

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DE RESPUESTA AGRONÓMICA DE LA ENMIENDA DEL  
SUELO CON POLÍMERO ACRILATO DE POTASIO DE ACCIÓN  
ALMACENADORA Y REGULADORA DE AGUA EN EL SUELO

por

Nicolás GIMÉNEZ

Adrián LAPAZ

Emily RILEY

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2016

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. PhD. Andrés Quincke

-----

Ing. Agr. PhD. Andrés Beretta

-----

Ing. Agr. Mag. Pablo Morales

Fecha: 29 de agosto de 2016

Autores: -----

Bach. Nicolás Giménez Nuñez

-----

Bach. Emily Riley Gervaz

-----

Bach. Adrián Marcelo Lapaz Olveira

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a nuestras familias por el apoyo incondicional brindado a lo largo de toda la carrera y nuestras vidas.

A nuestros amigos de facultad por acompañarnos en este trayecto.

A nuestro profesor tutor Andrés Quincke por darnos la oportunidad de realizar el presente trabajo.

A Andrés Beretta por su dedicación y gran aporte de conocimientos.

A todos los funcionarios del Laboratorio de Suelos y Aguas y del galpón de suelos de INIA La Estanzuela, por la permanente disposición que tuvieron a ayudarnos durante el trabajo de campo y por la buena actitud y el compañerismo que tuvieron con nosotros, en especial a Wilfredo Mesa y Lalo Vergara.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1. ANTECEDENTES SOBRE POLÍMEROS SÚPER-ABSORBENTES EN AGRICULTURA.....	3
2.1.1. <u>Polímeros súper-absorbentes</u> .....	3
2.1.2. <u>Estructura del gel de acrilato de potasio y acrilamida</u> .....	4
2.1.3. <u>Interacción del gel de acrilato de potasio y acrilamida con el medio                 ambiente</u> .....	5
2.1.3.1. Interacciones con sales.....	5
2.1.3.2. Retención de nutrientes .....	7
2.1.3.3. Degradación del polímero .....	8
2.1.3.4. Interacciones con los microorganismos .....	9
2.1.3.5. Antecedentes en la agricultura.....	9
2.1.4. <u>Características del gel Gelforest</u> .....	10
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AMBIENTES DE PRODUCCIÓN.....	11
2.2.1. <u>Condiciones atmosféricas</u> .....	11
2.2.1.1. Precipitaciones.....	11

2.2.1.2. Temperatura del aire .....	11
2.2.1.3. Humedad relativa del aire .....	12
2.2.1.4. Heliofanía real .....	12
2.2.2. <u>Régimen hídrico</u> .....	12
2.2.2.1. Evapotranspiración .....	12
2.2.2.2. Agua disponible en los suelos.....	13
2.3. CARACTERÍSTICAS ECOFISIOLÓGICAS DE LA SOJA .....	14
2.3.1. <u>Estados fisiológicos de la soja</u> .....	14
2.3.2. <u>Factores que afectan su crecimiento y desarrollo</u> .....	16
2.3.2.1. Temperatura.....	16
2.3.2.2. Fotoperíodo.....	16
2.3.2.3 Disponibilidad hídrica .....	17
2.4. HIPÓTESIS PRINCIPALES.....	19
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	20
3.1. SITIOS EXPERIMENTALES .....	20
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	21
3.3. APLICACIÓN DEL POLÍMERO .....	22
3.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO .....	23
3.5. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA VEGETAL.....	24
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	25
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	27
4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS EN LOS TRES SITIOS UTILIZADOS .....	27

4.2. RÉGIMEN DE LLUVIAS Y HUMEDAD DEL SUELO DURANTE EL PERÍODO DEL CULTIVO.....	27
4.3. DISPONIBILIDAD HÍDRICA DURANTE EL PERÍODO DEL CULTIVO..	32
4.3.1. <u>Agua disponible</u> .....	32
4.3.2. <u>Requerimientos hídricos del cultivo y agua disponible</u> .....	34
4.4. RENDIMIENTO .....	36
4.4.1. <u>Diferencias entre sitios</u> .....	37
4.4.2. <u>Efecto de la perforación</u> .....	38
4.4.3. <u>Efecto de la poliacrilamida</u> .....	38
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	42
6. <u>RESUMEN</u> .....	43
7. <u>SUMMARY</u> .....	44
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	45
9. <u>ANEXOS</u> .....	50

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Tratamientos .....	22
2. Características hidrológicas de los suelos .....	27
3. Prueba de hipótesis tipo III.....	36
4. Biomasa aérea promedio (materia seca) según dosis de gel aplicada, perforación y sitio.....	36
5. Biomasa aérea promedio según sitio.....	37

Figura No.	
1. Esquematación del proceso de hidratación de un SAP.....	4
2. Estructura de la cadena de acrilamida.....	5
3. Absorbencia de muestras típicas de SAPs de uso agrícola (S1 y S2) en agua desionizada y con agua de riego de varias salinidades.....	6
4. Esquema del ciclo ontogénico de soja. Cambios morfológicos, estado de los órganos reproductivos más avanzados de los nudos superiores del tallo principal y los períodos aproximados de diferenciación y aparición de órganos. ....	15
5. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) y media histórica para La Estanzuela (1965-2016). ....	28
6. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) para Tres Bocas y media histórica de Mercedes (1961-1990). ....	29
7. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) para Palmitas y media histórica de Mercedes (1961-1990). ....	30
8. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo y humedad volumétrica en los primeros 20 cm de perfil del suelo en los tres ensayos.....	31

9. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de La Estanzuela .....	32
10. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de Tres Bocas .....	33
11. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de Palmitas.....	34
12. % de agua disponible (AD) para los tres sitios.....	35
13. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de La Estanzuela.....	38
14. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de Tres Bocas .....	39
15. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de Palmitas ....	39

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

El polímero de acrilato de potasio y acrilamida tiene como propiedad retener agua dentro de su red y permitir su extracción por parte de la raíz de la planta. También es conocido (junto con otros compuestos) como polímero súper-absorbente (o SAP por las siglas en inglés de super absorbent polymer).

En virtud de estas propiedades, el SAP es un acondicionador de suelo cuyo efecto es aumentar la capacidad de almacenamiento del agua, y así aumentar la disponibilidad de agua para el cultivo e incrementar el aprovechamiento del agua de lluvia. Los SAPs han sido exitosamente utilizados en horticultura como enmiendas al suelo, para mejorar sus propiedades físicas, con el objetivo de aumentar la retención de agua y/o de nutrientes de los suelos arenosos, de forma de volverlos similares a suelos limo-arcillosos o arcillosos (Zohuriaan-Mehr et al., 2008). Según Riverflico (2015) en Uruguay ha tenido una adopción importante en el rubro de la forestación, usándose al momento de la plantación del monte para reducir la mortandad de plantines, y poder ampliar la "ventana" de plantación.

La principal causa de la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos estivales en nuestro país, es en muchos casos el déficit hídrico, el cual está en parte condicionado por la capacidad de almacenaje del suelo (Sawchik et al., 2005). Los SAPs pueden tener importantes beneficios dado los efectos antes mencionados sobre la dinámica del agua en el suelo.

El presente trabajo tiene como objetivo general contribuir al desarrollo del manejo agronómico del SAP para disminuir el estrés hídrico del cultivo de soja a través de la acumulación de agua disponible en el suelo.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo específico del presente estudio es evaluar la respuesta en acumulación de biomasa en el cultivo de soja en condiciones de campo, luego de aplicar el SAP "incorporado profundo" en distintas dosis en un experimento parcelario en tres sitios.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ANTECEDENTES SOBRE POLÍMEROS SÚPER-ABSORBENTES EN AGRICULTURA

#### 2.1.1. Polímeros súper-absorbentes

Desde el punto de vista de su estructura molecular, los SAPs son redes flexibles tridimensionales libremente entrecruzadas que contienen grupos iónicos funcionales disociados (Kiatkamjornwong, 2007). Los SAPs retienen el agua en una red creada por la expansión (termodinámicamente favorecida) de cadenas macromoleculares limitadas por enlaces entrecruzados. Dicha retención de agua ocurre ya sea por capilaridad dentro de los poros de la red y/o por hidratación de grupos funcionales (Zohuriaan-Mehr et al., 2008). En la figura No. 1 se presenta una esquematización del proceso:

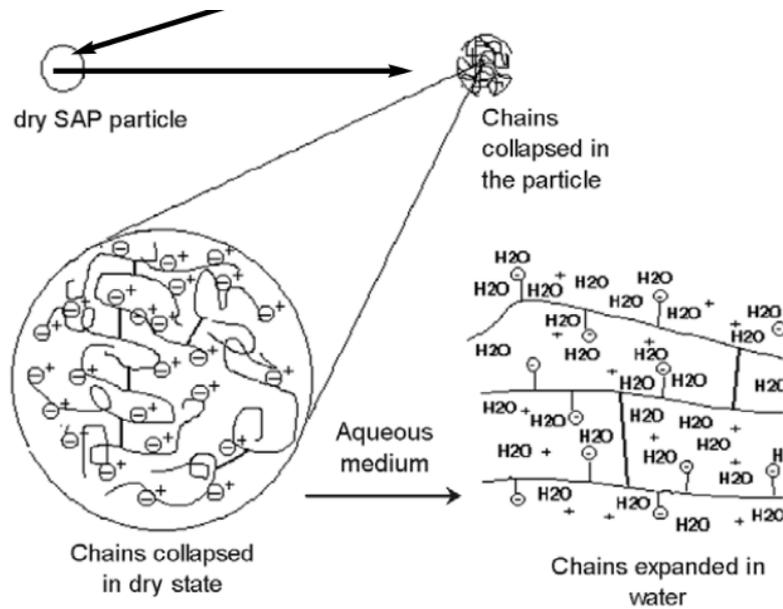


Figura No. 1. Esquematación del proceso de hidratación de un SAP.

Fuente: Zohuriaan-Mehr et al. (2008).

### 2.1.2. Estructura del gel de acrilato de potasio y acrilamida

El gel de acrilato de potasio y acrilamida se compone de copolímeros de enlaces entrecruzados de ácido acrílico (AA) y acrilamida, que son neutralizados con sal de potasio para dar un pH neutro (Viljoen, citado por Sita, 2002). La naturaleza hidrófila de los grupos carboxilo a lo largo de la cadena de acrilamida facilita la absorción de agua (figura No. 2), mientras que los enlaces entrecruzados provenientes del ácido acrílico evitan su total solubilización.

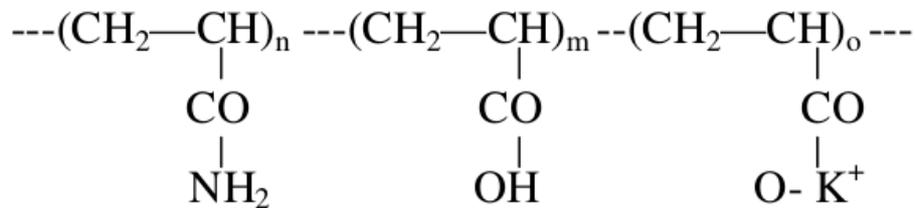


Figura No. 2. Estructura de la cadena de acrilamida.

Fuente: Delatorre et al. (1998).

En presencia de agua los grupos carboxilos se disocian parcialmente, liberando un átomo de hidrógeno y quedando con carga negativa. Este proceso genera un aumento de los grupos aniónicos en la cadena de acrilamida, los cuales se repelen entre sí aumentando el espacio entre ellos, el cual es ocupado por el agua (Stockhausen, citado por Messandri, 2005).

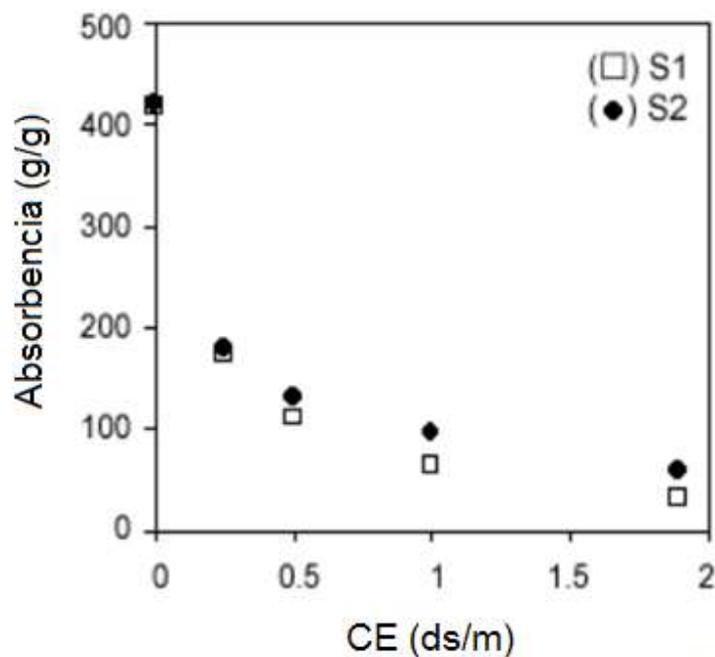
### 2.1.3. Interacción del gel de acrilato de potasio y acrilamida con el medio ambiente

#### 2.1.3.1. Interacciones con sales

Taylor y Halfacre, Lamont y O'Connell, citados por Ghebru et al. (s.f), Johnson (1984a), sostienen que la reducción o ausencia de efectos positivos en el agregado de hidrogeles se podría deber a la limitada hidratación de los mismos, ocasionado por las sales disueltas en el agua o por los fertilizantes. Según Wang y Gregg (1990) el grado de enlaces entrecruzados presentes en el gel determina el comportamiento de la poliacrilamida. A mayor grado de enlaces entrecruzados, menor capacidad absorbente pero mayor resistencia a los efectos de la salinidad del agua.

Los geles de poliacrilamida requieren entre 4 y 8 h para hidratarse totalmente en agua destilada, pero en el suelo demoran un tiempo mayor en hacerlo. La máxima absorción en agua destilada varía entre 57 g y 400 g de

agua por gramo de material, pero retiene menos agua en presencia de iones metálicos o fertilizantes, y son las sustancias que liberan hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) las más perjudiciales (Wang y Gregg, 1990). En caso de fertilizaciones con  $\text{Fe}^{+2}$  lo recomendado para mantener la capacidad de retención de la poliacrilamida sería utilizar fuentes que formen quelatos (James y Richards, 1986). En la figura No. 3 se ilustran las diferentes capacidades de absorción de muestras típicas de SAPs de uso agrícola (S1 y S2) hidratados con agua desionizada y con agua de riego de distinta salinidad y conductividad eléctrica (CE).



CE: conductividad eléctrica del agua.

Figura No. 3. Absorbancia de muestras típicas de SAPs de uso agrícola (S1 y S2) en agua desionizada y con agua de riego de varias salinidades.

Fuente: Zohuriaan-Mehr et al. (2008).

Según Bowman et al. (1990) la reducción en la absorción de agua causada por iones monovalentes es totalmente reversible al sumergir el hidrogel en agua desionizada, pero el efecto causado por iones bivalentes es irreversible. Este efecto generalizado de disrupción de geles debido a cationes indicaría que los cationes multivalentes desalojan y reemplazan el agua, sobre y dentro de los sitios polarizados del polímero (James y Richards, 1986). El uso

de nitrato de potasio haría parcialmente reversible los efectos causados por el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) sobre el gel (Bowman y Evans, 1991).

#### 2.1.3.2. Retención de nutrientes

La capacidad del polímero de formar quelatos con iones de carga positiva permitiría disminuir la pérdida de los mismos por lixiviación y/o erosión (Qu y de Varennes, 2009). Además, varios autores destacan la capacidad del polímero para reducir la erosión al mejorar la agregación del suelo (Sojka et al. 2006, Entry et al. 2007, Caesar-TonThat et al. 2008, Wu et al. 2012, Li y Wang 2014, Jiang et al. 2015).

Jiang et al. (2010) experimentaron con parcelas de un suelo Regosol Éutrico (taxonomía FAO) de 21 m de largo, 5 m de ancho y 27 % de pendiente en las que agregaron  $3,9 \text{ kg ha}^{-1}$  de poliacrilamida. Los autores constataron una reducción significativa de las pérdidas de fósforo (P) causadas por escurrimiento superficial en la parcela con poliacrilamida con respecto al testigo. En la misma investigación, los autores realizaron otro experimento consistente en columnas de suelo de 20 cm de profundidad mezcladas con diferentes cantidades de poliacrilamida en las que se estudió la lixiviación del P. En este estudio se constató una reducción significativa de las pérdidas por lixiviación en el tratamiento de 0,02 % de poliacrilamida en suelo (masa/masa) con respecto al testigo.

En cuanto a la interacción de la poliacrilamida con el nitrógeno, varios autores (Ghebru et al. s.f., Bres y Weston 1993, Li y Wang 2014) señalan que el mismo contribuye a retener el nitrógeno en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), pero no cuando está presente en forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

Henderson y Hensley, citados por Bres y Weston (1993) estudiaron la retención de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  en un medio de arena enmendado con poliacrilamida. En el estudio observaron que entre el 40 y el 80 % del  $\text{NH}_4^+$  era retenido cuando éste era agregado en un sustrato saturado de agua. Por otra parte, la retención aumentaba a más de un 80 % cuando era agregado en un sustrato seco. El  $\text{NO}_3^-$ , en contraste, fue lixiviado rápidamente en ambos casos.

Li y Wang (2014) hicieron un experimento con pequeñas parcelas de 60 cm de largo, 30 cm de ancho y 15 cm de profundidad, con lluvia artificial y diferentes cantidades de poliacrilamida incorporada, así como diferentes

pendientes. Los autores constataron una reducción de la pérdida de potasio ( $K^+$ ) y  $NH_4^+$ , no existiendo efecto sobre el  $NO_3^-$ .

Ghebru et al. (s.f.) estudiaron la dinámica del  $NO_3^-$  y el  $NH_4^+$  en un sustrato de trozos de corteza de pino. En el experimento colocaron 2 g de  $NO_3^-$  y de  $NH_4^+$  en recipientes con 500 g de trozos de corteza de pino que contenían poliacrilamida en dosis de 0, 1 ó 2  $kg\ m^{-3}$ . Un litro de agua destilada fue vertido luego y colectado en la base de los recipientes para medir concentración de  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$ . El  $NH_4^+$  fue retenido en mayor cantidad en presencia del hidrogel que en el testigo (41 % de retención para el testigo, 68 % para la dosis de 1 g y 82 % para la dosis de 2 g). No hubo diferencias significativas para la absorción de  $NO_3^-$ . Resultados similares obtuvieron Bres y Weston (1993) al trabajar con dos marcas comerciales distintas de poliacrilamida. Estos autores encontraron que para ambas marcas comerciales la retención de  $NH_4^+$  en el suelo aumentaba con el agregado del gel, mientras que la de  $NO_3^-$  no era afectada. Esta diferencia podría estar relacionada al potencial de carga negativo o a la capacidad de intercambio catiónico de gel, según los autores.

#### 2.1.3.3. Degradación del polímero

Aunque las poliacrilamidas no son biodegradables, sí se degradan por la luz, la planta y la ruptura mecánica causada por el laboreo (Azzam, citado por Sita, 2002). Al-Hahí et al., citados por Messandri (2005) confirmaron que la poliacrilamida pierde efectividad con el paso del tiempo. Luego de dos años de experimentos sucesivos sobre un recipiente que contenía un suelo arenoso y poliacrilamida en el que se cultivaba pepino (*Cucumis sativus*), dichos autores constataron un aumento de la densidad del suelo y una disminución de su capacidad de retención de agua.

Entry et al. (2007) estimaron la tasa de degradación de la poliacrilamida aniónica en el suelo mediante el uso isótopos de carbono ( $^{13}C$ ) y nitrógeno ( $^{15}N$ ). Los valores de  $^{13}C$  fueron positivamente relacionados con la tasa de degradación de la poliacrilamida en una forma curvilínea en un suelo de sedimento arcilloso Portneuf de Idaho (Durinodic Xeric Haplocalcid, taxonomía USDA). Cuando la degradación de la poliacrilamida fue basada en la variación del  $^{13}C$ , encontraron que la misma era de un 9,8 % al año.

#### 2.1.3.4. Interacciones con los microorganismos

Sojka et al. (2006) midieron los niveles de biomasa bacteriana y fúngica, así como la diversidad microbiológica en suelos con grandes cantidades de poliacrilamida (0, 2691 y 5382 kg ha<sup>-1</sup>). Los autores constataron reducciones de la biomasa bacteriana de 20-30 % y biomasa fúngica de 30-50 %, con respecto al testigo. Los autores sostienen que aunque la aplicación de poliacrilamida al suelo o al agua de riego puede reducir en algunos casos la biomasa bacteriana y fúngica activa, esto parecería no afectar apreciablemente el potencial metabólico microbiano del suelo.

Para esta revisión bibliográfica sólo se encontró un estudio publicado (Caesar-TonThat et al., 2008) en el que el agregado de poliacrilamida al suelo favoreció el crecimiento y sobrevivencia, de algunos hongos y bacterias, habiéndose realizado en condiciones in vitro.

#### 2.1.3.5. Antecedentes en la agricultura

Los polímeros súper-absorbentes pueden mejorar el crecimiento vegetal principalmente mediante tres procesos (Qu y De Verennes, 2009):

- I. Aumentando el abastecimiento de los nutrientes en formas catiónicas presentes como contraiones del polímero
- II. Aumentando la capacidad del suelo de almacenar agua y mejorando el abastecimiento para las plantas
- III. Disminuyendo la biodisponibilidad de metales tóxicos debido a quelatización y a uniones iónicas.

Navroski et al. (2014) evaluaron el efecto del uso de poliacrilamida en mudas de *Eucalyptus dunnii* en macetas y determinaron que el uso del polímero permitía un mayor intervalo de riego.

Savé et al. (1995) trabajaron con plantines de *Pinus pinea* bajo condiciones de invernáculo a los cuales agregaron 200 y 400 cm<sup>3</sup> de agua en forma de gel de poliacrilamida en agujeros dispuestos en una cuadrícula de 30 x 30 x 30 cm. Luego constataron un aumento en el período de supervivencia de las mudas 1,4 y 2 veces en comparación con el testigo, para las dosis de 200 y 400 cm<sup>3</sup> respectivamente.

Azevedo (2002), estudió el efecto en la altura y la cantidad de materia seca de mudas de café (*Coffea arabica*) sembradas sobre un sustrato enmendado con cuatro cantidades distintas de poliacrilamida y con cuatro frecuencias distintas de irrigación. El autor concluyó que la materia seca y la altura de las plantas aumentaron con el agregado de poliacrilamida, también se pudo disminuir la frecuencia de riego en presencia del polímero.

Gales et al. (2013), estudiaron los efectos en el rendimiento de soja y maíz, de la incorporación de distintas dosis de hidrogel en un molisol en la planicie de Moldavia. Los autores constataron un aumento del rendimiento en grano (base seca) de un 27 % para el maíz y un 33 % para la soja, con respecto a los testigos, cuando la dosis era de 30 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida.

#### 2.1.4. Características del gel Gelforest

Según Riverflico (2015) en Uruguay dicho producto es utilizado tanto en viveros para bandejas de plantación, macetas, trasplante a raíz desnuda y plantines, como en empresas forestales para el trasplante de plantines forestales.

Riverflico (2015) indica que un gramo de Gelforest es capaz de absorber entre 250 y 400 g de agua en la rehidratación, si la misma es proveniente de fuentes de agua dulce. También consigna que el gel es capaz de permanecer activo durante cuatro años luego de insertado, se caracteriza por ser no tóxico y biodegradable.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS AMBIENTES DE PRODUCCIÓN

### 2.2.1. Condiciones atmosféricas

#### 2.2.1.1. Precipitaciones

Según Castaño et al. (2011) la precipitación acumulada anual promedio es de 1200 mm para el suroeste (departamento de Colonia) y 1600 mm en el noreste (departamentos de Artigas y Rivera), los autores también determinaron que no hay una estación seca o lluviosa característica, no obstante, existe un pequeño gradiente este-oeste en invierno y sur-norte en verano-otoño, teniendo una variación de entre 60 mm/mes (litoral oeste en invierno) y 140 mm/mes (noreste en abril y octubre).

Debe destacarse la existencia de una gran variabilidad interanual. Castaño et al. (2011), en una serie con registros de precipitaciones medias acumuladas mensuales para 30 años, registraron valores mínimos menores a 20 mm/mes para julio y máximos superiores a los 250 mm/mes en todos los meses del año. Para los 10 años menos lluviosos las precipitaciones fueron inferiores a 60-80 mm/mes, y en los 10 años más lluviosos las mismas fueron mayores a 120-160 mm/mes.

#### 2.2.1.2. Temperatura del aire

Según Castaño et al. (2011) la temperatura del aire media anual del Uruguay es de 17,7 °C, y varía entre 19,8 °C para el noroeste (Bella Unión) y 16,6 °C para la costa Sur. En los meses de enero y febrero se producen las temperaturas más altas, siendo enero el mes más cálido con un promedio de temperatura de 24 °C con variaciones de 29,6 °C a 18,5 °C. Las máximas temperaturas extremas se ubican en la región noroeste (departamentos de Artigas, Salto y Paysandú) durante dichos meses.

#### 2.2.1.3. Humedad relativa del aire

La humedad relativa media anual del Uruguay se sitúa entre 70 % y 78 %, existiendo un gradiente ascendente desde el noroeste sureste (Castaño et al., 2011). Hay variación en el transcurso del año, con valores mínimos en verano (65 %-75 %), siendo el mes de enero el más seco.

#### 2.2.1.4. Heliofanía real

La heliofanía real (insolación) media de Uruguay es de 7 h diarias con una distribución espacial relativamente homogénea, aunque los valores medios anuales en el noreste tienden a ser mayores por tener una menor nubosidad y humedad relativa media, además de tener una insolación astronómica mayor por estar en una latitud menor del país. Interanualmente la variabilidad es baja, siendo durante el verano mayor y menor en el invierno (Castaño et al., 2011).

### 2.2.2. Régimen hídrico

El régimen hídrico se determina a partir del balance hídrico del suelo, donde el mes de enero presenta las mayores deficiencias y junio los máximos excesos (Castaño et al., 2011).

#### 2.2.2.1. Evapotranspiración

Durante las primeras etapas del ciclo del cultivo las pérdidas de agua son principalmente por el proceso de evaporación. Luego de desarrollado el cultivo, cuando éste cubre la superficie total del suelo, domina la transpiración. La unidad que expresa esta variable son los milímetros por

unidad de tiempo, donde  $1 \text{ mm día}^{-1}$  es equivalente  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración promedio acumulada anual oscila entre 1000 mm y 1200 mm para el país, con un gradiente creciente de sureste a noroeste. Existe una variación estacional donde los máximos valores están en verano con un rango de 160-185  $\text{mm mes}^{-1}$  (Castaño et al., 2011).

En cuanto a la variabilidad interanual, esta es baja, siendo mayor en la estación de verano con diferencias de 40 a 50 mm en los extremos (Castaño et al., 2011).

#### 2.2.2.2. Agua disponible en los suelos

Según Allen et al. (2006) el agua disponible (AD) del suelo es la capacidad que tiene un suelo para retener agua que sea disponible para el cultivo, a su vez, la cantidad de AD que hay en un momento dado en el suelo se puede expresar como porcentaje (PAD). No toda el agua disponible es fácilmente disponible para las plantas, sino que la magnitud con la cual se realiza la extracción de agua varía según el tipo de suelo y la profundidad radicular. Los aumentos en la extracción de agua por las plantas causan que el agua remanente sea retenida con más fuerza por las partículas del suelo, si continúa aumentando la absorción, cada vez más difícil será consumir agua por el cultivo hasta llegar a un nivel en el cual no se extrae más agua remanente, el cual se conoce como punto de marchitez permanente (PMP), donde las plantas se marchitan permanentemente. La capacidad de campo (CC) es la cantidad de agua del suelo que queda luego de que este haya sido saturado con la misma y haya drenado libremente entre 24 a 72 h. Si el suelo es de textura pesada, mayor es la demora para alcanzar la capacidad de campo (García Petillo et al., 2013).

Según Molfino y Califra (2001) los suelos del Uruguay presentan una alta variabilidad en la capacidad de almacenar agua, donde hay zonas con suelos superficiales que tienen una capacidad de almacenaje menor a 40 mm, mientras que algunos suelos profundos tienen capacidades de almacenaje superiores a los 160 mm.

Partiendo del análisis para el período de 1989-2009 Castaño et al. (2011) observaron el comportamiento hídrico estacional del porcentaje de agua disponible (PAD), la cual da una noción del estado de los suelos en función de

su capacidad de almacenaje. Del período analizado, el comportamiento hídrico estacional se caracteriza por tener menores valores de PAD desde que inicia la primavera hasta principios de otoño, donde los mínimos son en el mes de enero con valores inferiores al 50 %. Durante dicho período estacional la evapotranspiración es mayor a las precipitaciones lo que da como resultado que los valores de PAD en el verano sean bajos. Hay umbrales críticos aproximados de PAD para cultivos extensivos y pasturas, con valores de 40-50 % y 30-40 % respectivamente, lo que determina que en el mes de enero se alcance valores de humedad por debajo del umbral crítico para cultivos extensivos (Castaño et al., 2011).

En una serie de 24 años (1985-2009), para el PAD, existe una variabilidad interanual significativa, que puede ser explicada por las variaciones de precipitaciones entre años, donde la máxima variación de PAD se da entre veranos y la mínima entre inviernos. Para el verano, los 8 años con mayor PAD son superiores a 40-50 % y los 8 años de menor PAD son inferiores a 30-40 %. Si se consideran 2 a 3 años con mayores deficiencias, los valores de PAD son menores a 20-30 % (Castaño et al., 2011).

## 2.3. CARACTERÍSTICAS ECOFISIOLÓGICAS DE LA SOJA

### 2.3.1. Estados fisiológicos de la soja

La escala más utilizada para la determinación de la evolución de los distintos estadios fisiológicos de la soja es la de Fehr y Caviness (1977), en ella se distinguen dos etapas, el estado vegetativo identificado con la letra V y el estado reproductivo con una letra R. El estado vegetativo comprende la emergencia (VE), la etapa cotiledonar (VC) y el desarrollo nodal (Vn), y el estado reproductivo, que abarca desde la aparición de una flor abierta en cualquier nudo del tallo principal (R1) a madurez fisiológica (R8) (Toledo, 2012).

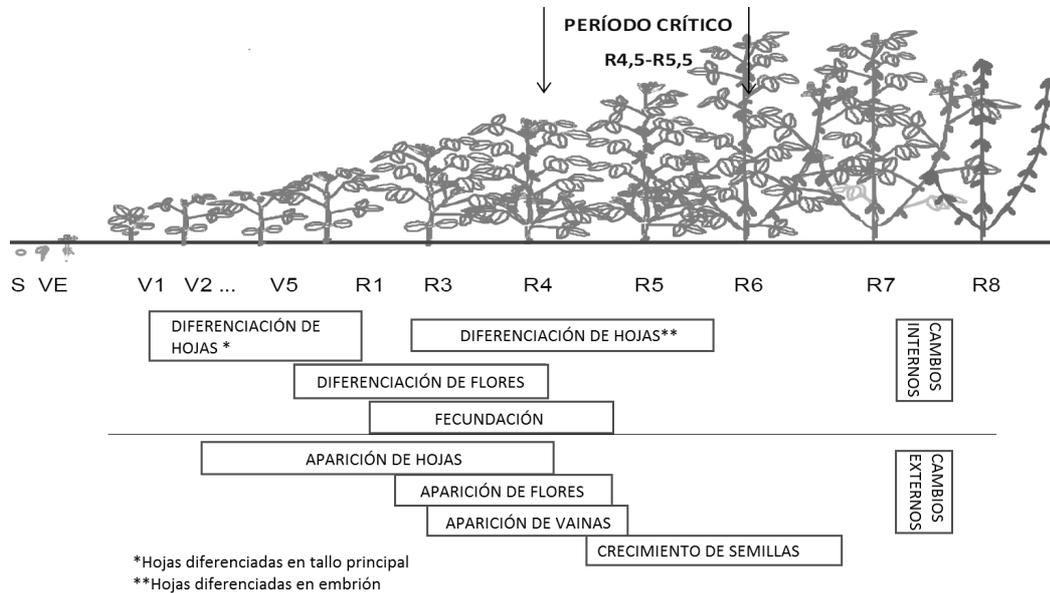


Figura No. 4. Esquema del ciclo ontogénico de soja. Cambios morfológicos, estado de los órganos reproductivos más avanzados de los nudos superiores del tallo principal y los períodos aproximados de diferenciación y aparición de órganos.

Fuente: Kantolic et al. (2004).

El estado reproductivo comienza con el inicio de la floración (R1) que es controlado por factores internos (genotipo) y externos a la planta que son fotoperíodo y temperatura (Andrade et al., 2000). En el estadio R2 se inicia la acumulación diaria y constante de materia seca y nutrientes que continuará hasta poco después de R6 (Andrade et al., 2000). Entre R3,1 y R4,5 se intercepta el 95 % de la radiación solar incidente en donde se alcanza el IAF crítico (Toledo, 2015).

En R4 comienza el período crítico (PC) de la producción de rendimiento en grano, donde cualquier situación de estrés producida hacia la planta repercutirá en su rendimiento. El período más crítico se encuentra en el estadio R4,5 a R5,5, donde la floración ya terminó y las vainas y semillas jóvenes tienden a abortar cuando hay estrés. El ritmo de envejecimiento de la planta entre R1 y R5, repercutirá en su capacidad de compensar las pérdidas (crecimiento compensatorio). En la etapa R5 es deseable haber logrado

alcanzar IAF crítico, debido que en este período se está determinando el desarrollo del número de granos (Toledo, 2005).

### 2.3.2. Factores que afectan su crecimiento y desarrollo

La duración de las fases de desarrollo del cultivo es regulada por la temperatura y el fotoperíodo. Los mismos actúan en forma simultánea en las plantas y existen evidencias de interacción entre ambos factores (Kantolic et al., 2004).

#### 2.3.2.1. Temperatura

La temperatura base durante el período de crecimiento vegetativo del cultivo es de 6 a 10 °C (Wilkerson et al., Brown, Hesketh et al., citados por Andrade et al., 2000). El rango óptimo de temperaturas para el desarrollo normal vegetativo y reproductivo del cultivo es entre los 25 °C y 30 °C (Toledo, 2012).

#### 2.3.2.2. Fotoperíodo

La soja se la clasifica por su respuesta cuantitativa al fotoperíodo como de día corto, lo que significa que la etapa emergencia-floración modifica su longitud según el fotoperíodo (Toledo, 2012). La soja tiene una fase juvenil o preinductiva que va desde la emergencia hasta la primera hoja verdadera (estadio V1) durante la cual las plántulas son incapaces de percibir el estímulo del fotoperíodo. A partir de este estadio, dependiendo del genotipo, la planta va adquiriendo sensibilidad al fotoperíodo, el cual induce la transformación de sus meristemas vegetativos en reproductivos (Rodríguez et al., 2001).

### 2.3.2.3 Disponibilidad hídrica

El consumo de agua en cultivos de secano depende factores ambientales como la demanda atmosférica y las precipitaciones, además de factores del propio cultivo como la duración del ciclo, el desarrollo radicular y del área foliar (Toledo, 2012).

La eficiencia de uso del agua (EUA) es la relación entre la cantidad de materia seca total o grano por unidad de recurso captado (Farlo, 2011). Para la soja se registran valores entre  $5\text{-}6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  y  $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (Della Maggiora et al., 2000), por los que se considera una EUA promedio de  $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . En las primeras etapas de desarrollo del cultivo el consumo de agua es el mínimo (aproximadamente de  $1 \text{ mm dia}^{-1}$ ), éste se incrementa a partir de R1 y en R5 presenta el máximo consumo (promedio de  $8 \text{ mm dia}^{-1}$ ), luego en la madurez del cultivo se reduce (Toledo, 2012).

Giménez (2014) estudió el efecto sobre el rendimiento en grano de deficiencias hídricas en distintos períodos de un cultivo de soja, sembrado en un Brunosol sub-éutrico típico de la unidad San Manuel (departamento de Paysandú, Uruguay). En este estudio determinó que las deficiencias hídricas durante el PC (R4-R6), son las que ocasionan pérdidas de rendimiento más importantes, que varían entre 44 % y 50 %. Mundialmente se ha determinado que del total de agua disponible en el suelo (AD), tan sólo el 50 % es extraíble fácilmente por las plantas, el restante se considera extraíble bajo estrés hídrico para la planta, el cual es cada vez mayor a medida que disminuye la cantidad de agua en el suelo (Adriani, 2002). En tal sentido Giménez (2014) determinó que un 60 % o más de AD presente durante el PC sería suficiente para el “bienestar hídrico” de la soja, disminuyendo a un 40 % de AD presente durante el período no crítico.

En soja, el sistema radicular está constituido por una raíz primaria y raíces secundarias que son numerosas, y se encuentran a 10-15 cm a partir del cuello de la planta. La raíz primaria deja de crecer poco después de la germinación, por lo que las raíces secundarias son las encargadas de realizar la exploración de nuevas zonas del suelo. Los mayores niveles de crecimiento de raíz se producen luego de R1. A partir de allí se maximiza la eficiencia de absorción (Venturi y Amaducci, citados por Andrade et al., 2000).

La fecha de siembra es el factor de manejo a tener en cuenta cuando el régimen hídrico y el térmico presentan desvíos importantes con respecto a su situación promedio, debido a que si no se toma en consideración,

puede modificar el patrón de desarrollo de los cultivares. Períodos prolongados de estrés hídrico en etapas avanzadas de llenado de grano, reducen la longitud del ciclo de los cultivares hasta en 20 días. Por el contrario, hay un incremento en la longitud del ciclo si se produce estrés hídrico a inicio de floración. En etapas reproductivas tardías del ciclo del cultivo hay efectos aditivos entre el estrés hídrico y altas temperatura, lo cual provoca una reducción del ciclo. Por otro lado, durante todo el ciclo del cultivo, hay un alargamiento del mismo si hay alta disponibilidad hídrica y bajas temperatura (Baigorri, 2011).

El número de nudos en el tallo principal se mantiene estable ante la ocurrencia de algún cambio ambiental que restrinja la tasa de crecimiento de las plantas. No obstante, en pos floración o ante aumentos en la densidad de siembra, la supervivencia y el crecimiento de los nudos de las ramas sí son fuertemente resentidos frente a deficiencias nutricionales e hídricas (Kantolic et al., 2004).

A modo de síntesis, Andriani (2002) divide al ciclo de la planta según el momento de ocurrencia del estrés y la respuesta diferencial durante el mismo, en tres períodos:

- a) De VE a R1: el rendimiento no sería afectado si se produce un estrés hídrico de mediana intensidad (40-50 % de agua útil), pero sí se puede afectar el crecimiento en altura de la planta y su área foliar. Estrés hídricos de mayor intensidad (20-40 % de agua útil presente) podrían ocasionar reducciones del 10 % del rendimiento.
- b) De R1 a R5: la ocurrencia de estrés hídrico puede reducir un 20 % o más el rendimiento, por consecuencia del aborto de flores y vainas. Puede haber cierta compensación con el peso del grano, si cesan las deficiencias hídricas luego de R5. Para evitar dichas pérdidas sería necesario que el contenido de agua en el suelo durante este período no sea menor a 50 % de agua útil.
- c) De R5-R7: este es el período más crítico debido a que el estrés hídrico provoca reducciones en el rendimiento del cultivo del 40 % o más, dado que afecta de forma conjunta el número de vainas, el número de granos por vainas y el peso de los granos, sin que haya posibilidad de compensación. Se aconseja tener un valor superior al 60 % del agua útil en el suelo.

## 2.4. HIPÓTESIS PRINCIPALES

La incorporación de SAP en el suelo contribuye a aumentar la retención de agua en el perfil y por tanto puede atenuar la severidad del estrés del cultivo durante períodos de déficit hídrico, lo cual resultaría en un mayor crecimiento del cultivo y mayor rendimiento en grano. La respuesta del cultivo depende de la dosis de gel que se aplica.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. SITIOS EXPERIMENTALES

Se usaron tres sitios experimentales durante el año agrícola 2014-2015, ubicados en el litoral sur de Uruguay: La Estanzuela, departamento de Colonia (34°20'35.18"S 57°43'22.50"O); Palmitas, de departamento de Soriano (33°25'48.87"S 57°48'31.69"O) y Tres Bocas, departamento de Río Negro (32°45'54.64"S 57°54'35.08"). Según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DSF. DSA, 1976) el sitio de La Estanzuela corresponde a un Brunosol éutrico típico franco-arcillo-limoso, perteneciente a la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas; el de Palmitas a un Brunosol sub-éutrico Lúvico arenoso, perteneciente a la unidad Cuchilla Corralito; y el de Tres Bocas a un Brunosol éutrico areno-arcilloso Típico, de la unidad Tres Bocas. Todos los sitios tenían una pendiente moderada (2 % a 4 %).

En los tres sitios se sembró soja (grupo de madurez medio) durante la primera quincena de noviembre, mediante siembra directa, en hileras separadas a 38 cm y con una distancia entre plantas de 20 cm. El manejo de la fertilización en los tres sitios fue para fósforo y potasio, quedando por encima de los niveles críticos requeridos por el cultivo. Para La Estanzuela también se realizó una aplicación starter de nitrógeno. No se constataron deficiencias de micronutrientes. No existieron limitantes perceptibles por malezas, plagas o enfermedades ya que estas fueron manejadas adecuadamente. A continuación se enlista las labores realizadas en los tres sitios:

- La Estanzuela

Se partió de una avena como cultivo antecesor, a la cual se le aplicó 3 L ha<sup>-1</sup> de glifosato el 19 de setiembre.

El 6 de noviembre se hizo una segunda aplicación presiembra con glifosato (3 L ha<sup>-1</sup>) en mezcla con Dual (1,6 L ha<sup>-1</sup>).

La siembra de la soja se realizó el 12 de noviembre, lográndose una densidad de 45-47 plantas/m<sup>2</sup>, junto con una fertilización con 70-80 kg ha<sup>-1</sup> de 7-40/40-0 + 5S + 8Ca).

El 23 de enero del 2015 se aplicó insecticida Upercut 200 cc ha<sup>-1</sup>.

- Tres Bocas

El cultivo antecesor fue avena, el 20 de agosto se realizó la primera aplicación de herbicida (Gliserb Sun 3.5 L ha<sup>-1</sup> + 2-4 D Amina 1.5 L ha<sup>-1</sup> + Banvel 250 cc ha<sup>-1</sup> + Dusilan 100 cc ha<sup>-1</sup>).

El 8 de noviembre se aplicó herbicida presiembra (gliserb G plus 2.5 kg ha<sup>-1</sup> + imazetapir 140 g ha<sup>-1</sup> + potent K 50 cc ha<sup>-1</sup>).

El 20 de noviembre se sembró y fertilizó con 200 kg ha<sup>-1</sup> de 0-33/34-0 y 150 kg ha<sup>-1</sup> de cloruro de potasio, se logró una densidad de 47 plantas/m<sup>2</sup>.

El 17 de diciembre se aplica Gliserb G Plus 2.5 kg ha<sup>-1</sup> + Insecticida (triflumuron 100 cc ha<sup>-1</sup> + potent K 50 cc ha<sup>-1</sup>).

El 23 de febrero se aplicó Rhino 14 g ha<sup>-1</sup> + Uppercut 250 cc ha<sup>-1</sup> + aceite 1 L ha<sup>-1</sup> + tebusole 75 WG 200 g ha<sup>-1</sup>.

- Palmitas

El 25 de julio se aplicó 1,2 L ha<sup>-1</sup> de 2-4D amina + 200 cc ha<sup>-1</sup> de clopiralid.

El 18 de setiembre se aplicó 2,8 kg ha<sup>-1</sup> de glifosato.

La siembra se realizó el 10 de noviembre sobre un campo reestablecido, aplicándose glifosato 3 L ha<sup>-1</sup> + 30 g ha<sup>-1</sup> de diclosulam. Se logró una densidad de 47 plantas/m<sup>2</sup>. También hizo una fertilización con 80 kg ha<sup>-1</sup> de K y se corrigió P a 16 ppm.

El 11 de diciembre se aplicaron 2 kg ha<sup>-1</sup> de glifosato sal amónica 75 % y de insecticida (150 cc ha<sup>-1</sup> de triflumuron).

El 26 de enero se aplicaron insecticidas (100 cc ha<sup>-1</sup> de triflumurón + 800 cc ha<sup>-1</sup> de clorpirifos).

El 23 de febrero se aplicaron insecticidas (250 cc ha<sup>-1</sup> de tiametoxan + lambdacialotrina) y fungicidas (trifloxisotrobina + ciproconazol 150 cc ha<sup>-1</sup>).

### 3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

En cada sitio se diseñó un experimento de 4 bloques completos al azar, con 5 tratamientos diferentes, de los cuales 3 fueron distintas dosis de poliacrilamida aplicada en orificios en el suelo, y dos testigos (uno con orificios y otro sin ninguna perturbación). Se hicieron dos testigos dado que los orificios crean un disturbio en el suelo que podría tener un efecto en el microambiente del mismo, generando diferencias en el crecimiento del cultivo. De esta manera se intentó diferenciar la respuesta del cultivo a la poliacrilamida de la respuesta a un efecto combinado de ésta y el disturbio del calador. Cada unidad

experimental tuvo un ancho de 3,04 m (8 hileras de plantas, con una distancia entre hileras de 38 cm) y un largo de 3 m. El tamaño total de cada experimento fue de 15,2 m x 12 m (5 tratamientos/bloque y 4 bloques). Las dosis utilizadas en los 4 tratamientos con orificios fueron de 0, 20, 40 y 60 kg ha<sup>-1</sup>. Si se considera la máxima capacidad de absorber agua del polímero (400 g de agua por g de polímero) la poliacrilamida agregada tendría una capacidad de absorción de agua de entre 8.000 y 24.000 L ha<sup>-1</sup>, dependiendo de la dosis. Los 5 tratamientos resultantes están resumidos en el cuadro No. 1.

Cuadro No. 1. Tratamientos

No. de tratamiento	Dosis PAM (kg ha <sup>-1</sup> )	Dosis PAM (g/m <sup>2</sup> )	Dosis GE (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Dosis GE/orificio (cm <sup>3</sup> )	Orificios	Máx. abs. de agua (L ha <sup>-1</sup> )	Máx. abs. de agua (mm ha <sup>-1</sup> )
1	0	0	0	0	Sí	0	0
2	20	2	250	10	Sí	8.000	0,8
3	40	4	500	20	Sí	16.000	1,6
4	60	6	750	30	Sí	24.000	2,4
5	0	0	0	0	No	0	0

GE: gel hidratado en proporción gel:agua (masa/masa) de 1:125, PAM: poliacrilamida, Máx. Abs.: máxima capacidad de absorción de agua de la poliacrilamida aplicada.

### 3.3. APLICACIÓN DEL POLÍMERO

La poliacrilamida se aplicó durante el mes de diciembre en distintas fechas según sitio. Se comenzó por La Estanzuela desde el 3 hasta el 6, encontrándose el cultivo en estadio V2, luego Tres Bocas del 15 al 17, durante el estadio V3 y por último Palmitas del 22 al 23 de diciembre, encontrándose el cultivo en el estadio V4.

La poliacrilamida fue hidratada con agua desionizada en una relación poliacrilamida:agua (masa/masa) de 1:125. El gel resultante fue inyectado mediante una jeringa y una manguera de 30 cm conectada a ésta en orificios realizados a una densidad de 26 orificios/m<sup>2</sup>. Los orificios fueron hechos con calador manual. Se utilizaron cordón y estacas, en cada parcela se trazó una cuadrícula de 19 cm x 21 cm, en cuyas intersecciones se insertó el calador a una profundidad de 20 cm. Dichos orificios tenían un diámetro de 2 cm y una inclinación aproximada 60-70° con respecto al suelo, todos paralelos entre sí. Luego de la aplicación de la dosis correspondiente de gel de poliacrilamida en cada orificio, éstos fueron obstruidos nuevamente con suelo.

### 3.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Para llevar un seguimiento del contenido de agua en el suelo, se tomaron semanalmente (durante enero y febrero) muestras de suelo en las cuales se midió humedad. En cada muestreo, se obtuvieron 20 muestras alrededor del ensayo (entre 1 y 2 m de distancia de éste) para no perturbar el experimento. Las muestras fueron tomadas con calador, obteniéndose cilindros de 1,98 cm de diámetro y 20 cm de profundidad, los cuales se subdividieron en dos muestras (de 0 cm a 10 cm y de 10 cm a 20 cm). Luego las muestras de suelo se llevaron en bolsas herméticamente cerradas al laboratorio, donde el suelo se homogeneizó manualmente para luego extraer una submuestra de 50 g. Estas muestras se colocaron en una estufa a 105 °C durante 48 h y luego se volvieron a pesar. La diferencia de peso entre la muestra fresca y seca, dividido el peso de la muestra seca, es el contenido de agua gravimétrico del suelo o humedad en peso ( $\square$ ).

Para determinar la densidad aparente ( $D_{ap}$ ) se usó el calador común de suelos procurando evitar que el suelo se comprimiera durante el procedimiento de insertar el calador en éste. La abertura del calador permitió controlar visualmente que esto no ocurra. Para cada profundidad de muestreo (0-10 y 10-20 cm) se obtuvieron cuatro muestras compuestas de 15 tomas cada una. La masa de suelo de cada muestra fue determinada luego de 48 h de secado en estufa a 105 °C.

La capacidad de campo de los suelos ( $\theta_{CC}$ ) fue tomada como igual a la humedad obtenida en el suelo luego de 24 h de una lluvia que hubiera saturado los primeros 20 cm del suelo. Para el sitio de Tres Bocas dicha humedad corresponde al mayor valor de humedad registrado, mientras que para los sitios de Palmitas y La Estanzuela corresponde al segundo mayor valor, dado que los mayores valores habían resultado de mediciones durante lluvias o a menos de 24 h de su ocurrencia.

Finalmente, a partir de la  $\theta_{CC}$ , la Dap y la  $\square$ , se determinó el  $\theta_{AD}$  mediante las siguientes fórmulas:

$$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \square \times \text{Dap} \quad (1)$$

$$\text{PMP (\% ps)} = \square \times 0,74 - 5 \text{ (Silva et al., 1988)} \quad (2)$$

$$\theta_{AD} \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \theta - \text{PMP (\% ps)} * \text{Dap} \quad (3)$$

$$\text{cap. } \theta_{AD} \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = \theta_{CC} - \text{PMP (\% ps)} * \text{Dap} \quad (4)$$

$$\text{AD \%} = \theta_{AD \text{ act.}} / \text{cap. } \theta_{AD} \times 100 \quad (5)$$

$\theta_{PMP}$ : punto de marchitez permanente.  $\theta_{AD}$ : agua disponible en el momento de tomada la muestra. cap.  $\theta_{AD}$ : capacidad de agua disponible del suelo.

### 3.5. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA VEGETAL

Se realizó un seguimiento semanal durante la etapa vegetativa e inicios de la reproductiva del cultivo, la cual consistió en una evaluación visual enfocada en reconocer posibles diferencias en altura o porte que se correspondieran con los tratamientos. Además se verificaba por posibles alteraciones debido a plagas o enfermedades dentro del experimento.

Para determinar la materia seca producida en cada parcela, se realizó una medición destructiva que consistió en la cosecha manual de la parte aérea de las plantas, en el estadio fenológico R5. Se cortaron con tijera a 5 cm del suelo los tallos de las cuatro hileras centrales de cada tratamiento, a una longitud de 2 m de largo, para formar dos mazos de plantas, cada uno de los cuales contenía las plantas cosechadas en dos hileras contiguas. Se midió el peso fresco de cada mazo y a continuación se lo pasó por una picadora mecánica para luego volver a pesar el material picado. A partir del material picado de cada mazo, se tomó y pesó una muestra que se secó en estufa a 105 °C durante 48 h. Para obtener el porcentaje de materia seca (% de MS) de cada mazo, se dividió el valor de la muestra seca picada entre valor de la muestra fresca picada y se lo multiplicó por 100. El % de MS se dividió entre 100 y multiplicó por el valor del peso fresco de cada mazo para obtener el peso en MS de cada mazo. Finalmente, se calculó la producción de biomasa por hectárea de cada parcela, al promediar los dos mazos pertenecientes a cada parcela y dividirlos por su área.

Todas las mediciones realizadas en cada mazo, fueron hechas consecutivamente para evitar pérdidas de humedad entre mediciones. Dado el tamaño limitado la de cada parcela (9 m<sup>2</sup>), no fue posible realizar mediciones del rendimiento en grano. La razón por el cual no se pudo medir rendimiento en grano es en parte por el tamaño limitado por la parcela en donde al momento de la cosecha la pérdida de grano podría interferir en el resultado final.

### 3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de producción de biomasa se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + B(S)_{ij} + P_k + \beta G_l + E_{ijkl}$$

Dónde:

- Y: biomasa (kg ha<sup>-1</sup>)
- $\mu$ : media poblacional
- S: sitio, i = 1, 2, 3 (La Estanzuela, Palmitas o Tres Bocas respectivamente)
- B: bloque, j = 1, 2, 3, 4
- P: perforación, k = 1, 2 (con o sin orificios)
- G: gel,  $\beta$  = el efecto del gel, l = 1, 2, 3, 4 (0, 20, 40, 60 kg ha<sup>-1</sup>)
- E: error experimental

El efecto bloque se anidó dentro del sitio, como efecto aleatorio.

Supuestos del modelo:

- Es correcto
- No existe interacción bloque por tratamiento
- Las variables son discretas con efecto fijo

Supuestos con respecto a los errores:

- Tienen distribución normal.
- Hay igualdad de varianza entre los diferentes niveles de cada efecto.

Hipótesis planteadas con respecto al gel:

Ho: la producción de biomasa en los diferentes tratamientos con gel son iguales,  $0 = 20 = 40 = 60 \text{ kg ha}^{-1}$

Ha: existe al menos una diferencia en la producción de biomasa entre los tratamientos con gel.

Hipótesis planteada con respecto al sitio:

Ho: la producción de biomasa en los diferentes sitios son iguales, La Estanzuela = Palmitas = Tres Bocas.

Ha: existe al menos una diferencia en la producción de biomasa entre los sitios.

Hipótesis planteada con respecto a los orificios:

Ho: la producción de biomasa con o sin perforación son iguales

Ha: existe al menos una diferencia en la producción de biomasa entre el perforado y el no perforado.

Si el p-valor es menor o igual a 0,05 se rechaza la Ho. Si el p-valor es mayor a 0,05 no se rechaza la Ho.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS EN LOS TRES SITIOS UTILIZADOS

En el cuadro No. 2 se presentan las características hidrológicas de los suelos en el experimento.

Cuadro No. 2. Características hidrológicas de los suelos.

Sitio	Profundidad (cm)	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	$\theta_{CC}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_{PMP}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
La Estanzuela	0-10	1,39	31,38	16,28
	10-20	1,55	43,36	24,34
	0-20	1,54	38,93	21,11
Palmitas	0-10	1,53	35,94	18,94
	10-20	1,52	36,96	19,75
	0-20	1,53	36,57	19,42
Tres Bocas	0-10	1,54	50,08	29,36
	10-20	1,65	49,56	27,69
	0-20	1,60	49,82	28,68

Dap: densidad aparente,  $\theta_{CC}$ : capacidad de campo,  $\theta_{PMP}$ : punto de marchitez permanente.

### 4.2. RÉGIMEN DE LLUVIAS Y HUMEDAD DEL SUELO DURANTE EL PERÍODO DEL CULTIVO

En las figuras 5, 6 y 7 se realiza una comparación entre las precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo en estaciones pluviométricas cercanas a cada ensayo y series históricas. Para el caso de La Estanzuela la serie histórica corresponde a la misma estación pluviométrica y va desde 1965 a 2016 (INIA. GRAS, 2016), en cambio para los sitios de Palmitas y Tres Bocas la serie histórica utilizada corresponde a la ciudad Mercedes y va desde 1961 a 1990 (INUMET<sup>1</sup>) debido a la ausencia de registros

<sup>1</sup> INUMET. 2016. Serie histórica de precipitaciones 1969-2015. (sin publicar).

históricos para Palmitas y Tres Bocas, y por ser Mercedes el lugar más cercano con esa clase de datos.

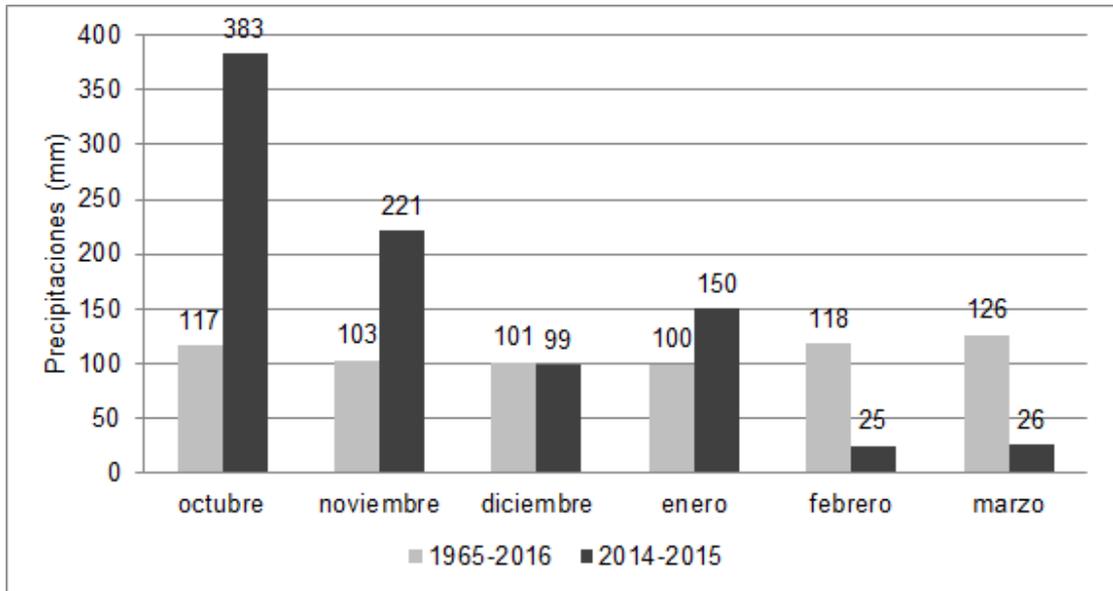


Figura No. 5. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) y media histórica para La Estanzuela (1965-2016).

Para el sitio de La Estanzuela (figura No. 5), se observa que desde octubre a enero las precipitaciones fueron en general superiores a la media histórica, a excepción de diciembre. Luego durante el mes de febrero y marzo las precipitaciones fueron inferiores a la media histórica (un 79 % menos en ambos meses).

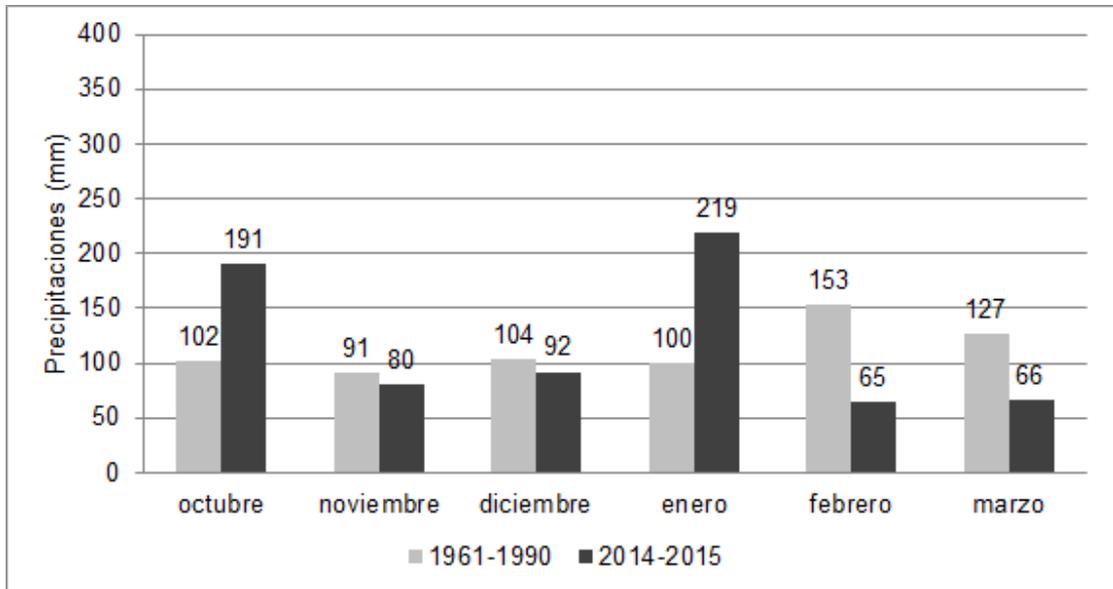


Figura No. 6. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) para Tres Bocas y media histórica de Mercedes (1961-1990).

En la figura No. 6 se observa que en la ciudad de Mercedes las máximas precipitaciones medias históricas se dan en el mes de febrero y marzo, (153 mm y 127 mm respectivamente), mientras que en octubre, noviembre, diciembre y enero rondan en 100 mm. En el sitio de Tres Bocas para el período 2014-2015, se observa que en los meses de octubre y enero ocurrieron las mayores precipitaciones, siendo por encima de la media histórica. En contraste en febrero y marzo se dieron precipitaciones en torno a los 65 mm mensuales, significando una reducción de 81 % y 61 %, con respecto a la media histórica respectivamente.

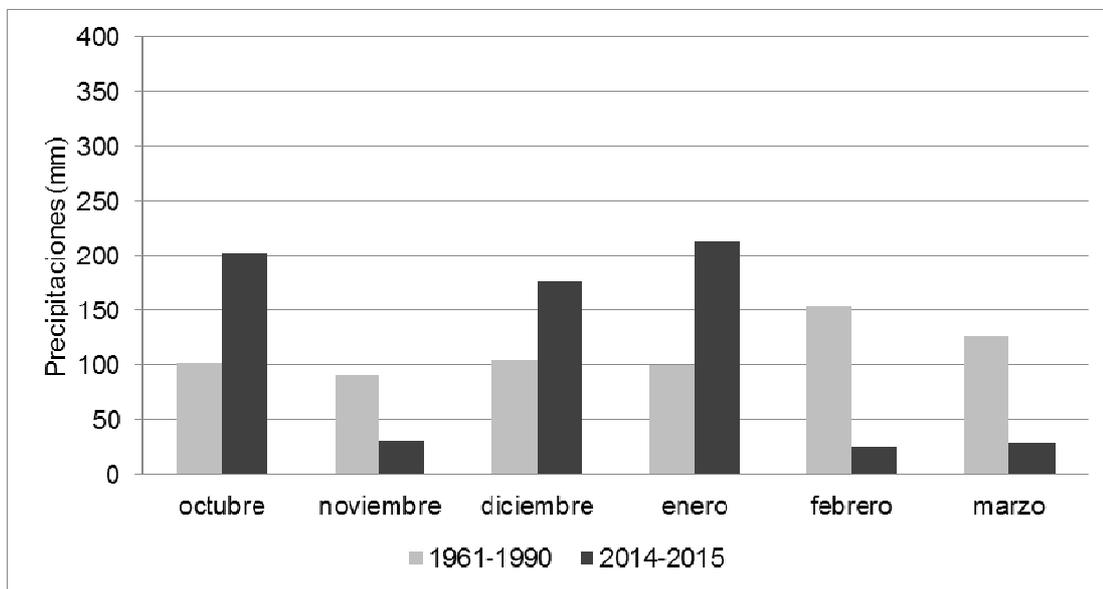
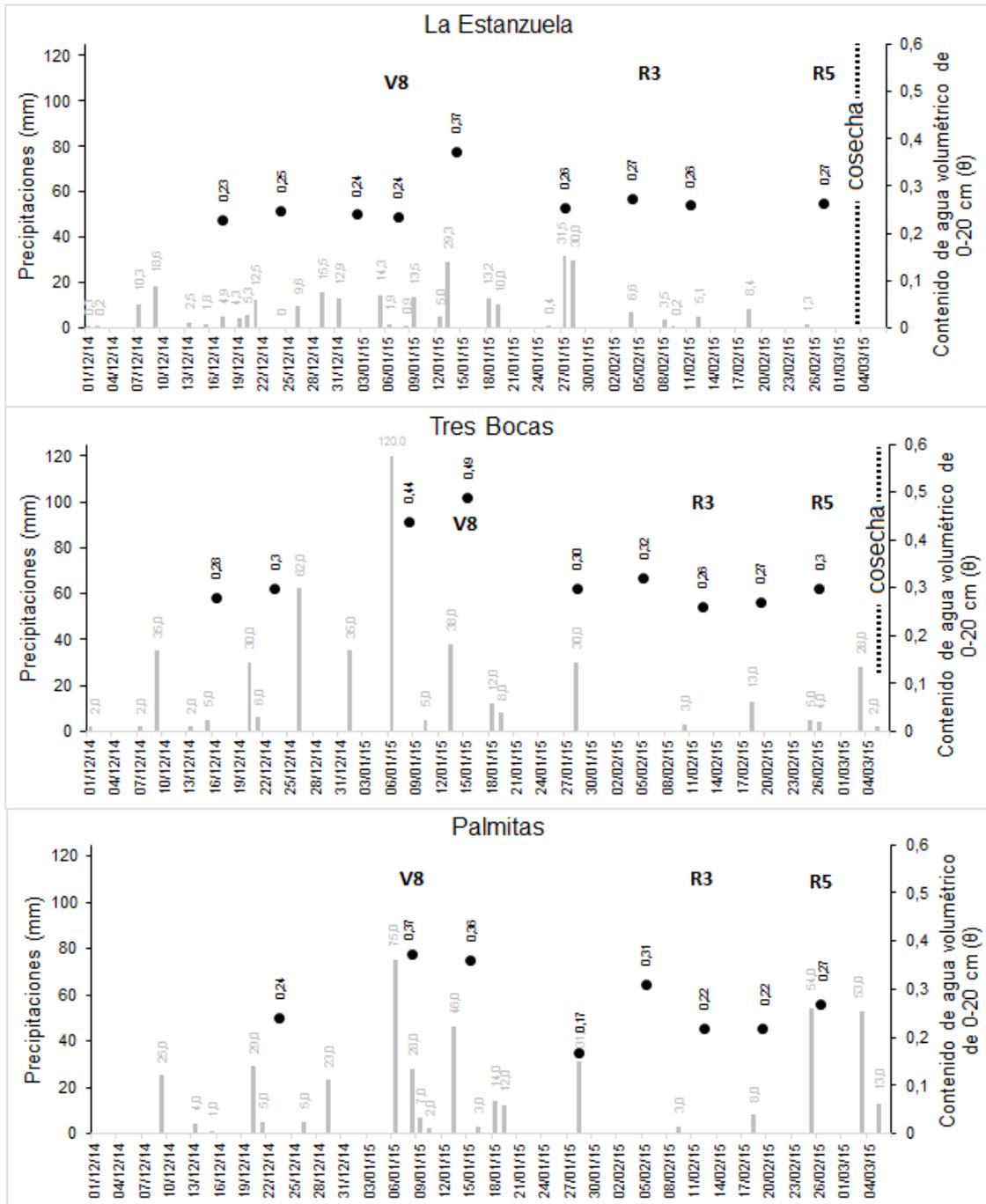


Figura No. 7. Precipitación acumulada mensual (verano 2014-15) para Palmitas y media histórica de Mercedes (1961-1990).

Para el sitio de Palmitas (figura No. 7) se observa que durante la estación de crecimiento del cultivo, los meses de octubre, diciembre y enero tienen mayores precipitaciones que la media histórica (100 %, 70 % y 118 % respectivamente). En los restantes meses las precipitaciones son inferiores a la media histórica, acentuándose en los meses de febrero y marzo, con precipitaciones de un 84 % y 76 % menores a la misma, respectivamente.

En la figura No. 8 se ilustran cronológicamente los datos relevados durante el ciclo del cultivo para los tres sitios. Los mismos consisten en las precipitaciones que ocurrieron con su fecha correspondiente, así como los momentos de muestreo y los niveles de humedad volumétrica obtenidos. También se indica el estado fenológico en el que se encontraba el cultivo al momento de realizado el muestreo.



Las barras representan las precipitaciones y los círculos los contenido de agua volumétrica,  $\theta$ : humedad volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). V8, R3, R5: estadios fisiológicos al momento de la medición. Figura No. 8. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo y humedad volumétrica en los primeros 20 cm de perfil del suelo en los tres ensayos.

### 4.3. DISPONIBILIDAD HÍDRICA DURANTE EL PERÍODO DEL CULTIVO

#### 4.3.1. Agua disponible

A continuación se presentan los datos de agua disponible (AD) calculados a partir de la humedad del suelo en los tres sitios, así como una estimación de la misma realizada por el INIA. GRAS (2015) para las zonas donde se realizaron los experimentos. Las estimaciones del INIA. GRAS son realizadas a partir de un modelo que toma como variables de entrada la precipitación efectiva, la evapotranspiración potencial y la capacidad de retener agua del suelo para cada una de las unidades de suelo definidas según Carta de Reconocimiento de Suelos de Uruguay escala 1:1.000.000 (MAP. DSF. DSA, 1976). Si bien este modelo no estima el AD a una escala local, sirve como punto de comparación con los datos obtenidos en los experimentos y como orientación para aquellas fechas con las que no se cuentan con datos (comienzos del ciclo del cultivo, principalmente). En las figuras 9, 10 y 11 se presenta dicha comparación para los sitios de La Estanzuela, Tres Bocas y Palmitas, respectivamente:

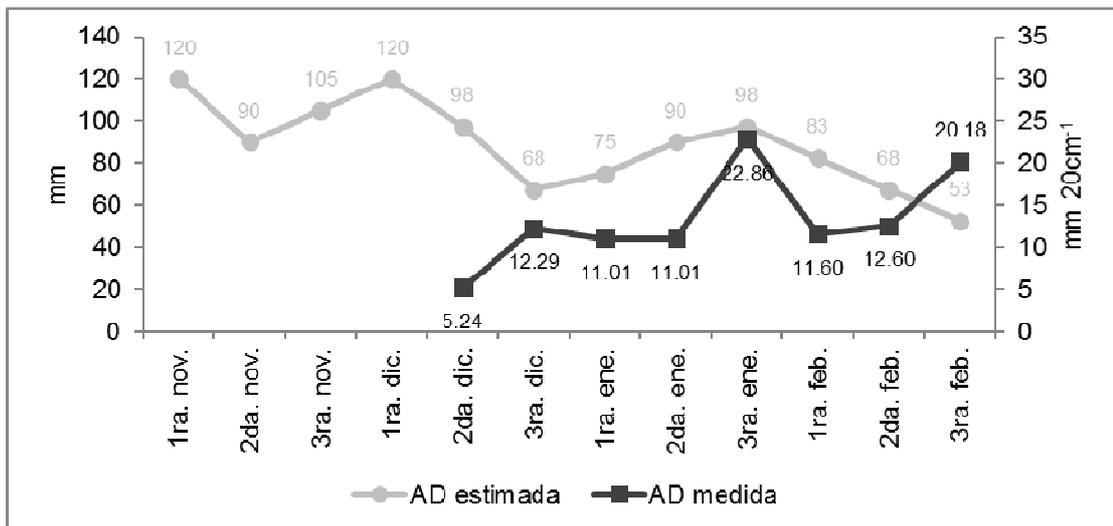


Figura No. 9. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de La Estanzuela, según estimación del modelo del INIA. GRAS (2015) y medida en el ensayo.

En la figura No. 9 se observa que en la segunda década de enero se da un pico de AD para los datos obtenidos a partir de humedad del suelo (comportamiento que se observa también en los otros dos sitios), mientras que en el modelo el mismo se da más tarde (tercera década). Luego de estos picos (a partir de la primera década de febrero) tanto en las mediciones como en el modelo el AD comienza a disminuir.

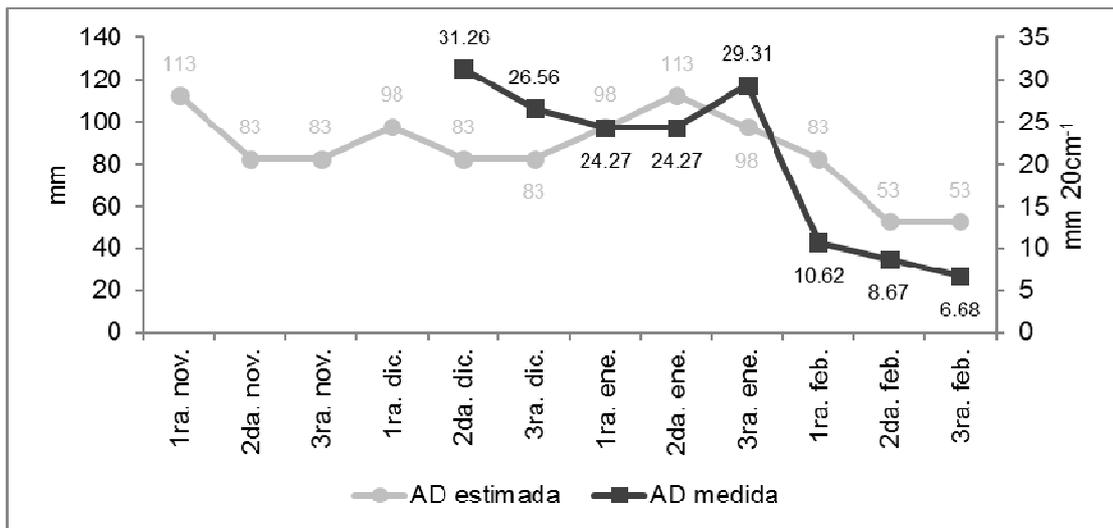


Figura No. 10. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de Tres Bocas, según estimación del modelo del INIA. GRAS (2015) y medida en el ensayo.

Para el sitio de Tres Bocas, se puede observar en la figura No. 10 una pequeña disminución del AD tanto estimado como medido a fines de diciembre y principios de enero, para luego darse un aumento y volver a caer marcadamente a fines de enero y febrero.

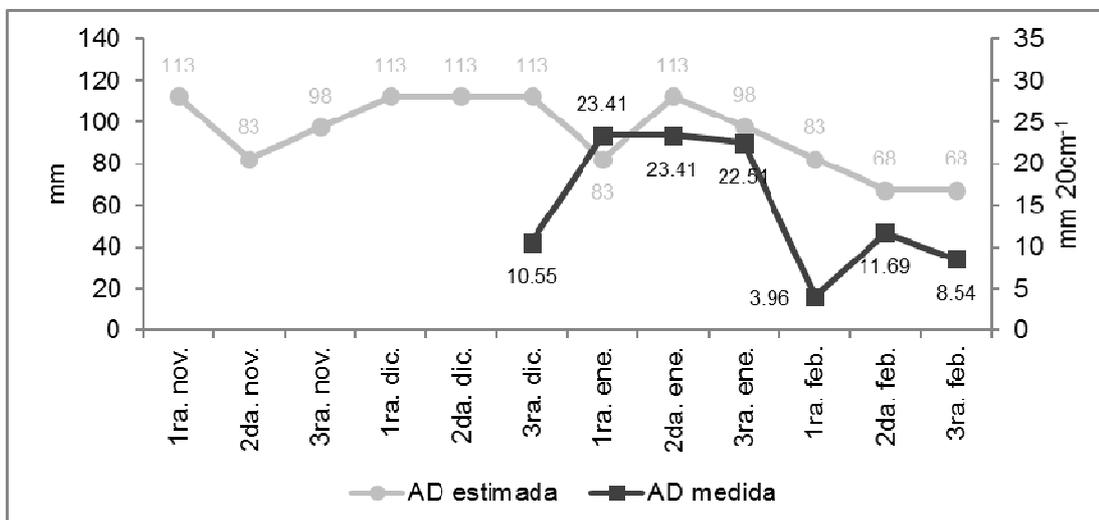


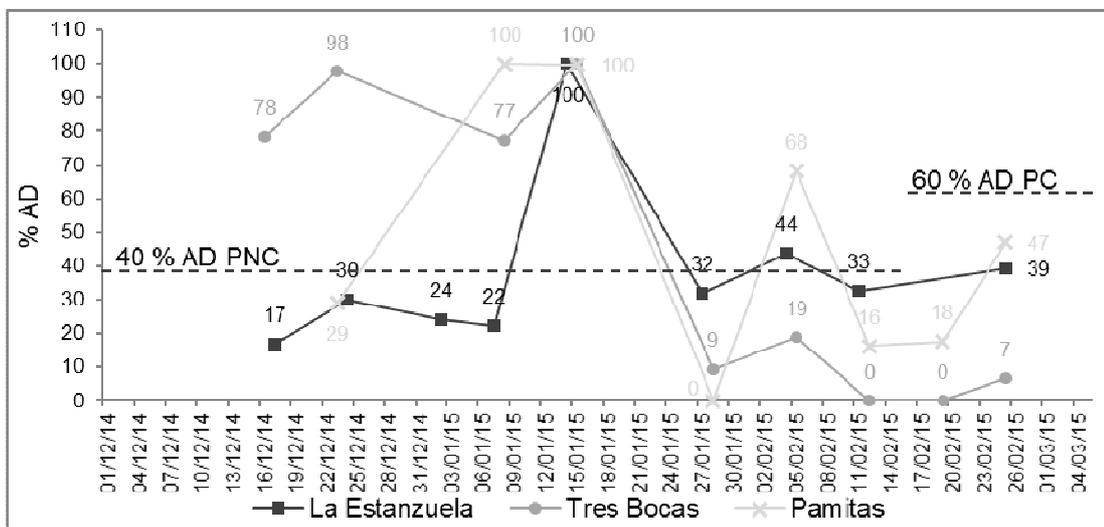
Figura No. 11. Evolución del agua disponible (AD) en décadas para el sitio de Palmitas, según estimación del modelo del INIA. GRAS (2015) y medida en el ensayo.

En el sitio de Palmitas, tanto en la estimación de INIA. GRAS (2015) como en los datos obtenidos a partir de la humedad del suelo, se nota un aumento del AD a mediados de enero para luego descender marcadamente y mantener bajos niveles durante todo febrero (figura No. 11).

Para los tres sitios, la mayor variabilidad de los datos obtenidos en comparación con el modelo, se podría deber a que éstos fueron obtenidos a partir de la humedad del suelo medida en profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm, siendo la parte del suelo que absorbe aquellas precipitaciones que no llegan a drenar hacia capas inferiores, además de tener mayor exploración radicular por parte del cultivo y por consiguiente mayor pérdida por transpiración.

#### 4.3.2. Requerimientos hídricos del cultivo y agua disponible

En la figura No. 12 se muestra la evolución del % AD para los tres sitios de estudio, junto con los umbrales de "bienestar hídrico" establecidos por Giménez (2014) en varias investigaciones en nuestro país; los mismos corresponden a un 60 % de AD durante el PC (R4-R6) y un 40 % de AD en los demás.



Las líneas punteadas indican el umbral de bienestar hídrico para el período no crítico (PNC) y el crítico (PC), respectivamente.

Figura No. 12. % de agua disponible (AD) para los tres sitios.

Como se observa en la figura No. 12, existieron déficits hídricos a fines de diciembre para la soja en el PNC (VE-R3) para los sitios de Palmitas y La Estanzuela. En la segunda quincena de febrero, durante el PC, hubo deficiencias hídricas para los tres sitios, siendo el más acentuado el de Tres Bocas y el más leve el de La Estanzuela. Si bien no se cuentan con datos de fechas anteriores a la segunda quincena de diciembre, es probable que hayan existido condiciones de bienestar hídrico en los tres sitios, según las estimaciones del modelo de INIA. GRAS, ya expuestas en las figuras 9, 10 y 11. Este modelo también indicaría que los días anteriores a la cosecha (fines de febrero y primera semana de marzo) fueron de marcado déficit hídrico para la soja de los tres sitios.

Según Giménez (2014), el déficit hídrico en el PC es mucho más importante para la determinación del rendimiento en biomasa, afirmación que parecería estar siendo confirmada por los valores de biomasa obtenidos y que se discutirán en el siguiente capítulo.

#### 4.4. RENDIMIENTO

En el cuadro No. 3 se presentan los resultados del análisis estadístico para el rendimiento en biomasa según sitio, perforación y poliacrilamida, además de sus posibles interacciones.

Cuadro No. 3. Prueba de hipótesis tipo III

	GL	denDF	valor- F	Valor-P
Sitio	2	6	19,94	0,0022*
perforación	1	42	0,17	0,6816
Poliacrilamida	1	42	0,11	0,7388
Sitio:perforación	2	42	0,32	0,7260
Sitio:poliacrilamida	2	42	0,35	0,7075

\* Efecto significativo del sitio ( $p < 0,05$ ). GL: grados de libertad. valor-P: probabilidad. valor-F: F estadístico.

En el cuadro No. 4 se presentan los datos obtenidos de rendimiento en biomasa aérea en los tratamientos evaluados para cada sitio.

Cuadro No. 4. Biomasa aérea como materia seca promedio según dosis de gel aplicada, perforación y sitio.

Sitio	Dosis de poliacrilamida (kg ha <sup>-1</sup> )	Perforación	MS (kg ha <sup>-1</sup> )
La Estanzuela	0	si	9037
La Estanzuela	20	si	8446
La Estanzuela	40	si	8901
La Estanzuela	60	si	9185
La Estanzuela	0	no	8554
Palmitas	0	si	7559
Palmitas	20	si	7060
Palmitas	40	si	6642
Palmitas	60	si	7367
Palmitas	0	no	6966
Tres Bocas	0	si	5710
Tres Bocas	20	si	5720
Tres Bocas	40	si	6117
Tres Bocas	60	si	5947
Tres Bocas	0	no	5890
Media			7273
Desvío estándar			1280
Coeficiente de variación			18%

MS: materia seca producida por la parte aérea.

Como se observa en el cuadro anterior el rendimiento de biomasa promedio fue de 7273 kg ha<sup>-1</sup>, con un desvío estándar de 1280 kg ha<sup>-1</sup> y un coeficiente de variación de 18 %. El máximo rendimiento de biomasa registrado fue de 9185 kg ha<sup>-1</sup> en La Estanzuela para la dosis de 60 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida y el mínimo rendimiento de biomasa registrado fue de 5710 kg ha<sup>-1</sup> en Tres Bocas con una dosis 0 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida, ambos casos con perforación.

#### 4.4.1. Diferencias entre sitios

Se constataron diferencias significativas entre los rendimientos promedios de cada sitio (efecto sitio), lo cual se puede observar con mayor detalle en el cuadro No. 5:

Cuadro No. 5. Biomasa aérea como MS promedio según sitio

Sitio	Medias de MS (kg ha <sup>-1</sup> )
La Estanzuela	8763 A*
Palmitas	7017 B
Tres Bocas	5931 B

\* Letras diferentes indican diferencias significativas con  $p < 0,05$  por el test de Fisher. MS: materia seca producida por la parte aérea.

El sitio con el mayor rendimiento fue La Estanzuela y es el que difiere estadísticamente de los restantes. Palmitas y Tres Bocas no presentan diferencias significativas entre ellos, sin embargo, existe una tendencia a que los tratamientos de Palmitas rindan alrededor de 1000 kg ha<sup>-1</sup> más que los de Tres Bocas, como se pudo ver en el cuadro No. 5.

Como uno de los principales factores que afectan el rendimiento en condiciones de secano podemos señalar la disponibilidad hídrica y su distribución durante el ciclo del cultivo. Giménez (2014), en cultivos de soja, provocó déficit en el PC para comparar con otro provocado en el PNC (período no crítico) y llegó a la conclusión de que el déficit hídrico en el PC es mucho más importante para la determinación del rendimiento en biomasa. Como ya se señaló en la figura No. 12 el cultivo de La Estanzuela fue el que mayor % AD tuvo durante el PC. En consecuencia, si se toma en cuenta sólo el factor de la disponibilidad hídrica, se deberían dar los mayores registros de biomasa en La

Estanzuela y los menores en Tres Bocas, conjetura que es coherente con los datos obtenidos.

#### 4.4.2. Efecto de la perforación

No hubo diferencias significativas en el rendimiento de biomasa aérea entre los dos testigos utilizados. Esto sugeriría que la perturbación del microambiente del suelo, causada por la perforación, no afectaría directamente en el rendimiento.

#### 4.4.3. Efecto de la poliacrilamida

En las figuras 13, 14 y 15, se observa la biomasa producida en función de la poliacrilamida aplicada al suelo para los sitios La Estanzuela, Tres Bocas y Palmitas, respectivamente. En las gráficas no está el valor promedio por tratamiento si se puede agregar quedaría más claro para entender los comentarios.

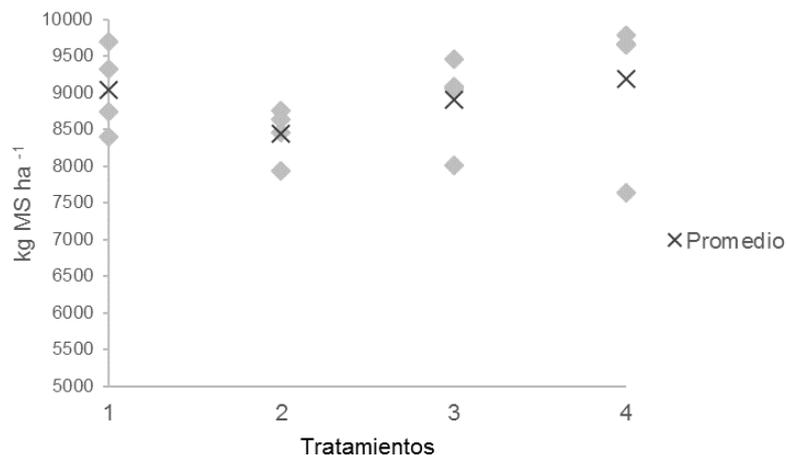


Figura No. 13. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de La Estanzuela.

En la figura No. 13 se observa que el máximo promedio en rendimiento es de  $9184 \text{ kg ha}^{-1}$  para la dosis de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ , en contraste, el mínimo valor de rendimiento medio es de  $8446 \text{ kg ha}^{-1}$  correspondiente a la dosis de poliacrilamida de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ .

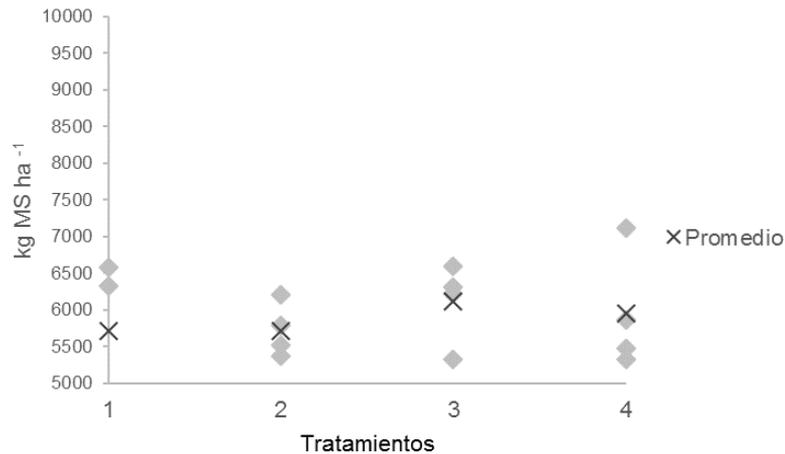


Figura No. 14. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de Tres Bocas.

En Tres Bocas el mayor promedio en rendimiento es de  $6117 \text{ kg ha}^{-1}$  correspondiente a la dosis de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ , el menor rendimiento medio es de  $5710 \text{ kg ha}^{-1}$  correspondiente a  $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de dosis.

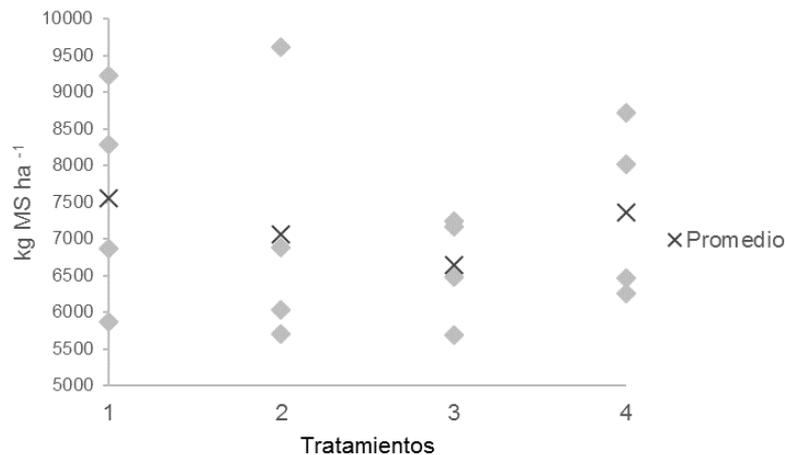


Figura No. 15. Rendimiento en materia seca de biomasa aérea en función de la cantidad de poliacrilamida agregada al suelo en el ensayo de Palmitas.

Con respecto a Palmitas, el mayor valor promedio de biomasa producida es de 7559 kg ha<sup>-1</sup> para la dosis de 0 kg ha<sup>-1</sup> y el mínimo rendimiento es de 6642 kg ha<sup>-1</sup> para una dosis de 40 kg ha<sup>-1</sup>.

De las gráficas anteriores se deduce que no hay ninguna tendencia clara de respuesta en biomasa cosechada entre los diferentes tratamientos con los sitios en estudio. Como ya se indicó en el cuadro No. 5 el análisis estadístico demuestra que no hay diferencias significativas en biomasa cosechada (kg ha<sup>-1</sup>) según distintas dosis de poliacrilamida (kg ha<sup>-1</sup>) ni tipo de perforación.

Aunque en este trabajo no se encontraron aumentos significativos de rendimiento para los tratamientos con poliacrilamida, en un experimento similar Gales et al. (2013) constataron aumentos en el rendimiento en grano con dosis de 15 kg ha<sup>-1</sup> y 30 kg ha<sup>-1</sup> en un cultivo de soja en seco. La diferencia en los resultados entre este trabajo y el citado se puede deber principalmente a dos factores que fueron muy distintos en los dos casos; la forma de aplicación de la poliacrilamida y el clima. En el presente trabajo la poliacrilamida fue colocada en pequeños orificios cilíndricos en el suelo (como ya fuera descrito en "Materiales y Métodos"), mientras que en el trabajo de Gales et al. (2013) la poliacrilamida fue aplicada en polvo y mezclada uniformemente con los primeros 25 cm de suelo mediante laboreo convencional, lo cual pudo haber potenciado su efecto. En este sentido, varios estudios (Johnson 1984b, Wang y Gregg 1990, Safdar y Rifat, citados por Gales et al. 2013) constatan que la poliacrilamida aumenta la retención de agua en el suelo no sólo por su capacidad de absorción propiamente dicha, sino también por ocupar los macroporos del suelo al hidratarse, disminuyendo la evaporación al generar un "efecto tapón", además de mejorar la estructura del suelo. El segundo factor que pudo haber generado diferencias entre ambos trabajos es el clima, explicado básicamente por las diferencias en precipitación. En el trabajo de Gales et al. (2013) se dio una primavera húmeda y un verano extremadamente seco (la precipitación acumulada mensual no superó los 40 mm) lo que hizo que el testigo rindiera 1629 kg ha<sup>-1</sup> de grano y el tratamiento con 30 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida 2166 kg ha<sup>-1</sup>, un 33 % más. Por el contrario, en el presente trabajo, las precipitaciones fueron más abundantes (pero existió un déficit hídrico marcado en febrero y marzo en Tres bocas y Palmitas y más leve en la Estanzuela) y sólo como comparación con el trabajo de Gales et al. (2013) se puede señalar que el rendimiento en grano del sitio de La Estanzuela superó los 3200 kg ha<sup>-1</sup>, fuera de la cuadrícula del ensayo.

A diferencia del trabajo de Gales et al. (2013) que fue desarrollado sobre un molisol, la mayoría de los experimentos encontrados en la literatura (Savé et al. 1995, Azevedo 2002, Navroski et al. 2014) son

realizados sobre suelos arenosos o sustratos artificiales (corteza de pino picada, etc.), sugiriendo que la poliacrilamida es en general considerada una enmienda para suelos de poca microporosidad, esto iría en concordancia con los estudios que recalcan la acción de la poliacrilamida al ocupar los macroporos y reducir las pérdidas por evaporación, así como mejorar su textura, volviéndolos similares a un suelo arcilloso (Zohuriaan-Mehr et al., 2008).

Varios de los trabajos referidos en la literatura fueron realizados con dosis considerablemente más altas que el presente, generalmente en horticultura, donde la producción intensiva haría viable el costo de dosis altas (Wang y Boogher 1987, Balena y Prevedello 2000, Dourado et al. 2013). La dosis más alta de poliacrilamida agregada en el presente experimento ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ) sólo aumentaría en  $2,4 \text{ mm ha}^{-1}$  el almacenaje de agua en el suelo, lo que no llegaría a cubrir las necesidades hídricas de la planta por un día (Giménez y García, 2011). El almacenaje de la poliacrilamida podría incluso ser menor al antes mencionado, si se considera que su capacidad absorbente puede reducirse por los cationes presentes en la solución del suelo y por las fertilizaciones (James y Richards 1986, Wang y Gregg 1990). Tal vez mayores dosis de poliacrilamida hubieran generado un aumento significativo en la biomasa, pero dado que se intentó realizarlo en condiciones similares a la agricultura extensiva local, dosis mucho mayores no parecieron ser trasladables luego a la producción comercial.

## 5. CONCLUSIONES

No hubo diferencias significativas en la producción de biomasa aérea debido a la aplicación del polímero de acrilato de potasio y poliacrilamida al suelo. Tampoco hubo diferencias significativas en la producción de biomasa aérea debido a la perforación.

El ensayo de La Estanzuela mostró mayor producción de biomasa comparado con Tres Bocas y Palmitas, siendo a su vez, el ensayo con mayor disponibilidad de agua durante el PC, resultado que es concordante con los obtenidos por Giménez (2014).

Teniendo en cuenta la bibliografía y los resultados obtenidos, se podría concluir que los suelos donde se instalaron los ensayos del presente experimento no fueron los más adecuados para evidenciar los efectos de la poliacrilamida. En las condiciones de nuestro país (suelos medianamente pesados o pesados y buenas precipitaciones) la capacidad de la poliacrilamida de aumentar la disponibilidad hídrica del suelo no parecería ser relevante, al menos en condiciones de agricultura extensiva, bajas dosis y con la forma de aplicación utilizada en este trabajo. No obstante, los resultados podrían ser diferentes de repetirse el experimento en otro año, dado que en el Uruguay existe una gran variabilidad interanual en las precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

Por último, cabe destacar la gran cantidad de propiedades de la poliacrilamida referidas en la literatura y que trascienden el objeto de estudio de esta tesis, que fue básicamente pensada como el análisis de una enmienda que mejorara la disponibilidad hídrica. Estas propiedades van desde la reducción de la erosión a la capacidad de absorción y lenta liberación de nutrientes.

## 6. RESUMEN

La poliacrilamida es un polímero súper-absorbente (SAP) que ha sido usado en horticultura y forestación como una enmienda de suelos para aumentar la capacidad de retención de agua de los mismos, así como mejorar sus propiedades físicas. El objetivo de este experimento fue evaluar los efectos sobre la producción de biomasa de soja (*Glycine max*) debido al agregado de pequeñas dosis de poliacrilamida (20-60 kg ha<sup>-1</sup>) en suelos agrícolas del sureste de Uruguay. Se hicieron tres ensayos ubicados en La Estanzuela (34°20'35.18"S 57°43'22.50"O), Palmitas (33°25'48.8 7"S 57°48'31.69"O) y Tres Bocas (32°45'54.64"S 57°54'35.08"), consistentes en un diseño en bloques completos al azar y 5 tratamientos. La poliacrilamida fue aplicada en V1-V3 (escala Fehr y Caviness) dentro de orificios de 20 cm de profundidad y 2 cm de diámetro, dispuestos en una cuadrícula de 21 cm X 19 cm y luego obstruidos con suelo. Los tratamientos evaluados fueron T1: un testigo sin poliacrilamida y con orificios, T2: 20 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida colocada en orificios, T3: 40 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida colocada en orificios, T4: 60 kg ha<sup>-1</sup> de poliacrilamida colocada en orificios y T5: otro testigo, sin poliacrilamida y sin orificios. Se midió el agua disponible (AD) semanalmente desde V6- V7 hasta R5, momento en que se hizo una medición destructiva de biomasa aérea. El análisis estadístico no arrojó diferencias significativas entre tratamientos, habiendo sólo diferencias en la producción de biomasa entre sitios. El sitio de La Estanzuela tuvo un rendimiento mayor que los otros lugares y fue el sitio con mayor disponibilidad hídrica (% AD) durante el PC.

Palabras clave: Soja; Poliacrilamida; Acrilato de potasio; Polímero súper-absorbente.

## 7. SUMMARY

The polyacrylamide is a superabsorbent polymer (SAP) which has been used in horticulture and forestry as a soil amendment to increase soil water retention capacity, as well as to improve soil physical properties. The objective of this experiment was to evaluate the effects on soybean biomass yield (*Glycine max*) due to the addition small doses of polyacrylamide (20-60 kg ha<sup>-1</sup>) in agricultural soils of the southeast of Uruguay. Three trials consisting of a randomized complete block design with 5 treatments, located at La Estanzuela (57°43'22.50"W 34°20'35.18"S), Palmitas (33°25'48.8 7"S 57°48' 31.69"W) and Tres Bocas (32°45'54.64"S 57°54'35.08"W). The polyacrylamide was added in V1-V3 (Fehr and Caviness scale) in holes of 20 cm depth and 2 cm diameter, arranged in a grid of 21 cm x 19 cm and then clogged with soil. Treatments evaluated were T1: a (check without polyacrylamide and with holes, T2: 20 kg ha<sup>-1</sup> of polyacrylamide placed in holes, T3: 40 kg ha<sup>-1</sup> of polyacrylamide placed in holes, T4: 60 kg ha<sup>-1</sup> of polyacrylamide placed in holes and T5: another check, without polyacrylamide and without holes. Available water (AD) was measured weekly from V6- V7 until R5, and then a destructive measurement of biomass was made. The statistical analysis showed no significant differences between treatments, existing differences in biomass yield only between locations. The location of La Estanzuela had higher biomass yield than the other sites, and it also was the location with greater water availability (% AD) during the critical period.

Key words: Soybean; Polyacrylamide; Potassium acrylate; Superabsorbent polymer.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. 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. Roma, FAO. 298 p. (Estudio FAO Riego y Drenaje no. 56).
2. Andrade, F. H.; Aguirrezabal, L.; Rizzalli, R. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
3. Andriani, J. M. 2002. Estrés hídrico en soja. Revista IDIA XXI. 3: 48-51.
4. Azevedo, T. L. F.; Bertonha, A.; Gonçalves, A. C. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Frizzone, J. A. 2002. Níveis de polímero superabsorvente, frequências de irrigação e crescimento de mudas de café. Maringá. 24 (5): 1239-1243.
5. Baigorri, H. E. J. 2004. Criterios para la elección y el manejo de cultivares de soja. Marcos Juárez, INTA. 21 p.
6. Balena, S. P.; Prevedello C. L. 2000. Efeitos de polímeros hidrorretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 24: 251-258.
7. Bowman, D. C.; Evans, R. Y.; Paul, J. L. 1990. Fertilizer salts reduce hydration of Polyacrylamide hydrogels and affect physical properteis of gel amended container media. Journal of American Society for Horticultural Scince. 115: 382-386.
8. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_.1991. Calcium inhibition of polyacrylamide gel hydration is partially reversible. HortScience. 26 (8): 1063-1065.
9. Bres, W.; Weston, L. A. 1993. Influence of gel additives on nitrate, ammonium, and water retention and tomato growth in a soilless medium. Hortscience 28 (10): 1005–1007.

10. Caesar-Ton That, T.; Busscher, W.; Novak, J.; Gaskin, J.; Kim, A. 2008. Effects of polyacrylamide and organic matter on microbes associated to soil aggregation of Norfolk loamy sand. *Applied Soil Ecology*. 40: 240-249.
11. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. pp. 4-22 (Serie Técnica no. 193).
12. Della Maggiora, A. I.; Gardiol, J. M.; Irigoyen, A. I. 2000. Requerimientos hídricos. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, EEA INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 155-171.
13. Delatorre, J.; Lanino, M.; Poblete, I. E.; Moll, W. 2001. Efecto de la aplicación de poliacrilamidas en suelo desérticos sobre los requerimientos hídricos del algodón (*Gossypium hirsutum*). *Revista de Agricultura del Desierto*. 2: 9-17.
14. Dourado, I. T.; Bezerra, M.; De Macêdo, E. B. 2013. Influência de polímero de poliacrilamida na sobrevivência de alface. In: Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão (13ª., 2013, Recife, BR). Anais. Recife, Editora Universitária da UFRPE. p. irr.
15. Entry, J.; Sojka, R.; Hicks, B. 2007. Carbon and nitrogen stable isotope ratios can estimate anionic polyacrylamide degradation in soil. *Geoderma*. 145 (1): 8-16.
16. Gales, D. C.; Topa, D.C.; Chiriac, G.; Raus, L.; Jitaeanu, G. 2013. The Influence of aquasorb on maize and soybean yield and economic efficiency in Moldavian plain native. *ProEnvironment*. 1: 233-237.
17. García Petillo, M.; Hayashi, R.; Morales, P.; Puppo, L. 2013. Curso de riego y drenaje. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 2-4.
18. Ghebru, M. G.; Dutoit, E. S.; Steyn, J. M. s. f. Water and nutrient retention by Aquasoil and Stockosorb polymers. Pretoria, South Africa, University of Pretoria. Department of Plant Production and Soil Science. 5 p.
19. Giménez, L.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 15 (2): 100-108.

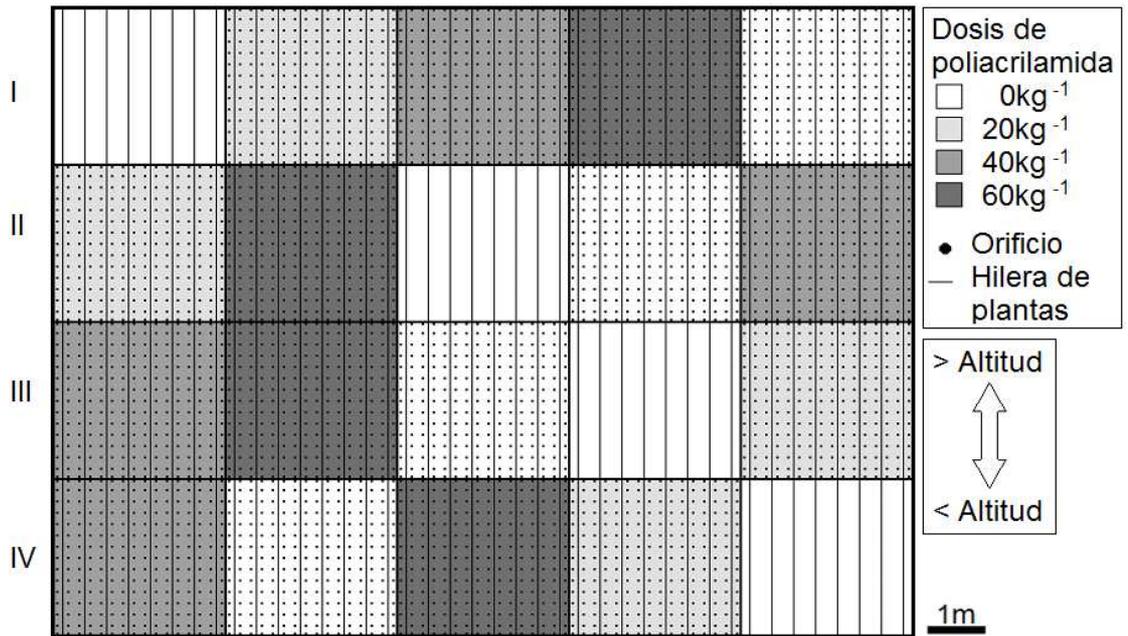
20. \_\_\_\_\_. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia* (Montevideo). 18 (1): 53-64.
21. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agroclima y Sistemas de Información, UY). 2016. Banco datos agroclimático. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 28 feb. 2016. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
22. James, E. A.; Richards, D. 1986. The influence of iron source on the water-holding properties of potting media amended with water-absorbing polymers. *Scientia Horticulturae*. 28 (3): 201-208.
23. Jiang, T.; Teng, L.; Wei, S.; Deng, L.; Luo, Z.; Chen, Y.; Flanagan, D. 2010. Application of polyacrylamide to reduce phosphorus losses from a chinese purple soil; a laboratory and field investigation. *Journal of Environmental Management*. 91 (7): 1437-1435.
24. Johnson, M. S. 1984a. The effects of gel-forming polyacrylamides on moisture in sandy soils. *Journal of the Science of Food Agriculture*. 35: 1196-1200.
25. \_\_\_\_\_. 1984b. Effects of soluble salts on water absorption by gel-forming soil conditioners. *Journal of the Science of Food Agriculture*. 35: 1063-1066.
26. Kantolic, A.; Giménez, P.; De La Fuente, E. 2004. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad de soja. In: Pascale, A. ed. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. 2ª. ed. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 167-195.
27. Kiatkamjornwong, S. 2007. Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites. *ScienceAsia*. 33 (1): 39-43.
28. Li, F. H.; Wang, A. P.; Wu, L. S. 2014. Interaction effects of polyacrylamide application rate, molecular weight, and slope gradient on runoff and soil loss under sprinkler irrigation. *Advanced Materials Research*. 955: 3489–3498.
29. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2016. Interaction effects of polyacrylamide application and slope gradient on potassium and nitrogen losses under simulated rainfall. *Catena*. 136: 162-174.

- 30.MAP. DSF. DSA (Ministerio de Agricultura y Pesca.Dirección de Suelos y Fertilizantes. División Suelos y Aguas, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay.Montevidео. Escala 1:1000000.
- 31.Messandri Dusi, D. 2005. Efeito da adição do polímero hidrorretentor na eficiência da adubação nitrogenada no crescimento de brachiaria decumbens cv. basilisk, em dois diferentes substratos. Tesis Mestria em Ciencias Agrarias. Curitiba, Brasil. Universidade Federal do Paraná. 93 p.
- 32.Molfino, J.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevidео, MGAP. 9 p.
- 33.Navroski, M. C.; Araújo, M. M.; Cunha, F.; Berghetti, A. L.; Pereira, M. 2014. Influência do polímero hidrorretentor na sobrevivência de mudas de Eucalyptus dunnii sob diferentes manejos hídricos. Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais. 2 (2): 108-113.
- 34.Qu, G.; De Verennes, A. 2009. Use of hydrophilic insoluble polymers in the restoration of metal-contaminated soils (en línea). Applied and Environmental Soil Science. 2009: p. irr. Consultado 22 feb. 2016. Disponible en <https://www.hindawi.com/journals/aess/2009/790687>
- 35.RIVERFILCO, UY. 2015. Manual de capacitación del sistema Gel Plant. (en línea). Montevidео. s.p. Consultado 28 feb. 2016. Disponible en [http://www.riverfilco.com.uy/estructura/otros\\_insumos/gel\\_forest/](http://www.riverfilco.com.uy/estructura/otros_insumos/gel_forest/)
- 36.Rodrigues, O.; Dirceu, A.; Barreneche, J.; Bertagnolli, P.; Silva, J. 2001. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 36 (3): 431-437.
- 37.Savé, R.; Pery, M.; Marfa, O.; Serrano, L. 1995. The effect of a hydrophilic polymer on plant water status and survival of transplanted pine seedlings. HortTechnology. 5 (2): 141-143.
- 38.Sawchik, J.; Ceretta, S. 2005. Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción. In: Jornada Técnica de Cultivos de Verano (2005, La Estanzuela, Colonia). Trabajos presentados. Montevidео, INIA. pp. 41-45 (Actividades de Difusión no. 417).

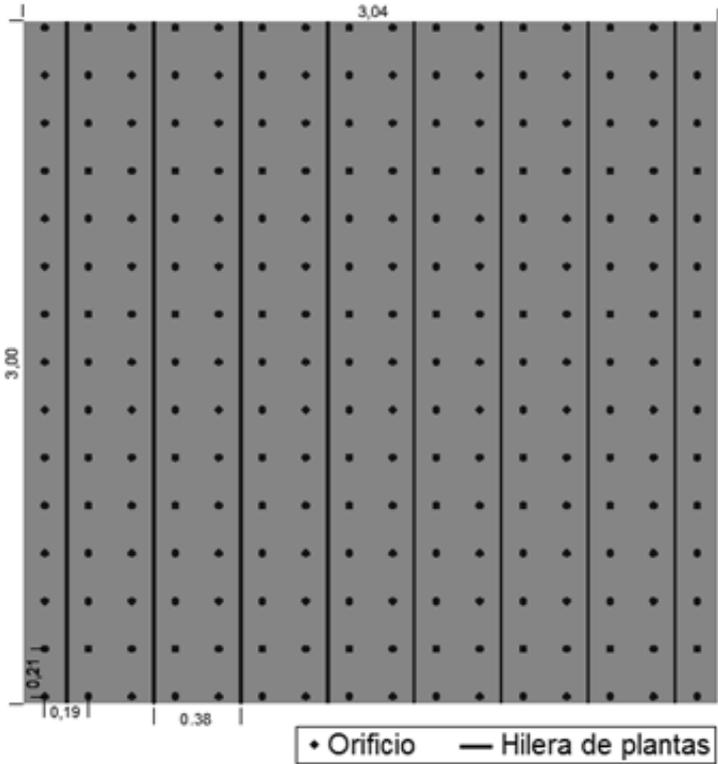
39. Sita, R. C. M. 2002. Influência das formas de adubação nitrogenada e potássica na ação de polímero hidrorretentor sobre o crescimento de crisântemo *Dedranthema grandiflorum* Variendade "virginal". Tesis Mestría em Ciências Agrarias. Curitiba, Brasil. Universidade Federal do Paraná. 98 p.
40. Sojka, R.; Entry, J.; Fuhrmann, J. 2006. The influence of high application rates of polyacrylamide on microbial metabolic potential in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*. 32 (2): 243–252.
41. Toledo, R. 2005. Fases de desarrollo del cultivo de soja. (en línea). Córdoba, UNC. 12 p. Consultado 15 feb. 2016. Disponible en [http://agro.unc.edu.ar/~ceryol/documentos/soja/feno\\_soja.pdf](http://agro.unc.edu.ar/~ceryol/documentos/soja/feno_soja.pdf)
42. \_\_\_\_\_. 2012. Ecofisiología y manejo del cultivo de soja. (en línea). Córdoba, UNC. 31 p. Consultado 15 feb. 2016. Disponible en [http://campus.fca.uncu.edu.ar/pluginfile.php/15826/mod\\_resource/content/0/Ecofisiologia%20de%20soja%20Ing.%20Agr.%20Rub%20C3%A9n%20E.%20Toledo%20Cereales%20y%20Oleaginosas%20C%20FCA-UNCORDOBA.pdf](http://campus.fca.uncu.edu.ar/pluginfile.php/15826/mod_resource/content/0/Ecofisiologia%20de%20soja%20Ing.%20Agr.%20Rub%20C3%A9n%20E.%20Toledo%20Cereales%20y%20Oleaginosas%20C%20FCA-UNCORDOBA.pdf)
43. \_\_\_\_\_. 2015. Principios básicos de ecofisiología y manejo de soja. (en línea). Buenos Aires, BuscAgro. 30 p. Consultado 28 feb. 2016. Disponible en <http://www.buscagro.com/biblioteca/Ruben-Toledo/Ecofisiologia-de-la-soja.pdf>
44. Wang, Y. T.; Boogher, C. A. 1987. Effect of a medium-incorporated hydrogel on plant growth and water use of two foliage species. *Journal of Environmental Horticulture*. 5:127–130.
45. \_\_\_\_\_.; Gregg, L. L. 1990. Hydrophilic polymers polymers - their response to amendments and effect on properties of a soilless potting mix. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 115: 943-984.
46. Wu, L.; Ok, Y. S; Xu, X. L.; Kuzyakov, Y. 2012. Effects of anionic polyacrylamide on maize growth; a short term <sup>14</sup>C labeling study. *Plant Soil*. 350 (1): 311–322.
47. Zohriaan-Mehr, M. J.; Karabiri, K. 2008. Superabsorbent polymer materials; a review. *Iranian Polymer Journal*. 17 (6): 451-477.

## 9. ANEXOS

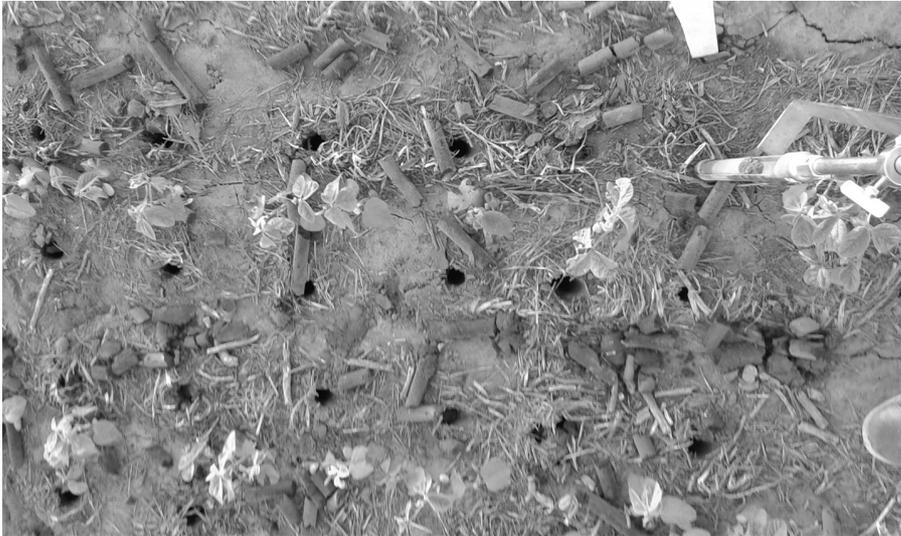
Anexo 1. Croquis del diseño de los experimentos



Anexo 2. Croquis de una parcela con la cuadrícula de orificios



Anexo 3. Cuadrícula de orificios.



Anexo 4. Aplicación de la poliacrilamida

