

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA



“Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”

Modalidad: Proyecto

Determinación del efecto de la variabilidad climática sobre los rendimientos de maíz y soja en el departamento Río Cuarto como información útil para mejorar la adaptación

ALUMNO: Luciano Luis Barlasina

DNI: 32.071.221

DIRECTOR: Ing. Agr. Ph. D. Roberto Seiler

AGOSTO 2013



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final:

Determinación de la variabilidad climática sobre los rendimientos de maíz y soja en el departamento Río Cuarto como información útil para mejorar la adaptación

Autor: Luciano Luis Barlasina

DNI: 32.071.221

Director: Ing. Agr. Ph. D. Roberto Seiler

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

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico



II

AGRADECIMIENTOS

A mi familia Omar, Nancy, Lucas, Leo, Vale y Francesca por estar siempre apoyandome bajo cualquier circunstancia.

A Caro, mi compañera de vida, mi soporte, por el apoyo incondicional.

A mis amigos, por el apoyo brindado.

Al Doctor Roberto Seiler, por la calidad humana y profesional brindada a lo largo del presente trabajo.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto, por brindarme la invaluable posibilidad de desarrollarme profesional y sobre todo humanamente.

A Dios.

INDICE

PORTADA	I
CERTIFICADO DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
INDICE	IV
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	4
HIPÓTESIS	7
OBJETIVOS	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
MATERIALES Y MÉTODOS	8
1. Área de Estudio y datos meteorológicos	8
2. Datos de rendimientos de cultivos	8
3. Datos de Satélites	11
RESULTADOS Y DISCUSION	13
1. Análisis de la variabilidad interanual	13
1.1. Precipitaciones medias del Departamento	13
1.2. Precipitaciones totales del ciclo agrícola y durante los meses de cultivo.	13
1.3. Precipitaciones estacionales	16
1.4. Indices satelitales de estado de la vegetación	17
2. Correlación de rendimiento de maíz y de soja versus variables ambientales	20
2.1. Rendimientos versus variables pluviométricas	20
2.2 Rendimientos versus variables satelitales	23
3. Cuantificación de la variabilidad de los rendimientos en función de las variables pluviométricas y satelitales.	25
3.1 Modelos de estimación de rendimientos de maíz y soja basados en variables pluviométricas.	26
3.1.1 Rendimiento de maíz versus variables pluviométricas.	26

3.1.2 Rendimiento de soja versus variables pluviométricas.	26
3.2 Modelos de rendimientos de maíz y soja basados en índices derivados de datos satélites.	27
3.2.1 Rendimiento de maíz versus VCI.	27
3.2.2 Rendimiento de soja versus VCI.	29
CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA	32
ANEXO	34

INDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1:** Variabilidad y tendencia de los rendimientos de soja de la serie de años 1974-2011 (Ecuación de regresión, y: rendimiento en Kg/ha; x: número de orden del año que corresponda, a partir de 1974 igual a 1). **9**
- FIGURA 2:** Variabilidad y tendencia de los rendimientos de maíz de la serie de años 1970-2011 (Ecuación de regresión, y: rendimiento en Kg/ha; x: número de orden del año que corresponda, a partir de 1970 igual a 1). **9**
- FIGURA 3:** Variación del rendimiento de maíz como desvío de la tendencia. **10**
- FIGURA 4:** Variación del rendimiento de soja como diferencia de la tendencia. **11**
- FIGURA 5:** Distribución de las precipitaciones decádicas promedio de la serie (1985-2008). **13**
- FIGURA 6:** Variabilidad de las lluvias ocurridas durante la campaña agrícola de cultivos de verano, para el departamento de Río Cuarto. **14**
- FIGURA 7:** Variabilidad de las precipitaciones de los meses de diciembre y enero durante las campañas analizadas. Precipitación media de diciembre y enero 142 mm y 145 mm respectivamente. **15**
- FIGURA 8:** Variabilidad de las precipitaciones de los meses de febrero y marzo durante las campañas analizadas. Precipitación media de febrero y marzo 94 mm y 117 mm respectivamente. **16**
- FIGURA 9:** Variabilidad interanual de lluvias de primavera y de verano entre las campañas analizadas. **17**
- FIGURA 10:** Variabilidad interanual de los promedios mensuales de VCI, para diciembre y enero. **18**
- FIGURA 11:** Variabilidad interanual de los promedios mensuales de VCI, para

febrero y marzo.	18
FIGURA 12: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 1: semana 49 a 51; Período 2: semana 52 a 2).	19
FIGURA 13: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 3: semana 3 a 5; Período 4: semana 6 a 8).	19
FIGURA 14: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 5: semana 9 a 11; Período 6: semana 12 a 14).	20
FIGURA 15: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus lluvias mensuales (nivel de significancia r para α 0,05).	21
FIGURA 16: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus lluvias decenales (nivel de significancia r para α 0,05).	22
FIGURA 17: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus VCI semanal (nivel de significancia r para α 0,05).	23
FIGURA 18: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus VCI mensual (nivel de significancia r para α 0,05).	24
FIGURA 19: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus VCI periódico (nivel de significancia: r para α 0,05).	25

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Correlación rendimiento de maíz versus precipitaciones.	34
TABLA 2. Correlación rendimiento de maíz versus estado de vegetación (VCI).	36
TABLA 3. Correlación rendimiento de soja versus precipitaciones.	38
TABLA 4. Correlación rendimiento de soja versus estado de vegetación (VCI).	40

RESUMEN

La producción mundial de alimentos depende en gran medida de los recursos climáticos, los cuales son los mayores responsables de las fluctuaciones anuales de los rendimientos de los cultivos. La variabilidad de las precipitaciones, sumada a la creciente demanda de aquellos frente al crecimiento de la población mundial, imponen estudios para cuantificar y en lo posible atenuar o predecir los efectos que producen las variaciones del clima sobre el rendimiento de los cultivos. En el presente trabajo se intenta determinar los impactos de la variabilidad climática de las lluvias sobre los rendimientos de maíz y de soja en el departamento de Río Cuarto y los períodos más sensibles durante el ciclo de los cultivos, como información útil para mejorar el manejo y las condiciones de adaptación de los mismos. Para ello se utilizaron métodos gráficos para la visualización de la variabilidad interanual de las lluvias, de los rendimientos de los cultivos y de índices de vegetación derivados de datos satélites. Las relaciones entre los datos biológicos y los datos físicos del ambiente se analizaron mediante técnicas corrientes de correlación –regresión. Los resultados muestran correlaciones entre las variables pluviométricas y los rendimientos y entre los índices de vegetación y los rendimientos, los cuales fueron en todos los casos más elevados para maíz que para soja. Finalmente, el trabajo permitió el desarrollo de una serie de modelos estadísticos para la estimación de rendimientos de maíz y de soja, basados en variables pluviométricas y en índices de vegetación. Modelos para maíz basados en el índice de vegetación explican entre un 50 y un 60 % de la variabilidad de los rendimientos.

Palabras claves: rendimiento, maíz, soja, período crítico, precipitaciones.

SUMMARY

World's food production largely depends on climatical resources, which are the most responsible of the crop yield annual fluctuations. Rainfall variability, added to the growing demand of those, due to the world's population growth, make necessary the invention of strategies to quantify, and as possible as it could, to attenuate or even predict the effects that weather variations produce on the crop yield. In this report, it is tried to determinate the impact that the climatical variability of rainfall have on the crop yield, and on the soybean yield at the Rio Cuarto's department, and the most sensitive periods during the cultivation cycle, as useful information, with the aim of enhance the management and adaptability conditions for them. Graphical methods were used to visualize rainfall interannual variability, to visualize the cultivation yield, and also to visualize the vegetation rates, derivate from satellite data. The relation between biological data and physical data of the environment was analysed by common correlation techniques- regression. The results show correlation between rainfall-rates variables and yields. Also show relations between vegetation rates and yield, which were higher for corns than for soybeans in every case. Finally, this paper allowed the development of statistical models series to estimate the maize and soybean yield, based on rainfall-rates variables and vegetation rates. Models for corn based on the vegetation rate explain between a fifty and a sixty percent of the yield variability.

Key words: yield, corn, soybean, critical period, rainfall.



XI

INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, es dependiente de los recursos climáticos. Además, aún sin cambios en la temperatura global y en los patrones de lluvias, la tasa de crecimiento de la población impone en muchas regiones dificultades en el suministro de alimentos, para satisfacer una demanda cada vez mayor (Kaiser et al., 1993).

Según la FAO (1990), la población mundial (5.3 billones de personas con 4 billones en países en desarrollo) está creciendo a una tasa anual de aproximadamente 2%. Los recursos en términos de extensión de tierra cultivable de los países en crecimiento, son limitados (Kaiser, et al. 1993) y al mismo tiempo, en muchas áreas del mundo, la producción potencial de alimentos, tiende a disminuir. Se estima que entre 60 y 100 millones de personas pueden quedar vulnerables a condiciones de malnutrición para el 2080 (Doering, et al. 2002).

El rendimiento en granos depende de la cantidad de agua que el cultivo pueda transpirar, de la eficiencia con que use ese agua para producir materia seca y de la proporción de materia seca que finalmente es destinada a la formación del grano (Satorre et al., 2003). La biomasa producida por unidad de agua consumida expresa la eficiencia con la cual un órgano o cultivo fija carbono en relación con el agua que pierde y se define como eficiencia del uso del agua (EUA) (Satorre et al., 2003). Esta es una característica importante de cada cultivo en particular, que hace al impacto diferencial que provoca un déficit hídrico sobre el rendimiento de los cultivos (Rosenzweig, et al., 1995).

Un gran número de observaciones y de investigaciones llevadas a cabo en los últimos años sustentan la aseveración de que el clima de la tierra está cambiando en mayor magnitud que lo hiciera la variabilidad natural en el pasado. Estos cambios influyen entre otros elementos climáticos, en las precipitaciones, tanto en cantidad como en la distribución temporal. Existe una evidencia creciente que el mayor consumo de combustibles fósiles, los procesos industriales y los cambios en el uso del suelo conducen a un aumento de la emisión de gases llamados efecto invernadero y aerosoles. Dentro de los mismos, el dióxido de carbono (CO₂) es el principal por la magnitud emitida a la atmósfera. No obstante el metano, el óxido nitroso y componentes químicos industriales son también importantes. Estas consecuencias antrópicas alteran el balance de energía del sistema climático, produciendo un aumento de la temperatura media del planeta (IPCC, 2007).

El cambio climático y las fluctuaciones del clima, o lo que colectivamente es denominado como variabilidad climática, afectan a todo el sistema de producción agropecuaria, en distintas formas y con

distintos grados de intensidad. El posible incremento en la variabilidad del clima asociado al calentamiento global ocasionará un aumento en la variabilidad interanual de los rendimientos de los cultivos, afectando tanto a los productores agropecuarios en forma individual como a las economías regionales (IPCC, 2007).

El cambio climático puede producir alteración en los patrones de precipitación modificando el ciclo hidrológico y consecuentemente la disponibilidad de agua para las distintas actividades humanas y para los ecosistemas naturales (Falkenmark y Rockström, 2004). El mayor responsable de las fluctuaciones anuales de los rendimientos de los cultivos y el suministro de alimentos es la variabilidad en las precipitaciones. Cantidades adecuadas o no, de precipitaciones en los períodos críticos de los cultivos, pueden determinar buenas o malas cosechas. Esto no significa que otros factores como la humedad relativa, la radiación solar y las temperaturas no sean importantes sino que, por sus niveles de variabilidad son menos sensibles que la cantidad y distribución de las precipitaciones (Kaiser et al., 1993).

El cambio climático puede producir cambios en el patrón global y regional de las precipitaciones, en la intensidad, la frecuencia y en la duración de los eventos (Trenberth et al., 2003). Asumiendo que las condiciones térmicas son en la mayoría de los casos favorables para el cumplimiento adecuado del ciclo de los cultivos, el agua proveniente de las precipitaciones es la variable más limitante en los sistemas productivos de secano (Seiler y Brizuela, 2009). Una de las causas de la variabilidad de las precipitaciones, a través del cambio climático, es el fenómeno del Niño. Esto es una anomalía del sistema climático del pacífico con efectos globales, que aparece con determinada frecuencia e intensidad. El fenómeno tiene consecuencias ecológicas profundas en los sistemas marinos y terrestres de la región.

En la región pampeana, cuando la temperatura del Océano Pacífico ecuatorial aumenta (años Niño), las precipitaciones tienden a ser superiores a las normales de noviembre a enero mientras que cuando disminuye (años Niña) tienden a ser inferiores al promedio entre octubre y diciembre. En años Niña se reduce sensiblemente el rendimiento de maíz y soja en sus respectivas zonas núcleo y el rendimiento de trigo en el sudoeste de la región pampeana, pero no hay mayor efecto sobre el girasol. En años Niño aumenta el rendimiento de maíz en el sudeste de la región y de trigo en el sudoeste, no se produce mayor impacto en la soja y decae el rendimiento de girasol por exceso de precipitaciones (Satorre et al., 2003).

Considerando que la disponibilidad de agua es fundamental para la agricultura, el impacto del cambio climático respecto de la misma, puede manifestarse a través de las sequías, tal como una falta de agua por un período de tiempo determinado, causando diferentes grados de perjuicios fisiológicos a

plantas y animales; inundaciones, como un exceso de agua por un período de tiempo determinado causando daño fisiológico y físico directo e indirecto a plantas y animales; o por falta de sincronización en la disponibilidad de agua (Doering, et al., 2002). Los daños difieren según las especies cultivadas y las características de las mismas. Teóricamente, los cultivos C4 requieren menos agua por gramo de carbono asimilado que cultivos C3 lo que significa que los cultivos como sorgo y maíz pueden ser más tolerantes a estreses hídricos que otros cultivos. En realidad, el maíz sufre mayor daño frente a un estrés hídrico que el sorgo y se adapta menos a condiciones de sequía. Hay evidencias de que el rendimiento de soja sufre con estrés hídrico temprano y también tardíos en la temporada de crecimiento, por lo que la sincronización de la disponibilidad de agua es importante (Doering, et al., 2002).

Disminuir la incertidumbre, tanto de la variabilidad natural del clima como de la producida por el calentamiento global y el incremento del efecto invernadero, son grandes desafíos científicos actuales en materia del clima y de sus impactos (Seiler y Brizuela., 2009). Los efectos de esa variabilidad climática han generado simultáneamente la necesidad de enfrentar la misma mediante la adopción de tecnología y manejo más eficiente, que contribuyan a la estabilidad de los sistemas de producción y a la mejor adaptación para la producción.

Los modelos climáticos globales (GCMs), proveen el principal pilar para la previsión de futuros escenarios y para evaluar los probables impactos del cambio climático sobre la agricultura. Por otra parte los modelos de cultivos para estimación regional o predial del comportamiento de cultivos son herramientas útiles para el manejo de los riesgos y la incertidumbre (Doering, et al., 2002).

También, en un contexto de cambio climático y de variabilidad climática, es necesario continuar sobre el avance de las metodologías de evaluación del clima y en las prácticas de adaptación de los cultivos, para profundizar el conocimiento sobre las interacciones entre la vegetación y los procesos físicos del ambiente.

ANTECEDENTES

En un análisis particular de los sistemas de producción de granos, se observa que en los últimos tiempos, estos han experimentado y experimentan importantes cambios debido al avance del conocimiento sobre la ecofisiología de las especies, de los diagnósticos y manejos de los distintos componentes tecnológicos y de las nuevas tecnologías incorporadas en los mismos (Satorre et al., 2003).

En maíz a lo largo del ciclo del cultivo se pueden distinguir distintas fases de desarrollo, determinadas por cambios cualitativos en los órganos en formación. La sucesión de etapas fenológicas ha sido generalmente ordenada según escalas, de diferente complejidad y detalle según el objetivo perseguido. La escala fenológica más usada para describir el desarrollo fenológico del maíz es la de Ritchie y Hanway (1982), que utiliza caracteres morfológicos externos (macroscópicos). En ella se pueden distinguir dos grandes períodos: el vegetativo y el reproductivo. El primero se subdivide en estadios identificados con la letra V y un subíndice, que señala el número de orden de la última hoja completamente expandida (lígula visible) al momento de la observación (Satorre et al., 2003).

El estado VE se utiliza para identificar la emergencia del cultivo. El número total de subdivisiones del período vegetativo varía con el genotipo y el ambiente considerado, por modificar ambos el número final de hojas. Una vez producida la aparición de todas las hojas, el estado es definido por la aparición de la panoja (VT: panojamiento). El período reproductivo, subdividido en estadios identificados con la letra R y un subíndice, comienza con la emergencia de los estigmas (R1), continúa con el cuaje (R2 o estado de ampolla) y el llenado de granos (R3: grano lechoso, R4: grano pastoso y R5: grano duro o indentado) y finaliza con la madurez fisiológica (R6) (Satorre et al., 2003).

El rendimiento de maíz está más asociado al número final de granos logrados (NG), que al peso de los mismos, como lo demuestran los altos coeficientes de correlación que se encuentra entre el número de granos y el rendimiento (Satorre et al., 2003). A través de diferentes aproximaciones experimentales se determinó que el NG queda establecido en un período de aproximadamente 30 días centrado en la floración, motivo por el cual se definió a esta etapa como período crítico. La incidencia de un estrés hídrico o lumínico provoca mayores mermas en el NG cuando tiene lugar en este período, que coincide con el crecimiento activo de la espiga, la emergencia de los estigmas y el inicio del llenado de granos (E. Satorre et al., 2003).

Desde el punto de vista climático, las lluvias alrededor de la floración determinan en gran medida el rendimiento, ya que este período es la etapa más sensible al estrés hídrico en el maíz (Andrade et al., 1996). El período de 30 días alrededor de floración es crítico para cultivo de maíz y la elección de la fecha

de siembra puede ser clave para lograr un mejor aprovechamiento del agua en cultivos bajo secano (Della Maggiora et al., 2012).

En soja, externamente pueden diferenciarse fases vegetativas, durante las que aparecen y se expanden hojas y fases reproductivas, caracterizadas por la aparición y el crecimiento de flores, frutos y semillas; además, durante gran parte de las fases reproductivas prosigue la aparición de hojas. Para la descripción de los principales estadios fenológicos externos, la escala desarrollada por Ferh y Caviness (1977) es la más utilizada, tanto por los investigadores como por los asesores y productores. Esta escala propone una descripción de la morfología del cultivo, cuya validez es independiente del cultivar utilizado o de las condiciones generales del cultivo (sitio, fecha de siembra, densidad), ya que toma en cuenta los cambios morfológicos ocurridos en el tallo principal del 50% de las plantas del cultivo (Satorre et al., 2003).

En los estadios vegetativos se describe la sucesiva aparición de hojas, teniendo en cuenta el número de nudos que presentan hojas totalmente desarrolladas. Para definir si una hoja se encuentra totalmente desarrollada es necesario observar la hoja presente en el nudo inmediatamente superior, si la hoja superior no se encuentra enrollada, es decir, si los bordes de los folíolos no se tocan, la hoja inferior se considera desarrollada y el nudo se cuenta. Los estados reproductivos están basados en la floración, el desarrollo en vainas, el desarrollo de las semillas y la maduración y en la mayoría de ellos se considera el estado de los nudos superiores del tallo principal, independientemente de los órganos presentes en otras posiciones de la planta (Satorre et al., 2003).

En soja, los subcomponentes del número de granos se definen durante un período muy extenso del ciclo, desde la emergencia hasta que se determina la supervivencia de los granos de las últimas vainas que aparecen en el cultivo. A su vez, el final de la aparición de nudos y la estabilización del número de granos se superponen parcialmente con la etapa de crecimiento de los granos, que finaliza en madurez fisiológica. Sin embargo, no todo el ciclo resulta igualmente crítico para definir el rendimiento. El período R1-R3 no es generalmente crítico para el rendimiento. Limitaciones posteriores, principalmente durante la etapa R4-R6 tienen un efecto directo sobre el rendimiento al reducir el número de granos, sin permitir compensaciones a través del mayor peso de los granos. Luego de R6 las reducciones en el rendimiento obedecen a un menor crecimiento de los granos (Satorre et al., 2003).

La precipitación es parte componente del ciclo hidrológico, fuente de agua dulce, base de la vida en el planeta. La variabilidad y los cambios en la marcha anual de la precipitación es una de las principales causas de incertidumbre y riesgo para las actividades productivas del país, las precipitaciones

extremas, aquellas que ocurren fuera de las condiciones promedio y de la típica variabilidad de sus promedios, pueden afectar severamente a la economía de un país o región (Núñez et al., 2012).

El objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la variabilidad climática durante el ciclo de los cultivos de maíz y soja y su consecuente respuesta en los rendimientos, para el departamento de Río Cuarto.

HIPÓTESIS

El clima y su variabilidad producen fluctuaciones en los rendimientos de cultivos, cuya cuantificación puede ayudar a mejorar el manejo y la adaptación de los mismos frente a la variabilidad interanual del clima.

OBJETIVOS

Objetivos generales

- Determinar los impactos de la variabilidad climática de las lluvias sobre los rendimientos de maíz y de soja en el departamento de Río Cuarto.
- Determinar los períodos más sensibles durante el ciclo de los cultivos de maíz y soja, como información útil para mejorar el manejo y las condiciones de adaptación de los mismos.

Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad de los rendimientos de maíz y de soja en el departamento de Río Cuarto y su relación con la variabilidad temporal de las precipitaciones y con índices de estado de la vegetación derivados de satélites NOAA.
- Establecer relaciones cuantitativas (modelos estadísticos) de los impactos de esas variables independientes sobre los rendimientos de maíz y de soja.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Área de Estudio y datos meteorológicos

El área de estudio corresponde al departamento de Río Cuarto en la provincia de Córdoba. La extensión geográfica del mismo manifiesta una heterogeneidad en los tipos de suelos, en la vegetación y en los comportamientos meteorológicos. El departamento se ubica como parte de cinco regiones naturales de la provincia, tales como la pampa loessica alta, pampa arenosa alta, pampa anegadiza, pampa medanosa y sierras del sur (Gorgas et al., 2002).

Los datos meteorológicos básicos obtenidos fueron valores diarios de lluvias, medias del departamento, de una serie de 25 años, desde 1984 hasta el año 2008. Los mismos fueron extraídos del sitio web del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (Minagri, 2012), en la sección del sistema integrado de información agropecuaria, suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional. A partir de los datos básicos se procesaron las lluvias totales de diez días, totales por mes y totales por año, conformando respectivas series de datos decádicos, mensuales y anuales. A los fines de poder analizar la variabilidad interanual de las precipitaciones y su efecto sobre el comportamiento biológico, en particular de los cultivos de maíz y de soja, a partir de las series anteriores se generaron para el departamento a) las lluvias de cada campaña agrícola, tal como la acumulación de lluvias desde julio de un año hasta junio del año siguiente; b) las lluvias de los meses críticos para la determinación de los rendimientos de esos cultivos (meses de diciembre, enero, febrero y marzo); c) las lluvias de primavera (acumulación de los meses de septiembre, octubre y noviembre) y d) las lluvias de verano (acumulación de los meses de diciembre, enero y febrero). Cada uno de estos agrupamientos de lluvias constituyeron nuevas series meteorológicas, disponibles para el análisis propuesto en este trabajo.

2. Datos de rendimientos de cultivos

Para el análisis se dispuso de datos de rendimiento de las campañas agrícolas desde 1969/1970 hasta la 2010/2011, y desde 1973/1974 hasta la 2010/2011, para maíz y soja, respectivamente. Los datos fueron obtenidos del sitio web oficial del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación (Minagri, 2011), en la sección del sistema integrado de información agropecuaria y corresponden a rendimientos promedios para el departamento de Río Cuarto. Mediante análisis de correlación-regresión, los mismos fueron procesados de manera de poder cuantificar la variabilidad de los rendimientos alrededor de la tendencia de la serie considerada (fig. 1 y 2). Este procedimiento permite separar la componente tecnológica (tendencia) en cada año particular, de la componente asumida como climática (Seiler et al., 2007).

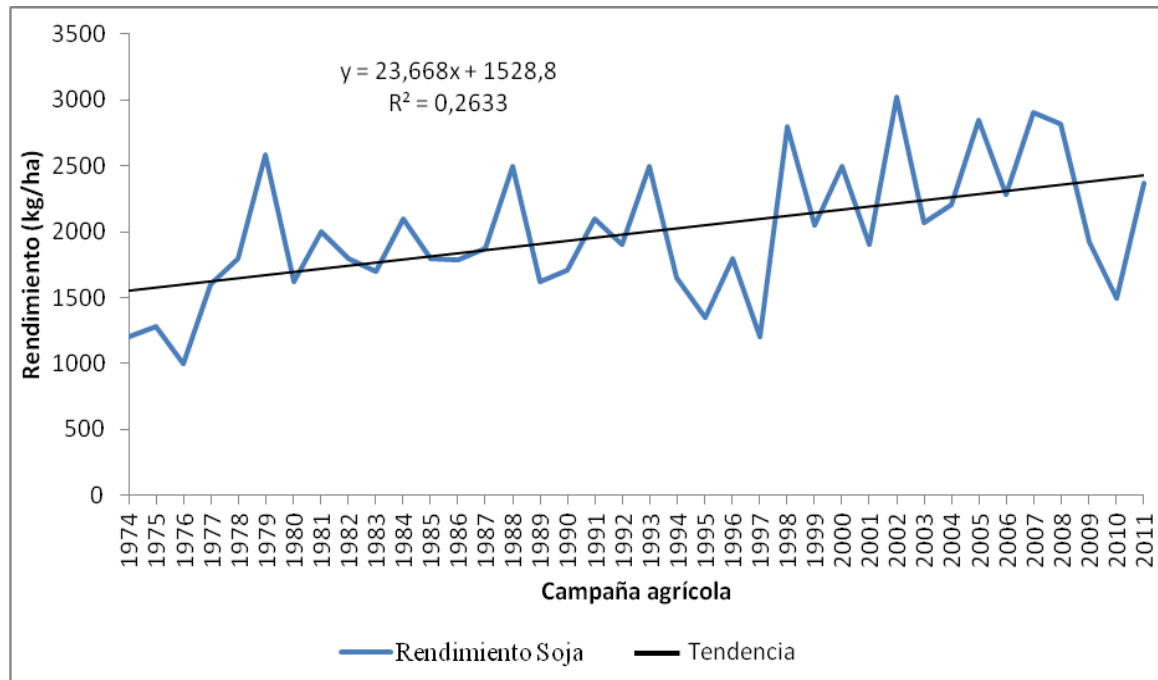


FIGURA 1: Variabilidad y tendencia de los rendimientos de soja de la serie de años 1974-2011 (Ecuación de regresión, y: rendimiento en Kg/ha; x: número de orden de la campaña que corresponda, a partir de 1974 igual a 1; 1974 = campaña agrícola 1973/74).

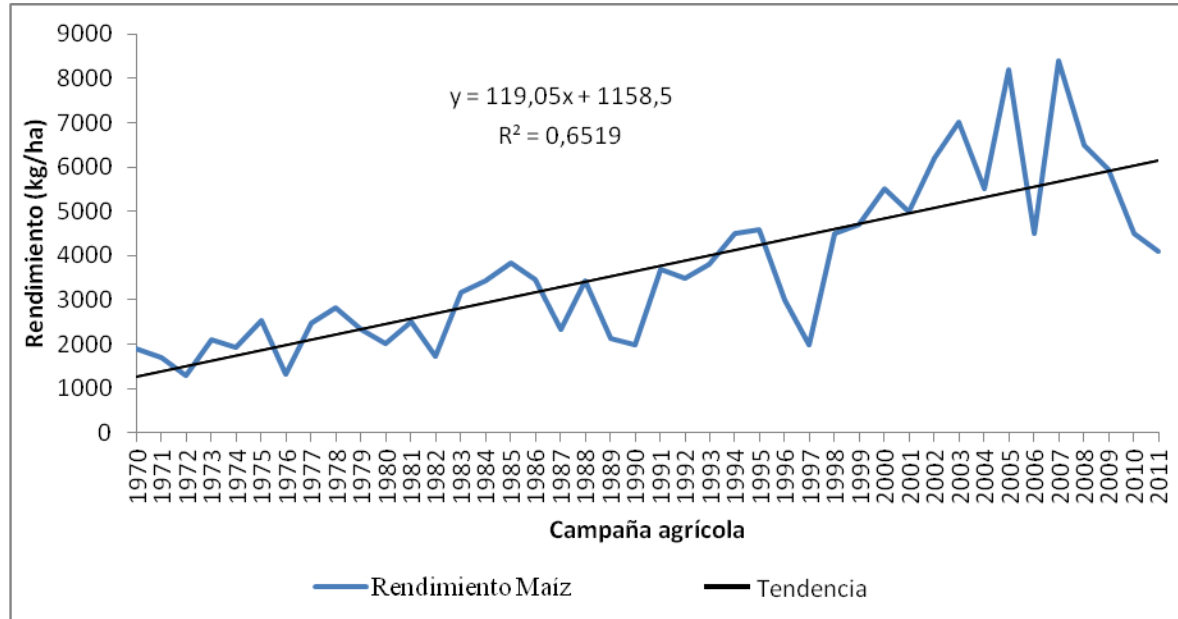


FIGURA 2: Variabilidad y tendencia de los rendimientos de maíz de la serie de años 1970-2011 (Ecuación de regresión, y: rendimiento en Kg/ha; x: número de orden del año que corresponda, a partir de 1970 igual a 1; 1970 = campaña agrícola 1969/70).

Ambas series de rendimientos muestran una tendencia positiva que refleja, seguramente en alta proporción, la evolución en materia de tecnologías aplicadas. La mejora de materiales genéticos, los cambios en los sistemas de labranza y en la maquinaria agrícola, el uso de fertilizantes y agroquímicos son parte del paquete tecnológico, que contribuye a elevar los promedios de rendimientos.

A partir de las respectivas tendencias calculadas para las series de rendimientos de ambos cultivos, se compusieron respectivas series de desvíos de rendimientos respecto de la tendencia, expresados como el cociente entre el rendimiento observado y el esperado según el nivel tecnológico, para cada uno de los años de las series (fig. 3 y 4). Las series se procesaron para un período menor, 1984/85 a 2007/2008, que corresponde al período de tiempo elegido para analizar las correspondientes relaciones clima- cultivos.

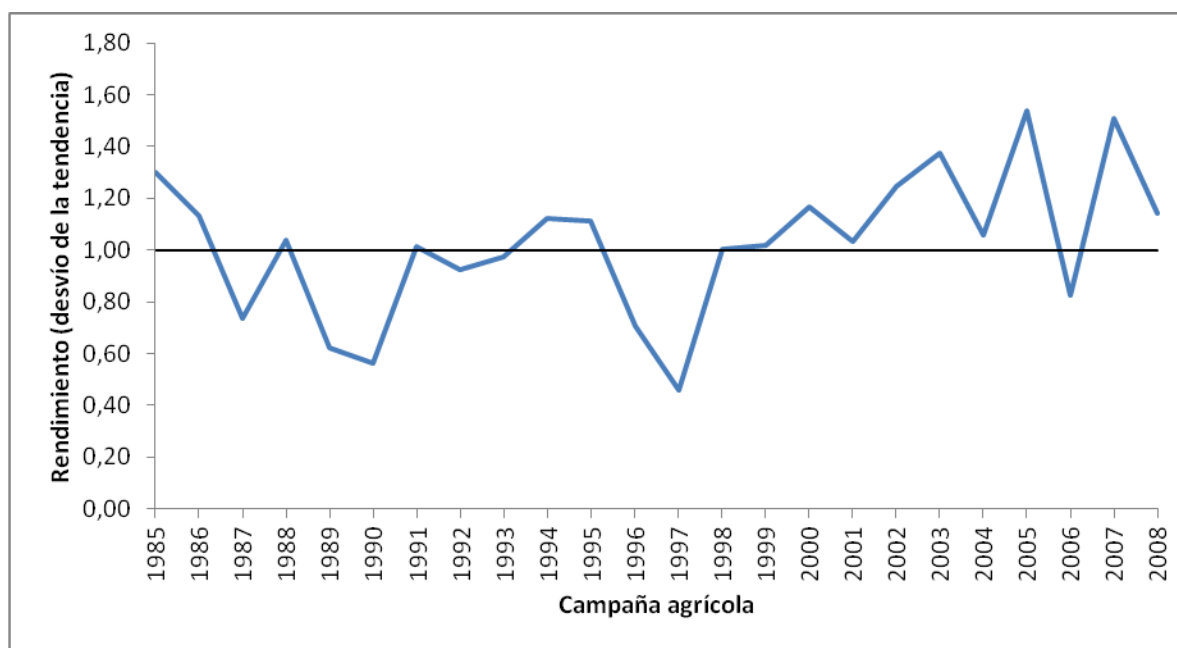


FIGURA 3. Variación del rendimiento de maíz como desvío de la tendencia (1985: campaña agrícola 1984/1985).

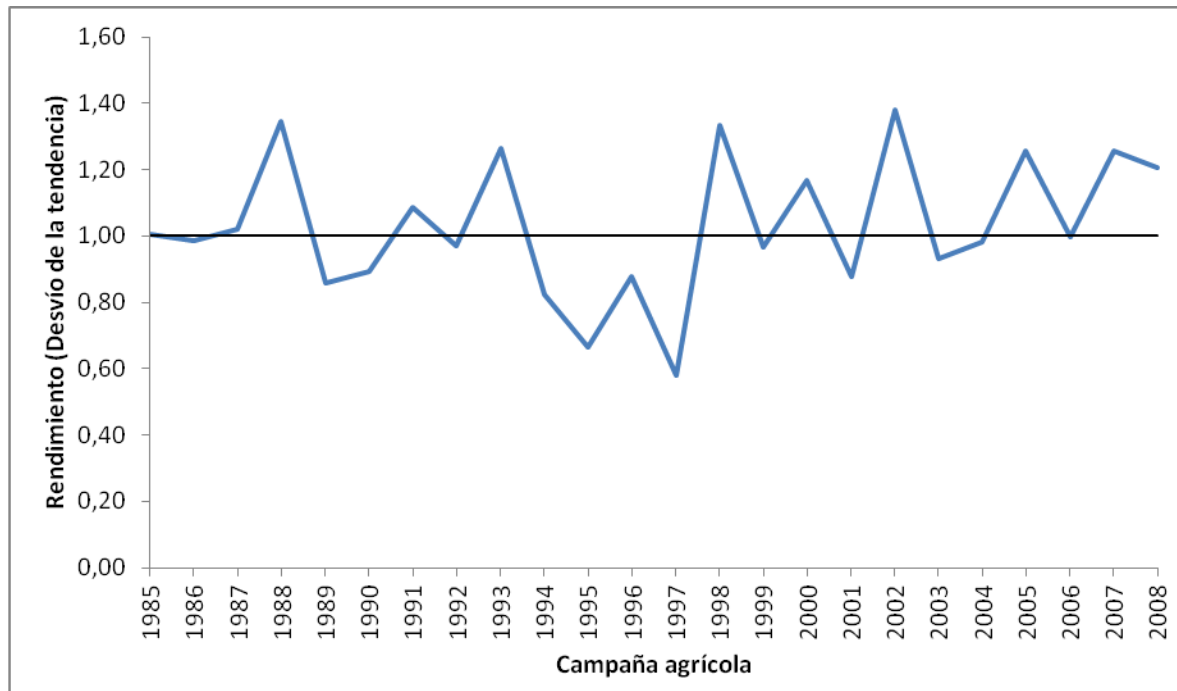


FIGURA 4. Variación del rendimiento de soja como diferencia de la tendencia (1985: campaña agrícola 1984/1985).

3. Datos de Satélites

Consecuente con la longitud y períodos de tiempo de las series de datos meteorológicos, se obtuvieron datos semanales de satélites en valores medios para el departamento de Río Cuarto. Los mismos corresponden al Índice de Estado de la Vegetación (VCI por sus siglas en inglés) (Kogan, 1990).

Los datos satélites corresponden a mediciones de energía total reflejada y emitida por la superficie del suelo, obtenidos del radiómetro avanzado de alta resolución (AVHRR) a bordo de satélites NOAA (Seiler et al., 2007). La resolución espacial de los datos es de 16 km y temporal de un día integrados en un valor semanal (Kidwell, 1997). A partir de los mismos se obtiene el índice normalizado de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Este Índice responde a la siguiente forma:

$$(NDVI = (VIS - NIR) / (VIS + NIR))$$

Donde VIS corresponde a valores medidos en el espectro visible y NIR a los del infrarrojo cercano. Finalmente a partir de este índice se calcula el VCI (Kogan, 1990) el cuál asume la siguiente forma:

$$VCI = 100 * (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$$

Donde NDVI, NDVI_max y NDVI_min corresponden a valores semanales de NDVI actual, máximo y mínimo de la serie respectivamente.

El VCI se obtuvo para las 52 semanas del año y para la serie 1985-2008. Estos índices se ordenaron para cada ciclo de cultivos de verano, desde la semana 27 que corresponde a la primera semana del mes de julio de un año, hasta la 26 que es la última semana de junio del año siguiente. Por ejemplo, la campaña 1985 se extiende desde la semana 27 a la 52 del año 1984 y desde la semana 1 hasta la 26 del año 1985. El Índice asume valores entre 0 a 100, reflejando la variación de las condiciones de la vegetación, desde el extremo malo al óptimo, respectivamente.

A partir de las series semanales de VCI se conformaron series mensuales como el promedio de los valores de las semanas que conforman cada mes y también series de valores promedios de VCI agrupados en períodos, conformados por tres semanas de la siguiente manera: período 1 (semanas 49, 50 y 51), período 2 (semanas 52, 1 y 2), período 3 (semanas 3, 4 y 5), período 4 (semanas 6, 7 y 8), período 5 (semanas 9, 10 y 11) y período 6 (semanas 12, 13 y 14). También se utilizaron para el análisis los valores promedios semanales desde la semana 37 hasta la semana 16, período que abarca los meses de septiembre hasta abril.

La metodología utilizada para el análisis de todos los datos contempla métodos gráficos, para la visualización de la variabilidad interanual o entre campañas agrícolas. La relación entre los datos biológicos (rendimientos de los cultivos) con los datos físicos del ambiente (lluvias, datos satelitales), se realiza mediante técnicas corrientes de correlación-regresión (Neter y Wasserman, 1974), procesados mediante Microsoft Excel (2007).

RESULTADOS Y DISCUSION

1. Análisis de la variabilidad interanual

1.1. Precipitaciones medias del Departamento

La región presenta un régimen de lluvias típicamente monzónico, con las mayores ocurrencias desde mediados de la primavera a mediados del otoño y con los mayores registros durante el verano. En la figura 5 se observa la oferta promedio de lluvias en cada una de las décadas, pudiendo inferirse la disponibilidad climática durante el ciclo de cultivos de verano.

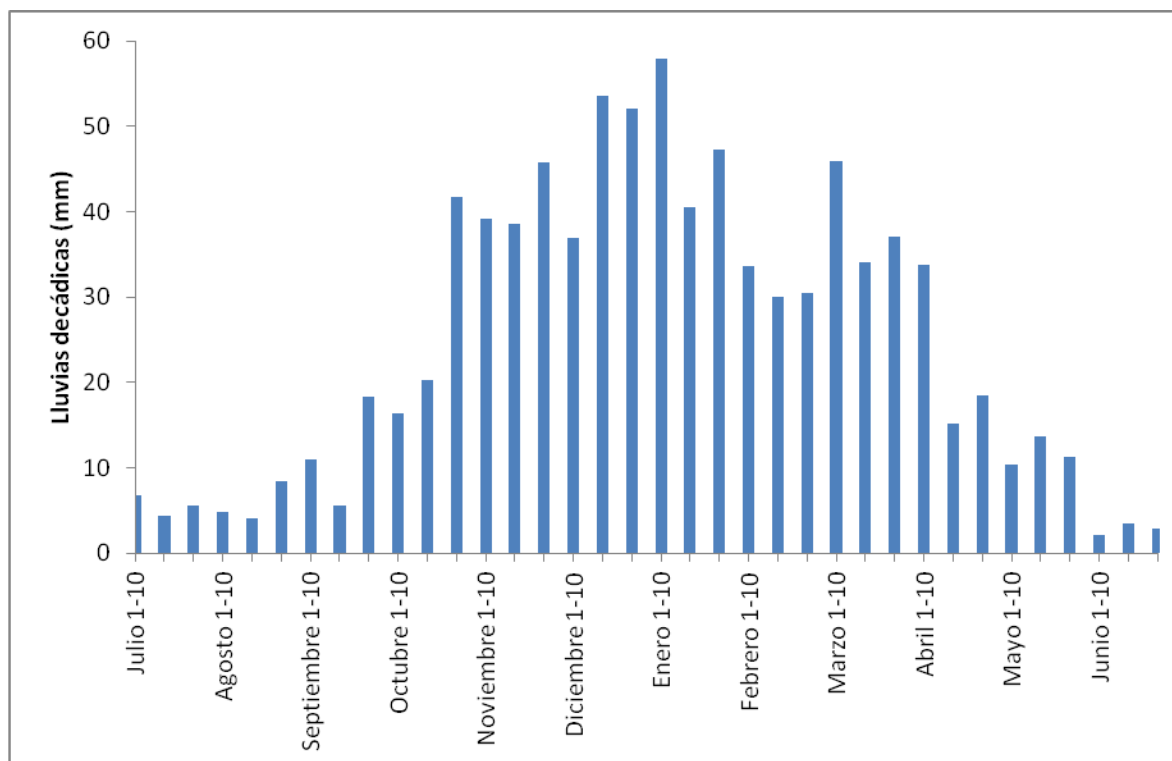


FIGURA 5: Distribución temporal de las precipitaciones decádicas medias del departamento de Río Cuarto como promedio de la serie 1985-2008.

1.2. Precipitaciones totales del ciclo agrícola y durante los meses de cultivo.

Los cultivos considerados en el trabajo, soja y maíz, son cultivos estivales. En el hemisferio sur, estos cumplen una parte de su ciclo en un año y lo finalizan en la primera parte del año siguiente. Con el objetivo de observar la variabilidad del total de lluvias asociadas al ciclo de los cultivos, se representaron los totales registrados en cada campaña durante la serie estudiada, desde julio de un año hasta junio del

año siguiente (fig. 6). En la misma se observa una marcada variabilidad interanual de las lluvias, con ciclos superiores a 1000 mm y hasta 1200 mm y otros bajos, del orden de 700 mm.

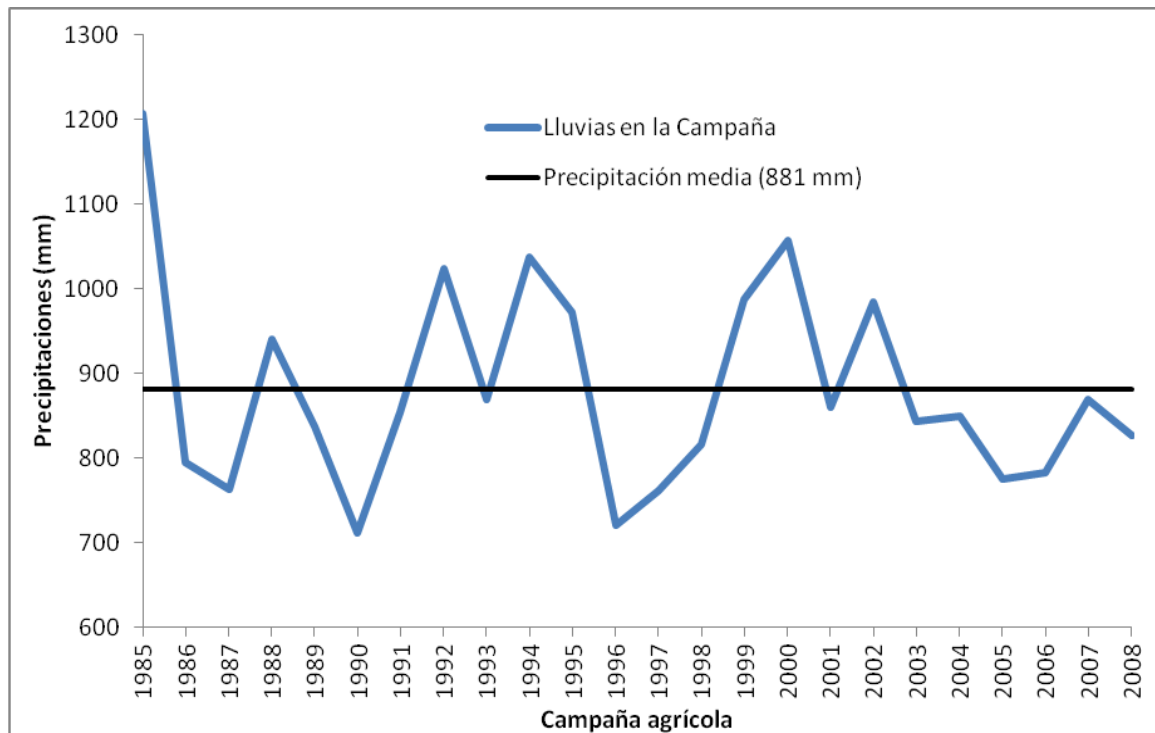


FIGURA 6: Variabilidad de las lluvias ocurridas durante la campaña agrícola de cultivos de verano, para el departamento de Río Cuarto (1985: campaña agrícola 1984/1985).

Similar comportamiento de variabilidad se observa entre ciclos, para las precipitaciones ocurridas en los meses de noviembre a marzo (fig. 7 y 8), con años de registros muy contrastantes entre la lluvia de un mes y la del mes siguiente. Los registros pluviométricos de esos meses son en general determinantes fuertes de los rendimientos de los cultivos.

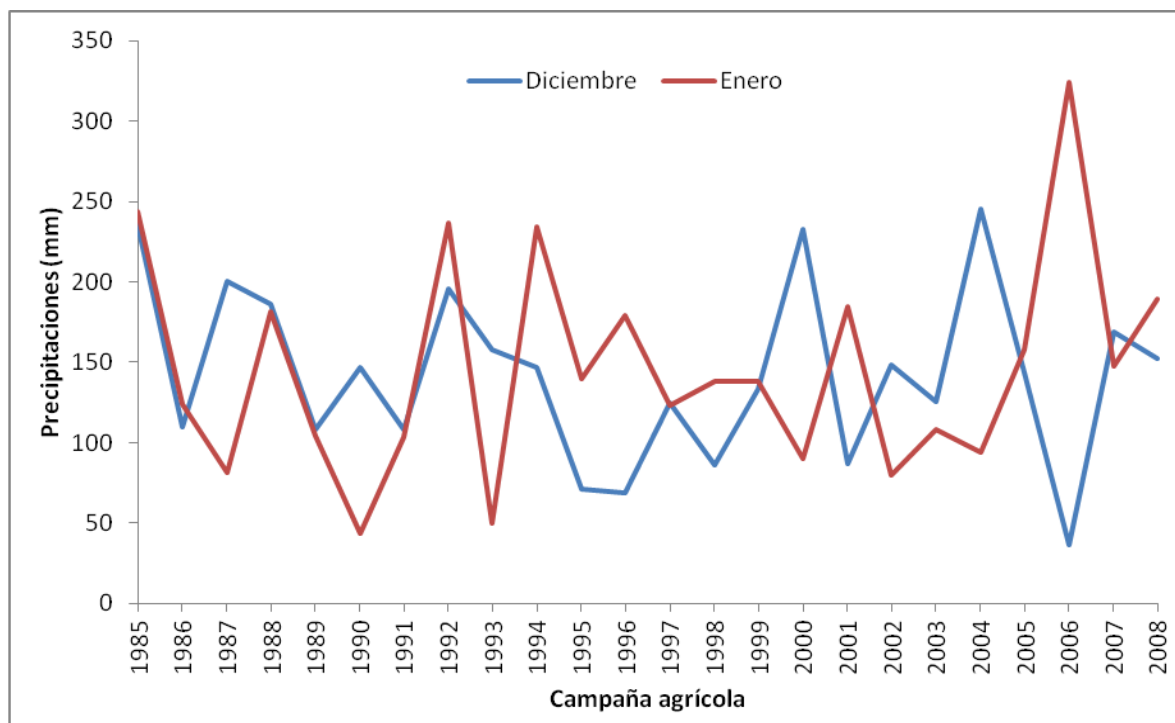


FIGURA 7: Variabilidad de las precipitaciones de los meses de diciembre y enero durante las campañas analizadas. Precipitación media de diciembre y enero 142 mm y 145 mm, respectivamente (1985: campaña agrícola 1984/1985).

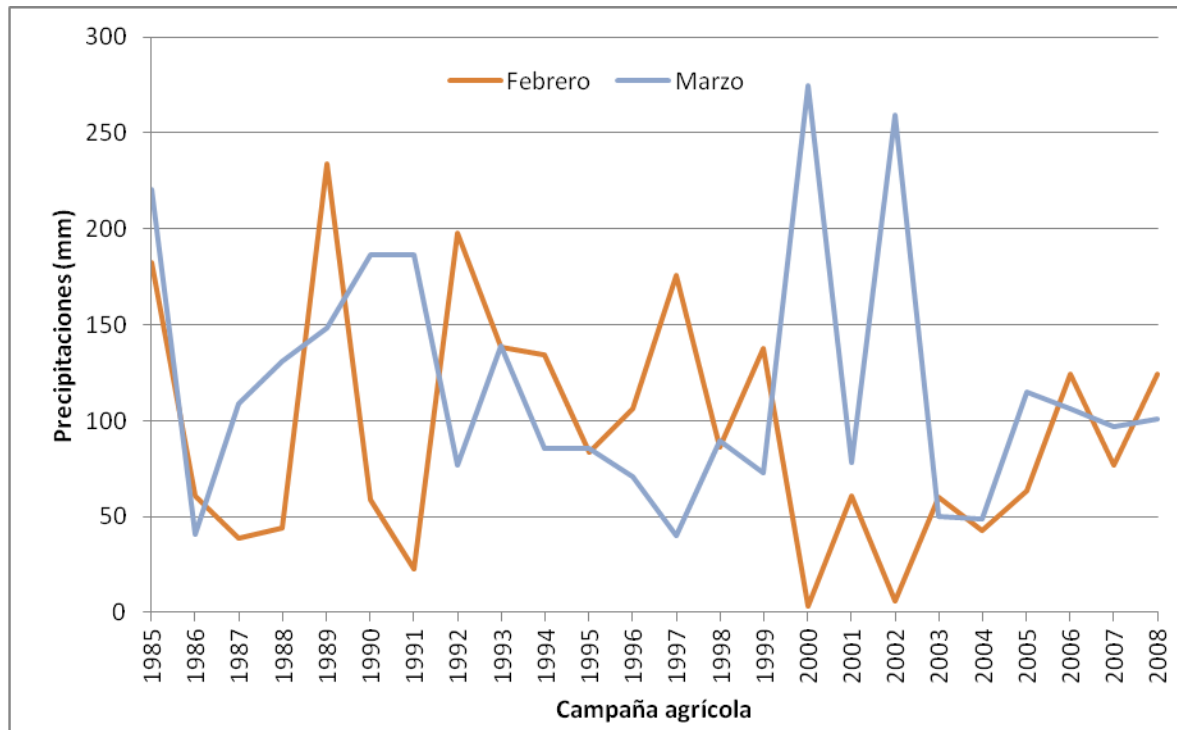


FIGURA 8: Variabilidad de las precipitaciones de los meses de febrero y marzo durante las campañas analizadas. Precipitación media de febrero y marzo 94 mm y 117 mm respectivamente (1985: campaña agrícola 1984/1985).

1.3. Precipitaciones estacionales

La acumulación de las lluvias ocurridas durante la primavera (septiembre, octubre y noviembre) y durante el verano (diciembre, enero y febrero) muestran también variabilidad entre las campañas agrícolas (fig. 9). Mientras las primaveras, para la serie analizada exhiben una fluctuación más regular excepto la campaña 2003/04, los veranos de los primeros años de la serie se caracterizaron por una alternancia de valores más extremos, luego una menor amplitud de variación entre 1995 al 2000 y similar hasta el final de la serie, aunque con una corta tendencia a mayores precipitaciones en el verano desde de la campaña 2001/02 hasta la 2007/08.

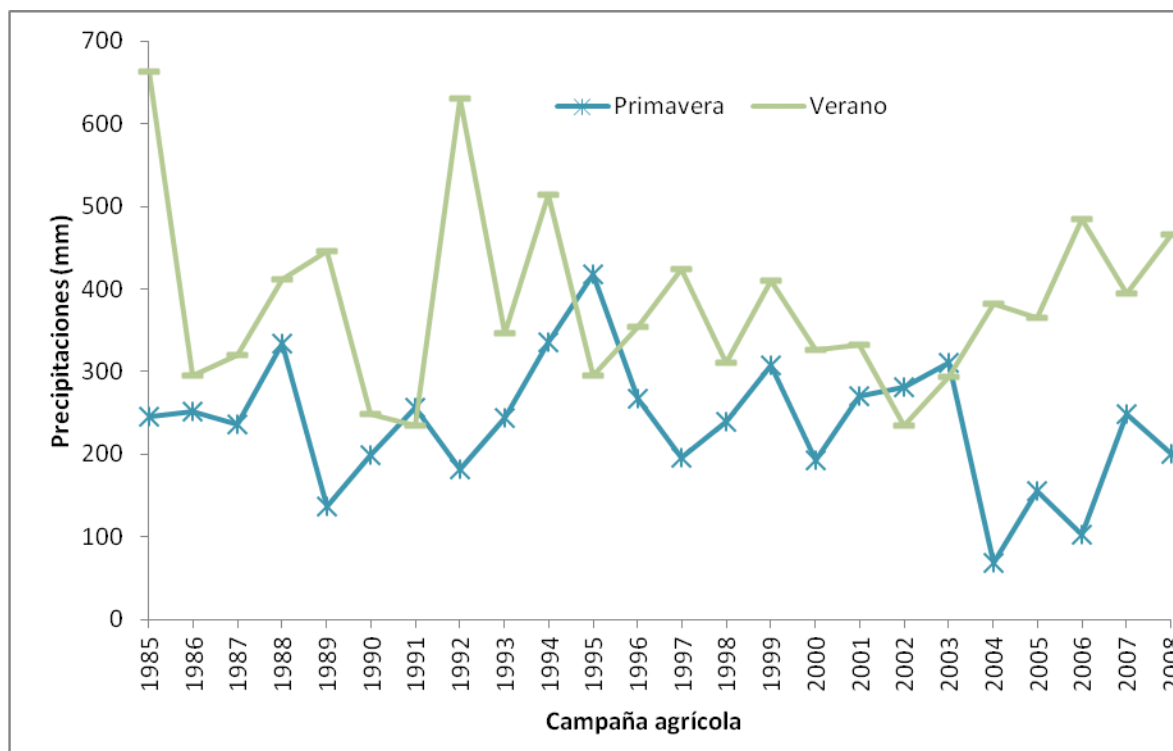


FIGURA 9: Variabilidad interanual de lluvias de primavera y de verano entre las campañas analizadas (1985: campaña agrícola 1984/1985).

1.4. Índices satelitales de estado de la vegetación

En las figuras 10, 11, 12, 13 y 14 se presenta la variabilidad del índice de estado de la vegetación VCI semanal, como promedio para los meses de diciembre y enero, de febrero y marzo y para períodos de tres semanas, asociadas con momentos fenológicos de los cultivos, más críticos a la variabilidad climática. En ambos análisis se observa una gran amplitud de variación del índice, con años extremos de casi cero, hasta otros con máximos próximos al 100%. Esta variabilidad al igual que la de las lluvias para el tipo de agrupamientos o períodos seleccionados, aparece a priori como un buen indicador para relacionar con la respuesta en rendimiento de los cultivos. Se observan también valores extremadamente bajos para la campaña 2003/2004 en los meses de diciembre y enero (fig. 10).

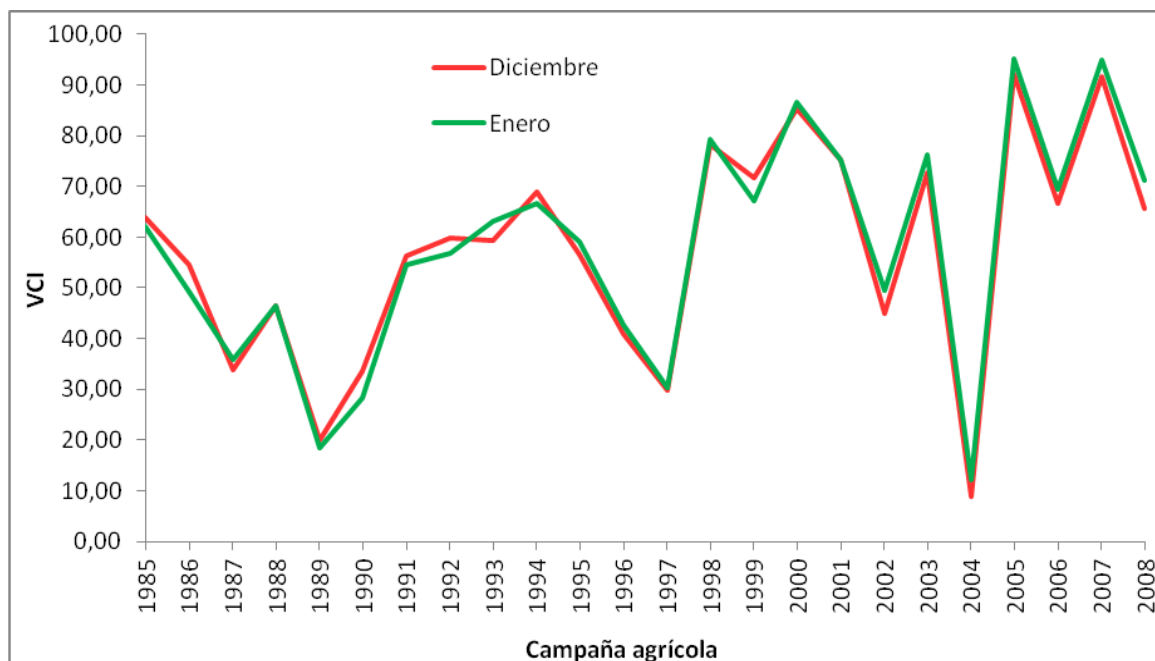


FIGURA 10: Variabilidad interanual de los promedios mensuales de VCI, para diciembre y enero (1985: campaña agrícola 1984/1985).

Es de destacar también el ajustado sincronismo de la variabilidad del VCI en diciembre y enero, lo (fig. 10) que contrasta con el comportamiento del Índice entre febrero y marzo (fig. 11).

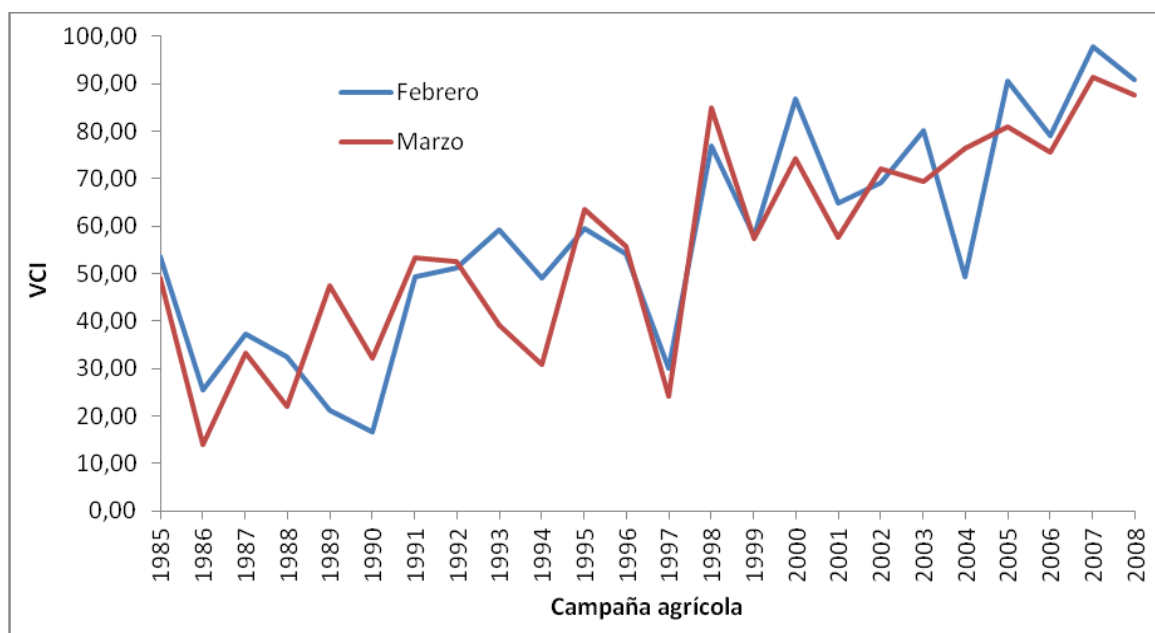


FIGURA 11: Variabilidad interanual de los promedios mensuales de VCI, para febrero y marzo (1985: campaña agrícola 1984/1985).

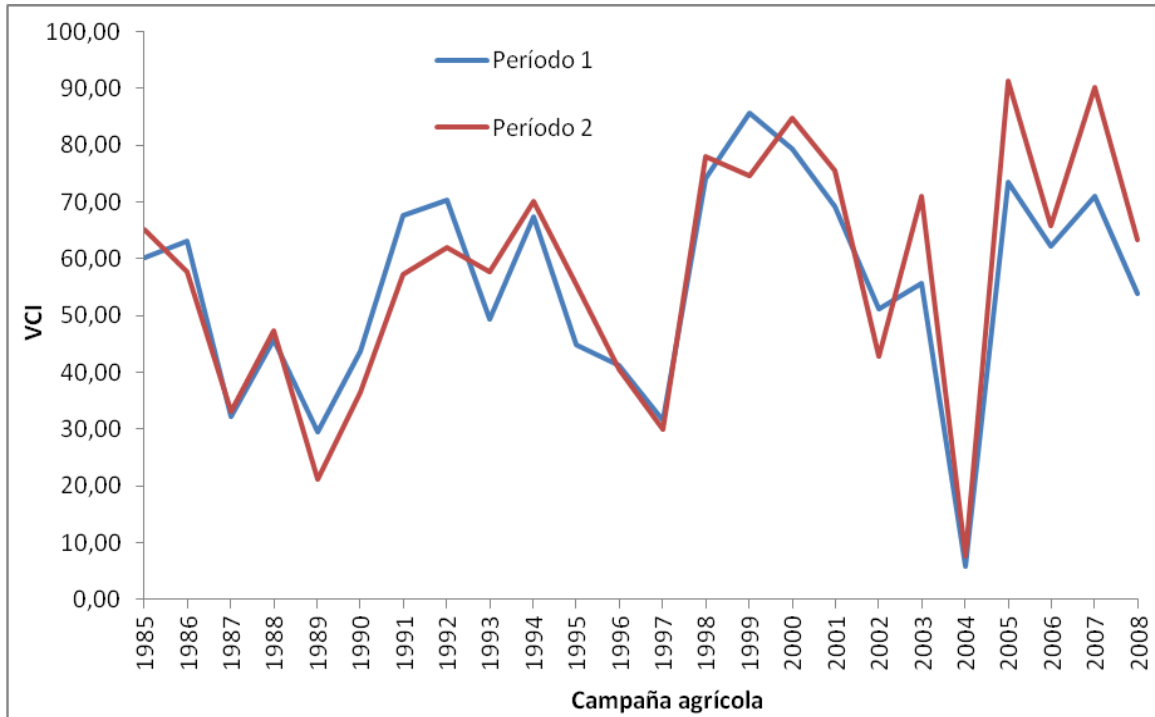


FIGURA 12: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 1: semana 49 a 51; Período 2: semana 52 a 2) (1985: campaña agrícola 1984/1985).

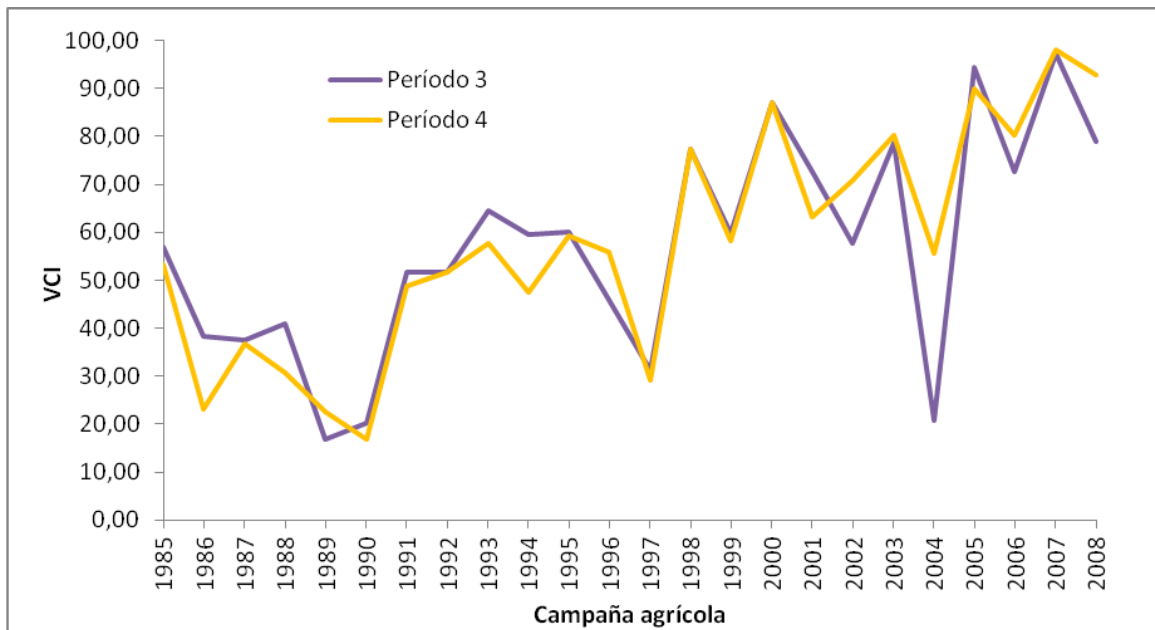


FIGURA 13: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 3: semana 3 a 5; Período 4: semana 6 a 8) (1985: campaña agrícola 1984/1985).

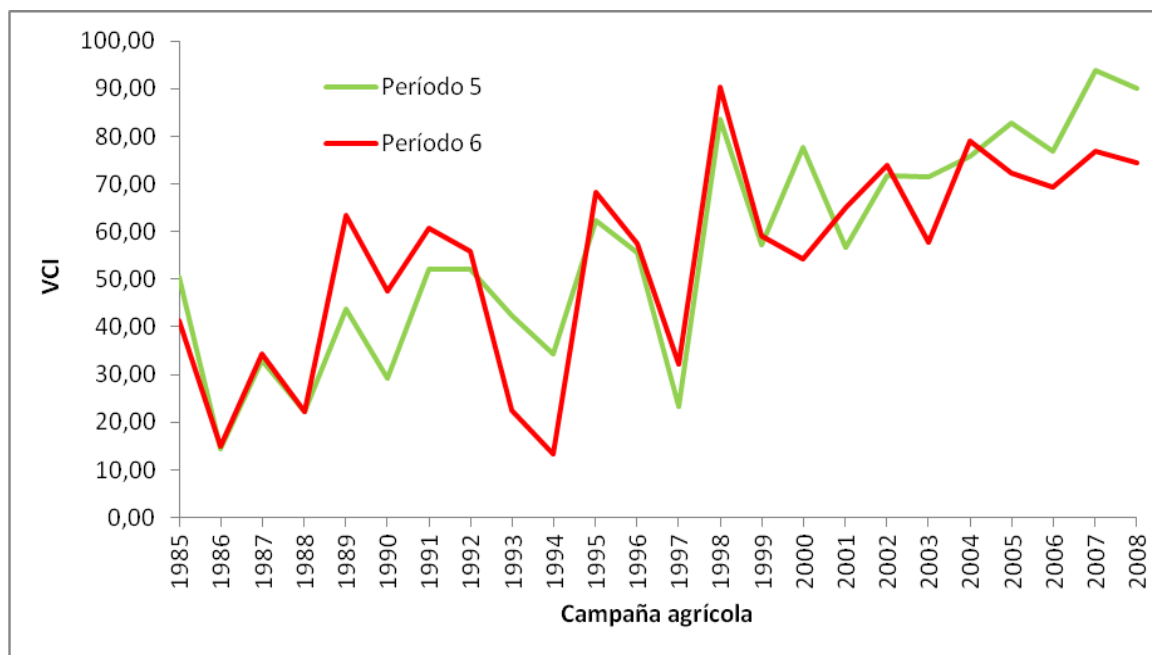


FIGURA 14: Variabilidad interanual del VCI promedio, de los distintos períodos sensibles de los cultivos (Período 5: semana 9 a 11; Período 6: semana 12 a 14) (1985: campaña agrícola 1984/1985).

2. Correlación de rendimiento de maíz y de soja versus variables ambientales

A los fines de intentar una mayor precisión entre el efecto de las variables posibles condicionantes de los rendimientos de los cultivos y los períodos críticos del maíz y de la soja, se asumieron fechas medias como referencia de los estados fenológicos dentro del ciclo de los mismos. Para el caso del maíz, se consideraron fechas medias de floración alrededor del 25 de diciembre y del 10 de febrero, para siembras de primera y de segunda respectivamente. Luego y a los fines de análisis estadístico, se asumieron períodos críticos, principalmente a la demanda de agua de alrededor de 30 días centrados en la floración. Para el caso de la soja se consideró un rango de 50 días centrado en el 20 de febrero, a partir de una fecha media de siembra para el departamento de Río Cuarto, del 28 de noviembre. Estos supuestos estuvieron presentes al momento de definir las distintas variables de base pluviométrica al igual que las satelitales.

2.1. Rendimientos versus variables pluviométricas

La relación entre los rendimientos en grano de maíz y de soja y las lluvias de los meses que comprenden el ciclo de los cultivos, puede observarse en la figura 15. En el mismo se presentan los coeficientes de correlación para cada uno de los meses y cultivos considerados. En la tabla 1 y 3 (Anexo)

se dispone de las matrices de correlación a partir de las cuales fueron obtenidos los valores de la figura para maíz y soja, respectivamente.

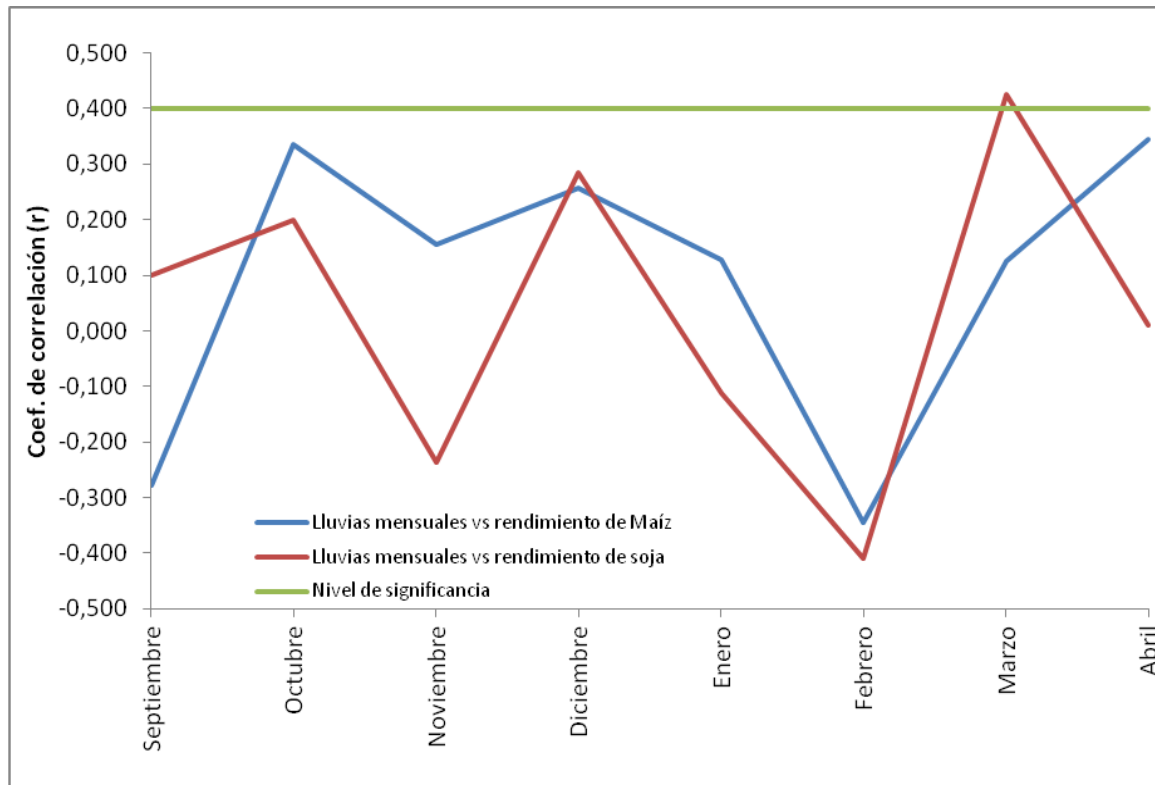


FIGURA 15: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus lluvias mensuales (nivel de significancia: r para α 0,05) (1985: campaña agrícola 1984/1985).

El análisis de las lluvias mensuales versus rendimientos no muestra significancia para ninguno de los dos cultivos, excepto para soja donde las lluvias de marzo denotan una relación positiva aunque de escasa significancia ($r=0,426$). Curiosamente y válido solamente desde un punto de vista estadístico, ambos cultivos muestran una relación negativa con las lluvias de febrero al límite de la significancia de $-0,345$ y $-0,408$ para maíz y soja respectivamente (fig. 15).

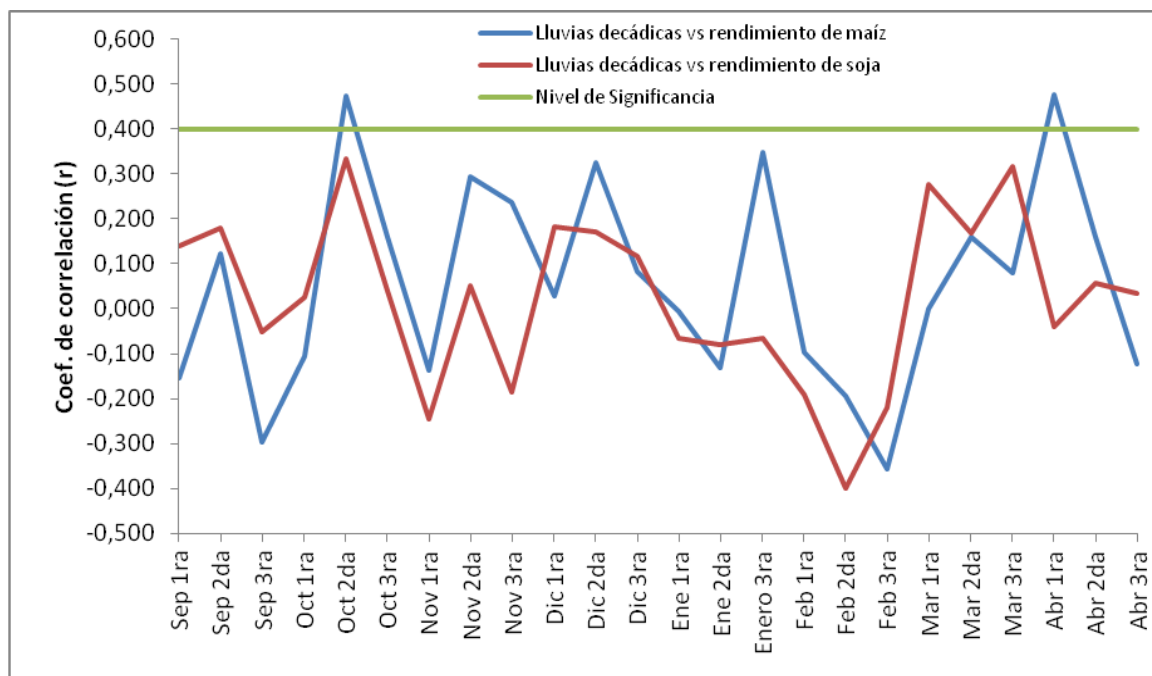


FIGURA 16: Correlación entre rendimientos de maíz y soja como desvío de la tendencia, versus lluvias decádicas (nivel de significancia: r para α 0,05) (1985: campaña agrícola 1984/1985).

Con respecto a la correlación de los rendimientos con las lluvias acumuladas por estación del año, principalmente primavera y verano, en donde los cultivos cumplen la mayor parte del ciclo, los resultados obtenidos no mostraron correlaciones significativas tabla 1 y 3 (Anexo). A los fines de analizar las relaciones entre períodos más cortos de las variables independientes con los rendimientos de ambos cultivos, se correlacionaron estos con las lluvias decádicas. Los resultados se presentan en la figura 16.

Para el caso de los rendimientos de maíz, se muestran particularmente significativas las lluvias de los segundos diez días del mes de octubre y de los primeros diez días del mes de abril. Los valores de las correlaciones fueron de 0,474, 0,475, respectivamente. Para el caso de los rendimientos de soja no se encontraron valores significativos para las lluvias decádicas. Las mejores relaciones se observan para la segunda década de octubre y los primeros y últimos diez días de marzo con valores de 0,33, 0,32 y 0,28, respectivamente. En el caso de la correlación entre las lluvias de los primeros diez días de noviembre y el rendimiento de maíz y soja, se observa que para ambos cultivos, los valores correlativos son negativos, -0,139 y -0,245, respectivamente. Se observa también una respuesta diferente entre el rendimiento de los cultivos y las lluvias de los terceros diez días de noviembre aunque sin significancia estadística (fig. 16).

2.2 Rendimientos versus variables satelitales

Los resultados obtenidos luego de correlacionar los rendimientos de maíz y soja con los valores de VCI semanal se muestran en la figura 17.

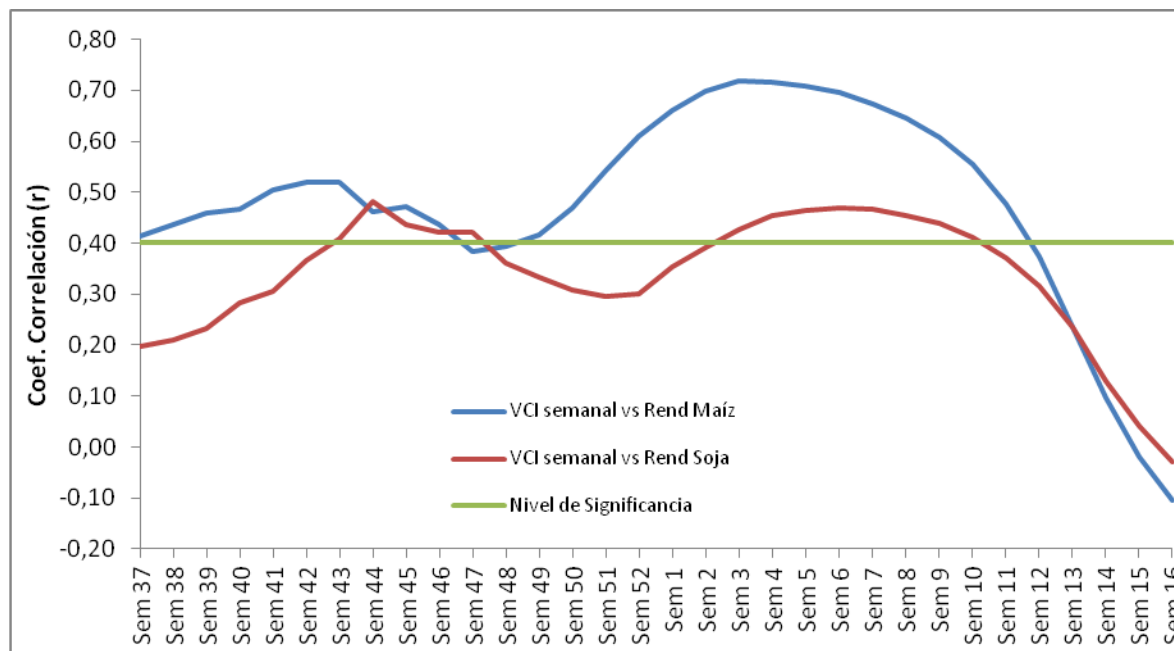


FIGURA 17. Correlación entre los rendimientos de maíz y soja, como desvío de la tendencia, versus el VCI semanal (nivel de significancia: r para α 0,05).

Para las relaciones obtenidas entre los valores de VCI semanales y el rendimiento de maíz se observan valores significativos en dos momentos del ciclo. Uno desde la semana 37 hasta la semana 46 inclusive (1ra de septiembre a 2da de noviembre) y otro desde la semana 49 hasta la semana 11 inclusive (diciembre a marzo). Los valores correlativos más altos se encontraron para las semanas 3, 4 y 5 (3ra de enero a 1ra de febrero) con valores de 0,72, 0,72 y 0,73 respectivamente. En el análisis del cultivo de soja pueden observarse particularmente significativos los valores de las semanas 43 hasta la semana 47 inclusive (3ra de octubre a 3ra de noviembre) y desde la semana 3 hasta la semana 10 inclusive (3ra de enero a 1ra de marzo), siendo los valores más altos los de la semana 44 (0,48), y de la semana 6 y 7 (0,47).

La correlación entre los rendimientos de maíz y de soja con los VCI mensuales de cada campaña se muestran en la figura 18.

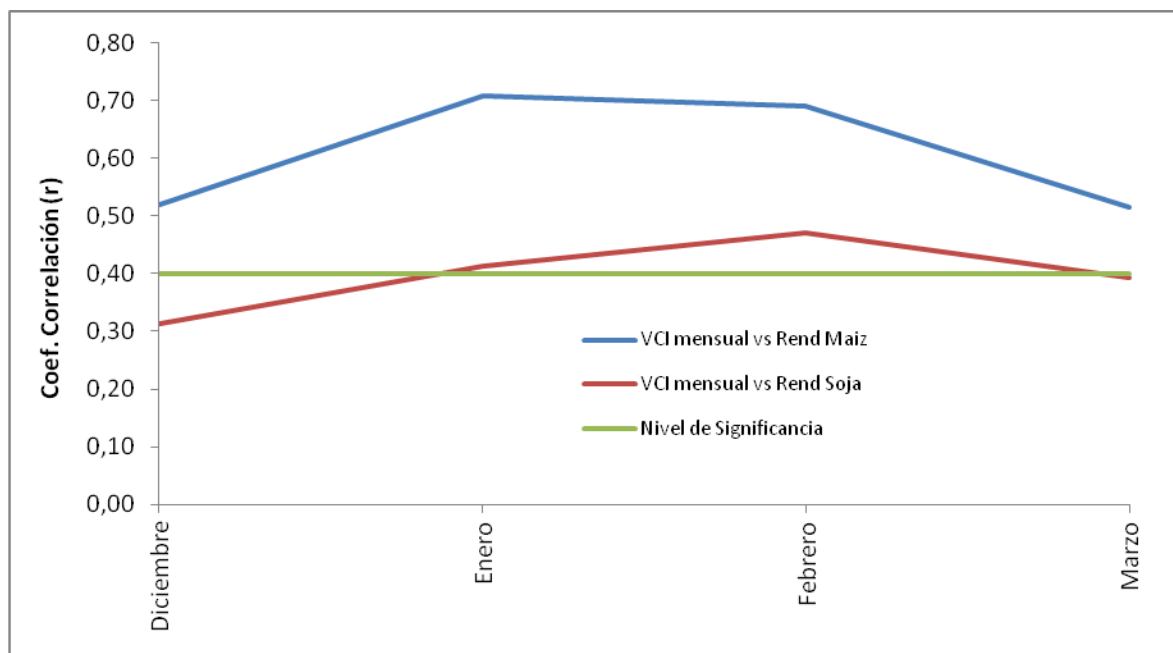


FIGURA 18: Correlación entre los rendimientos de maíz y soja, como desvío de la tendencia, versus el VCI mensual (nivel de significancia: r para α 0,05).

El análisis los valores obtenidos, para el caso del maíz indica que, todos los valores mensuales (diciembre, enero, febrero y marzo) son significativos, con mayores correlaciones observadas para los meses de enero (0,71), y febrero (0,69). Para soja se observa una correlación significativa con valores de VCI de febrero (0,47) y menor con enero (0,41).

La relación de los rendimientos con los índices de estado de vegetación promedio de períodos sensibles de los cultivos, se presentan en la figura 19.

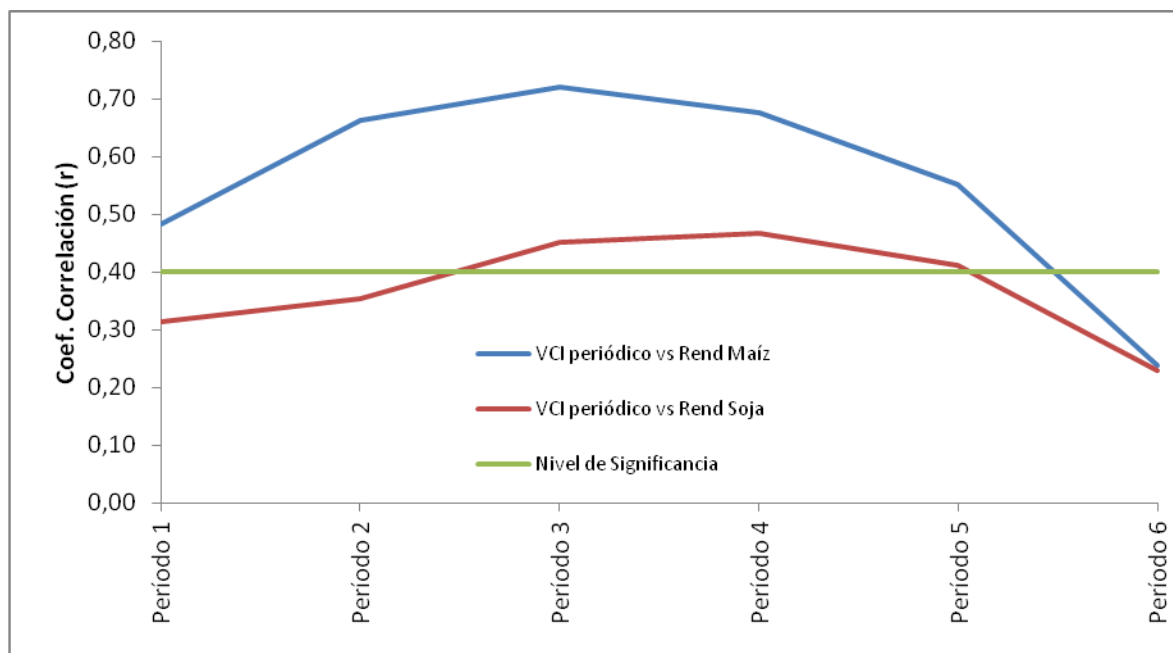


FIGURA 19: Correlación entre los rendimientos de maíz y soja, como desvío de la tendencia, versus el VCI por períodos (nivel de significancia: r para α 0,05).

Con respecto a la correlación graficada en la figura 19, se observa que para el maíz los valores de los períodos 1 hasta el período 5 inclusive (principios de diciembre a fines de marzo) son significativos, siendo el más alto el obtenido para el período 3 (3er semana de enero a primera de febrero) (0,72) y algo menor el período 4 (últimas 3 semanas de febrero) (0,68). Para el caso de la soja son particularmente significativos los períodos 3, 4 y 5 (tercer semana de enero a 3er semana de marzo) con valores de 0,45, 0,47, y 0,41, respectivamente.

3. Cuantificación de la variabilidad de los rendimientos en función de las variables pluviométricas y satelitales.

La variabilidad de los rendimientos de maíz y de soja se supone explicada por el siguiente modelo (Neter y Wasserman, 1974)

$$Y_i = b_0 + \sum_{k=1}^p b_k Z_{ik} + E_i$$

donde,

Y_i es el valor de rendimiento de un año en particular como desvío de la tendencia; b_0 y b_k son parámetros del modelo; E_i es un término del error aleatorio; i se refiere en este caso a una campaña

agrícola en particular y asume valores de 1 a n; p es el número de variables independientes; Z_{ik} se refiere al valor de la K-ésima variable independiente en la i-ésima campaña agrícola.

Considerando la media de la distribución de probabilidad del i-ésimo valor de las variables Z_k y además que la media del error E_i es cero, la función de estimación de rendimiento resulta de la siguiente forma:

$$Y_i = b_0 + \sum_{k=1}^p b_k Z_{ik}$$

De acuerdo a este modelo y a los resultados de los análisis de correlación previos, se seleccionaron grupos de variables independientes como posibles candidatos para integrar modelos de correlación-regresión, posibles de ser utilizados como herramientas de estimación de los rendimientos de los cultivos. En los cuadros a continuación se presentan los coeficientes de los modelos, parámetros de significancia y variables significativas para integrarlos.

3.1 Modelos de estimación de rendimientos de maíz y soja basados en variables pluviométricas.

3.1.1 Rendimiento de maíz versus variables pluviométricas.

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.898		12.535			1,71 E -11
Precipitaciones 2da década octubre		0.006	2.527			0.0192
Modelo				0.225	6.386	0.0192

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.763		8.129			3,36 E -8
Precipitaciones 2da década octubre		0.006	2.757			0.0118
Precipitaciones 3ra década enero		0.003	2.053			0.0527
Modelo				0.355	5.767	0.0101

3.1.2 Rendimiento de soja versus variables pluviométricas.

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.87		10.51			4.82 E -8
Precipitaciones Marzo		0.001	2.21			0.0379
Modelo				0.182	4.88	0.0379

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.796		9.066			1.05 E -8
Precipitaciones Marzo		0.004	1.885			0.0734
Precipitaciones 2da década octubre		0.001	2.384			0.0266
Modelo				0.299	4.499	0.0236

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	1.055		15.15			8.78 E -13
Precipitaciones 2da década octubre		0.003	1.764			0.0922
Precipitaciones 2da década febrero		-0.003	-2.131			0.0045
Modelo				0.269	3.85	0.0347

Los distintos modelos resultantes para estimación de rendimientos de maíz y de soja fueron aquéllos en los que todas sus variables son significativas al nivel del 10% ($t \leq 0.10$) para permanecer en el modelo. Para maíz la mayor explicación de la variabilidad lograda (36%) corresponde al modelo que considera las lluvias de la segunda década de octubre y la tercera de enero ($R^2 = 0.355$). Para el caso de soja, el 30% de la variabilidad de los rendimientos fue explicada por la lluvia de la segunda década de octubre y la del mes de marzo ($R^2 = 0.299$).

3.2 Modelos de rendimientos de maíz y soja basados en índices derivados de datos satélites.

3.2.1 Rendimiento de maíz versus VCI.

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.545		4.376			0.0002
VCI semana 1 (enero)		0.008	4.113			0.0005
Modelo				0.435	16.92	0.0005

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.53		4.575			0.0001
VCI semana 2 (enero)		0.009	4.582			0.0001
Modelo				0.488	20.99	0.0001

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.533		4.857			7,45 E -5
VCI semana 3 (enero)		0.009	4.832			7,92 E -5
Modelo				0.518	23.34	7,92 E -5

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.535		4.874			7,15 E -5
VCI semana 4 (enero)		0.009	4.814			8,27 E -5
Modelo				0.513	23.17	8,27 E -5

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.541		4.904			6.64 E -5
VCI semana 5 (febrero)		0.008	4.719			0.0001
Modelo				0.503	22.27	0.0001

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.552		4.925			6.32 E -5
VCI semana 6 (febrero)		0.008	4.55			0.0001
Modelo				0.485	20.7	0.0001

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.575		5.032			4.87 E -5
VCI semana 7 (febrero)		0.008	4.262			0.0003
Modelo				0.452	18.16	0.0003

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.595		5.078			4.36 -5
VCI semana 8 (febrero)		0.007	3.966			0.0006
Modelo				0.417	15.73	0.0006

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.52		4.531			0.0002
VCI enero		0.009	4.715			0.0001
Modelo				0.503	22.24	0.0001

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.553		4.867			7,27 E -5
VCI febrero		0.008	4.476			0.0002
Modelo				0.477	20.03	0.0002

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.541		4.33			0.0003
VCI período 2 (diciembre-enero)		0.008	4.145			0.0004
Modelo				0.438	17.18	0.0004

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.528		4.809			8,37 E -5
VCI período 3 (enero-febrero)		0.009	4.873			7,16 E -5
Modelo				0.519	23.75	7,16 E -5

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.567		4.95			5,95 E -5
VCI período 4 (febrero)		0.008	4.307			0.0003
Modelo				0.457	18.55	0.0003

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.461		3.942			0.0008
VCI semana 3 (enero)		0.055	0.033			0.1138
VCI semana 4 (enero)		-0.098	0.065			0.1461
VCI semana 5 (febrero)		0.053	0.034			0.1270
Modelo				0.572	8.900	0.0006

En los modelos de rendimiento de maíz versus variables satelitales en los cuales se utilizó solo una variable independiente, los mejores ajustes se encontraron para rendimiento de maíz versus VCI de la semana 3 (tercer semana de enero) (R^2 de 0.518); rendimiento de maíz versus VCI de la semana 4 (última semana de enero) (R^2 de 0.513) y rendimiento de maíz versus VCI del período 3 (tercera semana de enero a primera de febrero inclusive) con un valor de R^2 de 0.519. La combinación de las tres variables en un solo modelo explican un 57% de la variabilidad de los rendimientos de maíz ($R^2 = 0.572$). En efecto, el uso de las tres variables no mejora sustancialmente el desempeño del modelo, comparado con los modelos que consideran solo la semana 3 o la semana 4. Además, los coeficientes de las variables superan ligeramente el nivel de confianza fijada. El VCI de enero y el del período 3 en forma independiente, explican alrededor del 50% de la variabilidad de los rendimientos de maíz.

3.2.2 Rendimiento de soja versus VCI.

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.785		7.411			2,05 E -5
VCI febrero		0.004	2.495			0.0206
Modelo				0.221	6.22	0.0206

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.792		7.342			2,38 E -7
VCI período 3 (enero-febrero)		0.004	2.379			0.0264
Modelo				0.205	5.662	0.0264

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.802		8.28			3,31 E -8
VCI semana 44 (octubre)		0.005	2.57			0.0175
Modelo				0.231	6.606	0.0175

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.793		7.409			2,06 E -7
VCI semana 4 (enero)		0.004	2.392			0.0257
Modelo				0.206	5.724	0.0257

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.788		7.439			1,93 E -7
VCI semana 5 (febrero)		0.004	2.461			0.0222
Modelo				0.216	6.058	0.0222

Variable	bo	bk 1	t	R^2	F	Probabilidad
Constante	0.787		7.467			1,81 E -7
VCI semana 6 (febrero)		0.004	2.489			0.0208
Modelo				0.22	6.198	0.0208

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.792		7.593			1,39 E -7
VCI semana 7 (febrero)		0.004	2.467			0.0219
Modelo				0.217	6.086	0.0219

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.80		7.651			1,22 E -7
VCI semana 8 (febrero)		0.004	2.385			0.0261
Modelo				0.205	5.687	0.0261

Variable	bo	bk 1	t	R ²	F	Probabilidad
Constante	0.675		5.879			7,78 E -6
VCI febrero		0.003	1.851			0.0782
VCI semana 44 (octubre)		0.004	1.938			0.0661
Modelo				0.339	5.381	0.013

Respecto de los modelos de soja, los mejores ajustes utilizando sólo una variable independiente, se observaron para rendimiento de soja versus VCI del mes de febrero con un valor de R² de 0.221, rendimiento de soja versus VCI de la semana 44 (última semana de octubre) con un R² de 0.231 y rendimiento de soja versus VCI de la semana 6 (segunda semana de febrero) con un valor de R² de 0.22. En general todos los modelos desarrollados para soja explican un % más bajo de la variabilidad que los de maíz, mostrándose el mejor desempeño para el modelo que toma en conjunto las variables VCI del mes de febrero y VCI de la semana 44, que explican el 35% de la variabilidad del rendimiento de soja.

Comparado con el uso de la precipitación como estimador de rendimientos, los índices derivados de datos satélites mostraron para este análisis un mejor desempeño como estimadores de rendimientos, tanto para maíz como para soja. De todas maneras y en las mejores situaciones, considerando maíz, la explicación de la variabilidad a través de los indicadores considerados sólo estuvo alrededor del 50%.

CONCLUSIONES

El desarrollo y los resultados del presente trabajo permitieron evidenciar una marcada variación interanual de los rendimientos departamentales de los cultivos de maíz y de soja en los intervalos de las series analizadas. Además, las series de rendimiento de ambos cultivos evidencian una tendencia positiva en el tiempo. Ambos comportamientos permiten concluir sobre el efecto de elementos meteorológicos como responsables de buena parte de la variabilidad interanual de los rendimientos de los cultivos y de una componente llamada tecnológica, capaz de justificar las tendencias observadas. Resultó concluyente también la variabilidad de las precipitaciones, tanto en cantidad como en distribución de las mismas, de año en año y durante los períodos críticos del ciclo de los cultivos. Este comportamiento permite considerar objetivamente a la lluvia como una variable influyente para la estimación de los rendimientos. Fue interesante en el trabajo la consideración del índice de estado de la vegetación, como un integrador del comportamiento de las precipitaciones y de otros elementos meteorológicos, posibles de asociar a la respuesta de los cultivos de maíz y soja. Esto les asignó a priori, una capacidad predictiva de los rendimientos. En el desarrollo del trabajo pudo comprobarse la fluctuación de los valores de VCI (semanales, mensuales y por períodos) a lo largo de las campañas analizadas, fluctuaciones que se mostraron asociadas con los rendimientos de ambos cultivos.

Las correlaciones entre las variables pluviométricas y los rendimientos y entre los índices de vegetación y los rendimientos, fueron en todos los casos más elevadas para maíz que para soja. Esto se supone asociado a las características fisiológicas y bioclimáticas particulares de ambos cultivos. El maíz es un cultivo determinado, el cual tiene un período de floración mucho más estrecho y definido que la soja y consecuentemente un período crítico más estricto frente a la cantidad y sobretodo la distribución de las precipitaciones, que puede determinar un impacto más directo e influyente sobre el rendimiento.

Finalmente, el trabajo permitió el desarrollo de una serie de modelos estadísticos para la estimación de rendimientos de maíz y de soja, basados en variables pluviométricas y en índices de vegetación, posibles de ser usados para ese propósito. Sin embargo y aunque con mejores comportamientos de aquéllos basados en los índices de vegetación, los mismos en general explican porcentajes relativamente bajos de la variabilidad de los rendimientos. Los mejores resultados se observaron para los modelos que consideran indicadores basados en el índice de vegetación versus rendimiento de maíz, con una explicación entre un 50 y un 60 % de la variabilidad. En el caso de soja, los mejores estimadores lograron una explicación del 30% de la variabilidad de los rendimientos.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, F. H., A. CIRILO, S. A. UHART, M. E. OTEGUI. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Ed. Dekalb Press. ISBN 987-96163-0-8. Buenos Aires, Argentina.
- DELLA MAGGIORA, A. I., A. I. IRIGOYEN, L. C. MALENA, M. A. CAMBARERI. 2012. Deficiencia hídrica para el cultivo de maíz en el centro- sudeste bonaerense según fecha de siembra. **XIV Reunión Argentina de Agrometeorología**. Malargüe- Mendoza, Argentina. p: 45-46.
- DOERING, O. C., J. C. RANDOLPH, J. SOUTHWORTH, R. A. PFEIFER. 2002. *Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems*. Ed. Boston- EE.UU.
- FALKENMARK, M., J. ROCKSTRÖM. 2004. *Balancing Water for Man and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. Earthscan, U. K.
- FAO. 1990. *1989 Production yearbook No. 43*. FAO Statistics series No.94. AGROSTAT-PC, the PC version (1990) of the FAO Production Yearbook was also used.
- FEHR, W. R., C. E. CAVINESS. 1977. *Stages of soybean development. Special Report 80*. Iowa State University, Ames, Iowa. 11 p.
- GORGAS, J. A., J. L. TASSILE. 2002. *Regiones Naturales de la Provincia de Córdoba*. Serie C, Publicaciones Técnicas. Agencia Córdoba Ambiente. Córdoba. Ferreyra Editor.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KAISER, H. M., T. E. DRENNEN. 1993. *Agricultural Dimensions of Global Climate Changes*. Eds. St. Lucie Press, Delray Beach, Florida, EE.UU. 311p.
- KIDWELL, K. B. 1997. Global vegetation index user`s guide. *NOAA Tech. Rep.* 65.
- KOGAN, F. N. 1990. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int. J. Of Rem. Sens.*, 11, 1405-1419.

- MINAGRI. 2011. Estadísticas agropecuarias - Agricultura - Rendimiento. En: <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura.htm>. Consultado: 9/12/11.
- MINAGRI. 2012. Estadísticas agropecuarias - Agrometeorología - Precipitaciones. En: <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agrometeorologia.htm>. Consultado: 12/1/12.
- NETER, J., W. WASSERMAN. 1974. *Applied linear statistical models. Regression, Analysis of Variance and Experimental Design*. Richard D. Irwin, Inc. Homewood, Illinois, USA. 842 pp.
- NÚÑEZ, L. N., E. C. GONZÁLEZ MORINIGO, N. BONEL. 2012. Cambios registrados en los máximos mensuales de precipitación según métodos MOV31D y MOV31*31D. **XIV Reunión Argentina de Agrometeorología**. Malargüe- Mendoza, Argentina. p: 61-62.
- RITCHIE, S. W., J. HANWAY. 1982. *How a corn plants develops*. Iowa State Univ. Special Report 48.
- ROSENZWEIG, C., J. T. RITCHIE, J. W. JONES, G. Y. TSUJI, P. HILDEBRAND. 1995. *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. Asa Special Publication No. 59 American Society of Agronomy, Madison, Wisc., USA.
- SATORRE, E., L. R. BENECH ARNOLD, G. SLAFER, E. de la FUENTE, D. MIRALLES, E OTEGUI, R SAVIN. 2003. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, UBA. 783p.
- SEILER, R., F. KOGAN., GUO WEI, M. VINOCUR. 2007. Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Córdoba, Argentina assessed by AVHRR derived vegetation indices. *Advances in Space Research* 39: 88 – 94.
- SEILER, R. A., M. A. BRIZUELA. 2009, El cambio climático y la variabilidad climática en la Región Pampeana. En *Producción Animal en Pastoreo*, 2da. Edición. CANGIANO C. A y M. A. Brizuela (eds). INTA, Argentina (en prensa).
- TRENBERTH, K. E., A DAI, M RASMUSSEN, D. B. PARSONS. 2003. The Changing character of precipitation. *BAMS*, 84 (9): 1205-1217.

ANEXO

TABLA 1. Correlación rendimiento de maíz versus precipitaciones.

	Rend. Maíz	Sep 1ra	Sep 2da	Sep 3ra	Oct 1ra	Oct 2da	Oct 3ra	Nov 1ra	Nov 2da	Nov 3ra	Dic 1ra	Dic 2da	Dic 3ra	Ene 1ra	Ene 2da	Ene 3ra
Rend. Maíz	1.00															
Sep 1ra	-0.15	1.00														
Sep 2da	0.12	-0.02	1.00													
Sep 3ra	-0.30	-0.09	-0.11	1.00												
Oct 1ra	-0.10	0.16	-0.15	-0.14	1.00											
Oct 2da	0.47	-0.17	0.03	0.15	0.07	1.00										
Oct 3ra	0.16	-0.11	0.09	-0.14	-0.12	-0.15	1.00									
Nov 1ra	-0.14	-0.01	-0.10	-0.09	0.31	-0.12	-0.03	1.00								
Nov 2da	0.29	-0.25	-0.19	-0.21	0.01	-0.01	0.01	0.01	1.00							
Nov 3ra	0.24	0.03	-0.02	-0.30	-0.05	0.20	-0.27	-0.06	0.32	1.00						
Dic 1ra	0.03	0.09	-0.12	-0.15	-0.36	-0.16	-0.08	0.16	-0.10	-0.24	1.00					
Dic 2da	0.32	0.08	-0.12	0.09	0.04	0.21	-0.05	-0.28	0.13	0.55	-0.32	1.00				
Dic 3ra	0.08	0.34	0.27	0.02	-0.09	-0.23	0.20	-0.19	-0.40	-0.18	0.11	-0.09	1.00			
Ene 1ra	-0.01	0.02	0.25	-0.20	-0.32	-0.06	-0.15	0.05	-0.13	-0.17	-0.01	-0.43	0.04	1.00		
Ene 2da	-0.13	0.01	-0.07	-0.04	-0.07	-0.27	0.09	0.37	0.10	0.15	0.07	-0.20	-0.20	0.07	1.00	
Enero 3ra	0.35	-0.28	0.02	-0.25	-0.09	-0.03	0.14	-0.05	0.14	0.27	-0.20	0.24	0.03	0.04	-0.05	1.00
Feb 1ra	-0.10	0.32	0.24	-0.20	-0.01	0.08	-0.09	-0.06	-0.13	0.36	0.05	0.24	-0.15	-0.11	-0.04	0.10
Feb 2da	-0.19	0.12	0.06	0.23	-0.29	-0.01	-0.46	0.04	0.01	0.15	0.03	-0.21	-0.11	0.32	0.24	-0.14
Feb 3ra	-0.36	-0.01	0.10	0.22	-0.26	-0.38	-0.20	-0.07	-0.15	-0.11	-0.02	-0.34	0.13	0.41	0.29	0.26
Mar 1ra	0.00	0.31	0.01	0.71	-0.09	-0.05	-0.07	-0.19	-0.33	-0.26	-0.12	0.21	0.42	-0.12	0.01	-0.19
Mar 2da	0.16	0.04	-0.16	0.07	0.44	0.06	-0.19	0.29	0.15	-0.46	0.45	-0.08	-0.13	-0.08	0.12	0.12
Mar 3ra	0.08	0.18	0.15	-0.09	0.00	-0.05	-0.07	0.16	-0.03	-0.23	0.45	-0.34	0.28	-0.03	0.02	-0.22
Abr 1ra	0.48	-0.39	-0.08	0.03	-0.09	0.47	0.15	-0.10	0.43	0.34	-0.29	0.27	-0.26	-0.10	-0.15	0.06
Abr 2da	0.16	-0.06	-0.11	-0.04	-0.19	0.14	0.41	-0.18	-0.14	-0.15	0.13	-0.02	-0.03	0.08	0.25	-0.34
Abr 3ra	-0.12	-0.03	0.03	0.16	-0.12	-0.32	-0.07	-0.14	-0.04	-0.01	-0.14	0.43	0.03	-0.26	-0.06	0.03
Septiembre	-0.28	0.41	0.32	0.77	-0.10	0.05	-0.14	-0.13	-0.39	-0.26	-0.13	0.06	0.30	-0.06	-0.06	-0.34
Octubre	0.34	-0.13	0.05	-0.11	0.24	0.35	0.82	0.01	0.01	-0.17	-0.27	0.06	0.05	-0.26	-0.07	0.09
Noviembre	0.16	-0.10	-0.16	-0.31	0.19	0.01	-0.15	0.64	0.60	0.61	-0.06	0.15	-0.39	-0.11	0.37	0.16
Diciembre	0.26	0.35	0.06	-0.02	-0.25	-0.15	0.08	-0.20	-0.28	0.03	0.47	0.30	0.76	-0.21	-0.21	0.05
Enero	0.13	-0.13	0.16	-0.29	-0.30	-0.16	0.00	0.15	0.02	0.08	-0.08	-0.26	-0.03	-0.05	0.32	0.25
Febrero	-0.35	0.22	0.22	0.13	-0.29	-0.18	-0.37	-0.06	-0.15	0.20	0.03	-0.16	-0.05	-0.16	-0.03	0.14
Marzo	0.13	0.31	-0.01	0.47	0.18	-0.03	-0.18	-0.06	-0.09	-0.21	-0.12	0.23	0.38	-0.16	-0.03	-0.17
Abril	0.34	-0.33	-0.08	0.10	-0.21	0.22	0.22	-0.22	0.25	0.20	-0.25	0.45	-0.18	-0.20	-0.05	-0.06
Primavera	0.24	-0.02	0.00	-0.07	0.28	0.23	0.26	0.59	0.45	0.40	-0.26	0.21	-0.24	-0.28	0.30	0.08
Verano	0.01	0.21	0.25	-0.11	-0.47	-0.27	-0.17	-0.04	-0.21	0.17	0.20	-0.10	0.33	0.54	0.29	0.42

TABLA 2. Correlación rendimiento de maíz versus estado de vegetación (VCI).

Rend Maíz	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Sem 37	Sem 38	Sem 39	Sem 40	Sem 41
Rend Maíz	1.00														
Diciembre	0.52	1.00													
Enero	0.71	0.87	1.00												
Febrero	0.69	0.55	0.83	1.00											
Marzo	0.51	0.29	0.53	0.86	1.00										
Periodo 1	0.48	1.00	0.84	0.51	0.26	1.00									
Periodo 2	0.66	0.94	0.98	0.72	0.42	0.92	1.00								
Periodo 3	0.72	0.76	0.97	0.93	0.67	0.72	0.91	1.00							
Periodo 4	0.68	0.51	0.79	1.00	0.89	0.47	0.67	0.90	1.00						
Periodo 5	0.55	0.32	0.57	0.90	1.00	0.28	0.46	0.71	0.92	1.00					
Periodo 6	0.24	0.10	0.24	0.59	0.89	0.09	0.16	0.36	0.62	0.85	1.00				
Sem 37	0.41	0.47	0.33	0.30	0.24	0.48	0.38	0.29	0.30	0.25	0.17	1.00			
Sem 38	0.44	0.51	0.36	0.29	0.20	0.52	0.41	0.31	0.29	0.22	0.11	0.99	1.00		
Sem 39	0.46	0.54	0.38	0.28	0.17	0.55	0.44	0.32	0.27	0.19	0.06	0.97	1.00	1.00	
Sem 40	0.47	0.57	0.40	0.27	0.13	0.59	0.47	0.33	0.26	0.15	0.00	0.94	0.97	0.99	1.00
Sem 41	0.50	0.61	0.44	0.28	0.12	0.63	0.50	0.40	0.26	0.14	-0.01	0.90	0.93	0.97	0.99
Sem 42	0.52	0.65	0.47	0.29	0.11	0.67	0.53	0.40	0.27	0.14	-0.02	0.84	0.88	0.92	0.95
Sem 43	0.52	0.68	0.50	0.30	0.11	0.71	0.56	0.42	0.28	0.13	-0.02	0.78	0.82	0.86	0.90
Sem 44	0.46	0.66	0.49	0.33	0.19	0.69	0.54	0.43	0.31	0.20	0.12	0.73	0.77	0.81	0.85
Sem 45	0.47	0.79	0.58	0.33	0.13	0.81	0.65	0.49	0.30	0.15	0.01	0.66	0.69	0.74	0.79
Sem 46	0.44	0.84	0.62	0.35	0.13	0.87	0.69	0.52	0.31	0.15	0.02	0.60	0.64	0.68	0.73
Sem 47	0.38	0.88	0.63	0.35	0.12	0.91	0.72	0.52	0.31	0.14	0.01	0.57	0.60	0.65	0.70
Sem 48	0.39	0.93	0.70	0.39	0.16	0.96	0.79	0.59	0.35	0.18	0.04	0.52	0.55	0.59	0.64
Sem 49	0.42	0.97	0.76	0.44	0.20	0.99	0.85	0.64	0.40	0.22	0.06	0.50	0.53	0.57	0.61
Sem 50	0.47	1.00	0.83	0.50	0.25	1.00	0.91	0.71	0.46	0.28	0.09	0.48	0.51	0.55	0.58
Sem 51	0.54	1.00	0.89	0.58	0.31	0.99	0.96	0.78	0.53	0.34	0.11	0.46	0.49	0.52	0.55
Sem 52	0.61	0.98	0.94	0.65	0.37	0.96	0.99	0.85	0.60	0.40	0.14	0.42	0.45	0.48	0.51
Sem 1	0.66	0.94	0.97	0.70	0.39	0.91	1.00	0.90	0.65	0.43	0.13	0.38	0.41	0.45	0.47
Sem 2	0.70	0.90	1.00	0.78	0.48	0.86	0.99	0.95	0.74	0.52	0.19	0.33	0.37	0.39	0.42
Sem 3	0.72	0.83	1.00	0.86	0.57	0.80	0.96	0.99	0.83	0.61	0.27	0.30	0.32	0.35	0.36
Sem 4	0.72	0.76	0.97	0.93	0.66	0.72	0.90	1.00	0.90	0.70	0.36	0.28	0.30	0.31	0.32
Sem 5	0.71	0.67	0.93	0.97	0.75	0.63	0.83	0.99	0.95	0.79	0.45	0.28	0.29	0.30	0.32
Sem 6	0.70	0.59	0.86	1.00	0.82	0.55	0.75	0.95	0.99	0.86	0.53	0.29	0.29	0.29	0.28
Sem 7	0.67	0.50	0.79	1.00	0.89	0.46	0.67	0.90	1.00	0.92	0.62	0.30	0.29	0.28	0.26
Sem 8	0.65	0.43	0.71	0.98	0.94	0.39	0.59	0.84	0.99	0.96	0.70	0.29	0.27	0.25	0.23
Sem 9	0.61	0.37	0.65	0.94	0.98	0.33	0.52	0.77	0.96	0.99	0.78	0.27	0.25	0.22	0.19
Sem 10	0.55	0.32	0.57	0.90	1.00	0.28	0.45	0.70	0.92	1.00	0.85	0.25	0.22	0.19	0.15
Sem 11	0.48	0.26	0.49	0.83	1.00	0.23	0.38	0.62	0.86	0.99	0.92	0.23	0.19	0.15	0.10
Sem 12	0.37	0.19	0.38	0.73	0.97	0.16	0.28	0.51	0.76	0.94	0.98	0.20	0.15	0.10	0.09
Sem 13	0.24	0.10	0.24	0.59	0.89	0.09	0.16	0.36	0.63	0.85	1.00	0.17	0.11	0.06	-0.01
Sem 14	0.10	0.01	0.09	0.42	0.78	0.01	0.03	0.20	0.46	0.73	0.98	0.14	0.08	0.02	-0.04
Sem 15	-0.02	-0.07	-0.03	0.28	0.67	-0.07	-0.08	0.06	0.32	0.61	0.93	0.10	0.04	-0.03	-0.09
Sem 16	-0.10	-0.15	-0.14	0.17	0.58	-0.14	-0.18	-0.05	0.21	0.52	0.88	0.07	-0.01	-0.07	-0.14

TABLA 3. Correlación rendimiento de soja versus precipitaciones.

	Rend. Soja	Sep 1ra	Sep 2da	Sep 3ra	Oct 1ra	Oct 2da	Oct 3ra	Nov 1ra	Nov 2da	Nov 3ra	Dic 1ra	Dic 2da	Dic 3ra	Ene 1ra	Ene 2da	Enero 3ra
Rend. Soja	1.00															
Sep 1ra	0.14	1.00														
Sep 2da	0.18	-0.02	1.00													
Sep 3ra	-0.05	-0.09	-0.11	1.00												
Oct 1ra	0.03	0.16	-0.15	-0.14	1.00											
Oct 2da	0.33	-0.17	0.03	0.15	0.07	1.00										
Oct 3ra	0.04	-0.11	0.09	-0.14	-0.12	-0.15	1.00									
Nov 1ra	-0.25	-0.01	-0.10	-0.09	0.31	-0.12	-0.03	1.00								
Nov 2da	0.05	-0.25	-0.19	-0.21	0.01	-0.01	0.01	0.01	1.00							
Nov 3ra	-0.19	0.03	-0.02	-0.30	-0.05	0.20	-0.27	-0.06	0.32	1.00						
Dic 1ra	0.18	0.09	-0.12	-0.15	-0.36	-0.16	-0.08	0.16	-0.10	-0.24	1.00					
Dic 2da	0.17	0.08	-0.12	0.09	0.04	0.21	-0.05	-0.28	0.13	0.55	-0.32	1.00				
Dic 3ra	0.12	0.34	0.27	0.02	-0.09	-0.23	0.20	-0.19	-0.40	-0.18	0.11	-0.09	1.00			
Ene 1ra	-0.06	0.02	0.25	-0.20	-0.32	-0.06	-0.15	0.05	-0.13	-0.17	-0.01	-0.43	0.04	1.00		
Ene 2da	-0.08	0.01	-0.07	-0.04	-0.07	-0.27	0.09	0.37	0.10	0.15	0.07	-0.20	-0.20	0.07	1.00	
Enero 3ra	-0.07	-0.28	0.02	-0.25	-0.09	-0.03	0.14	-0.05	0.14	0.27	-0.20	0.24	0.03	0.04	-0.05	1.00
Feb 1ra	-0.19	0.32	0.24	-0.20	-0.01	0.08	-0.09	-0.06	-0.13	0.36	0.05	0.24	-0.15	-0.11	-0.04	0.10
Feb 2da	-0.40	0.12	0.06	0.23	-0.29	-0.01	-0.46	0.04	0.01	0.15	0.03	-0.21	-0.11	0.32	0.24	-0.14
Feb 3ra	-0.22	-0.01	0.10	0.22	-0.26	-0.38	-0.20	-0.07	-0.15	-0.11	-0.02	-0.34	0.13	0.41	0.29	0.26
Mar 1ra	0.28	0.31	0.01	0.71	-0.09	-0.05	-0.07	-0.19	-0.33	-0.26	-0.12	0.21	0.42	-0.12	0.01	-0.19
Mar 2da	0.17	0.04	-0.16	0.07	0.44	0.06	-0.19	-0.01	0.29	0.15	-0.46	0.45	-0.08	-0.13	-0.08	0.12
Mar 3ra	0.32	0.18	0.15	-0.09	0.00	-0.05	-0.07	0.16	-0.03	-0.23	0.45	-0.34	0.28	-0.03	0.02	-0.22
Abr 1ra	-0.04	-0.39	-0.08	0.03	-0.09	0.47	0.15	-0.10	0.43	0.34	-0.29	0.27	-0.26	-0.10	-0.15	0.06
Abr 2da	0.06	-0.06	-0.11	-0.04	-0.19	0.14	0.41	-0.18	-0.14	-0.15	0.13	-0.02	-0.03	0.08	0.25	-0.34
Abr 3ra	0.03	-0.03	0.03	0.16	-0.12	-0.32	-0.07	-0.14	-0.04	-0.01	-0.14	0.43	0.03	0.03	-0.06	0.03
Septiembre	0.10	0.41	0.32	0.77	-0.10	0.05	-0.14	-0.13	-0.39	-0.26	-0.13	0.06	0.30	-0.06	-0.06	-0.34
Octubre	0.20	-0.13	0.05	-0.11	0.24	0.35	0.82	0.01	0.01	-0.17	-0.27	0.06	0.05	-0.26	-0.07	0.09
Noviembre	-0.24	-0.10	-0.16	-0.31	0.19	0.01	-0.15	0.64	0.60	0.61	-0.06	0.15	-0.39	-0.11	0.37	0.16
Diciembre	0.28	0.35	0.06	-0.02	-0.25	-0.15	0.08	-0.20	-0.28	0.03	0.47	0.30	0.76	-0.21	-0.21	0.05
Enero	-0.11	-0.13	0.16	-0.29	-0.30	-0.16	0.00	0.15	0.02	0.08	-0.08	-0.26	-0.03	0.77	0.42	0.54
Febrero	-0.41	0.22	0.22	0.13	-0.29	-0.18	-0.37	-0.06	-0.15	0.20	0.03	-0.16	-0.05	0.32	0.25	0.14
Marzo	0.43	0.31	-0.01	0.47	0.18	-0.03	-0.18	-0.06	-0.09	-0.21	-0.12	0.23	0.38	-0.16	-0.03	-0.17
Abril	0.01	-0.33	-0.08	0.10	-0.21	0.22	0.22	-0.22	0.25	0.20	-0.12	0.23	0.18	-0.16	-0.03	-0.06
Primavera	-0.08	-0.02	0.00	-0.07	0.28	0.23	0.26	0.59	0.45	0.40	-0.26	0.21	-0.24	-0.28	0.30	0.08
Verano	-0.16	0.21	0.25	-0.11	-0.47	-0.27	-0.17	-0.04	-0.21	0.17	0.20	-0.10	0.33	0.54	0.29	0.42

TABLA 4. Correlación rendimiento de soja versus estado de vegetación (VCI).

Rend. Soja	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Sem 37	Sem 38	Sem 39	Sem 40	Sem 41
Diciembre	1.00														
Enero	0.31	1.00													
Febrero	0.41	0.87	1.00												
Marzo	0.47	0.55	0.83	1.00											
Periodo 1	0.39	0.29	0.53	0.86	1.00										
Periodo 2	0.31	1.00	0.84	0.51	0.26	1.00									
Periodo 3	0.35	0.94	0.98	0.72	0.42	0.92	1.00								
Periodo 4	0.45	0.76	0.97	0.93	0.67	0.72	0.91	1.00							
Periodo 5	0.47	0.51	0.79	1.00	0.89	0.47	0.67	0.90	1.00						
Periodo 6	0.41	0.32	0.57	0.90	1.00	0.28	0.46	0.71	0.92	1.00					
Sem 37	0.23	0.10	0.24	0.59	0.89	0.09	0.16	0.36	0.62	0.85	1.00				
Sem 38	0.20	0.47	0.33	0.30	0.24	0.48	0.38	0.29	0.30	0.25	0.17	1.00			
Sem 39	0.21	0.51	0.36	0.29	0.20	0.52	0.41	0.31	0.29	0.22	0.11	0.99	1.00		
Sem 40	0.23	0.54	0.38	0.28	0.17	0.55	0.44	0.32	0.27	0.19	0.06	0.97	0.99	1.00	
Sem 41	0.28	0.57	0.40	0.27	0.13	0.59	0.47	0.33	0.26	0.15	0.00	0.94	0.97	0.99	1.00
Sem 42	0.30	0.61	0.44	0.28	0.12	0.63	0.50	0.36	0.26	0.14	-0.01	0.90	0.93	0.97	0.99
Sem 43	0.37	0.65	0.47	0.29	0.11	0.67	0.53	0.40	0.27	0.14	-0.02	0.84	0.88	0.92	0.95
Sem 44	0.41	0.68	0.50	0.30	0.11	0.71	0.56	0.42	0.28	0.13	-0.02	0.78	0.82	0.86	0.90
Sem 45	0.48	0.66	0.49	0.33	0.19	0.69	0.54	0.43	0.31	0.20	0.12	0.73	0.77	0.81	0.85
Sem 46	0.44	0.79	0.58	0.33	0.13	0.81	0.65	0.49	0.30	0.15	0.01	0.66	0.69	0.74	0.79
Sem 47	0.42	0.84	0.62	0.35	0.13	0.87	0.69	0.52	0.31	0.15	0.02	0.60	0.64	0.68	0.73
Sem 48	0.42	0.88	0.63	0.35	0.12	0.91	0.72	0.52	0.31	0.14	0.01	0.57	0.60	0.65	0.70
Sem 49	0.36	0.93	0.70	0.39	0.16	0.96	0.79	0.59	0.35	0.18	0.04	0.52	0.55	0.59	0.64
Sem 50	0.33	0.97	0.76	0.44	0.20	0.99	0.85	0.64	0.40	0.22	0.06	0.50	0.53	0.57	0.61
Sem 51	0.31	1.00	0.83	0.50	0.25	1.00	0.91	0.71	0.46	0.28	0.09	0.48	0.51	0.55	0.58
Sem 52	0.29	1.00	0.89	0.58	0.31	0.99	0.96	0.78	0.53	0.34	0.11	0.46	0.49	0.52	0.55
Sem 1	0.30	0.98	0.94	0.65	0.37	0.96	0.99	0.85	0.60	0.40	0.14	0.42	0.45	0.48	0.51
Sem 2	0.35	0.94	0.97	0.70	0.39	0.91	1.00	0.90	0.65	0.43	0.13	0.38	0.41	0.45	0.47
Sem 3	0.39	0.90	1.00	0.78	0.48	0.86	0.99	0.95	0.74	0.52	0.19	0.33	0.37	0.39	0.42
Sem 4	0.43	0.83	1.00	0.86	0.57	0.80	0.96	0.99	0.83	0.61	0.27	0.30	0.32	0.35	0.36
Sem 5	0.45	0.76	0.97	0.93	0.66	0.72	0.90	1.00	0.90	0.70	0.36	0.28	0.30	0.31	0.32
Sem 6	0.46	0.67	0.93	0.97	0.75	0.63	0.83	0.99	0.95	0.79	0.45	0.28	0.29	0.30	0.30
Sem 7	0.47	0.59	0.86	1.00	0.82	0.55	0.75	0.95	0.99	0.86	0.53	0.29	0.29	0.29	0.28
Sem 8	0.45	0.50	0.79	1.00	0.89	0.46	0.67	0.90	1.00	0.92	0.62	0.30	0.29	0.28	0.26
Sem 9	0.44	0.43	0.71	0.98	0.94	0.39	0.59	0.84	0.99	0.96	0.70	0.29	0.27	0.25	0.23
Sem 10	0.44	0.37	0.65	0.94	0.98	0.33	0.52	0.77	0.96	0.99	0.78	0.27	0.25	0.22	0.19
Sem 11	0.41	0.32	0.57	0.90	1.00	0.28	0.45	0.70	0.92	1.00	0.85	0.22	0.19	0.15	0.14
Sem 12	0.37	0.26	0.49	0.83	1.00	0.23	0.38	0.62	0.86	0.99	0.92	0.23	0.19	0.10	0.09
Sem 13	0.32	0.19	0.38	0.73	0.97	0.16	0.28	0.51	0.76	0.94	0.98	0.20	0.15	0.10	0.05
Sem 14	0.23	0.10	0.24	0.59	0.89	0.09	0.16	0.36	0.63	0.85	1.00	0.17	0.11	0.06	0.00
Sem 15	0.13	0.01	0.09	0.42	0.78	0.01	0.03	0.20	0.46	0.73	0.98	0.14	0.08	0.02	-0.04
Sem 16	0.04	-0.07	-0.03	0.28	0.67	-0.07	-0.08	0.06	0.32	0.61	0.93	0.10	0.04	-0.03	-0.09
	-0.03	-0.15	-0.14	0.17	0.58	-0.14	-0.18	-0.05	0.21	0.52	0.88	0.07	-0.01	-0.07	-0.14

