



Universidad Nac. de Córdoba
Fac. de Ciencias Agropecuarias
Escuela para graduados



Universidad Nac. de Río IV
Fac. de Agronomía y Veterinaria
Escuela de Posgraduación

**EL ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN
COMO INDICADOR DE LA
SUSTENTABILIDAD DE UN TERRITORIO
AGRÍCOLA**

José Luis Zamar

Tesis

Para optar al Grado Académico de
Magister en Gestión Ambiental Agropecuaria

Córdoba, 2004

EL ÍNDICE NORMALIZADO DE VEGETACIÓN COMO INDICADOR DE LA SUSTENTABILIDAD DE UN TERRITORIO AGRÍCOLA

José Luis Zamar

Comisión Asesora de Tesis

Director: Ing. Agr. (MSc.) Esteban E. Alessandria

Co-Director: Dr. Ernesto G. Abril

Asesor Estadístico: Dr. Julio Di Rienzo

Tribunal Examinador de Tesis

Dr. Andrés Ravelo

Ing. Agr. Santiago Sarandón

Dr. Américo Degioanni

Presentación formal académica: 17 de Diciembre de 2004

Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Córdoba

Agradecimientos

A la comisión asesora de la tesis en su conjunto y, especialmente, al Ing. Esteban Alessandria por su dedicación y aliento permanente para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeras de trabajo en Ecología Agrícola, Alicia Barchuk y Marta Boetto por su apoyo y comprensión.

A la comisión revisora de la tesis, Dr. Andrés Ravelo, Ing. Agr. Santiago Sarandón y Dr. Américo Degioanni por haber aportado generosamente ideas para la corrección y mejoramiento del trabajo.

A la Junta Académica de la Maestría en Gestión Ambiental Agropecuaria por su compromiso y dedicación en llevar adelante esta importante y trascendente iniciativa interinstitucional.

Al personal de la Escuela de Posgrado, por su colaboración y predisposición a la solución de todos los problemas en el transcurso de la Maestría.

A la Escuela de Posgrado de la Facultad de Veterinaria y Agronomía de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Al Dr. Jorge Alberto Sanabria por su generosidad en brindar la información de base de la cuenca Rafael García - Lozada.

Al Dr. Walter Robledo, por haberme asesorado sobre la implementación del modelo estadístico de serie de tiempo.

Al Ing. Agr. Antonio de la Casa, quien leyó los borradores del trabajo y aportó valiosas sugerencias.

A mis compañeros de la Maestría, con los cuales compartí numerosos momentos de estudio y camaradería.

A mis padres Sara y Yamil y hermanos, Rubén, David y Ricardo por haber generado continuamente un ámbito de libertad, reflexión y espíritu indagador que me orientó a abordar la carrera científica.

A mi familia, por haber apoyado comprensivamente todos los momentos que dedique a la elaboración de este trabajo.

A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Provincia de Córdoba y la Agencia Córdoba Ciencia por haber colaborado económicamente para la realización de la tesis.

A los señores productores agropecuarios de la región de Lozada, por haberme permitido compartir sus historias, problemas y proyectos, lo que me ayudó a interpretar mejor su realidad.

*La tierra tiene lo suficiente para las necesidades de cada hombre,
pero no para la avaricia de cada hombre*

Mahatma Gandhi

A Silvia, Manuel, Mercedes y Mariela

Resumen

Se propuso evaluar de manera comparativa la sustentabilidad de diferentes ambientes agrícolas, utilizando la vegetación como un indicador dinámico de tal condición. Para ello se estudiaron los cambios temporales y la heterogeneidad espacial de un territorio a través de información satelital y se ensayaron diferentes indicadores de estas variaciones.

Se analizó la cuenca denominada "Rafael García-Lozada", localizada en el departamento Santa María, Córdoba, con una extensión de 350 km² y uso actual de la tierra con predominio agrícola. Se contó con imágenes digitales de NDVI obtenidas de información de dominio público de Internet. Se dispuso de una serie de imágenes decádicas de resolución 1,1 x 1,1 km (1992-1996, en forma discontinua) y de una serie de imágenes mensuales NOAA de resolución 8 x 8 km (1981-2001). Mediante clasificación no supervisada del primer componente principal estandarizado obtenido de un análisis de serie temporal, se delimitaron tres unidades homogéneas (UH), que se caracterizaron física y biológicamente. Se usaron diferentes indicadores de su heterogeneidad espacial y temporal, que se integraron en un diagrama tipo tela de araña.

La UH 3, ubicada hacia el NO, en la cabecera de la cuenca, alcanzó el mayor valor del índice de productividad edafo-climático (IP) y promedios superiores de NDVI, especialmente en los valores de los ciclos invernales. Fueron elevados los índices de correlación entre los NDVI promedio y los IP de las regiones geomorfológicas ($r = 0,97$) y de las unidades homogéneas ($r = 0,99$). En el relevamiento más reciente (año 1999), la vegetación leñosa ocupaba el 7% de la superficie, mostrando además una distribución heterogénea y fragmentada. La cantidad de biomasa de los cultivos que retorna al suelo a través de los rastrojos, calculada a partir de la estimación de la productividad primaria neta aérea, fue 683 (± 95.0) Kg/ha/año de materia seca mayor en la UH 3 que en la UH 1, ubicada en la porción inferior de la cuenca. Por otra parte, la fecha promedio de máximo crecimiento en la UH 3 se anticipa en algo más de un mes a la fecha de las otras.

Durante el período analizado (1970-1999), se eliminó de la cuenca el 61% de los bosques (3881,7 ha), con mayor descenso (47%) en los primeros quince años. Los sistemas de cultivo revelan una simplificación creciente, con un marcado predominio

del cultivo de soja; este proceso se cuantificó con el Índice de Diversidad de Shannon, que descendió de 0,51 en la primera década a 0,38, en la segunda.

Los promedios de NDVI de los ciclos estivales de la UH 3 aumentaron significativamente un 8,9% en la última década. Las correlaciones entre los valores mensuales de las series de precipitación y NDVI resultaron significativas. Con los promedios anuales, sólo los años de precipitación desfavorables presentaron ajustes elevados y significativos. Es decir, en estos períodos secos la precipitación fue el factor determinante de la captación fotosintética. Las unidades homogéneas se diferenciaron en su respuesta frente a la lluvia, presentando la UH 1 el mayor ajuste y la UH 3 el menor; poniendo en evidencia su menor dependencia de la precipitación.

De las relaciones entre NDVI y las estadísticas de cultivos del Departamento Santa María que se analizaron, surgió que los promedios de NDVI de los meses de Agosto y Setiembre, en el caso de los cultivos invernales y el NDVI del mes de Febrero, para los estivales, permiten realizar estimaciones tempranas de los rendimientos. También el ICV (índice de condición de la vegetación) correlacionó positiva y significativamente con los datos de producción total de cultivos del departamento, pero no alcanzó a mejorar el ajuste obtenido con el NDVI.

La variable *Derivada del NDVI* discriminó las diferencias entre los distintos ambientes, tanto por sus valores máximos como por las fechas en que ocurrieron. Las diferencias entre los valores de NDVI máximos y mínimos de los períodos anuales para la serie 1981-2001 fue significativamente menor en la UH 3 que en las otras dos.

Se destaca la validez del procedimiento metodológico, basado en la utilización de información satelital de acceso público para definir unidades ambientalmente homogéneas, corroborar estas delimitaciones a través de la evaluación de diferentes características de su estructura física y biológica y comparar el estado o condición actual y los cambios a los que estuvieron sujetos. Estas características, junto al análisis de las relaciones entre el NDVI y la precipitación, la calidad del suelo y las estadísticas de cultivos del departamento, permitieron interpretar el funcionamiento de las unidades homogéneas y establecer un conjunto de indicadores para evaluar la productividad, la eficiencia y la estabilidad, bases de la sustentabilidad ambiental de estos agroecosistemas.

Palabras Clave: sustentabilidad, indicadores, índice normalizado de vegetación, agroecosistemas, cuenca

Abstract

The objective of this work was the comparative evaluation of different agricultural environments using the vegetation like a dynamic indicator of sustainability condition. Temporary changes and space heterogeneity of a test site watershed were evaluated and interpreted for this purposes through satellite information.

The techniques were applied to "Rafael García-Lozada" watershed, an area of about 350 km² located in Santa Maria, Cordoba (Argentina) where land use is mainly agriculture. We used decadic NOAA NDVI images with 1.1 x 1.1 Km pixel size from 1992 to 1996 period and series of monthly NOAA NDVI images with 8 x 8 Km pixel size from 1981 to 2001. Working with the first standardized main component a nonsupervised classification of the temporary series was performed. Three homogenous units (HU) were delimited trough this way and this parameters provided for a physical and biological characterization. In addition, we considered too spatial and temporary indicators.

HU 3 reached the greater value of the index of edafo-climatic productivity (IP) and superior averages of NDVI, specially in the values of the winter cycles. The indices of correlation between the NDVI average and the IP of the geomorphic regions ($r = 0.97$) and of the homogeneous units ($r = 0.99$) were elevated. In the most recent period (1999), the woody vegetation occupied 7% of the surface, showing too an heterogeneous fragmented distribution. The amount of biomass of the crops that returns to the ground through the stubbles, calculated from the estimation of the aerial net primary productivity, was 683 ($\pm 95,0$) Kg/ha/year of dry matter greater in the HU 3 that in HU 1. On the other hand, the date average of maximum growth in HU 3 is anticipated in something more of a month to the date of the others.

During the analyzed period (1970-1999), 61% of forests were eliminated in the watershed (3881.7 ha), with greater reduction (47%) in the initial stage. The crops systems reveal an increasing simplification, with a noticeable predominance of the soybean. This process was quantified with the diversity Index of Shannon, that descend from 0.51 in the first decade to 0.38, in the second.

The NDVI averages of summer cycles of HU 3 significantly increased about 8.9% between both decades. Monthly values of precipitation series and NDVI correlations were significant. With the annual averages, only unfavorable years of precipitation showed high and conspicuous adjustments. In these dry periods precipitation was the determining factor of the photosynthetic activity. The homogenous units were different in their answer rain, presenting the HU 1 the greater adjustment and HU 3 the minor; putting in evidence its smaller dependency of the precipitation.

NDVI and statistics of crops relations for all Santa Maria arose that NDVI August and September averages (in winter crops) and NDVI of the month of February (in summer crops) would allow to make early estimations of the yields. VCI (vegetation condition index) also correlated positively and significantly with total production data of crops of Santa Maria, but it did not reach to improve the adjustment obtained with the NDVI.

The *NDVI Derived* discriminated the differences between environments, as much by its maximum values as by the dates in which they happened. The differences between values of maximum and minimum of the annual NDVI periods for series 1981-2001 were significantly smaller in the HU 3 than in the others.

The methodological procedure validation using public satellite images information stands out to delimit environmentally homogenous units, to corroborate these boundaries through the evaluation of different characteristics from its physical and biological structure and to compare the present condition and changes to which they were subject. These characteristics, with the analysis of relations between the NDVI with precipitation, ground quality and crops statistics, allows the interpret the function of homogenous units and to detect a set of indicators to evaluate the productivity, the efficiency and the stability, bases of the environmental sustainability of an agroecosystems.

Key words: indicators of sustainability, NDVI, agroecosystem, watershed

Tabla de Contenido

Contenido	Pág.
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
I. INTRODUCCION.....	1
Consecuencias ambientales de la agricultura convencional.....	1
Necesidad de un cambio de paradigma.....	3
Incorporación del concepto de sustentabilidad.....	5
Elementos ambientales de la sustentabilidad.....	6
Indicadores de sustentabilidad de sistemas agropecuarios.....	7
La calidad del suelo como indicador.....	10
La vegetación como indicadora del ambiente.....	11
Información satelital de la vegetación	13
II. HIPOTESIS Y OBJETIVOS.....	16
Hipótesis.....	16
Objetivo general.....	17
Objetivos particulares.....	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
1. Caracterización del área de estudio.....	18
1.1 Ubicación.....	18
1.2 Caracterización física.....	18
2. Fuentes de información utilizadas.....	22
3. Procesamientos realizados.....	23
3.1 Georreferenciación de las imágenes.....	24
3.2 Identificación de las unidades homogéneas (UH).....	25
3.2.1 Comprobación del grado de ajuste entre las series 8 x 8 y 1 x 1 km.....	25
3.2.2 Modelo estadístico para la comparación de las UH	26
3.3 Caracterización de la estructura física y biológica de las unidades homogéneas.....	27
3.3.1 Sistematización de la información fisiográfica.....	27
3.3.2 Índice de Productividad Edafo-Climatológico.....	27
3.3.3 Precipitación.....	28
3.3.4 Evaluación de la superficie boscosa de la cuenca.....	29
3.3.5 Evaluación de los cultivos.....	29
a) Análisis de la serie de resolución 8 x 8 km.....	29
b) Cálculo de la productividad primaria neta aérea (PPNA).....	30
c) Ritmo de crecimiento.....	30
d) Índice de diversidad de los cultivos.....	31
e) Modificaciones en el manejo tecnológico de los sistemas de producción...	31
3.4 Uso del NDVI como indicador de la heterogeneidad espacial y temporal..	31
3.4.1 Relación entre NDVI y precipitación.....	31
3.4.2 Relación entre NDVI y el índice de productividad del suelo.....	31
3.4.3 Relación entre NDVI y cultivos del Departamento.....	31

3.5 Otros indicadores basados en el NDVI.....	32
3.5.1 Delta NDVI.....	32
3.5.2 Derivada del NDVI.....	32
3.5.3 Índice de condición de la vegetación.....	32
3.5.4 Diferencia entre el máximo y el mínimo valor del NDVI.....	33
3.6. Evaluación de la sustentabilidad ambiental.....	33
IV. RESULTADOS OBTENIDOS.....	35
IV. A - Heterogeneidad espacial	35
1. Delimitación de las unidades homogéneas (UH).....	35
2. Comprobación del grado de ajuste entre las series 8 x 8 y 1,1 x 1,1 Km.....	40
3. Características físicas y biológicas de las unidades homogéneas	42
3.1 Geomorfología.....	43
Caracterización geomorfológica de cada unidad homogénea.....	43
3.2 Suelos.....	45
3.2.1. Clasificación y Mapa de suelos.....	45
3.2.2 Índice de productividad edafo-climatológica.....	47
3.3 Vegetación leñosa, predominantemente nativa.....	49
3.4 Cultivos.....	49
3.4.1 Análisis de la superficie y producción de los cultivos.....	49
3.4.2 Evaluación del NDVI en imágenes de resolución 8x8 km.....	50
3.4.3 Cálculo de la productividad primaria neta aérea (PPNA).....	52
3.4.4 Ritmo de crecimiento.....	53
4. El NDVI como indicador de la heterogeneidad espacial.....	55
4.1 Relación entre NDVI y la calidad del suelo.....	55
4.1.1 Relación entre el NDVI resolución 1,1 x 1,1 km y el suelo.....	55
4.1.2 Relación entre el NDVI resolución 8 x 8 km y el suelo.....	56
IV. B Variabilidad temporal	57
1. Análisis de la precipitación.....	57
2. Variación de la vegetación leñosa en el período analizado.....	59
3. Evolución de los cultivos en el departamento Santa María.....	61
4. Modificaciones en el manejo tecnológico.....	62
5. Uso del NDVI como indicador de los cambios temporales.....	63
5.1 Evolución temporal del NDVI.....	64
5.1.1 Modelo estadístico para la comparación de las UH.....	66
5.2 Relación entre NDVI y precipitación.....	67
5.3 Relación entre NDVI y estadísticas de cultivos del Departamento.....	70
6. Otros indicadores basados en el NDVI.....	71
6.1 delta NDVI y derivada del NDVI.....	71
6.2 Índice de condición de la vegetación (ICV)	71
6.3 Diferencia entre el máximo y el mínimo valor del NDVI.....	73
IV. C Integración de resultados.....	74
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
VI. CONCLUSIONES	89
VII. LITERATURA CITADA	91

ANEXO I.....	92
ANEXO II.....	93
ANEXO III.....	96
ANEXO IV.....	97

Índice de Tablas

Contenido	Pág.
Tabla 1: Resultados de la prueba DGC (alfa = 0,01) sobre los datos de los pixeles 1 x 1 km que se corresponden con las unidades homogéneas y los pixeles 8 x 8 km.	41
Tabla 1a: Clasificación Taxonómica de las Series de suelo de la cuenca R. García- Lozada.....	45
Tabla 2. Valores del índice de productividad de la unidad cartográfica (Ipc) básicos calculados para cada una de las facetas de suelo. Donde: Co = Complejo; Con = Consociación.....	48
Tabla 3. Valores del índice de productividad de la unidad cartográfica (Ipc) para cada unidad homogénea de la cuenca Rafael García-Lozada	49
Tabla 4. Promedios de NDVI y Coeficientes de Variación (CV) de la serie 1981-2001 para las unidades homogéneas 1, 2 y 3. Se presentan los valores promedio mensuales para los periodos anuales y semestrales, estivales e invernales.....	51
Tabla 5: Promedios de productividad primaria neta aérea (PPNA) calculados a partir de los datos de NDVI, para los ciclos estivales e invernales y discriminando por unidad homogénea. Los datos están en Kg de materia seca por hectárea y por ciclo.....	52
Tabla 6: Valores de materia seca remanente aportada por los cultivos estivales e invernales de cada uno de las unidades homogéneas.....	53
Tabla 7: Fechas promedio del máximo crecimiento y del máximo decrecimiento de los valores de NDVI.....	54
Tabla 8: Coeficientes de correlación (CC) de Pearson entre valores correspondientes a la suma invernal de NDVI (Mayo-Octubre) y los rendimientos del Dpto. Santa María.....	55
Tabla 9: Valores de los Ipc calculados para diferentes regiones geomorfológicas y valores medios de NDVI para la Serie 1,1 x 1,1 km.....	56
Tabla 11: Promedios de precipitación calculados para las décadas 1980-1990 y 1990-2000. Los promedios están calculados para el período anual y los ciclos estivales e invernales.....	59
Tabla 12: Evolución de la superficie ocupada por vegetación leñosa en las diferentes unidades homogéneas, según tres fechas analizadas.....	59
Tabla 13: Indices de fragmentación de la vegetación leñosa obtenidos a partir de los datos relevados de 1970 y 1987.....	61
Tabla 14: Promedios de NDVI para la cuenca R. García-Lozada para la serie 1981-2001 y para la primera y segunda década de este período.....	66

Tabla 15: Análisis de la varianza para probar la hipótesis nula de igualdad de medias de NVDI entre las unidades homogéneas	66
Tabla 16: Coeficientes de correlación (Pearson) entre la serie de valores máximos mensuales de NDVI y los promedios mensuales de precipitación para la serie 1981-2001. Se presentan las correlaciones para meses coincidentes (Pp m) y precipitaciones anticipadas en 1 (Pp m-1), 2 (Pp m-2) y 3 (Pp m-3) meses.	68
Tabla 17: Coeficientes de correlaciones (Pearson) entre precipitación mensual (abril-setiembre y octubre-marzo) y NDVI mensual (mayo-octubre y noviembre-abril) para ciclos invernales y estivales de la serie 1981-2001....	69
Tabla 18: Coeficiente de correlación (Pearson) entre la precipitación y la producción total del departamento Santa María para los ciclos agrícolas estivales e invernales.....	70
Tabla 19: Coeficientes de correlación (Pearson) entre valores de NDVI de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos invernales del Dpto. S. María.....	70
Tabla 20: Coeficientes de correlación (Pearson) entre valores de NDVI de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos estivales del Dpto. S. María.....	70
Tabla 21: delta NDVI y fecha del máximo valor para cada unidad homogénea....	71
Tabla 22: Derivada del NDVI y fecha del máximo valor para cada unidad homogénea.....	71
Tabla 23: Valores de ICV promedio de la serie 1980-00 de los ciclos estivales e invernales secos (precipitación inferior a la media) de cada unidad homogénea.....	72
Tabla 24: Coeficientes de correlación de Pearson entre ICV promedio invernal (mayo-octubre) de cada unidad homogénea y la suma de precipitación otoño-invernal. Se consideraron los ciclos más secos de la serie.....	73
Tabla 25: Coeficientes de correlación de Pearson entre valores de ICV de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos invernales y estivales del Dpto. S. María.....	73
Tabla 26: Promedios de los máximos y mínimos anuales y de las diferencias entre el máximo y el mínimo NDVI anual de las unidades homogéneas de la cuenca R. García-Lozada, durante la serie 1981-2001.....	73
Tabla 27: Indicadores de sustentabilidad evaluados para las unidades homogéneas de la cuenca R. García-Lozada.....	74

Índice de Figuras

Contenido	Pág.
Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca R. García-Lozada.....	18
Figura 2: imagen del componente 1 del TSA, realizado sobre la serie 1981-2001. Se puede ver la silueta de la cuenca.....	35
Figura 3: Imagen del primer componente del TSA realizado con una máscara que comprende a la cuenca bajo estudio.....	36
Figura 4: Imagen del componente 1 del TSA realizado sobre una máscara restrictiva que incluye sólo a los pixeles de borde con 50 % o más de su área dentro de la cuenca.	37
Figura 5: Unidades homogéneas obtenidas a partir de una clasificación no supervisada del componente 1 del TSA. Unidades homogéneas: UH 1 - Sector SE (color amarillo); UH 2 - Sector Central (color azul) y UH 3 - Sector NW (color verde)	38
Figura 6: Componente 1 del TSA generado a partir de los valores máximos mensuales de la serie de imágenes de pixel 1,1 x 1,1 km (período 1992-1996), cuadro completo.	38
Figura 7: Componente.1 del TSA generado a partir de la serie de imágenes 1,1 x 1,1 con valores máximos mensuales utilizando una máscara de la cuenca.....	39
Figura 7a: Componente 1 del AST generado a partir de la serie de imágenes decádicas 1,1 x 1,1 utilizando una máscara de la cuenca.....	40
Figura 7b: Valores promedio de los pixeles de la serie 1 x 1km y de los pixeles de la serie 8 x 8 km de los componentes 1 del AST de cada serie.....	41
Figura 7c: Esquema con la denominación de las unidades homogéneas (UH) y de las superficies correspondientes a los pixeles (Px) de las imágenes de 8 x 8 km.....	42
Figura 8. Porcentajes de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas con respecto a la unidad homogénea 1 y de la cuenca.....	43
Figura 9. Porcentaje de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas con respecto de la unidad homogénea 2 y de la cuenca.....	44
Figura 10. Porcentaje de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas con respecto de la unidad homogénea 3 y de la cuenca.....	44
Figura 11. Mapa de suelos de la cuenca R. García-Lozada (Sanabria <i>et al.</i> , 1997).....	45
Figura 12. Promedios mensuales de NDVI para las diferentes unidades	

homogéneas de la cuenca. El mes 1 representa a Setiembre, inicio de la estación de crecimiento.....	53
Figura 13. Imagen del componente 1 del TSA realizado sobre la serie NOAA 1,1 x 1,1 km, utilizando los valores máximos mensuales; se superponen las clases de suelo de la cuenca.....	55
Figura 14: Precipitación anual (milímetros caídos entre Octubre y Setiembre para la serie 1981-2001. Datos promedio de las estaciones Pilar, Aeropuerto Córdoba y Observatorio Nacional.....	57
Figura 15: Desvíos de la precipitación estival (período Octubre-Marzo) respecto a su promedio, para la serie 1981-2000.....	57
Figura 16: Desvíos de la precipitación invernal (período Abril-Setiembre) respecto a su promedio, para la serie 1981-2000.....	58
Figura 17: Evolución de la vegetación leñosa (en %) a lo largo del período bajo estudio en las unidades homogéneas.....	60
Figura 18: Producción anual de cultivos estivales del Dpto. Santa María durante el período 1981-2001.	61
Figura 19: Producción anual de cultivos invernales del Dpto. Santa María durante el período 1981-2001.....	61
Figura 20: Valores anuales de NDVI de la cuenca, expresados como variaciones porcentuales respecto del promedio serial. Se presentan ciclos anuales, estivales (Noviembre-Abril) e invernales (Mayo-Octubre) de la serie 1981-2001.....	64
Figura 21. Coeficientes de variación (%) de los meses del año (ordenados de acuerdo al ciclo estival setiembre-agosto) de cada unidad homogénea.....	65
Figura 22: Evaluación de la sustentabilidad de las unidades homogéneas de la cuenca R. García-Lozada.....	75

I. INTRODUCCIÓN

Consecuencias ambientales de la agricultura convencional

Desde diferentes centros de decisión política y entidades no gubernamentales, se menciona una serie de razones que conducen a una visión cada vez mas crítica de la agricultura convencional, que se desarrolló en base a los principios de la Revolución Verde.

De manera general, el proceso agropecuario se encuentra en la actualidad relacionado con el deterioro de los recursos naturales renovables, el paulatino agotamiento de los recursos naturales no renovables, la afectación de la calidad y cantidad de la producción de alimentos y el agravamiento de problemas socioeconómicos (Francis y Youngberg, 1990; Viglizzo y Filippin, 1993; Di Pace, 1992). En nuestro país, las evidencias que demuestran tal realidad son numerosas.

En las últimas dos décadas, se produjo una marcada agriculturización de la región central del país, pasando la agricultura a abarcar de la mitad al 80% de la superficie total bajo uso agropecuario. Esto significó el desplazamiento de alrededor de 5 millones de hectáreas desde la actividad ganadera hacia la agrícola, lo cual se vio agravado con el avance del cultivo de oleaginosas (soja) en reemplazo de cereales como el maíz y el sorgo (Casas, 1985; Coscia, 1991).

Paralelamente, en las regiones marginales, se observó un desplazamiento de la frontera agropecuaria, con el consecuente desbosque de las tierras para afectarlas a la ganadería y la agricultura, a partir del *boom* de las oleaginosas en los '80 (Morello, 1995). Según datos del IFONA, de los 106 millones de ha cubiertos por bosques nativos en 1914, equivalentes al 39% de la superficie del territorio nacional, se pasó a alrededor de 35,5 millones de ha en 1987, que cubren el 14% de dicha superficie (PRODIA, 1999).

En la provincia de Córdoba, las solicitudes de aprovechamiento forestal (tala para obtener leña o carbón) en el período 1979-97 fueron de 139.234 ha. Entretanto, las solicitudes para desmonte (tala rasa para sembrar cultivos o pasturas) fueron de 388.619 ha (Kopta, 1999). Ambas áreas desmontadas representan el 3% de la superficie de la provincia.

Además de la disminución de la superficie cubierta por la vegetación natural, debe considerarse también su grado de fragmentación, ya que ésta modifica los procesos bióticos y abióticos. La fragmentación de bosques afecta las condiciones microclimáticas de los remanentes, la abundancia de algunas especies y sus interacciones biológicas, las que afectarán en última instancia a la biodiversidad existente en los bosques (Cantín *et al.*, 2003). Mac Arthur y Wilson (1967) establecieron que el patrón de abundancia de las especies requiere de un área mínima por debajo de la cual pelagra su supervivencia. Otros procesos como la productividad, la formación de detritus, la mineralización del humus, el movimiento de agua y nutrientes, la sucesión y la competencia, pueden ser también afectados por el tamaño, forma y conexiones de los fragmentos (Morello y Matteucci, 1997).

Esta disminución de la superficie ocupada por áreas naturales y la erosión de la base genética de las superficies remanentes, sumadas a la uniformización del material genético de los cultivos, contribuyeron a la pérdida de la biodiversidad.

En la región pampeana en general y en el área central del país en particular, la actividad agropecuaria continua, a partir de la colonización de fines del s XIX, provocó el descenso del porcentaje de la materia orgánica contenida en el suelo a menos de la mitad. Como una consecuencia del cambio de la estructura boscosa original y/o el excesivo laboreo, diferentes grados de intensidad de procesos erosivos, ocasionados por efectos hídricos y eólicos, afectan actualmente casi 50 millones de hectáreas, existiendo problemas de desertificación en toda el área semiárida argentina (Coscia, 1992).

Mediciones realizadas en el Núcleo Maicero muestran cómo la agricultura continua, que allí se desarrolla desde la década del '70, redujo el contenido de materia orgánica del suelo a valores incompatibles con la formación de agregados (menos de 2%), hizo descender el índice de estructura un 66% y el de percolación 62% y provocó una pérdida de suelos de 28 tn/ha/año (Morello y Matteucci, 1997).

Del total de la superficie de la provincia de Córdoba (16.600.000 ha), el 7% se encuentra afectada por erosión hídrica y el 15% por erosión eólica, abarcando entre ambas 4.740.000 ha (PRODIA, 1999). Marelli (1988) midió una disminución promedio de 5,5 cm del espesor del horizonte A dentro de la cuenca del río Carcarañá en un lapso de

28 años, lo que representó una pérdida anual de 25,5 toneladas/ha de suelo. Cisneros *et al.* (1997) evaluaron un nivel de deterioro próximo a los máximos posibles en varias propiedades físicas en suelos Haplustoles típicos del centro de Córdoba, luego de 80 años de uso agrícola, comparándolas con las del bosque natural.

Una de las zonas más afectadas por la erosión hídrica acelerada dentro de la provincia de Córdoba es la cuenca denominada Rafael García-Lozada (Sanabria *et al.*, 1997), situada a 15 km al Sur de la Capital, dentro del departamento Santa María. Luque *et al.* (1995) evaluaron allí la evolución de la cobertura boscosa entre 1962 y 1987 a partir de fotografías aéreas. Los relevamientos, realizados en una subcuenca de aproximadamente 4130 ha ubicada en el extremo NO de la mencionada cuenca, mostraron que la cobertura boscosa cayó en ese lapso de 39 % a 21 %. Otro relevamiento realizado sobre una microcuenca de menor tamaño, señala para el año 1994 una cobertura de vegetación permanente (bosque nativo e implantado y pasturas perennes) de 13% (Ruiz Posse, 1997 en Aoki, 2002). Por otro lado, numerosas evaluaciones realizadas en esta cuenca hidrográfica mostraron un marcado deterioro de diferentes variables físicas y biológicas del suelo bajo uso agropecuario, comparadas con las del bosque nativo (Aoki, 2002; Leguía *et al.*, 2004)

A mediados de los 90 se produce en la región central de Córdoba una acelerada adopción de la práctica de "siembra directa" debido a su efecto positivo en el balance hídrico, el control de la erosión y la disminución del costo de labores y uso de mano de obra (Gil y Garay, 2001). Por otro lado, la generalización de este sistema de cultivo aceleró los procesos de expansión agrícola y con ello, contribuyó a la homogeneidad territorial de la zona, no sólo en la configuración paisajística sino también en el manejo del suelo y las plagas (Leguía *et al.*, 2004).

Necesidad de un cambio de paradigma

En Argentina, todavía es incipiente la reacción de la opinión pública y de las organizaciones de productores ante esta problemática ambiental. Este aparente desinterés podría obedecer a causas económicas coyunturales que enmascaran el problema, como ocurrió con el bajo precio de los insumos agrícolas químicos y energéticos de importación de la última década, sujetos a rebajas arancelarias en un marco de cambio monetario fijo. Además, en algunos sectores relacionados con la

agricultura existe el convencimiento de que en el país no se implementaron todavía en su totalidad los mecanismos en los que se basó la Revolución Verde (Morello, 1995). Así, muchos de los problemas de fertilidad del suelo y de plagas serían solucionados con un incremento en la proporción de insumos que se utilicen. Esta opinión se sostiene a pesar de que se conoce que el costo de haber triplicado la producción mundial de granos entre 1950 y 1985 significó una degradación ambiental extensiva y una pérdida de recursos (Kidd y Pimentel, 1992).

Por otro lado, problemas ecológicos graves que están sufriendo sectores muy amplios de la región central del país, como la alteración del funcionamiento hidrológico, no son relacionados por la opinión pública y por los productores en general con el incorrecto manejo del suelo agrícola. Además, en países en vías de desarrollo como la Argentina, con historia reciente de alta inestabilidad política y económica y con una importante proporción de la población con necesidades económicas urgentes, no está arraigada la filosofía y la práctica de planificar para el mediano y largo plazo. Esto lleva, por ejemplo, a minimizar o no considerar la incertidumbre futura de poder seguir accediendo a fuentes de energía que sostengan a la agricultura convencional.

Como otros ejemplos de resultados de este enfoque reduccionista con que se desarrolló la agricultura convencional, se puede mencionar: el desconocimiento de los límites amplios espacio-temporales con que trabaja la agricultura (existencia de efectos a mediano-largo plazo y en el ámbito regional); la ignorancia de la necesidad de la subordinación de las leyes económicas a las ecológicas; el desconocimiento de las interacciones de tipo positivo o sinérgico entre los organismos, capaces de reducir la necesidad de controles externos.

No está de más decir que tal enfoque reduccionista o analítico no es negativo en sí mismo sino que se trata del complemento necesario de una visión holística, a la que debe servir para explicar los mecanismos que intervienen.

No obstante, la magnitud de los problemas ocasionados, sumados a otros de índole socio-económico, motivan una creciente toma de conciencia de los costos ambientales y sociales del paradigma predominante. Esto debería conducir a descubrir alternativas de producción que lleven a minimizar los costos externos (o externalidades), así como a una optimización del uso de los recursos.

Incorporación del concepto de sustentabilidad

A partir de la década del '80, florecieron marcos conceptuales, enfoques metodológicos y sistemas de producción rural que, con diferentes nombres, se cobijaron bajo los conceptos de *agricultura y/o desarrollo sustentables*. Estos contribuyeron a que el proceso de desarrollo agrario fuese visto en función de tres factores fundamentales: el económico, el socio-cultural y el ambiental (Farshad y Zinck, 1993; Yulong y Smit, 1994). Su consideración de manera integrada permite medir el proceso de desarrollo y el tránsito hacia la sustentabilidad (Ruttan, 1994; Francis y Youngberg, 1990).

Se encuentra en la bibliografía un espectro de definiciones y condicionamientos a su significado, a raíz de las continuas discusiones sobre este tema. Así, aparece dificultoso optar si el significado de *agricultura sustentable* debe basarse en una filosofía o una estrategia, proceso o producto, prácticas culturales específicas o enfoques de sistema. Se encuentran, desde posturas pragmáticas para las cuales "el término es significativo y provechoso solo en contextos específicos, cuidadosamente definidos" (Kidd y Pimentel, 1992), hasta intentos diversos de definiciones más o menos abarcativas.

Éstas, a su vez, pueden tratar en diferente grado las consecuencias de la agricultura sobre el ambiente y la salud humana, el uso en el largo plazo de los recursos no renovables, el nivel de productividad y la dimensión social, de acuerdo a la escuela de pensamiento en que esté enrolada.

Kidd y Pimentel (1992) abogan porque la sustentabilidad incluya el concepto de ***dinámica***, es decir que para un sistema determinado el criterio sustentable debe considerar el manejo de su inevitable cambio.

Una definición muy abarcativa dada por Francis y Youngberg (1990) considera que la agricultura sustentable es una filosofía basada en fines humanos y en el entendimiento de los impactos de nuestras actividades sobre el ambiente. Este fundamento filosófico guía la aplicación de la experiencia precedente y los últimos avances científicos para crear sistemas agrícolas integrados, equilibrados y conservadores de los recursos. Estos sistemas reducen la degradación ambiental, mantienen la productividad agrícola, promueven la viabilidad económica tanto en el

corto como en el largo plazo y mantienen estables a las comunidades rurales y su calidad de vida.

Elementos ambientales de la sustentabilidad

Dentro del **aspecto ambiental o ecológico** de la sustentabilidad se incluyen todos los factores físico-biológicos del sistema analizado. Entre las bases de la sustentabilidad ambiental se acuerda que el sistema de producción maximice tres atributos fundamentales: la *eficiencia*, la *productividad* y la *estabilidad* de su estructura y su funcionamiento (Sarandón, 2002a; Ghera *et al.*, 2002; Rasul, 2003). Dentro de estos atributos, la eficiencia es el concepto que puede considerarse como más ambiguo. En ecología se la ha relacionado ampliamente al flujo de la energía dentro del ecosistema; pero aquí se considera de manera más general, relacionada también a la circulación de la materia y, fundamentalmente, del agua. Así, para proporcionar las bases de un manejo sustentable del agroecosistema, se requiere del conocimiento tanto de su **estructura** como de su **funcionamiento**.

La estructura comprende a la organización de los componentes del agroecosistema, tales como el suelo y la vegetación. Condicionados estos por el clima y la geomorfología, determinan la **heterogeneidad espacial** de un territorio. El manejo agroecológico sustentable de ese territorio deberá basarse en el respeto a las singularidades expresadas por tal heterogeneidad. Por lo tanto, una manera práctica de organizar la gestión territorial es mediante la administración de unidades homogéneas, de semejante organización estructural, que aceptan similares prácticas. Para poder desglosar comprensivamente el problema de la sustentabilidad, es necesario reconocer el orden jerárquico de la naturaleza. Esto es, que existen niveles de organización cada vez más complejos y que contienen otros más simples y de los cuales dependen. Estos últimos, desde el momento que forman parte de un sistema mayor, se encuentran relacionados entre sí y determinan, con sus propiedades emergentes, al nivel superior (Jackson, 1984). Los patrones a nivel del paisaje o de la cuenca, por ejemplo, influyen el rango de condiciones que existen en escalas más detalladas, tales como subcuencas o fincas (Jones *et al.*, 1998). Además, los cambios causados por el hombre a escalas relativamente mayores (impactos acumulativos) pueden causar cambios significativos en el patrón o diseño del paisaje y en los procesos ecológicos (Solbrig y Morello, 1997; Walker y Reuter, 1998). Estos cambios

resultan luego en futuras limitaciones y afectan los recursos ecológicos en tales escalas. En otras palabras, el desconocimiento de la forma en que se organizan (y se interrelacionan) los componentes de los agroecosistemas es una de las razones fundamentales de los errores en el manejo de los recursos y los consecuentes problemas que trata de resolver la visión sustentable.

El segundo atributo, el funcionamiento, comprende la circulación del agua y los nutrientes y el flujo energético a través de los elementos del agroecosistema. La productividad primaria neta sintetiza acabadamente ese funcionamiento. La sustentabilidad, desde este punto de vista, debe basarse en el conocimiento y consideración de los niveles de productividad primaria neta y su **variabilidad temporal**. Al respecto, Ghera *et al.* (2002) señalan que el estudio del flujo de la energía y su dinámica permite hacer inferencias respecto de su estabilidad y la sustentabilidad del ecosistema. Los niveles de producción y la estabilidad dentro de los agroecosistemas están relacionadas con los servicios naturales provistos por los ecosistemas (tales como el ciclado de los nutrientes, el suministro de agua, enemigos naturales de plagas y enfermedades) los cuales no solamente dependen del total de productividad primaria neta total (determinada por el flujo de la energía) sino también de cómo mucha de esta energía permanece en el sistema para sostener los niveles tróficos nativos o naturalizados luego de la cosecha (Cleveland, 1995). Si estos servicios se ven reducidos o no existentes respecto del sistema original, los subsidios de energía en la forma de ingresos de fertilizantes, plaguicidas, herbicidas y genotipos mejorados deben ser usados para compensarlos. (Halberg, 1999).

Indicadores de sustentabilidad de sistemas agropecuarios

En la vida diaria, se usan diversos tipos de indicadores para diferentes propósitos. En cambio no presentan la misma disponibilidad, indicadores que permitan observar y seguir la situación del medio ambiente, el impacto y las consecuencias de los procesos de desarrollo sobre los recursos naturales, las funciones ecológicas e interrelaciones entre los diferentes factores del desarrollo.

El término “indicador” suele ser usado en más de un sentido por las distintas ciencias o disciplinas. Se lo define como “una variable cuyo propósito es medir un cambio en un determinado fenómeno o proceso”, y es percibido como un instrumento analítico

que facilita la medición de los cambios que experimenta un sistema (Glave y Escobal, 1995).

En la actualidad, los **indicadores ambientales** e **indicadores de sustentabilidad** reciben una atención creciente, sobresaliendo como herramientas indispensables para el seguimiento y la definición de las políticas, acciones y estrategias de desarrollo sustentable y el análisis de sus costos y beneficios (Sarandón, 2002b; Winograd, 1995; Soriano, 1992). En el capítulo 40 (Información para la Toma de Decisiones) de la Agenda 21 de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED-92), que condujo a gestar un consenso general acerca de la necesidad de un desarrollo sustentable, se hace un llamado para la generación de los indicadores correspondientes. A partir de allí, varios grupos de investigación trabajan intensivamente en la formulación de un marco de evaluación de la sustentabilidad, que sea operativo y sencillo en sus aplicaciones prácticas (International Institute for Sustainable Development, 1997; Sarandón, 2002b; Winograd, 1995; Neave *et al.*, 1995; EPA, 1994).

Cáceres (2004) considera que los indicadores de la sustentabilidad son un conjunto de atributos físico-biológicos y socioeconómicos que permiten medir estados o procesos de una realidad determinada. Define como "estado" al conjunto de atributos que caracterizan la situación actual de un sistema determinado, mientras que como "proceso" se refiere a los cambios que observan los atributos de los sistemas a lo largo de determinadas series temporales. Al respecto, de acuerdo a Rasul (2003), aunque no es posible acceder a mediciones precisas de la sustentabilidad en la agricultura, puede registrarse si se mantienen regulares ciertas tendencias a crecer o disminuir. En la revisión que hacen los dos autores antes citados, coinciden en destacar el concepto de que los indicadores de la sustentabilidad presentan un elevado grado de dependencia de las características biofísicas y socioeconómicas locales y en ese sentido, deben generarse o adaptarse de acuerdo al caso bajo estudio

Viglizzo (1996) diferencia entre *medidas* e *indicadores* de sustentabilidad. Una "medida" es un instrumento de evaluación preciso, bien definido y a menudo complejo. Un "indicador", en cambio, es un instrumento de evaluación muy correlacionado con la medida, pero fácil de observar o registrar y sencillo de entender. Tanto en las medidas como en los indicadores es necesario identificar **atributos** y **clases**. Los atributos a

evaluar pueden ser físicos, agronómicos, ecológicos, económicos y socio-culturales. Las clases expresarán tanto la condición o estado actual, como la tendencia de cada uno de los atributos evaluados.

En general, los indicadores se elaboran para cumplir con las funciones de simplificación, cuantificación, análisis y comunicación, permitiendo entender fenómenos complejos, haciéndolos medibles y comprensibles. De manera tal, pueden ser analizados en un contexto dado y comunicarse a los diferentes niveles de la sociedad (Winograd, 1995).

Los indicadores deben ser seleccionados de acuerdo con un conjunto de criterios que se pueden resumir en tres grupos básicos: 1) confiabilidad de los datos; 2) relación con los problemas y prioridades y 3) utilidad para el usuario (Winograd, 1995; Sarandón, 2002b).

Según Glave y Escobal (1995), las estrategias que se han usado para identificar y seleccionar en general a indicadores de la sustentabilidad son:

- A partir de una aproximación intuitiva (subjetiva)
- A partir de un menú construido sobre la base de la experiencia previa
- A partir de un modelo causa / efecto o de una aproximación analítica

El indicador debe estar relacionado con el nivel jerárquico del sistema que se esté evaluando. Así, Ghera *et al.* (1998), Walker y Reuter (1998) y Soberón *et al.* (2000) analizan distintos indicadores de la sustentabilidad a diferentes niveles, como el poblacional y genético, el comunitario, el ecosistema y el paisaje.

Muchos de los indicadores que se necesitan para valorar la condición y la tendencia en la salud del paisaje pueden ser colectados mediante relevamiento directo de campo, como así también a partir de la teledetección.

El objetivo de los indicadores, de simplificar la realidad compleja de la sustentabilidad, exige que los resultados puedan ser expresados de manera sencilla y clara. Una forma de hacer esto es a través de su representación gráfica en un diagrama tipo tela de araña, ameba o cometa, como señalan varios autores (Sarandón, 2002b; Astier *et al.*, 2002). Esta representación gráfica tiene la ventaja de sintetizar mucha

información y permitir la visualización de los puntos críticos y la distancia entre el sistema real y el que se define como ideal.

La calidad del suelo como indicador

Como es sabido, el suelo no es un objeto inanimado sino una entidad dinámica, semejante a un organismo viviente, que funciona en una forma holística, dependiendo de sus condiciones o estados (Doran *et al.*, 1996; Lal, 1994).

La calidad del suelo ha sido definida como la capacidad que tiene éste para producir cultivos saludables, resistir la erosión y reducir el impacto del estrés ambiental sobre las plantas. La calidad del suelo describe cómo efectivamente un suelo acepta, retiene y libera nutrientes y agua, promueve y sustenta el crecimiento radicular, mantiene favorablemente el hábitat biótico, responde al manejo y resiste la degradación (Karlen y Stott, 1994).

La calidad del suelo puede ser vista en términos de su óptimo funcionamiento en un ecosistema, de manera semejante a cómo es vista la calidad del agua desarrollando funciones ecosistémicas en una cuenca. El concepto, entonces, no se refiere a su capacidad para diferentes usos, sino a si sus funciones son óptimas dentro de los límites de la ecorregión específica.

De acuerdo a Warkentin (1995), algunas de estas funciones ecológicas incluyen:

- (a) el reciclado de materiales orgánicos en el suelo para liberar nutrientes para la futura síntesis dentro de materiales orgánicos nuevos;
- (b) la partición de la lluvia en la superficie del suelo en escurrimiento e infiltración;
- (c) el mantenimiento de diversidad de hábitats, de tamaños de poros, de superficies y presión de agua y gas;
- (d) el mantenimiento de la estabilidad de hábitats, incluyendo una estructura estable, la resistencia a la erosión del viento y del agua y la amortiguación del hábitat ante los cambios rápidos de temperatura, de humedad y de concentración de materiales potencialmente tóxicos
- (e) el almacenamiento y liberación gradual de nutrientes y agua.

Diferentes métodos de valoración de la capacidad productiva de las tierras han sido utilizados en el ámbito agropecuario desde la década del '30. Así por ejemplo, el Índice de Productividad Edafo-Climatológico (Nakama y Sobral, 1987) podría ser considerado un *indicador de la calidad del suelo*, ya que para su cuantificación intervienen varios de los parámetros que hacen a su función ecológica. Este valor indicador debe ser relativizado, debido a que varios de estos parámetros se refieren a factores permanentes o estructurales.

Este índice, al sintetizar numerosas variables que determinan la calidad del suelo, permite relacionar esta información edafológica con otra, también sintética, que proviene de la información que brinda la vegetación.

La vegetación como indicadora del ambiente

El conocimiento de la estructura de la vegetación es necesario por su importancia como subsistema fundamental del sistema ecológico, ya sea como captadora y transformadora de energía solar, puerta de entrada de la energía y de la materia a la trama trófica, almacenadora de energía y proveedora de refugio de la fauna, agente antierosivo del suelo, regulador del clima local, reductor de la contaminación atmosférica y del ruido, fuente de materia prima para el hombre, fuente de bienestar espiritual y cultural, por su valor estético, recreativo y educativo. Así, numerosos autores (Altieri, 1995; Morello y Matteucci, 1997; Ghera *et al.*, 1998) postulan que el estado o condición en que se encuentra la vegetación nativa o implantada de una región está directamente relacionado con el funcionamiento del sistema.

Por ser la vegetación el componente más fácilmente reconocible del ecosistema, se emplea con frecuencia para delimitar unidades ecológicas homogéneas. A este respecto, los estudios de la vegetación se centran en la clasificación de los tipos de vegetación y su cartografía; es decir, se la usa para identificar y definir los límites de sistemas ecológicos o de zonas uniformes de una región. Sirve así como marco para la planificación de actividades productivas o de investigación basadas en unidades geográficas, y para la extrapolación de los resultados de investigaciones o acciones puntuales a toda la unidad homogénea y a todas las zonas de características similares.

En los estudios de regionalización ecológica con propósitos de planificación y de gestión del ambiente, se suele emplear la vegetación como herramienta por varias razones: es sensible a la variación de los factores ambientales, es sencilla de estudiar y, por último, su comportamiento está vinculado directamente a la productividad de la tierra, por lo que da una idea clara de su potencialidad (Matteucci y Colma, 1982).

En ecología, agricultura y silvicultura, es importante la aceptación de los “indicadores biológicos”. Se trata de organismos que con su presencia, abundancia (o ausencia), o con algunos de sus procesos fisiológicos, denotan características del medio (González Bernaldez, 1981). Las comunidades vegetales son el resultado de la acción conjunta e integrada de los factores del ambiente. Su estructura y funcionamiento reflejan el conjunto interactuante de factores ambientales. De esta manera, la vegetación ha sido usada históricamente como indicadora de distintos factores ambientales, ya que sintetiza diferentes parámetros del ecosistema (Matteucci y Colma, 1982).

Las respuestas de las poblaciones cultivadas frente a las diferentes situaciones ambientales pueden ser utilizadas también como indicadores de estas últimas. Así por ejemplo, De Fina (1992) utiliza diferentes cultivos como indicadores de la aptitud agrícola del clima. Primavesi (1982), en diferente escala de percepción, analiza la capacidad indicadora de la calidad del suelo que poseen las especies adventicias, en sistemas bajo cultivo. Dentro del contexto agrícola, el registro temporal de los niveles de producción de los cultivos se ha usado para calcular indicadores de diferentes aspectos de la sustentabilidad ambiental, como, por ejemplo, estabilidad (Viglizzo *et al.*, 2002, Berzseny, 2000), productividad (ILEIA, 1991, Ghersa *et al.*, 2002) y eficiencia (Pimentel *et al.*, 1983; Viglizzo, 1983)

Información satelital de la vegetación

La teledetección es una técnica que se basa en la captación de la energía electromagnética reflejada por los objetos situados en la superficie terrestre, para su posterior estudio. La teledetección incluye técnicas de observación convencionales, como la fotografía aérea y en la actualidad el término se centra en el análisis de datos procedentes de satélites de observación de la Tierra (Chiuveco, 1999).

Actualmente, existe una variedad muy amplia de sistemas satelitales. Dentro de los llamados sensores remotos pasivos, se encuentran los correspondientes a los satélites meteorológicos NOAA, de órbita casi polar helio sincrónica, equipados con el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), de dos bandas en el espectro visible y tres infrarrojas, con una resolución espacial de 1,1 km y una frecuencia temporal de 24 horas. Otro sistema de ese género, el sistema LANDSAT, cuenta con los sensores TM (Thematic Mapper) y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), con 7 canales espectrales el primero (30 m de resolución) y el agregado de una banda pancromática en alta resolución el ETM+, con una definición de 15 m. Los satélites LANDSAT tienen una frecuencia de paso de 18 y 16 días, respectivamente.

Debido a su resolución temporal, las imágenes del satélite NOAA son las más indicadas para el monitoreo de la vegetación, con limitaciones en cuanto a la resolución geométrica, pero con un nivel de detalle suficiente para efectuar seguimientos regionales. Se dispone gratuitamente de las series temporales de imágenes NOAA AVHRR, aunque con una resolución de 8 x 8 km.

Se han desarrollado diversas técnicas para estudiar cualitativa y cuantitativamente el estado de la vegetación a partir de medidas espectrales obtenidas por satélites (Karszenbaum, 1998).

Con la finalidad de estandarizar las mediciones referidas al valor de la vegetación, se han definido los llamados **índices de vegetación**. Los índices de vegetación son el resultado de combinaciones de bandas espectrales de sensores satelitales para realzar las características de la vegetación, atenuando la señal correspondiente a otros factores como el suelo, la iluminación, etc.

En las imágenes multiespectrales de satélite la vegetación puede ser distinguida de otros materiales gracias al fenómeno de absorción de energía lumínica que presenta en los sectores rojo y azul del espectro. En el sector externo de la hoja verde se encuentran los cloroplastos, cuyo contenido de clorofila hace que los pigmentos de ésta presenten un rango de absorción centrado aproximadamente en los 0,65 µm (el rojo, del visible) pero que incluye también al azul, que es también absorbido. El infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,0 µm) es reflejado, ya que en la interfase con las células esponjosas de la hoja, ubicadas en el interior o en la parte posterior de la hoja, hay aire, lo que hace que aparezcan brillantes (fuerte reflectancia) en esta banda (Abril, 2001).

El NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*), o índice normalizado de vegetación (Yates, 1984), se obtiene al contrastar la información que brinda la reflectancia en los ámbitos del visible y el infrarrojo cercano. Empleando la información del sensor AVHRR, significa combinar las bandas cuyo ámbito de longitud de onda se encuentra comprendida entre los 0,58 – 0,68 micrones (NOAA - AVHRR Visible, canal 1) y los 0,725 – 1.0 micrones (NOAA - AVHRR Infrarrojo Cercano, canal 2).

$$\text{NDVI} = (\text{Canal 2} - \text{Canal 1}) / (\text{Canal 2} + \text{Canal 1})$$

El intervalo de valores del NDVI varía entre -1 y 1 y sólo los valores positivos corresponden a zonas de vegetación, comprendidos entre 0,1 y 0,6. Los valores más elevados se encuentran asociados a mayor densidad de vegetación y verdor de la planta.

Los valores negativos, generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y afloramientos rocosos.

El NDVI es afectado por la dispersión de la energía reflejada como resultado de la participación del polvo en suspensión y la nubosidad graneada, por ejemplo.

Sobre la base de este tipo de información, se han desarrollado numerosas modificaciones, como d-NDVI (delta NDVI) (Henricksen y Durkin, 1978, en de la Casa 2001), Derivada del NDVI (Di Rienzo, 1995), ICV (Índice de Condición de la Vegetación) (Kogan, 1995, en Seiler *et al.*, 1998).

Se desarrollaron, además, modelos para la descripción cuantitativa y cualitativa de la productividad primaria a partir de datos satelitales (Jouve y Paruelo, 1999; Ghersa *et al.*, 2000). Se estudió también la relación entre los datos climáticos y espectrales para analizar tipos funcionales de vegetación, tanto en comunidades de pastos y arbustos en Norte América (Paruelo y Lauenroth, 1998), como en la estepa patagónica (Paruelo *et al.*, 1998 a y b).

La utilización de los datos satelitales para el monitoreo de la vegetación está generalmente limitada por problemas de submuestreo tanto en el espacio como en el tiempo. Las imágenes NOAA-AVHRR son los únicos productos satelitales disponibles para estudios retrospectivos a largo plazo, con una frecuencia de muestreo suficiente como para seguir los cambios rápidos de la vegetación. Los archivos conteniendo datos AVHRR de composiciones temporales cada 10 días están disponibles a partir de comienzos de los '80s. Con respecto a estos datos, actualmente se tiene acceso libre a una serie LAC de resolución 1,1 x 1,1 km pero de relativamente corta duración (Land Processes Distributed Active Archive Center USGS, 2003) y otra serie GAC que, si bien tiene una resolución 8 x 8 km, ofrece una extensión temporal de 20 años (NASA, 2003).

Las imágenes NOAA-AVHRR han sido ampliamente utilizadas para estudios globales y de grandes áreas, debido a su bajo costo y su alta resolución temporal. Los datos de NDVI calculados a partir del sensor AVHRR son los productos más comúnmente usados en los estudios de cobertura vegetal en escalas globales y de grandes áreas (Dymond *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 1995). No obstante, ha sido puesta poca atención en la aplicación del NDVI en el monitoreo de la cobertura a nivel paisaje, debido a su gruesa resolución espacial. La mezcla de clases que esto origina es la principal razón para la baja precisión de estas clasificaciones (Cihlar *et al.* 1996, Gutman e Ignatov, 1995). Esto ha alentado estudios sobre posibles métodos para integrar datos con diferentes resoluciones espaciales, los que han tenido diferentes grados de éxito. Muchos de estos estudios fueron orientados a compatibilizar las características espaciales y temporales utilizables de los datos adquiridos de diferentes sistemas, tales como LANDSAT Thematic Mapper (TM) y NOAA-AVHRR, con sus diferentes productos (Maselli *et al.*, 1998; Maselli, 2004; Kerdiles y Grondona, 1995).

En una revisión bibliográfica sobre las aplicaciones del NDVI, Paruelo (2004), justifica el uso de las imágenes NOAA-AVHRR para el monitoreo a nivel paisaje, con aplicación satisfactoria en escalas regional o local, a través de dos aspectos. Por un lado, se han comparado favorablemente las composiciones de NDVI máximo con las obtenidas por otros satélites de mayor resolución espacial; también algunas variables derivadas del NDVI fueron relacionadas con aquellas basadas en datos satelitales de alta resolución espacial. Por otro lado, se pueden desarrollar procesos estadísticos a partir de series multitemporales de NDVI AVHRR para identificar diferentes tipos de vegetación y brindar información ecológica relevante en escalas más finas.

Existen, asimismo, referencias bibliográficas sobre la utilización exitosa de imágenes NOAA-AVHRR para la determinación primaria de los relativamente pequeños parches producidos en la vegetación por la acción de incendios (Barbosa *et al.*, 1999; Fernandez *et al.*, 1997).

HIPOTESIS Y OBJETIVOS

Este trabajo se propone indagar sobre la experiencia acumulada en indicadores ambientales obtenidos a partir del uso de datos de sensores remotos, aplicándolos a un caso concreto sobre el cual se dispone de suficiente información tanto documental como de campo, con la finalidad de evaluar el recurso y ampliar la base experimental, en un tema en el que localmente hay pocas experiencias.

Hipótesis

- Los grados relativos de sustentabilidad pueden ser evaluados usando a la vegetación como indicadora, relevándola a través de sensores remotos.
- El NDVI de una región bajo uso agrícola es indicativo de la heterogeneidad espacial del sustrato.
- El análisis de series temporales de NDVI permite detectar patrones de diferente sustentabilidad ambiental.

Objetivo General

Se propone evaluar de manera comparativa la sustentabilidad ambiental de diferentes ambientes agrícolas de una región, utilizando la vegetación como un indicador dinámico de tal condición.

Objetivos Particulares

- Evaluar e interpretar los cambios temporales y la heterogeneidad espacial de un territorio usado para actividades agrícolas, a través de información satelital de acceso público
- Ensayar diferentes indicadores de estas variaciones temporales y espaciales, a partir de la información suministrada por la vegetación
- Investigar correlaciones entre los indicadores ensayados y las características físicas y biológicas del territorio
- Ensayar y evaluar un procedimiento metodológico para la realización de estos análisis

II. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Caracterización del área de estudio

1.1 Ubicación

En este estudio se analiza la cuenca denominada "Rafael García-Lozada" (Sanabria *et al.*, 1997), localizada en el departamento Santa María, a unos 35 Km al Sur de la ciudad de Córdoba, al Este de la ciudad de Alta Gracia, entre los 31° 30` y los 32° 00 de Latitud Sur, y los 63° 30` y 64° 30` de Longitud Oeste, aproximadamente (Figura 1).

1.2 Caracterización física

Esta cuenca tiene una extensión de 350 km², aproximadamente, y con la excepción de los espacios ocupados por urbanizaciones, infraestructura vial y ferroviaria, el uso actual de la tierra es para producción agrícola y, en menor medida, agrícola-ganadera y ganadera, realizada sobre fragmentos de bosques nativos e implantados.

Los materiales geológicos de superficie corresponden en su mayor extensión a una cubierta limo-loésica, que alterna con depósitos que conforman un complejo fluvio-eólico ligado a paleoclimas desérticos y semi-desérticos y a los paleocauces del río Xanaes y sus tributarios, además de materiales fluviales de piedemonte, de carácter torrencial, que se presentan como relictos de antiguos conos aluviales (Sanabria *et al.*, 1997).

La cuenca Rafael García-Lozada se ubica en la sub-región geomorfológica denominada **plataforma basculada**, que corresponde a la región designada como Llanura Oriental de Córdoba (Capitanelli, 1979).

Según Sanabria *et al.* (1997), en esta sub-región se distinguen las siguientes asociaciones: una **planicie ondulada**, que domina a una **planicie deprimida o central**, una **planicie fluvio eólica** y formas aisladas asociadas a relictos de **paleoconos** sobre elevados por neotectónica, ubicados en el borde occidental de la

cuenca. La **planicie ondulada** se presenta como paisaje dominante ocupando los bordes oeste y norte de la subcuenca conformada por lomadas elongadas en dirección NW-SE. Las pendientes medias están comprendidas dentro del rango de 1 a 3% y los desniveles son de alrededor de 12 m. Hacia el Oeste el paisaje de planicie ondulada se asocia a un bloque profundo del basamento cristalino sobreelevado por efecto de la prolongación sur de la falla regional de rumbo N-S "La Calera - Mal Paso" y basculado hacia el Este, que oficia como borde oriental de la depresión periférica, al pie de sierra. La **planicie central** configura un plano uniforme de inclinación regional NO-SE con pendientes medias inferiores al 0,5% y desniveles mínimos. Este paisaje, en forma gradual e imperceptible desde el punto de vista morfológico, se integra hacia el sur con la planicie aluvial actual del río Xanaes y hacia el este con la planicie fluvio-eólica.

La dinámica del escurrimiento superficial se organiza recién en el paisaje de la planicie ondulada. Tal organización comienza con una modalidad de carácter *mantiforme* que pasa a *difusa* y *pseudo-concentrada* en los bajos, para desaguar finalmente en corrientes muy poco jerarquizadas en la planicie central, como pequeños cursos que desembocan en los paleocauces de río Xanaes. Estos actúan como colectores principales ocasionales de la escorrentía.

De acuerdo con la clasificación de Vázquez *et al.* (1979), hidrológicamente, la zona en estudio forma parte de la llamada *pendiente oriental* y, dentro de ésta, corresponde a los pequeños sistemas dispersos que aportan directa o indirectamente a la depresión de Mar Chiquita. Está desvinculada de la vertiente oriental de las Sierras Chicas de Córdoba, representando un sistema enteramente desarrollado en la *planicie loésica* y que integra la cuenca del Río Primero o Suquía. Este hecho determina el régimen de escurrimiento marcadamente temporario que presenta, ya que actúa sólo como colectora de las aguas pluviales locales.

Para Vázquez (1979) los suelos de la *plataforma basculada* corresponden al Dominio de las *planicies orientales* y, dentro de éste, a la Asociación 6, que resulta conformada por "complejos de suelos Brunizems regosólicos, integrados a Castaños; enterrados; regosoles y salino-alcalinos". Este autor los considera suelos moderadamente profundos, con escurrimiento superficial medio y buen drenaje interno.

Según la Carta de Suelos de la Provincia de Córdoba escala 1:500.000, del Atlas de Suelos de la República Argentina (Jarsún *et al.*, 1989), los suelos del área representan un Complejo de Haplustol éntico franco arenoso y se relaciona con lomas y pendientes, y de Natracualf típico franco arenoso, predominantemente en las hoyas. Más al Este aparece una Asociación de Haplustol éntico, franco arenoso propio de las lomas; Haplustol típico ligeramente salino en las lomas suaves y pendientes y Natralbol típico en las hoyas y depresiones. En la porción más sudoccidental de la cuenca se describe una Consociación de Haplustol típico, severamente erosionado y relacionado con pendientes pronunciadas.

El área bajo estudio no se encuentra comprendida en el mapa de detalle de suelos de la provincia (escala 1:50.000), por lo que en este trabajo se usa la caracterización realizada por Sanabria *et al.* (1997), cuyas unidades cartográficas tomaron como base la caracterización geomorfológica y fueron clasificados por ese autor como pertenecientes a los órdenes Molisoles y Entisoles. Los primeros dominan en el área, y, dentro de estos, los Argiustoles típicos son los más importantes. Sus características varían fundamentalmente de acuerdo a las geoformas y a los materiales constitutivos. Excepto en aquellos lugares en donde el CO_3Ca está en superficie, los suelos del área son todos ácidos. Cartográficamente, presentan la particularidad de constituir complejos según fases de erosión.

La erosión hídrica acelerada es un proceso degradante que alcanza aquí gran intensidad. Los procesos más importantes que se describen en Sanabria *et al.* (1997) son erosión areolar (arroyada difusa) y lineal (surcos y, en mucho menor proporción, cárcavas). Los *mallines* se presentan en forma generalizada, pero con una concentración muy evidente en la planicie con drenaje entrelazado, en los paleocanales. La susceptibilidad a la erosión hídrica de los distintos tipos de suelo de la cuenca fue calificada como de nivel 4 (altamente susceptibles) y 5 (de muy elevada susceptibilidad), dentro de la escala de seis categorías de Van Zuidan y Cancelado (1980).

En la clasificación de Capitanelli (1979), corresponde climáticamente al “dominio semi-seco con tendencia al semi-húmedo”. Este dominio abarca gran parte de la llanura oriental y del piedemonte. Térmicamente, se define como mesotermal, con temperaturas medias anuales que varían entre 17° C y 18° C de Sur a Norte,

respectivamente. Las precipitaciones disminuyen con la longitud, desde 900 mm al Este hasta 600 o 700 al Oeste. La región de este estudio queda comprendida dentro del “Subdominio con gran déficit de agua (100 a 200 mm)” y del tipo climático conocido como “con invierno térmico”, correspondiendo al área en cuestión la variedad Pilar.

Precisamente, los datos estadísticos de la estación Pilar, son los siguientes:

Variable climática	Valor Estadístico
Temperatura máxima media anual	23,6° en enero
Temperatura mínima media anual	9,6° en julio
Período de máximas precipitaciones	561 mm (octubre – marzo)
Evapotranspiración potencial	540 mm (octubre – marzo)
Período de mínimas precipitaciones	129 mm (abril – septiembre)
Evaporación potencial	293 mm (abril – septiembre)

Si bien en la actualidad la vegetación nativa ha desaparecido casi por completo, debido al uso agrícola y ganadero de la tierra, la vegetación original correspondía a lo que Luti *et al.* (1979) describieron como *vegetación de la llanura*, de la *zona del espinal*, íntegramente comprendida en el “distrito del algarrobo” de Cabrera (1976).

El algarrobo (*Prosopis alba*, *P. nigra*) domina el estrato arbóreo, acompañado por otras especies, como: chañar (*Geoffroea decorticans*), tala (*Celtis tala*), sombra de toro (*Jodina rhombifolia*), tusca (*Acacia aroma*) y atamisqui (*Atamisquea emarginata*). El estrato arbustivo se compone de espinillo (*Acacia caven*), moradillo (*Schinus bumelioides*, *S. fasciculatus*), tala churqui (*Celtis pallida*), palo amarillo (*Alaeyisia gratissima*), albarillo (*Ximenia americana*), diversas especies de *Lycium*, duraznillo negro (*Cestum parqui*), carquejilla (*Baccharis articulata*), poleo (*Lippis turbinata*) y numerosas trepadoras. El pastizal, que alterna con el bosque o que se encuentra salpicado de especies leñosas como una sabana arbolada, presenta como gramíneas más conspicuas: *Cenchrus myosuroides*, *Sporobolus pyramidatus*, *Aristida adscensionis*, *A. mendocina*, *Eragrostis lugens* y diversas especies de los géneros *Setaria*, *Trichloris*, *Chloris*, *Stipa*, *Poa*, *Bromus*, *Botriochloa*, *Festuca*, *Panicum*, *Paspalum* y *Boutelowa*.

2. Fuentes de información utilizadas

La información cartográfica empleada consistió en las correspondientes hojas del Instituto Geográfico Militar: Alta Gracia, Toledo, Despeñaderos y Cosme, escala de 1:50.000 (fechas de edición, entre 1971 y 1974). A partir de estas, se dispuso de información topográfica y de los primeros datos de la vegetación leñosa.

Se trabajó con dos series de fotografías aéreas. La primera corresponde al vuelo de 1970, realizado en escala 1:20.000 empleándose fundamentalmente para apoyar la interpretación en escala menor. La otra serie aerofotográfica utilizada corresponde al vuelo de 1987. Las fotografías se encuentran en este caso en escala 1:50.000. Se las utilizó para georreferenciación y para la evaluación de la vegetación nativa de esas fechas.

Específicamente de la cuenca bajo estudio, se dispuso de la información básica referida a Geomorfología, Suelos, Geología y Erosión, proveniente del estudio de Sanabria, *et al.* (1997).

A falta de una información más detallada sobre la actividad agropecuaria en la cuenca, se recurrió a la información referida a los cultivos realizados en el departamento Santa María para el período analizado (1981-2001) y consistió en la base de datos de *Estimaciones agrícolas* provenientes de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Alimentos de la Provincia de Córdoba. Se trata de información anual referida a superficies sembrada y cosechada y rendimientos por hectárea y total de los principales cultivos estivales e invernales del departamento, manifestando el uso actual e histórico de la tierra y la importancia de los diferentes cultivos.

Con respecto a la información climática, al no disponerse de información local, se trabajó con los datos de precipitaciones mensuales del período 1981-2001 de las estaciones Pilar, Observatorio Meteorológico y Aeropuerto Córdoba, promediándose los valores, con la finalidad de hacerlos más representativos de la realidad del sector.

Se contó con imágenes digitales de NDVI obtenidas de información de dominio público de Internet. Se trabajó con dos tipos de imágenes del satélite NOAA, sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

La primera correspondió a una serie de imágenes decádicas de resolución 1,1 x 1,1 km. (Land Processes Distributed Active Archive Center, 2003). La serie disponible, comprendiendo tres imágenes mensuales, fue la siguiente:

Año	Meses
1992	Abril a Diciembre
1993	Enero a Setiembre
1995	Febrero a Diciembre
1996	Enero a Mayo

Esta base contiene un total de 93 imágenes. A partir de estas imágenes decádicas se calcularon **imágenes NDVI de valores máximos mensuales**.

El segundo tipo de imágenes empleadas en el trabajo correspondió a una serie de imágenes mensuales NOAA de resolución 8 x 8 km (NASA, 2003). Esta serie, luego de depurarse de imágenes defectuosas, fue la siguiente:

Años	Meses
1981	Ago - Nov - Dic
1982 a 1993	Completos
1994	Enero a Marzo
1995 a 2000	Completos
2001	Enero a Marzo

El procesamiento de las imágenes fue efectuado mediante el Programa Idrisi 32 Release 2 (Eastman, 2001), contándose con equipamiento PC adecuado y software complementario.

3. Procesamientos realizados

La estrategia empleada para el procesamiento de la información, con la finalidad de cubrir con los objetivos planteados, se puede resumir en la secuencia que se presenta a continuación.

- 3.1. Georreferenciación de las imágenes
- 3.2. Identificación de las Unidades Homogéneas, a través del análisis temporal y espacial de imágenes NDVI de pixel 8 x 8 km
 - 3.2.1. Comprobación del grado de ajuste entre las series 8 x 8 y 1 x 1 km
 - 3.2.2. Modelo estadístico para la comparación de las UH
- 3.3. Caracterización de la estructura física y biológica de las Unidades Homogéneas
 - 3.3.1. Sistematización de la Información fisiográfica
 - 3.3.2. Cálculo del Índice de Productividad Edafo-Climatológico
 - 3.3.3. Análisis de la precipitación
 - 3.3.4. Evaluación espacial y temporal de la superficie boscosa de la cuenca
 - 3.3.5. Evaluación de la vegetación cultivada, a través de:
 - a) Análisis de la serie de resolución 8 x 8 km
 - b) Cálculo de la productividad primaria neta aérea a partir de las imágenes de NDVI
 - c) Ritmo de crecimiento
 - d) Cálculo del Índice de Diversidad de los cultivos
 - e) Modificaciones en el manejo tecnológico de los sistemas de producción
- 3.4. Uso del NDVI como indicador de la heterogeneidad espacial y temporal, a través de las siguientes relaciones:
 - 3.4.1. Relación entre NDVI y precipitación
 - 3.4.2. Relación entre NDVI y el índice de productividad del suelo
 - 3.4.3. Relación entre NDVI y estadísticas de cultivos del Departamento
- 3.5. Prueba de otros indicadores basados en el NDVI
- 3.6. Evaluación de la sustentabilidad ambiental

3.1. Georreferenciación de las imágenes

El manejo de imágenes de baja resolución geográfica trae aparejados serios problemas en cuanto a su georreferenciación. Así, la certeza de la correspondencia de los pixeles de la imagen con el lugar geográfico al que pertenecen tales valores, se presenta como uno de los inconvenientes iniciales a resolver en la primera fase de los estudios.

Para solucionar a satisfacción el problema de la correspondencia geográfica de los datos espectrales se procedió al empleo de imágenes complementarias LANDSAT ETM+ de épocas coincidentes con las escenas NOAA proveedoras de las series temporales de datos empleadas en este estudio. Así, la sobreposición de los compuestos NDVI de estos productos de alta resolución geográfica sobre muestras geo-referenciadas de épocas de contraste, permitió el empleo de puntos singulares de la geografía de la comarca para ajustar la latitud y longitud de tales escenas y, con ello la de las máscaras de corte.

El proceso se efectuó con escenas LANDSAT de diferentes épocas, recurriéndose a la mayor definición de la banda pancromática (banda 8, visible).

3.2. Identificación de las unidades homogéneas (UH)

La determinación de las unidades homogéneas se efectuó a partir del análisis de imágenes mensuales 8x8 km. Se confeccionó luego una *máscara* delimitando la superficie de la cuenca en las imágenes de la serie. Se practicó un análisis de series temporales (AST) sobre ambas series de imágenes. La salida gráfica consiste en un conjunto de imágenes de componentes principales estandarizados, indicativas de los patrones espaciales de los principales elementos de variabilidad a lo largo de la serie. La salida temporal consiste en un conjunto de gráficos de *loadings*, producidos para cada componente mostrando, en este contexto, la correlación (eje Y) entre esa imagen componente y cada una de las imágenes originales (eje X) (Eastman, 2001).

A partir de una clasificación no supervisada realizada sobre el primer componente del TSA, se dividió la superficie en unidades homogéneas.

3.2.1. Comprobación del grado de ajuste entre las series 8 x 8 y 1 x 1 km: Con la finalidad de comprobar el grado de ajuste entre los rasgos del territorio que discriminan las series 8 x 8 y 1,1 x 1,1 km y evaluar la exactitud de los datos de resolución relativamente baja utilizados para la clasificación, se diseñó un procedimiento que se describe a continuación.

En primera instancia, se confeccionó una serie de imágenes 8 x 8 km que se correspondiera temporalmente con la disponible para las imágenes 1 x 1 km. A partir de ambas series se obtuvieron las imágenes con el primer componente del AST.

Luego, con los valores provenientes de este análisis, se elaboraron las matrices numéricas para los pixeles 1,1 x 1,1, en correspondencia con los pixeles 8 x 8 km. Con estos datos, se llevaron a cabo correlaciones, análisis de la varianza y análisis de conglomerados, a nivel de las unidades homogéneas delimitadas y de las áreas de cobertura de los pixeles de menor definición.

3.2.2. Modelo estadístico para la comparación de las UH: El análisis estadístico de las series de NDVI resolución 8 x 8 km se llevó a cabo mediante el estudio de series de tiempo, realizándose en dos etapas. En la primera se identificó la estructura de autocorrelación del NDVI en cada sitio para identificar cuántos son los períodos hacia atrás de los cuales depende una observación dada; esta relación se analizó utilizando las funciones de **autocorrelación (fac)** y de **autocorrelación parcial (facp)** (Box y Jenkins, 1976). En la segunda etapa se realizó un análisis de la varianza, para probar la hipótesis nula de igualdad de medias de NDVI entre unidades homogéneas versus la alternativa de que al menos hay una media de NDVI que es distinta entre las unidades homogéneas, esto es,

$$H_0 : \mu_{NDVI, sitio1} = \mu_{NDVI, sitio2} = \mu_{NDVI, sitio3}$$

$$H_1 : \text{Al menos una esperanza es distinta}$$

Al modelo lineal para probar la hipótesis estadística de referencia se le incorporaron tantos términos autoregresivos como el análisis de las acf y pacf lo indicaban, de la siguiente forma:

$$NDVI_{i,t} = \mu + \tau_i + \sum_{k=1}^m \beta_k NDVI_{t-k} + \varepsilon_{i,t} ,$$

donde el subíndice i es utilizado para representar el sitio 1, 2 ó 3, el subíndice t representa el año, μ representa una constante general, τ_i el efecto promedio que el sitio tiene sobre el NDVI, m representa la cantidad de términos autoregresivos identificados en base al análisis de las acf y pacf, β_k es un coeficiente de regresión que cuantifica la relación que existe entre el $NDVI_t$ y el $NDVI_{t-k}$, y $\varepsilon_{i,t}$ es un término de error aleatorio con distribución normal e independiente, esperanza cero, varianza constante.

3.3. Caracterización de la estructura física y biológica de las Unidades Homogéneas

La finalidad de esta caracterización fue corroborar, mediante el uso de la información básica disponible de la cuenca y la proveniente del análisis de las series temporales de imágenes satelitales, la diferenciación de la estructura de cada unidad delimitada e interpretar las particularidades de su funcionamiento.

3.3.1. Sistematización de la Información fisiográfica: La información a que se accedió a partir de las diferentes fuentes, referida a geomorfología, geología, áreas con distintos tipos de erosión y escurrimiento y susceptibilidad a la erosión, fue digitalizada mediante una mesa digitalizadora y *scanner* con la finalidad de incorporarla al sistema de procesamiento y análisis digital.

3.3.2. Cálculo del Índice de Productividad Edafo-Climatológico: Con el objetivo de obtener una ponderación cuantitativa de la característica agroclimática y edafológica de cada unidad homogénea, se procedió al cálculo del *índice de productividad* de cada una de ellas. Este se basó en la metodología empleada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación para la evaluación de las tierras de la República Argentina (Nakama y Sobral, 1987) y se llevó a cabo en dos etapas:

a) *Determinación del índice de productividad de la unidad taxonómica de suelos:* los parámetros fueron valorados para obtener coeficientes, de acuerdo a la escala de rangos correspondientes a los estados posibles de cada uno de ellos, según la información experimental existente y los resultados de las consultas efectuadas entre técnicos especialistas de la región. Para su cálculo se usó la siguiente expresión, modificada de Nakama y Sobral (1987), con la finalidad de considerar sólo las variables de las que se poseía información:

$$Ipt = H D Pe Ta Tb Ap$$

Donde,

Ipt = índice de productividad de unidad taxonómica de suelos

Coeficientes

H = condición climática

D = drenaje

- Pe = profundidad efectiva
- Ta = textura del horizonte superficial
- Tb = textura del horizonte subsuperficial
- Ap = profundidad del horizonte Ap

b) *Determinación del índice de productividad de la unidad cartográfica:* Para ello se usó la siguiente expresión:

$$I_{pc} = \sum_i^n I_{pt} F P$$

Donde,

- I_{pc} = índice de productividad de la unidad cartográfica
- F = fases
- P = proporción del área que ocupa la unidad taxonómica
- i = primer componente taxonómico de la unidad cartográfica
- n = cantidad de unidades taxonómicas que integran la unidad cartográfica

Este índice se calculó a nivel de las asociaciones de suelos y de las "unidades parcelarias" de Nakama y Sobral (1987). Este último nivel de integración se asimiló a la superficie de los píxeles y las unidades homogéneas.

Para la determinación de la variable *P* se debió realizar el cálculo correspondiente de las proporciones de cada tipo de suelo dentro de cada una de las unidades cartográficas. Esto se realizó a través del programa de información geográfica antes citado, mediante las herramientas correspondientes.

Las fases por erosión se consideraron a partir de tres fuentes de información (Sanabria *et al.*, 1997): la fase de la *clasificación de suelos* propiamente dicha; la información del *mapa de escurrimiento y erosión* y las *planillas de análisis de susceptibilidad a la erosión*. También se delimitaron las áreas con peligro de anegamiento.

3.3.3. Análisis de la precipitación: Se trabajó con un promedio de los datos de las tres estaciones meteorológicas próximas a la cuenca bajo estudio, cuyos promedios no presentaron diferencias significativas durante el período analizado; se graficaron los datos de precipitación estival e invernal y las diferencias porcentuales con la Media. Se calcularon los promedios y coeficientes de variación de la 1ª y 2ª décadas y se

analizaron mediante un ANAVA teniendo en cuenta un posible modelo auto-regresivo de orden 1 para los errores.

3.3.4. Evaluación de la superficie boscosa de la cuenca: Se realizaron tres relevamientos de la vegetación leñosa de la cuenca, correspondientes a los años 1970, 1987 y 1999.

El primero correspondió a la delimitación de la vegetación asentada en las Cartas Topográficas del Instituto Geográfico Militar, escala 1:50.000, editadas entre los años 1971 y 1974.

El segundo relevamiento se realizó a partir del análisis de fotografías aéreas Escala 1:50.000 de un vuelo realizado el año 1987, apoyando este análisis con fotografías en escala 1:20.000 correspondientes a un vuelo realizado en 1970.

El procedimiento empleado para calcular las superficies en estos dos relevamientos, fue superponer sobre cuadrículas de áreas conocidas las unidades delimitadas.

El tercer inventario corresponde a la situación actual de la cuenca. La información fue calculada digitalmente, a partir de una clasificación no supervisada de una imagen LANDSAT del año 1999 (Ravelo, 2002).

Los *índices de fragmentación* empleados fueron: **número total de parches** y **tamaño medio de parches**, equivalentes al número total de áreas de bosques y su tamaño medio dentro de una unidad cartográfica. Para evaluar la **conectividad**, se usó el **tamaño de parches relativo** (BM / A , donde BM es el tamaño del mayor parche de bosque y A es el área total de bosque en la cuenca) (Towson University Center for Geographic Information Sciences, 2003)

3.3.5. Evaluación de los cultivos: Se llevó a cabo mediante la utilización de información de campo, estadística y satelital, tomándose sus datos básicos, así como los procesados mediante el cálculo de diferentes índices.

a) Análisis de la serie de resolución 8 x 8 km: Además de analizar la varianza identificando la estructura de autocorrelación del NDVI y los procedimientos

TSA antes citados, los cambios temporales y la heterogeneidad espacial se analizaron e interpretaron sobre la base de otros procesamientos estadísticos, como el cálculo de coeficientes de correlación, obtención de estadísticas descriptivas y análisis de varianza. Para analizar el efecto década se realizó un análisis de la varianza teniendo en cuenta un posible modelo auto-regresivo de orden 1 para los errores.

b) Cálculo de la Productividad primaria neta aérea (PPNA): Se siguió la metodología empleada por Ghera *et al.* (2000), partiéndose del cálculo de la *fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida* (FPAR) mediante la expresión:

$$FPAR = 0,25 + 1,25 NDVI.$$

La *radiación absorbida* (APAR) (MJ/m²) se estimó mediante el producto:

$$APAR = FPAR * PAR$$

Donde, PAR es la *radiación fotosintéticamente activa*, que equivale al 50% de la radiación global. Los datos provinieron de la estación del CIAL ubicado en la ciudad de Córdoba (Red Solarimétrica). Se usó la suma de la radiación diaria para cada ciclo estacional. Por último se calculó la PPNA potencial en g C/ m², como:

$$PPNA_p = E * APAR$$

Donde, E es la *eficiencia media de la conversión de energía* para un escenario agrícola (0,48 g C/MJ). El factor de conversión Carbono a Biomasa fue de 2,2 (Fogg y Wright, 1973; Barceló Coll *et al.*, 2001).

c) Ritmo de crecimiento: A partir de la serie de 20 años de datos mensuales de la derivada del NDVI (Di Rienzo, 1995), para estimar las fechas de inicio y final de la estación de crecimiento de cada ciclo se computaron aquellos meses con valores de derivada máximo y mínimo. Los promedios plurianuales de estos valores discretos correspondientes a los meses con máximos y mínimos, fueron transformados luego en fechas calendario de inicio y final de los ciclos de cada UH.

d) Índice de diversidad de los cultivos: Se calculó usando el *índice de Shannon* (Magurran, 1989) que es igual a $H = - \sum_i^n \ln (P_i) * P_i$; el *índice de equitatividad* $E = H / \ln (S)$. Donde, P_i = valor de importancia (proporción de superficie asignada al i -ésimo cultivo); S = riqueza específica.

e) Modificaciones en el manejo tecnológico de los sistemas de producción: Para disponer de información sobre diferentes aspectos del manejo tecnológico de los sistemas de producción agropecuaria, se llevaron a cabo trabajos de campo con dos tipos de entrevistas a productores, técnicos y empresas agropecuarias del medio. Un primer tipo de entrevistas consistió en encuestas semi-estructuradas a productores agropecuarios en las cuales se rescató el manejo tecnológico del suelo, cultivos y plagas de los años recientes. El segundo tipo consistió en entrevistas no estructuradas, realizadas a técnicos, responsables de cooperativas y de empresas comercializadoras, indagándose información histórica del mediano plazo.

3.4. Uso del NDVI como indicador de la heterogeneidad espacial y temporal

Se llevó a cabo a través de las siguientes relaciones:

3.4.1. Relación entre NDVI y precipitación: Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre la precipitación mensual (abril-setiembre y octubre-marzo) y el NDVI mensual (mayo-octubre y noviembre-abril), para ciclos invernales y estivales de la serie 1981-2001. Se realizó este análisis para los años de precipitación considerados favorables y desfavorables, según si sus precipitaciones excedían o se encontraban debajo de la media, respectivamente.

3.4.2. Relación entre NDVI y el índice de productividad del suelo: Para establecer el grado de correspondencia en los patrones de distribución cartográfica entre ambas variables, se utilizaron correlaciones entre los valores promedio de NDVI de las unidades homogéneas y de las regiones geomorfológicas con los respectivos índices de productividad.

3.4.3. Relación entre NDVI y estadísticas de cultivos del Departamento: Se calcularon correlaciones entre valores promedios de los ciclos estivales e invernales y

de combinaciones de algunos meses particulares de NDVI, con las variables Superficie Cosechada, Rendimiento de los Cultivos y Producción Total del Departamento Santa María.

3.5. Otros indicadores basados en el NDVI

Se calcularon distintos *indicadores* basados en la información que brinda el NDVI, como *delta NDVI* (Henricksen y Durkin, 1986 en de la Casa, 2001), *derivada del NDVI* (Di Rienzo, 1995), *ICV (índice de condición de la vegetación)* (Kogan, 1995 en Seiler, 1998) y *diferencia entre el máximo y el mínimo valor del NDVI* (Paruelo y Lauenroth, 1998).

3.5.1 Delta NDVI (d-NDVI). Corresponde a la tasa de cambio del NDVI en una base incremental. Se utilizó la siguiente expresión:

$$d\text{-NDVI} = [((\text{NDVI}_{i+2} + \text{NDVI}_{i+1}) * 0.5) - ((\text{NDVI}_{i-2} + \text{NDVI}_{i-1}) * 0.5)]$$

Donde el subíndice corresponde al valor mensual.

3.5.2 Derivada del NDVI (D-NDVI). Se evaluó a través de la siguiente expresión:

$$D\text{-NDVI} = \text{NDVI}_{i+1} - \text{NDVI}_i$$

Donde el subíndice corresponde al valor mensual.

3.5.3 Índice de condición de la vegetación (ICV). Utilizado por Liu y Kogan (1996) para monitorear patrones espaciales de sequía a escala continental y por Seiler *et al.* (1998) a escala regional. Se lo calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{ICV}_j = 100 * (\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_{\text{mín}}) / (\text{NDVI}_{\text{máx}} - \text{NDVI}_{\text{mín}}).$$

Donde, ICV_j es el ICV en el período j de un año particular; NDVI_j es el NDVI en el período j de un año en particular y $\text{NDVI}_{\text{máx}}$ y $\text{NDVI}_{\text{mín}}$ son los valores máximos y

mínimos en el período j para toda la serie considerada. El índice varía entre: 0 (condición extremadamente desfavorable) y 100 (condición óptima).

3.5.4 Diferencia entre el máximo y el mínimo valor del NDVI (Mm). Para su cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$Mm = (\text{Máx NDVI Anual} - \text{Mín NDVI Anual}) / \text{Promedio Anual}.$$

Donde, Máx y Mín NDVI Anual corresponden a los valores máximos y mínimos de NDVI del período anual considerado; Promedio Anual es el promedio de NDVI del año considerado.

3.6. Evaluación de la sustentabilidad ambiental

Sobre la base de la información procesada y analizada, se eligió un conjunto de indicadores capaces de monitorear en forma comparativa el proceso y la tendencia que presenta la sustentabilidad de la agricultura en las diferentes regiones delimitadas de la cuenca. Luego de la revisión bibliográfica, algunos de estos indicadores debieron ser definidos localmente, en función del tipo de información disponible.

Se agruparon en tres categorías, con el objetivo de monitorear los atributos básicos de la sustentabilidad ambiental.

Productividad

- Promedio del NDVI anual: Promedio del NDVI anual de la serie 1982-2000
- Capacidad de producción de doble cultivo: Correlación entre la suma invernal de NDVI y los rendimientos del Dpto. Santa María en años con siembra de trigo.

Estabilidad

- Porcentaje de bosques óptimo: 30%, según Tinto (1978)
- Estabilidad del NDVI anual: $CV \cdot 10^{-1}$ Donde, CV (en tantos por uno) es el coeficiente de variación de los promedios anuales de NDVI
- Diferencia entre Máximo y Mínimo NDVI: inversa de las diferencias proporcionales a la media entre máximos y mínimos NDVI anuales
- Biomasa remanente del cultivo. Calculada a través del valor de PPNA y los índices de cosecha de los cultivos predominantes.

Eficiencia

- Promedio del ICV para años secos. Relaciona el estado de la vegetación en los períodos con déficit hídrico.
- Independencia a la precipitación de veranos secos: Correlación (1-r) entre precipitación y NDVI de años secos.
- Independencia a la precipitación de inviernos secos: Correlación (1-r) entre precipitación y NDVI de años secos.

Los resultados de los diferentes indicadores utilizados se integraron utilizando diagramas llamados "tela de araña" o "ameba" (Sarandón, 2002b; García, 2001), que son una herramienta visual rápida para ilustrar los resultados de todos los indicadores. Este tipo de gráfico son diagramas radiales donde cada indicador está representado en un eje por separado. Los valores utilizados en la ameba se construyen a partir de índices para cada indicador, que representan el porcentaje de la situación analizada con respecto a un valor óptimo o umbral (Astier *et al.*, 2002).

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

IV.A - Heterogeneidad espacial

1. Delimitación de las Unidades Homogéneas (UH)

A partir de un Análisis de Series Temporales (AST), donde el primer componente principal estandarizado sintetiza el comportamiento típico del área y luego, clasificando esta imagen síntesis, se obtuvieron las diferentes unidades homogéneas.

En la Figura 2 se muestra el componente 1 del AST que abarca la superficie total de la cuenca y una parte del territorio circundante.

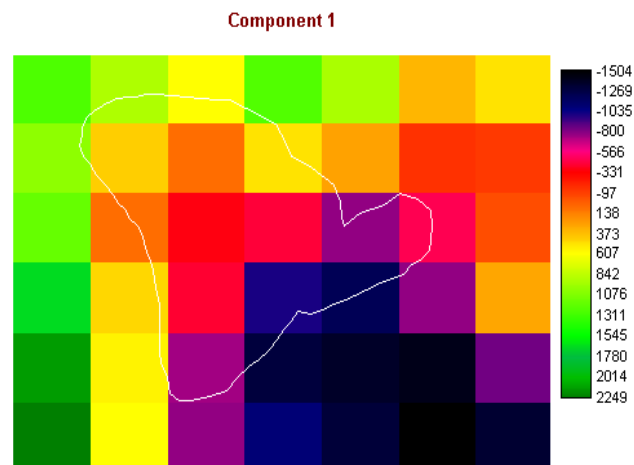


Figura 2: imagen del componente 1 del AST, sobre la serie 1981-2001 de imágenes mensuales. Se puede ver la silueta de la cuenca.

La heterogeneidad de la imagen es acentuada, ya que están incluidos sectores bajo uso muy diferente al que predomina estrictamente en la cuenca en estudio. Así, en el sector Centro Norte de este corte se encuentra la zona Sur del cinturón fruti-hortícola de Córdoba y en el sector Oeste queda incluido el cordón montañoso de la Sierra Chica.

Para evitar esa distorsión, se procedió a correr el AST sobre una máscara sobre el sector exterior de la cuenca. El criterio empleado fue el de incluir todos los píxeles con al menos una porción perteneciente a la cuenca. De esta manera, se obtiene una imagen del componente 1 del AST que permite una mejor discriminación de los sectores internos del área bajo estudio (Figura 3).

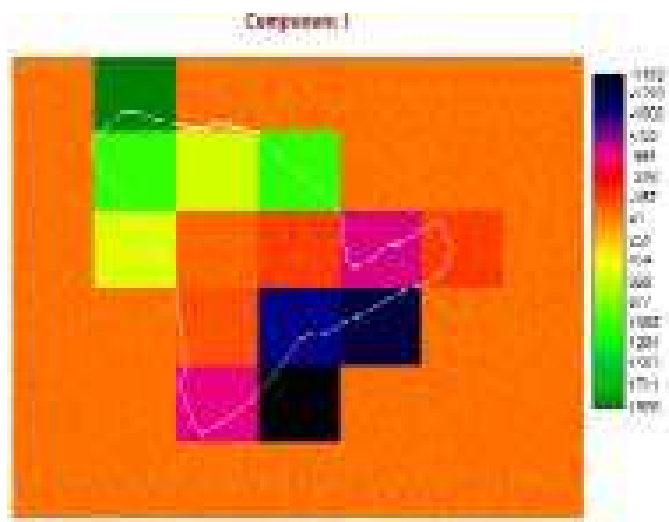


Figura 3: Imagen del primer componente del AST realizado con una máscara que comprende a la cuenca bajo estudio

El sector SE presenta píxeles con valores del Componente 1 negativos elevados (colores oscuros), que se relacionan respecto a las gráficas de *loadings* con los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril, donde alcanzan sus picos negativos. En cambio, en el sector NO se presentan valores positivos elevados (verdes y amarillos), que se asocian con los valores positivos de *loadings* de los meses de Mayo a Noviembre (Ver Anexo I).

Estos resultados conducen a interpretar un diferente funcionamiento de la vegetación: el sector SE presenta en verano y comienzos del otoño los valores más elevados de NDVI de la cuenca, en tanto que el sector NO los presenta en invierno y primavera, fundamentalmente.

A partir de esta primera representación de píxeles del sector ocupado por la cuenca, se seleccionaron sólo aquellos cuya superficie dentro del área fuera

significativa. Así, se eliminaron los píxeles de los bordes que contenían superficies inferiores al 50 % dentro de la cuenca.

Con el nuevo criterio de máscara, se procedió a realizar un segundo procesamiento de los datos de la serie. El componente 1 obtenido contiene el 35 % (39 % para el corte anterior) del total de variación de la serie de imágenes analizada (Figura 4).

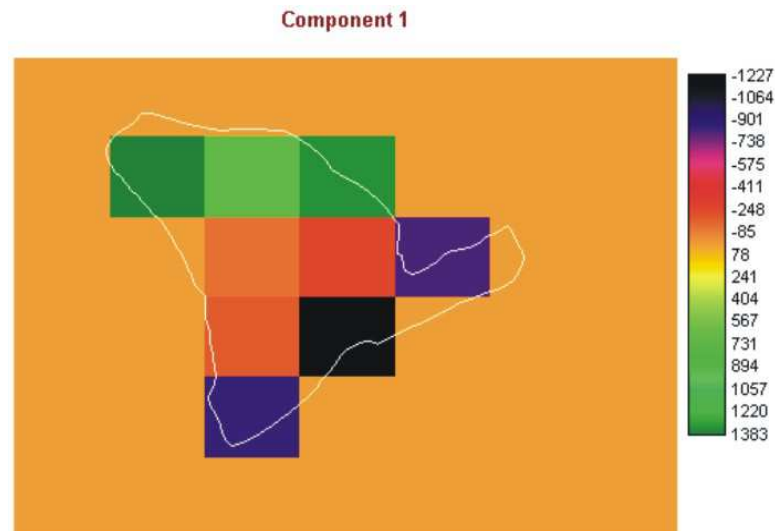


Figura 4: Imagen del componente 1 del AST realizado sobre una máscara restrictiva que incluye sólo a los píxeles de borde con 50 % o más de su área dentro de la cuenca.

Sobre la imagen del componente 1 de la serie anual se realizó una clasificación de aproximación¹ no supervisada y, a partir de ella, se obtuvieron tres grupos. Estos constituyen los sectores en que se puede dividir la superficie de la cuenca, quedando conformada así las unidades homogéneas: UH 1 (SE), UH 2 (Centro) y UH 3 (NW) (Figura 5).

¹ Una clasificación de este tipo permite la aplicación de un criterio matemático determinado que, sin ser específicamente diseñado a esos efectos, posibilita una visión genérica de la situación.

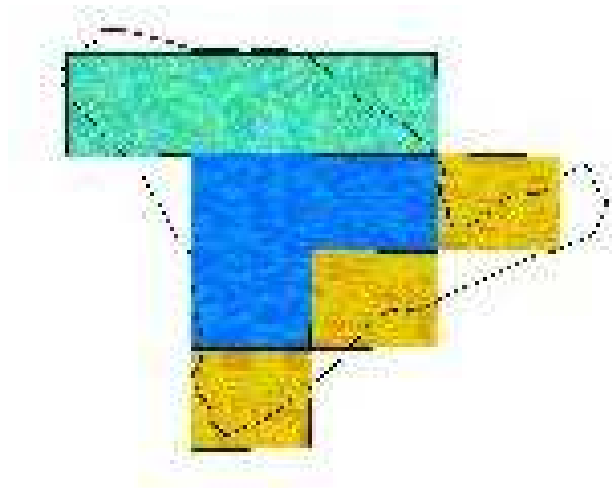


Figura 5: Unidades homogéneas obtenidas a partir de una clasificación no supervisada del componente 1 del AST. Unidades homogéneas: UH 1 - Sector SE (color amarillo); UH 2 - Sector Central (color azul) y UH 3 - Sector NW (color verde)

Seguidamente, la evaluación del NDVI se realizó sobre una serie de imágenes de menor tamaño y mayor resolución (1,1 x 1,1 km), con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos con la serie 8 x 8 km. El AST de esta serie permitió obtener las imágenes y los gráficos correspondientes. Según se procediera precedentemente, se trabajó con la imagen completa y con una máscara de la cuenca (Figura 6).

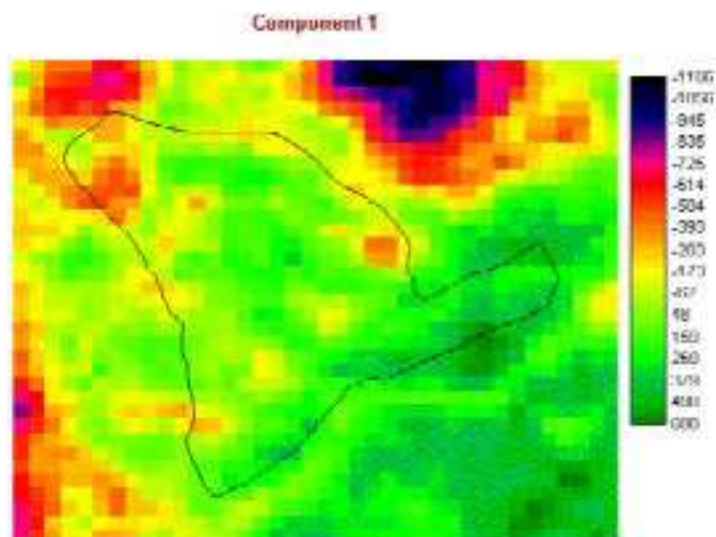


Figura 6: Componente 1 del AST generado a partir de los valores máximos mensuales de la serie de imágenes de pixel 1,1 x 1,1 (período 1992-1996), cuadro completo.

Analizando la heterogeneidad del marco regional (Figura 6), se destaca la diferenciación del área hortícola, con píxeles de coloración oscura (valores negativos del componente 1) en el sector NE de la imagen. Estos valores se encuentran correlacionados con picos negativos de las gráficas correspondientes a los meses de la estación invernal y que coinciden con el período del cultivo de algunas especies hortícolas como la papa. Es de hacer notar que en esta imagen los valores son inversos a los de las otras imágenes analizadas, lo que es indistinto a los fines de su interpretación (Eastman, 2001).

Corriendo el AST según una máscara de la cuenca, la imagen del componente 1 (Figura 7) muestra un patrón espacial similar al de los tratamientos de la serie de resolución 8 x 8 km.

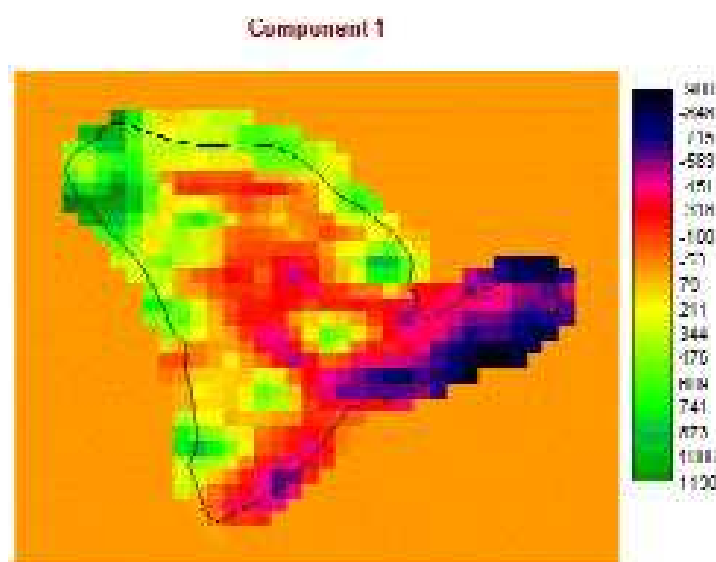


Figura 7: Componente 1 del AST generado a partir de la serie de imágenes 1,1 x 1,1 con valores máximos mensuales utilizando una máscara de la cuenca.

Con el propósito de realizar un control del procedimiento seguido, el mismo tratamiento se llevó a cabo usando la serie de imágenes decádicas y utilizando la máscara de la cuenca. Los resultados obtenidos fueron muy semejantes al realizado con la serie mensual.

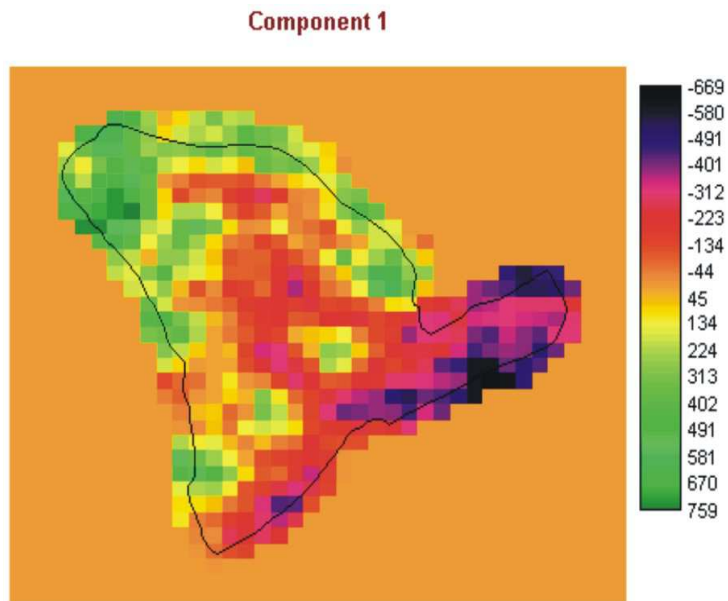


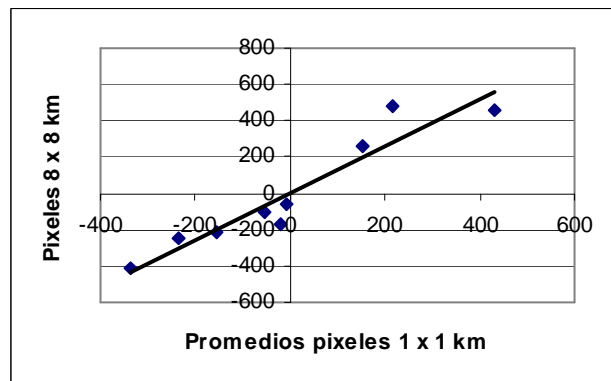
Figura 7a: Componente 1 del AST generado a partir de la serie de imágenes decádicas 1,1 x 1,1 utilizando una máscara de la cuenca.

2. Comprobación del grado de ajuste entre los rasgos del territorio que discriminan las series 8 x 8 y 1,1 x 1,1 Km

La comprobación estadística del grado de exactitud de la serie de baja resolución utilizada para clasificar las unidades homogéneas respecto de la serie de menor detalle, arrojó los resultados que se presentan a continuación.

El índice de correlación de Pearson, obtenido para los promedios del componente 1 del AST de los pixeles de ambas series fue de 0.91 ($p = 0,0006$).

Figura 7b: Valores promedio de los pixeles de la serie 1 x 1km y de los pixeles de la serie 8 x 8 km de los componentes 1 del AST de cada serie.



El modelo del tratamiento de ANAVA sobre los datos de los pixeles 1 x 1 km ajustó significativamente, con $P < 0,0001$. La Prueba DGC (alfa = 0,01) arrojó los siguientes cuadros de resultados.

Tabla 1: Resultados de la prueba DGC (alfa = 0,01) sobre los datos de los pixeles 1 x 1 km que se corresponden con las unidades homogéneas y los pixeles 8 x 8 km.. Los valores corresponden al componente 1 del AST. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,01$).

UH	Medias	n	
1	-243,17	129	A
2	-27,41	134	B
3	266,64	113	C

UH	Pixel 8x8	Medias	n	
1	3	-335,61	47	A
1	2	-237,09	38	B
1	1	-156,81	44	B
2	2	-54,04	48	C
2	1	-20,64	39	C
2	3	-7,55	47	C
3	2	151,89	44	D
3	3	215,00	38	D
3	1	433,02	31	E

Figura 7c: Esquema con la denominación de las unidades homogéneas (UH) y de las superficies correspondientes a los pixeles (Px) de las imágenes de 8 x 8 km

Px. 1 UH3	Px. 2 UH 3	Px. 3 UH3	
	Px. 1 UH 2	Px. 2 UH 2	Px. 3 UH 1
	Px. 3 UH 2	Px. 2 UH 1	
	Px. 1 UH 1		

Este análisis segregó claramente los valores medios de las tres UHs. Con respecto al nivel de organización espacial de los pixeles 8 x 8, la prueba estadística diferenció cinco grupos de valores de pixeles 1 x 1 que presentan una correspondencia aproximada con las unidades homogéneas definidas con las imágenes 8 x 8. El pixel 3 de la UH 1, a pesar de estar diferenciado estadísticamente de los denominados 1 y 2, podría ser considerado dentro de este grupo por su cercanía numérica; lo mismo puede decirse del pixel 1 de la UH3 que, al tener el valor promedio más elevado, podría considerarse como perteneciente al grupo 3, que reúne los mayores valores del componente 1.

Con el Análisis de Conglomerados de los pixeles 1 x 1 se logró percibir con una mayor precisión la conformación de estos grupos. Este identificó la presencia de 3 o a lo sumo 4 grupos de pixeles. Cuando se consideró la reclasificación en 3 o 4 grupos por la técnica de los k-vecinos más cercanos, las tasas de errores de mala clasificación indicó que la conformación de 3 grupos era preferible a la de 4 (tasas de error del orden del 1% versus tasas del orden del 5%). La clasificación de los pixeles en 3 grupos, coincidió en casi un 70% con la clasificación de los pixeles 8 x 8.

3. Características físicas y biológicas de las Unidades Homogéneas

La heterogeneidad espacial reflejada por las unidades homogéneas resultantes, puede vincularse con los patrones de distribución de los diversos componentes físicos (suelo y geomorfología) y biológicos (vegetación nativa y cultivos), que se presentan a continuación.

3.1 Geomorfología.

La cuenca abarca diferentes ambientes geomorfológicos (Anexo II). De acuerdo con el estudio de Sanabria *et al.* (1997), se distinguieron y calcularon las proporciones que ocupa cada una sobre el total de la superficie, arrojando los siguientes resultados:

Planicie Ondulada:	40.70 %
Planicie Central:	48.40 %
Paleoconos Aluviales:	2.60 %
Faja Aluvial Río Xanaes:	7.30 %.
Misceláneas:	1.00 %

Es decir que cerca del 90 % está constituida por las planicies Ondulada y Central; la primera, con pendientes entre el 1 y 3 %, oficia de borde oriental de la depresión periférica y la segunda, de superficie plana, hace de receptora de toda el agua de escurrimiento de la cuenca alta.

Caracterización geomorfológica de cada unidad homogénea

En las Figuras 8, 9 y 10 se exponen los porcentajes de superficie que le corresponden a las diferentes asociaciones geomorfológicas presentes en cada unidad homogénea.

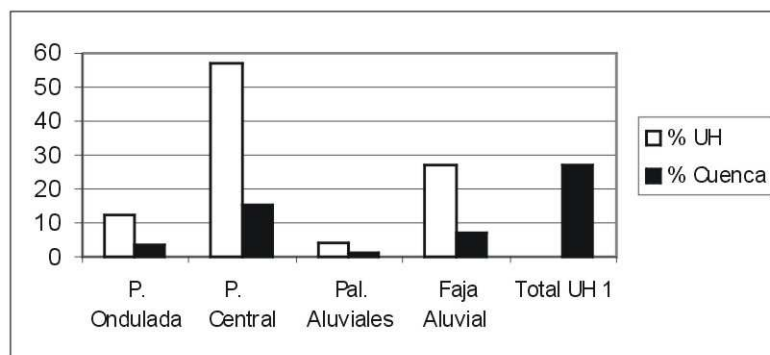


Figura 8. Porcentajes de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas con respecto a la unidad homogénea 1 y de la cuenca.

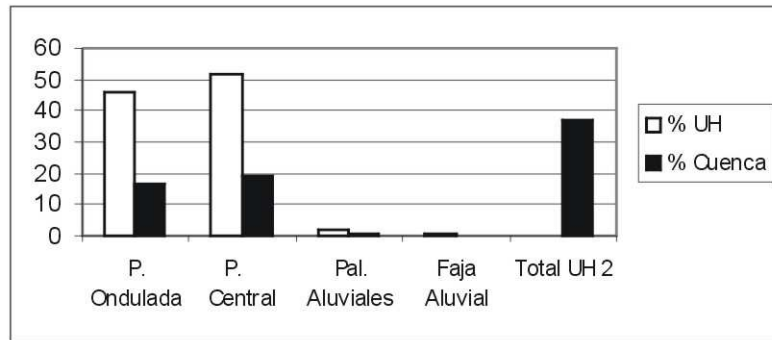


Figura 9. Porcentajes de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas respecto de la unidad homogénea 2 y de la cuenca.

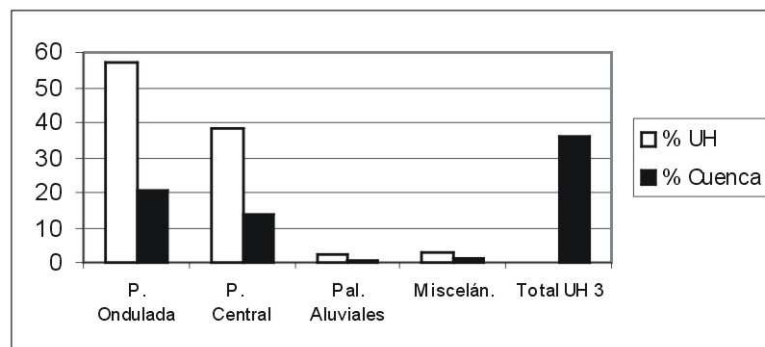


Figura 10. Porcentajes de superficie que presentan las diferentes asociaciones geomorfológicas respecto de la unidad homogénea 3 y de la cuenca.

A partir de la información que se desprende de las figuras anteriores, se comprueba que la UH 1, ubicada en el sector SE de la cuenca, presenta como componente principal de su superficie a la Planicie Central y también comprende una porción importante de la asociación que corresponde a la Faja Aluvial del Río Xanaes. Las UH 2 y 3 presentan más del 90% de su territorio conformado por las Planicies Central y Ondulada, diferenciándose porque en la UH 2 predomina la primera, mientras que en la UH 3, la segunda.

3.2 Suelos

3.2.1. Clasificación y Mapa de suelos

A partir de los datos del relevamiento realizado por Sanabria *et al.* (1997), se digitalizaron las principales unidades geomorfológicas y suelos correspondientes a la cuenca (Figura 11). En la Tabla 1a se presentan las clases taxonómicas que corresponden a las series de suelo. En la Tabla 1 b se exponen las unidades geomórficas.

Tabla 1a. Clasificación Taxonómica de las Series de suelo de la cuenca R. García-Lozada (Sanabria *et al.*, 1997).

ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	SERIE
Molisoles	Ustoles	Haplustoles	Enticos	1, 2, 5
			Típicos	3, 16
			Tapto árgico	8, 11
		Argiustoles	Típicos	4, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 17
Entisoles	Orthen	Ustiorthent	Típico	15
	Fluvent	Ustifluvent	Durinódico o típico	14

3.2.2 Índice de Productividad edafo-climatológica

Con el objetivo de obtener una ponderación cuantitativa de las características agroclimática y edafológica de cada unidad homogénea se procedió al cálculo del Índice de Productividad de cada una de ellas.

El cálculo del Índice de Productividad se realizó en dos etapas (Nakama y Sobral, 1987). La primera consistió en la determinación del *Índice de productividad de unidad taxonómica de suelos (Ipt)*, y se realizó para cada una de las series o unidades básicas de suelo de la cuenca; la segunda condujo a la determinación del *Índice de*

productividad de la unidad cartográfica (Ipc), calculándose para cada una de las asociaciones de suelos y para la superficie de los píxeles y las unidades homogéneas

Los valores de Ipc obtenidos para cada una de las unidades cartográficas de suelo, se presentan en la Tabla 2 (en el Anexo III se presentan las planillas con los cálculos para sus valoraciones).

Tabla 2. Valores del Índice de Productividad calculados para las unidades cartográficas (Ipc) a nivel de las asociaciones de suelos de la cuenca R. García-Lozada. Donde: Co = Complejo; Con = Consociación

Unidad cartográfica	Ipc básicos
Co 1	14.8
Co 2	37.8
Co 3	10.8
Con 1	29.1
Co 5	26.9
Co 6	52.2
Co 7	65.0
Co 8	45.4
Co 9	61.7
Co 10	69.0
Co 11	45.5
Co 12	58.3
Co 13	49.1
Co 14	15.2
Co 15	49.1

Con la información del mapa de escurrimiento y erosión y de las planillas de análisis de susceptibilidad a la erosión (Sanabria *et al.*, 1997) se procedió a ponderar localmente los diferentes tipos de suelos sujetos a erosión; en su cálculo se consideraron las fases por erosión: *escurrimiento concentrado en surcos (incipiente)* y *escurrimiento concentrado en surcos (con tendencia a cárcavas)*. Lo mismo se hizo con las áreas con peligro de anegamiento. Como resultado final de éstas se obtuvieron los Ipc para cada UH (Tabla 3).

Tabla 3. Valores del índice de productividad de la unidad cartográfica (Ipc) correspondientes a cada unidad homogénea de la cuenca Rafael García-Lozada

Unidad Homogénea	Índice de Productividad
UH 1	37.6
UH 2	40.6
UH 3	47.0

Se debe destacar que la UH 3 alcanza el mayor valor del Índice de Productividad. Este hecho se encuentra relacionado con que esta unidad homogénea se halla constituida en su mayor parte por la Planicie Ondulada como asociación geomorfológica, la que presenta en conjunto los menores índices de erosión hídrica y anegamiento. Estos factores fueron los que definieron principalmente las diferencias del Índice de Productividad.

3.3 VEGETACIÓN LEÑOSA, PREDOMINANTEMENTE NATIVA

La vegetación leñosa ha sufrido un fuerte deterioro a lo largo de las últimas décadas, como se analiza más adelante (ver Variabilidad Temporal). En el relevamiento más reciente de este trabajo, realizado en el año 1999, ésta representa el 7% de la superficie, mostrando además una distribución bastante heterogénea y fragmentada (ver Tabla 12). La región NO es la que conserva mayor superficie boscosa (9%), mientras que en las zonas central y SE su cobertura es de 6,5% y 5,4%, respectivamente (Tabla 11). Lamentablemente, los desmontes se continúan realizando, como se ha podido detectar en la zona SE a través de observaciones realizadas en el año 2001.

3.4 Cultivos

3.4.1 Análisis de la superficie y producción de los cultivos

La información estadística que se utilizó, referida a estimaciones de producción del departamento Santa María, si bien no alcanza la precisión de los datos censales,

tiene la ventaja de conformar una serie anual continua que cubre la totalidad del período que se analiza. La representatividad de estos datos sobre el área de estudio puede justificarse según dos aspectos. En primer lugar, el área bajo estudio cubre alrededor del 20% de la superficie llana de dicho departamento, región donde se llevan a cabo actividades eminentemente agrícolas (Sonnet, 1988). Así por ejemplo, de acuerdo al Censo Agropecuario de 1988, en la pedanía de San Antonio, de la cual el área de la cuenca cubre un 50% de su superficie, el área sembrada con cereales y oleaginosas alcanzó al 85% de su superficie. El segundo aspecto justifica la representatividad del ambiente físico, ya que, de acuerdo al Mapa de Reconocimiento de Suelos (Gorgas y Tassile, .2003), en la cuenca se encuentran representados los principales suelos de la región².

Allí se cultivan, en mayor medida especies estivales (superficie promedio cultivada: 110.000 ha) que invernales (superficie promedio: 12.000 ha), con predominio de la soja. Este cultivo alcanza para la serie 1981-2001 un promedio de 88.8% de la superficie anual sembrada del departamento. Otras especies estivales, como el maíz y el sorgo, tienen una representación más limitada en la superficie agrícola (9.9%). El rendimiento promedio del cultivo de soja en el departamento, durante el período analizado, fue de 2.112 Kg/ha.

Esta concentración de superficie en un solo cultivo se ve reflejada en el reducido valor del Índice de Equitatividad (Shannon), cuyo promedio para los ciclos estivales de la serie analizada fue de 0,31. Asimismo, el Índice de Riqueza de 4,14 evidencia una utilización muy reducida de especies cultivadas. Estas características se sintetizan en el Índice de Diversidad, que alcanzó un valor 0,45, equivalente a la mitad del medido por Alessandria *et al.* (2000), para sistemas productivos de la región central de Córdoba.

3.4.2 Evaluación del NDVI en imágenes de resolución 8 x 8 km

² Estos suelos están constituidos por las siguientes asociaciones: **Mnen-6**, Clase de Uso III, Índice de Productividad 58; **Mnen-4**, Clase de Uso III, Índice de Productividad 68; **MNtc-2**, Clase de Uso IV, Índice de Productividad 24 y **COrs**, Clase de Uso VI, Índice de Productividad 5.

La información analizada a través del NDVI, debido a que más del 90% de la superficie se halla destinada a la producción agrícola, corresponde mayoritariamente a la vegetación cultivada.

En la Tabla 4 se presentan los valores de NDVI promedios mensuales calculados a partir de los ciclos anuales y de los ciclos productivos estivales e invernales promedio, correspondientes a las tres unidades homogéneas.

Tabla 4. Promedios de NDVI y Coeficientes de Variación (CV) de la Serie 1981-2001 para las unidades homogéneas 1, 2 y 3. Se presentan los valores promedios mensuales para los períodos anuales y semestrales, estivales (Noviembre-Abril) e invernales (Mayo-October). Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$) LSD Fisher.

Ciclo Anual					
	UH 1	UH 2	UH 3	Total	P-valor ANAVA
Promedio Mensual	0.16 a	0.17 a	0.19 b	0,17	0.0004
CV (%)	13,0	14,8	11,1	12,4	
Ciclo Estival					
	UH 1	UH 2	UH 3	Total	P-valor ANAVA
Promedio Mensual	0,27 a	0,27 a	0,28 a	0,27	0.1791
CV (%)	12,0	10,4	9,3	10,3	
Ciclo Invernal					
	UH 1	UH 2	UH 3	Total	P-valor ANAVA
Promedio Mensual	0,05 a	0,07 ab	0,10 c	0,07	0.0019
CV (%)	86,8	64,5	37,0	54,7	

En la Tabla 4 se destacan los promedios superiores que alcanza la UH 3, hecho que resalta especialmente en los valores de los ciclos invernales. Los coeficientes de variación alcanzan valores bajos, presentándose aquí también una diferenciación espacial, siendo la UH 3 la más homogénea en términos relativos a la media. Esta variabilidad calculada con los datos satelitales puede ser comparada con la de los datos de producción de cultivos del departamento Santa María, donde los

cultivos estivales registraron un coeficiente de variación de 30%, mientras que para los invernales fue de 89%.

3.4.3 Cálculo de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA)

Los cálculos de los valores de PPNA a partir de los datos de NDVI para la cuenca en general y las tres unidades homogéneas en las que fue dividida, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Promedios de Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) calculados a partir de los datos de NDVI, para los ciclos estivales e invernales y discriminados por unidad homogénea. Los datos están en Kg de materia seca por hectárea y por ciclo.

Ciclo Estival (Noviembre-Abril)				Ciclo Invernal (Mayo-Octubre)			
UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca
10142	10224	10525	10297	3619	3991	4359	3930

A partir de los datos de la Tabla 5, se estimó la cantidad de biomasa que retorna de los cultivos al suelo a través de los rastrojos (Tabla 6). Para este cálculo se tuvo en cuenta, como ponderador, las áreas sembradas de los diferentes cultivos; además, se consideraron los siguientes valores de índices de cosecha: maíz 45%, soja 37% (Andrade et. al., 2000) y trigo 40% (Musick y Portier, 1990). De esta manera, se obtuvo para los cultivos de verano un remanente promedio ponderado de 62,5% del total de la biomasa aérea y para los de invierno, de 60%.

Tabla 6: Valores de biomasa remanente aportada por los cultivos estivales e invernales de cada una de las unidades homogéneas. Los datos están en Kg de materia seca por hectárea y por ciclo.

Ciclo Estival (Nov-Abr)				Ciclo Invernal (May-Oct)			
UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca
6339	6390	6578	6436	2172	2395	2616	2358

Puede considerarse, de acuerdo a estos cálculos, que los cultivos realizados en la UH 3, a través de sus remanentes, aportan cada año al suelo 683 (± 95.0) Kg de materia seca por hectárea más que los de la UH 1.

En el caso de la estimación de los rendimientos en grano de los cultivos, si se compara la productividad potencial calculada para los ciclos estivales (3.861 Kg/ha/ciclo) con el promedio del rendimiento ponderado por la superficie de cada cultivo, para el departamento Santa María (2.246 Kg/ha), se observa una estimación 72% mayor en su cálculo. Un mejor ajuste se obtuvo para los cultivos invernales, ya que la productividad calculada (1.572 Kg/ha) comparada con los rendimientos estimados del departamento (1.392 Kg/ha), da una estimación 13% mayor.

3.4.4 Ritmo de crecimiento

Cuando se analizan los promedios mensuales de NDVI de las diferentes unidades homogéneas, (Figura 12), surge que en la UH 3 el ciclo productivo comienza en setiembre y presenta valores ascendentes hasta marzo. En cambio, en las otras dos unidades homogéneas, recién hay aumento notorio de los valores de NDVI a partir de diciembre. En la figura también se observa que la UH 3 presenta la mayor estabilidad, manteniendo valores más elevados en los meses invernales, mientras que en Febrero y Marzo es superada por las otras unidades homogéneas, que denotan oscilaciones anuales más amplias.

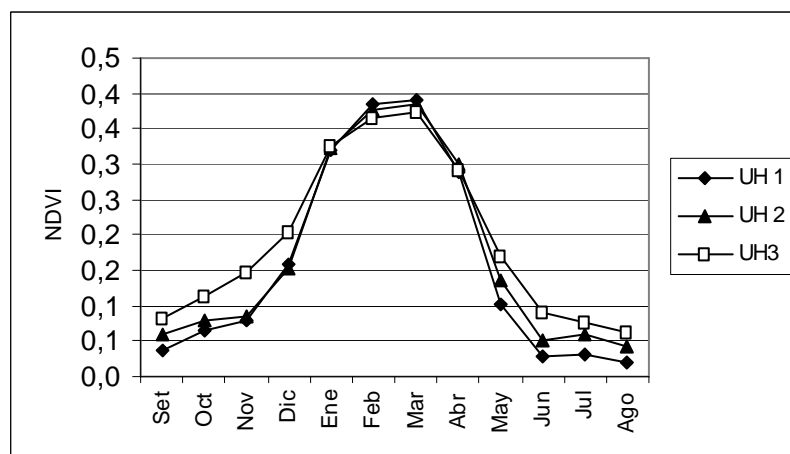


Figura 12. Promedios mensuales de NDVI para las diferentes unidades homogéneas de la cuenca. El mes 1 representa a Setiembre, inicio de la estación de crecimiento.

Por otro lado, el cálculo de la fechas promedio del máximo crecimiento y del máximo decrecimiento de los valores de NDVI a partir de la serie de datos mensuales de la derivada del NDVI, dio los resultados que se presentan en la Tabla 7.

Como puede verse en la Tabla 7, la fecha de máximo crecimiento en la UH 3 se anticipa en algo más de un mes a la fecha de las otras; mientras que las fechas de máxima velocidad de disminución de estos valores son semejantes en todos los lugares estudiados.

Tabla 7: Fechas promedio del máximo crecimiento y del máximo decrecimiento de los valores de NDVI. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.01$). LSD Fisher.

	UH 1	UH 2	UH 3	p - valor ANAVA
Crecimiento Máximo	02-Ene a	02-Ene a	25-Nov b	0.0028
Decrecimiento Máximo	25-Abr a	02-May a	28-Abr a	0.5439

Con el objetivo de analizar si una mayor frecuencia de realización de cultivos invernales en la UH 3 era la causa de estas diferencias fenológicas, se calcularon los coeficientes de correlación entre los valores correspondientes a la suma invernal de NDVI (Mayo-Octubre) y la producción de cultivos invernales del departamento Santa María (Tabla 8). Se tomó una serie de 9 años en que hubo siembra significativa de estos cultivos en la región (es decir, se tomaron solo los años en que la producción del departamento fue superior al promedio).

Tabla 8: Coeficientes de correlación de Pearson entre valores correspondientes a la suma invernal de NDVI (Mayo-Octubre) y los rendimientos de cultivos invernales del Dpto. Santa María en años con siembra significativa de trigo

	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca
Coefficiente de Correlación	0,36	0,44	0,73	0,55
p-valor	0.35	0.23	0.03	0.13

De acuerdo a los valores obtenidos, **sólo** la UH 3 mantuvo un coeficiente elevado de correlación, lo que refuerza el planteo realizado, de que la causa de las diferencias fenológicas era una mayor frecuencia de cultivos invernales en la UH 3.

4. El NDVI como indicador de la heterogeneidad espacial

4.1 Relación entre NDVI y la Calidad del Suelo

Se evaluó la capacidad de la vegetación como indicadora de diferentes parámetros del ecosistema, relacionando el NDVI con el índice de productividad edafo-climatológico, que sintetiza numerosas variables que determinan la calidad edafo-climática del territorio. La vinculación entre estos dos atributos se realizó para las dos resoluciones, de 1,1 x 1,1 y de 8 x 8 km.

4.1.1- Relación entre el NDVI resolución 1,1 x 1,1 km y el suelo

La Figura 13 muestra la asociación entre el componente 1 del AST y las principales unidades de suelo.

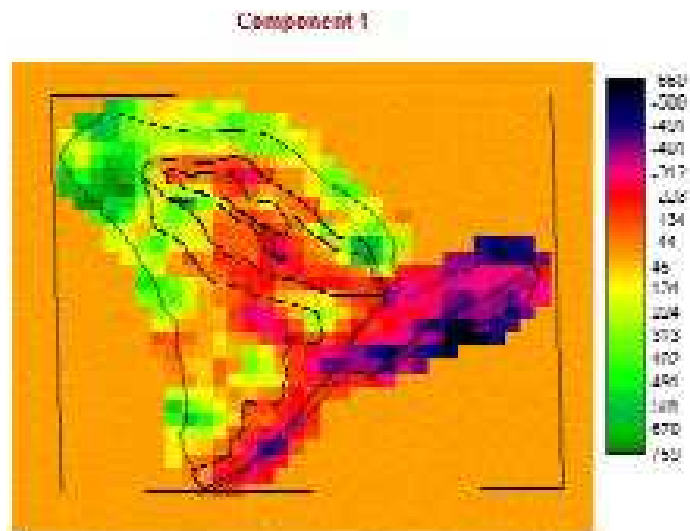


Figura 13. Imagen del componente 1 del AST realizado sobre la serie NOAA 1,1 x 1,1 km, utilizando los valores máximos mensuales; se superponen las clases principales de suelo de la cuenca.

Se evidencia la clara superposición de las regiones obtenidas a través del procesamiento AST, que considera la historia del funcionamiento de la vegetación, con el mapa geomorfológico y edáfico de la cuenca. Esta correspondencia en los patrones de distribución observada entre ambas variables fue evaluada correlacionando los valores promedio de NDVI de cada una de estas regiones con los Índices de Productividad de los suelos.

Los Índices de Productividad (Ipc) de las diferentes unidades de suelo, integrados cartográficamente a las regiones geomorfológicas más extendidas en la cuenca, alcanzaron los valores que se presentan en la Tabla 9. Allí también figuran los valores medios de NDVI calculados para tales regiones.

Tabla 9: Valores de los Ipc calculados para diferentes regiones geomorfológicas y valores medios de NDVI para la Serie 1,1 x 1,1.

Regiones Geomorfológicas	Índices de Productividad	NDVI Promedio
Planicie Ondulada	47.00	0.16
Planicie Central	39.73	0.15
Faja Aluvial Río Xanaes	33.30	0.13

La correlación entre NDVI y el Índice de Productividad presentó un valor de $r = 0,97$ ($p = 0,14$)

4.1.2- Relación entre el NDVI resolución 8 x 8 km y el suelo

En este caso, la comparación fue realizada entre los índices de productividad del suelo calculados para cada unidad homogénea (Tabla 3) y sus correspondientes valores de NDVI promedio (Tabla 4).

Entre ambas variables, se obtuvo un ajuste lineal con un coeficiente de correlación igual a 0,99 ($p = 0,05$).

Las correlaciones encontradas entre ambas variables, elevadas y positivas, (Tablas 8 y 9) avalan el valor indicador de la vegetación respecto a la calidad del suelo, lo que fue observado aún a niveles de baja resolución como el de imágenes con pixeles de 8 x 8 km.

IV.B Variabilidad temporal

1. Análisis de la Precipitación

Con los datos de Precipitación anual, que se muestran en la Figura 14, se calcularon los desvíos de la precipitación respecto a la media, tanto estival (Figura 15) como invernal (Figura 16) para detectar los períodos con déficit o con exceso de lluvia.

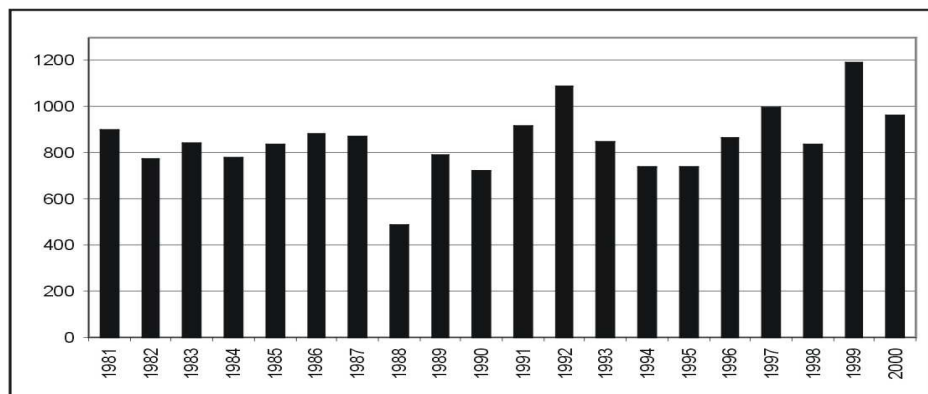


Figura 14: Precipitación del período entre Octubre a Setiembre del año siguiente para la serie 1981-2000. Datos promedio de las estaciones Pilar, Aeropuerto Córdoba y Observatorio Nacional.

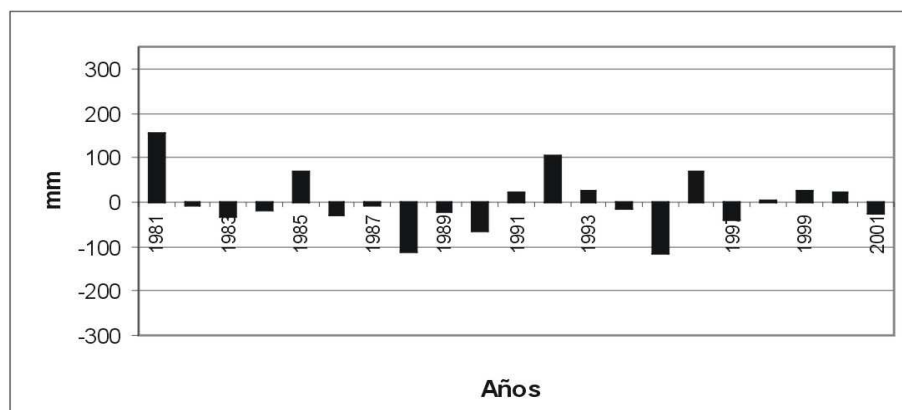


Figura 15: Desvíos de la precipitación estival (período Octubre-Marzo) respecto a su promedio, para la serie 1981-2000

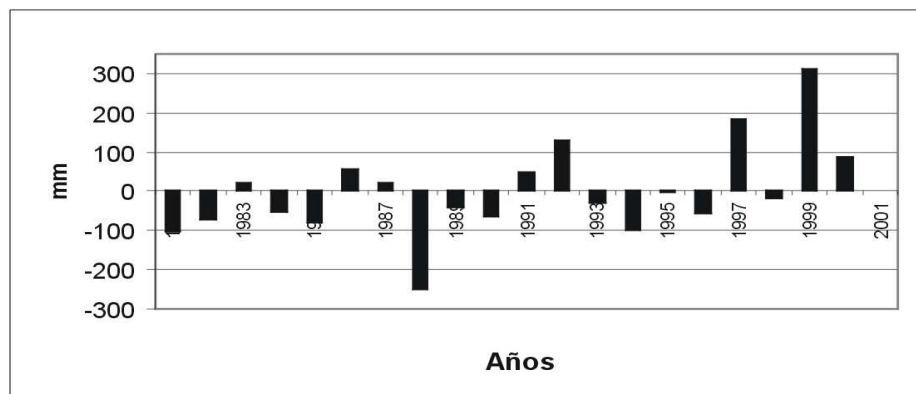


Figura 16: Desvíos de la precipitación invernal (período Abril-Setiembre) respecto a su promedio, para la serie 1981-2000.

En la Figura 14 se visualiza una tendencia creciente de la precipitación anual. La precipitación caída en época estival concentra el 82 % del total y determina el predominio regional de los cultivos de verano. En la Figura 15 se observa que los ciclos estivales cuya precipitación fue superior a la media (denominados hidrológicamente *favorables*) se concentraron mayormente en la segunda mitad de la serie. Los ciclos *desfavorables*, por el contrario, se ubicaron en la primera mitad; allí se destaca el ciclo 1988-89, con una diferencia con respecto de la media de -251,24 mm, constituyendo el ciclo más seco de la serie. Sin considerar situaciones limitantes puntuales, la precipitación de los ciclos estivales desfavorables, salvo el año antes mencionado, alcanzó a satisfacer las necesidades del cultivo. Así por ejemplo, a excepción de 1988-89 cuando el total de la precipitación estival sumada hasta el mes enero cubrió sólo el 49% del requerimiento del cultivo de soja, en los otros años desfavorables estos valores se ubicaron entre 85 y 115%.

Los ciclos invernales (Figura 16), en cambio, no muestran tendencia alguna y manifiestan una elevada variabilidad (CV 0,41). En esta estación, a diferencia de la estival, los períodos desfavorables que no alcanzaron a satisfacer los requerimientos agrícolas presentaron una frecuencia más elevada. Así, el 76% de los ciclos del cultivo de trigo (establecimiento hasta llenado del grano) tuvo precipitaciones inferiores a los 200 mm, considerados el valor mínimo de evapotranspiración a partir del cual comienza a producir granos (Musick *et al.*, 1994).

Tabla 11. Promedios de precipitación calculados para las décadas 1981-1990 y 1991-2001. Los promedios están calculados para el período anual (Ene-Dic) y los ciclos estivales (Oct-Mar) e invernales (Abr-Set). Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.01$). LSD Fischer.

Precipitación	Anual	CV	Ciclo Estival	CV	Ciclo Invernal	CV
1a Década	774,6 a	0,15	640,2 a	0,13	147,7 a	0,49
2a Década	913,6 b	0,16	752,8 b	0,17	165,3 a	0,36
p-valores	0,0650		0,0504		0,6498	

Según se aprecia en los resultados de la Tabla 11, las precipitaciones ocurridas durante la segunda década fueron mayores a las de la primera, tanto en el promedio anual, como en el estival; en cambio, no fueron diferentes las precipitaciones de ambas décadas del período invernal. La variabilidad de las precipitaciones fue mayor en las temporadas invernales que en las estivales.

2. VARIACIÓN DE LA VEGETACIÓN LEÑOSA EN EL PERÍODO ANALIZADO

Los datos de los relevamientos de vegetación leñosa nativa e implantada realizados sobre la superficie de la cuenca se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Evolución de la superficie ocupada por vegetación leñosa en las diferentes unidades homogéneas, según tres fechas analizadas: Aerofotografías años 1970 y 1987 e imagen LANDSAT año 1999 (Ravelo, 2002).

Unidades Homogéneas	Vegetación Leñosa					
	Año 1970		Año 1987		Año 1999	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
UH 1	1135,80	12,04	696,25	7,38	507,58	5,38
UH 2	1817,50	14,01	994,80	7,67	837,80	6,46
UH 3	3418,50	26,90	1654,70	13,02	1144,72	9,01
Sumas y promedios	6371,80	18,15	3345,75	9,53	2490,10	7,09

Puede notarse que la UH 3 es la que mantiene una mayor superficie boscosa en los tres relevamientos. En el período 1970-1987 esta UH perdió el mayor porcentaje de área boscosa (52%). En el segundo intervalo analizado (1987-1999) la UH 3 fue la que totalizó también la mayor pérdida de leñosas (31%), como se observa

en la Figura 17. En la superficie total de la cuenca, se eliminó entre 1970 y 1999 el 61% de los bosques remanentes, es decir, 3881,7 ha, siendo el primer período el de mayor descenso (47%).

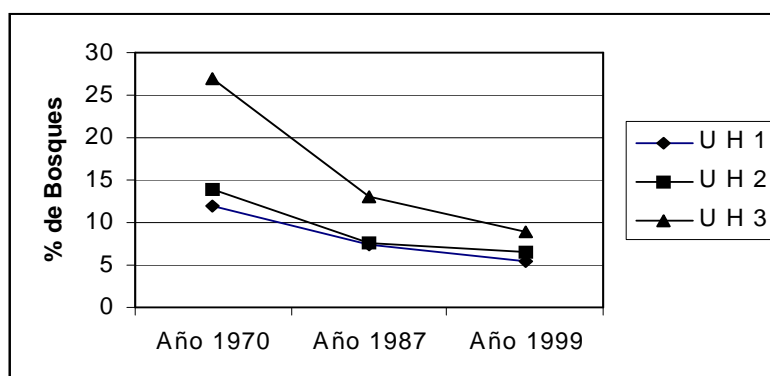


Figura 17. Evolución de la vegetación leñosa (en %) a lo largo del período bajo estudio en las unidades homogéneas.

A través de la observación remota, se pudieron detectar detalles de la dinámica de la eliminación boscosa en la cuenca. Así, por ejemplo, ciertos remanentes leñosos ubicados sobre vías de escurrimiento del terreno (conformadas por suelos no aptos para actividad agrícola), observables en las fotografías aéreas del año 1970, fueron posteriormente eliminados al incrementarse la presión expansionista de la agricultura.

Como consecuencia de la deforestación paulatina, el tamaño de las parcelas remanentes se vio afectado. Los resultados del cálculo de diferentes índices de fragmentación se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Índices de fragmentación de la vegetación leñosa obtenidos a partir de los datos relevados en los años 1970 y 1987

Unidades Homogéneas	Número de parches		Tamaño medio de parches (ha)		Tamaño relativo del parche mayor	
	1970	1987	1970	1987	1970	1987
UH 1	37	52	30,70	13,39	0,40	0,07
UH 2	58	47	33,95	19,95	0,18	0,15
UH 3	38	39	92,00	44,71	0,27	0,18
Promedio Cca.	133	138	52,22	26,02	0,28	0,13

Considerados a nivel de la cuenca, todos los índices de fragmentación empeoraron dentro del período analizado.

Las unidades homogéneas sufrieron de diferente manera la fragmentación de su superficie boscosa en el período 1970-1987. La UH 1 fue la que recibió una subdivisión más importante (el número de parches se incrementó un 50%). El tamaño medio disminuyó en la totalidad de la cuenca, pero fue más importante en la UH 1; sus parcelas, de menor tamaño en 1970, redujeron luego su superficie a menos de la mitad. El tamaño relativo de parches, que es un indicador de la conectividad, pues pondera el tamaño medio de los parches respecto a la superficie total del bosque, disminuyó mayormente también en la UH 1.

3. Evolución de los cultivos en el departamento Santa María

En las Figuras 18 y 19 se presentan los datos de la estimación anual de Producción Total del departamento Santa María para los cultivos invernales y estivales.

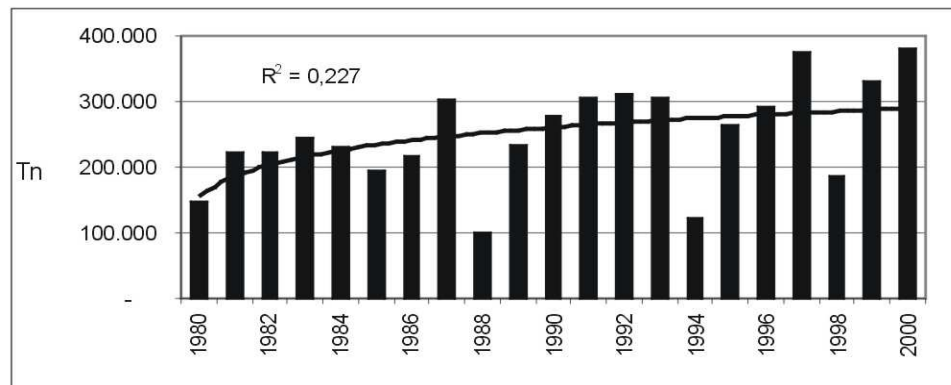


Figura 18: Producción anual de cultivos estivales del Dpto. Santa María durante el período 1981-2000.

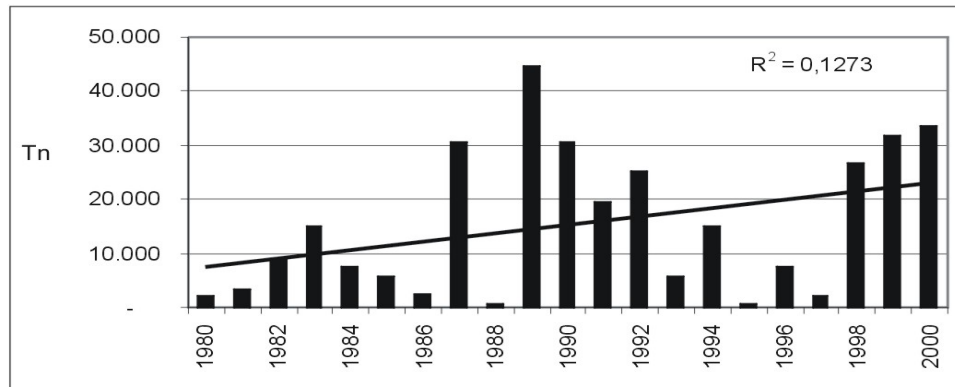


Figura 19: Producción anual de cultivos invernales del Dpto. Santa María durante el período 1981-2001.

La producción estival fue alrededor de 10 veces mayor que la invernal, siendo ésta más variable a lo largo de la serie. De la comparación de los promedios de la producción total de cultivos estivales alcanzados en la primera y segunda décadas de la serie, se observa un crecimiento del 32% ($p = 0,0264$). Este se explica con el aumento tanto de la superficie cosechada (11%), como del rendimiento promedio ponderado de los cultivos (20%).

La superficie ocupada por el cultivo de soja fue creciente: de 86.4 % de la superficie sembrada en la década 1980-90, pasó a 90.7% en la segunda década. Presentó valores máximos, superando las 127.000 ha, en los años 1988 y 1989, para estabilizarse en alrededor de las 110.000 ha a fines de la década del '90. El promedio anual de la primera década fue de 93.450 ha sembradas, con un rendimiento promedio de 1.984 Kg/ha, mientras que en la segunda década se sembraron anualmente 108.000 ha, con un rendimiento promedio de 2.228 Kg/ha.

El predominio del cultivo de soja revela una simplificación notoria de los sistemas de cultivo. Este proceso puede verse cuantificado, también, cuando se calculó el Índice de Diversidad de Shannon sobre las especies estivales cultivadas. En la primera década se obtuvo un promedio de 0,51, con un promedio de Riqueza de 4,55; en la segunda década estos valores decaen a 0,38 y 3,78, respectivamente. La Equitatividad también descendió: de 0,33 a 0,29.

4. Modificaciones en el manejo tecnológico

Dentro del proceso general de modificaciones en el uso del suelo acaecidas en la región central del país, se realizó la siguiente revisión sintética de los cambios ocurridos en la zona bajo estudio.

Tradicionalmente, se cultivaban en la zona cereales de grano grueso (maíz y sorgo granífero) y maní, en una proporción de superficie ocupada de aproximadamente de 2 a 1, respectivamente. El cultivo de oleaginosas fue creciendo en importancia, especialmente con la aparición de la soja, a comienzos de la década del 70, la cual llegó a reemplazar al maní a fines de la misma. La soja se convirtió, así, en el cultivo predominante en la zona desde comienzos de la década del 80, reemplazando además áreas dedicadas a la ganadería. Ese proceso histórico, de un uso cada vez más intensivo del suelo, trajo como consecuencias un deterioro acelerado de sus condiciones biofísicas.

Las prácticas de conservación de suelo, y la siembra directa en especial, comenzaron a desarrollarse en la zona recién a partir mediados de la década del 90. Estas técnicas de manejo del suelo y la nueva tecnología de siembra fueron paulatinamente incrementándose y potenciándose con la generalización, a partir del ciclo agrícola 1998-99 de un paquete tecnológico que involucraba el uso de soja transgénica. Las técnicas conservacionistas en el manejo del suelo pueden haber determinado una menor cantidad de agua de escurrimiento a partir de mediados de la década del '90, lo que se reflejaría, por ejemplo, en menores caudales escurridos por el límite SE de la cuenca, según lo expresado por pobladores de la localidad de Lozada.

La superficie sistematizada mediante obras de infraestructura, como la construcción de terrazas y obras de desagüe, no alcanza a ser de importancia en la cuenca, ya que no superan las 500 ha ubicadas en la región occidental de la misma.

El área bajo estudio, comparada con otras del área central de Córdoba, presenta una actividad ganadera muy reducida. Según datos del Censo Agropecuario de 1988, la superficie sembrada con especies forrajeras perennes en el departamento representa solamente el 3% de la superficie dedicada a cultivos estivales. De acuerdo a datos de Sonnet (1988), San Antonio y Cosme, que abarcan más del 60% de la

cuenca, tienen los menores porcentajes ganaderos (0,7%) entre las pedanías del área pampeana de Córdoba.

A partir del año 1993, se llevó a cabo la eliminación de los bosques de olivos establecidos en el sector NO de la cuenca, los que fueron reemplazados por cultivos de soja. Relictos de vegetación leñosa nativa continuaron extrayéndose de diferentes áreas de la cuenca hasta la fecha de elaboración de este trabajo.

5. USO DEL NDVI COMO INDICADOR DE LOS CAMBIOS TEMPORALES

Se utilizaron diferentes maneras de análisis de la información brindada por el NDVI en resolución 8 x 8 km para evaluar la dinámica temporal en la fijación fotosintética y detectar variaciones en la estructura y el funcionamiento de la UH y de la cuenca en general. También se analizó la sensibilidad de cuatro indicadores basados en la información básica del NDVI.

Se analizan diferentes maneras en que la información disponible en la serie completa de NDVI con resolución de 8 x 8 km fue utilizada para valorar los cambios temporales en la producción de los cultivos (período 1981-2001) y las relaciones observadas de este índice con las series de precipitación y producción de cultivos del departamento. Se estudia, además,

5.1 Evolución temporal del NDVI

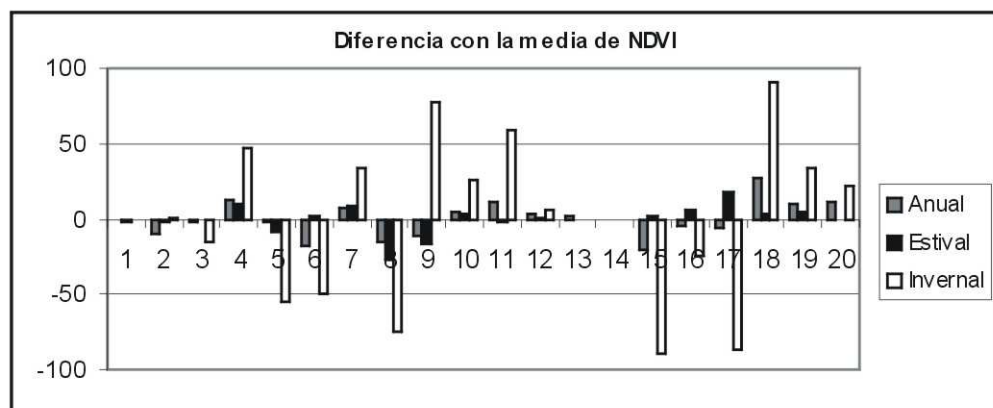


Figura 20: Valores anuales de NDVI de la cuenca, expresados como variaciones porcentuales respecto del promedio serial. Se presentan ciclos anuales, estivales (Noviembre-Abril) e invernales (Mayo-Octubre) de la serie 1981-2001.

En la Figura 20 se grafican las diferencias con respecto a la media para los ciclos anuales, estivales e invernales de los datos de NDVI de la cuenca R. García-Lozada. Allí se destaca en primera instancia, y siguiendo un patrón semejante al de las precipitaciones, una mayor variabilidad de los ciclos invernales, no mostrando tendencias definidas. Los ciclos estivales, en tanto, durante la segunda década tuvieron una mayor frecuencia de períodos superiores a la media.

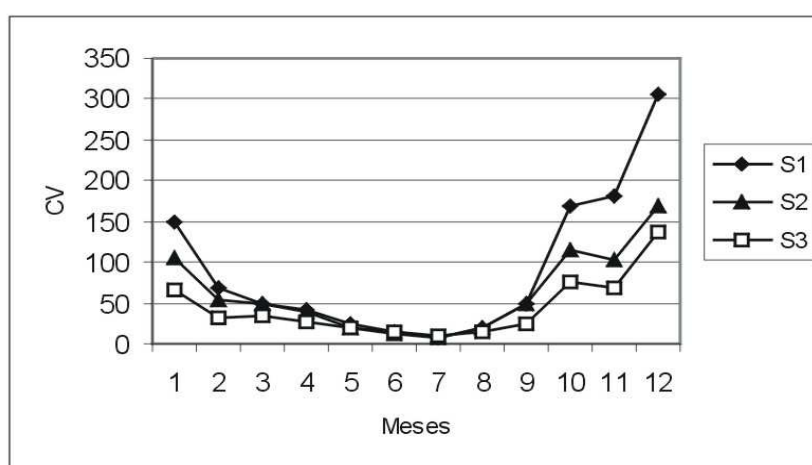


Figura 21. Coeficientes de Variación (%) de los meses del año (ordenados de acuerdo al ciclo estival setiembre-agosto) de cada unidad homogénea.

Los Coeficientes de Variación calculados para cada mes a lo largo de la serie, (Figura 21), evidencian las diferencias en el funcionamiento, siendo la UH 1 la más variable, con un promedio de CV del 90%, siguiéndoles la UH 2 (62%) y la UH 3 (40%).

Tabla 14: Promedios de NDVI para la cuenca R. García-Lozada para la serie 1981-2001 y para la primera y segunda década de este período. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$) LSD Fisher.

Período	Ciclo Anual	Ciclo Estival	Ciclo Invernal
Serie completa	0,172	0,271	0,072
1 Década	0,165 a	0,262 a	0,071 a
2 Década	0,178 a	0,284 b	0,073 a
p-valor	0,2633	0,0264	0,7463

Las diferencias entre los valores promedios de NDVI de ambas décadas analizadas manifestaron una tendencia a crecer en la segunda, siendo significativo solamente en el caso los ciclos estivales (Tabla 14).

En el caso de las unidades homogéneas, sólo los ciclos estivales de la UH 3 tuvieron diferencias significativas entre décadas, con un 8,9 % de crecimiento promedio ($p = 0.043$).

5.1.1 Modelo estadístico para la comparación de las UH

La aplicación de las funciones de **autocorrelación (fac)** y de **autocorrelación parcial (facp)** a las series de NDVI promedio de las unidades homogéneas permitió identificar que la UH 1 podía ser modelada como un proceso autoregresivo de orden 12-13. Las funciones obtenidas para la UH 2 fueron muy parecidas, identificándose también un proceso autoregresivo de orden 12-13. En la UH 3 se encontró algo similar, pero se identificó que el proceso que posiblemente generaba a la serie observada era de orden menor a los anteriores. (Ver Anexo IV). Sobre la base de esta información, el modelo lineal finalmente se especificó incorporando $m=12$ términos autoregresivos, como sigue:

$$NDVI_{i,t} = \mu + \tau_i + \sum_{k=1}^{12} \beta_k NDVI_{t-k} + \varepsilon_{i,t} .$$

Los resultados del análisis de la varianza se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Análisis de la varianza para probar la hipótesis nula de igualdad de medias de NDVI entre las unidades homogéneas.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
NDVI	672	0.86	0.86	4.70

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo	310040.75	14	22145.77	292.12	<0.0001	
UH	499.83	2	249.91	3.30	0.0376	
ndvi_1	14826.89	1	14826.89	195.58	<0.0001	0.54
ndvi_2	567.97	1	567.97	7.49	0.0064	-0.12
ndvi_3	0.89	1	0.89	0.01	0.9135	-4.7E-03
ndvi_4	1740.71	1	1740.71	22.96	<0.0001	-0.21
ndvi_5	26.59	1	26.59	0.35	0.5539	0.03
ndvi_6	85.41	1	85.41	1.13	0.2889	0.05
ndvi_7	14.90	1	14.90	0.20	0.6577	-0.02
ndvi_8	914.15	1	914.15	12.06	0.0005	-0.16
ndvi_9	128.84	1	128.84	1.70	0.1928	-0.06
ndvi_10	254.70	1	254.70	3.36	0.0673	0.08
ndvi_11	2199.54	1	2199.54	29.01	<0.0001	0.25
ndvi12	1523.15	1	1523.15	20.09	<0.0001	0.18
Error	49808.14	657	75.81			
Total	359848.89	671				

Como puede leerse de la Tabla 15, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, permitiendo concluir que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de NDVI de las UH.

El contraste utilizado posteriormente para realizar las comparaciones múltiples de las tres medias, fue la prueba DGC ($p < 0,05$) (Di Rienzo *et al.*, 2002) y permitió afirmar que el NDVI promedio de la serie UH 3 era significativamente superior al de las UH 1 y 2.

Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron a través de los gráficos de Normalidad (Q-Q plot Normal) y de Residuales vs. Predichos, respectivamente (Anexo IV) y mediante las pruebas de Shapiro-Wilks (Mahibbur, 1997) ($p = 0.2256$) y la prueba de Levene ($p = 0.8498$).

5.2 Relación entre NDVI y precipitación

Las correlaciones entre los valores mensuales de precipitación y NDVI para el período bajo estudio se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Coeficientes de correlación (Pearson) entre la serie de valores máximos mensuales de NDVI y los promedios mensuales de precipitación para la serie 1981-2001. Se presentan las correlaciones para meses coincidentes (Pp m) y precipitaciones anticipadas en 1 (Pp m-1), 2 (Pp m-2) y 3 (Pp m-3) meses.

Superposición	UH 1	UH 2	UH 3
Mes NDVI- Pp m	0,46	0,43	0,47
Mes NDVI-Pp m-1	0,68	0,67	0,69
Mes NDVI-Pp m-2	0,71	0,71	0,71
Mes NDVI-Pp m-3	0,56	0,57	0,56

En todos los casos los coeficientes resultaron significativamente distintos de cero ($p < 0,001$); las correlaciones que miden asociación con las precipitaciones de uno y dos meses anteriores al registro de NDVI, muestran las mayores correlaciones.

Al comparar los desvíos de la precipitación invernal respecto a su promedio (Figura 16) y los valores anuales de NDVI de la cuenca (Figura 20) surge que los 3 ciclos invernales con NDVI más bajos (1995, 1997 y 1988), coinciden con precipitaciones inferiores a la media de ese ciclo. Dos de tales ciclos, (1995 y 1988) correspondieron a las menores precipitaciones de la serie. En cambio, los ciclos con mejores valores de NDVI (1998, 1989 y 1991) no coincidieron con las precipitaciones más elevadas.

En los ciclos estivales existió también correspondencia entre los menores valores de NDVI de la serie (1988, 1989 y 1985) y los años de precipitaciones desfavorables. Entre ellos, 1988 coincidió con el verano más seco y 1985, con el tercero en esa escala. Los ciclos estivales con elevados valores de NDVI, a diferencia de los invernales, presentaron menos contrastes respecto a la lluvia; así, en 1997, coincidieron valores máximos en ambas variables, y en 1984, hubo un NDVI elevado y precipitaciones desfavorables.

Con la finalidad de encontrar un patrón general a este comportamiento, se calcularon las correlaciones entre el NDVI y la precipitación de ciclos considerados favorables y desfavorables (precipitación superior e inferior a la media, respectivamente).

Comparando la serie completa, los mejores ajustes se produjeron en los ciclos estivales, con correlaciones significativas en todas las unidades homogéneas.

Las correlaciones para los ciclos estivales favorables (octubre a marzo) no fueron significativas (Tabla 17). En cambio, en los años desfavorables estas correlaciones mostraron un mejor ajuste, llegando a ser significativo a nivel de la cuenca. Es decir, la precipitación es el factor determinante de la captación fotosintética en los períodos estivales secos y no en los favorables, donde otros factores pueden estar incidiendo. La asociación entre la producción fotosintética evaluada por el NDVI y la precipitación, tanto en los años secos como húmedos, tendió a ser menor en la UH 3 y máxima en la UH 1.

Tabla 17: Coeficientes de correlaciones (Pearson) entre precipitación mensual (abril-setiembre y octubre-marzo) y NDVI mensual (mayo-octubre y noviembre-abril) para ciclos invernales y estivales de la serie 1981-2001. Los años de precipitación favorable y desfavorable son aquellos en los que sus precipitaciones exceden o son menores a la media, respectivamente.

	Ciclos Estivales				Ciclos Invernales			
	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca
Años Pp favorables	0.45	0.30	0,30	0,23	0.48	0.35	0.27	0.35
<i>P-valor</i>	<i>0.26</i>	<i>0.46</i>	<i>0.46</i>	<i>0.59</i>	<i>0.23</i>	<i>0.39</i>	<i>0.52</i>	<i>0.40</i>
Años Pp desfavorables	0.78	0.69	0.61	0,74	0.63	0.59	0.37	0.56
<i>P-valor</i>	<i>0.01</i>	<i>0.04</i>	<i>0.08</i>	<i>0.02</i>	<i>0.09</i>	<i>0.12</i>	<i>0.37</i>	<i>0.25</i>
Serie completa	0,59	0,58	0,62	0,61	0.36	0,50	0,23	0,43
<i>P-valor</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.02</i>	<i>0,16</i>	<i>0,04</i>	<i>0,37</i>	<i>0,09</i>

En el caso de los ciclos invernales, los mejores ajustes entre ambas variables se produjeron acumulando la precipitación ocurrida en época invernal (Abril-Setiembre), junto al excedente proveniente del verano. Para ello, al valor del ciclo invernal se sumaron las precipitaciones estivales que le antecedían y que excedían el valor de 468 mm, equivalente al requerimiento hídrico ponderado de los cultivos de soja y maíz (Della Maggiora *et al.*, 2000). Las precipitaciones de los ciclos invernales secos presentaron correlaciones de valores elevados con los datos de NDVI. En la Tabla 17 se nota que las unidades homogéneas se diferenciaron en su respuesta frente a la lluvia, presentando la UH 1 el mayor ajuste y la UH 3 el menor; esto pone en evidencia su menor dependencia de la precipitación.

Tabla 18: Coeficiente de correlación (Pearson) entre la precipitación y la producción total del departamento Santa María para los ciclos agrícolas estivales e invernales.

Período Correlacionado	Coeficiente	p-valor
Estival	0.76	1.7 E-04
Invernal	0.34	0.22

Los datos de la Tabla 18 permiten comparar los ajustes de las estimaciones de producción del departamento Santa María con respecto a la precipitación, con los obtenidos del NDVI. Estas correlaciones confirman, con mayor claridad aún que los datos de la Tabla 17, las mejores correlaciones de los ciclos estivales que los invernales.

5.3 Relación entre NDVI y cultivos del Departamento

Los mejores ajustes se obtuvieron con la variable Producción Total del Departamento, que sintetiza a Superficie Cosechada y Rendimiento de los Cultivos. En las Tablas 19 y 20 se presentan las mejores correlaciones obtenidas.

Tabla 19: Coeficientes de correlación (Pearson) entre valores de NDVI de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos invernales del Dpto. S. María.

Período considerado del NDVI	Coeficientes de Correlación	p-valor
Agosto + Setiembre	0.84	1.5E-05
Ciclo invernal completo	0.79	1.0E-04

Tabla 20: Coeficientes de correlación (Pearson) entre valores de NDVI de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos estivales del Dpto. S. María.

Período considerado del NDVI	Coeficientes de Correlación	p-valor
Febrero	0.69	1.1E-03
Enero + Febrero + Marzo	0.67	1.7E-03
Ciclo estival completo	0.72	1.0E-03

Todas ellas fueron elevadas y significativas, ajustando mejor los cultivos invernales que los estivales. La mejor correlación para los cultivos invernales se alcanzó con la suma de Agosto y Setiembre, lo que sugiere la posibilidad de estimar tempranamente la producción a partir de datos satelitales.

En estación estival se obtuvo un buen ajuste con la sumatoria de NDVI de los meses de Enero, Febrero y Marzo. Un valor similar fue obtenido para la correlación del mes de Febrero, posibilitando en este caso estimar la producción de granos de este ciclo a partir de las mediciones de ese mes solamente.

No se observaron diferencias entre los valores de correlación de los datos de producción departamental con los diferentes valores de NDVI de las unidades homogéneas.

6. Otros indicadores basados en el NDVI

6.1 *delta-NDVI (d-NDVI) y Derivada del NDVI (D-NDVI)*

Cada unidad homogénea fue caracterizada con los valores alcanzados por los índices d-NDVI y D-NDVI (Tablas 21 y 22).

Tabla 21: d-NDVI y fecha del máximo valor para cada unidad homogénea. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.01$). LSD Fischer.

	UH 1	UH 2	UH 3	p-valor
Valor máximo	0,31 b	0,30 b	0,24 a	0.0002
Fecha valor máximo	18-Dic a	14-Dic a	01-Dic a	0.0715

Tabla 22: Derivada del NDVI y fecha del máximo valor para cada unidad homogénea. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.01$). LSD Fischer.

	UH 1	UH 2	UH 3	p-valor
Valor máximo	0,20 b	0,18 ab	0,15 a	0,0261
Fecha valor máximo	02-Ene a	02-Ene a	25-Nov b	0.0028

Los resultados encontrados indican que la UH 3 presenta una velocidad de crecimiento máxima estival menor. Además, la fecha en que se alcanza ese máximo valor en esta unidad homogénea es significativamente más temprana que la de los otros dos.

La variable Derivada del NDVI mejoró la discriminación entre las diferentes unidades homogéneas, tanto por sus valores máximos como por las fechas en que ocurrieron.

6.2 *Índice de condición de la vegetación (ICV)*

En la Tabla 23 se presentan los valores de ICV calculados para cada uno de las UH y para los ciclos estivales e invernales secos, es decir aquellos con suma de precipitación inferior a la media estacional respectiva.

Tabla 23: Valores de ICV promedio de los ciclos estivales e invernales secos (precipitación inferior a la media) de cada unidad homogénea.

	Verano			Invierno		
	UH 1	UH 2	UH 3	UH 1	UH 2	UH 3
ICV	55,5	54,2	52,3	41,3	41,4	46,5
CV	30,1	44,1	23,9	59,5	55,5	43,2

Las diferencias entre los promedios de las unidades homogéneas no fueron significativas, para ninguno de los ciclos estacionales analizados. Los coeficientes de variación fueron menores en los ciclos estivales y, en ambas estaciones, la UH 3 presentó los más bajos.

Los promedios de ICV obtenidos considerando los 6 ciclos con menores valores de ICV invernales³ fueron: 26.2, 26.0 y 33.6 para las UH 1, 2 y 3, respectivamente, aunque las diferencias detectadas no fueron significativas. Los promedios estacionales de estos ciclos críticos fueron correlacionados con precipitaciones acumuladas considerando distintos períodos⁴. Las mejores correlaciones se obtuvieron con la suma semestral de precipitaciones de Abril a Setiembre (Tabla 24).

Tabla 24: Coeficientes de correlación de Pearson entre ICV promedio invernal (mayo-octubre) de cada unidad homogénea y la suma de precipitación otoño-invernal (Abr-Set). Se consideraron los ciclos más secos de la serie.

	UH 1	UH 2	UH 3
Coefficiente de Correlación	0,675	0,831	0,716
p-valor	0.14	0.04	0.11

En el período estival, durante el ciclo agrícola 1988-89 cuya precipitación no alcanzó a satisfacer la necesidad de consumo hídrico de la soja, los valores de ICV alcanzados por las unidades homogéneas fueron muy contrastantes: 17,4, 25,7 y 31,7 para las UH 1, 2 y 3, respectivamente.

³ años con menores valores de ICV: 1982, 1983, 1986, 1988, 1995 y 1997

⁴ Se sumaron las precipitaciones ocurridas (i) durante las estaciones del Otoño, Invierno y Primavera, (ii) entre los meses de Abril a Setiembre (iii) entre los meses de Abril a Setiembre más el excedente proveniente del verano y (iv) entre los meses de Marzo a Noviembre

Con la finalidad de comparar la sensibilidad de este índice con la observada con el NDVI, se correlacionaron los datos de producción total del departamento Santa María con el ICV (Tabla 25).

Tabla 25: Coeficientes de Correlación de Pearson entre valores de ICV de la cuenca R. García-Lozada y la producción total de cultivos invernales y estivales del Dpto. Santa María.

Período considerado	Coeficientes de Correlación	p-valor
Ciclo invernal	0.75	3.8E-04
Ciclo estival	0.71	4.1E-04

Tanto los ciclos estivales como los invernales correlacionaron positiva y significativamente, con valores muy semejantes a los obtenidos con los datos de NDVI (Tablas 19 y 20). Las correlaciones considerando sólo los 6 ciclos invernales más críticos, mostraron que el NDVI ($r = 0,82$) tuvo un mejor comportamiento que el ICV ($r = 0,75$).

6.3 Diferencia entre el máximo y el mínimo valor del NDVI (Mm)

Las diferencias entre los valores de NDVI máximos y mínimos de los períodos anuales para la serie 1981-2001 fue significativamente menor en la UH 3 que en las otras dos (Tabla 26). Estas diferencias se manifestaron considerando tanto los valores netos del NDVI, como los proporcionales de cada unidad homogénea.

Tabla 26: Promedios de los máximos y mínimos anuales y de las diferencias entre el máximo y el mínimo NDVI anual de las unidades homogéneas de la cuenca Rafael García-Lozada, durante la serie 1981-2001. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$) LSD Fisher.

Mm Promedios	UH 1	UH 2	UH 3	Cuenca
Máximos anuales	0,40 a	0,39 a	0,38 a	0,40
Mínimos anuales	-0,01 a	0,01 ab	0,03 b	-0,01
Diferencia entre máximo y mínimo	0,41 a	0,38 a	0,35 b	0,41
Diferencia proporcional a la media	2,66 a	2,33a	1,86 b	2,45

Este indicador refleja una mayor estabilidad en el funcionamiento fotosintético de la UH 3, especialmente determinado por sus valores mínimos más elevados.

IV. C - Integración de Resultados

La utilización de un conjunto de indicadores indirectos basados en el monitoreo remoto de la vegetación permitió evaluar la estructura física y biológica del agroecosistema y detectar los procesos y las tendencias a los que estuvieron sujetos. Estas características, junto con el análisis de las relaciones entre el NDVI y la precipitación, la calidad del suelo y las estadísticas de cultivos del departamento Santa María, permitieron interpretar el funcionamiento de unidades homogéneas del territorio y establecer un conjunto de indicadores capaces de evaluar la productividad, la eficiencia y la estabilidad en las que se fundamenta la sustentabilidad ambiental de estos agroecosistemas (Tabla 27 y Figura 22).

Tabla 27: Indicadores de sustentabilidad evaluados para las unidades homogéneas de la cuenca R. García-Lozada.

Indicador	UH 1	UH 2	UH 3	Valor máximo	Aspecto de la Sustentabilidad ^a
Porcentaje de bosques óptimo ^b	0,28	0,31	0,54	1.00	E
Promedio NDVI anual	0,84	0,89	1,00	0,19 ^g	P
Capacidad para el doble cultivo ^c	0,36	0,44	0,73	1.00	P
Promedio ICV años secos	0,67	0,79	1,00	0,32 ^g	Ef
Estabilidad NDVI anual ^d	0,85	0,75	1,00	0,11 ^g	E
Diferencia max mín NDVI ^e	0,70	0,79	1,00	0,35 ^g	E
Independencia a la Pp en veranos secos ^f	0,22	0,31	0,39	1.00	Ef
Independencia a la Pp en inviernos secos ^f	0,27	0,41	0,63	1.00	Ef
Biomasa remanente del cultivo	0,93	0,96	1,00	9,2 ^h	E

^a E = Estabilidad; P = Productividad; Ef = Eficiencia; ^b 30%, según Tinto (1978)

^c Correlación entre la suma invernal de NDVI y los rendimientos del Dpto. Santa María en años con siembra de trigo. (Tabla 8).

^d $(CV * 10^{-1})$. CV (en tantos por uno) de los promedios anuales de NDVI (Tabla 4)

^e inversa de las diferencias proporcionales a la media entre máximos y mínimos NDVI anuales (Tabla 26)

^f Correlación (1-r) entre precipitación y NDVI de años secos. (Tabla 17)

^g Valor obtenido por la UH 3; ^h Valor obtenido por la UH 3, en Ton/ha/año

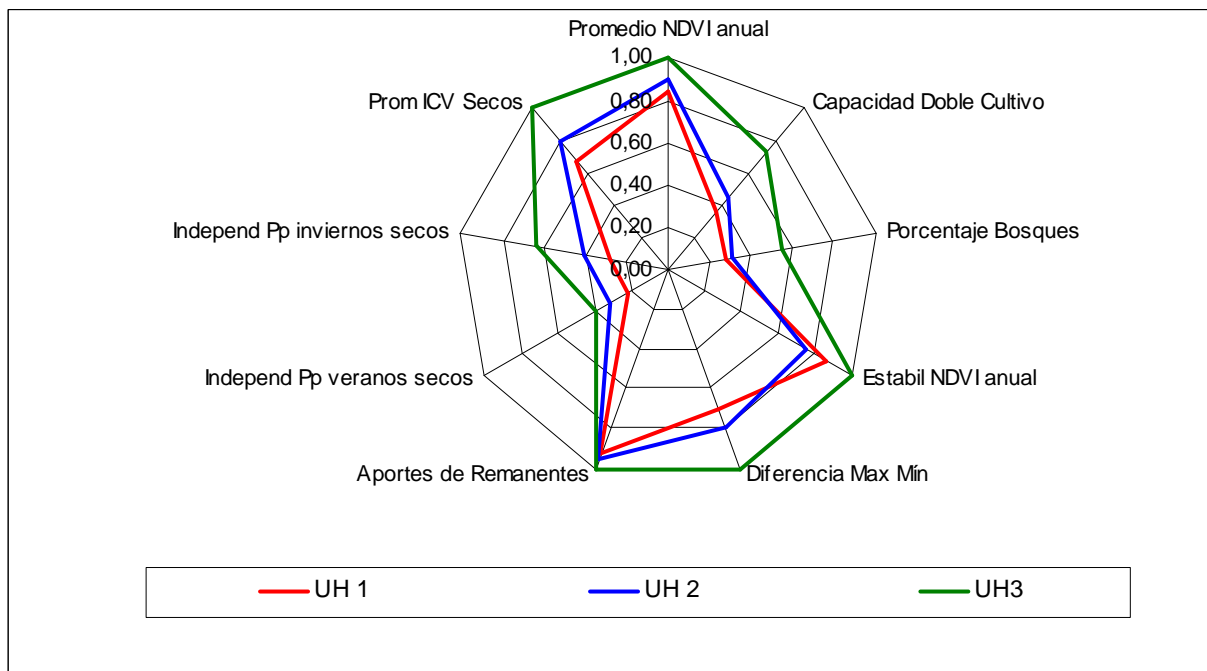


Figura 22: Evaluación de la sustentabilidad de las unidades homogéneas de la cuenca R. García- Lozada

Mediante el análisis de las particularidades de las características físicas (geomorfología, suelo) y de la estructura y dinámica de la vegetación natural y cultivada, es posible realizar una interpretación del funcionamiento de los diferentes ambientes de la cuenca.

En primer lugar, la UH 3, que se ubica en la cabecera de la cuenca y está conformada principalmente por la Planicie Ondulada, se halla sometida a menor erosión por no presentar escorrentía concentrada. Además, es la que ha permanecido con una mayor cobertura de vegetación natural, presenta una proporción de áreas con una menor historia agrícola y tiene un índice de productividad del suelo más elevado. Esta unidad presenta una **productividad** total más elevada y una mayor frecuencia de dobles cultivos, lo que aporta más remanentes de cultivos al suelo. De acuerdo a lo analizado por Ghera *et al.* (2000), esta provisión de materiales vegetales constituye la fuente en la que se sustenta la estructura biológica del suelo. Estas características estructurales y funcionales le brindan a esta unidad homogénea la posibilidad de utilizar en forma más **eficiente** la energía, el agua y los nutrientes disponibles, como se evidenció por su capacidad de incrementar la actividad fotosintética ante episodios hidrológicos más favorables como los de la segunda década analizada y por mantener

la vegetación en condiciones más aceptables ante eventos de sequía, tanto invernales como estivales. Esta mayor eficiencia regional puede suponerse que se manifiesta también a nivel de los sistemas de producción, ya que los aportes de energía a través de los subsidios por vías tecnológicas son similares a los de las otras regiones analizadas. Por otra parte, esta unidad homogénea mostró una menor variabilidad de sus rendimientos y una menor diferencia entre sus valores máximos y mínimos. A su vez, en años secos presentó la mayor independencia productiva ante la pluviometría. En virtud de estas características funcionales, que evidencian una mayor capacidad para amortiguar los efectos del ambiente, puede considerarse a esta unidad territorial como la de mayor **estabilidad** en la cuenca.

Por otro lado, la UH I se ubica en la parte más baja de la cuenca y está conformada principalmente por una superficie plana como es la Planicie Central y una porción importante de la Faja Aluvial del Río Xanaes. Esta unidad presenta una historia de uso agrícola más antigua, con un porcentaje promedio de bosques menor y, actualmente, una calidad de suelo inferior. En esta zona se registró la **productividad** más baja de la cuenca, implicando 680 Kg anuales menos de remanentes de cultivos que en la UH 3. Su **eficiencia** frente a condiciones de sequía fue la más reducida y no incrementó su producción frente a episodios de precipitación favorable. Respecto a la **estabilidad** de su producción fotosintética, los indicadores coincidieron en mostrar en esta unidad homogénea las situaciones más desfavorables, con una alta variabilidad anual e interanual y un alto grado de dependencia a la precipitación.

Por último, en la UH 2, de manera semejante a lo que ocurre en la 1, predomina la Planicie Central y presenta amplias zonas de Planicie Ondulada aunque en grado inferior a la UH3. Esta conformación le confiere características físicas intermedias a las de las unidades anteriores. El grado de eliminación de la vegetación permanente, la antigüedad de su historia agrícola y el índice que refleja la calidad del suelo, muestran valores ubicados entre los de las unidades 1 y 3. Tales hechos se reflejan en los valores intermedios de todos los indicadores evaluados, referidos a parámetros de **productividad, eficiencia y estabilidad**.

V. Discusión de Resultados

La hipótesis del trabajo consiste en la posibilidad de evaluar la sustentabilidad del territorio de manera indirecta, a través del estudio de la vegetación como un indicador dinámico de la misma. El argumento y la originalidad de este estudio radican, entonces, en el uso de la vegetación como un indicador biológico de diversas propiedades del ecosistema.

Con la finalidad de evaluar e interpretar comparativamente la heterogeneidad espacial de la cobertura del territorio y los cambios temporales ocurridos en la cuenca R. García-Lozada durante un período de dos décadas, se utilizó un conjunto de indicadores indirectos basados en el monitoreo remoto de la vegetación. Estos indicadores, tal como lo señalan Cáceres (2004) y Rasul (2003), registraron los procesos y las tendencias de la productividad primaria neta, la eficiencia y la estabilidad dentro de este agroecosistema.

Aunque existe la recomendación general del uso de la serie de datos NOAA-AVHRR para escalas globales o regionales (Dymond *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 1995), este estudio se enmarca en los intentos que muchos autores, y con diferentes técnicas (Maselli *et al.*, 2001; Maselli, 2004; Kerdiles y Grondona, 1995; Paruelo, 2004), realizan para lograr su utilización en escalas de mayor detalle.

Debido a que los cálculos de los indicadores de procesos utilizados no se podrían haber realizado sobre la serie LAC de escasa extensión temporal y discontinua, se emplearon las únicas disponibles de largo plazo y compatibles con los análisis de la dinámica de la vegetación de la cuenca bajo estudio. Tales condicionamientos, necesariamente, conllevaron a subordinar la aspiración a una precisión absoluta en las delimitaciones territoriales. Con la finalidad de evaluar el grado de exactitud o de ajuste de los datos que se disponían de resolución relativamente baja, se comparó su desempeño con respecto de la serie LAC, a través de diferentes pruebas estadísticas.

El valor y significancia de la correlación realizada entre ambas series de datos indica que durante el período analizado el funcionamiento fotosintético de las unidades territoriales, sintetizado en una imagen resultante del AST, guarda una estrecha

correspondencia entre ambas series. Las elevadas correlaciones obtenidas permiten avalar las observaciones realizadas a partir de la serie de menor resolución espacial pero continua y con mayor amplitud temporal. Estos valores aseguran, además, que la delimitación del área de trabajo en las imágenes de ambas series se ha realizado en forma similar

El ANAVA realizado sobre los valores del componente 1 del AST de los píxeles 1 x 1, cuando se los ordena de acuerdo con los píxeles de mayor tamaño, arroja una clara separación de las tres unidades homogéneas. El análisis de conglomerados, en conjunción con aquella prueba estadística, lleva a considerar que la clasificación con los píxeles 8 x 8 retiene la mayor parte de la estructura de grupos que puede identificarse en la imagen de mayor precisión, preservando la idea de áreas geográficas homogéneas. La sectorización realizada se considera entonces aceptable, ya que los niveles de mezcla de los diferentes tipos de cobertura son compatibles con los objetivos de este estudio.

La clasificación en tres unidades homogéneas representa de manera general los sectores altos, medios y bajos de la cuenca Rafael García-Lozada. Con el uso de las imágenes de mayor resolución, surge un porcentaje de mezcla a nivel de la zona intermedia de la cuenca (zona de transición), mientras que la separación es más notable entre las zonas alta y baja de la misma.

En suma, puede señalarse que, ante el obstáculo que representa una serie de tiempo discontinua y una resolución en principio insuficiente, se ha ensayado aquí una estrategia de combinación de bondades y dilución de defectos que se pudo demostrar como efectiva, a partir de los resultados obtenidos en los análisis estadísticos, que son suficientemente explicativos en este sentido.

Desde el momento en que la vegetación es el elemento del sistema que sintetiza diferentes variables ambientales (González Bernaldez, 1981; Matteucci y Colma, 1982), esta tiende a presentar correspondencia con la heterogeneidad geomorfológica y edáfica. Así, es notoria la manera en que los datos de vegetación, representados en la imagen del primer componente del AST, correlacionaron con el mapa geomorfológico. Esta relación surgió en una primera instancia en forma visual, a partir de la simple superposición de ambas imágenes y fue corroborada

numéricamente cuando se correlacionaron los datos del Índice de Productividad de las principales regiones geomorfológicas y de las unidades homogéneas con los valores medios del Índice Normalizado de Vegetación. Este ajuste se observó con los dos niveles de resolución utilizados.

Un porcentaje elevado de la cuenca (81%) posee suelos con una buena potencialidad productiva, expresada en Índices de Productividad taxonómicos por encima de 60 (Apéndice III). No obstante, los valores de productividad cartográficos a nivel de la cuenca son modestos, especialmente en las unidades homogéneas 1 y 2, con valores del IP de 37,6 y 40,6, respectivamente (Ver Tabla 3). Esto se explica porque, al presentar una elevada susceptibilidad a la erosión debida, fundamentalmente a la longitud de las pendientes, a la estructura de la vegetación y al uso de la tierra, estas zonas han sufrido un proceso de erosión acelerada, que se refleja en los numerosos síntomas evaluados por Sanabria *et al.* (1997). Asimismo, Morello y Matteucci (1997) para un suelo *Argiudol típico*, ubicado al SE de la región pampeana y dentro de los rangos de pendiente que se presentan en la cuenca Rafael García Lozada, citan pérdidas de suelo de 10-20 ton/ha/año para 0-1% de pendiente y de 50,2 ton/ha/año para el 3%. Estos procesos erosivos, sumados a la susceptibilidad a anegamientos periódicos de las áreas bajas de la cuenca, llegan a comprometer la calidad productiva real de gran parte de los suelos.

EN GENERAL, PUEDE NOTARSE QUE LA COBERTURA DE VEGETACIÓN LEÑOSA EN ESTA REGIÓN HA QUEDADO REDUCIDA A NIVELES MÍNIMOS (ENTRE 5 Y 9 %), MOSTRANDO ADEMÁS ELEVADOS ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN Y HETEROGENEIDAD EN SU DISTRIBUCIÓN ESPACIAL. ESTOS VALORES DE COBERTURA BOSCOSA ESTÁN MUY POR DEBAJO DEL NIVEL ÓPTIMO QUE, DE ACUERDO A LO QUE RECOMIENDA TINTO (1978), DEBERÍA ALCANZAR A 30 % EN TIERRAS LLANAS.

Entre los años 1970 y 1999, se produjo en la cuenca una eliminación de casi 4.000 ha de bosques, lo cual representa el 11% de su superficie. El mayor porcentaje fue perdido por la UH 3, manteniendo, no obstante, la mayor cobertura de leñosas de la cuenca. En los sectores centro y sudoeste de la cuenca la deforestación fue más

antigua, presentando superficies boscosas menores a la mitad de la recomendada como sustentable (Tinto, 1978) ya en los relevamientos de 1970, lo que determina una más prolongada y extendida afectación de la calidad de estos suelos. La UH 3, recién en el relevamiento del año 1987 alcanza esos valores reducidos

La simplificación severa de la estructura biológica del sistema, como en este caso el reemplazo de la vegetación leñosa natural por otra cultivada de carácter herbáceo, es mencionada en general como responsables de una serie de consecuencias sobre el ambiente físico y biológico. Así, Altieri (1983), al referirse al papel potencial de los árboles en el agroecosistema, menciona su contribución a mejorar: (i) las características químicas y físicas del suelo, desempeñando además un rol de protección del mismo; (ii) el microclima, en aspectos tales como la temperatura, viento y humedad relativa; (iii) la hidrología, ya que las características estructurales y funcionales de los árboles tienen efectos sobre el balance total de agua del sistema; (iv) los componentes biológicos asociados, que pueden beneficiarse como resultado de los efectos enunciados más arriba y (v) la productividad, ya que muchos árboles producen un sinnúmero de productos diferentes e importantes tanto para los humanos como para los animales.

De manera adicional, junto a la reducida superficie cubierta por leñosas remanentes, debe considerarse el grado de fragmentación que presenta su estructura espacial. Pudo constatarse en forma clara el incremento de la fragmentación de los parches de vegetación leñosa entre los años 1970 y 1987, lapso en el cual los indicadores evaluados, *número de parches*, *tamaño medio* y *tamaño relativo*, mostraron este deterioro (Tabla 13). En este caso, la UH 3 mantuvo también los mejores valores para todos estos índices. El incremento de la fragmentación tiene implicancias sobre el nivel de funcionamiento de materia y energía de la cuenca y, fundamentalmente, sobre la sobrevivencia y circulación de la fauna (Environmental Protection Agency, 1994; Ghersa *et al.*, 2000). Dos de los índices de fragmentación evaluados reflejan acabadamente esta situación: el tamaño medio de parches, que difiere ampliamente en las diferentes unidades homogéneas, tiene un promedio a nivel de la cuenca, de 26 ha, y el índice de conectividad alcanza un valor muy reducido (0,13). Se podría suponer que con estos niveles de fragmentación muchas especies son excluidas al no encontrar una superficie mínima (Mac Arthur y Wilson, 1967). Así por ejemplo, Lomolino (1999), evaluando la presencia del ave *Bonasa bonasia* en

parcelas de bosques rodeados por campos agrícolas, cita que solo estaba presente en fragmentos superiores a las 25 ha y con un grado de aislamiento menor a los 250 m.

Dentro de las consecuencias negativas de la pérdida y la fragmentación de la vegetación natural, Morello y Matteucci (1997) analizan la desaparición de componentes críticos del ecosistema, como los llamados *eslabones móviles* (elementos que colaboran en la dispersión y polinización) y *mutualistas clave* (especies que les sirven de alimento o hábitat). Esto produce una desarticulación de las cadenas tróficas, desaparece o se atenúa el control biológico y algunas especies se vuelven plagas.

Es de resaltar, tal como se expresara con anterioridad, el hecho de que en la región media y baja de la cuenca la deforestación paulatina tuvo el agravante de realizarse, en muchos casos, sobre áreas boscosas que perduraban sobre las vías de escurrimiento y que, al presentar impedimentos a la actividad agrícola, se mantenían como reductos protegidos. Es decir que, en el transcurso de las dos últimas décadas, al verse deteriorado de tal manera el estado de la vegetación, distintos efectos perjudiciales afectaron el funcionamiento del agroecosistema, tal como lo manifiestan Altieri (1995), Morello y Matteucci (1997) y Ghersa *et al.* (1998). Estos efectos se sobrepusieron en dos niveles jerárquicos diferentes: a nivel local (lote agrícola-establecimiento), debido a la simplificación extrema de la estructura vegetal realizada en un ambiente de semiaridez y, a escala regional (cuenca), debido a la desprotección de los puntos de concentración hídrica. A través del estudio de las unidades homogéneas del paisaje, se abordó el análisis del funcionamiento de las mismas a un nivel de detalle intermedio. Se concuerda así con Jones *et al.* (1998), quienes manifestaron la necesidad de integrar la información derivada de indicadores a nivel del paisaje, con otros derivados de los niveles de finca y de grupos de informantes comunitarios.

Evaluaciones realizadas en diferentes sectores de la cuenca, reafirman el rol fundamental de la cobertura del suelo aportado por una estructura de vegetación como el bosque y su influencia en la regulación de los flujos de entrada y salida y por ende en la disponibilidad de agua. Así por ejemplo, Leguía *et al.* (2004) en establecimientos cercanos a la localidad de Lozada, midieron tasas de infiltración, porosidad, estabilidad estructural y materia orgánica, muy superiores en el suelo del bosque con relación a lotes agrícolas bajo labranza convencional y siembra directa. En el sector NO de la

cuenca, Aoki (2002), a través de determinaciones de las propiedades hidráulicas, estimó una disminución del 50 al 70 % de la funcionalidad superficial del suelo en el sistema de monocultivo de soja manejado con labranza convencional con respecto al estado prístino del bosque nativo.

Este grado de simplificación de la estructura original llevada a cabo por la deforestación, debe ser considerado conjuntamente con el proceso de agriculturización de estos ambientes, cuyos importantes efectos negativos sobre la calidad y la salud del suelo y sobre el rendimiento de los cultivos en la región central del país ya han sido analizados por Morello y Matteucci (1997), Casas (1985), Coscia (1991 y 1992) y Marelli (1988). El incremento del área sembrada en 11.000 ha con cultivos anuales, según lo registrado a lo largo del período analizado, supera al promedio de superficie deforestada, 4.000 ha. Esto significa que la agricultura fue reemplazando, además, áreas de uso ganadero, que en la cuenca históricamente tuvieron muy baja representación.

Es importante considerar que en el departamento Santa María, particularmente en sectores significativos de la cuenca R.García-Lozada, el cultivo de maní fue tradicional hasta finales de la década del 70. Esta oleaginosa presenta la característica de ser muy exigente en cuanto a labores del suelo; y además sus remanentes son escasos y de muy rápida degradación, lo que tiende a deprimir la materia orgánica del suelo. (Martelotto, 2003).

Por otra parte, los índices de diversidad, riqueza y equitatividad de las especies cultivadas en el Departamento Santa María, mostraron fuertes descensos entre la primera y segunda décadas estudiadas. Los índices de diversidad y equitatividad, cuyos promedios para el período 1981-2001 equivalen a la mitad de los medidos por Alessandria *et al.* (2000) para sistemas productivos de la región central de Córdoba, evidencian una clara homogeneización de la estructura de los cultivos.

El cultivo de la soja alcanza actualmente más del 90% de la superficie cultivada del departamento. Este monocultivo es una práctica que ha cobrado una importancia creciente en los últimos años, debido a varias razones. Entre ellas, se destacan la mayor rentabilidad relativa de este grano, un desarrollo tecnológico que simplifica su cultivo y, dentro de los cultivos de mayor difusión en el área, la menor sensibilidad

desde el punto de vista productivo que manifiesta frente a las condiciones de degradación física y química de los suelos (Senigaglia *et al.*, 1997). No obstante, y a modo de círculo vicioso, el monocultivo de soja favorece aún más los procesos de deterioro edáfico propios de una agricultura continuada. Esto se debe, como en el caso del maní, al menor aporte de materia orgánica que realiza su rastrojo, en comparación con cultivos de gramíneas, como por ejemplo maíz y trigo. Los remanentes de la soja, además, son descompuestos rápidamente, debido a su baja relación de C/N y a la coincidencia de los períodos de laboreo del suelo (en el caso del manejo convencional), siembra y crecimiento inicial con una época de alta erosividad de las lluvias (Alessandria *et al.*, 1997; Santanatoglia *et al.*, 1994).

La homogeneización del territorio puede incrementar la fragilidad del sistema frente a condiciones adversas del ambiente (Sarandón y Sarandón, 1996) y provocar cambios significativos en el diseño del paisaje y los procesos ecológicos (Solbrig y Morello, 1997, Jones *et al.*, 1998). Así, el patrón de los diferentes usos del terreno que se establece en un mismo momento en una cuenca tiene un enorme efecto sobre la dinámica de transferencia de materiales. De acuerdo con Morello y Matteucci (1997), se hace necesario planificar los usos de cada lote de una unidad productiva, introduciendo modalidades de manejo que promuevan la desaceleración del transporte de materiales.

De acuerdo a las entrevistas realizadas, diversas prácticas de conservación del suelo, como las obras estructurales de sistematización hidrológica, no alcanzaron a generalizarse en la zona de estudio. Sin embargo, y según lo señala a Aoki (2002), en la región solamente se destacó la siembra directa como una práctica conservacionista que presenta diversos beneficios sobre las tasas de infiltración, escurrimiento y erosión y la conservación del agua almacenada (Gil y Garay, 2001; Papendick, 1996).

Por las razones expuestas, y a pesar de que los sistemas predominantes de manejo de los cultivos fueron tornándose cada vez más conservacionistas, todavía se encuentran muy lejos de ser ambientalmente sustentables a raíz de los procesos de deforestación, agriculturización y homogeneización del uso del territorio.

Resultó relevante que mediante series de imágenes de baja resolución pero ampliamente disponibles en la Web, se puedan identificar unidades homogéneas con un funcionamiento agroecosistémico distinto, a la escala de detalle considerada. Estas

diferencias fueron demostradas, de manera principal, a través del modelo estadístico de análisis de series temporales ajustado para las series de NDVI de las tres unidades homogéneas. Mediante este modelo se pudo demostrar, además, que la UH 3 presenta un NDVI promedio superior al de las otras dos unidades.

Asimismo, las estructuras de autocorrelación calculadas, al proporcionar un término de $m = 12$ meses para las diferentes unidades homogéneas, le confirieron sentido agronómico y simplicidad al modelo lineal obtenido. Es decir, cada registro mensual de NDVI se mostró independiente de una historia prolongada de uso del territorio, como la que resultaría, por ejemplo, de la consideración de los períodos plurianuales anteriores. En contraste, resalta la practicidad de la función de pronóstico derivada del modelo, la que permite estimar el rendimiento fotosintético mensual a partir de los datos de NDVI sólo del año precedente.

Las mayores estimaciones obtenidas en el cálculo del rendimiento de los cultivos a partir de la PPN potencial respecto de los promedios del departamento Santa María, podrían estar explicadas por la presencia de factores que condicionan la expresión de la captación fotosintética medida en los rendimientos agrícolas. Estos factores intervinientes podrían ser, entre otros: presencia de la superficie boscosa antes mencionada, distinto grado de enmalezamiento, estrés hídrico sufrido por el cultivo y limitaciones en el abastecimiento de nutrientes. La productividad diferencial de los cultivos realizados en las diferentes unidades homogéneas, podría ser un factor adicional para un diferente funcionamiento de las mismas. Así, el mayor remanente de la producción que es aportado anualmente por la UH 3 mediante los rastrojos, implica una contribución significativamente diferente de materia orgánica incorporada al suelo (Ghersa, 2000).

La actividad fotosintética y la mayor cantidad de remanentes de cosecha que se producen en una mayor medida en la UH 3 representan la mayor productividad biológica de esta zona. Para calcular la eficiencia, que es la capacidad de transformación de energía, en los agroecosistemas, deberían también considerarse los ingresos de energía fósil. En el caso de la zona bajo estudio, a partir de las entrevistas realizadas, se podría considerar que los sistemas de producción presentan un manejo tecnológico similar, es decir tienen similares aportes de energía artificial. Por ello, se asume que la UH 3 es energéticamente más eficiente.

Fueron notorias las diferencias en el comportamiento fenológico de las unidades homogéneas, con picos de crecimiento que se anticipan más de un mes en la UH 3 a los de las unidades 1 y 2. El hecho de que esta diferencia pueda ser atribuida a una mayor presencia de los cultivos invernales en la UH 3, como se dedujo de los datos de correlación de la Tabla 8, es otra evidencia de un diferente funcionamiento y potencialidad de esta unidad homogénea, que presenta una mayor posibilidad de realización de cultivos invernales.

El desplazamiento de las isoyetas hacia el Oeste se postula entre las razones para explicar el avance de la frontera agropecuaria hacia sectores marginales de la región pampeana (Morello, 1995). Para la provincia de Córdoba, Ravelo *et al.* (2002) encontraron una tendencia positiva en la serie 1931-2000, midiéndose incrementos de 4,29 y 1,92 mm/año para las localidades de Córdoba Capital y Pilar, respectivamente. Asimismo, Ovando *et al.* (2000) calcularon para Córdoba un incremento promedio de 100 mm en la década 1970/79 respecto de la precipitación media anual normal del período 1921/50. En consonancia con este fenómeno, durante el período analizado para la cuenca R. García-Lozada, se detectó un incremento de las precipitaciones, especialmente las ocurridas durante el ciclo primavero-estival. Los ciclos invernales no mostraron esta tendencia y manifestaron, tal como lo evaluaron de la Casa *et al.* (2002), una elevada ocurrencia de casos con insuficiencia hídrica para el cultivo de trigo.

Paralelamente, los resultados demostraron un crecimiento de los valores promedio de la actividad fotosintética estival a lo largo del período bajo estudio (Tabla 14), aunque sólo en la UH 3 fue significativo. Esto pone de manifiesto los mejores atributos de esta área los cuales le permiten capitalizar productivamente el mencionado incremento hídrico. La variabilidad de este índice fue menor en los ciclos estivales que en los invernales, al igual que en el caso de las precipitaciones. Cabe destacar, no obstante, una menor variabilidad de la vegetación con relación a las precipitaciones. De acuerdo a Paruelo y Lauenroth (1998), esto refleja la capacidad de los ecosistemas de amortiguar las fluctuaciones climáticas, manifestándose aún con estructuras simplificadas como las de estos agroecosistemas.

Los valores de NDVI medidos tuvieron un elevado ajuste con los datos de producción de cultivos del departamento Santa María (Tablas 19 y 20); si bien la cuenca representa el 21% de su área llana, se inserta en las pedanías con las más altas proporciones de superficie destinadas a la agricultura. Estos ajustes se manifestaron tanto con los datos de los ciclos completos estivales e invernales, como con los datos de algunos meses que se anticipan al momento de la cosecha. Así por ejemplo, las buenas correlaciones obtenidas con los meses de Agosto y Setiembre, en el caso de los cultivos invernales y con el mes de Febrero, para los estivales, permitirían llevar adelante estimaciones tempranas del rendimiento, alrededor de dos meses anticipadas a la cosecha. Smith *et al.* (1995) encontraron, de manera análoga, relaciones significativas entre mediciones de NDVI con NOAA-AVHRR realizadas entre 3 y 5 meses antes de la cosecha y los rendimientos/ha de trigo.

Se encontró una estrecha relación entre las series mensuales de NDVI y de precipitación y también un retraso de 2 meses en la repuesta por parte de la vegetación con respecto a la ocurrencia de la lluvia, de manera similar a lo registrado por de la Casa (2001).

Por otro lado, aparece como relevante desde el punto de vista de la estabilidad de estos sistemas que, durante los ciclos agrícolas hidricamente desfavorables, estivales e invernales, se registrara una dependencia marcada de la vegetación ante las precipitaciones, aunque fue menos notable en la UH 3 (Tabla 17), con mejores condiciones edáficas. Es necesario tener presente que en una zona semiárida como esta, la cantidad, el tipo y los rangos de las precipitaciones suelen ser muy variables (Stewart y Robinson, 1997), debiendo los sistemas de producción propender a independizarse de tales factores ambientales para mejorar su sustentabilidad. En años favorables, la ausencia de una dependencia directa de la fotosíntesis ante las precipitaciones indicaría que el cultivo no podría capitalizar ese mayor aporte hídrico pues otros factores limitarían su crecimiento. Entre ellos, puede citarse a la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, la ocurrencia de temperaturas extremas, la limitada provisión de nutrientes, la capacidad de retención de agua del suelo, los posibles anegamientos y la estructura y fisiología del cultivo.

El índice Derivada del NDVI se comportó mejor que el delta NDVI, ya que logró discriminar mejor a las tres unidades homogéneas. Con ambos índices, la UH 3

manifestó el menor valor de velocidad de crecimiento, registrándolo en una fecha más temprana. La manifestación de un pico de producción en verano en la UH 1 por encima de las otras, posiblemente está explicada por la organización del escurrimiento, conducido en esta porción inferior de la cuenca a través de corrientes muy poco jerarquizadas, que posibilitan, además del aporte hídrico, la deposición de sedimentos y un consecuente incremento de la fertilidad química (González Bernaldez, 1981). Esta mayor velocidad de crecimiento, evaluada a través del índice derivada del NDVI, puede deberse, además, a que en esta zona el cultivo de trigo se realiza con una menor frecuencia que en la UH 3. En la UH 3 la mayor ocurrencia de cultivos de soja “de segunda” y un mayor porcentaje de vegetación leñosa explicarían la manifestación de esta menor velocidad de crecimiento.

La menor variabilidad observada en los registros de ICV en la UH 3 refuerza las evidencias encontradas de un comportamiento más estable de la vegetación en esta zona. A su vez, los promedios estivales e invernales no diferenciaron a las unidades homogéneas y sólo cuando se compararon los ciclos de menor ICV de la serie, este presentó una mayor sensibilidad. Esto indica que, en las estaciones críticas para el crecimiento de los cultivos, la vegetación de la UH 3 tiende a mantenerse en un nivel más favorable que la de las otras dos unidades. Durante los períodos de sequía de los ciclos invernales, los aportes hídricos estivales y la precipitación otoño-invernal, inferiores a sus promedios de la serie, no alcanzaron en la cuenca a satisfacer los requerimientos del cultivo. En estos períodos invernales críticos, la vegetación se torna independiente respecto de los reducidos aportes hídricos derivados del verano anterior, como lo mostró la mejor correlación obtenida entre ICV y la precipitación caída durante el ciclo.

Este índice correlacionó positiva y significativamente con los datos de producción total de cultivos del departamento Santa María, pero no alcanzó a mejorar al ajuste obtenido con el NDVI. Cuando se consideraron sólo los ciclos de menor ICV, con la finalidad de detectar la sensibilidad de este índice frente a las condiciones de sequía, de manera análoga a lo realizado por Seiler *et al.* (1998), las correlaciones también fueron elevadas, pero tampoco superaron a las obtenidas con el NDVI.

Junto con las oscilaciones interanuales en la producción fotosintética, el rango de variación anual de los valores de NDVI indica la estabilidad en el funcionamiento.

En este caso también se encontró que la UH 3 mantenía un comportamiento más estable, con menores diferencias entre sus máximos y mínimos anuales. Es de destacar que esta característica se relaciona directamente con la velocidad de crecimiento, ya que cuando mayor es el rango mayor es la derivada.

Dentro de una misma área climática, las características geomorfológicas y edáficas determinan el uso potencial del territorio. Y, de acuerdo a Maestrojuan *et al.* (2003) y Petraglia *et al.* (2003), el grado de ajuste entre ese uso potencial y el real es un parámetro que puede estar indicando el nivel de sustentabilidad de la actividad que allí se desarrolla. Mediante series de imágenes de baja resolución pero ampliamente disponibles en la Web, se pudieron identificar y evaluar unidades homogéneas con características físicas y estructuras de la vegetación diferentes, que les confieren distintas particularidades a su funcionamiento. Ahora bien, el uso al que están sometidas esas regiones no presenta diferencias respecto a las actividades (predominantemente agrícolas), rubros (cultivo casi exclusivo de la soja), ni manejos tecnológicos. A través de este estudio, se percibió sólo un mayor nivel de intensidad de uso en las áreas más favorables (UH 3), donde se desarrolla con mayor frecuencia el doble cultivo trigo-soja. Las estrategias de manejo agropecuario a aplicar deberían presentar adaptaciones específicas a cada una de ellas, respetando sus características estructurales y funcionales. Este es uno de los principios en los que se basa el ordenamiento o la planificación territorial, cuyo propósito es posibilitar la gestión ambiental del territorio con enfoque sustentable, como se sostiene desde diferentes fuentes bibliográficas.

VI. CONCLUSIONES

- Este estudio acompaña los intentos de muchos autores que con diferentes técnicas buscan la utilización de series de largo plazo de datos NOAA-AVHRR en escalas de mayor detalle que las usuales.
- La determinación de las unidades homogéneas con la serie de NDVI de menor detalle (8 x 8 km) tuvo un grado de mezcla de píxeles de detalle de un 30% en la zona intermedia de la cuenca, que es coherente con su identidad de área de transición. No obstante, la separación correspondiente a las zonas alta y baja de la cuenca fue muy elevada.
- Estos resultados son compatibles con los objetivos de este trabajo, que consideran evaluar comparativamente la sustentabilidad de una cuenca destinada a uso agropecuario y analizar la heterogeneidad espacial de su cobertura y sus cambios temporales.
- Ante el obstáculo que representaban una serie de tiempo discontinua y una resolución en principio insuficiente, se ha ensayado aquí una estrategia de combinación del aprovechamiento de bondades y dilución de defectos que se pudo demostrar como efectiva, según los resultados obtenidos en los análisis estadísticos.
- Los valores de NDVI medidos en los meses de Agosto y Setiembre, en el caso de los cultivos invernales y con el mes de Febrero, para los estivales, permiten realizar estimaciones tempranas del rendimiento de los cultivos. También el ICV correlacionó positiva y significativamente con los datos de producción total de cultivos del departamento Santa María, pero no alcanzó a mejorar el ajuste obtenido con el NDVI. Asimismo, mediante la función de pronóstico derivada del modelo estadístico de análisis de series temporales ajustado para las series de NDVI es posible estimar el rendimiento fotosintético mensual a partir de los datos de NDVI del año precedente.
- En este trabajo se identificaron unidades homogéneas con estructuras y funcionamiento diferentes pero que están sometidas a usos muy similares. La aplicación de un ordenamiento territorial tendiente a la gestión ambiental del territorio con enfoque sustentable debería presentar estrategias de manejo agropecuario con

adaptaciones específicas a cada una de ellas, respetando sus características estructurales y funcionales.

VII. LITERATURA CITADA

- Abril, E.G. 2001. Sensores remotos y vegetación. Notas técnicas. Laboratorio Área Geotecnia. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- Alessandria, E., A. Barchuk, J. Zamar, M. Boetto, S. Luque, H. Leguía, G. Giambastiani y G. Ruiz. 1997. Sistemas de cultivos bajo siembra directa en la región semiárida de la provincia de Córdoba. Incidencia sobre aspectos físico-biológicos. Informe Secret. Ciencia y Técnica, U. N. Córdoba, 40 pp.
- Alessandria, E., H. Leguía, L. Pietrarelli, J. Zamar, J. Sanchez, S. Luque, M. Arborno y D. Rubín. 2000. Diversidad de los agroecosistemas en la región central de la Provincia de Córdoba. Los factores bióticos adversos y su relación con la agrobiodiversidad. Informe Secret. Ciencia y Técnica, U. N. Córdoba, 36 pp.
- Altieri M. 1995. Agroecology. The science of sustainable agriculture. Ed. Westview. Boulder, USA, 433 pp.
- Andrade, F.H., L.A. Aguirrezabal y R.H. Rizzalli. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade, F. y V. Sadias (Eds). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editorial Médica Panamericana S.A. Bs. As, pp. 61-96.
- Aoki, A.M. 2002. Caracterización de las propiedades hidráulicas como indicadores de calidad de un suelo Haplustol típico de la región central de la provincia de Córdoba. Tesis Magister. Universidad Nacional de Córdoba y Universidad Nacional de Río IV, Córdoba, Argentina, 117 pp.
- Astier, M., S. López Ridaura, E. Pérez Agis y O.R. Masera. 2002. Título El Marco de la Evaluación de Sistemas de Manejo incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) y su aplicación en un sistema agrícola campesino en la región Purhepecha, México. En: Sarandón, S.J. (Ed). Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable. Ediciones Científicas Americana. pp. 415-430.
- Barbosa, P.M., J.M. Grégoire y J.M. Cardozo Pereira. 1999 . An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. Remote Sensing of Environment 69(3):253-263.
- Barceló Coll, J., G. Nicolás Rodrigo, B. Sabater García y R Sánchez Tomás. 2001. Fisiología Vegetal. Ed. Pirámide. Bs. As., 566 pp
- Berzseny, Z., B. Gy y D.Q. Lap. 2000. Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. European Journal of Agronomy. 13 (2-3): 225-244.
- Box, G.E.P. y G.M. Jenkins. 1976. Time series analysis. Forecasting and control.. Ed. Holden-Day. San Francisco, USA.
- Cabrera, A.A. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo II, fasc. 1. ACME. Buenos Aires.
- Cáceres, D. 2004. Programa de monitoreo de explotaciones de pequeños productores agropecuarios asentados en la Reserva Hídrica Provincial Pampa de Achala. Informe Administración de Parques Nacionales, Delegación Regional Centro, 50 pp.
- Cantín, G., Z. Ordenes, C. Quijada y A. Rodríguez. 2003. Fragmentación del hábitat y su efecto borde. Publicado en internet, disponible en: <http://www.monografias.com/trabajo5/frag/frag.shtm>. Activo en Noviembre de 2003.
- Capitanelli, R. 1979. Geomorfología En: Vazquez, J., R. Miatello y M. Roqué (Eds) Geografía física de la Provincia de Córdoba. Ed. Boldt. Bs. As., pp. 45-138.
- Capitanelli, R. 1979. Clima. En: Vazquez, J., R. Miatello y M. Roqué (Eds) Geografía física de la Provincia de Córdoba. Ed. Boldt. Bs. As., pp. 213-296.

- Casas, R. R. 1985. La agricultura permanente y la degradación de los suelos en la República Argentina. IDIA: 62-74.
- Chiuvenco, E. 1999. La teledetección espacial en la planificación del uso sustentable de los recursos naturales. Rev. Arg. Prod. Animal 19(1): 15-26.
- Cihlar, J, H. Ly, Q. Xiao. 1996. Land cover classification with AVHRR multichannel composites in northern environments. Remote Sensing of Environment. 58(1): 36-51. Gutman, G., A. Ignatov. 1995. Global land monitoring from AVHRR: Potential and limitations. International Journal of Remote Sensing 16(13): 2301-2309.
- Cisneros, J.M., C. Cholaky, E. Bricchi, O. Giayetto y J.J. Cantero. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un suelo Haplustol típico del centro de Córdoba. Rev. UNRC 17(1): 13-22
- Cleveland, C.J 1995. The direct and indirect use of fossil fuels and electricity in USA agriculture, 1910–1990. Agric. Ecosyst. Environ. 55 (1995), pp. 111–121.
- Coscia, A. 1991. Desarrollo sostenido de la Pampa Húmeda argentina. Serie Agricultura Sostenible N°9. INTA, 15 pp.
- Coscia, A. 1992. La tecnología frente a la agricultura del siglo XXI. Serie Agricultura Sostenible N°11. INTA, 15 pp.
- De Fina, A. L. 1992. Aptitud agroclimática de la República Argentina. Ed. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Bs. As., 402 pp.
- de la Casa, A., G. Ovando y A. Rodríguez. 2002. Evaluación de la condición marginal del cultivo de trigo de secano en la provincia de Córdoba, Argentina, en relación a las lluvias durante su ciclo. IX Reunión de Agroclimatología. Vaquerías, Córdoba.
- de la Casa, A.C. 2001. Evaluación territorial y temporal de factores agroclimáticos de riesgo en la producción ganadera de la provincia de Córdoba. Tesis Magister. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 101 pp.
- Della Maggiora, A.I., J.M. Gardiol y A.I. Irigoyen. 2000. Requerimientos hídricos. En: Andrade, F. y V. Sadias (Eds). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editorial Médica Panamericana S.A. Bs. As., pp. 155-171.
- Di Pace, M. 1992. Las utopías del medio ambiente. Desarrollo sustentable en la Argentina. Centro Editor de América Latina. Bs. As.
- Di Rienzo J.A. 1995. Una aproximación a la modelación de los perfiles del índice vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). Simposio Internacional de Estadística. Estadística en Agricultura y Medio Ambiente. Santa Marta, Colombia. Libro de resúmenes pp 38.
- Di Rienzo J.A., A.W. Guzmán y F. Casanoves. 2002. A multiple comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. Journal of Agricultural Biological, and Environment Statistics, 7(2): 1-14.
- Doran, J.W, M. Sarrantonio y M.A. Liebig, 1996. Soil health and sustainability. Advances in Agronomy 56: 1-54.
- Dymond, J.R., A. Bégue y D. Loseen. 2001. Monitoring land at regional and national scales and the role of remote sensing. JAG (3): 162-175.
- Eastman, J. R. 2001. Guide to GIS and image processing. Manual Version 32.20. Release 2 Clark Labs. Clark University.
- Eastman, J. R. 2001. Idrisi for Windows. Versión 32.20. Clark Labs. Clark University.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1994. Landscape Monitoring and Assessment Research Plan. U.S. EPA 620/R-94/009. Ed. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Las Vegas, USA.
- Farshad, A. y J.A. Zinck. 1993. Seeking a agricultural sustainability. Agriculture, Ecosystem and Environment, 47(1): 1-12.

- Fernandez, A. P Illera y J.L.Casanova. 1997 Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite data. *Remote Sensing of Environment* 60:153-162.
- Fogg, G.E. y J.E. Wright. 1973. El crecimiento de la planta. EUDEBA. Bs. As., 327 pp.
- Francis, C. A. y G. Youngberg. 1990. Sustainable agriculture - An overview. In: Francis, C., C. Flora y L. King (Eds). *Sustainable agriculture in temperate zones*. J. Willey & Sons, Inc., pp. 1-24.
- García, S. 2001. Indicadores para el desarrollo sostenible de la pesca. En: *Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural*. Boletín Tierra y Agua de FAO N°5, pp. 131-158.
- Ghersa C.M., M.A. Martinez-Ghersa y R.J.C. León. 1998. Cambios en el paisaje pampeano y sus efectos sobre los sistemas de soporte de la vida. En: Solbrig O.T. y L. Vainesman (Comps). *Hacia una agricultura productiva y sostenible en la pampa*. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires, pp: 38-68.
- Ghersa, C.M, D. Ferraro, M. Omancini, M.A. Martínez-Ghersa, S. Perelman, E.H. Satorre y A. Soriano. 2002. Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland-Pampa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 93 (2): 279-293.
- Ghersa, C.M, M. Omancini, D. Ferraro, M.A. Martínez-Ghersa, S. Perelman, E.H. Satorre y A. Soriano. 2000. Estimación de indicadores de sustentabilidad de los sistemas mixtos de producción en la Pampa Interior. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 20(1): 49-66.
- Gil, R.C. y A. Garay. 2001. La siembra directa y el funcionamiento sustentable del suelo. En: Panigatti, J.L., D. Buschiazzo y H. Marelli (Eds). *Siembra Directa II*. Ediciones INTA, pp. 5-16. Bs. As.
- Glave, M y J. Escobal. 1995. Indicadores de sostenibilidad para la agricultura andina. *Debate Agrario* 23: 89-112.
- Gonzalez Bernaldez, F. 1981. *Ecología y paisaje*. H Blume Ediciones. España, 210pp.
- Gorgas, J.A. y J.L. Tassile (Eds). 2003. *Los suelos*. Agencia Córdoba D.A.C.yT. S.E.M.-INTA Manfredi, 527 pp.
- Halberg, N. 1999. Indicators of resource use and environmental impact for use in a decision aid for Danish livestock farmers. *Agric. Ecosyst. Environ.* 76 (1999), pp. 17-30.
- Hall, F.G., J.R. Townshend y E.T. Engman 1995. Satus of remote sensing algorithms for estimation of land surface state parameters. *Remote Sensing of Environment* 51: 138-156.
- ILEIA (Institute for Low External Input Agriculture). 1991. *Criteria for assessment*. Workshop proceedings. ILEIA Newsletter 7(3), 21-23
- International Institute for Sustainable Development, Environment Canada, Redefining Progress y World Bank. 1997. *Compendium of sustainable development indicator initiatives and publications*. Publicado en internet, disponible en: <http://iisd1.iisd.ca/measure/compindex.asp>. Activo en Noviembre de 2003.
- Jackson, W. 1984. A search for the unifying concept for sustainable agriculture. In: Jackson, Berry & Coleman (Eds). *Meeting the expectations of the land: essays in sustainable agriculture and stewardship*. North Point Press.
- Jarsún, B., J. Gorgas, H Bosnero, E. Zamora y E. Lobera. 1989. *Provincia de Córdoba. Atlas de suelos de la República Argentina*. Bs. As., pp. 393-512.
- Jones, B., J. Walker, K.H. Riitters, J.D. Wickham y C. Nicoll. 1998 *Indicators of landscape integrity*. In: Walker. J. y D.J. Reuter (Eds). *Indicators of catchment health. A technical perspective*. CSIRO. Australia.
- Jouve, V.V. y J. M. Paruelo. 1999. Calibración de la relación IVN-PPNA para un gradiente de precipitaciones en la región patagónica. *Actas de la XIX Reunión Argentina de Ecología*. Tucumán, abril 21-23.

- Karlen, D.L. y D. E. Stott, 1994. A framework for evaluation physical and chemical indicators of soil quality. In: Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America, Inc.
- Karszenbaum, H. 1998. Procesamiento de imágenes satelitales para la gestión ambiental. En: Matteucci, S. y G. Buzai (Eds). Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial. Editorial Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, pp.:197-217.
- Kerdiles, H. y M.O. Grondona. 1995. NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in Argentinean Pampa. International Journal of Remote Sensing. 16(7): 1303-1325.
- Kidd, C. y D. Pimentel. 1992. Integrated resource management. Academic Press. I.N.C.
- Kopta, R. F. 1999. Problemática ambiental con especial referencia a la provincia de Córdoba. Ed ACUDE. Córdoba, 203 pp.
- Lal, R., 1994. Sustainable land use systems and soil resilience. In: Greenland, D. and J. Szaboks (Eds). Soil resilience and sustainable land use. CAB International.
- Land Processes Distributed Active Archive Center. USGS. 2003. FTP Access to Global AVHRR 10-day composite data. Publicado en internet, disponible en: <http://edcdaac.usgs.gov/1KM/comp10d.html>. Activo Noviembre de 2003.
- Leguía, H., L. Pietrarelli, S. Luque, J. Sánchez, E. Alessandria, M. Arborno, J. Zamar. 2004. El bosque nativo como referente de las condiciones hídricas de los suelos agrícolas. LEISA, Revista de Agroecología, 19 (4): 28-31
- Lomolino, M.V. 1999. A species-based, hierarchical model of island biogeography. In: Weiher, E. y P. Keddy (Eds). Ecological assembly rules. Cambridge University Press, pp. 272-310.
- Luque, R.L., J.C. Bertoni, G. Esmoriz, D. Torre, G. Negro, E. Ruiz Posse. 1995. Evaluación de los procesos hidrosedimentológicos típicos de la región agrícola ganadera central de Córdoba. Informe Secret. Ciencia y Técnica, U. N. Córdoba.
- Luti, R., M. Bertran de Solís, M. Galera, N. Muller de Ferrayra, M. Berzal, M. Nores, M. Herrera; J. Barrera. 1979. Vegetación. En: Vazquez, J., R. Miatello y M. Roqué (Eds). Geografía física de la Provincia de Córdoba. Ed. Boldt. Bs. As., pp. 297-368.
- Mac Arthur, R.H. y E.O. Wilson. 1967. The Theory of island biogeography. NJ: Princeton University Press.
- Maestrojuan, P., A.E. Challú, G. Pujol, G. de la Mota y C. Laba. 2003. Uso potencial y uso actual del suelo en el sur de la región pampeana (1988-1996): Una verificación a través de imágenes satelitales NOAA-AVHRR. Publicado en internet, disponible en: <http://www.proatlas.secyt.gov.ar/papers/usosuelo/agricola.html>. Activo Noviembre 2003
- Magurran, A.E. 1989. Ecological diversity and its measurement. Chapman and Hall. London, 179 pp.
- Mahibbur, R.M. y Z. Govidarajulu. 1997. A modification of the test of Shapiro and Wilks for normality. Journal of Applied Statistics, 24(2): 219-235.
- Marelli, H.J. 1988. Erosión en la Provincia de Córdoba. En: El deterioro del ambiente en la Argentina. Centro para la Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua Ed. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura. B. A., Argentina.

- Martelotto, E, H. Salas y E. Lovera. 2003. El monocultivo de soja y la sustentabilidad de la agricultura cordobesa. Publicado en internet, disponible en: <http://elsitioagrícola.com/articulos/martelotto/>. Activo en Noviembre de 2003.
- Maselli, F. 2004. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 89: 423-433.
- Maselli, F., M. A. Gilabert y C. Conese. 1998. Integration of high and low resolution NDVI data for monitoring vegetation in Mediterranean environments. *Remote Sensing of Environment* 63: 208- 218.
- Matteucci, S y A. Colma, 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Serie Biología. Monografía N°22, O.E.A, Washington, 20 p p.
- Morello, J. 1995. ¿Puede haber hoy desarrollo rural sostenible en Argentina?. *Desarrollo Agroforestal y Comunidad Campesina*, 17:1-6.
- Morello, J. y S. D. Matteucci. 1997. Estado actual del subsistema ecológico del Núcleo Maicero de la Pampa Húmeda. En: Morello, J. y O. Solbrig (Comps). *¿Argentina granero del mundo: hasta cuándo?*. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires, pp. 57-110.
- Musick, J.T, O.R. Jones, B.A. Stewart y D.A. Dusek. 1994. Water-yield relationships for irrigated and dryland wheat in U.S. Southern Plains. *Agronomy Journal*, 86: 980-986.
- Musick, J.T. y K.B. Portier. 1990. Wheat. In: Stewart, B.A. and D.R. Nielsen (Eds). *Irrigation of agricultural crops*. American Society of Agronomy, Inc. Wiscosin, USA, pp. 597-638.
- Nakama, V. y R Sobral. 1987. Indices de Productividad. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 57 pp.
- NASA, 2003. AVHRR FTP User Subset Gridded Data Products. Publicado en internet, disponible en: http://daac.gsfc.nasa.gov/data/dataset/AVHRR/01_Data_Products/04_FTP_Products/01_ftp_subsets/index.html. Activo en Noviembre de 2003.
- Neave, P, V. Kirkwood y J. Dumanski. 1995. Review and assessment of available indicators for evaluating sustainable land management. Technical Bulletin 1995-7E. Centre for Land and Biological Resources Research. Agriculture and Agri-Food, Ottawa, Canada.
- Ovando, G, A. de la Casa y A. Rodríguez (at equo). 2000. Variabilidad temporal de la precipitación media anual en la provincia de Córdoba, Argentina, evaluada por medios geoestadísticos. *Anales de la VIII Reunión Argentina de Agrometeorología*.
- Papendick, R.I. 1996. No tillage impacts on soil. Twenty years of experience. IV Congreso Nacional de Siembra Directa. AAPRESID. pp: 59-83
- Paruelo, J. M, A.B. Beltrán, O.E. Sala, E.G. Jobbágy y R.A. Golluscio. 1998a. The climate of Patagonia general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral* 8: 85-104.
- Paruelo, J. M, E.G. Jobbágy y O.E. Sala. 1998b. Biozones of Patagonia (Argentina). *Ecología Austral* 8: 145-153.
- Paruelo, J.M. 2004 A review of NDVI and its applications Publicado en internet, disponible en: <http://www.gis.usu.edu/~doug/RS5750/PastProj//FA2000/XZHang/literaturereview.html>. Activo en Noviembre de 2003
- Paruelo, J.M. y W.K. Lauenroth. 1998. Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25: 721-733.
- Petraglia, C., J.H. Molfino y C. Clerici 2003. Un avance en la propuesta de ordenamiento territorial del área agrícola en la zona del acuífero de Raigón,

- mediante la utilización del SIG IDRISI. Publicado en internet, disponible en: <http://www.cpa.unicamp.br/cigv1n2n6.html>. Activo Noviembre 2003.
- Pimentel, D. C. Berarde y S. Fast. 1983. Energy efficiency of farming systems: Organic and conventional agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.* (9): 359-372.
- Primavesi, A. 1982. Manejo ecológico del suelo. El Ateneo. Buenos Aires, 499 pp.
- PRODIA (Programa Desarrollo Institucional Ambiental). Secr. de R. N. y Desarrollo Sustentable. 1999. Diagnóstico ambiental actualizado. Publicado en internet, disponible en: <http://www.cai.org.ar/medioambiente/prodia-1.html>. Activo Noviembre 2003.
- Rasul, G y G.B. Thapa. 2003. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh. 2003. *World Development*. 31 (10): 1721-1741.
- Ravelo, A.C., R.O. Irastorza y L.E. Luque. 2002. Variabilidad de la tendencia en series pluviométricas de la provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. Arg. de Agrometeorología*, 2(1): 69-74.
- Ravelo, V. 2002. Relevamiento de la vegetación en relación a las características geomorfológicas del Departamento Santa María (Córdoba) utilizando información satelital y terrestre. Tesina Licenciatura en Ciencias Biológicas, UNC.
- Ruttan, V. W. 1994. Constraints on the design of sustainable systems of agricultural production. *Ecological Economics* 10: 209-219.
- Sanabria, J.A.; G.L. Arguello; A. Balbis; C. Dasso y O. Barbeito. 1997. Evaluación de los aspectos geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos de la Cuenca Rafael García-Lozada, para el control de la erosión hídrica. Informe Final Secr. Ciencia y Tecnología de la U. N. de Córdoba, 123 pp.
- Santanatoglia, O.J., R. Alvarez, N. Barbero y M. Russo. 1994. Descomposición de la cobertura de rastrojo y evolución de su contenido de nitrógeno en el doble cultivo trigo-soja bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 12: 63-67.
- Sarandón, S.J. 2002 a. El agroecosistema: un sistema natural modificado. Similitudes y diferencias entre ecosistemas naturales y agroecosistemas. En: Sarandón, S.J. (Ed). *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable*. Ediciones Científicas Americana. pp:119-134.
- Sarandón, S.J. 2002 b. El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. En: Sarandón, S.J. (Ed). *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable*. Ediciones Científicas Americana. pp:393-414.
- Sarandón, S.J. y R. Sarandón. 1996. Aplicación del enfoque agroecológico en sistemas extensivos de producción. *Agroecología y Desarrollo*, 10:34-37.
- Seiler, R.A., F. Kogan and J. Sullivan. 1998. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Adv. Space Res.* 21(3): 481-484
- Senigagliesi, C., M. Ferrari y J. Ostojic. 1997. La degradación de los suelos en el Partido de Pergamino. En: Morello, J. y O. Solbrig (Comps). *¿Argentina granero del mundo: hasta cuándo?*. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires, pp.: 137-155.
- Smith, R.C.F., J. Adams, D.J. Stephens y P.T. Hick. 1995. Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 113-125.
- Soberón, J., P. Rodríguez y E. Vázquez-Domínguez. 2000. Implications of the hierarchical structure of biodiversity for the development of ecological indicators of sustainable use. *Ambio* 29(3): 136-142.
- Solbrig, O. y J. Morello. 1997. Reflexiones generales sobre el deterioro de la capacidad productiva de la Pampa Húmeda argentina. En: Morello, J. y O. Solbrig (Comps). *¿Argentina granero del mundo: hasta cuándo?*. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires, pp. 1-27.

- Sonnet, F.H. 1988. Estructura agraria de la región pampeana de Córdoba. *Revista de Economía* (Bco. Provincia de Córdoba), 53: 47-108.
- Soriano, A. 1992. La agricultura sustentable: su estrecha relación con los conocimientos ecológicos. *Agricultura Sostenible* N° 10. INTA, 8 pp.
- Stewart, B.A. y C.A. Robinson. 1997. Are agroecosystems sustainable in semiarid regions?. *Advances in Agronomy*, 60:191-228.
- Tinto, J.C. 1978. Relación del bosque y las actividades forestales con otros recursos naturales y el ambiente humano. Tercer Congreso Forestal Argentino N° 75 – IV Sesión. Instituto Forestal Nacional.
- Towson University Center for Geographic Information Sciences. 2003. Forest fragmentation. In Chesapeake Bay from Space project and Infomart Center for GIS. Towson University. Publicado en internet, disponible en: <http://chesapeake.towson.edu/landscape/forestfrag/>. Activo Noviembre de 2003.
- Van Zuidan, R.A. y F.I. Cancelado. 1980. Terrain analysis and classification using aerial photographs. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC). Textbook VII-6; 310 pp. Enschede.
- Vázquez, J. B. 1979. Suelos. En: Vazquez, J., R. Miatello y M. Roqué (Eds). *Geografía física de la Provincia de Córdoba*. Ed. Boldt. Bs. As., pp. 433-458.
- Vázquez, J. B., A. Lopez Robles, D. Sosa, M. Saez. 1979. Aguas. En: Vazquez, J., R. Miatello y M. Roqué (Eds). *Geografía física de la Provincia de Córdoba*. Ed. Boldt. Bs. As, pp. 139-208.
- Viglizzo, E A. 1083. Productividad y estabilidad productiva de distintos ecosistemas de la región pampeana subhúmeda y semiárida. *Agrarius*: 4-15.
- Viglizzo, E.A. J Pordomingo, M.G Castro, F.A Lértora. 2002. La sustentabilidad ambiental. *Ciencia Hoy*. 12 - (68) Publicado en internet, disponible en: <http://www.cienciahoy/hoy68Index.html>. Activo Noviembre 2003
- Viglizzo, E y C. Filippín. 1993. Los agroecosistemas en la Argentina. En Goig, S. y R. Goñi (Eds). *Elementos de política ambiental*. Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires, pp 109-131
- Viglizzo, E.F. 1996. La sustentabilidad en agricultura. ¿Cómo evaluar y medir?. *RIA*, 26(1): 1-15
- Walker, J. y D.J. Reuter. 1998. Indicators of catchment health. CSIRO. Australia, 173 pp.
- Warkentin, B.P.,1995. The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(3): 226-228.
- Winograd M. 1995. Marco conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sustentabilidad para toma de decisiones en Latinoamérica y el Caribe. CIAT-UNEP. Colombia
- Yates, H.W., J.D. Tarpley, S.R. Scheider, D.F. McGinnis y R.A. Scofield, 1984. The role of meteorological satellites in agricultural remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 14: 219-233.
- Yulong, C. y B. Smit. 1994. Sustainability in agriculture: a general review. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 49: 299-307.

ANEXO II

Clasificación Geomorfológica y Edáfica de la Cuenca Rafael García-Lozada

Asociaciones	Unidades	Facetas	Suelo				
I	Paleoconos aluviales	I.1	P. descubiertos				
		I.2	P. cubiertos con loess	I.1.1 P. descubiertos	Co 1		
				I.2.1 Área cumbral	Co 2		
				I.2.2 Líneas de escurrimiento moderadamente a bien manifiesta en área cumbral	Co 3		
II	Planicie onculada	II.1	Bloque occidental ondulado y bloque elevado norte	I.2.3 Pendientes	Co 3		
				I.2.4 Líneas de escurrimiento en pendientes			
				II.1.1 Área cumbral	Con1		
				II.1.2 Pendiente alta	Co 5		
				II.1.3 Pendiente baja	Co 6		
III	Planicie central	III.1	P. central con drenaje entrelazado	II.1.4 Líneas de escurrimiento moderadas	Co 7		
				II.1.5 Bajos amplios	Co 8		
				III.1.1 Planicies bajas	Co 9		
				III.1.2 Planicies altas	Co 10		
				III.1.3 Líneas de escurrimiento amplias	Co 11		
				III.2.1 Planicies	Co 12		
IV	Planicie fluvio-eólica del río Xanaes	IV.1	Albardones y planos fluviales	III.2.2 Líneas de escurrimiento	Co 13		
				IV.1.1 Albardones	Co 14		
				IV.1.2 Planicies fluviales	Co 15		
				IV.2	Planicie intraalbardones loésica	IV.2.1 Planicie intraalbardones	

ANEXO III

Cálculo del índice de productividad del suelo

Planilla para el cálculo del índice de productividad de las series de suelo (S) o unidades taxonómicas (lpt) de la cuenca R. García-Lozada

Variable	S1	S2	S3	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
Clima (H)	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Drenaje (D)	50	60	90	60	95	90	90	90	95	85	85	100	80	60	70	95
Profundidad Efectiva (Pe)	40	40	60	60	80	100	100	100	100	100	100	80	40	60	70	75
Textura Superficial (Ta)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	60	60	80
Textura Subsuperficial (Tb)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Profundidad Horizonte Ap	90	95	95	95	95	100	95	100	100	90	90	95	90	95	85	95
Índice Productividad (lpt)	15.3	19.4	43.6	29.1	61.4	76.5	72.7	76.5	80.8	65.0	65.0	64.6	24.5	17.4	18.2	49.1

Planilla para el cálculo del índice de productividad de las facetas o unidades cartográficas (Ipc) de la cuenca R. García-Lozada

$$\text{Co1} = S1 + S2 + S2 \text{ fH3} = 15,3 + 19,4 + (19,4 * 0,5) = 14,8$$

$$\text{Co2} = S3 + S3 \text{ fH2} + \text{Suelos totalmente erosionados en surcos} = 43,6 + (43,6 * 0,7) + (43,6 * 0,2) = 37,8$$

$$\text{Co3} = S1 \text{ fP2} + S1 \text{ fH3} + S2 \text{ fP2} + S2 \text{ fH3} + \text{Suelos totalmente erosionados en surcos} = (15,3 * 0,95) + (15,3 * 0,5) + (19,4 * 0,5) + (19,4 * 0,2) = 10,8$$

$$\text{Con1} = S5 = 29,1$$

$$\text{Co5} = S5 \text{ fP2} + S5 \text{ fH1} = (29,1 * 0,95) + (29,1 * 0,9) = 26,9$$

$$\text{Co 6} = S6 + S6 \text{ fH2} = 61,4 + (61,4 * 0,7) = 52,2$$

$$\text{Co 7} = S7 + S7 \text{ fH2} = 76,5 + (76,5 * 0,7) = 65,02$$

$$\text{Co 8} = S8 + S8 \text{ fH2} + S8 \text{ fH3} + S8 \text{ fx} = 72,7 + (72,7 * 0,7) + (72,7 * 0,5) + (72,7 * 0,3) = 45,4$$

$$\text{Co 9} = S6 + S6 \text{ fH1} + S9 + S9 \text{ fH2} = 61,4 + (61,4 * 0,9) + 76,5 + (76,5 * 0,7) = 61,7$$

$$\text{Co 10} = S6 + S10 + S10 \text{ fH1} + S9 + S9 \text{ fH2} = 61,4 + 80,8 + (80,8 * 0,9) + 76,5 + (76,5 * 0,7) = 69,0$$

$$\text{Co 11} = S11 \text{ fx} + S12 + S12 \text{ fH2} + S12 \text{ fH3} = (65 * 0,3) + 65 + 65 * 0,7 + (65 * 0,5) = 45,5$$

$$\text{Co 12} = S6 + S6 \text{ fH1} = 61,4 + (61,4 * 0,9) = 58,3$$

$$\text{Co 13} = S13 + S13 \text{ fH1} + S14 = 64,6 + (64,6 * 0,9) + 24,5 = 49,1$$

$$\text{Co 14} = S15 + S16 + \text{Suelos arenosos menores} = 17,4 + 18,2 + 10 = 15,2$$

$$\text{Co 15} = S17 = 49,1$$

Co = Complejo

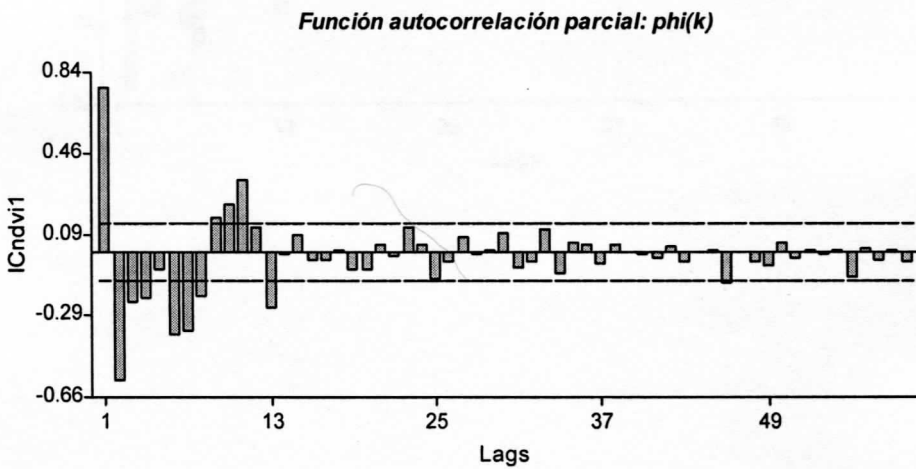
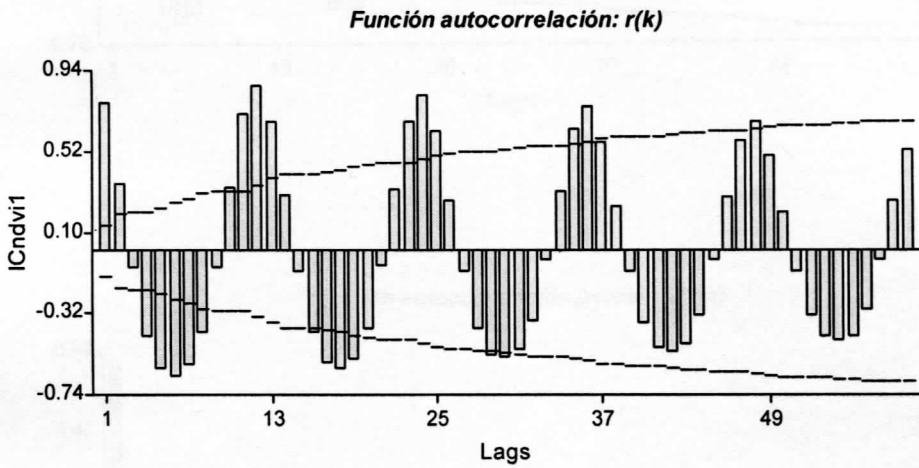
Cons = Consociación

ANEXO IV

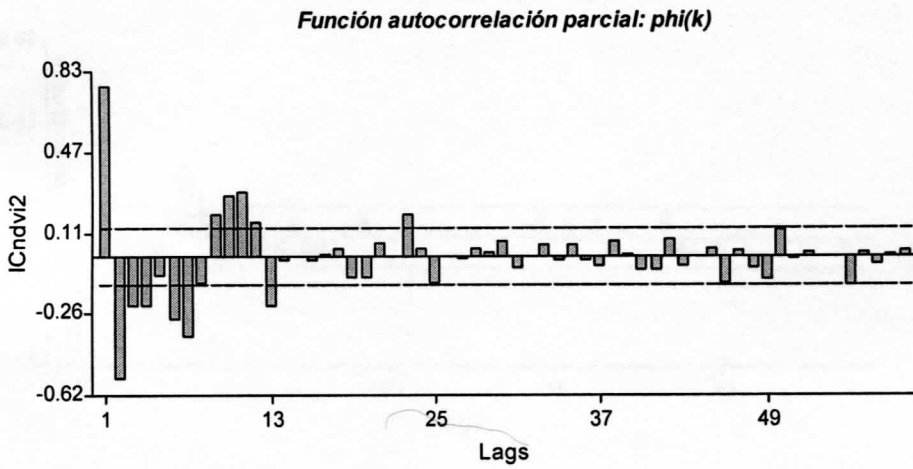
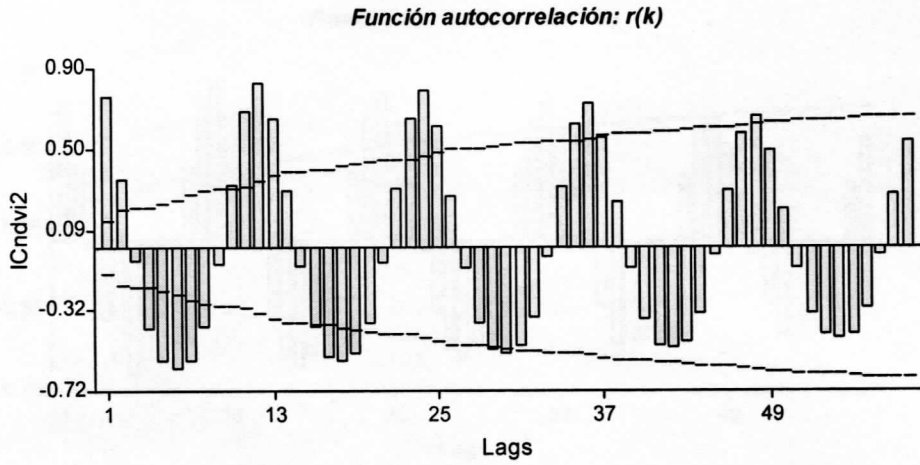
Análisis estadístico de las series de NDVI

Estructura de autocorrelación del NDVI

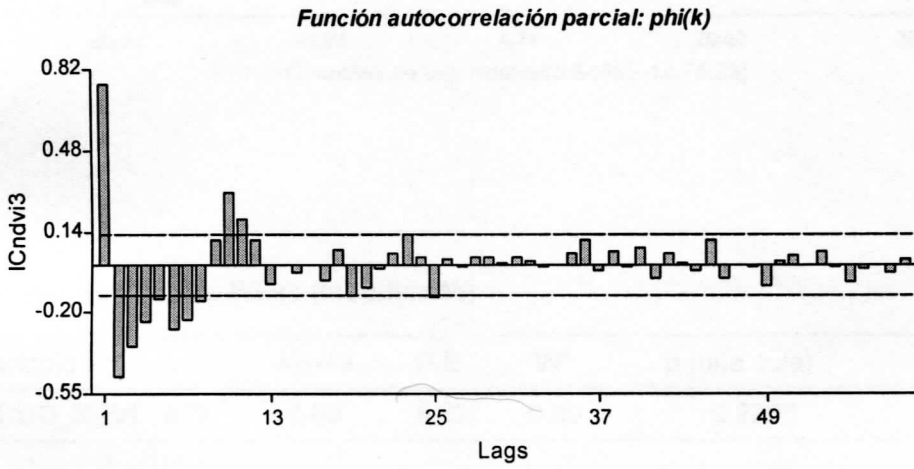
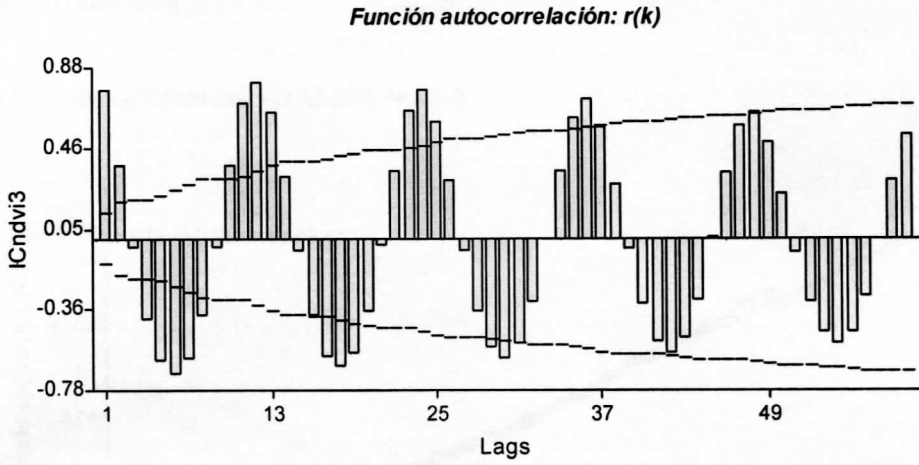
Para la UH 1, las gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial fueron las siguientes:



Para la UH 2, las gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial fueron las siguientes:



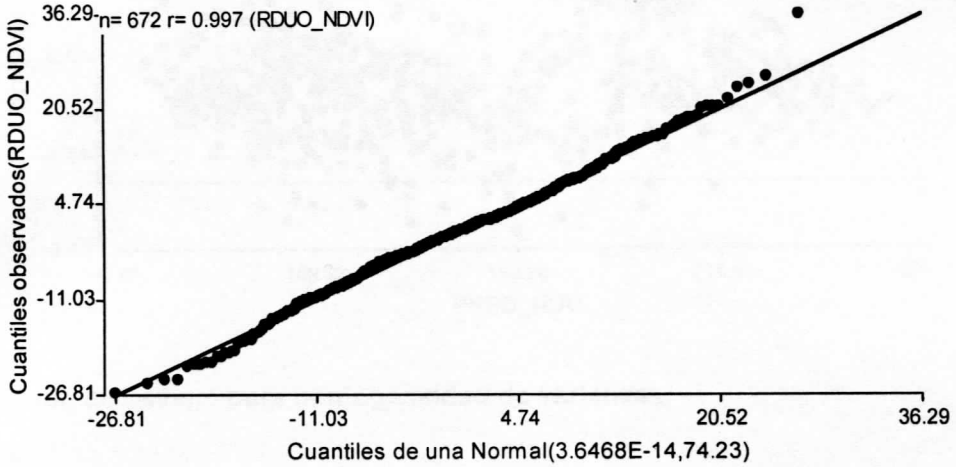
Para la UH 3, las gráficas de **autocorrelación** y **autocorrelación parcial** fueron las siguientes:



Análisis de Residuos

Normalidad

Gráfico de Normalidad (Q-Q plot Normal)

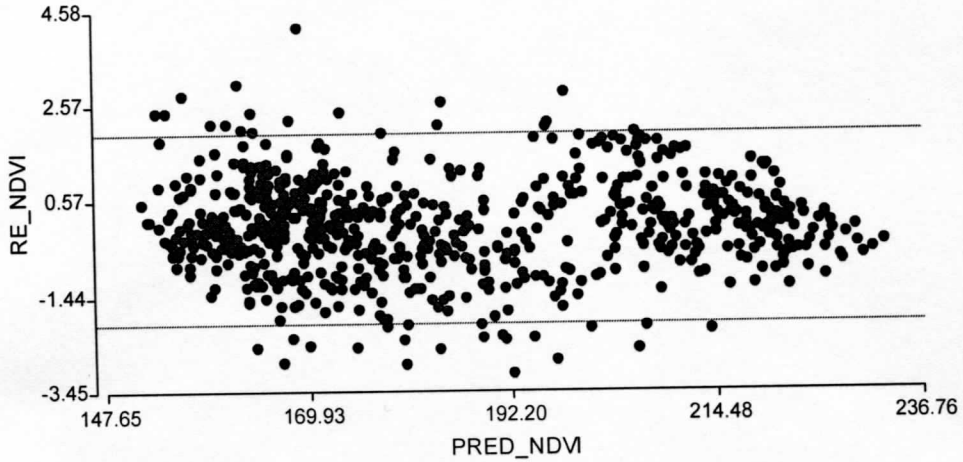


Prueba de Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (una cola)
RDUO_NDVI	672	0.00	8.62	0.99	0.2256

Homogeneidad

Gráfico de Residuales vs. Predichos (homogeneidad de varianzas)



Prueba de Levene para homogeneidad de varianzas:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS_NDVI	672	4.9E-04	0.00	84.04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10.01	2	5.00	0.16	0.8498
Sitio	10.01	2	5.00	0.16	0.8498
Error	20557.53	669	30.73		
Total	20567.54	671			