

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

CUANTIFICACION DE LA REPUESTA EN RENDIMIENTO EN GRANO EN EL
CULTIVO DE SOJA EN FUNCION DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAJE DE
AGUA DEL SUELO, CONTENIDO DE AGUA INICIAL Y DISTRIBUCION DE
PRECIPITACIONES DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO

por

Sergio Agustín BIDEGAIN LÓPEZ

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2012

Tesis aprobada por:

Director:-----

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Luis Giménez

Fecha: 01/06/2012

Autor:-----

Sergio Agustín Bidegain López

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que mediante su apoyo a lo largo de toda la carrera fueron quienes hicieron posible realizarla.

A los amigos, que siempre estuvieron durante estos años de estudio.

A Sebastián Mazzilli, por su buena disposición durante todo el desarrollo de la presente Tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. COMPONENTES INVOLUCRADOS EN LA GENERACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	2
2.2. PERÍODO CRÍTICO PARA LA GENERACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	3
2.3. DETERMINANTES AMBIENTALES DEL RENDIMIENTO.....	3
2.4. EFECTO DE DÉFICIT HÍDRICO EN LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	6
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	8
3.1. ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN.....	8
3.2. INFORMACIÓN UTILIZADA PARA CONFORMAR LA BASE DE DATOS.....	8
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	9
3.3.1. <u>Regresión lineal múltiple</u>	9
3.3.2. <u>Árbol de regresión (regresión recursiva)</u>	10
3.3.3. <u>Regresión con variables auxiliares (Dummy)</u>	11
3.3.4. <u>Análisis de conglomerados</u>	11
3.3.5. <u>Comparación de % de agua disponible en los períodos desde siembra-R3, R3-R6, R6-R7</u>	12
4. <u>RESULTADOS</u>	13
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	13
4.2. RENDIMIENTOS LOGRADOS EN RELACIÓN AL POTENCIAL.....	14
4.3. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	17
4.4. ÁRBOL DE REGRESIÓN.....	19
4.5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE CON LAS PRECIPITACIONES ACUMULADAS EN EL PERÍODO R3-R6 COMO VARIABLE AUXILIAR (DUMMY).....	22
4.6. ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS.....	23

4.7. COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES % DE AGUA DISPONIBLE ESTIMADA EN LOS DIFERENTES PERÍODOS DESDE SIEMBRA-R3, R3-R6 Y R6-R7.....	24
5. <u>DISCUSIÓN</u>	26
6. <u>CONCLUSIONES</u>	28
7. <u>RESUMEN</u>	30
8. <u>SUMMARY</u>	31
9. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	32

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Caracterización de la base de datos.....	13
2. Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado.....	15
3. Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado y las precipitaciones acumuladas entre la siembra (S) y madurez (R7).....	16
4. Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado y las precipitaciones acumuladas durante el periodo R3-R6.....	17
5. Coeficientes de regresión estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.....	18
6. Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la regresión lineal múltiple.....	19
7. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.....	22
8. Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la regresión lineal múltiple utilizando una variable de clasificación.....	23
9. Conglomerados: % de agua disponible en los diferentes periodos del cultivo.....	23
10. Test LSD de Fisher. Comparación entre Conglomerados.....	24
11. Test LSD Fisher. Comparación entre % Agua disponible en el período Siembra-R3.....	25
12. Test LSD Fisher. Comparación entre % Agua disponible en el período R3-R6.....	25
 Figura No.	
1. Relación entre radiación acumulada durante el ciclo del cultivo y el rendimiento potencial.....	15
2. Árbol de regresión para rendimientos.....	21

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 10 años han ocurrido cambios muy importantes en el sector agrícola uruguayo, la expansión del área del cultivo de soja ha sido la principal responsable ya que se paso de sembrar 12000 has en la zafra 2000-2001 a 862000 has en la zafra 2010-2011, lo que permitió pasar de producir 27600 Mg en el 2000 a 1541000 Mg en la zafra pasada 2010-11 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

El aumento de la producción de soja ha estado relacionado al aumento del área, ya que el rendimiento por hectárea no se ha modificado durante estos años y se ha mantenido en el entorno a los 1970 Kg ha⁻¹ (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2011).

Si bien existen varios factores que determinan que no se obtengan los rendimientos medios mayores a nivel comercial, los cultivos de verano entre los que se encuentra el de soja presentan como principal limitante las deficiencias hídricas (Giménez y García, 2011).

Las variables determinantes de este déficit son las precipitaciones y la capacidad de almacenaje de agua del suelo (CAAD). Específicamente la baja capacidad de almacenaje de agua disponible en los suelos uruguayos (80 a 180 mm) y la alta variabilidad que presentan las precipitaciones durante el verano hacen que las situaciones de déficit hídrico se presenten frecuentemente (Giménez y García, 2011).

A pesar de que esta problemática es conocida, no existen hasta el momento intentos locales de cuantificar la importancia relativa de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, el agua almacenada al inicio del cultivo y la distribución de las precipitaciones en los diferentes periodos del ciclo del cultivo sobre el rendimiento en grano. Por lo tanto el objetivo de este trabajo es cuantificar la importancia relativa de cada uno de los factores mencionados sobre el rendimiento en grano.

Con el propósito de poder cumplir con los objetivos se plantearon las siguientes hipótesis: i) El agua disponible a la siembra es determinante del rendimiento en grano del cultivo de soja. ii) Déficits hídricos durante el periodo crítico (R3-R6) es la principal determinante del rendimiento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPONENTES INVOLUCRADOS EN LA GENERACION DEL RENDIMIENTO

Durante el ciclo del cultivo se van generando los componentes que determinan el rendimiento del cultivo de soja. Los dos principales componentes son el número de granos y peso de granos. El ambiente al que se expone el cultivo es muy importante ya que determina cuanto se genera y cuanto sobrevive de cada componente (Kantolic et al., 2003).

El componente número de granos se puede dividir en tres subcomponentes: número de nudos, número de vainas por nudo y número de granos por vaina.

El número de nudos que se diferencia en ramificaciones está asociado a las condiciones fotoperiódicas previas y posteriores a la floración. La elongación y sobrevivencia de estos está condicionado por la tasa de crecimiento del cultivo y los factores ambientales que la regulan (agua, luz, nutrientes). Por su parte el número de vainas por nudo resulta de los fenómenos de generación y mortandad de los frutos. La soja produce muchos mas primordios florales de los que puede fijar y en condiciones normales, menos del 50% llega a formar vainas. Si bien no están claras las condiciones que determinan el aborto de vainas, se conoce que una de las principales determinantes de la mortandad de flores y frutos jóvenes es la disminución del flujo de asimilados desde las hojas a los órganos reproductivos. El subcomponente número de granos por vaina es mucho más estable ante variaciones ambientales que los anteriores, aunque en determinadas situaciones pueden abortar granos en una vaina antes de que comience la fase de llenado efectivo (Kantolic et al., 2003)

Por último el peso final del grano depende de la tasa de crecimiento del cultivo y de la duración del periodo de llenado. Ambos componentes están determinados genéticamente y varían de acuerdo a las condiciones ambientales (Kantolic et al., 2003). Este proceso se divide en 2 etapas la primera después de la floración donde el grano fecundado acumula poco peso, pero se determina el número de células, fenológicamente el periodo se extiende del estadio de R3 a R5. Y la segunda el grano crece y acumula la mayor parte de su peso. Condiciones desfavorables en la primera etapa disminuyen el tamaño potencial del grano, mientras que si se producen en la segunda etapa se reduce el peso de los granos (Andrade et al., 2002a).

2.2 PERÍODO CRÍTICO PARA LA GENERACION DEL RENDIMIENTO

Se define como período crítico para la generación del rendimiento aquel período durante el ciclo del cultivo en el cual las disminuciones en la tasa de crecimiento inciden marcadamente y explican las variaciones en el rendimiento en grano (Cárcova et al., 2002). Para el caso del cultivo de soja, a diferencia de otros cultivos el número y peso de los granos se define durante un periodo muy extenso del ciclo del cultivo, sin embargo no todo el ciclo resulta de igual importancia en la definición del rendimiento. Condiciones ambientales adversas en etapas tempranas del cultivo pueden ser compensadas si la calidad del ambiente mejora, no afectando el número de granos (Andrade et al. 2002a, Kantolic et al. 2003).

Se ha demostrado que el número de granos está limitado por la actividad de la fuente de fotoasimilados durante la etapa que se extiende de R1 a R6, a esto se le debe agregar que las restricciones en la tasa de crecimiento en las primeras etapas reproductivas pueden ser compensadas por un aumento en el peso de los granos, por lo que el período R1-R3 no es generalmente considerado crítico para el rendimiento. En contraparte limitaciones posteriores (R4-R6) tiene un efecto directo sobre el rendimiento al reducir el número de granos con menores posibilidades de compensaciones en el peso de granos (Andrade et al. 2002a, Kantolic et al. 2003).

Es aceptado que el rendimiento del cultivo de soja está limitado por su capacidad fotosintética a partir de estadio de R4. Cuando ocurren alteraciones en la fuente fotosintética debido a situaciones de estrés entre estadio de R4.5 y R5.5 se ve afectado el número de granos por unidad de superficie, mientras que si ocurren entre R6 y R 6.5 se ve afectado el peso de los granos (Egli y Legget, Egli y Craft-Branden, citados por Andrade et al., 2002a).

2.3 DETERMINANTES AMBIENTALES DEL RENDIMIENTO

Los procesos que regulan el desarrollo de un cultivo son complejos debido a que responden tanto a factores genéticos como ambientales, existiendo interacción entre estos, siendo la temperatura y el fotoperiodo los factores ambientales más importantes.

La temperatura está involucrada en la duración de los estados fenológicos de los cultivos, a medida que las plantas son expuestas a temperaturas más elevadas se produce una aceleración del desarrollo (Miralles et al., 2003). La tasa de desarrollo surge de la relación entre la duración de una fase fenológica y la temperatura, y a partir de esta se definen las temperaturas cardinales, la temperatura base (T_b), temperatura óptima

(T_o) y temperatura máxima (T_m). Para que haya desarrollo la temperatura debe ser mayor a T_b , el desarrollo aumenta linealmente hasta la T_o , y declina entre la T_o y la T_m (Sadras et al., 2002).

Para estimar la duración de las distintas fases fenológicas se han desarrollado diferentes modelos, el modelo más sencillo y utilizado es el de Tiempo Térmico, es definido como la suma de la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base correspondiente a cada fase (Sadras et al. 2002, Miralles et al. 2003).

Por otra parte las respuestas al fotoperiodo son complejas y varían con la especie y el estado de desarrollo (Sadras et al. 2002, Miralles et al. 2003). Para el caso de la soja el fotoperiodo regula la mayor parte de los eventos reproductivos. Es una especie de día corto con respuesta cuantitativa al fotoperiodo, es decir, se demora en florecer si el fotoperiodo está por encima de un valor crítico (Sadras et al. 2002, Kantolic et al. 2003).

La mayoría de los cultivares de soja presentan una fase juvenil en la que no responden al fotoperiodo, esta tiene una duración de aproximadamente 8 días a temperaturas óptimas. Luego de esta etapa comienza una etapa inductiva que se extiende hasta la aparición del primer meristemo reproductivo cuando se cumplen las necesidades de día corto (Sadras et al. 2002, Kantolic et al. 2003).

Como cada nudo es un sitio de potencial de rendimiento, el retraso en la iniciación floral por condiciones de día largo es de importancia para lograr buenos rendimientos (Sadras et al., 2002).

El fotoperiodo a partir del cual se induce la floración, como la sensibilidad al mismo presentan una gran variación genotípica, los grupos de madurez más cortos presentan fotoperiodos mayores y baja sensibilidad y a medida que aumenta el grupo de madurez disminuye el fotoperiodo y aumenta la sensibilidad (Kantolic et al., 2003).

La tasa de crecimiento de un cultivo (TC: biomasa acumulada por unidad de tiempo) resulta del balance entre la fotosíntesis (ganancia de CO_2) y la respiración (perdida de CO_2). Como la fracción de carbono fijado que se destina a la respiración es relativamente constante, aumentos en la radiación interceptada por el cultivo se traducen en aumentos en la tasa de crecimiento. La radiación interceptada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la eficiencia de interceptación de la misma (Cárcova et al., 2002).

Trabajos realizados por Andrade (1995) determinaron que reducciones en la radiación durante el periodo de llenado de granos produjeron una disminución en el rendimiento, el componente que más era afectado era el número de granos y no tanto el peso de los mismos.

Posiblemente el factor más determinante de los rendimientos, en las condiciones de secano es la disponibilidad de agua. El consumo de agua de los cultivos, cuando el contenido de agua disponible del suelo se encuentra por encima de un umbral crítico está determinado por la tasa de transpiración, la cual es cercana a la que establece la demanda atmosférica. Cuando el contenido se encuentra por debajo de dicho umbral la tasa de transpiración depende de la capacidad del cultivo para absorber agua del suelo. Bajo condiciones favorables para la absorción de agua cuanto más energía absorbe el canopeo, más agua puede transpirar y más CO₂ puede fijar (Dardanelli et al., 2003).

La cantidad de agua que puede absorber un cultivo bajo condiciones limitantes depende de: factores del suelo (cantidad de agua disponible y conductividad hidráulica), del cultivo (densidad y profundidad de raíces, conductancia hidráulica de los tejidos vasculares y la capacidad de ajuste osmótico) y la intensidad de la demanda. Mientras que la extracción va a depender de la disponibilidad hídrica a lo largo del ciclo (Otegui, 2009).

Giménez y García (2011) realizaron un estudio en el que estimaron las necesidades hídricas para los cultivos de verano en Uruguay. Consistió en estimar la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), que es la evapotranspiración cuando el cultivo se encuentra en óptimas condiciones, y por otro lado la evapotranspiración real (ET_r), la cual refiere a la evapotranspiración de los cultivos en condiciones diferentes a las óptimas, causadas por situaciones en las cuales los cultivos se desarrollan en condiciones ambientales y de manejos diferentes a las condiciones no limitantes. Tanto la ET_c y la ET_r se calcularon para dos localidades diferentes y en ambas localidades se evaluaron 2 cultivares de GM IV y GM VI. Las estimaciones de ET_r fueron sustancialmente menores que las ET_c en la mayoría de las situaciones y con una alta variabilidad entre años. Para la localidad de Colonia en promedio la ET_r alcanzo un 65% y un 62% de la ET_c para los cultivares de GM VI y GM IV respectivamente, mientras que para salto el promedio de la ET_r alcanzo un 69% para el GM VI y 70% para el GM IV.

2.4 EFECTO DE DÉFICIT HÍDRICO EN LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

El déficit hídrico es causado por falta de agua disponible para las plantas, lo cual se genera por escasez de precipitaciones, suelos poco profundos, con baja capacidad de retención de agua o con impedimentos para la penetración radical, las tres características del déficit que determinan su efecto sobre el cultivo son: la intensidad, duración y momento de ocurrencia en relación al estado del cultivo (Andrade y Sadras, 2002b).

Adriani et al. (1991) en un experimento con el objetivo de cuantificar la responsabilidad de déficits hídricos durante el período reproductivo en términos de rendimiento para el cultivo de soja, demostraron que déficits hídricos durante el período R1-R4, no tuvo efectos en el rendimiento. Por otro lado déficit en el periodo R4-R6.3 sí afectó sustancialmente el rendimiento. Los componentes del rendimiento que se vieron afectados fueron el número de vainas, el número de granos por vaina y el peso de los granos.

La influencia de la lluvia sobre el rendimiento en soja fue estudiada por Calviño y Sadras (1999), a partir de registros de chacras de productores de Tandil y Pergamino (Argentina). Los rendimientos variaron entre 2.1 a 3.1 Mg ha⁻¹ en suelos con profundidad mayor a 1 metro (suelos profundos) y entre 1.3 y 2.6 Mg ha⁻¹ en suelos con profundidad entre 0.5 y 0.7 metros (suelos superficiales). La mayor variabilidad de los rendimientos fue por el agua disponible en el período de desde aparición de vainas hasta el llenado de grano (R3 a R6), en todos los casos la relación entre el rendimiento y el agua disponible entre R3 y R6 mostraba un modelo no lineal con plateau, lo que refleja que cuando el agua disponible no es limitante existen otras restricciones ambientales que afectan el rendimiento. El 74 % de la variación en el rendimiento lo explicó el agua disponible en el periodo R3-R6. En este periodo el rendimiento aumenta hasta aproximadamente 100 mm de agua disponible y no se encontraron evidencias de disminución de rendimiento causados por excesos hídricos.

A nivel nacional Giménez (2010) comparó 3 situaciones de disponibilidad hídrica para el cultivo de soja, la primera fue denominada de bienestar hídrico en la que el porcentaje de agua disponible fue mayor al 60% en el periodo crítico, y durante el período no crítico superior al 40%, la segunda de déficit hídrico en el periodo crítico, el porcentaje de agua disponible inferior al 60% en este periodo y en el período no crítico

superior al 40%, y la tercera en seco, debido a que fue un año con alto registro de precipitaciones, este último tratamiento se comportó de forma muy similar al de bienestar hídrico. Las diferencias entre el tratamiento con alta disponibilidad hídrica en el periodo crítico y el de baja disponibilidad se vieron reflejadas en el número de grano/m², mientras que no hubo diferencias en el peso de los granos entre tratamientos. Las deficiencias de agua en el periodo crítico en el tratamiento de déficit hídrico representaron una disminución del rendimiento del 50%.

Bacigaluppo et al. (2006), en Santa Fe, Argentina, estudiaron los factores del clima y el suelo que generan variaciones del rendimiento en soja. El trabajo fue realizado en las zafra 2001-2002, 2002-2003 y 2003-2004, para cada caso se determinó el rendimiento, variables del suelo (contenido de materia orgánica, porosidad, contenido de fósforo, etc.), el agua útil a la siembra y a partir de registros climáticos, las precipitaciones, la radiación incidente y la temperatura media para los periodos desde emergencia a R2, desde R2 a R5 y desde R5-R7. El agua disponible a la siembra fue de 263 mm, el resultado obtenido fue que las precipitaciones en el periodo R2-R7 separó situaciones de diferente comportamiento. Cuando las precipitaciones fueron menores a 180 mm se obtuvieron los menores rendimientos, y en estos casos además de las precipitaciones lo que determinó las variaciones en rendimiento fue la porosidad del suelo, cuando las precipitaciones fueron mayores a 180 mm se obtuvieron los mayores rendimientos y la radiación acumulada en el periodo R5-R7, la porosidad del suelo, el contenido de materia orgánica y la conductividad hidráulica fueron los factores que determinaron las diferencias entre los rendimientos máximos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

A partir de bases de datos disponibles obtenidas en trabajos de tesis y proyectos de investigación en el cultivo de soja, realizados en la estación experimental Dr Mario A. Cassinoni, desde la zafra 2004-2005 a la 2010-2011, datos climáticos de la estación meteorológica automática de la misma estación experimental y datos de rendimiento potencial estimados a partir del modelo CROPSYST, se conformó una base de datos en la cual se estudiaron las relaciones entre los rendimientos reales, rendimientos potenciales y distintas combinaciones de ciclos de cultivo, condiciones climáticas y reserva de agua en el suelo al momento de siembra de los cultivos.

3.2 INFORMACIÓN UTILIZADA PARA CONFORMAR LA BASE DE DATOS

Para armar la base de datos se obtuvo información de 8 trabajos diferentes, cada trabajo además constaba de diferentes repeticiones, los cuales variaban en el tipo de suelo, fecha de siembra, ubicación en la rotación (primera o segunda), grupo de madurez, lo que permitió obtener 74 situaciones de cultivo.

La información obtenida de los trabajos realizados anteriormente se detalla a continuación:

- Suelo: profundidad, textura, contenido de materia orgánica, densidad aparente y humedad gravimétrica al momento de la siembra.

- Cultivo: fecha de siembra, grupo de madurez, fenología, la ubicación en la rotación (primera o segunda), rendimiento en grano.

A partir de la información original se calcularon una serie de variables que se detallan a continuación:

- Capacidad de almacenaje de agua, se calculó para todo el perfil utilizando la ecuación de Saxton y Rawls (2006). Esta ecuación permite calcular la capacidad de almacenaje a partir de los datos de textura, densidad aparente y % de materia orgánica.

- Agua disponible a la siembra, con la humedad gravimétrica y la densidad aparente, se calculó la humedad volumétrica al momento de la siembra, restandole el volumen de agua retenida a punto de marchitez permanente se determinó el agua disponible en los primeros 30cm de perfil y de 30cm a donde terminaban los horizontes explorables por las raíces.

- Para estimar el rendimiento potencial fue utilizando el modelo CROPSYST, para esto se utilizó la información de fecha de siembra y fenología para cada caso, los datos climáticos correspondiente para cada zafra y los datos del suelo (profundidad, textura, materia orgánica y densidad aparente) de cada situación. Los parámetros de crecimiento y desarrollo utilizados en el modelo fueron los ajustados por Baroffio y Ramos (2009).

Para completar la base de datos se calcularon las precipitaciones acumuladas, la temperatura promedio, la radiación acumulada y % de agua disponible (% AD) promedio, desde siembra a R3, entre R3-R6, entre R6-R7 y las acumuladas durante todo el ciclo del cultivo. Para las precipitaciones y la radiación acumulada se realizó la suma de los valores acumulados diariamente durante cada período, la temperatura promedio se realizó un promedio de las temperaturas medias, y para el % de agua disponible, se realizó el balance hídrico diario para cada situación, según la capacidad de almacenaje de agua del suelo se determinó el % AD y con estos datos se calculó el promedio para cada período.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Cuando la base de datos quedó finalizada se procedió a analizarla estadísticamente utilizando el software estadístico Infostat 2010/p. Se realizaron 5 análisis diferentes los cuales se detallan a continuación.

3.3.1 Regresión lineal múltiple

Con el software se seleccionaron las variables que maximizaban el R² del modelo, se seleccionó el modelo de mayor R² y menor número de variables. Con las variables seleccionadas se realizó el análisis de regresión lineal múltiple.

El análisis de regresión lineal múltiple permite estudiar la relación entre una variable de respuesta Y (variable dependiente) y una o más variables regresoras X (Variables independientes o predictoras).

La ecuación del modelo de regresión lineal múltiple es el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i$$

donde:

Y_i = es la i-ésima observación de la variable dependiente .

$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ = es el i -ésimo valor de las variables regresoras o independientes.

β_0 = parámetro desconocido que representa la ordenada al origen de la recta, indica el valor esperado de Y cuando $x_1=0, x_2=0, \dots, x_k=0$.

$\beta_1, \dots, \beta_k$ = parámetros desconocidos que representan las tasas de cambio de Y frente a cambios unitarios en $x_1, x_2, \dots, x_k$.

ϵ_i = término de error aleatorio.

En este caso la variable dependiente Y fue el rendimiento y las variables regresoras x fueron las variables que seleccionó el programa. Las estimaciones realizadas para los parámetros del modelo son obtenidas por el método de estimación por mínimos cuadrados ordinarios.

En los resultados se muestran la matriz de coeficientes de regresión y estadísticos asociados, donde se puede ver para cada parámetro incluido en el modelo el valor estimado (Est), el error estándar de la estimación (EE), los límites del intervalo de confianza al 95% (LI y LS), el valor estadístico T para probar la hipótesis que el parámetro vale 0, el valor de significación p para la prueba de la hipótesis de T y el índice C_p de Mallows.

También se muestra la tabla de análisis de la varianza. En esta se incluye el coeficiente R^2 , el R^2 ajustado, el error cuadrático medio de cada predicción y el análisis de la varianza para el modelo especificado. El R^2 mide la proporción de la variación en Y que es explicada por la relación con la variable X . El R^2 ajustado se calcula como el cociente entre la suma de cuadrados del modelo y la suma de cuadrados total. En el análisis de la varianza la suma de cuadrados es de tipo III.

3.3.2 Árbol de regresión (regresión recursiva)

El árbol de regresión es un conjunto de muchas reglas determinadas por un procedimiento de ajuste por particiones binarias recursivas, donde un conjunto de datos es sucesivamente particionado. Al principio todos los objetos son considerados como pertenecientes al mismo grupo. Este grupo se separa en dos sub-grupos a partir de una de las variables regresoras de tal manera que la heterogeneidad a nivel de la variable dependiente sea mínima de acuerdo a la medida de heterogeneidad seleccionada, los dos sub-grupos se separan nuevamente si: hay suficiente heterogeneidad para producir una partición de observaciones y/o el tamaño del nodo es superior al mínimo establecido para continuar el algoritmo. El proceso se detiene cuando no se cumple una de estas

condiciones. En cada separación el algoritmo analiza todas las variables regresoras y selecciona la que permite formar grupos más homogéneos pero más heterogéneos entre ellos.

En este análisis se seleccionó la variable dependiente, el rendimiento, y al resto de las variables como regresoras. Se utilizó como medida de heterogeneidad dentro de nodos a la suma de cuadrados.

Se obtuvo como resultado el árbol y la historia de formación de nodos, los valores del estadístico utilizado para la clasificación, los puntos críticos o valores asociados a cada nodo.

3.3.3 Regresión con variables auxiliares (Dummy)

Este modelo se utiliza cuando es necesario o se pretende incluir en el modelo estadístico, variables de clasificación. Las variables auxiliares (dummy) se incorporan cuando los datos a analizar contienen información sobre las variables de interés diferenciado en subgrupos.

Se selecciona la variable que se quiere categorizar, se determina en cuantas categorías se la va dividir y a esa variable x se la divide en k categorías en k_l variables binarias (0 y 1).

Luego de haber realizado el árbol de regresión se decidió categorizar la variable precipitaciones acumuladas R3-R6, diferenciando las situaciones en que habían acumulado más de 290 mm de las que habían acumulado menos, determinándose dos categorías a las que se le asignó el 0 a los datos que acumularon mas de 290mm y 1 a aquellos con menos de 290mm.

3.3.4 Análisis de conglomerados

Este análisis es utilizado con el objetivo de conocer el agrupamiento natural de las observaciones, las técnicas de clasificación basadas en agrupamientos implican la distribución de las unidades de estudio en categorías o clases, de manera tal que las clases (conglomerados) reúne las unidades cuya similitud es máxima bajo algún criterio. Los objetos de un mismo grupo comparten el mayor número permisible de características y los objetos de diferentes grupos tienden a ser distintos.

3.3.5 Comparación de % de agua disponible en los periodos desde siembra-R3, R3-R6, R6-R7

Se categorizaron las variables % de agua disponible en los periodos desde siembra hasta R3, desde R3-R6 y entre R6-R7. Para el periodo desde siembra hasta R3 y desde R6-R7 el criterio de diferenciación fue si el % de agua disponible había sido mayor o menor al 40%, y para el periodo de R3-R6 el criterio fue con el 60% de agua disponible. Se realizó el análisis de la varianza y se compararon de forma independiente cada situación.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS

La base de datos quedó conformada por 74 situaciones diferentes de cultivos. En el Cuadro No. 1 se presentan los valores máximos, mínimos, promedio y el coeficiente de variación de las diferentes variables utilizadas.

Cuadro No. 1: Caracterización de la base de datos.

	Max	Min	Media	CV
Profundidad (cm)	105	30	82	27
Agua Disponible Potencial (mm)	124	41	99	25
Agua Disponible a la Siembra(mm)	123	0	81	41
Agua Disponible 0-30 (mm)	60	0	33	42
Agua Disponible 30 +++ (mm)	93	0	49	59
Precipitaciones Acumuladas S-R3 (mm)	862	152	292	66
Precipitaciones Acumuladas R3-R6 (mm)	455	41	210	54
Precipitaciones Acumuladas R6-R7 (mm)	186	4	64	77
Precipitaciones Acumuladas S-R7 (mm)	1376	256	567	46
Temperatura media S-R3 (°C)	25	22	24	4
Temperatura media R3-R6 (°C)	25	21	24	3
Temperatura media R6-R7 (°C)	23	16	21	8
Temperatura media S-R7 (°C)	24	22	23	3
Radiación Acumulada S-R3 (Mj m ⁻²)	2478	1058	1791	20
Radiación Acumulada R3-R6 (Mj m ⁻²)	1380	392	786	38
Radiación Acumulada R6-R7 (Mj m ⁻²)	503	248	410	17
Radiación Acumulada S-R7 (Mj m ⁻²)	4014	2198	2987	16
% Agua Disponible S-R3 (mm)	88	11	38	47
% Agua Disponible R3-R6 (mm)	82	6	31	50
% Agua Disponible R6-R7 (mm)	77	1	27	97
% Agua Disponible S-R7 (mm)	83	8	33	46
Rendimiento (Kg ha ⁻¹)	5900	821	3121	39
Rendimiento Potencial (Kg ha ⁻¹)	8329	4138	6164	22

La profundidad de los suelos en los que se realizaron los experimentos varió desde profundos de 105 cm a poco profundos de 30 cm y con capacidad de almacenar agua disponible entre 124 y 41 mm.

El agua disponible a la siembra presentó una alta variación (CV 41%), existiendo situaciones en las que el cultivo se instaló con el suelo a capacidad de campo y otras en las que el agua disponible estaba cercano a cero, coincidiendo estas últimas con cultivos de segunda. Esta alta variabilidad se mantuvo para las diferentes profundidades. En el cuadro se detallan los mm de agua disponible en los primeros 30 cm de profundidad, y desde 30 cm hasta la aparición del material madre.

En cuanto a las variables climáticas, las de mayor variabilidad fueron las precipitaciones, las cuales presentaron rangos muy amplios entre los valores máximos y mínimos registrados en los diferentes periodos estudiados.

La radiación acumulada también presentó una alta variabilidad, los valores máximos acumulados durante el ciclo son el doble aproximadamente de los valores mínimos. Esta variación se debe a las diferencias de radiación solar incidente entre años, y a la duración de los ciclos de los diferentes cultivares.

La temperatura fue el factor estudiado con menor variación, manteniéndose ésta en un rango de entre 24 y 20°C durante todo el ciclo.

Los rendimientos reales variaron entre 5900 y 821 Kg ha⁻¹ con un promedio de 3121 Kg ha⁻¹, y los rendimientos potenciales estimados variaron entre 8329 y 4138 Kg ha⁻¹ con un promedio de 6164 Kg ha⁻¹.

4.2 RENDIMIENTOS LOGRADOS CON RELACIÓN AL POTENCIAL

Los rendimientos potenciales fueron estimados con el modelo CROPSYST, La diferencia con los rendimientos logrados estuvo dada por la no limitación por agua, y su variación por la radiación solar acumulada durante todo el ciclo del cultivo (Figura No. 1).

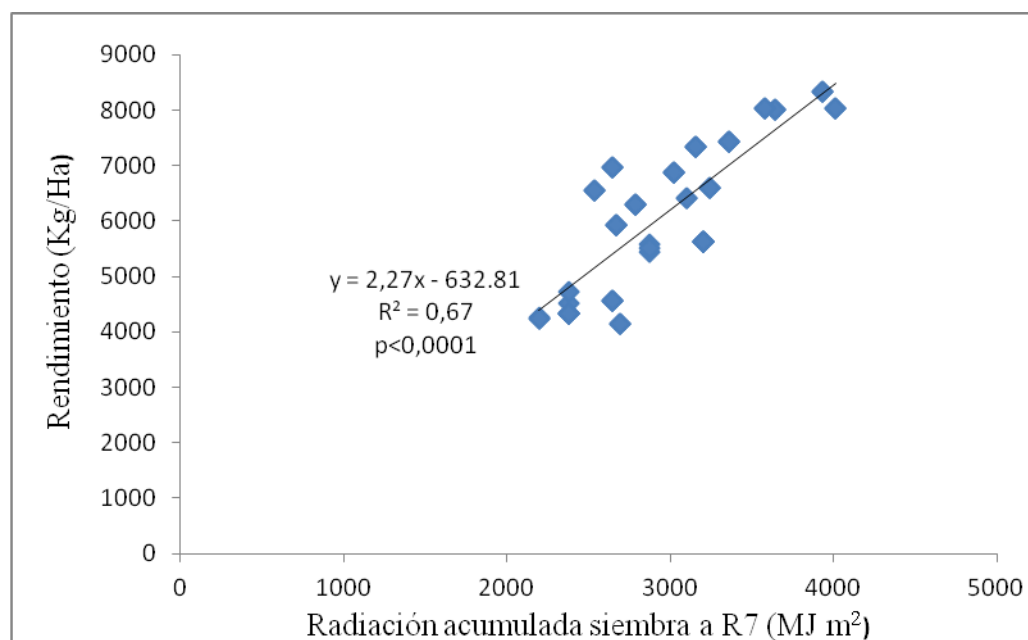


Figura No. 1: Relación entre radiación acumulada durante el ciclo del cultivo y el rendimiento potencial.

Los rendimientos potenciales estimados siempre fueron mayores a 4000 Kg ha⁻¹. En el 42% de las zafras en las que el rendimiento potencial se ubicó en el rango inferior (entre 4000 y 5000 Kg ha⁻¹), el rendimiento logrado fue mayor al 70% de ese rendimiento potencial, lo que indicaría que en estas zafras el agua no fue limitante y seguramente el rendimiento potencial estuvo limitado por la radiación (Cuadro No. 2). En contraparte, en zafras donde el rendimiento potencial fue mayor (8000-9000 Kg ha⁻¹) ninguna situación logró rendimientos mayores al 70% de ese rendimiento potencial.

Cuadro No. 2: Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado.

% Rendimiento Potencial	Rendimiento Potencial Kg ha ⁻¹				
	4000-5000	5000-6000	6000-7000	7000-8000	8000-9000
10-40	26	38	32	38	42
40-70	32	56	37	50	58
70-100	42	6	32	13	0
Nro Sitios	19	16	19	8	12

En el Cuadro No. 3 se presenta el porcentaje de situaciones según el rendimiento potencial alcanzado y las precipitaciones acumuladas durante todo el ciclo del cultivo. Las precipitaciones acumuladas se presentan en rangos de a 100 mm y solo se muestran los rangos en que existieron situaciones reales.

Cuadro No. 3: Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado y las precipitaciones acumuladas entre la siembra (S) y madurez (R7).

% Rendimientos Potenciales	Precipitaciones Acumuladas S-R7 (mm)					
	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	1300-1400
10-20	25	0	0	0	0	0
20-30	50	0	24	9	0	0
30-40	25	8	29	30	17	0
40-50	0	17	29	17	17	0
50-60	0	8	18	26	25	0
60-70	0	8	0	13	25	0
70-80	0	25	0	0	17	50
80-90	0	8	0	4	0	33
90-100	0	25	0	0	0	17
Nro Sitios	4	12	17	23	12	6

No existió un patrón claro de distribución de rendimientos que se pueda establecer entre las precipitaciones totales acumuladas durante todo el ciclo del cultivo y el % del rendimiento potencial efectivamente logrado. Sólo cuando llovieron entre 200 y 300 mm durante todo el ciclo los rendimientos obtenidos no superaron el 40% del rendimiento potencial, lo que corresponde a situaciones donde el estrés hídrico fue muy severo y posiblemente alto rendimiento potencial en ausencia de deficiencias hídricas. Cuando las precipitaciones fueron muy elevadas (1300-1400 mm) los rendimientos reales alcanzados estuvieron por encima del 70% del rendimiento potencial, seguramente la disponibilidad hídrica fue alta en todo el ciclo. Pero en los demás rangos de precipitaciones se ve una alta variabilidad de rendimientos logrados.

Cuando se realiza el mismo análisis pero sólo considerando las precipitaciones durante el período R3-R6 (Cuadro No. 4), se concluye que cuando las precipitaciones en este período fueron menores a 100 mm, en la mayoría de los casos no se alcanzó el 50% del rendimiento potencial. La mayor dispersión se observó cuando las precipitaciones en

este periodo estuvieron entre 200 y 300 mm, lo que muestra que con estas lluvias acumuladas se pueden obtener tanto altos como bajos rendimientos en relación al rendimiento potencial, En estos casos posiblemente se depende de la distribución de las precipitaciones en el período y de la capacidad de almacenar agua del suelo. Por último cuando las precipitaciones superaron los 300 mm los rendimientos logrados fueron siempre mayores al 70% del rendimiento potencial.

Cuadro No. 4: Porcentaje de situaciones según % del rendimiento potencial alcanzado y las precipitaciones acumuladas durante el periodo R3-R6.

% Rendimiento Potencial	Precipitaciones Acumuladas R3-R6 (mm)				
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500
10-20	5	0	0	0	0
20-30	25	0	8	0	0
30-40	20	33	26	0	0
40-50	30	33	13	0	0
50-60	15	33	21	0	0
60-70	0	0	13	0	67
70-80	5	0	8	50	33
80-90	0	0	5	33	0
90-100	0	0	8	17	0
Nro Sitios	20	6	39	6	3

4.3 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

El segundo análisis realizado para la variable rendimiento en grano fue el análisis de regresión lineal múltiple. Se logró un R^2 ajustado de 0.68, y los parámetros de la ecuación lineal se detallan en el Cuadro siguiente.

Cuadro No. 5: Coeficientes de regresión estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.

Coeficientes	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
Constante	13879,94	6365	1160,51	26599,37	2,18	0,033	
Agua Disponible 0-30 (mm)	26,31	7,21	11,91	40,71	3,65	0,0005	23,14
Fecha R3 Juliano	258,12	51,65	154,9	361,34	5	<0.0001	34,6
Fecha R7 Juliano	-147,05	29,79	-206,59	-87,51	-4,94	<0.0001	34
Precipitaciones Acumuladas S-R3 (mm)	1,49	0,57	0,34	2,63	2,6	0,0117	16,66
Precipitaciones Acumuladas R3-R6 (mm)	7,76	1,28	5,2	10,32	6,05	<0.0001	46,03
Temperatura media S-R3 (°C)	-740,46	237,3	-	-266,19	-3,12	0,0027	19,6
Temperatura media R3-R6 (°C)	449,81	184,5	81,22	818,4	2,44	0,0176	15,87
Temperatura media R6-R7 (°C)	-510,09	193,3	-896,35	-123,84	-2,64	0,0105	16,87
Radiación Acumulada R3-R6 (Mj m ⁻²)	8,29	1,66	4,97	11,61	4,99	<0.0001	34,57
Radiación Acumulada R6-R7 (Mj m ⁻²)	6,22	2,31	1,61	10,84	2,7	0,009	17,18

Est: Valor Estimado. E.E.: Error Estándar de la estimación. LI: Limite Inferior. LS: Limite Superior. T: Valor estadístico T.

El rendimiento logrado se relacionó positivamente con el aumento de la cantidad de agua disponible a la siembra entre 0 y 30 cm de suelo, mayor cantidad de días desde la siembra a la fecha de R3, más precipitaciones acumuladas hasta R3 y entre R3 y R6, mayor temperatura media entre R3-R6 y mayor cantidad de radiación acumulada entre R3-R6 y entre R6-R7. Por el otro lado, cuando la fecha en que se

alcanzó R7 fue mayor (madurez fisiológica ocurra más tarde), y las temperaturas medias entre S-R3 y R6-R7 fueron mayores, el rendimiento se afectó negativamente.

Cuadro No. 6: Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la regresión lineal múltiple.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	77215119	10	7721511,9	16,4	<0.0001
Agua Disponible 0-30 (mm)	6275006,2	1	6275006,2	13,33	0,0005
Fecha R3 Juliano	11754565	1	11754565	24,97	<0.0001
Fecha R7 Juliano	11467096	1	11467096	24,36	<0.0001
Precipitaciones Acumuladas S-R3 (mm)	3175446,2	1	3175446,2	6,75	0,0117
Precipitaciones Acumuladas R3-R6 (mm)	17220035	1	17220035	36,58	<0.0001
Temperatura media S-R3 (°C)	4581825,8	1	4581825,8	9,73	0,0027
Temperatura media R3-R6 (°C)	2799462,2	1	2799462,2	5,95	0,0176
Temperatura media R6-R7 (°C)	3278233,3	1	3278233,3	6,96	0,0105
Radiación Acumulada R3-R6 (Mj m ⁻²)	11742904	1	11742904	24,95	<0.0001
Radiación Acumulada R6-R7 (Mj m ⁻²)	3423527,5	1	3423527,5	7,27	0,009
Error	29654869	63	470712,21		
Total	106869989	73			

El análisis de la varianza de la regresión (Cuadro No. 6) determina que el modelo es significativo y que las diferentes variables seleccionadas también son significativas. A su vez, en base al valor de F se puede determinar la importancia relativa de cada variable. En este caso, se destaca la variable precipitaciones en el periodo R3-R6, así como los aspectos asociados a la ubicación del ciclo del cultivo, especialmente la fecha de ocurrencia del periodo de inicio de R3 y madurez fisiológica (R7), así como también la radiación acumulada en dicho periodo.

4.4 ARBOL DE REGRESIÓN.

En la Figura No. 2 se presenta el árbol de regresión para el rendimiento en grano, Kg ha⁻¹. El primer factor en determinar diferencias entre los rendimientos máximos y mínimos fueron las precipitaciones acumuladas en el periodo R3-R6, lo cual

es coincidente con análisis anteriores. Específicamente aquellas situaciones que acumularon más de 290 mm en dicho periodo los agrupa en un nodo que tiene rendimientos logrados máximos de 5900 Kg ha⁻¹, un promedio de 4473 Kg ha⁻¹ y un mínimo de 2612 Kg ha⁻¹. Por el otro lado, los que acumularon menos de 290 mm los agrupa en otro nodo que tiene 5204, 2685 y 821 Kg ha⁻¹ como máximo, promedio y mínimo respectivamente.

Dentro de cada nodo se vuelven a separar distintas situaciones. El de mayor rendimiento se divide según las precipitaciones acumuladas desde la siembra a R3 (mayor o menor a 205 mm). Aquellas situaciones en las que la lluvia acumulada fue mayor a 205 mm, lograron un rendimiento máximo de 5900 Kg ha⁻¹, un promedio de 4945 Kg ha⁻¹ y un rendimiento mínimo de 3364 Kg ha⁻¹. Este nodo es dividido nuevamente según la fecha de siembra haya sido antes o después del día 296 juliano (23 de octubre). Siembras posteriores a esa fecha se agrupan en el nodo de máximos rendimientos.

El nodo inicial de menor rendimiento se divide según la radiación acumulada en el periodo R6-R7. Aquellas situaciones que acumularon más de 449 Mj m² lograron un rendimiento máximo 3129 Kg ha⁻¹, un promedio de 2020 Kg ha⁻¹ con un mínimo de 829 Kg ha⁻¹. Este nodo se vuelve a dividir según el agua disponible en suelo a la siembra en todo el perfil del suelo (mayor o menor a 116.5 mm). En las situaciones con menor cantidad de agua disponible a la siembra, se encuentran los menores rendimientos logrados (2934, 1788 y 821 Kg ha⁻¹ como máximo, promedio y mínimo respectivamente).

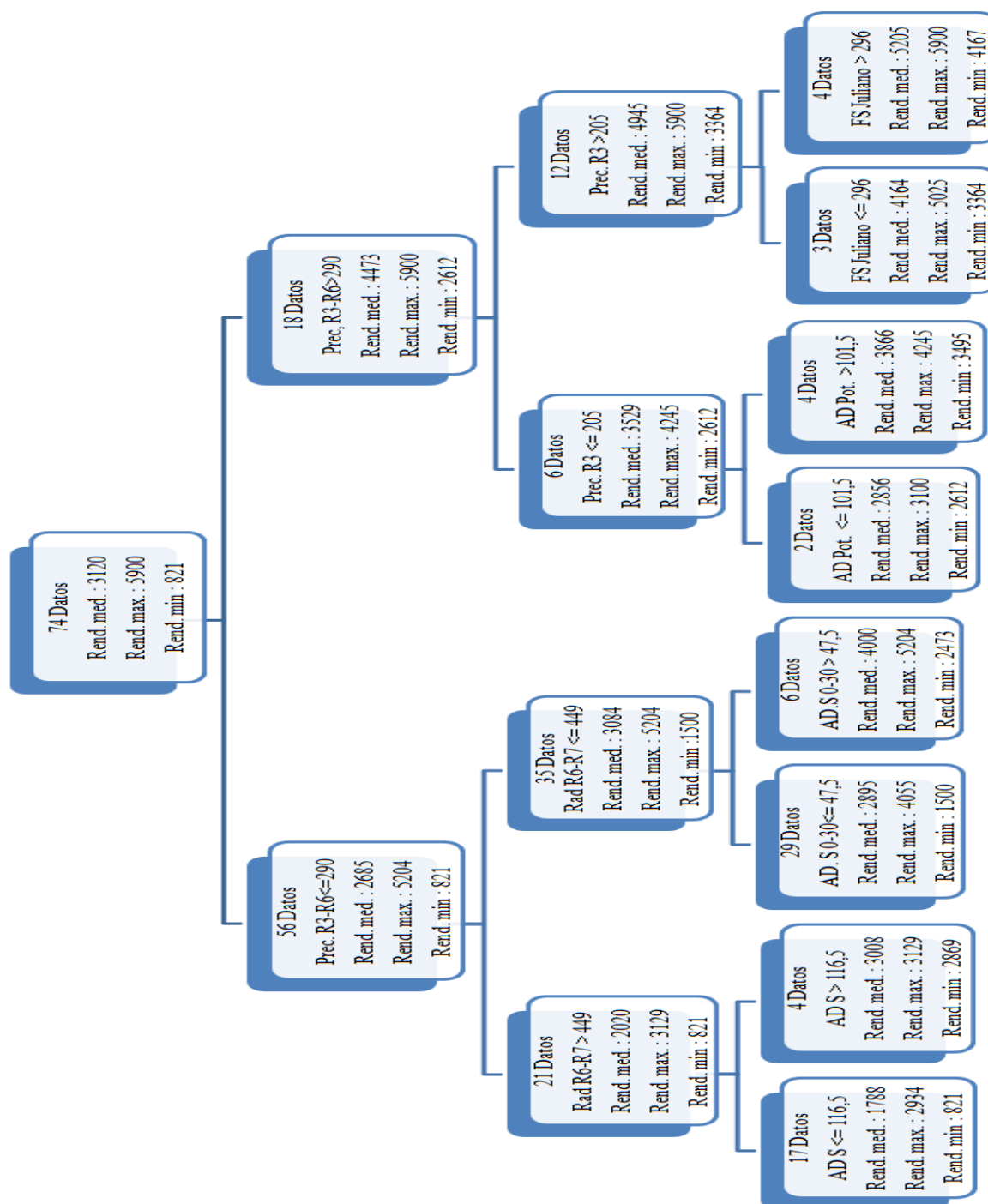


Figura No. 2 : Árbol de regresión para rendimientos.

Rendimientos en Kg ha^{-1} . Precipitaciones y Agua Disponible en mm, y Radiación en Mj m^{-2} .

4.5 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE CON LAS PRECIPITACIONES ACUMULADAS EN EL PERÍODO R3-R6 COMO VARIABLE AUXILIAR (DUMMY)

El objetivo de este análisis fue, una vez estudiada la salida del árbol de regresión anterior, conocer cuáles eran las variables significativas, especialmente en situaciones que las precipitaciones acumuladas entre R3-R6 fueran menores a 290mm.

El R^2 ajustado fue de 0.55 y en el cuadro presentado a continuación se pueden ver los coeficientes de regresión y estadísticos asociados. El procedimiento de selección del modelo fue el mismo que se utilizó en el primer análisis de la regresión múltiple presentado.

Cuadro No. 7: Coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.

Coeficientes	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows
Constante	-1038,15	1643,5	-4315,9	2239,6	-0,63	0,5297	
Agua Disponible 0-30 cm (mm)	37,4	7,3	22,6	52,1	5,06	<0.0001	28,31
Fecha de Siembra Juliano	13	4,7	3,5	22,5	2,75	0,0076	10,48
Dummy R3-R6	-1695	221	-2136,1	-1254,5	-7,67	<0.0001	61,03

Est: Valor Estimado. E.E.: Error Estándar de la estimación. LI: Limite Inferior. LS: Limite Superior. T: Valor estadístico T.

Las variables que seleccionó el modelo de regresión y que fueron estadísticamente significativas (Cuadro No. 8) fueron el agua disponible a la siembra en los primeros 30cm, la fecha de siembra y la variable de clasificación impuesta. Como no es posible al momento de la siembra saber si van a ocurrir o no precipitaciones por encima o por debajo de los 290 mm, una variable que puede ser manejada es el agua disponible a la siembra en los primeros 30 cm. La fecha de siembra también fue relevante pero tuvo un impacto menor.

Cuadro No. 8: Análisis de la Varianza (SC tipo III) para la regresión lineal múltiple utilizando una variable de clasificación.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	60997139	3	20332380	31,03	<0.0001
AD 0-30	16811309	1	16811309	25,65	<0.0001
FS Juliano	4960554,5	1	4960554,5	7,57	0,0076
Dummy R3-R6	38560775	1	38560775	58,84	<0.0001
Error	45872850	70	655326,43		
Total	106869989	73			

4.6 ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS

El análisis de conglomerados permitió separar 4 grupos, Si diferenciamos estos grupos según el % de agua disponible (%AD) promedio durante tres períodos (siembra-R3, R3-R6, R6-R7).

Cuadro No. 9: Conglomerados: % de agua disponible en los diferentes periodos del cultivo.

Conglomerado	Promedio % AD S-R3	Promedio % AD R3-R6	Promedio % AD R6-R7
1	38	31	29
2	24	15	12
3	81	69	66
4	24	28	12

El conglomerado 1 lo integraron situaciones en las cuales el % AD promedio para los 3 períodos fueron similares y menores al 40%, en el 2 el % AD promedio fue bajo en los 3 períodos (menores al 25%), en el 3 el % AD promedio fue alto en todos los períodos y en el 4 fue muy similar al 2, pero con la diferencia que durante el período crítico (R3-R6) el % AD promedio fue el doble que en el 2 y a su vez similar al 1, pero con menos de la mitad del % AD promedio durante el período R6-R7.

En el Cuadro No. 10 se presentan las diferencias en rendimiento entre conglomerados (R^2 ajustado 0.47 $p < 0.001$). El conglomerado 3 tuvo el rendimiento promedio más alto, dada la alta disponibilidad hídrica durante todo el ciclo del cultivo. El Conglomerado 1 fue el que agrupó las situaciones promedio en cuanto a % AD y por

lo tanto el rendimiento promedio para estos datos fue el que siguió el orden. El conglomerado 4 es el 3° en el orden de rendimientos promedio obtenidos, posiblemente estando debajo del 2° por falta de agua en el último período del ciclo y el rendimiento fue muy similar al del conglomerado 1, si bien en los periodos desde siembra a R3 y desde R6-R7 el agua disponible fue bastante menor, lo que posiblemente permitió alcanzar ese rendimiento fue que en el período crítico R3-R6 el agua disponible fue similar al del conglomerado 1. El conglomerado 2 fue el que presentó los menores rendimientos promedio explicado por el bajo % de agua disponible durante todo el ciclo del cultivo.

Cuadro No. 10: Test LSD de Fisher. Comparación entre Conglomerados.

Conglomerado	Medias	n	E.E.			
3	5378	6	358,37	A		
1	3191	48	126,7		B	
4	2958	9	292,61		B	
2	1711	11	264,68			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). Alfa=0.05
DMS=686.85966.

4.7 COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES % DE AGUA DISPONIBLE ESTIMADA EN LOS DIFERENTES PERÍODOS DESDE SIEMBRA-R3, R3-R6 Y R6-R7

Se comparó de forma independiente para cada período los diferentes % AD promedio durante los períodos desde Siembra a R3, R3-R6 y R6-R7, estimadas a partir del balance hídrico. Se compararon situaciones en que el % AD promedio estimada fue mayor o menor al 40% , para el período desde siembra a R3 y desde R6-R7 y mayor o menor al 60% para el período R3-R6. Resultaron significativas las diferencias en rendimiento según el % AD promedio estimada en el período siembra a R3 ($p < 0.0012$) y R3-R6 ($p < 0.0002$) y no significativas las diferencias para el período R6-R7 ($p < 0.7847$).

Cuadro No. 11: Test LSD Fisher. Comparación entre % Agua disponible en el período Siembra-R3.

% AD desde Siembra a R3	Medias	n	E.E.		
>40%	3971	27	214,94	A	
<40%	2969	47	192,92		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes($p \leq 0.05$). Alfa=0.05
DMS=492.65074. Error: 1086772.0487 gl: 70.

Las situaciones que presentaron mayor al 40% de AD promedio durante el período desde siembra a R3 presentaron rendimientos significativamente superiores (Cuadro No. 11), así como las situaciones que presentaban %AD > 60 % durante el período R3-R6 (Cuadro No. 12)

Cuadro No. 12: Test LSD Fisher. Comparación entre % Agua disponible en el período R3-R6.

% AD R3-R6	Medias	n	E.E.		
>60%	5297	5	466,21	A	
<60%	3138	69	150,22		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes($p \leq 0.05$). Alfa=0.05
DMS=682.25978. Error: 1086772.0487 gl: 70.

5. DISCUSIÓN

La capacidad de almacenaje de agua disponible que presentaron los datos utilizados en la base de datos para realizar el análisis varió entre 41 y 124 mm, y según Molfino y Califra (2001) estarían comprendidos en las clases de baja (entre 40 y 80 mm) y media (entre 80 y 120 mm) agua potencialmente disponible. No estuvieron comprendidas en el análisis las clases Alta y Muy Alta, las cuales tienen capacidad de almacenar agua entre 120 y 160 mm, y mayor a 160 mm respectivamente. Esto debe ser tenido en cuenta, ya que al variar la capacidad de almacenaje de los suelos, en suelos de mayor capacidad de almacenaje de agua, podrían aparecer diferentes respuestas en los factores que determinaron los rendimientos en el análisis.

El rendimiento real promedio de los ensayos que conformaron la base fue de 3121 Kg ha⁻¹, este se encuentra por encima del rendimiento promedio nacional para los últimos 10 años (1970 Kg ha⁻¹). A su vez, si se observan las precipitaciones acumuladas en el período desde siembra hasta R7, el promedio para el total de los datos de la base fue de 567mm. El cálculo entre los Kg de grano producido por mm de agua da un valor de 5 Kg ha⁻¹ por mm de agua, este valor está por debajo de los 8 Kg ha⁻¹ por mm de agua adicional reportado por Andrade y Sadras (2002b).

En aquellas situaciones en que las precipitaciones desde siembra hasta R7 fueron muy elevadas (1300-1400 mm), las precipitaciones tuvieron una buena distribución durante todo el ciclo del cultivo, lo que permitió obtener rendimientos cercanos a los potenciales, además de que en esas situaciones los rendimientos potenciales no fueron los más elevados, debido a que la radiación acumulada no fue elevada. Por otro lado en las situaciones en que las precipitaciones variaron entre 300 y 700 mm de precipitaciones acumuladas entre siembra y R7, si se observa detalladamente la base, se puede ver que hubo una alta variabilidad de las precipitaciones en los diferentes períodos (siembra-R3, R3-R6 y R6-R7) lo que generó la variabilidad en los rendimientos reales.

Las precipitaciones acumuladas durante el período crítico fue el factor determinante del rendimiento, y pudo observarse que solo cuando las precipitaciones en este período fueron mayores a 290-300 mm dependiendo del análisis se pudo obtener por encima del 70% del rendimiento potencial, a su vez el árbol de regresión determinó que los datos se agrupaban en diferentes grupos según las precipitaciones en este período también.

Otro aspecto relevante fue el promedio de días para el período R3-R6 de los datos analizados fue de 39 días, lo que deja un valor muy alto de precipitaciones a concretarse en es corto período (300mm en 39 dias). Si se compara este valor con las precipitaciones promedio esperadas para Uruguay en la serie 1980-2009 para la localidad de Paysandú, aproximadamente llueven en esos dias132 mm (Castaño et al., 2011). El valor de la precipitaciones está muy por debajo del valor de 290 mm determinados como necesarios. Debe tenerse también la capacidad de almacenaje d agua de los suelos (entre 41 y 141 mm) estudiados, esto si se realizara en análisis en suelos de mayor capacidad de almacenaje de agua podrían variar los requerimientos de precipitaciones en el período R3-R6.

En resumen los altos rendimientos del cultivo van a estar asociados a diversos factores, pero las precipitaciones durante el período crítico (R3-R6) deben estar en el entorno de los 300 mm y el período en que deben ocurrir es en términos medios de 39 días, lo que hace muy baja la probabilidad de ocurrencia y por tanto explica la realidad de los rendimientos nacionales.

6. CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis realizado a partir del rendimiento potencial se concluye que precipitaciones menores a los 100 mm ocurridos durante el período R3-R6 determinan rendimientos reales menores al 50% del potencial y precipitaciones mayores a los 300 mm determinan rendimientos reales mayores al 70% del potencial. Para estos casos hay un doble efecto, ya que a menores precipitaciones menores rendimientos reales y mayor rendimiento potencial consecuencia de la mayor radiación interceptada.

- El análisis de regresión lineal múltiple permitió explicar el 66% de la variación en rendimientos. Entre las variables seleccionadas, la de mayor peso fue las precipitaciones acumuladas durante el período R3-R6.

- De acuerdo al árbol de regresión la principal fuente de variación fueron las precipitaciones acumuladas durante el periodo R3-R6, ubicando en 290 mm el límite entre los altos y bajos rendimientos. Los máximos rendimientos estuvieron asociados a precipitaciones mayores a los 205 mm en el período siembra-R3 y a siembras posteriores al 23 de octubre. Otra forma de llegar a rendimientos elevados (aunque no a los máximos) aún cuando las precipitaciones ocurridas en el período R3-R6 fueran menores a los 290 mm, estuvo dada por radiación menor a 449 Mj m^{-2} en el periodo R6-R7 y agua disponible en los primeros 30 cm del suelo mayor a 47 mm.

- El análisis de regresión lineal utilizando una variable de clasificación, reafirmó la importancia de las lluvias durante el período R3-R6, ya que la variable de clasificación ingresó al modelo y fue significativa y determinó que el agua acumulada a la siembra en los primeros 30 cm de profundidad cumple un rol relevante en la determinación del rendimiento.

- El análisis de conglomerados permitió separar distintos tipos de sequías a las que estuvo expuesto el cultivo, aunque la variación existente no permitió profundizar en el tema. Los resultados indican que los mayores rendimientos estuvieron asociados a niveles de agua en el suelo mayores a 60% de su capacidad máxima durante todo el ciclo del cultivo.

- Los resultados indican que los mayores rendimientos estuvieron asociados a disponibilidades hídricas mayores a 40% durante el período desde siembra a R3 y mayores al 60% durante el periodo R3-R6.

- Según lo analizado, las condiciones que van a permitir obtener altos rendimientos en el cultivo de soja, son la alta ocurrencia de precipitaciones en el período

crítico (R3-R6), las mismas deberán ser mayores a los 290 mm, y un porcentaje de agua disponible en el suelo mayor al 60% para el mismo período y desde la siembra a R3 mayor al 40%. El factor que puede ser manejado previo a la siembra, con el objetivo de tener una mayor probabilidad de obtener un buen rendimiento, es el agua acumulada en el suelo en los primeros 30 cm.

7. RESUMEN

El cultivo de soja ha sido una de los principales responsables de los cambios en el sector agrícola uruguayo durante los últimos 10 años. El mismo pasó de 12000 hás sembradas en la zafra 2000-2001 a 862000 hás en la zafra 2010-2011. A pesar de estos cambios el rendimiento por hectárea no se ha visto modificado durante estos años. Las deficiencias hídricas se han presentado como la principal limitante para la obtención de mayores rendimientos a nivel comercial. Este trabajo tiene como objetivo cuantificar la importancia relativa de la capacidad de almacenaje de agua del suelo, el agua almacenada al inicio del cultivo y la distribución de las precipitaciones en los diferentes períodos del ciclo del cultivo sobre el rendimiento en grano. Para el mismo se conformó una base de datos con información que se obtuvo de 8 trabajos diferentes en el cultivo de soja, realizados en la estación experimental Dr. Mario A. Cassinoni desde la zafra 2004-2005 a la 2010-2011, datos climáticos de la estación meteorológica automática de la misma estación y datos de rendimiento potencial estimados a partir del modelo CROPSYST. Cuando la base de datos fue finalizada, se estudiaron las relaciones entre el rendimiento reales, rendimientos potenciales, y distintas combinaciones de ciclos de cultivos, condiciones climáticas y reserva de agua en el suelo al momento de la siembra. Para el análisis se utilizó el software estadístico Infostat 2010/p, fueron realizados 5 análisis diferentes. Los resultados de los mismos fueron coincidentes en que el agua en el período desde R3-R6 es la principal determinante del rendimiento. Para la obtención de altos rendimientos debe haber alta ocurrencias de precipitaciones, mayores a 290 mm, y un % de agua disponible mayor al 60% en dicho período. El factor que se puede manejar previo a la siembra del cultivo es el agua disponible en el suelo.

Palabras clave: Soja; Precipitaciones; Período Crítico; Rendimiento.

8. SUMMARY

The soybean crop has been one of the main responsible in the changes of the agricultural sector of Uruguay during the last 10 years. The same was true of 12000 hectares planted in 2000-2001 to 862,000 hectares crop in 2010-2011. Despite these changes the yield per hectare has not been modified over the years. The water deficiencies have been presented as the main obstacle to obtaining higher performance in yield at fields of commercial producers. This work aims to quantify the relative importance of water storage capacity of soil, water stored at the beginning of cultivation and distribution of rainfall in different periods of the crop cycle on grain yield. For the same we assembled a data base with information obtained from 8 different jobs in the soybean crop, conducted at the experimental station Dr. Mario A. Cassinoni from the 2004-2005 harvest of 2010-2011, climatic data from automatic weather station in the same season and estimated potential yield data from CropSyst. When the data base was completed, we studied the relationship between actual performance, potential yields, and various combinations of crop cycles, weather and water reserve in the soil at planting. For analysis we used the statistical software Infostat 2010 / p, 5 different analyzes were performed. The results of these studies were consistent in that the water in the period from R3-R6 is the main determinant of performance. To obtain high yields should be high occurrences of rainfall greater than 290 mm, and a% of available water greater than 60% in that period. The factor that can be handled prior to crop planting is the available soil water.

Key words: Soybean; Rains; Critical period; Yield.

9. BIBLIOGRAFIA

1. ADRIANI, J.M.; ANDRADE, F.H.; SUERO, E.E; DARDANELLI, J.L. 1991. Water deficits during growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie*. 11: 737-746.
2. ANDRADE, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Research*. 41: 1-12.
- 3._____.; AGUIRREZÁBAL, L.A.N; RIZZALLI, R.H. 2002a. Crecimiento y rendimiento comparados. *In*: Andrade, F.H; Sadras, V.O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 61-96.
- 4._____.; SADRAS, V.O. 2002b. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *In*: Andrade, F.H; Sadras, V.O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 173-206.
5. BAROFFIO QUILLET, J.C; RAMOS BETANCURT, J.P. 2009. Calibración y validación del modelo Cropsyst para un cultivar de soja para las condiciones de producción del litoral-oeste de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 76 p.
6. BACIGALUPPO, S.; DARDANELLI, J.; GERSTER, G.; QUIJANO, A.; BLZARINI, M.; BODRERO, M.; ADRIANI, J.M.; ENRICO, J.; MARTIGNONE, R. 2006. Variaciones del rendimiento de soja en sur de Santa Fe. Factores limitantes de clima y suelo. *Informaciones Agronómicas*. 32: 12-15.
7. CALVIÑO, P.A; SADRAS, V.O. 1999. Interannual variation in soybean yield; interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research*. 63: 237-246.
8. CÁRCOVA, J.; ABELEDO, L.G; LÓPEZ, M. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *In*: Satorre, E.H.; Benech, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. pp. 75-98.

9. CASTAÑO, J.P.; GIMÉNEZ, A.; CERONI, M.; FUREST, J.; AUNCHAYNA, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo, INIA. 34 p. (Serie Técnica no. 193).
10. DARDANELLI, J.; COLLINO, D.; OTEGUI, M.E.; SADRAS, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de cultivos de grano. In: Satorre, E.H.; Benech, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. pp. 375-440.
11. GIMÉNEZ, L. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. In: Seminario Internacional; Potencial del Riego Extensivo en Cultivos y Pasturas (1º, 2010, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Boscana. pp. 29-37.
12. _____.; GARCIA, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano en dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15: 100-108.
13. KANTOLIC, A.G.; GIMÉNEZ, P.I.; DE LA FUENTE, E.B. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica, del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. In: Satorre, E.H.; Benech, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. pp. 165-201.
14. MIRALLES, D.J.; WINDAUER, L.B.; GÓMEZ, N.V. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de grano. In: Satorre, E.H.; Benech, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. eds. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Facultad de Agronomía. pp. 59-70.
15. MOLFINO, J.; CALIFRA, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. División Suelos y Aguas. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. 12 p.
16. OTEGUI, M.E. 2009. Bases ecofisiológicas para el manejo del agua en cultivos para grano conducidos en secano. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º, 2009, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 7-15.

17. SADRAS, V.O.; FERREIRO, M.; GUTHEIM, F.; KANTOLIC, A.G. 2002. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. In: Andrade, F.H; Sadras, V.O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce, INTA Balcarce/ UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 29-60.
18. SAXTON, K.E; RAWLS, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society American Journal. 70: 1569-1578.
19. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS. 2011. Anuario estadístico agropecuario.(en línea). Montevideo. ? p. Consultado 15 ene. 2012. Disponible en:
<http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,583,O,S,0,MNU;E;27;7;MNU;>