

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

**Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo**

**BALANCE DE NITRÓGENO EN SOJA GM III, IV Y V
CULTIVADA BAJO DOS SITUACIONES HÍDRICAS**

Autor: **Andreo, Nicolás**

DNI: 33.814.054

Director: **Oscar Giayetto**

Río Cuarto - Córdoba

Noviembre de 2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**BALANCE DE NITRÓGENO EN SOJA GM III, IV Y V
CULTIVADA BAJO DOS SITUACIONES HÍDRICAS**

Autor: Nicolás Andreo

DNI: 33.814.054

Director: Oscar Giayetto

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión
Evaluadora:

Gabriel Espósito _____

Marcelo Kearney _____

Oscar Giayetto _____

Fecha de Presentación: ____ / ____ / ____.

Aprobado por la secretaría Académica: ____ / ____ / ____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que me brindaron la posibilidad de poder formarme a nivel universitario y que me enseñaron a no bajar los brazos nunca. A mis hermanos que de una manera u otra siempre están presentes. A toda la familia por el deseo de que a uno le vaya bien.

Al grupo de amigos de la universidad que me hicieron pasar momentos excelentes e inolvidables.

A toda la cátedra de Cultivos Oleaginosos por el espacio y el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Certificado de aprobación.....	II
Agradecimientos.....	III
Índice general.....	IV
Índice de figuras.....	V
Índice de cuadros.....	VI
Resumen.....	VII
Summary.....	VIII
Introducción.....	9
Hipótesis.....	14
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos.....	14
Materiales y métodos.....	15
Resultados y discusión.....	18
Conclusiones.....	30
Bibliografía.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Valores decádicos de temperatura media del aire y RFA durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13) y de la serie 1974-1993 (arriba); y balance hidrológico (Lluvia-ETo) y riegos aplicados durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13) en Río Cuarto (Córdoba) (abajo).....	18
Figura 2: Biomasa total aérea producida y acumulada por los cultivares (GM III, IV y V) en condición secano y riego durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13), en Río Cuarto (Córdoba).	20
Figura 3: Relación entre el peso seco de nódulos (g/planta) en R5 y el porcentaje de FBN para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones, los rombos azules corresponden a la situación bajo riego y los rojos a secano.....	28
Figura 4: Relación entre la FBN y el N° de semillas m ⁻² para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones.	29
Figura 5: Relación entre la FBN y el peso de 100 semillas para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones.	29
Figura 6: Relación entre la FBN y el rendimiento en granos del cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones.....	29

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis estadístico del número de nódulos por planta (en raíz principal + raíces secundarias) cuantificados en las etapas R1, R5 y R7 de los tres cultivares de soja y bajo las dos condiciones hídricas evaluadas.	22
Cuadro 2. Análisis estadístico del peso seco de nódulos por planta (en raíz principal + raíces secundarias) cuantificados en las etapas R1, R5 y R7 de los tres cultivares de soja y bajo las dos condiciones hídricas evaluadas.....	22
Cuadro 3: Balance relativo de nitrógeno para los tres grupos de madurez del cultivo de soja en las dos condiciones hídricas (valores en kg ha ⁻¹).....	25
Cuadro 4: Índice de cosecha de nitrógeno de los GM III, IV y V de soja cultivados bajo riego y en secano (2012/13).....	26
Cuadro 5: Rendimiento en grano y sus componentes directos (número de semillas por m ² y peso de 100 semillas) de los GM III, IV y V de soja cultivados en secano y con riego durante el ciclo 2012/13.....	27

RESUMEN

El presente trabajo consta de un experimento realizado en 2012/13 en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC (Río Cuarto, Córdoba). Los factores evaluados fueron grupo de madurez del cultivar, en tres niveles (III, IV y V), y la condición hídrica, en dos niveles (riego suplementario y seco). Los 6 tratamientos, resultantes de combinar ambos factores (cultivar y condición hídrica), se asignaron a un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Durante el ciclo del cultivo se hicieron determinaciones de biomasa total, para lo cual se tomaron muestras en etapas fenológicas V7/V8, R1, R5 y R7. En las etapas R1, R5 y R7 se realizaron determinaciones de nodulación discriminando entre raíz principal y raíces secundarias, contabilizando número de nódulos y peso de los mismos. Al estadio R8 se determinaron los componentes directos del rendimiento, es decir, número y peso de 100 granos. Se calculó un Balance Relativo de Nitrógeno, a partir del cual se determinó el aporte realizado por FBN y se determinó la variación de N en el suelo. Al analizar la nodulación se encuentra que el número de nódulos por planta experimenta un aumento de R1 a R5, presentando una disminución hacia R7 con diferencias significativas sólo para condición hídrica en R1 y R7. Respecto al peso de nódulos hubo diferencias significativas entre GM en R1 y R5 a favor del GM V. Tanto el número como el peso de nódulos por planta tuvieron mayor proporción en raíces secundarias. Los aportes por FBN representaron en promedio para la condición riego un 63,9% de los requerimientos ($282,1 \text{ kg N ha}^{-1}$), mientras que para seco el valor fue de 36,6% ($90,1 \text{ kg N ha}^{-1}$); obteniéndose variaciones de N en el suelo positivas para ambas condiciones pero en mayor magnitud para seco ($56,9 \text{ kg ha}^{-1}$ vs. $80,8 \text{ kg ha}^{-1}$). Respecto al rendimiento en grano obtenido existe una diferencia significativa entre riego (6977 kg ha^{-1}) y seco (3723 kg ha^{-1}), sin efecto del GM ni de la interacción entre ambos factores. Se cuantificaron una serie de relaciones funcionales entre la nodulación y la FBN, y entre ésta y el rendimiento en granos y sus componentes; encontrándose coeficientes de determinación que corroboran la importancia de la FBN sobre los aspectos productivos del cultivo de soja.

Palabras clave: soja, nodulación, fijación de N, rendimiento

SUMMARY

This paper consists on an experiment conducted in 2012/13 in the experimental field of the Faculty of Agronomy and Veterinary UNRC (Río Cuarto, Córdoba). The factors evaluated were crop maturity group in three levels (III, IV and V), and water condition in two levels (supplemental irrigation and dry land). The 6 treatments resulting from the combination of both factors (crop and water condition), were assigned to a block design at random with three replications. During the crop cycle determinations of total biomass were made, for which samples were taken at phenological stages V7 / V8, R1, R5 and R7. In stages R1, R5 and R7 nodulation determinations were performed discriminating between taproot and secondary roots, counting number of nodules and weight. In stage R8 direct yield components were determined, that is to say, number and weight of 100 grains. It was calculated the Nitrogen relative balance, from which it was determined the contribution made by FBN and the variation of N in the soil. When analyzing the nodulation it is found that the number of nodules developed per plant increased from R1 to R5, with a tendency to decrease towards R7, with significant differences only for water condition in R1 and R7 stages. About the weight of nodules, there were significant differences between GM in R1 and R5 with greater value in GM V. The higher contribution to number and weight of nodule per plant were in secondary roots. The contributions by FBN represented an average for irrigation condition of 63.9% from the requirements ($282.1 \text{ kg N ha}^{-1}$), while for dry land the value was of 36.6% ($90.1 \text{ kg N. ha}^{-1}$); obtaining positive variations of N in the soil for both conditions but in greater extent to dry land (56.9 kg ha^{-1} vs. 80.8 kg ha^{-1}). Regarding the grain yield obtained there is a significant difference between irrigation (6977 kg ha^{-1}) and dry land (3723 kg ha^{-1}), without effects due to GM and interactions among factors. A number of functional relationships were quantified between nodulation and BNF, and between this and the yield and its components; finding coefficients of determination that corroborates the importance of FBN on productive aspects of the soybean crop.

Keywords: soybean, nodulation, N fixation, yields.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), comienza su expansión en Argentina a partir de la década del 70', presentando en los últimos 15 años el mayor incremento en la superficie sembrada. En la actualidad la Región Pampeana es donde se presenta la mayor concentración, siendo las provincias más importantes Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires; así mismo este cultivo se encuentra distribuido en una amplia zona ecológica de Argentina. La producción total del país, para la campaña 2014/15 fue de 61.398.272 t, obtenidas en una superficie sembrada de 19.792.100 ha, de las cuales se cosecharon 19.334.915; siendo el rendimiento anual promedio de 3.176 kg ha⁻¹. En la provincia de Córdoba la producción total fue de 18.619.067 t, obtenidas en 5.413.330 ha, de las que se cosecharon 5.284.530, con un rendimiento promedio de 3.523 kg ha⁻¹ (SIIA, 2015).

La soja es un cultivo que se adapta a diferentes texturas de suelo, obteniendo rendimientos adecuados tanto en suelos arenosos como arcillosos, siempre que el agua y los nutrientes no sean limitantes (Baigorri *et al.*, 1997). El nitrógeno está relacionado con la producción de los cultivos, ya que la cantidad de nitrógeno acumulado en las hojas determina la intensidad de la fotosíntesis (Salvagiotti *et al.*, 2009). Deficiencias de este nutriente reducen severamente los rendimientos al restringir la expansión foliar durante las primeras etapas del ciclo, y afectar la fijación de granos en el período reproductivo.

El rendimiento del cultivo de soja se puede determinar mediante dos componentes numéricos principales: el número de granos que se establecen por superficie y el peso individual de los mismos. El número de granos depende de varios subcomponentes, tales como el número de nudos por unidad de área, el número de vainas por nudo y el número de granos por vaina. Resulta de suma importancia identificar los períodos críticos para la definición del rendimiento, para lo cual es fundamental reconocer el período crítico de definición del número de granos y de la parcial compensación que pueda realizar el cultivo en el peso de los mismos. Hay una fuerte base experimental que demuestra que el número de granos del cultivo está limitado por la actividad de la fuente de fotoasimilados durante la etapa crítica R1-R5/R6. Restricciones en la tasa de crecimiento durante la primera parte del período reproductivo pueden ser compensadas por un aumento en el peso de los granos. En cambio, limitaciones posteriores durante la etapa R4-R6 tienen un efecto directo sobre el rendimiento al reducir el número de granos, sin permitir compensaciones a través de un mayor peso de los granos (Kantolic *et al.*, 2003).

Se ha estimado que en la región sojera del país, las necesidades de agua para una soja de primera y segunda oscilan entre 450 y 650 mm y entre 350 y 355 mm, respectivamente. Aunque existe una alta variabilidad anual en la distribución y cantidad de lluvias, es de suma importancia para el manejo del cultivo tener información sobre las

precipitaciones promedio de las diferentes regiones productivas. Conocer esta información permitirá hacer uso de todas las opciones de manejo del cultivo (elección de fechas de siembra, grupo de madurez, ciclo, etc.) que permitan ubicar el período crítico del cultivo en el momento de menor riesgo de estrés (Salinas y Martellotto, 2012).

Dependiendo de la duración del ciclo, los cultivares de soja se dividen en 12 Grupos de Madurez (GM), que van desde los más cortos 00 y 0, cultivados en Canadá y el norte de Europa y Asia, hasta el GM X adaptado a regiones ecuatoriales. En Argentina, se cultivan mayoritariamente soja de los GM II o III al norte de la Patagonia o al sur de Buenos Aires, el GM IV predomina en casi toda la región Pampeana y los GM VI al IX están difundidos en el NOA y NEA (Salado Navarro, 2012).

Con referencia a la calidad del grano, alrededor del 20% de su peso es aceite (rico en ácido linoleico), y un 40% proteína (con alto contenido de lisina) (Kantolic *et al.*, 2003). Este elevado contenido de proteína en el grano, implica que el cultivo necesita acumular una cantidad significativa de nitrógeno (N), nutriente que, de no existir limitantes importantes de otro tipo (radiación, agua, fósforo), condiciona el rendimiento del cultivo (González *et al.*, 1997).

Para producir una tonelada de grano la planta de soja requiere absorber 80 kg de N (Gutiérrez Boem *et al.*, 2008). Dicha demanda la satisface mediante la absorción del nutriente desde el suelo (nitratos y amonio) y, al igual que otras leguminosas, a través de la fijación biológica de N₂ (FBN), basada en la asociación simbiótica con bacterias del suelo (rizobios), en este caso *Bradyrhizobium japonicum* (Ferraris, 2004). A partir de esa relación, se forman los nódulos radicales dentro de los cuales las bacterias transforman el nitrógeno del aire (N₂) en amonio (NH₄⁺), que es la forma asimilable por la planta (González *et al.*, 1997).

Coincidiendo con estas formas de abastecimiento de N, Barraco (2010), le suma en algunos casos el aporte de la aplicación de fertilizantes nitrogenados.

El N mineral disponible en el suelo es la fuente más importante durante las primeras etapas del ciclo de la soja, ya que la FBN comienza alrededor de los 30 días posteriores a la siembra, alcanzando un máximo durante el período reproductivo (Zapata *et al.*, 1987, citado por Gutiérrez Boem, 2008). Las tasas máximas de fijación ocurren entre las etapas reproductivas R5-R6 con valores promedio de 3 y máximos de 5 kg de N fijado/ha/día. Luego de esta etapa el proceso disminuye en forma abrupta (Peticari *et al.*, 2003).

Por ser éste un proceso que conlleva un alto costo energético para la planta, ante una elevada disponibilidad de N en el suelo, se produce una disminución tanto de la formación de nódulos como de la actividad de las bacterias, porque la planta toma el nutriente desde el suelo. Además, existe una relación entre el crecimiento del cultivo y la cantidad de N fijado, y se observa que cultivos que crecen y rinden más, tienen mayores requerimientos pero fijan

mayor cantidad de este nutriente (Gutiérrez Boem, 2008). La evolución de la FBN está relacionada con la tasa de acumulación de carbono (C), por lo tanto, las limitaciones nutricionales que afecten el crecimiento del cultivo afectarán la tasa de acumulación de N (García 2000 citado por Peticari *et al.*, 2003). Por otro lado, otros nutrientes intervienen directamente en el proceso de fijación, como por ejemplo Mg, Mo, Fe y Co (Purcell, 1999 citado por Peticari *et al.*, 2003).

El aporte de la FBN al cultivo puede variar entre el 25 y 84% del N total que absorbe el cultivo (Buttery *et al.*, 1991), dependiendo esa variación de diversos factores como la presencia o no de rizobios, su abundancia en el suelo, género, especie y cepas de los mismos, características físico-químicas del suelo y condiciones ambientales, entre otros (González, 1994).

La práctica más recomendable para lograr que la fijación de nitrógeno sea una fuente importante de este nutriente para el cultivo, es la inoculación de la semilla con cepas de *Bradyrhizobium japonicum* empleando cepas específicas e inoculantes de alta calidad. La respuesta a la inoculación es mayor cuando los lotes no cuentan con antecedentes de soja. No obstante, también se ha observado respuesta a la reinoculación en lotes con historia sojera (Díaz Zorita *et al.*, 2004).

Cuando se producen fallas en el proceso de simbiosis, ya sea por falta de población natural de rizobios o por una mala práctica de la inoculación, el cultivo puede presentar síntomas de deficiencia nitrogenada consistentes en una disminución del crecimiento de las plantas y hojas viejas de una coloración amarillenta, debido a la movilidad del nutriente en la planta (Gutiérrez Boem, 2008).

Un factor ambiental importante a considerar es el déficit hídrico que puede afectar el establecimiento y crecimiento de los nódulos, con un menor flujo de carbohidratos generados por la fotosíntesis, disminuyéndose la actividad fijadora de N. Si ocurren períodos prolongados de sequía durante la etapa reproductiva, pueden provocar un cese temporario o permanente de la actividad fijadora de los nódulos (Ferraris, 2004). Las siembras en condiciones secas provocan la mortandad de bacterias y disminuyen la posibilidad de lograr una nodulación apropiada; la falta de agua en etapas tempranas retrasa la aparición de los nódulos y la falta de agua en etapas reproductivas limita la FBN, restringiendo los rendimientos por menor aporte de N para la formación de granos. Otro aspecto a considerar también, es que la simbiosis tiene sensibilidad a condiciones de anegamiento; con sólo 2-3 días de inundación se puede provocar una alta mortandad de nódulos. Respecto a otros factores que afecten la FBN temperaturas cercanas a 15°C retrasan el proceso de infección y la nodulación; a su vez, no todas las cepas de rizobios toleran temperaturas superiores a los 40°C. La salinidad y la falta de aireación en el suelo también influyen en forma negativa sobre la simbiosis (Peticari *et al.*, 2003).

En cultivos de altos rendimientos, el aporte de N del suelo y de la fijación biológica puede ser insuficiente y una aplicación tardía de N puede producir mejoras del rendimiento (Wesley *et al.*, 1998; citado por Barraco, 2010). Al respecto, algunos autores encontraron respuesta y otros no.

Las deficiencias de nitrógeno reducen el rendimiento al restringir la expansión foliar durante las primeras etapas del ciclo y afectar la fijación de granos en el período reproductivo (Ferraris y Couretot, 2007).

Actualmente, con la implementación del sistema de siembra directa y la gran expansión que presentó el mismo en Argentina, se produjeron cambios a nivel de los procesos que afectan la dinámica del nitrógeno en el suelo. Cuando el laboreo es minimizado, se reducen las tasas de mineralización y nitrificación, y se incrementa la inmovilización de N y la desnitrificación. Esto acrecienta la demanda de N, estimulando desde etapas tempranas del cultivo la FBN (Van Kessel y Hartley, 2000 citado por Peticari *et al.*, 2003). Ante esta perspectiva, se requieren nuevos estudios ajustados al estado actual de los conocimientos científicos y de manejo del cultivo de soja en Argentina (Peticari *et al.*, 2003).

La FBN es un proceso que se integra con fuerte impacto en sistemas agropecuarios sustentables. Como tal se aprecia la necesidad de continuar mejorando la eficiencia de utilización de este bioinsumo, a través de diagnósticos y programas genéricos, considerando que urge mantener e incrementar la competitividad del sector agropecuario, principal generador de riquezas genuinas de la Argentina (Bragachini, 2001 citado por Peticari *et al.*, 2003).

La importancia de este trabajo radica en que se propone continuar estudiando el balance de nitrógeno en soja para diferentes GM y, en este caso, bajo dos condiciones hídricas en Río Cuarto.

ANTECEDENTES

En Balcarce, Cicore *et al.* (2005) evaluaron la materia seca nodular (MSN) y el nitrógeno acumulado (N-acum) en el cultivo de soja según el sistema de labranza [siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)] y la disponibilidad de azufre (S) en dos condiciones hídricas en la campaña la 2002/03. La MSN determinada en R5 no fue afectada por la aplicación de S; sin embargo, fue mayor bajo SD en secano. Bajo riego, la MSN fue mayor en SD que en LC, con diferencias no significativas. El N-acum no se afectó por la fertilización azufrada y bajo condiciones de secano fue significativamente mayor en LC. El

N-acum se relacionó positivamente con la MSN; aunque la relación fue baja sugiriendo que no es el único factor interviniente en la fijación biológica del nitrógeno.

Pietrarelli *et al.* (2008) en Córdoba estudiaron el efecto de la secuencia de cultivos, la inoculación y la fertilización sobre la nodulación y el rendimiento del cultivo de soja. Se trabajó con diferentes niveles de estrés hídrico, bajo siembra directa con secuencias soja-soja y maíz-soja, donde se evaluó el efecto de la aplicación de fertilizante no nitrogenado e inoculante. En la etapa R5 del cultivo se midieron el número y peso fresco de nódulos en raíces principal y secundarias y el porcentaje de nódulos funcionales; también, rendimiento de granos y morfología de raíces. Encontraron que el peso promedio de los nódulos de la raíz principal fue la variable más sensible a las diferentes prácticas culturales. La rotación maíz-soja favoreció más al sistema nodular. Los efectos de prácticas como fertilización e inoculación en la mayoría de las variables, no resultaron significativos. En la campaña húmeda los nódulos de la raíz principal pesaron el doble que en la campaña seca. Los rendimientos no mostraron diferencias entre tratamientos ni correlacionaron con los patrones de nodulación. La mayor nodulación se presentó en lotes de menor disponibilidad de nitrógeno.

Di Ciocco *et al.* (2010) en Luján, realizaron experimentos con soja en suelos Argiudoles de la Región Pampeana determinando rendimiento, producción de biomasa aérea, FBN y balance de nitrógeno con el método de disolución isotópica ^{15}N . Se emplearon isólinas no nodulantes o gramíneas a modo de control como no fijadores de nitrógeno. Se diseñaron bloques al azar comparándose dos sistemas de labranza, convencional y siembra directa. En líneas fijadoras se obtuvo un rendimiento promedio de 2310 kg/ha. La FBN arrojó un promedio 133,4 kg/ha, significando un 34,5% del contenido de nitrógeno de la planta y se correlacionó con la biomasa aérea, el rendimiento y el nitrógeno de la biomasa. No ocurrieron diferencias entre los sistemas de labranza en producción de biomasa, contenido de nitrógeno, FBN o rendimiento.

HIPÓTESIS

El grupo de madurez de la soja y las condiciones hídricas durante el ciclo del cultivo afectan la fijación biológica del nitrógeno, la producción de biomasa y el rendimiento de granos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el aporte relativo de la FBN a la nutrición nitrogenada de cultivares de soja de los GM III, IV y V cultivados en secano y bajo riego en la región de Río Cuarto (Córdoba).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Cuantificar los aportes relativos de N del suelo, la precipitación y la FBN en cada cultivar bajo las dos condiciones hídricas del estudio.
- Evaluar la nodulación durante el ciclo del cultivo y su relación con el aporte de la FBN al cultivo.
- Cuantificar el crecimiento del cultivo en etapas fenológicas clave, los componentes numéricos del rendimiento y el rendimiento de semillas.
- Establecer relaciones entre los aportes relativos de N y el crecimiento / rendimiento de los cultivares estudiados para las condiciones hídricas del estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Veterinaria- UNRC (33° 06' S, 64° 17' W y a 434 msnm), sobre un suelo Haplustol típico de textura franca arenosa fina.

Se sembraron tres cultivares de soja de los GM III (TJ 2137), IV (TJ 2246) y V (TJ exp. 2255), en dos condiciones hídricas (secano y bajo riego). La siembra se realizó el día 8 de noviembre de 2012 con una máquina de siembra directa de 9 surcos, con una DEH 0,52 m y una densidad de 30 semillas/m². La semilla no fue inoculada y se realizó el control fitosanitario previo a la siembra y durante el ciclo para mantener al cultivo libre de malezas, plagas y enfermedades. El riego fue por aspersión mediante equipo de avance frontal y la frecuencia de aplicación basada en reponer semanalmente el agua evapotranspirada (según datos de ETo obtenido en la estación agrometeorológica instalada en el sitio experimental).

Los 6 tratamientos, resultantes de combinar ambos factores (cultivar y condición hídrica), se asignaron a un diseño de bloques al azar con tres repeticiones.

Evaluaciones:

Balance de N

Se aplicó el Balance Relativo de N propuesto por Cholaky *et al.* (1986) para cuantificar las variaciones de su contenido en el sistema suelo-planta resultante de los cambios en las entradas y salidas del sistema y de las transformaciones internas durante el ciclo del cultivo. El objetivo principal fue estimar el aporte por FBN mediante la siguiente formulación:

$$\text{FBN} = N_{pc} - [(N_{ss} + N_m + N_{ll}) - N_{sc}] \quad (1)$$

donde:

FBN= Fijación biológica del nitrógeno

N_{pc}= Contenido total de N en planta a la cosecha

N_{ss}= Contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra

N_m= N derivado de la mineralización de la materia orgánica del suelo

N_{ll}= N aportado por las lluvias registradas durante el ciclo, estimado en 2,5 ppm de N por cada mm de agua precipitada (Harpaz, 1975).

N_{sc}= Contenido de N-NO₃ en suelo a la cosecha

Además, se calculó la variación de N en el suelo según la siguiente ecuación:

$$\text{VNS} = (N_{ss} + N_m) - (N_{sc} + N_{\text{rastrajo}}) \quad (2)$$

donde:

N_{rastrajo}= Contenido de N en planta a cosecha sin incluir los granos

Para cuantificar los parámetros de las ecuaciones (1) y (2) se realizaron análisis de suelo (contenido de MO y N-NO₃) a la siembra y cosecha del cultivo en un laboratorio de suelos especializado. A tal efecto, se tomaron muestras compuestas (formadas por 10 submuestras) en dos estratos del perfil (0-20 y 20-40 cm de profundidad). El dato de la densidad aparente (1,3 g cm⁻³) para expresar los resultados en kg ha⁻¹ se tomó de estudios previos realizados en el mismo campo experimental del presente trabajo. El factor para estimar el N mineralizado durante el ciclo del cultivo de 2,12%, fue proporcionado por especialistas del área Relación suelo-planta (Facultad de Agronomía y Veterinaria UNRC).

También, como un aporte complementario y a los fines de determinar en porcentaje el nivel de extracción de nitrógeno se realizó el cálculo del índice de cosecha de nitrógeno, tal como lo expresa la siguiente ecuación:

$$\text{ICN} = (\text{cantidad de N en semilla} / \text{cantidad total de N en biomasa aérea}) \quad (3)$$

Biomasa

En las etapas fenológicas V7/V8, R1, R5, R7 se recolectaron 3 muestras de 1/3 de m² (0,64 m lineales de surco) por tratamiento y repetición. Todas las plantas de cada muestra se separaron en los órganos (tallos+ramas, hojas, frutos y semillas) y se secaron en estufa de circulación forzada de aire a 45°C y hasta peso constante que fue registrado.

Nitrógeno en Materia Seca

De cada muestra de plantas, mencionadas en el punto anterior, se tomó una sub muestra representativa destinadas a cuantificar el contenido de N mediante análisis de laboratorio con el método de micro Kjeldahl. Con ese dato se calculó, posteriormente, la cantidad de N extraído por el cultivo de soja.

Nodulación

En las etapas fenológicas R1, R5 y R7 se determinó el número y peso de los nódulos discriminados según su ubicación en raíz principal y raíces secundarias por tratamiento y repetición. Para ello, se muestrearon las plantas presentes en 1/3 de m² con especial cuidado para extraer la mayor parte del sistema radical. En laboratorio, las muestras se lavaron para eliminar restos de tierras y proceder al recuento de nódulos que luego se colocaron en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante que fue registrado.

Componentes del rendimiento

En madurez de cosecha (etapa R8) se tomaron tres muestras de 1m² cada una (1,92 m sobre la hilera) y se realizaron las siguientes mediciones:

- Número de plantas por m²
- Número de frutos por planta
- Número de semillas por fruto
- Peso de 100 semillas

Con estos datos se calculó el rendimiento en granos por hectárea ajustado a 13,5% de humedad.

Clima

Se obtuvieron datos diarios durante el ciclo del cultivo de las variables meteorológicas: precipitaciones (mm), evapotranspiración de referencia (ET_o, mm), temperaturas del aire, media, máxima y mínima (°C) y radiación solar fotosintéticamente activa (RFA) procedentes de una estación agrometeorológica instalada en el área experimental (CAMDOCEX) y ubicada en cercanías del ensayo. Con estos datos se realizó un análisis de las condiciones meteorológicas de la estación de crecimiento del cultivo de soja (2012/13) cotejándolas con datos de series históricas locales (1974-1993).

Análisis Estadísticos

Se aplicó un ANOVA para detectar diferencias debidas a los tratamientos estudiados y las medias se contrastaron según test LSD ($p= 0,05$) utilizando el programa estadístico INFOSTAT versión 2011 (Di Renzo *et al.*, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones meteorológicas

En la figura 1 se observan datos de la oferta ambiental referidos a la temperatura media del aire, RFA y lluvias para la campaña 2012/13 y el periodo 1974-93, respectivamente.

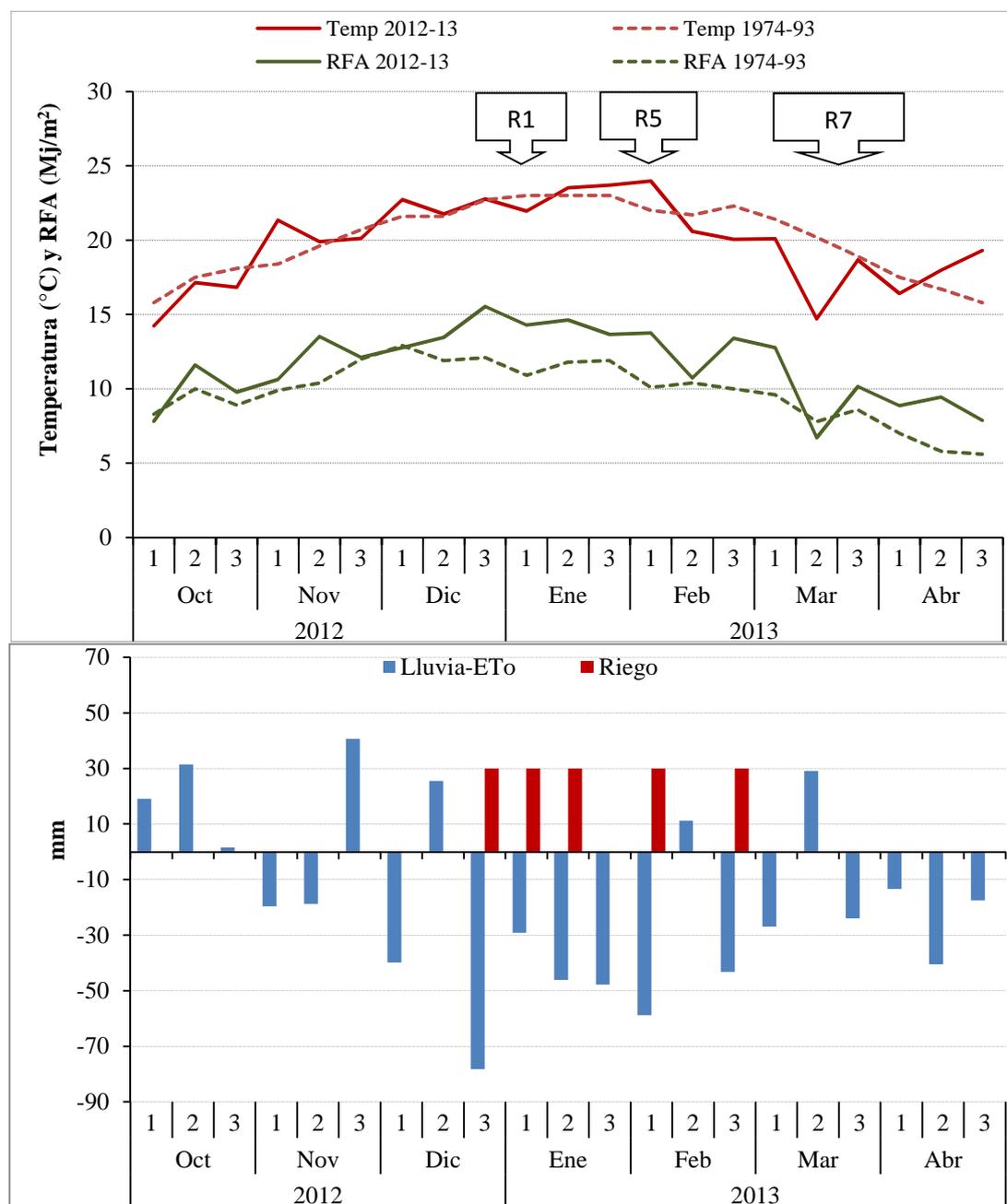


Figura 1: Valores decádicos de temperatura media del aire y RFA durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13) y de la serie 1974-1993 (arriba); y balance hidrológico (Lluvia-ETo) y riegos aplicados durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13) en Río Cuarto (Córdoba) (abajo). *Las flechas indican el rango de variación del momento de ocurrencia (fechas) de las etapas R1, R5 y R7 para los GM evaluados en este trabajo.*

La evolución de la temperatura durante el ciclo 2012/13 fue similar a la registrada para el período 1974-1993, excepto entre la segunda década de febrero y la tercera de marzo donde se registraron valores inferiores a la serie histórica, ocurriendo el valor más bajo (14,7 °C) en la segunda década de marzo. Respecto a la radiación registrada en el ciclo 2012/13 fue, en términos generales, superior a la del período 1974-1993 hasta mediados de marzo donde se produjo una caída probablemente causada por condiciones de alta nubosidad y precipitaciones ocurridas en ese período. Luego, hacia fines de marzo y abril, los valores fueron nuevamente superiores a los de la serie histórica. Este patrón puede ser un indicador de condiciones que determinen diferencias para el crecimiento del cultivo según los diferentes GM y las condiciones hídricas evaluadas. En tal sentido, el tamaño (ancho) de las flechas verticales representa el rango de duración y el momento de ocurrencia de las etapas fenológicas R1, R5 y R7 para los diferentes tratamientos evaluados.

La parte inferior de la figura 1, muestra la ocurrencia de los déficits hidrológicos (lluvia-ETo) en intervalos decádicos donde la demanda atmosférica superó a la oferta hídrica de las lluvias. El valor acumulado de esa deficiencia totalizó 486,5 mm entre la primera década de noviembre/2012 y la segunda década de abril/2013. Por su parte, la suma de los valores positivos del balance para ese mismo período y del aporte por riego (150 mm) fue de 256,5mm. También se indica la oportunidad de aplicación de los 5 riegos de 30 mm cada uno. El primero fue en diciembre/2012, seguido de 2 riegos en enero y otros 2 en febrero de 2013.

Crecimiento: Biomasa aérea total

En la figura 2 se presentan las curvas de biomasa aérea total (g m^{-2}) producida por los GM evaluados (III, IV y V) en secano y bajo riego para el ciclo agrícola 2012/13, desde la emergencia del cultivo hasta la etapa R7 (en función de los grados días después de siembra).

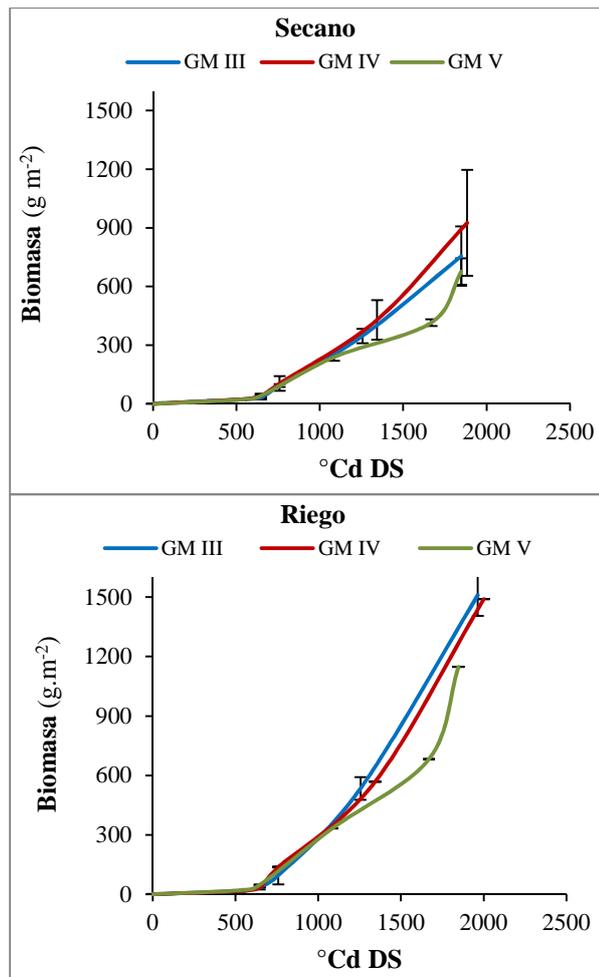


Figura 2: Biomasa aérea total producida y acumulada por los cultivares (GM III, IV y V) en condición de secano y con riego durante el ciclo del cultivo de soja (2012/13), en Río Cuarto (Córdoba). Líneas verticales indican el error estándar de la media.

El crecimiento de cada cultivar describió un patrón de respuesta similar en ambas condiciones hidrológicas evaluadas, con una notable y significativa diferencia en los valores de biomasa aérea total producida y acumulada a R7, entre secano y riego ($p < 0,0001$) y entre cultivares ($p = 0,0023$), pero sin efecto debido a la interacción entre ambos factores ($p = 0,1424$).

Así, en secano la cantidad de biomasa promedio de los tres GM fue de 786 g m^{-2} , mientras que en la situación bajo riego fue de 1383 g m^{-2} , lo que evidencia la respuesta del cultivo a condiciones hídricas favorables. Por su parte, la respuesta genotípica, promedio de ambas condiciones hidrológicas, mostró diferencias a favor de los GM III y IV, con 1133 y 1208 g m^{-2} , respectivamente; sin diferencias entre ellos pero significativamente superiores al GM V (913 g m^{-2}).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Rabery *et al.*, (2015) quienes encontraron, para todas las variables estudiadas, una respuesta claramente superior cuando

las plantas fueron sometidas a riego. Y también concuerdan con el planteo de Salvagiotti (2009), respecto a que en Argentina la maximización de la producción estará vinculada al manejo del agua, dado que la agricultura extensiva se realiza fundamentalmente en condiciones de secano. Lo expuesto puede corroborarse con los resultados obtenidos en este estudio, donde la biomasa producida y acumulada al final del ciclo (etapa R7) fue claramente superior en la condición hídrica no limitante; siendo la producción de biomasa en secano un 43,2% inferior a la generada bajo riego.

Nodulación

Los cuadros 1 y 2 muestran el resultado de los ANAVA y comparación de medias aplicados al número y peso seco de nódulos por planta, respectivamente medidos en las etapas fenológicas R1, R5 y R7. Para ambas variables, el valor total por planta se compone de los valores medidos en raíz principal y raíces secundarias.

Es frecuente que estas variables presenten inestabilidad relativa a las condiciones de toma de muestras y al procesamiento posterior de las mismas, que se refleja en los valores relativamente altos del coeficiente de variación. A pesar de los cuidados implementados durante el muestreo y al tamaño de las muestras (repeticiones), esta situación también se observó en este estudio.

El número de nódulos por planta varió significativamente en respuesta a la condición hídrica en las etapas R1 ($p=0,0493$) y R7 ($p=0,0362$), sin cambios significativos debidos al GM y a la interacción entre ambos factores. En ambas etapas, las plantas cultivadas en secano tuvieron mayor número de nódulos respecto a las crecidas bajo riego.

Por su parte, el peso seco de nódulos por planta varió significativamente con el GM de los cultivares estudiados en las etapas R1 ($p=0,0080$) y R5 ($p=0,0719$), sin cambios debidos a la condición hídrica y a la interacción entre ambos factores. En las dos etapas, el GM V acumuló más biomasa nodular que los GM III y IV.

Cuadro 1. Análisis estadístico del número de nódulos por planta (en raíz principal + raíces secundarias) cuantificados en las etapas R1, R5 y R7 de los tres cultivares de soja y bajo las dos condiciones hídricas evaluadas.

Fuente de Variación	Factores	Número de nódulos (pl ⁻¹)		
		R1	R5	R7
Grupo madurez (GM)	III	26,2	43,7	38,4
	IV	21,4	46,5	38,8
	V	32,6	59,7	21,1
Condición hídrica (CON)	Secano	30,9 A	48,9	40,5 A
	Riego	22,5 B	50,9	24,9 B
GM x CON	III _s	25,3	35,4	48,6
	III _r	27,0	52,1	28,2
	IV _s	26,1	42,7	44,0
	IV _r	16,7	50,2	33,5
	V _s	41,3	68,7	28,9
	V _r	23,9	50,6	13,2
Valor de <i>p</i>	GM	0,0948	0,2336	0,0806
	CON	0,0493	0,7968	0,0362
	GM x CON	0,1682	0,2011	0,8303
CV (%)		30,4	32,5	42,7

Para el factor condición hídrica, letras distintas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($p < 0,05$)

Cuadro 2. Análisis estadístico del peso seco de nódulos por planta (en raíz principal + raíces secundarias) cuantificados en las etapas R1, R5 y R7 de los tres cultivares de soja y bajo las dos condiciones hídricas evaluadas.

Fuente de Variación	Factores	Peso de nódulos (g planta ⁻¹)		
		R1	R5	R7
Grupo madurez (GM)	III	0,07 B	0,19 B	0,21
	IV	0,10 B	0,23 AB	0,28
	V	0,18 A	0,34 A	0,11
Condición hídrica (CON)	Secano	0,12	0,21	0,17
	Riego	0,10	0,29	0,23
GM x CON	III _s	0,07	0,13	0,13
	III _r	0,06	0,24	0,29
	IV _s	0,11	0,17	0,24
	IV _r	0,08	0,29	0,32
	V _s	0,18	0,33	0,13
	V _r	0,17	0,35	0,09
Valor de <i>p</i>	GM	0,0080	0,0719	0,1135
	CON	0,4483	0,1090	0,3018
	GM x CON	0,9065	0,6673	0,4212
CV (%)		46,8	41,4	63,4

Para el factor grupo de madurez, letras distintas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($p < 0,05$)

El efecto que genera la condición hídrica no limitante sobre la masa nodular fue observado por Cicore *et al.* (2005) quienes observaron que el experimento con riego desarrolló mayor materia seca nodular que el experimento en secano. Similar tendencia se produjo en el estudio de Pietrarelli *et al.* (2008), donde la condición de mayor disponibilidad hídrica determinó un promedio de peso seco de nódulos totales por planta 2,2 veces superior al registrado en la campaña con estrés hídrico, demostrando que el agua es un factor condicionante de la nodulación. En el presente estudio, se produjo un efecto similar con valores levemente superiores de biomasa de nódulos en la condición hídrica no limitante.

La fijación biológica del nitrógeno en la soja es un proceso metabólico altamente sensible al estrés hídrico. La demora en la infección por esa causa hace que la nodulación se desplace hacia las raíces secundarias y terciarias, ya que sólo las porciones de raíces muy jóvenes pueden ser infectadas exitosamente. A igualdad de masa nodular, los nódulos desarrollados sobre raíz primaria, cercanos al cuello de la planta, tienen una actividad nitrogenasa específica varias veces superior a la de las raíces secundarias o terciarias (González y Racca, 2012). Esto es una muestra más del efecto que genera una mejor condición hídrica del cultivo, beneficiando a la nodulación en raíz principal y, con ello, favorecer el proceso de FBN.

La planta reacciona rápidamente cuando se ve afectada por falta de agua y la FBN tiende a anularse. La primera respuesta de la planta a nivel del sistema nodular, es inactivar la nitrogenasa. Si la humedad edáfica se restablece, también lo hará la FBN, pero si el déficit se profundiza, ese “período elástico” es superado y se producirá la inactivación definitiva de la enzima, seguida de muerte y desprendimiento de nódulos. La planta crecerá, a partir de entonces, a expensas del N edáfico sin aporte adicional del nitrógeno atmosférico (González y Racca, 2012).

Según Peticari *et al.*, (2003) en la etapa reproductiva R5-R6 una nodulación adecuada presenta 40-50 nódulos por planta, de los cuáles al menos 12 se encuentran en la parte superior de la raíz primaria y son de tamaño mediano a grande (4-6 mm de diámetro). Esta condición se cumplió en todos los GM (44 a 60 nódulos planta⁻¹) y en ambas condiciones hídricas (49 a 51 nódulos planta⁻¹) en la etapa R5. Por su parte, el peso seco de nódulos por planta óptimo ronda los 800 mg y el peso individual de 7 a 9 mg nódulo⁻¹. En este caso, los valores obtenidos fueron inferiores a lo referido por Peticari *et al.* (2003) ya que la masa nodular varió entre un mínimo de 130 mg (GM III secano) y un máximo de 350 mg (GM V riego). La coloración interna de la mayoría de los nódulos fue rojiza o rosada lo cual indica su condición de activo, porque cuando el nódulo se deteriora, por senescencia natural o a causa de algún estrés y finaliza la FBN, el color interno cambia a verde por la presencia de legcoleglobina, y en el estado final previo a la degradación del nódulo se torna amarronado por la presencia de legmethemoglobina (Peticari *et al.*, 2003).

La dinámica temporal de la FBN durante el ciclo del cultivo tiene tres etapas diferentes. La primera de ellas, se extiende desde la emergencia hasta casi 30 días posteriores con un aporte de la FBN muy bajo debido a que el aparato nodular se está desarrollando y tiene baja funcionalidad. En ese lapso, la provisión de N al cultivo depende en gran medida del aporte que hace el suelo. En situaciones donde se presenta un bajo aporte de N del suelo, esta etapa puede ser crítica para la formación de los nódulos, ya que el N disponible puede no ser suficiente para desarrollar el área foliar mínima necesaria para el crecimiento inicial del cultivo y de los nódulos. En línea con este razonamiento, Collino *et al.* (2007) mostraron que la radiación acumulada entre emergencia y R1 estuvo positivamente relacionada con la cantidad de N aportado por FBN (asociada a un mayor desarrollo del sistema nodular). A partir de los 30 días el aparato nodular es capaz de trabajar a la máxima tasa y la FBN tendrá mayor importancia relativa en la acumulación de N por el cultivo. Cualquier factor que afecte la actividad durante este periodo afectará el aporte de FBN. La tercera etapa ocurre desde el comienzo del llenado de granos en el cultivo (R5). A partir de este momento, los granos se convierten en el principal destino del carbono y nutrientes en la planta y, por lo tanto, los nódulos pasan a ser un destino secundario. Las tasas de FBN van decayendo en este período y podrían llegar a limitar el aporte de N al cultivo (Salvagiotti *et al.*, 2009).

Un aspecto a tener en cuenta sobre la importancia del desarrollo de nódulos en raíz principal es que esos nódulos contribuirán en mayor medida al aporte de N derivado de la FBN por su mayor actividad entre R1 y R5, etapa cuando la tasa de FBN es más alta (McDermott y Graham, 1989). Por otra parte, se ha observado que la actividad de los nódulos ubicados en raíces laterales tendría mayor importancia durante el llenado de granos, cuando las tasas de FBN decrecen (Salvagiotti *et al.*, 2009).

Balance de Nitrógeno

En el cuadro 3, se presenta el balance relativo de N calculado para cada cultivar y las dos condiciones hídricas evaluadas en este estudio. El análisis correspondiente está basado en parámetros descriptivos (promedios de factores).

Cuadro 3: Balance relativo de nitrógeno para los tres grupos de madurez de soja cultivados en las dos condiciones hídricas (valores en kg ha⁻¹)

GM	Condición hídrica y ciclo	N-NO ₃ en el suelo		Aportes de N		N extraído por el cultivo	FBN	Aporte de la FBN%	Variación de N en el suelo
		a la siembra	a cosecha	Lluvias	Mineralización				
III	Riego	86,1	40,1	11,6	100,2	451,7	293,9	65,1	54,7
IV		86,1	41,8	11,8	100,2	502,8	346,5	68,9	27,7
V		86,1	41,9	12,7	100,2	363,0	205,9	56,7	88,4
<i>Promedio</i>		86,1	41,3	12,0	100,2	439,2	282,1	63,6	56,9
III	Secano	86,1	42,8	11,6	100,2	246,4	91,4	37,1	77,6
IV		86,1	42,8	11,8	100,2	242,2	87,0	35,9	69,2
V		86,1	42,0	12,7	100,2	248,9	91,9	36,9	95,7
<i>Promedio</i>		86,1	42,6	12,0	100,2	245,8	90,1	36,6	80,8

El contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra fue de 86,1 kg ha⁻¹, mientras que a la cosecha del cultivo el valor promedio se redujo en más del 50% arrojando para la condición con riego 41,3 kg ha⁻¹ y 42,6 kg ha⁻¹ en secano, sin diferencias destacadas entre genotipos. El contenido de MO inicial fue de 2,45% para los primeros 20 cm del perfil, y la mitad de ese valor entre los 20 y 40 cm de profundidad. Para calcular el aporte por mineralización de la MO, se aplicó un porcentaje estimado del 2,12% que arrojó 100,2 kg ha⁻¹ de N adicional al determinado en el suelo a la siembra. El aporte por lluvias entre la siembra y R8 fue, en promedio, de 12 kg ha⁻¹ para el ensayo en su conjunto.

La cantidad de N extraído por el cultivo al final del ciclo se obtuvo afectando la biomasa aérea acumulada por cada GM y condición hidrológica, por el contenido de N medido en los órganos aéreos de la planta. El valor calculado para cada condición hidrológica fue, en promedio, un 56% menor en secano que en la condición bajo riego. También se observaron valores diferentes entre grupos de madurez para la condición bajo riego, correspondiendo el valor mayor de N extraído al GM IV (503 kg ha⁻¹), seguido del GM III con 452 kg ha⁻¹ y el menor valor al GM V (363 kg ha⁻¹).

Los requerimientos de N del cultivo son abastecidos por el nutriente proveniente del suelo (cantidad disponible inicial más el generado por mineralización de la MO durante el ciclo del cultivo), el aportado por la FBN y, en menor proporción, por el N atmosférico que incorporan las lluvias. En este caso, la condición bajo riego recibió el mayor aporte por FBN con un valor, promedio de los tres cultivares, de 282 kg ha⁻¹ que representa el 63,6% del N total absorbido. En secano el valor medio fue de 90 kg ha⁻¹ equivalente al 36,6% del total requerido por el cultivo.

La variación del nitrógeno del suelo fue positiva en ambas condiciones hidrológicas; pero en la situación hídrica no limitante se obtuvo un valor menor (57 kg ha⁻¹) que el calculado para secano (81 kg ha⁻¹). Esa diferencia podría ser explicada por la reposición del nitrógeno contenido en la biomasa vegetativa (rastrojo) superior bajo riego. Estos valores

reflejan la importancia de la FBN y sus aportes significativos a la nutrición nitrogenada de la soja que, de no existir o estar limitados como en la condición de secano, se evidenciaría en valores de rendimiento inferiores a los registrados en este trabajo. Así lo refiere Peticari *et al.* (2003) indicando que al limitarse la FBN, el balance de N del suelo resulta negativo en extremo, situación que convierte a la soja en un cultivo que reduce la fertilidad del suelo.

El ICN, calculado según la ecuación (3), se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4: Índice de cosecha de nitrógeno (ICN) de los GM III, IV y V de soja cultivados bajo riego y en secano (2012/13)

GM	Condición hídrica	N semilla kg ha ⁻¹	N total biomasa kg ha ⁻¹	ICN
III	Riego	360,24	451,69	0,80
IV		386,05	502,80	0,77
V		307,04	362,98	0,85
<i>Promedio</i>		351,11	439,16	0,80
III	Secano	180,53	246,41	0,73
IV		167,96	242,21	0,69
V		200,40	248,92	0,81
<i>Promedio</i>		182,96	245,85	0,74

Los valores de ICN fueron levemente superiores para la condición hídrica no limitante (0,80 en promedio de los tres cultivares) respecto a la situación en secano con 0,74. Al comparar entre GM, los promedios de ambas condiciones hídricas muestran que el GM V alcanzó el mayor valor (0,83) seguido de los GM III y IV cuyos ICN fueron similares. En general, estos valores se asemejan al dato señalado por Fontanetto y Keller (2006), quienes informaron para soja un índice de cosecha de N de 0,75.

Rendimiento en granos y sus componentes directos

En el cuadro 5 se presenta el rendimiento en granos y sus componentes directos (número de semillas m⁻² y peso individual, g/100 semillas). La condición hídrica más favorable del tratamiento con riego se correspondió con un rendimiento mayor, que también se reflejó en las respuestas de los componentes directos. Lo contrario se produjo en la situación de secano. Precisamente el ANAVA reveló diferencias altamente significativas para la condición hídrica en el rendimiento ($p=0,0002$), el número de semillas por superficie ($p=0,0003$) y su peso individual ($p=0,0078$). No fue así para el factor genotipo representado por los GM evaluados, excepto para el peso individual de las semillas con diferencias significativas ($p=0,0854$) entre el GM III y los otros dos. En cuanto a la interacción entre ambos factores (genotipo y condición hídrica), sólo fue significativa para el componente peso individual de semillas ($p=0,0054$) con un patrón de respuesta similar para los GM III y

IV, es decir, ambos fueron superiores con riego y menores en secano; mientras que en el GM V el peso individual no difirió entre riego y secano.

Cuadro 5: Rendimiento en grano y sus componentes directos (número de semillas por m² y peso de 100 semillas) de los GM III, IV y V de soja cultivados en secano y con riego durante el ciclo 2012/13

Fuente de Variación	Factores	Semillas		
		Nº m ⁻²	Peso g/ 100	Rendimiento kg ha ⁻¹
Grupo madurez (GM)	III	3045	16,81 A	5183,5
	IV	3344	16,62 B	5673,0
	V	3306	15,81 B	5192,3
Condición hídrica (CON)	Secano	2349 B	15,85 B	3722,8 B
	Riego	4114 A	16,98 A	6977,4 A
GM x CON	III _s	2319	15,71 B	3637,7
	III _r	3771	17,91 A	6729,3
	IV _s	2358	15,59 B	3674,3
	IV _r	4330	17,66 A	7671,7
	V _s	2370	16,26 B	3853,3
	V _r	4243	15,36 B	6531,3
Valor de p	GM	0,7566	0,0854	0,7669
	CON	0,0003	0,0078	0,0002
	GM x CON	0,8169	0,0054	0,6829

Para cada factor y la interacción, letras distintas indican diferencias significativas según test LSD Fisher ($p < 0,05$)

Los resultados expuestos permiten llegar a la misma conclusión que Rabery *et al.* (2015) estableciendo que cuando los niveles de precipitación durante el ciclo del cultivo no son satisfactorios, la aplicación de riego complementario a un cultivo de soja, puede contribuir a que las plantas expresen sus características productivas, y que éstas se traduzcan en un mayor rendimiento de granos.

Relaciones funcionales

A continuación se presentan y analizan algunas relaciones funcionales entre la nodulación, y su producto derivado, la FBN, y entre ésta y el rendimiento en granos y sus componentes directos.

La figura 3 presenta la relación entre la masa nodular (peso seco de nódulos por planta) en el estadio R5 y la fijación biológica del nitrógeno. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,60$) indica que el 60% de la variación observada en la FBN se explicaría por los cambios en la biomasa de nódulos. Además, la distribución de los datos muestra claramente el efecto de la condición hídrica contrastante entre los tratamientos evaluados.

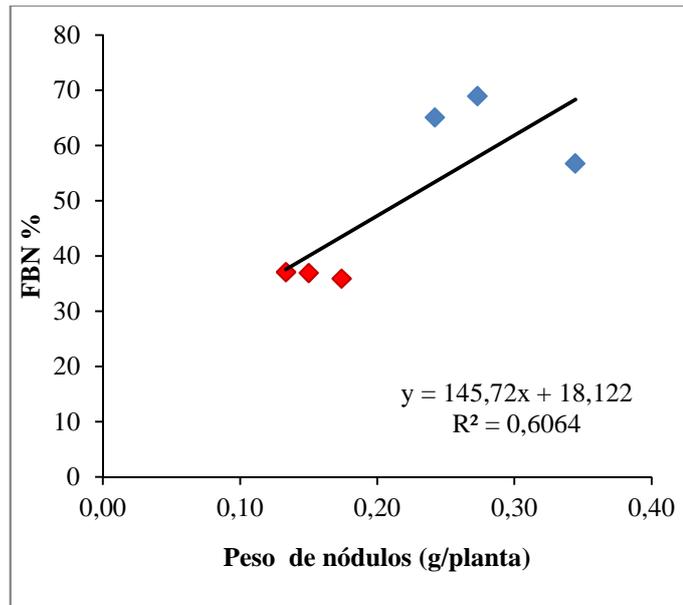


Figura 3: Relación entre el peso seco de nódulos (g/ planta) en R5 y el porcentaje de FBN para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones, los símbolos azules corresponden a la situación bajo riego, y los rojos a la de secano.

Al evaluar el efecto de la FBN sobre los componentes directos del rendimiento (número de semillas m^{-2} y peso de 100 semillas) se observó para ambos una correlación lineal y positiva (Figura 5), pero el grado de ajuste fue superior ($R^2 = 0,89$) entre la FBN y el número de granos por superficie, principal componente determinante del rendimiento en granos. Mientras que el ajuste fue menor con el peso individual de las semillas ($R^2 = 0,54$).

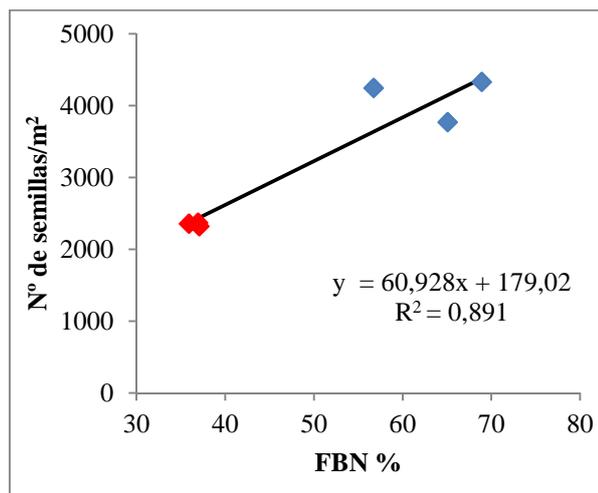


Figura 4: Relación entre la FBN y el Nº de semillas m^{-2} para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones, los símbolos azules corresponden a la situación bajo riego, y los rojos a la de secano.

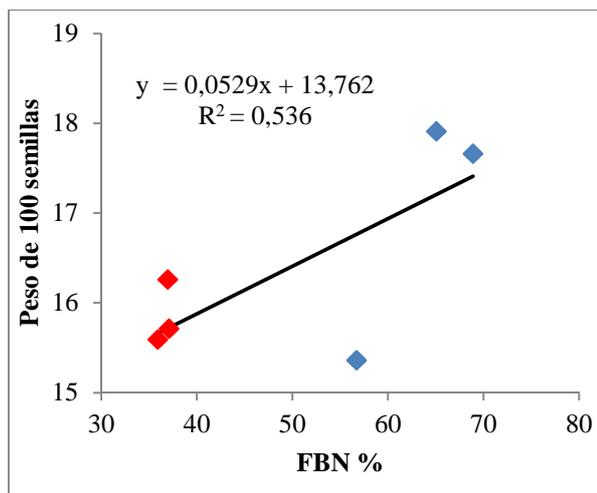


Figura 5: Relación entre la FBN y el peso de 100 semillas para el cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones, los símbolos azules corresponden a la situación bajo riego, y los rojos a la de secano.

Por último, se cuantificó la relación entre la FBN y el rendimiento en granos (Figura 6). La misma resultó positiva y con un elevado grado de ajuste ($R^2 = 0,98$), ratificando la importancia del aporte vía simbiosis a la nutrición nitrogenada del cultivo a través de una mayor biomasa nodular como señaló Cicore *et al.* (2005). Así mismo, muestra el impacto negativo que resulta cuando las condiciones de cultivo presentan limitantes severas como el estrés hídrico en el presente trabajo, similar a lo hallado por Rabery *et al.* (2015).

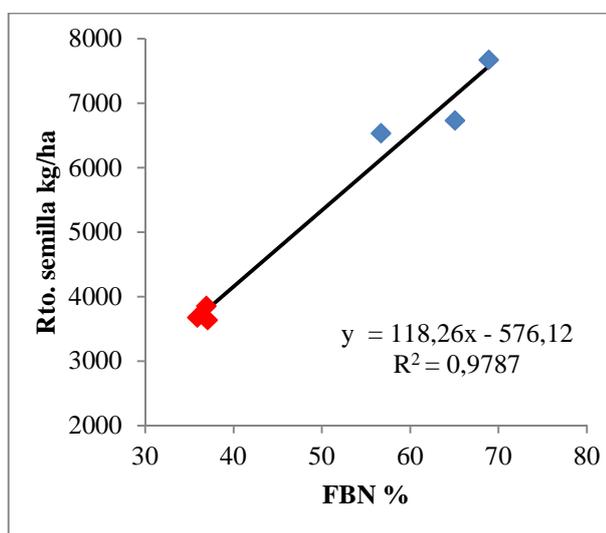


Figura 6: Relación entre la FBN y el rendimiento en granos del cultivo de soja (2012/13). Valores promedio de 3 repeticiones, los símbolos azules corresponden a la situación bajo riego, y los rojos a la de secano.

CONCLUSIONES

El estudio permitió validar la hipótesis planteada para la variación de rendimiento debida a condición hídrica, no así para los cultivares evaluados.

Los resultados obtenidos evidenciaron claramente la influencia de las condiciones hídricas evaluadas (riego y seco) sobre el rendimiento en grano obtenido que resultó un 87,4% superior con riego comparado con la condición de seco.

Esa diferencia en el rendimiento resultó de un mayor número de granos por superficie y granos de mayor peso individual bajo la condición hídrica no limitante y relacionada con el aumento de la biomasa nodular formada entre seco y riego, que impactó positivamente en la FBN.

La metodología de Balance Relativo de Nitrógeno permitió cuantificar los aportes de N del suelo y de la fijación biológica a la nutrición nitrogenada del cultivo. La cantidad total de N extraído por el cultivo resultó, en promedio de los tres cultivares, superior bajo riego (439 kg ha^{-1}) comparado con seco (246 kg ha^{-1}). Del total extraído, el aporte por FBN fue del 63,6 % para la condición riego y del 36,6% para seco.

Se cuantificaron relaciones funcionales entre la biomasa nodular y la FBN ($R^2=0,61$), y entre ésta y los componentes directos del rendimiento (número de granos por superficie, $R^2=0,89$; y peso individual de los granos, $R^2=0,54$), y el rendimiento en granos ($R^2=0,98$). Todas tuvieron ajustes lineales y positivos.

El índice de cosecha de N tuvo valores similares entre condiciones hídricas y cultivares y cercano a los datos referidos en la bibliografía.

BIBLIOGRAFÍA

- BAIGORRI, H.E.J; H. ECHEVERRÍA; H. FONTANETTO; C. GALARZA; S. GAMBAUDO; F.O.GARCÍA; R. MELGAR. 1997. Fertilidad y fertilización. El cultivo de la soja. INTA. Cap 10. p: 203.
- BARRACO MIRIAN.2010. Nutrición y fertilización de soja. Portal informativo para el agro.En: <http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/06/NUTRICI%C3%93N-Y-FERTILIZACI%C3%93N-EN-SOJA.pdf>
- BUTTERY, B. R.; PARK, S. J and HUME, D. J. 1991. Potential for increasing nitrogen fixation in grain legumes. Canadian Journal of Plant Science 72: 323-349.
- CICORE, P; H. SAINZ ROZAS; H. ECHEVERRÍA; P. BARBIERI. 2005. Materia seca nodular y nitrógeno acumulado en el cultivo de soja en función de la disponibilidad de agua y azufre, y del sistema de labranza. En: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672005000200011&script=sci_arttext
- COLLINO, D., M. DE LUCA., A. PERTICARI., S. URQUIAGA., R. RACCA. 2007. Aporte de la FBN a la nutrición de la soja y factores que la limitan en diferentes regiones del país. Actas XXIII Reunión Latinoamericana de Rizobiología. Los Cocos, Córdoba. Argentina
- CHOLAKY S., L., A. CANTERO GUTIERREZ; O. GIAYETTO, E. BONADEO y E.C. NEUMAN, 1986. Fertilización nitrogenada y modelos de siembra en soja de hábito determinado. Rev. UNRC 6 (2):133-166.
- DIAZ ZORITA, M; R. BALIÑA y M. FERNANDEZ CANIGIA. 2004. Inoculación con *Bradhyrizobium japonicum* en cultivos de Soja. pp 7-12. En: Campaña 2003-04. Resumen de resultados de investigación y desarrollo aplicado. Nitragin Argentina S.A.
- DI CIOCCO, C; E. PENÓN; C. COVIELLA; S. LÓPEZ; M. DÍAZ ZORITA; R. ÁLVAREZ; F. MOMO. 2010. Relación entre la fijación de nitrógeno y la producción de biomasa de soja en la Región Pampeana. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, 31 de Mayo al 4 de Junio de 2010. En: www.nitragin.com.ar/intranet/argentina/pags-internas/trabajos-publicados/721-MDZ-3_009_1_RE-Di-Ciocco-et-al.pdf
- DI RIENZO, J.A., F. CASANOVES, M.G. BALZARINI, L. GONZALEZ, M. TABLADA y C.W. ROBLEDO. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- FERRARIS, G.N. 2004. Fertilización del cultivo de soja. Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino.En: <http://www.elsitioagricula.com/articulos/ferraris/FertilizaciondelCultivodeSoja.pdf>

- FERRARIS, G Y L. COURETOT. 2007. Evaluación de estrategias de inoculación en soja. Proyecto Regional Agrícola, Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino. SOJA CAMPAÑA 2006-07. En:<http://www.elsitioagricola.com/articulos/ferraris/EvaluacionEstrategiasInoculacionSoja.pdf>
- FONTANETTO, H. Y O. KELLER. 2006. Consideraciones sobre el manejo de la fertilización de la soja. En: <http://www.agrolluvia.com/wp-content/uploads/2009/09/r-consideraciones-manejo-fertilizacion-soja.pdf>
- GONZÁLEZ, N.S. 1994. Dinámica de la fijación de nitrógeno en soja, en suelos con alta fertilidad nitrogenada. Tesis de M. Sc. Programa de Post-grado en Producción Vegetal. Fac. de Ciencias Agrarias. U. N de Mar del Plata.
- GONZÁLEZ, N; A. PERTICARI; B. STEGMAN DE GURFINKEL; E. RODRÍGUEZ CÁCERES. 1997. Nutrición nitrogenada. En: El cultivo de la soja. INTA. Cap. 9. p: 189, 191.
- GONZÁLEZ, N Y R. RACCA 2012. Fijación biológica de nitrógeno en soja. En: El cultivo de soja en Argentina. Ed. Agroeditorial. Cap: 5. p: 105-120.
- GUTIERREZ BOEM, F.H. 2008. Nutrición del cultivo. En: Producción de soja. CREA. Cap. 4. p: 45, 46, 50, 51.
- HARPAZ, Y. 1975. Simulation of the nitrogen balance in semi-arid regions. Thesis for the Degree Doctor of Philosophy, Hebrew University, Jerusalem, Israel.
- KANTOLIC, A.G., P.I. GIMENEZ Y E.B. de la FUENTE 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial facultad de agronomía. UBA. Cap: 9. p: 181,189, 192.
- MCDERMOTT, T.R., P.H. GRAHAM. 1989. Bradyrhizobium japonicum Inoculant Mobility, Nodule Occupancy, and Acetylene Reduction in the Soybean Root System. Appl. Environ. Microbiol. 55, 2493-2498.
- PERTICARI A., N. ARIAS; H. BAIGORRI; J.J. DE BATTISTA; L. LETT; M. MONTECCHIA; J.C. PACHECO BASURCO; A. SIMONELLA; S. TORESANI; L. VENTIMIGLIA Y R. VICENTINI. 2003. Inoculación y fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja. INTA Castelar. En: http://m.agrositio.com/vertex.php?id=19361&area_id=2
- PIETRARELLI, L.; J.L. ZAMAR; H.L. LEGUÍA; E.E. ALESSANDRIA; J. SÁNCHEZ; M. ARBORNO; S.M. LUQUE. 2008. Efectos de diferentes prácticas de manejo en la nodulación y en el rendimiento del cultivo de soja. En:http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1668-298X2008000200004

- ROCHESTER, I.J., M.B. PEOPLE., G.A. CONSTABLE., R.R. GAULT. 1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. Aust. J. Exp. Res. 38,253–260.
- RABERY, S. H; A.L. AYALA; R.M. OVIEDO de CRISTALDO; I.R. FRANCO; V.R. ENCISO. 2015. Aplicación de riego complementario en soja y su relación con el rendimiento de granos. MERCOSOJA 2015.
- SALADO NAVARRO, L.R. 2012. Ecofisiología de Soja. En: El cultivo de soja en Argentina. Agroeditorial. Cap: 4. p: 83-104.
- SALINAS, A.I, y E. MARTELLOTTI 2012. Soja: Uso del agua y riego. En: El cultivo de soja en Argentina. Agroeditorial. Cap: 8. p: 163-174.
- SIIA. 2015. Sistema integrado de Información Agropecuaria. En: <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>. Consultado el 18/09/2015.
- SALVAGIOTTI, F; J.E. CAPURRO; J.M. ENRICO. 2009. El manejo de la nutrición nitrogenada en soja. EEA Oliveros INTA. p: 45-47. En: <http://inta.gob.ar/documentos/el-manejo-de-la-nutricion-nitrogenada-en-soja/>
- SALVAGIOTTI, F. 2009. Manejo de soja de alta producción. En: [http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manejo soja alta produccion.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manejo_soja_alta_produccion.pdf)