



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados

**Utilización de información agrometeorológica y
satelital para la evaluación de la desertificación
en el Chaco Seco - Departamento Moreno,
Santiago del Estero**

**Magister en Ciencias Agropecuarias,
Mención Agrometeorología**

PEDRO ENRIQUE CESAR BOLETTA

2001

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados

**Utilización de información agrometeorológica y
satelital para la evaluación de la desertificación
en el Chaco Seco - Departamento Moreno,
Santiago del Estero**

**Magister en Ciencias Agropecuarias,
Mención Agrometeorología**

Comisión asesora de tesis

Director: Profesor Dr. Andrés C. Ravelo

**Miembros: Profesor Dr. Roberto Seiler
 Profesora Dra. Ana María Planchuelo**

Ing. Forestal Pedro Enrique César Boletta

2001

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación pudo llevarse a cabo gracias al apoyo de muchas personas e instituciones, a quienes agradezco toda su ayuda. En forma muy especial quiero dejar el testimonio de mi más sincero agradecimiento:

- A mi esposa Cuky por su paciencia y comprensión durante todo el tiempo dedicado a alcanzar este objetivo.
- A mi hija Verónica Beatriz por su cariñoso acompañamiento y por confiar en mis fuerzas para alcanzar este logro.
- A mi Director de tesis Dr. Andrés C. Ravelo por sus sabios y desinteresados consejos, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, y por su predisposición durante las consultas realizadas durante todo el tiempo del desarrollo de la investigación.
- A la Dra. Ana María Planchuelo por su esmero y dedicación en la corrección de los capítulos.
- Al Dr. Roberto Seiler por sus oportunas observaciones y consejos para lograr con mayor éxito los objetivos de esta investigación.
- Al Ing. Walter Da Porta por facilitar el programa de computadora para la estimación de la ETP (método de Morton) y explicarme su funcionamiento.
- Al Ing. Rafael Rodríguez por haber cedido los datos meteorológicos mensuales históricos de las estaciones agrometeorológicas de INTA.
- Al Dr. Hugo Zerda por su apoyo en los trabajos de campo para la determinación de los sitios de relevamiento, por el adiestramiento del uso del programa ERDAS-IMAGINE, y por las sugerencias brindadas cuando se presentaron dificultades en la clasificación temática de las imágenes.
- Al tribunal por las valiosas sugerencias que contribuyeron a un mejor logro de los objetivos.
- A las autoridades y personal administrativo de la Escuela para Graduados de la Facultad de Ciencias Agropecuarias - Univ. Nac. de Córdoba por su calidez y buena disposición en atender las consultas de orden académico y administrativo que se les hiciera.

- A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, por ceder gratuitamente las imágenes del satélite LANDSAT 5 TM del mes de enero de 1999.
- A la Fundación Caldenius por facilitar los datos de precipitación mensuales del período de estudio del área y por el cobro simbólico de los mismos.
- Al Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), por la ayuda económica aportada para solventar parcialmente mis estudios de cuarto nivel.
- Al Ing. Lucas D. Roic de la Cátedra de Botánica Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, por la revisión de los nombres científicos de las especies del área de estudio.
- A las Ings. Celia Gaillard, Marta Pece y Margarita Juárez, integrantes de la Cátedra de Estadística de la Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, por la orientación en el análisis de los datos y por su asesoramiento estadístico.
- Al Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, UNSE, por haber permitido el uso de las imágenes georreferenciadas del satélite LANDSAT 5 TM, para corregir geométricamente las imágenes multitemporales utilizadas en el área de estudio.
- Al Dr. Victorio Mariot Director del Laboratorio de Percepción Remota de la Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, por facilitarme el uso del equipamiento y del programa ERDAS-IMAGINE para el procesamiento de las imágenes. Y a todos los integrantes del Laboratorio por su buena disposición en atender mis consultas referentes al manejo de los equipos.
- Al Dr. Carlos O. Turc por la revisión crítica del resumen y del summary.
- Al Sr. Fabian Zubrinic, por la compaginación y la impresión de la versión final de la tesis.
- A mis compañeros de los cursos de postgrado quienes me acogieron brindándome su afecto y alentaron a no claudicar para alcanzar esta importante meta de mi vida profesional.

UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN AGROMETEOROLÓGICA Y SATELITAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA DESERTIFICACIÓN EN EL CHACO SECO - DEPARTAMENTO MORENO, SANTIAGO DEL ESTERO

R E S U M E N

La pérdida de la cobertura forestal permite que la radiación alcance directamente la superficie del suelo y que el viento actúe libremente. Esto causa un incremento de la temperatura del suelo y del aire y del déficit de saturación y, consecuentemente una mayor pérdida de humedad edáfica. La deforestación también ocasiona que las lluvias torrenciales alcancen la superficie del suelo con toda su intensidad y produzcan erosión hídrica en las áreas con uso agropecuario.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar agroclimáticamente a la desertificación en la región fitogeográfica del Chaco Seco en el Departamento Moreno, Santiago del Estero.

Mediante el modelo de Morton, se estimaron los valores de la evapotranspiración potencial (ETP) mensual para aquellas localidades donde se disponía de las variables meteorológicas necesarias, y mediante interpolación espacial, se obtuvieron los valores de ETP para aquellas donde sólo se contaba con registros mensuales de precipitaciones (P). Cuando fue necesario, se usaron ecuaciones de regresión para ajustar los valores de ETP para meses secos y húmedos. Con los datos de ETP y P, se calculó el balance hídrico seriado por el método de Palmer, obteniéndose los correspondientes índices de sequía (ISP). Se efectuó un tratamiento estadístico del ISP y se determinó la ocurrencia del ISP con 90, 95 y 99 % de probabilidad. Con los valores de probabilidad del 99 %, se trazaron las isolíneas de los ISP en el área de estudio, para los meses de enero, abril, julio y octubre. Se observó un incremento gradual de los índices de sequía de Este a Oeste, lo que implica un aumento del riesgo de desertificación.

Por medio de imágenes LANDSAT correspondientes a los veranos de 1975, 1992 y 1999, se evaluó el incremento de las superficies desmontadas con fines agropecuarios y los cambios de cobertura forestal en el tiempo. Para la clasificación temática de las imágenes se empleó un método híbrido entre el rígido y el supervisado. Gracias a sus formas geométricas, a su tonalidad y a su textura, las superficies desmontadas con fines agropecuarios son fáciles de ubicar en una imagen satelital; por eso se trabajó en forma rígida para estas superficies. En 1975,

la superficie utilizada para la agricultura era de 30.893 ha; en 1992 asciende a 192.637 ha, y culmina en 1999 con 358.199 ha. En este período el área en cuestión creció en forma exponencial. Se comprobó además que el desmonte por medio de topadoras elimina los primeros centímetros de la capa superficial del suelo, que posee el mayor contenido de materia orgánica. En consecuencia, antes de la iniciación de la actividad agropecuaria, ya ha comenzado la degradación del suelo y, por ende, el proceso de desertificación.

Del análisis temporal de las imágenes surge que, a pesar del aprovechamiento forestal irracional, mediante la extracción de árboles de edades superiores, el bosque tiene capacidad de recuperación, dado que quedan las edades iniciales que, con el paso del tiempo, alcanzan la altura dominante típica de la clase informacional denominada bosque. Esto ocurrió en el período 1975/92, como se demuestra en los modelos de coberturas proporcionales obtenidos con los datos de los mapas temáticos correspondientes y con la tabulación cruzada resultante de las matrices de las imágenes de los años 1975 y 1992. En cambio, el desmonte a tala rasa para uso agropecuario impide la recuperación de la cobertura boscosa por la carencia de árboles semilleros de las especies principales.

Esta investigación revela que los distintos procesos de desertificación surgen como resultado de la pérdida total de la cobertura forestal nativa y se ponen en evidencia por el abandono de campos improductivos, la degradación del suelo y el incremento de las superficies con cobertura arbustiva, o “fachinal”, como se muestra en el mapa temático del verano de 1999.

USING AGROMETEOROLOGICAL AND SATELLITE INFORMATION TO ASSESS DESERTIFICATION IN THE DRY CHACO REGION

S U M M A R Y

The loss of the forest cover allows solar radiation to reach the soil surface directly and the wind to act without impediment. This increases both soil and air temperature as well as the air saturation deficit, thus resulting in a greater loss of soil moisture. Deforestation also allows heavy rains to reach the soil surface with their maximum intensity and to cause water erosion on farmlands.

The purpose of this research project was to characterize the climatic risk of desertification in the phytogeographical region known as the Dry Chaco in the Province of Santiago del Estero, Argentina.

Through Morton's model, monthly potential evapotranspiration (PET) values were estimated for sites for which the necessary meteorological parameters were available, while spatial interpolation was utilized to obtain PET values for those sites for which only monthly precipitation (P) records existed. When necessary, regression equations were used to adjust the PET values for dry and wet months. With the PET and P data, the serial water balance (Palmer's method) was carried out, and the corresponding drought indices (PDI) were obtained. These were then treated statistically and the probability of occurrence was determined for 90, 95, and 99 percent. With the 99% probability values, PDI isolines for the study area were drawn for January, April, July, and October. A gradual East-to-West increment in the PDI values is noted, thus aggravating the risk of desertification.

Through LANDSAT imagery for the summers of 1975, 1992, and 1999, the increase in the land areas cleared for farming and the changes in forest cover over time were evaluated. A mixed method was utilized in the thematic classification of the satellite images. Due to their geometric shapes, as well as their color uniformity and texture, those areas which were cleared for agriculture and livestock uses are easy to locate on a satellite image; hence a rigid approach was chosen for such areas. In 1975, the area under farming was 30,893 ha; in 1992, it grew to 192,637 ha, and a maximum of 358,199 ha was reached in 1999. In this 24-year period, an exponential growth took place. Furthermore, it was confirmed that land clearing with bulldozers

eliminates the first centimeters of the surface soil layer, which has the highest organic matter content. Therefore, soil degradation and, hence, the desertification process, begin before any farming activity occurs.

Time analysis of the satellite images shows that, in spite of irrational logging practices, involving the extraction of older trees, the forest is recovering because the younger trees remaining in the stand reach, in time, the typical dominant height of the forest. This happened in the period 1975-92, as shown in the proportional cover model obtained from the corresponding thematic maps and by crossed tabulation of the matrices from the 1975 and 1992 images. On the other hand, land clearing for farming purposes hinders the recovery of the forest cover due to the absence of seed trees of the major species.

This research reveals that the various desertification processes are the results of the total loss of native forest cover, and are made evident by the abandonment of unproductive fields, soil degradation, and the increasing area with shrub cover, as shown in the thematic map of the summer of 1999.

INDICE

	Pág.
Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE LA DESERTIFICACIÓN	
Generalidades	1
Factores causales	2
Parámetros de evaluación	3
Hipótesis	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Capítulo 2	6
ASPECTOS AGROMETEOROLÓGICOS DE LA DESERTIFICACIÓN	
Antecedentes	6
Caracterización del área de estudio	6
A. Aspectos geográficos	6
B. Vegetación	7
C. Suelo	8
D. Clima	8
Objetivos	9
Materiales y Métodos	9
A. Variables meteorológicas	9
B. Datos de suelo	11
C. Balance hídrico de Palmer.....	11
1. Cálculo del balance hídrico mensual seriado.....	12
2. Obtención de los coeficientes promedios de evapotranspiración, recarga, drenaje y pérdida de agua por el suelo	14
3. Conversión de los coeficientes en índices de variación de humedad o sequía.....	15
4. Escala del Índice de Sequía de Palmer (ISP).....	16

5. Justificación del uso del modelo de Morton	17
a. Variables utilizadas en el modelo de Morton	18
b. Estimación de datos de ETP para localidades carentes de datos meteorológicos.....	21
6. Cálculo del Balance hídrico y del índice de sequía.....	22
a. Con valores mensuales de ETP	22
b. Con valores promedios de ETP	23
c. Con valores estimados de ETP	23
d. Distribución del índice de sequía.....	24
Resultados y Discusión	24
 Capítulo 3	 40
EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS DESTINADAS A LA AGRICULTURA, DETERMINADA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL MULTITEMPORAL	
Introducción	40
A. Antecedentes en el empleo de información satelital.....	40
B. Antecedentes sobre el uso de la tierra en la zona de estudio.....	42
Objetivos	45
Materiales y Métodos	45
Clasificación de las imágenes	52
Resultados y Discusión	53
A. Imágenes de los veranos de 1975, 1992 y 1999	53
B. Actividades agropecuarias	56

Capítulo 4	63
DETERMINACIÓN DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO UTILIZANDO	
INFORMACIÓN SATELITAL	
Introducción	63
Objetivos	63
Materiales y Métodos	63
Clasificación temática de las imágenes.....	64
Resultados y Discusión	74
Capítulo 5	79
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXO	90

INDICE DE CUADROS

		Pág.
Cuadro N° 1	Tipo de suelo y lámina de agua útil (mm)	11
Cuadro N° 2	Archivo de datos de entrada para el BHS (a) con datos mensuales de ETP y (b) con ETP promedio para la localidad de Quimilí.....	13
Cuadro N° 3	Escala de valores del índice de sequía de Palmer para distintos tipos de sequía	17
Cuadro N° 4	Valores mensuales de ETP, según el método de Morton, correspondientes al año 1970	24
Cuadro N° 5	Valores del índice de sequía para la localidad de Quimilí obtenidos con ETP mensuales.....	25
Cuadro N° 6	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Sachayoj.....	26
Cuadro N° 7	Análisis de la regresión de los índices de sequía obtenidos para las localidades consideradas con ETP mensuales y \overline{ETP} del período 1970/90.	27
Cuadro N° 8	Años secos y húmedos de la localidad de Sachayoj, serie 1970/90.....	28
Cuadro N° 9	\overline{ETP} serie 1970/90 y ETP estimados para años secos y húmedos para la localidad de Sachayoj.	30
Cuadro N° 10	Comportamiento de los valores de los análisis de correlación de los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales, \overline{ETP} y con ETP estimados (p/años secos y húmedos) en la serie 1970/90.	32
Cuadro N° 11	Medidas de posición, dispersión y probabilidad del test de Shapiro-Wilk para la localidad de Tintina.	33
Cuadro N° 12	Medidas de posición, dispersión y prueba de normalidad del índice de sequía de Palmer de localidades de la Región del Chaco Seco, para los meses de enero, abril, julio y octubre.....	34
Cuadro N° 13	(a) Probabilidades de ocurrencia de determinados niveles del Índice de Sequía de Palmer para la localidad de Tintina y (b) Probabilidades de ocurrencia del ISP para los meses de enero, abril, julio y octubre en una localidad de la región más húmeda (Gancedo) y otra localidad de la región semiárida (Suncho Corral).	35
Cuadro N° 14	Índices de sequía de Palmer según probabilidades de ocurrencia (X_1 , X_2 y X_3) para la localidad de Tintina.....	36
Cuadro N° 15	Índices de sequía de Palmer según probabilidades de ocurrencia (X_1 , X_2 y X_3) de los meses de enero, abril, julio y octubre.	36
Cuadro N° 16	Distribución porcentual de los casos avanzados de los procesos de alteración del suelo, crecimiento y/o rendimiento del cultivo en tierras desmontadas y habilitadas a la producción (Casas et al., 1983).	44
Cuadro N° 17	Puntos de control considerados para la corrección geométrica de la imagen MSS 245/079 del año 1975.....	51
Cuadro N° 18	Superficie desmontada del departamento Moreno (hasta el verano de 1975).....	54
Cuadro N° 19	Superficie desmontada con fines agropecuarios en el Departamento Moreno (verano de 1992).....	54
Cuadro N° 20	Superficie desmontada en el Departamento Moreno (verano de 1999).....	54

Cuadro N° 21	Clases temáticas y área ocupada en los veranos de 1975, 1992 y 1999 en el Departamento Moreno, Sgo. del Estero.	74
Cuadro N° 22	Datos comparativos de las intersecciones entre las matrices de las imágenes de a) 1975 con 1992 y b) 1992 con 1999, en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).....	78
Cuadro N° 23	Datos del balance hídrico seriado de la localidad de Quimilí, correspondientes a los años 1970 y 1971, ejecutado con ETP mensuales.....	90
Cuadro N° 24	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Gancedo (Chaco).	91
Cuadro N° 25	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Quimilí.....	92
Cuadro N° 26	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Roversi.	93
Cuadro N° 27	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Sachayoj.....	94
Cuadro N° 28	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Suncho Corral.....	95
Cuadro N° 29	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Tintina.	96
Cuadro N° 30	Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Vilelas.....	97
Cuadro N° 31	Medidas de posición, dispersión y probabilidad del Test de Shapiro-Wilk, para las localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.....	98
Cuadro N° 32	Valores de los índices de sequía mayores o iguales a: X_1 , X_2 , X_3 , con probabilidad de 90 %, 95 % y 99 % respectivamente, para las localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.....	102
Cuadro N° 33	Probabilidades de ocurrencia de determinados niveles del Índice de Sequía de Palmer en los meses del año, para la localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.....	103
Cuadro N° 34	Puntos finales de control en la georreferenciación de la Sub-escena MSS 229/079 de enero de 1992.....	108
Cuadro N° 35	Puntos finales de control en la georreferenciación de la Sub-escena MSS 228/079 de diciembre de 1991.....	110
Cuadro N° 36	Puntos finales de control en la georreferenciación de la Sub-escena LandSat 5 TM 228/079 de noviembre de 1998.....	113
Cuadro N° 37	Puntos finales de control en la georreferenciación de la Sub-escena LandSat 5 TM 229/079 de enero de 1999.....	115

INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura N° 1	Ubicación geográfica del área de estudio en el Chaco Seco, Departamento Moreno (Sgo. del Estero).....	7
Figura N° 2	Ubicación geográfica de las localidades cuyos registros fueron utilizados para la caracterización del área de estudio.....	10
Figura N° 3	Representación esquemática de la relación complementaria, entre la Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real, con energía radiante constante.....	19
Figura N° 4	Isolíneas de ETP del área, correspondientes al mes de enero del año 1970.	22
Figura N° 5	Correlación entre los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales en función de \overline{ETP} y límites de los intervalos del 95 % de confianza de la localidad de Sachayoj, (Período 1970/90).	27
Figura N° 6 (a)	Análisis de regresión lineal para años secos.....	29
Figura N° 6 (b)	Análisis de regresión lineal para años húmedos.....	29
Figura N° 7	Correlación entre los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales en función de ETP estimados y límites de los intervalos del 95 % de confianza, para la localidad de Sachayoj.....	31
Figura N° 8 a	Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de enero.	37
Figura N° 8 b	Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de abril.	38
Figura N° 8 c	Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de julio.	38
Figura N° 8 d	Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de octubre.	39
Figura N° 9	Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes satelitales para obtener las superficies ocupadas con fines agropecuarios.....	49
Figura N° 10	Mapas de uso agropecuario en el Departamento Moreno y gráfico que muestra la dinámica del incremento de la actividad agropecuaria en el área de estudio.....	55
Figura N° 11	Distintas vías de degradación del Bosque natural por la actividad de la explotación forestal irracional (obrajes) y agropecuaria.	57
Figura N° 12	Cambio de uso del suelo en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).....	59
Figura N° 13	Diagrama de flujo de los procesos y pasos seguidos para la clasificación temática hasta lograr el SIG.....	65
Figura N° 14	Perfil espectral de las firmas de las clases temáticas de la imagen MSS 1975.....	69
Figura N° 15	Mapa temático de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1975.....	72
Figura N° 16	Perfil espectral de las firmas de las clases temáticas de la imagen MSS 1992.....	73
Figura N° 17	Mapa temático de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1992.....	75
Figura N° 18	Mapa de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1999.	76
Figura N° 19	Dinámica del cambio de ocupación del suelo en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).	77
Figura N° 20	Diagrama de flujo del mosaico de las sub-escenas de las imágenes MSS22879 y MSS22979.....	111

INDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto N° 1	Topadora utilizada para el desmonte. 59
Foto N° 2	Rolo trozador de grandes dimensiones y muy pesado utilizado para aplastar los componentes más bajos de la cobertura forestal y facilitar el trabajo de la topadora. 60
Foto N° 3	Cordones de material leñoso en proceso de secado para su quema posterior. En la foto se puede observar el suelo acumulado en el cordón. 60
Foto N° 4	Cultivo de trigo en ciclo vegetativo, material leñoso y una importante cantidad de suelo acumulado en los cordones. 61
Foto N° 5	Suelo acumulado durante el acordonado y los restos de ceniza del material leñoso quemado. 61
Foto N° 6	Campo sometido recientemente a la acción del fuego para el rebrote de pastos tiernos. En la vista se puede apreciar el negro intenso de la superficie del suelo después del incendio. 61
Foto N° 7	Comienzo de rebrote de pastos tiernos en un campo que fue sometido a la acción del fuego (en esta vista se puede observar el efecto del lavado de la ceniza por el efecto de la escorrentía y la erosión hídrica que se produce). 62
Foto N° 8	Campo que fuera desmontado para actividades ganaderas y luego abandonado. (Se puede apreciar el suelo compactado y el inicio de la invasión de arbustal-fachinal(. 62
Foto N° 9	Campo con labranza tradicional de la pampa húmeda. 62
Foto N° 10	Perfil de bosque del Departamento Moreno (Sgo. del Estero). 67
Foto N° 11	En primer plano con la clase temática arbustal. 67
Foto N° 12	Pastizal iniciando el rebrote después del efecto del fuego al que fue sometida el área. 68
Foto N° 13	Pastizal seco (primer plano, en el sector izquierdo). 69

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE LA DESERTIFICACIÓN

Generalidades

La desertificación es un proceso que afecta en mayor o menor grado a los diferentes ambientes agroecológicos a nivel mundial, disminuyendo la cobertura natural protectora del suelo e influyendo en la capacidad agrícola de los territorios.

La eliminación de la cobertura vegetal arbórea en zonas con ecosistemas frágiles de regiones con climas subhúmedos secos, semiáridos y áridos constituye el factor principal que activa las causas de la desertificación en el mundo (UNEP, 1991). Esta problemática es muy compleja dado que las demandas crecientes de alimentos, por el incremento de la población, contribuye a la destrucción de ecosistemas naturales boscosos estables para incorporarlos a la actividad agrícola.

Por ser tan complejas las causas que determinan la desertificación, consideramos que no hay una definición que la satisfaga totalmente. Dregne (1983) definió la desertificación como “el empobrecimiento de los ecosistemas terrestres por el impacto humano”. Como se puede apreciar, la definición de Dregne es incompleta por no tomar en consideración todos los factores intervinientes. Una definición oficial internacional adoptada por la UNCED (1992) en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, considera a la desertificación como, “un proceso que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales del planeta en el contexto específico de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas, como resultado de variaciones climáticas y actuaciones humanas adversas”. Esta definición es también incompleta porque no hace una mención específica de los efectos de la desertificación sobre la biodiversidad (flora y fauna) y la atmósfera.

Factores causales

Según Kittredge (1948, 1960), Rusin y Flit (1960) y Geiger (1965), la cubierta forestal estabilizada actúa como un techo protector interceptando la radiación solar directa y disminuyendo la velocidad del viento. Al ser eliminada la vegetación arbórea nativa, se alteran los parámetros citados y, consecuentemente, las otras variables ambientales que actúan en función de ellos tales como: la humedad relativa, la temperatura del aire y suelo, el déficit de saturación y el albedo, entre otras (Schroeder y Buck, 1970; Lee, 1978; Heuveldopt et al., 1986).

Charney (1975) y Charney et al. (1975, 1977) atribuyen a las actividades del hombre los cambios que experimentan las características superficiales del paisaje y las propiedades físicas de la atmósfera en las regiones con déficit hídrico. Williams y Balling (1996) afirman que los cambios que el hombre produce en la cobertura vegetal tienen una influencia significativa en el equilibrio energético y que estos cambios repercuten principalmente en los valores de los parámetros del albedo y de la evapotranspiración potencial. Huss (1993) argumenta que la desertificación no avanza por sí sola sino que el hombre es el principal responsable de la explotación desmedida que realiza, la cual excede la capacidad productiva del suelo en zonas con déficit hídricos estacionales.

La región fitogeográfica del Parque Chaqueño Seco (Parodi, 1964), en la extensión comprendida en la Provincia de Santiago del Estero, no ha sido ajena a la presión demográfica. En los últimos años, está sufriendo un proceso de desertificación a raíz del desmonte para introducir cultivos de ciclo anual y debido a la actividad ganadera.

El proceso de degradación de la masa forestal comienza hace más de 400 años con las economías pastoriles hispano-indígenas, por los efectos de la ganadería caprina y bovina sin apotreramiento dentro de la masa forestal (Saravia Toledo, 1986), que trajo como consecuencia la expansión de elementos arbustivos invasores y la destrucción de renovales de las especies arbóreas forestales principales.

Desde principios de siglo, la intensa actividad extractiva de las especies forestales de valor para la obtención de durmientes, maderas y leña, para satisfacer la demanda del ferrocarril y el suministro de postes para los alambrados de los campos de la pampa húmeda, intensificó la degradación del bosque natural con la arbustización de los estratos bajos (fachinal) (Morello y Saravia Toledo, 1979).

En el Departamento Moreno, que constituye el área piloto de estudio, el problema se agrava desde la década de 1970 por la denominada expansión de la frontera agropecuaria y la puesta en venta por subasta pública de tierras fiscales con cobertura forestal para fines agropecuarios. A partir de esta época se produce una continua y acelerada disminución de su cobertura vegetal nativa. Los desmontes a tala rasa, utilizando maquinaria pesada y métodos que producen la alteración del suelo y la quema posterior del material leñoso residual, contribuyen a un paulatino y progresivo proceso de desertificación.

En la mayoría de los casos no se han respetado los decretos del Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero sobre el Régimen Legal de Desmontes (1980, 1996, 1997), que fijan franjas de bosque nativo de protección a distancias preestablecidas. Se puede apreciar que el desmonte irracional influye sobre la acción del viento y la escorrentía superficial, que se manifiestan a través de la erosión eólica e hídrica (Casas y Mon, 1988).

El manejo inadecuado de la actividad ganadera contribuye, en la mayoría de los casos, a la compactación del suelo, dificultando la infiltración del agua de precipitación en el perfil del suelo, disminuyendo la capacidad de almacenaje del mismo e incrementando la escorrentía superficial y por lo tanto la erosión hídrica.

En general, el laboreo del suelo desmontado para cultivos anuales se efectúa mediante el uso de maquinaria y tecnología empleadas en la pampa húmeda, lo cual produce la remoción del suelo, alterando su estructura y quedando el mismo expuesto a los fuertes vientos, calientes y desecantes del cuadrante Norte, de fines de invierno y comienzos de primavera (Boletta, 1988; Boletta et al., 1989), visualizándose la erosión eólica en las “tormentas de tierra” (Casas y Mon, 1988).

Parámetros de evaluación

La capacidad productiva de los distintos ambientes se puede conocer a través del balance hídrico (Pascale y Damario, 1983). Para el cálculo de un balance hídrico se necesita disponer de datos de registro de precipitación (P) y de los valores de la evapotranspiración potencial (ETP). La ETP es la demanda que realiza la atmósfera al conjunto suelo-planta, según las condiciones físicas que posea en ese momento y en cuyo proceso intervienen como variables: la temperatura

del aire, el déficit de saturación, la velocidad del viento, el tipo y color de la cobertura del suelo, y la heliofanía relativa entre otras.

El balance hídrico seriado de Palmer (1965) es un método que permite la obtención de los valores del balance y un índice de sequía (ISP) para cada uno de los meses en la serie de años considerada. El modelo de Palmer ejecuta el balance con los valores de ETP estimado con el método de Thornthwaite (1948).

La ETP se puede estimar con distintos modelos, según los registros que se disponga en el lugar de las variables que intervienen en el proceso. El modelo de Thornthwaite estima la ETP con datos de la temperatura media del aire y de la latitud, pero es un método que subestima los valores de la ETP por tomar en consideración solamente una de las variables determinante del proceso. El modelo de Penman (1948) para estimar la ETP necesita datos de las variables: temperatura media del aire, heliofanía relativa, déficit de saturación, radiación astronómica y velocidad del viento, siendo uno de los más usados para los cálculos de ETP. Morton (1983) estima la ETP con datos de temperatura media del aire, la heliofanía relativa y la humedad relativa. Da Porta y Caamaño Nelli (1993) realizaron un estudio comparativo de la obtención de la ETP utilizando diferentes modelos y encontraron que los valores de ETP estimados con el modelo de Morton superan en un 20 y 30 % a los obtenidos con el método de Penman (1948).

En escenarios semejantes al Chaco Seco, Thomas y Middleton (1994) y Williams y Balling (1996), que tratan temas sobre desertificación, coinciden que el principal inconveniente para un estudio que permita cuantificar con precisión los parámetros que caracterizan la desertificación es la carencia de registros prolongados y confiables de todas las variables intervinientes en el proceso.

En la zona de estudio no se dispone de registros de las variables necesarias para estimar la ETP por el método de Penman y solamente existen los registros de las variables que intervienen en el modelo de Morton. Por ello, se postula utilizar para determinar la variación regional de la sequía en el área de estudio la estimación de la ETP mediante el modelo de Morton, en reemplazo del método de Thornthwaite, usado por Palmer (1965) para la ejecución del balance hídrico seriado y la obtención de los índices de sequía mensuales.

Con respecto a los procesos de sequías Ravelo y Rotondo (1987a, 1987b) han comprobado que la intensidad y frecuencia de las mismas están asociadas con las características agroclimáticas de cada región.

Tucker y Choudhury (1987), Kogan (1995, 1997), Ravelo y Pascale (1997) y Ravelo (2000), utilizaron información satelital para la identificación de las áreas afectadas por sequías. Las imágenes satelitales fueron utilizadas para determinar cambios de cobertura terrestre como: áreas afectadas por incendios forestales y de pastizales, cartografía de bosques, inventario forestal, clasificación de bosques, cambios estacionales en la vegetación, y estudio de desertificación (Chuvienco y Congalton, 1989; Tucker et al., 1987, 1991; Thren y Zerda, 1994; González Sánchez y Calvo Herrero, 1994 y Zerda, 1994).

Sobre la base de los antecedentes arriba detallados, se postula que con datos meteorológicos de superficie e información de imágenes satelitales se identificará y determinará la evolución de la desertificación en el área de estudio en el Chaco Seco.

Hipótesis

Los procesos conducentes a la desertificación se pueden evaluar mediante la utilización de datos meteorológicos de superficie e información de sensores remotos.

Objetivo general

Caracterización agrometeorológica de un sector del Chaco Seco para evaluar los procesos de desertificación.

Objetivos específicos

- 1- Determinar la variación regional de las sequías.
- 2- Identificar la evolución de las áreas dedicadas a la agricultura entre 1975 y 1999.
- 3- Documentar cuales de las actividades agropecuarias no conservacionistas inician y/o aceleran procesos de desertificación.
- 4- Determinar tipos de cobertura vegetal y su variación temporal.

Capítulo 2

ASPECTOS AGROMETEOROLÓGICOS DE LA DESERTIFICACIÓN

Antecedentes

Uno de los factores considerados en los estudios sobre la desertificación es la sequía. Algunos autores consideran que se está en presencia de una sequía cuando las precipitaciones de ese año son inferiores al promedio (Ogallo, 1994; López Bermúdez, 1995). Palmer (1965), mediante un balance hídrico seriado obtiene un índice de sequía (ISP). Con los valores de ISP, Palmer (1965) identifica el grado de severidad de las sequías o su ausencia sobre la base de una escala por él confeccionada. Ravelo y Rotondo (1987a, 1987b), utilizando el ISP, han comprobado que la intensidad y frecuencia de las sequías están asociadas con las características agroclimáticas de cada región.

Caracterización del área de estudio

A. Aspectos geográficos

El área de estudio está incluida en la Región Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Chaqueña, Distrito Chaqueño Occidental, de acuerdo a la fitogeografía de la República Argentina de Cabrera (1971, 1976). El Distrito Chaqueño Occidental; además de las partes Oeste de las Provincias de Formosa y Chaco, casi la totalidad de la Provincia de Santiago del Estero, Este de Salta y Este de Tucumán, llegando en su límite inferior hasta La Rioja y Catamarca. El estudio se lleva a cabo en una porción de este gran Distrito Fitogeográfico, circunscripto principalmente a la superficie ocupada por el Departamento Moreno, en la Provincia de Santiago del Estero. Se consideran además localidades vecinas de los Departamentos colindantes al Departamento Moreno y algunas limítrofes de las Provincias del Chaco, Santa Fe y Tucumán.

Esta zona posee un clima subhúmedo seco y semiárido, que se caracteriza por tener, en determinadas épocas del año, un fuerte déficit hídrico, motivado por las precipitaciones escasas o nulas en determinados meses y una fuerte demanda de la atmósfera, debidas a las altas temperaturas y su elevado déficit de saturación, que agravan aún más la situación ambiental.

La Figura N° 1 muestra la ubicación geográfica del área de estudio en la Provincia de Santiago del Estero.

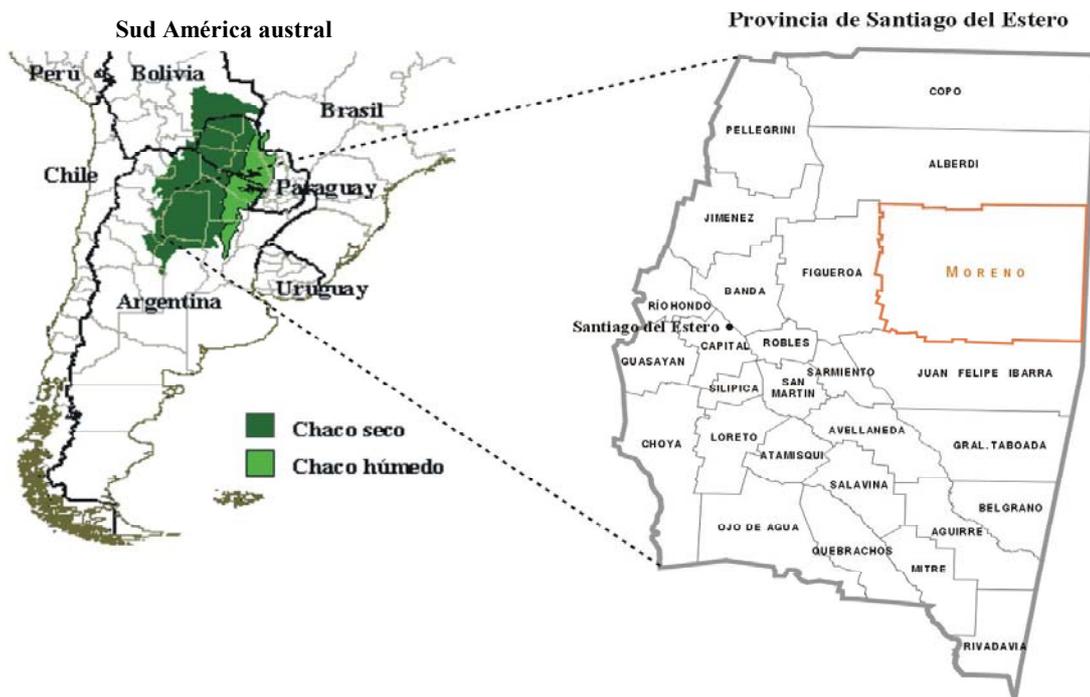


Figura N° 1. Ubicación geográfica del área de estudio en el Chaco Seco, Departamento Moreno (Santiago del Estero).

B. Vegetación

La vegetación de la zona ha sido listada por Tortorelli (1956), Digilio y Legname (1966), Ragonese (1967), Morello y Adámoli (1968), Cabrera (1971, 1976) y Legname (1982), que consideran que la comunidad clímax es el bosque de *Schinopsis quebracho-colorado* (quebracho colorado santiagueño) y *Aspidosperma quebracho-blanco* (quebracho blanco), las especies de mayor importancia que componen el estrato arbóreo superior.

Especies arbóreas de menor porte son: *Prosopis kuntzei* (itín); *Prosopis nigra* (algarrobo negro) y *Ziziphus mistol* (mistol); con menos frecuencia se hallan presentes

Prosopis alba (algarrobo blanco), *Cercidium praecox* (brea), *Jodina rhombifolia* (sombra de toro) y *Acacia aroma* (tusca).

Entre las especies arbustivas, se destacan *Celtis pallida* (tala pispita), *Acacia furcatispina* (teatín), *Mimosa detinens* (garabato blanco), *Acacia praecox* (garabato negro) y *Capparis atamisquea* (atamisqui).

Entre las cactáceas que representan esta región se encuentran *Opuntia quimilo* (quimil), *Stetsonia coryne* (cardón), *Cereus validus* (ucle) y *Opuntia salmiana* (llora tigre), entre otras.

El estrato herbáceo está compuesto por especies de gramíneas pertenecientes a los géneros *Setaria*, *Trichloris*, *Digitaria*, *Gouinia*, *Chloris*, y otras con menor presencia.

Por último, las bromeliáceas están representadas por especies epífitas del género *Tillandsia* y las terrestres por los chaguares (*Bromelia serra* y *B. hieronymi*).

C. Suelo

El suelo del área de estudio pertenece al Orden de los Molisoles, que se desarrollan bajo vegetación de gramíneas y bosques de regiones templadas húmedas, subhúmedas y semiáridas.

En el Departamento Moreno, los molisoles están representados por el grupo de los Haplustoles que se han generado a partir del loess original, bajo condiciones de clima semiárido, hipertérmico y de un paisaje de relieve llano a suavemente ondulado. En el área de estudio predomina el Haplustol Entico (Peña-Zubriate, 1979; Vargas Gil, 1990; Bonelli, 1994; Duffau, 1995).

D. Clima

El clima del Chaco Seco, al cual pertenece la zona en estudio, se caracteriza por ser cálido, con registros de temperatura media mensual (TMM) del mes más caliente (enero) de 28° C y del mes más frío (julio) de 16,3° C. Los extremos térmicos van desde temperaturas superiores a los 47° C en varias localidades del Noroeste Argentino (NOA), quedando incluida la totalidad de la Provincia de Santiago del Estero en el polo de calor de

América del Sur (Prohaska, 1959) y un registro de mínima absoluta de $-10,0^{\circ}\text{C}$ en 1955 en la ciudad de Santiago del Estero (SMN, 1980).

Las precipitaciones medias anuales de la zona en estudio oscilan desde aproximadamente 750 mm en la parte oriental a 500 mm en la parte occidental, disminuyendo progresivamente de Este a Oeste. El 60 % de las precipitaciones se concentra en el semestre cálido (octubre-marzo). El balance hídrico del área es deficitario en la mayoría de los meses del año (Ledesma y Boletta, 1972; Boletta, 1988; Boletta et al., 1989).

Los vientos predominantes son del cuadrante Sur y Norte, siendo calientes y desecantes los que soplan del cuadrante Norte a fines de invierno y principio de la primavera (Ledesma y Boletta, 1972; Boletta, 1988).

Objetivos

Los objetivos del presente capítulo son:

- Obtención de índices de sequía.
- Verificación de la variabilidad temporal, y espacial del índice de sequía.

Materiales y Métodos

A. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas consideradas son la temperatura media mensual (TMM), la humedad relativa media mensual (HRMM), la heliofanía relativa media mensual (HELRMM) y la precipitación (P). Se obtuvieron de registros meteorológicos de estaciones y puestos pluviométricos ubicados dentro y fuera del área de estudio, para disponer de una mejor cobertura espacial. Las series de tiempo utilizadas abarcan 21 años consecutivos (1970-1990) para TMM, HRMM y HELRMM, y 27 años (1970-1996) para P.

A continuación, se detalla la ubicación geográfica de las localidades con los registros de las distintas variables utilizadas y las series correspondientes. En la Figura N° 2 se presenta la ubicación geográfica.

a) Temperatura media mensual, humedad relativa media mensual y heliofanía relativa media mensual, serie 1970-1990.

Localidades	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura (msnm)
Santiago del Estero	27° 47'	64° 16'	199
Ceres (Sta. Fe)	29° 53'	61° 57'	88
Las Breñas-INTA (Chaco)	27° 05'	61° 07'	102
Villa Angela (Chaco)	27° 34'	60° 44'	75
Famaillá-INTA (Tucumán)	27° 03'	65° 25'	363

b) Precipitación mensual, serie 1970-1996.

Localidades	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura (msnm)
Gancedo (Chaco)	27° 30'	61° 42'	102
Sachayoj	26° 41'	62° 11'	155
Roversi	27° 35'	62° 11'	153
Quimilí	27° 39'	62° 25'	134
Tintina	27° 02'	62° 42'	160
Vilelas	27° 57'	62° 37'	235
Suncho Corral	27° 56'	63° 26'	103

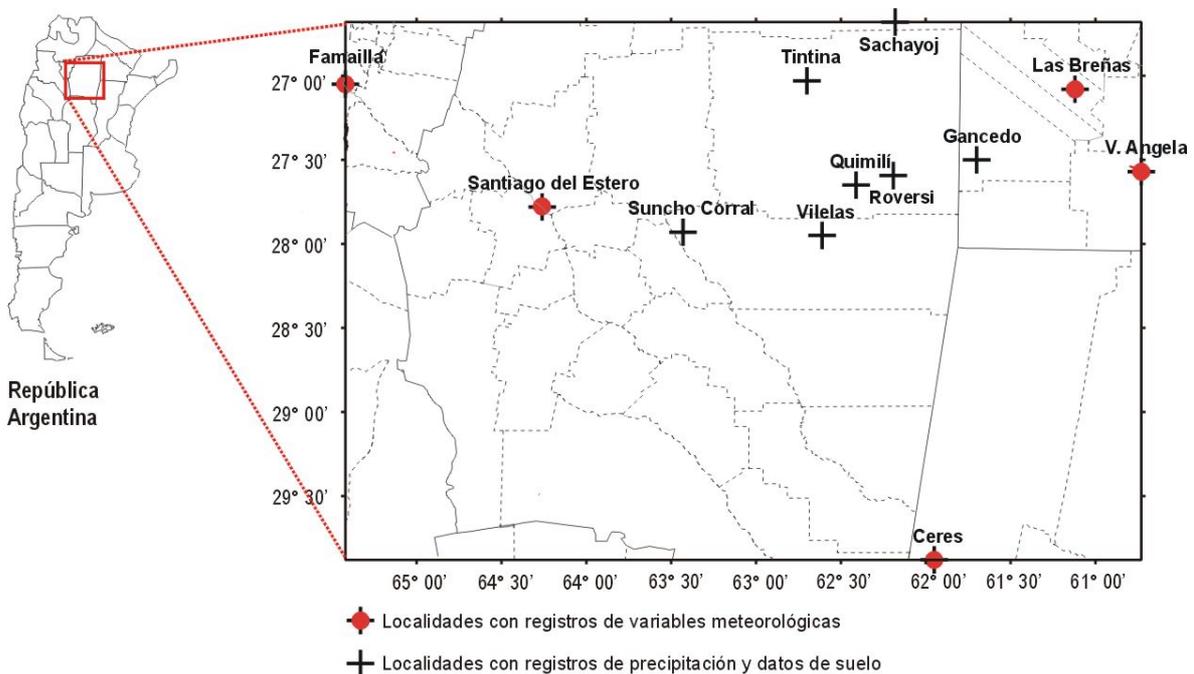


Figura N° 2. Ubicación geográfica de las localidades cuyos registros fueron utilizados para la caracterización del área de estudio.

B. Datos de suelo

Para la evaluación de la capacidad de almacenaje de agua de los suelos se utilizaron las características edáficas de localidades dentro y fuera del área de estudio.

En el Cuadro N° 1 se detallan los tipos de suelo de cada una de las localidades de referencia.

Cuadro N° 1. Tipo de suelo y lámina de agua útil (mm)

Localidades	Latitud Sur	Longitud Oeste	Tipos de Suelo	Agua útil (mm)
Quimilí	27° 39'	62° 25'	Haplust. Entico (Molisoles)	150
Tintina	27° 02'	62° 42'	Haplust. Entico	105
Roversi	27° 35'	62° 11'	Haplust. Entico	180
Vilelas	27° 57'	62° 37'	Haplust. Entico	168
Sachayoj	26° 41'	62° 11'	Haplust. Entico	224
Suncho Corral	27° 54'	63° 26'	Haplustol-Ustortentes-Torrifluentes Típicos	120
Gancedo (Chaco)	27° 30'	61° 42'	Haplust. Entico	174

C. Balance hídrico de Palmer

Para el conocimiento de la marcha anual del balance de la humedad del suelo se utilizó el Balance Hídrico de Palmer (1965). El balance considera dos capas de suelo para la acumulación y extracción del agua: la capa superior, que se denomina **Ss**, contiene 25 mm de agua útil y que, ante la pérdida de la misma (**Ls**), se comporta como un espejo de agua, y la capa inferior, denominada **Su**, que contiene el resto del agua útil.

La pérdida de agua del suelo está en función de la ETP y se la calcula mediante las siguientes expresiones:

$$Ls = Ss \quad \text{o} \quad ETP - P, \text{ el valor que resulte menor de ambos, donde } P \text{ es la precipitación del período (mes)}$$

La pérdida de humedad de la capa inferior (**Lu**) se produce de acuerdo a:

$$Lu = (ETP - P - Ls) Su' / AWC$$

Donde:

Su': humedad del día anterior

AWC : valor del agua útil total, o sea, $AWC = CC - PMP$

CC: contenido de humedad del suelo en capacidad de campo

PMP: contenido de humedad del suelo en el punto de marchitez permanente

Para un período determinado, el contenido de agua total del suelo es $S = Ss + Su$ y la pérdida total de humedad es $L = Ls + Lu$.

El escurrimiento comienza cuando las dos capas alcanzan el valor **CC**.

El agua útil total está en función de la profundidad y de las características físico-químicas del suelo, para la profundidad considerada.

Se optó por emplear el balance hídrico de Palmer porque a partir del mismo se calcula el Índice de Sequía, que permite comparar las condiciones de la humedad edáfica de distintos tipos de suelo en condiciones de climas diferentes y de agua útil con valores no coincidentes. Este índice se convierte en un factor de comparación al permitir analizar las variaciones de la evapotranspiración, la humedad edáfica y los excesos y deficiencias de cada mes en relación a los valores normales (promedio) de dichas variables. En síntesis, se logran cuantificar los desvíos de la marcha de la humedad edáfica en una época determinada del año respecto de los valores promedio considerando tipo de suelo, precipitación, evapotranspiración y capacidad de retención de humedad edáfica.

El procedimiento original de cálculo consta de las siguientes etapas:

1. Cálculo del balance hídrico mensual seriado

Se calcula a partir de las precipitaciones y de la evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Thornthwaite. Dado que el método de Thornthwaite subestima el valor ETP, porque sólo considera la TMM del aire, y que está demostrado que hay otras variables que contribuyen activamente en la ETP (como el déficit de saturación del aire y la heliofanía relativa, entre otros), en este estudio se reemplazó por el método de Morton (1983), que se explica más adelante.

Mediante la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), se calculan los valores potenciales de recarga, drenaje y pérdida de humedad del suelo.

El formato de los archivos de datos para la realización del balance hídrico se ejemplifica en el Cuadro N° 2.

Cuadro N° 2. Archivo de datos de entrada para el BHS (a) con datos mensuales de ETP y (b) con ETP promedio para la localidad de Quimilí ^{1 2}

a) Archivo de datos para el BHS con valores históricos de ETP

QUIMILI OBSERV		1970												
25.0	125.0	25.0	125.0											
005170	257	243	170	156	63	33	73	123	165	199	276	282		
005170	57	13	43	27	30	5	10	4	36	9	32	8	274	
005171	203	179	137	113	92	46	74	117	154	209	249	313		
005171	99	70	51	46	0	0	7	20	0	107	119	10	529	

b) Archivo de datos para el BHS con valores promedios de ETP ^{2 3}

QUIMILI OBSERV		1970												
25.0	125.0	25.0	125.0											
005170	236	193	157	102	69	38	52	96	144	203	215	238		
005170	57	13	43	27	30	5	10	4	36	9	32	8	274	
005171	99	70	51	46	0	0	7	20	0	107	119	10	529	
005172	137	32	199	54	6	80	0	0	37	31	32	197	805	
005173	215	9	238	149	0	77	0	0	0	17	32	141	878	

¹ Se describe el Balance Hídrico Seriado (BHS) para la localidad de Quimilí con valores mensuales de ETP. Se presenta una porción del mismo, correspondiente a los primeros años de la serie 1970-90, con la lámina de agua útil que le corresponde a dicha localidad.

² La primera fila de los archivos identifica el observatorio (punto geográfico con registro) y el año de inicio del balance hídrico seriado, en la segunda fila están consignados los valores de agua útil de la capa superficial y de la capa inferior y los montos de iniciación del balance. En la tercera fila, la primera columna identifica a la estación (código de la estación) y el año correspondiente. En el resto de cada archivo, las filas en las que no se da a conocer el total anual corresponden a los valores de ETP en cada mes y en las filas en las cuales se consigna el monto anual acumulado, la precipitación registrada en cada uno de los meses de los años de la serie considerada.

³ Este archivo se diferencia del anterior por que los datos de ETP son valores promedios que solamente se leen en la primera fila.

Se inició el balance con los montos máximos de agua útil, dado que las precipitaciones se concentran en esta región en los meses del verano, suponiendo que el suelo se encontraba en condiciones de contenido máximo de humedad.

2. Obtención de los coeficientes promedios de evapotranspiración, recarga, drenaje y pérdida de agua del suelo

Palmer define variables que asumen valores potenciales, y que se detallan a continuación:

$$\text{Recarga potencial (PR)} = \text{AWC} - S'$$

$$\text{Pérdida potencial (PL)} = \text{PLs} + \text{Plu}$$

Donde:

PLs (Pérdida potencial de la capa superior) = ETP o Ss' o el que resulte menor de ambos

Plu (Pérdida potencial de la capa inferior) = (ETP - Pls) Su' / AWC

S' = cantidad de agua disponible, en la capa superior e inferior del suelo al inicio del mes

Ss' = cantidad de agua disponible en la capa superior al inicio del mes

Su' = cantidad de agua utilizable de la capa inferior del suelo al inicio del mes

$$\text{Esgurrimiento potencial (PRO)} = \text{AWC} - \text{PR} = S'$$

$$o = 3 P - \text{PR}$$

El método permite obtener coeficientes promedios de evapotranspiración, recarga, drenaje y pérdida de agua del suelo de la siguiente forma:

$$\text{Coeficiente de Evapotranspiración } (\alpha) = \overline{ETR} / \overline{ETP}$$

Donde:

\overline{ETR} = Evapotranspiración real promedio

\overline{ETP} = Evapotranspiración potencial promedio

Coefficiente de Recarga	$(\beta) = \overline{R} / \overline{PR}$
Coefficiente de Escurrimiento	$(\gamma) = \overline{RO} / \overline{PRO}$
Coefficiente de Pérdidas	$(\delta) = \overline{L} / \overline{PL}$

Los valores climáticamente apropiados para las condiciones existentes (CAFEC) son identificados con el símbolo ^ sobre la variable de referencia:

$$\hat{ETR} = \alpha \text{ ETP}$$

$$\hat{R} = \beta \text{ PR}$$

$$\hat{RO} = \gamma \text{ PRO}$$

$$\hat{L} = \delta \text{ PL}$$

$$\hat{P} = \hat{ETR} + \hat{R} + \hat{RO} + \hat{L}$$

3. Conversión de los coeficientes en índices de variación de humedad o sequía

Las deficiencias hídricas “d” en momentos determinados estarán indicadas por el valor que tome la siguiente expresión:

$$d = P - \hat{P}$$

Una primera aproximación al valor del factor climático (K) para cada localidad queda indicado por la siguiente relación:

$$K = (\overline{ETP} + \overline{R}) / (\overline{P} + \overline{L}) \text{ Relación demanda / oferta de agua}$$

Un ajuste de la relación anterior está dada por la expresión que se indica a continuación:

$$K = 1,5 \text{ Log} [((\overline{ETP} + \overline{R} + \overline{RO} / (\overline{P} + \overline{L}) + 2,80) / \overline{D}) + 0,50$$

Donde:

\bar{D} : promedio de los valores absolutos de “d”

El Índice de Anomalía Hídrica (Z) es obtenido de la siguiente expresión:

$$Z = d K$$

El Índice de Sequía de Palmer surge de:

$$X_i = Z_i / (0,3 t + 2,69)$$

$$\text{para } t = 1 \quad X_i = Z_i / 3$$

$$\text{para } i = 1 \quad X = Z / 3$$

El método en el cálculo del Índice de Sequía de un mes dado toma en cuenta la situación del Índice del mes anterior (X_{i-1}) para considerar el factor de arrastre de la sequía o excesos, lo cual se obtiene de la expresión:

$$X_i = (X_{i-1} + Z_i) / (3 - 0,103 X_{i-1})$$

Palmer define el comienzo del período de sequía cuando X desciende alcanzando el valor -1,0 y su finalización cuando el valor de X es mayor que -0,5.

El cálculo del balance hídrico seriado de Palmer se realizó mediante el software PDIWIN (Ravelo y Herrero, 1999).

4. Escala del Índice de Sequía de Palmer (ISP)

El índice de sequía de Palmer permite cuantificar el grado de exceso o deficiencia de humedad (Palmer, 1965). El ISP ha sido utilizado en varios trabajos para caracterizar climáticamente las sequías, su variabilidad y la identificación de su ocurrencia (Ravelo y Rotondo, 1987a; 1987b; Ravelo y Pascale, 1997; Ravelo, 2000). Por otro lado, algunos autores también han encontrado en este índice un buen indicador para otras aplicaciones como el riesgo de peligro de incendios forestales (Haines et al., 1976; Heddinghaus, 1985).

En el Cuadro N° 3 se presenta la escala de valores de ISP que utiliza Palmer para ponderar e identificar los tipos de sequía.

Cuadro N° 3. Escala de valores del índice de sequía de Palmer para distintos tipos de sequía

ISP como factor condicionante de la desertificación	Tipo de Sequía
≤ -4,0	Sequía extrema
-3,99 a -3,0	Sequía severa
-2,99 a -2,0	Sequía moderada
-1,99 a -1,0	Sequía reducida
-0,99 a -0,5	Sequía incipiente
-0,49 a 0,49	Sin sequía (Normal)

Los valores del índice de sequía indican las distintas condiciones de estrés hídrico y/o ausencia de éste, que resulta ser una herramienta útil para valorar en forma objetiva los grados de riesgo de desertificación en una región. Sin embargo, dado que el proceso de desertificación es complejo, por la intervención de varios factores ambientales (vegetación, suelo, fauna, etc.) y de manejo del ecosistema, el ISP debe ser complementado con otros indicadores “ad hoc”, tales como los relacionados con excesos hídricos, índices de vegetación, etc. (estos son mencionados en el Capítulo 3).

5. Justificación del uso del modelo de Morton

Tal como se señaló en el Capítulo 1 para el cálculo de la ETP, para el BHS se utilizó el método de Morton (1983). Se reemplazara así el metodo de Thornthwaite en base de las siguientes consideraciones:

El método de Thornthwaite (1948) utiliza solamente la temperatura media mensual para estimar la demanda potencial. Los valores obtenidos subestiman la ETP respecto de otros modelos que utilizan otros elementos atmosféricos determinantes del requerimiento hídrico que la atmósfera hace al conjunto suelo-planta.

Por otro lado, dichos modelos hacen estimaciones geográficas puntuales de la evapotranspiración, mientras que Morton desarrolla su modelo sobre un concepto original y

novedoso que queda identificado como la relación complementaria entre la evapotranspiración potencial y la real (ETR) para áreas relativamente grandes.

El modelo utiliza como valores de entrada para el cálculo de la ETP, la temperatura media mensual del aire, la humedad relativa media mensual, la heliofanía relativa media mensual y los milímetros de la precipitación mensual, variables necesarias para emplear el método de Morton.

Estudios realizados sobre comparación de métodos de estimación de ETP por Da Porta y Caamaño Nelli (1996) demuestran que los valores obtenidos por el método de Morton son superiores entre un 20 y 30 % a los obtenidos por Penman.

Damario y Cattaneo (1982) en la cartografía de su trabajo sobre estimación climática de la evapotranspiración potencial en la República Argentina, obtienen para la localidad de Quimilí, por el método de Penman (1948), un valor acumulado anual de 1300 mm. Con el método de Doorembos y Pruitt (1977) obtienen unos 1400 mm.

En la estimación con el método de Morton, para la serie 1970/90, el acumulado anual obtenido para la misma localidad es de 1743 mm.

Al no disponerse en el área de estudio de las variables necesarias para estimar la ETP por el método de Penman con valores mensuales y en base a los estudios comparativos citados más arriba se resolvió reemplazar su cálculo por el método de Morton.

a. Variables utilizadas en el modelo de Morton

Morton parte de la suposición de que la ETP es un valor que varía en respuesta a cambios en la ETR.

En la consideración de la relación complementaria entre la ETP y la ETR se toman en cuenta las interacciones entre las superficies evaporantes y el aire que circula, de modo tal que un aumento en la disponibilidad de agua se corresponde con un incremento de la ETR y una disminución de la ETP. Morton resuelve las ecuaciones del balance de energía y de la transferencia de vapor calculando las mismas según Penman (1948), integrados a la estimación de la evapotranspiración potencial:

$$ETP = R\Delta / (\Delta + \gamma p) + f_T (U - U_D) \gamma p / (\Delta + \gamma p) \quad (1)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial;

R = radiación neta;

U = presión de vapor de saturación a la temperatura del aire;

U_D = presión de vapor de saturación a la temperatura del punto de rocío;

f_T = coeficiente de transferencia del vapor;

γ = constante psicrométrica;

p = presión atmosférica;

Δ = tasa de cambio de la presión de vapor de saturación respecto de la temperatura.

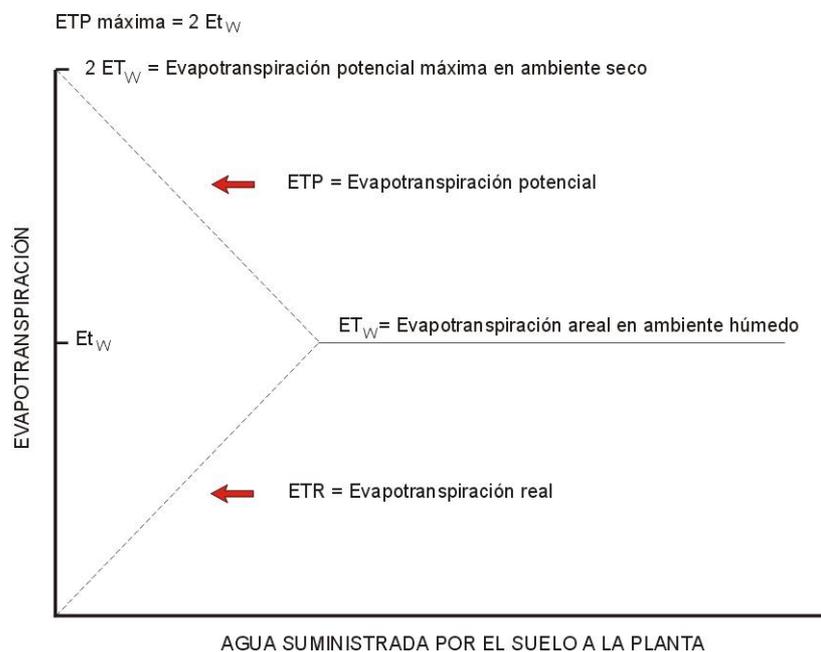


Figura N° 3. Representación esquemática de la relación complementaria, entre la Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real, con energía radiante constante.

En la Figura N° 3, se representa en forma esquemática la relación complementaria entre la ETP y la ETR. Como se puede apreciar, a falta de agua la ETP es máxima y no se registra ETR, pero a medida que el suministro de agua incrementa la ETR aumenta y la ETP disminuye proporcionalmente hasta un punto de igualdad. A ese punto Morton lo llama evapotranspiración areal en ambiente húmedo (E_{t_w}). A partir de ese punto, que corresponde al estado de saturación del suelo, a mayor incremento de suministro de agua no hay cambios ni en la ETP ni en la ETR. Por otro lado, la evapotranspiración máxima en ambiente seco (ETP máxima) corresponde a dos veces la evapotranspiración en ambiente húmedo ($2 E_{t_w}$), según se expresa en la siguiente ecuación:

$$ETP + ETR = 2 ETw$$

En ausencia de agua: $ETR = 0$ y ETP máxima = $2 ETw$ evapotranspiración potencial en ambiente seco.

Sin carencia de agua: $ETR = ETP = ETw$ y, como se desprende de la Figura N° 3, estamos en presencia de:

$$ETP + ETR = 2 ETw$$

Por lo tanto

$$ETR = 2 ETw - ETP$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial; es la que corresponde a la temperatura de equilibrio en la cual la ecuación del balance de energía y la ecuación de la transferencia de vapor de una superficie saturada arrojan el mismo valor;

ETw: evapotranspiración areal en suelo saturado y sin limitaciones en la disponibilidad de agua;

ETR: evapotranspiración real; en un área de dimensiones tales que los efectos del viento desde áreas vecinas son despreciables.

Los estudios llevados a cabo por Quintela y Scarpati (1991) indican que el modelo de Morton se adapta para grandes áreas y para series de tiempos largos en todas las regiones, excepto las áridas.

La zona de estudio se caracteriza por ser muy cálida y con déficit estacional de humedad, es por ello que se considera que el modelo de Morton es mucho más adecuado para estimar la ETP que el modelo de Thornthwaite, que únicamente se basa en la temperatura media del aire.

Sobre la base de todas las explicaciones, considerando las variables meteorológicas disponibles y ante la necesidad de estimar lo más eficientemente posible la demanda de agua por parte de la atmósfera en la zona de estudio, se optó por el modelo de Morton.

Se aplicó el modelo de Morton mediante el programa WREVAP (Morton et al., 1985), adaptado por Da Porta y Caamaño Nelli (1993).

El formato del archivo de los datos es el siguiente:

SANTIAGO DEL ESTERO	-27.77	199.0	576.0
1211010021			
1 11970 1			
.59	27.0		0.45
.54	28.4		0.73
.74	24.5		0.52
.64	24.7		0.53
.74	16.5		0.36
.68	13.1		0.47
.56	12.7		0.60
.42	15.5		0.71
.48	20.5		0.56
.52	21.7		0.48
.43	24.5		0.66
.53	28.1		0.57
HR	TM		Hr

Formato de entrada de datos para WREVAP (Morton et al., 1985; Da Porta y Caamaño Nelli, 1993) ⁴

b. Estimación de datos de ETP para localidades carentes de datos meteorológicos

Con los valores mensuales de ETP de cada una de las localidades de las que se poseían datos meteorológicos, en cada uno de los meses de cada año de la serie 1970/90, se procedió a obtener las isolíneas de ETP del área comprendida por dichas localidades con el programa Surfer (Surfer, 1994), (mediante el método de interpolación lineal de kriging). Se utilizó el método lineal por poseer la zona de estudio un relieve de uniforme a suavemente ondulado y un clima relativamente homogéneo. En la Figura N° 4 se pueden apreciar las isolíneas obtenidas para el mes de enero de 1970. En ella se colocaron a las localidades del área de estudio, de las cuales no se disponía de datos de las variables meteorológicas para estimar el valor de ETP que les corresponde. Mediante este método de interpolación se pudieron obtener 21 datos de ETP mensuales.

⁴ En el encabezamiento el archivo lleva el nombre de la localidad, la latitud con signo negativo para que el programa lea que corresponde al Hemisferio Sur, la Altura msnm y la precipitación anual acumulada en mm. Las columnas se identificaron al pie de las mismas, donde: HR = humedad relativa media mensual; TM = temperatura media mensual y Hr = heliofanía relativa media mensual.

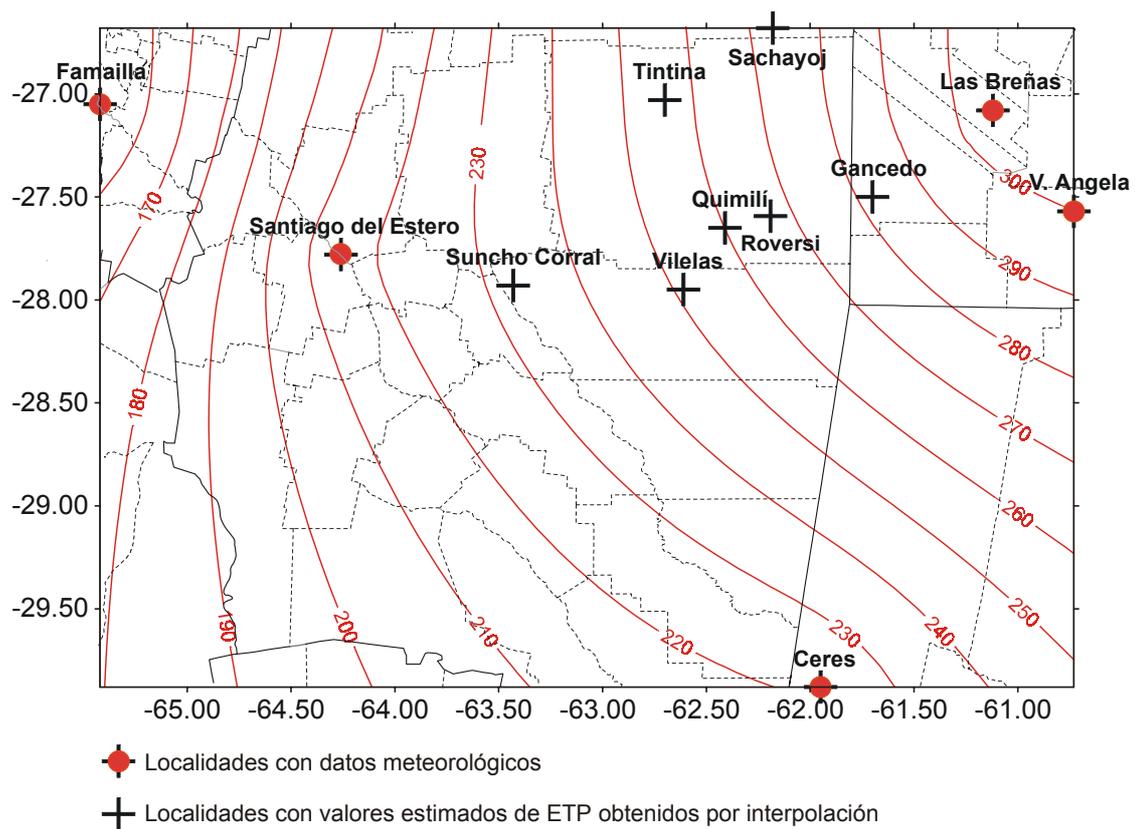


Figura N° 4. Isolíneas de ETP del área, correspondientes al mes de enero del año 1970.

Con la serie de ETP y de precipitación mensual de cada una de las localidades de interés, se procedió a armar los archivos de datos de entrada, según el formato requerido para ejecutar el balance hídrico seriado por el método de Palmer.

6. Cálculo del balance hídrico y del índice de sequía

Para cada una de las localidades, se calculó el balance hídrico seriado con tres bases de datos de distintos valores de ETP.

a. Con valores mensuales de ETP

Se ejecutó el balance hídrico seriado y se obtuvo los valores de ISP mensuales para cada una de las localidades del área de estudio, de la serie 1970-90.

b. Con valores promedios de ETP

Para cada localidad utilizando una hoja electrónica, se procedió a obtener la Media Aritmética, Desvío Estándar y Coeficiente de Variación para cada una de las localidades seleccionadas en el área de estudio. Esto se hizo con la finalidad de analizar los resultados y ver la posibilidad del uso de valores promedios de ETP, para la obtención del índice de sequía para toda la longitud de la serie 1970/1996 de registro de la precipitación, dado que los valores mensuales de ETP son del período 1970/90. Los coeficientes de variación para los meses calientes y húmedos están dentro de los valores aceptables, no así de los meses fríos y secos (abril, mayo, junio y julio), como se puede apreciar en el Cuadro N° 6.

Con los valores promedios de ETP de la serie 1970/90 para cada una de las localidades, se procedió a ejecutar el balance hídrico seriado. Se obtuvieron dos archivos de salida, uno con el balance hídrico y otro con el índice de sequía; ambos se comentan en el apartado Resultados y Discusión.

c. Con valores estimados de ETP

Para establecer la posibilidad de extender el balance hídrico a la serie de precipitación 1970/96, se ajustó la ETP promedio para años secos y húmedos de cada localidad. Una vez seleccionado el ETP promedio para cada localidad, se confeccionó el archivo de datos de entrada para el balance hídrico seriado.

Los datos de salida del índice de sequía, agrupados para cada uno de los meses del año, desde 1970 hasta 1996, (27 valores para el mes de enero y así sucesivamente para los otros meses) fueron sometidos al análisis estadístico con el programa Statgraphic v. 6.0 (Statistical Graphics Corp., 1992), con la finalidad de obtener las medidas de posición y dispersión y el test de Shapiro–Wilk (Di Rienzo et al., 1999), para conocer si los valores se distribuyen normalmente.

d. Distribución del índice de sequía

Conocida la distribución de los valores de los índices de sequía en cada mes de la serie, se procedió a obtener la probabilidad de ocurrencia de los distintos tipos de sequía para luego utilizarlos como grados de riesgo de desertificación.

Sobre la base del tipo de distribución de los valores de los índices se calculó la ocurrencia de los mismos con probabilidades de 90, 95 y 99 %.

Los valores de cada probabilidad de ocurrencia de los índices de sequía en cada uno de los meses y localidades del área se procesaron con el programa Surfer. Se obtuvieron las isolíneas de variación espacial, analizadas luego mediante SIG.

Resultados y Discusión

En el Cuadro N° 4 se presentan los valores de ETP mensuales estimados por Morton para las localidades de Santiago del Estero, Ceres, Famaillá, Villa Angela y Las Breñas, correspondiente al año 1970.

Cuadro N° 4. Valores mensuales de ETP, según el método de Morton, correspondientes al año 1970.

Localidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Sgo. del Estero	216	254	150	146	33	34	73	137	154	173	271	264	1905
Ceres	221	210	154	128	39	19	54	103	128	174	254	240	1724
Famaillá	148	171	89	95	24	24	68	114	150	162	224	213	1482
V. Angela	300	241	174	155	97	45	77	113	138	197	278	296	2111
L. Breñas	306	251	194	171	87	36	81	123	189	225	288	310	2261

En el Cuadro N° 23 (Anexo) se presenta el balance hídrico seriado de la localidad de Quimilí para los años 1970 y 1971 y en el Cuadro N° 5 los índices de sequía correspondientes para la misma localidad y esos años.

Cuadro N° 5. Valores del índice de sequía para la localidad de Quimilí obtenidos con ETP mensuales

N° de Orden	Año	Mes	Índice
1	1970	1	.0
2	1970	2	-1.1
3	1970	3	-1.8
4	1970	4	-2.4
5	1970	5	-2.2
6	1970	6	-2.2
7	1970	7	-2.3
8	1970	8	-2.5
9	1970	9	-2.3
10	1970	10	-2.8
11	1970	11	-3.5
12	1970	12	-4.2
13	1971	1	-3.9
14	1971	2	-3.6
15	1971	3	-3.7
16	1971	4	-3.7
17	1971	5	-4.0
18	1971	6	-4.0
19	1971	7	-3.9
20	1971	8	-3.5
21	1971	9	-3.8
22	1971	10	-2.5
23	1971	11	-2.3
24	1971	12	-3.3

En el Cuadro N° 6 se presentan los valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Sachayoj.

Cuadro N° 6. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Sachayoj.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	280	245	180	162	73	35	79	125	177	212	281	295	2144
1971	214	190	140	112	90	47	84	121	167	217	260	330	1972
1972	295	260	156	105	78	18	55	85	166	227	215	216	1876
1973	220	195	145	35	65	31	21	90	138	225	240	218	1623
1974	241	122	133	112	70	60	60	97	128	235	275	250	1783
1975	290	230	155	111	68	50	57	75	150	203	230	265	1884
1976	207	212	145	150	82	63	67	115	170	243	276	255	1985
1977	235	175	155	110	48	45	42	96	165	215	203	215	1704
1978	240	185	205	150	110	42	70	112	205	200	210	265	1994
1979	290	185	160	85	85	52	75	102	150	188	200	188	1760
1980	245	230	185	114	52	30	72	104	192	195	185	253	1857
1981	180	157	177	88	85	44	76	120	140	242	185	257	1751
1982	262	170	165	114	107	18	29	96	123	210	210	214	1718
1983	232	176	175	80	18	52	27	89	180	216	223	275	1743
1984	225	212	127	93	67	10	53	87	153	183	164	220	1594
1985	253	157	177	90	95	48	69	84	91	182	210	229	1685
1986	262	216	164	98	73	34	52	80	125	185	167	240	1696
1987	193	213	195	95	73	62	48	91	178	210	200	216	1774
1988	229	220	190	115	75	51	53	104	113	260	300	295	2005
1989	290	258	168	96	86	31	74	135	164	203	215	245	1965
1990	238	165	146	65	76	46	48	140	130	175	205	212	1646
PROMEDIO	243.86	198.71	163.9	103.81	75.05	41.38	57.67	102.28	152.62	210.76	221.62	245.38	1817.
DESVEST	32.70	35.74	20.84	28.37	20.01	14.61	17.68	18.17	28.07	22.5	37.68	34.47	149.1
CV%	13.41	17.99	12.71	27.33	26.67	35.30	30.66	17.76	18.39	10.67	17.0	14.05	8.2

A continuación, se procedió a analizar los índices de sequía obtenidos con los valores mensuales de ETP y los índices obtenidos con los promedios (\overline{ETP}) de la serie 1970/90 para cada localidad. Para comprobar el comportamiento de la \overline{ETP} de la serie 1970/90, se graficaron los índices de sequía obtenidos con los ETP mensuales y \overline{ETP} , para cada una de las localidades. En la Figura N° 5, correspondiente a la localidad de Sachayoj se puede apreciar que hay un ajuste aceptable para la mayoría de los puntos, pero también que hay algunos que se separan considerablemente del resto. Se analizó cuáles eran las causas que respondían a los desvíos de un grupo de los índices y se encontró que se debe a los meses muy húmedos del año 1974. Por ello, se los analizó haciendo un análisis de correlación. Los resultados del mismo están contenidos en la Figura N° 5.

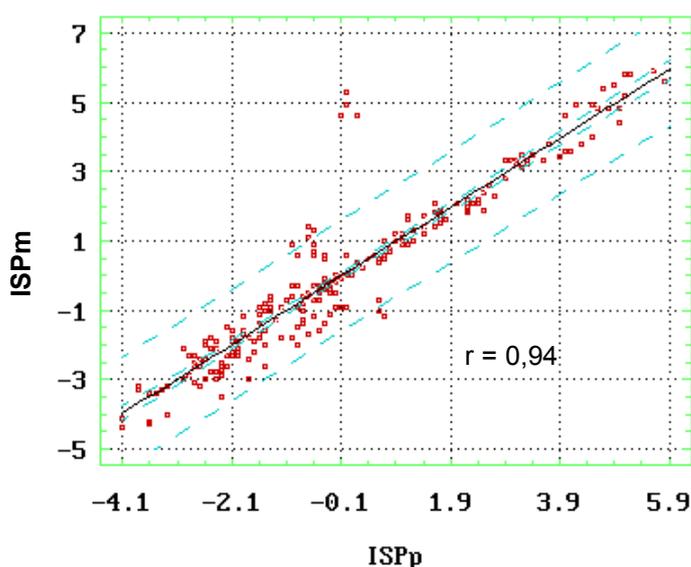


Figura N° 5. Correlación entre los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales en función de \overline{ETP} y límites de los intervalos del 95 % de confianza de la localidad de Sachayoj, (Período 1970/90).

Cuadro N° 7. Análisis de la regresión de los índices de sequía obtenidos para localidades consideradas con ETP mensuales y \overline{ETP} del período 1970/90.

Localidad	Regresión Lineal	R²
Sachayoj	$Y = 0,09 + 0,99 X$	0,88
Gancedo	$Y = -0,026 + 1,01 X$	0,94
Tintina	$Y = 0,61 + 1,01 X$	0,90
Vilelas	$Y = -0,02 + 1,03 X$	0,88
Quimili	$Y = 0,2 + 0,97 X$	0,88
Roversi	$Y = 0,01 + 1,01 X$	0,92
Suncho Corral	$Y = -0,04 + 1,01 X$	0,94

En el Cuadro N° 7, se puede comprobar que los R^2 de algunas localidades están por debajo del 90 % y que esto se debe a que unos pocos índices de sequía se apartan más de lo conveniente de los límites de los intervalos de confianza del 95 %. Sobre esta base, se decidió intentar un ajuste dividiendo la serie de precipitación 1970/90 de cada localidad en años secos y húmedos. Para ello, se procedió a obtener el promedio de precipitación de la serie 1970/90 en cada una de las localidades agrupando como “años húmedos” aquellos que tuviesen un valor de precipitación anual igual o superior al promedio y como “años secos” a los que tuviesen un valor inferior al promedio.

Para la localidad de Sachayoj, el promedio de la serie 1970/90 es 790 mm. En el Cuadro N° 8, se dan a conocer los años secos y húmedos y el milimetraje anual registrado en cada uno de ellos.

Cuadro N° 8. Años secos y húmedos de la localidad de Sachayoj, serie 1970/90

Años	Años secos < 790 mm	Años húmedos > 790 mm
1970	634	
1971	759	
1972		932
1973		1164
1974		973
1975		856
1976	479	
1977		1045
1978	619	
1979		870
1980		829
1981		871
1982		937
1983		791
1984	675	
1985	633	
1986		1007
1987	476	
1988	510	
1989	622	
1990		900

Tomando como base los años secos y húmedos, se crearon dos archivos que contienen respectivamente los valores mensuales de ETP de cada uno de los años que componen a cada grupo en función de \overline{ETP} de la serie 1970/90. Los archivos se sometieron al análisis de regresión y de este modo se obtienen dos ecuaciones de regresión que son las que permiten estimar las ETP para años secos y húmedos.

En las Figuras N° 6 (a) y 6 (b) están graficadas las rectas de regresión de los años secos y húmedos.

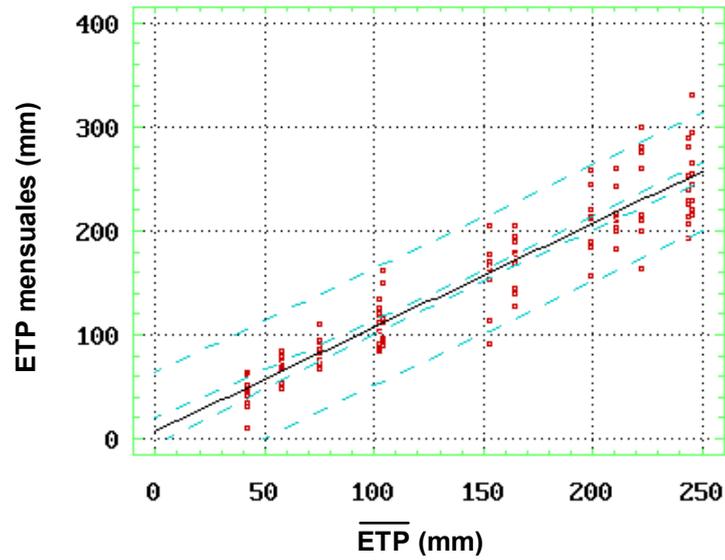


Figura N° 6 (a). Análisis de regresión lineal para años secos

$$y = 7,17 + 0,999 * \overline{ETP}$$

Coefficiente de Determinación $R^2 = 0,86$

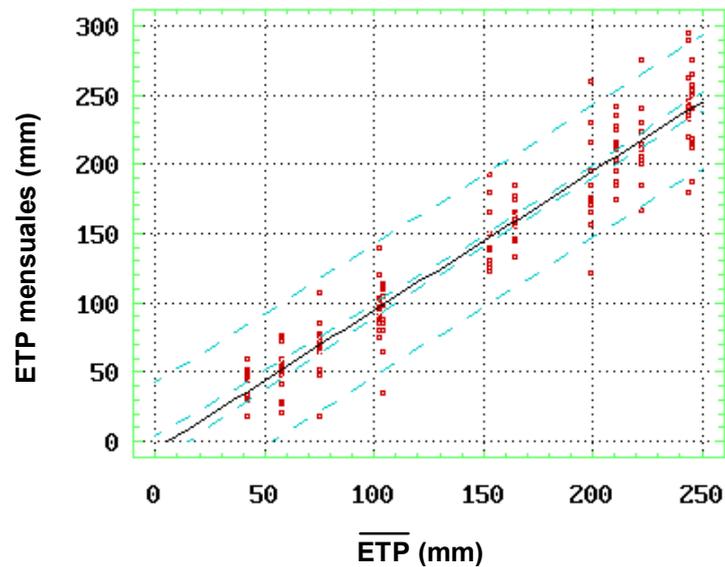


Figura N° 6 (b). Análisis de regresión lineal para años húmedos

$$Y = -5,91 + 1,003 * \overline{ETP}$$

Coefficiente de Determinación $R^2 = 0,897$

Con las ecuaciones de la recta de regresión de los años secos y húmedos de la serie 1970/90 de la localidad de Sachayoj se procedió a estimar \hat{ETPs} (para años secos) y \hat{ETPh} (para años húmedos). En el Cuadro N° 9 se muestran los valores correspondientes al \overline{ETP} de la serie 1970/90 y los ETP estimados para los años secos y húmedos de esa localidad.

Cuadro N° 9. \overline{ETP} serie 1970/90 y ETP estimados para años secos y húmedos para la localidad de Sachayoj.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
\overline{ETP}	244	199	164	104	75	42	58	102	153	211	222	245
\hat{ETPs} (p/años secos)	251	206	171	111	82	49	65	109	160	218	229	252
\hat{ETPh} (p/años húmed).	239	194	159	98	69	36	52	96	147	206	217	240

A continuación, se generó un nuevo archivo de datos para la ejecución del balance hídrico seriado para la serie 1970/90 con los ETP estimados, efectuándose luego el balance con el nuevo archivo de datos y obteniéndose el balance seriado y el índice de sequía. Se importó el archivo y con el mismo programa se generó un archivo con los índices de sequía obtenidos con los ETP mensuales y con los ETP estimados ajustados de la serie 1970/90. Se realizó un análisis de correlación (ver Figura N° 7).

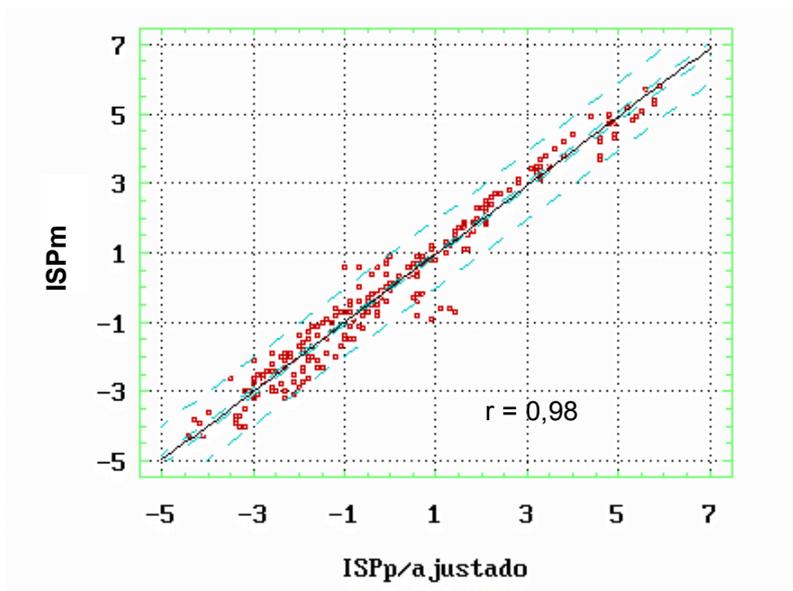


Figura N° 7. Correlación entre los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales en función de ETP estimados y límites de los intervalos del 95 % de confianza para la localidad de Sachayoj.

Comparados los datos de los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales y ETP estimados para años secos y húmedos surge de los gráficos de correlación que se produjo una mejora sensible en este último, en relación con lo mostrado en la Figura N° 5. Esto es así dado que no se observan puntos tan alejados de los intervalos del límite de confianza, como se produce con los índices obtenidos con los \overline{ETP} . Además, con los índices que se obtuvieron con los ETP estimados para los años secos y húmedos el valor 0,94 de r se incrementó a $r = 0,98$.

Para las restantes localidades, se siguió el mismo procedimiento descrito para la localidad de Sachayoj.

El comportamiento para las distintas localidades no fue idéntico ya que mientras en algunas con la estimación de ETP se advirtió una mejora sensible en la correlación, en otras varió desde una leve mejora (leve disminución del ajuste), a una fuerte baja de r (r cayó de 0,96 a 0,91 para la localidad de Roversi, por ejemplo). En el Cuadro N° 10, se pueden ver en forma comparativa, para las distintas localidades, los valores de coeficiente de correlación de los índices obtenidos con \overline{ETP} y ETP estimados, respecto de los obtenidos con ETP mensuales, para la serie 1970/90.

Cuadro N° 10. Comportamiento de los valores del análisis de correlación de los índices de sequía obtenidos con ETP mensuales, \overline{ETP} y con ETP estimados (p/años secos y húmedos) en la serie 1970/90.

Localidades	Coeficiente de correlación	
	Ind. de Sequía con \overline{ETP}	Ind. de Sequía con ETP estimados (\hat{ETPs} y \hat{ETPh})
Sachayoj	0,94	0,98
Gancedo	0,97	0,96
Tintina	0,95	0,95
Vilelas	0,94	0,94
Roversi	0,96	0,91
Quimilí	0,94	0,93
Suncho Corral	0,97	0,97

Con los resultados comparativos de los análisis de correlación de las distintas localidades (Cuadro N° 10), se resolvió extender la serie utilizando \overline{ETP} o ETP estimada para años secos y húmedos, de acuerdo al mejor coeficiente de correlación alcanzado en la localidad en cuestión, para ejecutar el balance hídrico en la serie de precipitación 1970/96. En la localidad de Sachayoj se extendió la serie con ETP estimadas, dado el excelente ajuste logrado en la correlación (con un $r = 0,98$).

Se confeccionaron los archivos de datos de entrada sobre la base del criterio del uso de \overline{ETP} o estimadas, según el comportamiento del coeficiente de correlación. Se procedió a formar un archivo para cada uno de los meses, agrupando los valores de los índices de sequía del año de la serie 1970/96. Se obtuvieron 27 valores de índice de sequía para cada uno.

Los archivos de índice de sequía de Palmer de cada mes de la serie 1970/96 de cada localidad se sometieron al tratamiento estadístico correspondiente. Se obtuvieron los estadísticos resumen y de descripción más importantes. En el mismo cuadro se presenta el valor de la probabilidad obtenida mediante el test de Shapiro – Wilk (Di Rienzo et al., 1999), para comprobar si el índice se ajusta a una distribución normal. Los datos obtenidos del análisis para la localidad de Tintina se detallan en el Cuadro N° 11.

Cuadro N° 11. Medidas de posición, dispersión y probabilidad del test de Shapiro - Wilk para la localidad de Tintina.

Estadísticos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media Aritmética	-0,08	-0,11	-0,1	-0,1	-0,07	-0,03	-0,03	-0,02	-0,09	-0,03	-0,03	-0,25
Mediana	-0,3	-0,8	-0,7	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7
Desviación Estandar	2,03	2,24	2,40	2,34	2,41	2,36	2,29	2,29	2,19	2,06	2,28	2,08
Asimetría	0,95	1,12	1,22	1,06	0,90	0,74	0,79	0,83	1,10	1,19	1,07	1,20
Asimetría Estandarizada	2,01	2,38	2,6	2,24	1,90	1,58	1,67	1,77	2,33	2,52	2,26	2,54
Kurtosis	1,39	1,84	2,16	1,54	0,75	0,11	-0,004	-0,08	0,71	1,06	0,75	2,07
Kurtosis Estandarizada	1,47	1,95	2,29	1,63	0,79	0,11	-0,005	-0,09	0,76	1,13	0,8	2,19
Coefficiente de Variación	-2487	-2087	-2399	-2256	-3422	-9107	-8847	10326	2465	-6941	-8815	-813
Probabilidad de Test S-W	0,13	0,24	0,11	0,13	0,23	0,26	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09

En el Cuadro N° 12 pueden verse las medidas de posición, dispersión y prueba de normalidad para los meses representativos del verano, otoño, invierno y primavera de una localidad del sitio de estudio (Tintina) y de dos localidades vecinas. Una se encuentra ubicada en el borde oriental más sub-húmedo (Gancedo) y la otra en la parte occidental de la región semiárida (Suncho Corral), ambas pertenecientes a una misma región fitogeográfica, con la finalidad de poder analizar comparativamente el comportamiento de estos valores.

Cuadro N° 12. Medidas de posición, dispersión y prueba de normalidad del índice de sequía de Palmer de localidades de la Región del Chaco Seco para los meses de enero, abril, julio y octubre.

Localidades Estadísticos	Gancedo (sub-húmedo)				Tintina				Suncho Corral (semiárido)			
	Ene	Abr	Jul	Oct	Ene	Abr	Jul	Oct	Ene	Abr	Jul	Oct
Med. Aritmética	0.15	0.12	0.03	0.18	-0.08	-0.1	-0.03	-0.03	0.06	-0.27	-0.26	-0.01
Mediana	0	-0.7	-0.8	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.2	-0.9	-1.0	-0.4
Desviación Estandar	2.09	2.15	2.34	2.30	2.03	2.34	2.29	2.06	2.25	2.44	2.39	2.03
Asimetría	0.26	0.93	0.66	0.48	0.95	1.06	0.79	1.19	0.29	0.41	0.95	0.58
Asimetría Estandarizada	0.56	1.93	1.41	1.02	2.01	2.24	1.67	2.52	0.62	0.86	2.02	1.23
Kurtosis	-0.79	0.74	-0.60	-0.36	1.39	1.54	-0.004	1.06	-0.67	-0.86	-0.04	-0.44
Kurtosis Estandarizada	-0.83	0.77	-0.64	-0.38	1.47	1.63	-0.005	1.13	-0.71	-0.92	0.05	-0.47
Coef. de Variación	1347.1	1801.5	7887.8	1244.8	-2487	-2256	-8847	-6941	3578.4	-901.2	-909.1	-13704
Probabilidad Test S-W	0.19	0.13	0.07	0.15	0.13	0.13	0.06	0.07	0.47	0.09	0.07	0.18

El test de Shapiro - Wilk demostró que los índices de sequía en cada uno de los meses de las series analizadas se distribuyen normalmente en todas las localidades consideradas. Se trabajó con la distribución normal para obtener entonces los valores críticos de los índices de sequía en cada mes de la serie y para las distintas localidades. En el Cuadro N° 13 (a), se detallan los valores críticos de la probabilidad de ocurrencia de las clases de sequía correspondientes a la localidad de Tintina y en el Cuadro N° 13 (b) los resultados para esa localidad, comparados con los de dos de sus vecinas, para los meses representativos del verano, otoño, invierno y primavera.

Con la distribución normal de los índices de sequía de todas las localidades, se procedió a obtener la ocurrencia de los índices con probabilidades de 90, 95 y 99 %, ($\alpha = 10\%$, 5% y 1% , respectivamente). Esto se hizo para cada uno de los meses del año de la serie 1970/96. En el Cuadro N° 14, se presentan los valores de probabilidad del 90, 95 y 99 % de que ocurra un índice de sequía mayor o igual a X_1 , X_2 y X_3 , para la localidad de Tintina.

Cuadro N° 13 (a). Probabilidades de ocurrencia de determinados niveles del Índice de Sequía de Palmer para la localidad de Tintina y **(b)** Probabilidades de ocurrencia del ISP para los meses de enero, abril, julio y octubre en una localidad de la región más húmeda (Gancedo) y otra localidad de la región semiárida (Suncho Corral).

(a)

Ind. de Sequía ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0266	0,0412	0,0520	0,0480	0,0513	0,0462	0,0416	0,040	0,0310	0,0270	0,0410	0,0357
ISP ≤ -3,0	0,0749	0,0985	0,1134	0,1079	0,1118	0,1039	0,0974	0,0939	0,0793	0,0743	0,0966	0,0931
ISP ≤ -2,0	0,1719	0,1993	0,2142	0,2088	0,2114	0,2015	0,1947	0,1891	0,1702	0,1690	0,1939	0,2004
ISP ≤ -1,0	0,3252	0,3452	0,3585	0,3508	0,3497	0,340	0,3355	0,3280	0,3096	0,3185	0,3350	0,360
ISP ≤ -0,5	0,4182	0,4305	0,4338	0,4327	0,4292	0,4204	0,4181	0,4010	0,3940	0,4095	0,4178	0,4531

(b)

Localidad Ind. de Sequía ISP	Gancedo (sub-húmedo)				Tintina				Suncho Corral (semiárida)			
	E	A	J	O	E	A	J	O	E	A	J	O
ISP ≤ -4.0	0.0237	0.0276	0.04233	0.035	0.0266	0.0480	0.0416	0.0270	0.0357	0.0629	0.0590	0.0248
ISP ≤ -3.0	0.066	0.0732	0.0974	0.0835	0.0749	0.1079	0.0974	0.0743	0.0870	0.1313	0.1261	0.0707
ISP ≤ -2.0	0.1518	0.1619	0.1925	0.1715	0.1719	0.2088	0.1947	0.1690	0.1799	0.2389	0.2337	0.1641
ISP ≤ -1.0	0.291	0.3011	0.3297	0.3053	0.3252	0.3508	0.3355	0.3185	0.3185	0.3823	0.3789	0.3137
ISP ≤ -0.5	0.38	0.3866	0.41	0.3831	0.4182	0.4327	0.4181	0.4095	0.4013	0.4624	0.4605	0.4055

Cuadro N° 14. Índices de sequía de Palmer según probabilidades de ocurrencia (X_1 , X_2 y X_3) para la localidad de Tintina.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$X_1 = 90 \%$	-0,59	-0,67	-0,71	-0,69	-0,68	-0,62	-0,61	-0,56	-0,46	-0,55	-0,60	-0,78
$X_2 = 95 \%$	-0,75	-0,84	-0,89	-0,87	-0,86	-0,80	-0,78	-0,73	-0,63	-0,70	-0,78	-0,94
$X_3 = 99 \%$	-1,05	-1,18	-1,24	-1,22	-1,15	-1,12	-1,07	-0,96	-1,01	-1,12	-1,12	-1,25

En el Cuadro N° 15, se detallan los valores de probabilidad de ocurrencia con distintos niveles, para los meses representativos del verano, otoño, invierno y primavera, para las localidades de Gancedo (Chaco), Tintina y Suncho Corral, con la finalidad de poder hacer un análisis comparativo de estos meses críticos.

Cuadro N° 15. Índices de sequía de Palmer según probabilidades de ocurrencia (X_1 , X_2 y X_3) de los meses de enero, abril, julio y octubre.

	Gancedo				Tintina				Suncho Corral			
	E	A	J	O	E	A	J	O	E	A	J	O
$X_1 = 90 \%$	-0,37	-0,43	-0,56	-0,40	-0,59	-0,69	-0,61	-0,55	-0,51	-0,89	-0,87	-0,53
$X_2 = 95 \%$	-0,53	-0,6	-0,74	-0,57	-0,75	-0,87	-0,78	-0,70	-0,68	-1,07	-1,05	-0,68
$X_3 = 99 \%$	-0,84	-0,93	-1,08	-0,91	-1,05	-1,22	-1,12	-1,01	-1,01	-1,43	-1,4	-0,98

Los valores de probabilidad de ocurrencia de los índices de sequía para cada uno de los meses y las localidades consideradas, obtenidos con los niveles de 90, 95 y 99%, se utilizaron para obtener las isolíneas del área con el método de interpolación lineal.

Los valores contenidos en el Cuadro N° 15 (de probabilidades de ocurrencia de los ISP) muestran con claridad que hay un incremento gradual de los mismos de Este a Oeste. Los valores más bajos en la parte occidental se producen en el otoño e invierno y son levemente más altos que en el área de estudio en primavera y verano. Esto se debe a que en esta parte del territorio de la Provincia de Santiago del Estero las precipitaciones se concentran en el semestre cálido.

Las probabilidades de ocurrencia de determinados niveles de ISP del Cuadro N° 13 (a) y (b), confirman que la severidad de los índices aumenta gradualmente de Este a Oeste y que en la parte semiárida son más severos en otoño e invierno.

En las Figuras N° 8 a, b, c y d, se presentan las isolíneas del índice de sequía de Palmer obtenidas para el área de estudio para los meses de enero, abril, julio y octubre, con el 99 % de probabilidad. En dichas figuras, se puede analizar el comportamiento de las probabilidades de ocurrencia del ISP en distintas épocas del año en la región.

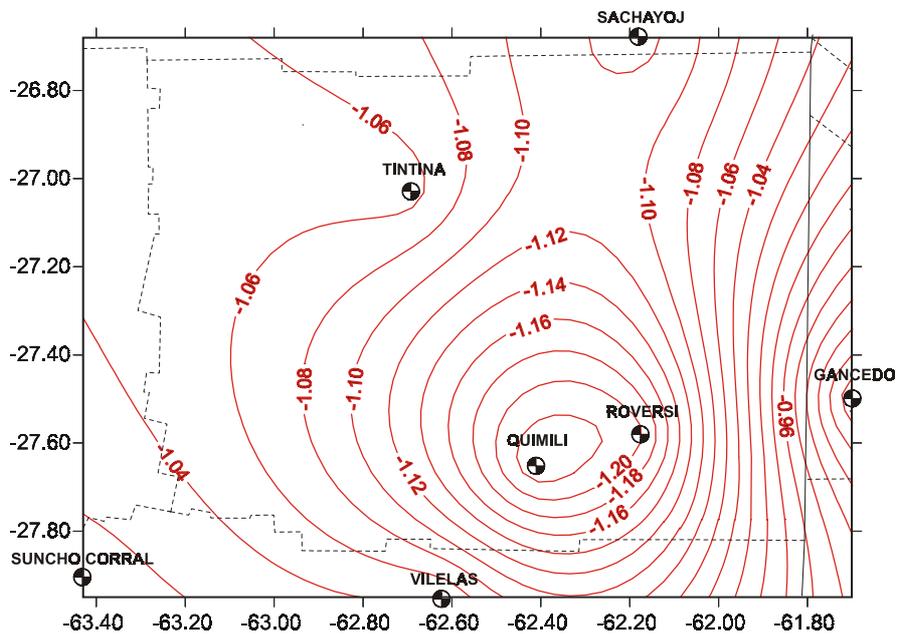


Figura N° 8 a. Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de enero.

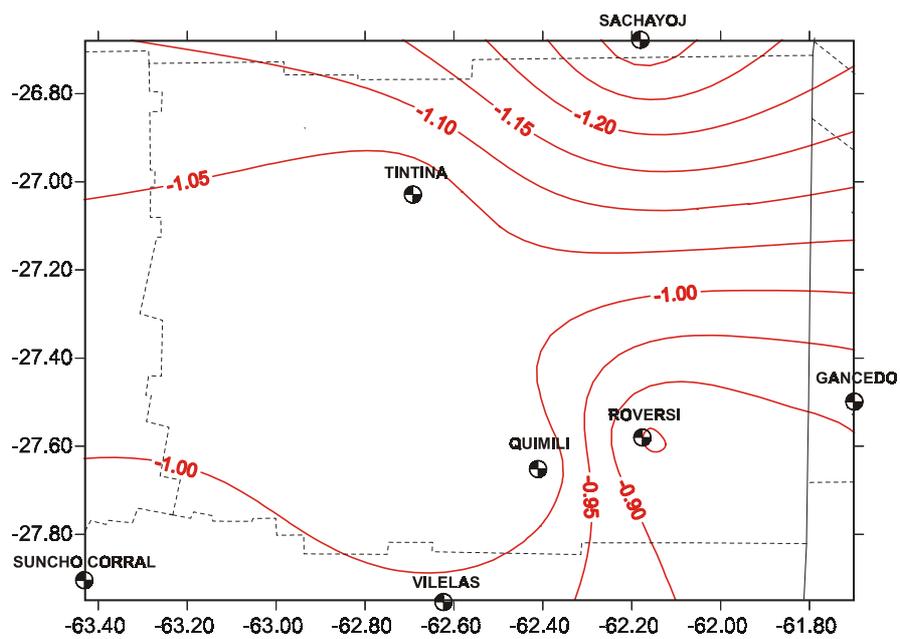


Figura N° 8 d. Isolíneas de ISP con 99% de probabilidad para el mes de octubre.

Capítulo 3

EVOLUCIÓN DE LAS ÁREAS DESTINADAS A LA AGRICULTURA, DETERMINADA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL MULTITEMPORAL

Introducción

A. Antecedentes en el empleo de información satelital

Los resultados exitosos que se obtuvieron con las primeras fotografías espaciales determinaron que la agencia espacial de Norteamérica (National Aeronautics and Space Administration-NASA) diseñara, a fines de la década de los años 60, el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos naturales. La necesidad de registrar los recursos naturales renovables y no renovables ha ido en continuo aumento con el incremento de la población y el mejoramiento de la calidad de vida, que generaron una presión considerable sobre estos recursos (Chuvienco, 1996; Jensen, 1996).

El primer satélite de la serie ERTS (Earth Resource Technology Satellite) fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y estaba destinado a efectuar un relevamiento de los recursos naturales renovables y no renovables, como parte del programa implementado por la NASA (Jensen, 1996). Este programa de la NASA generó una familia de satélites que fue denominada LANDSAT a partir del segundo lanzamiento en 1975 y que ha sido, sin lugar a dudas, el proyecto más exitoso de teledetección espacial desarrollado hasta el momento para el relevamiento de los recursos naturales de la superficie terrestre.

Los satélites de la serie LANDSAT poseen órbita heliosincrónica polar. Los tres primeros satélites (1 a 3) de la serie, con una altura orbital media de 917 Km., circundaban la tierra cada 103 minutos, relevando en cada recorrido un ancho de 185 Km de la superficie y diariamente realizaban 14 órbitas, para volver a cubrir el mismo sector cada 18 días. En los satélites LANDSAT 4 y 5 se reduce su altura de orbita a 705 Km., disminuyendose el tiempo de cubrimiento a 16 días, dado que pasaron a poseer un período orbital de 98,9 minutos (Lillesand

y Kiefer, 1987; Chuvieco, 1996). Como consecuencia de ello, cambiaron las franjas de recorrido en el espacio geográfico.

Los LANDSAT 1 a 3 llevaban como sensor un equipo de barrido multi-espectral denominado MSS (Multispectral Scanner) y un conjunto de tres cámaras de video (Return Beam Vidicon-RBV). A partir del LANDSAT 4 se eliminan las cámaras RBV y se las reemplaza por un nuevo sistema de barrido denominado TM (Thematic Mapper), que brinda mayor resolución espacial y espectral que el MSS. Para asegurar la continuidad en la serie de datos, la NASA mantuvo el sensor MSS en los satélites LANDSAT 4 y 5, con características similares a los anteriores (Chuvieco, 1996; Jensen, 1996).

En el diseño del sensor MSS se tuvieron en cuenta las medidas de laboratorio y con las cuatro bandas de medición de este sensor se pretendía realizar la aplicación de éste en la detección de masas vegetales, recursos hídricos y mineros (Chuvieco, 1996). Las bandas de medición del sensor MSS son:

- Banda 4 (renombrada 1): 0,5 - 0,6 **mm**
- Banda 5 (“ 2): 0,6 - 0,7 **mm**
- Banda 6 (“ 3): 0,7 - 0,8 **mm**
- Banda 7 (“ 4): 0,8 - 1,1 **mm**

El campo de visión instantáneo (Instantaneous Field Of View-IFOV) del sensor MSS corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen y se designa con el nombre de pixel (picture element). Cada pixel corresponde a 79 x 79 m, si bien en la transformación digital se le asigna un formato de 57 x 79 m.

El sensor TM es también un equipo de barrido multi-espectral pero aumenta los detectores de 24 a 100 y al mismo tiempo reduce el IFOV de 79 x 79 m a 30 x 30 m e incrementa el número de bandas de medición de 4 a 7. Todo ello permite a este sensor mejorar la calidad de las imágenes en resolución espacial y espectral.

Las bandas de medición del sensor TM son:

- Banda 1: 0,45 - 0,52 **mm**
- Banda 2: 0,52 - 0,60 **mm**
- Banda 3: 0,63 - 0,69 **mm**
- Banda 4: 0,76 - 0,90 **mm**
- Banda 5: 1,55 - 1,75 **mm**
- Banda 6: 10,40 - 12,50 **mm**

- Banda 7: 2,08 - 2,35 *mm*

Las imágenes satelitales fueron utilizadas en el transcurso del tiempo para conocer y estudiar distintos aspectos de la cobertura terrestre como por ejemplo: áreas afectadas por incendios forestales, superficies desforestadas, cambios estacionales en la vegetación, identificación de la ocurrencia de sequías y análisis de desertificación (Tucker et al., 1985; Chuvieco y Congalton, 1989; González Sánchez y Calvo Herrero, 1994; Ravelo y Pascale, 1997).

Por lo detallado, se puede asegurar que la información que suministran las imágenes satelitales son una buena herramienta de trabajo para el relevamiento de los recursos naturales renovables y no renovables.

B. Antecedentes sobre el uso de la tierra en la zona de estudio

En aquellos lotes donde se ha realizado el desmonte en un todo de acuerdo con la legislación vigente, Casas y Mon (1988) demuestran, mediante mediciones realizadas de la velocidad del viento con anemómetros de cazoleta, que la distancia de las fajas protectoras establecidas en el Decreto no son efectivas para evitar la erosión eólica. Esto es como consecuencia de que la altura promedio de los ejemplares arbóreos que componen un 63 % de los individuos de la franja no pasan los 7m de altura. Tomando en cuenta que el área protegida por una cortina forestal densa está en el orden de 10 a 15 veces la altura de la barrera rompeviento (Rosenberg et al., 1983), la distancia entre fajas no debe ser superior a los 100 m. Casas y Mon (1988) demostraron además, con sus mediciones de velocidad del viento desde las 9:00 horas hasta las 19:00 horas que, a 50 m de la franja, la reducción de la velocidad del viento era de sólo de un 20 %¹.

¹ La Provincia de Santiago del Estero mediante Ley N° 6321 promulgada el 06/11/96 fija las “Normas Generales y Metodología de Aplicación para la Defensa, Conservación y Mejoramiento del Ambiente y los Recursos Naturales”. En el año 1997 el Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero dicta el Decreto Serie “A” N° 1797/97 de Régimen Legal sobre Desmonte, modificatorio de los Decretos Acuerdos Serie “B” N° 2340/80 y 5670/80, que reafirma la obligatoriedad de las franjas protectoras y obliga a los que no las respetaron a implantar cortinas forestales con especies nativas y/o exóticas.

En lo que respecta a la marcha de la temperatura del suelo, Casas y Mon (1988) hicieron mediciones instalando termorresistencias de platino a 5 cm de profundidad en la franja con bosque y en el área desmontada, a una distancia de 100 m de la cortina. Las lecturas las realizaron en el mes de noviembre de 1983, cada hora, encontrándose diferencias importantes en los registros de temperatura superiores a 6 y 9° C en el suelo sin cobertura boscosa respecto a los del suelo bajo el efecto de la sombra, dentro de la misma franja. En cuanto a la temperatura del aire, en abrigo, a 1,50 m, la diferencia entre la temperatura en la superficie desmontada y la temperatura del aire, dentro de la barrera protectora, las diferencias no fueron tan marcadas dado que en el área sin cobertura forestal tan sólo se registraron temperaturas superiores a 1° C. La observación de Casas y Mon (1988) concuerda con el estudio llevado a cabo por Lewis (1998) sobre la marcha de la temperatura de la superficie del suelo en diferentes condiciones de sitio, a saber: pleno sol, semi-soleado, parcialmente sombreado, bosque ralo y bosque denso, encontrando que en los suelos que perdían la cobertura boscosa, ya sea por desmonte o por incendios forestales, se incrementaba sensiblemente la temperatura superficial.

Casas et al. (1983) realizaron una encuesta en la Provincia de Santiago del Estero con la finalidad de evaluar distintos aspectos del desmonte y habilitación de tierras y en especial aquellos indicadores vinculados a la identificación de procesos degradatorios que afectan a los suelos. En el Cuadro N° 16 se transcriben los resultados de la encuesta que fue considerada representativa por los autores porque fue llevada a cabo íntegramente en la parte semiárida del territorio.

Las observaciones de Casas y Mon (1988) acerca de los procesos de alteración del suelo son confirmadas a través de varios estudios que demuestran que la conversión de bosques nativos a tierras de uso agropecuario con cultivos anuales, con prácticas de manejo no conservacionista, producen un marcado descenso en el contenido de materia orgánica (Bremer et al., 1995; Albanesi et al., 1999a).

Las alteraciones negativas de las propiedades físicas y físico químicas del suelo se deben a la labranza con maquinaria no apta para las condiciones climáticas de la región (Foto N° 9), que provoca la modificación de la distribución vertical de la materia orgánica, de los nutrientes en los horizontes superficiales, de la actividad enzimática y de la biomasa microbiana responsable de las transformaciones del ciclo de los nutrientes para las plantas (Hassink et al., 1993; Cursi et al., 1997; Bardgett et al., 1999).

Cuadro N° 16. Distribución porcentual de los casos avanzados de los procesos de alteración del suelo, crecimiento y/o rendimiento del cultivo en tierras desmontadas y habilitadas a la producción (Casas et al., 1983).

Procesos de alteración del suelo, crecimiento y/o rendimiento del cultivo	% en los casos analizados
Encostramiento	30
Manchoneo	23
Erosión hídrica	18
Disminución de rendimientos	12
Erosión eólica	10
Densificación de la capa arable	7
Total	100

La actividad de las enzimas es sugerida como indicadora de la calidad, por su relación con la biota de los suelos, la facilidad de su medición y las respuestas rápidas que experimenta en los cambios en el manejo de los ecosistemas (Dick, 1992 y 1994; García et al., 1997). El estudio se realiza mediante la actividad deshidrogenasa, que es llevada a cabo por un conjunto de enzimas oxidoreductasa que eliminan H^+ desde el sustrato orgánico del suelo hacia los aceptores, jugando un rol importante en la oxidación de la materia orgánica (Dick, 1994). Por lo tanto, según García et al. (1997), la determinación de la actividad deshidrogenasa constituye un buen indicador de la acción oxidativa de los suelos y es por ello que aconsejan su uso como indicador de la calidad biológica de los mismos.

Según Beyer et al. (1993), la actividad deshidrogenasa está influenciada por distintos parámetros del ambiente y es afectada principalmente por el incremento de la temperatura de los suelos desmontados.

Albanesi et al. (1999b), trabajando con la actividad deshidrogenasa en el Centro Este de Santiago del Estero, en suelos con distintas posiciones topográficas de áreas boscosas desmontadas que pasaron a ser tierras de cultivo, comprobaron que en los primeros 7 años de uso agrícola se produce una merma significativa de las fracciones más lábiles del carbono orgánico respecto del ambiente natural. Esta reducción del carbono orgánico la atribuyen a la reducción de la actividad microbiana por el efecto del laboreo del suelo.

Objetivos

Los objetivos de este capítulo son:

- Análisis de la evolución del incremento de las superficies desmontadas para fines agropecuarios desde 1975 hasta 1999.
- Análisis de las distintas actividades agropecuarias no conservacionistas que inician y aceleran los procesos de desertificación.

Materiales y Métodos

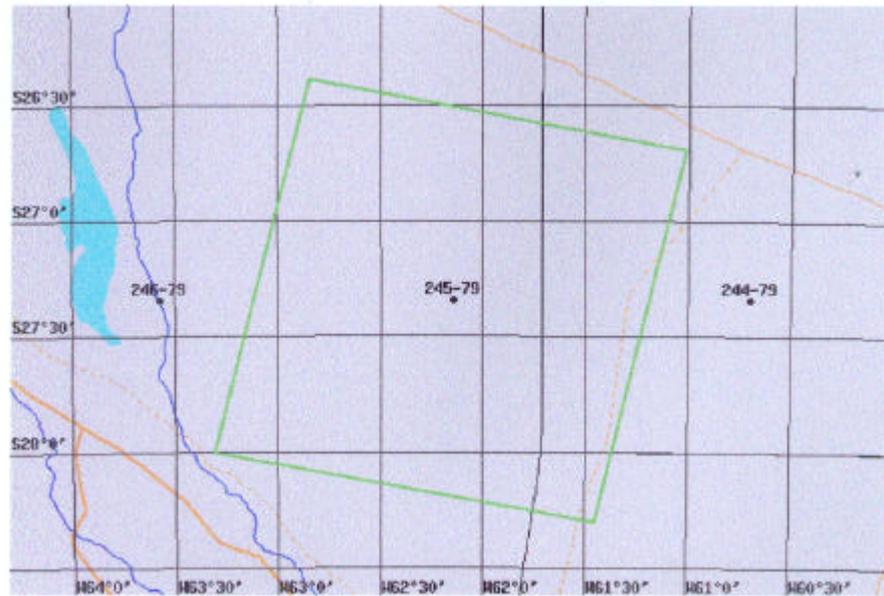
Se emplearon fotografías tomadas “in situ” para documentar las diferentes degradaciones que sufre el ecosistema del área de estudio como consecuencia de la acción antrópica, que dispara el riesgo climático potencial de desertificación. Además, las fotografías de las distintas vistas temáticas de cobertura de suelo son utilizadas como muestras de relevamiento espectral en la clasificación supervisada de las imágenes.

Se adquirieron imágenes satelitales de la serie LANDSAT, tanto MSS como TM, de diferentes fechas y de la misma estación (verano), a efectos de poder evaluar la evolución y cambio temporal de la cobertura vegetal en el área de análisis.

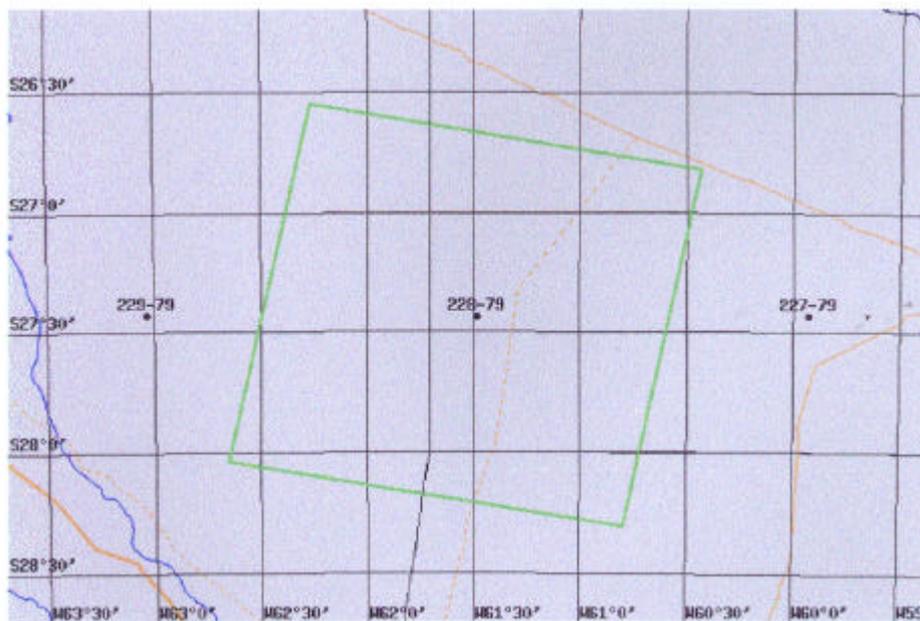
El estudio se inicia con una imagen del satélite LANDSAT 2 MSS del 27 de febrero de 1975 que cubre la totalidad del área de interés. Las imágenes que corresponden al verano 91-92, con dos fechas (25/12/91 y 17/01/92), registro del satélite LANDSAT 5 MSS y del verano 98-99, también con dos fechas (26/11/98 y 20/01/99) del satélite LANDSAT 5 TM permiten completar un mosaico que cubre toda la zona de estudio.

Por su calidad visual, ausencia de nubes y fechas de interés se escogieron las siguientes imágenes:

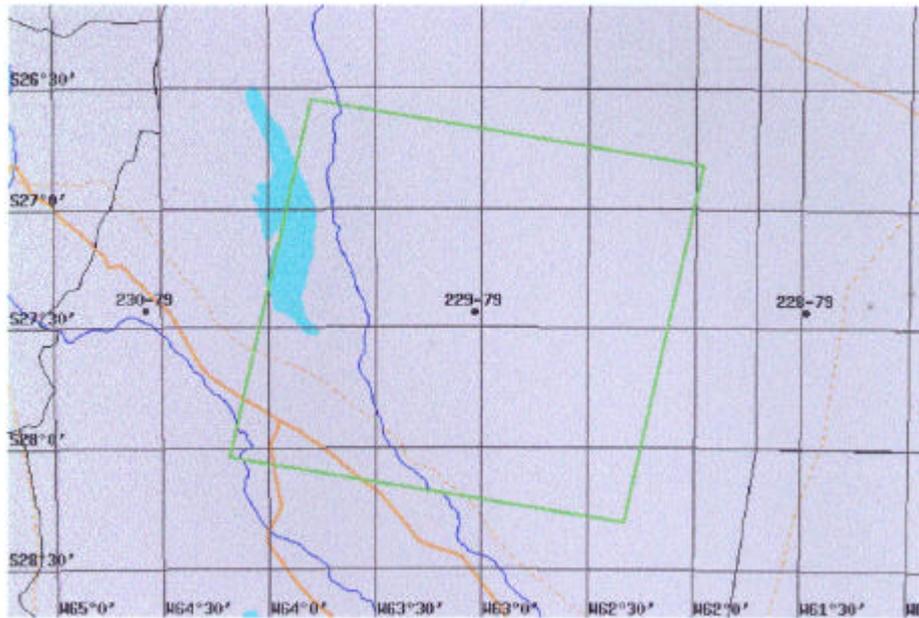
- Imagen LANDSAT MSS, del 27/02/1975 (las coordenadas geográficas están indicadas en los respectivos croquis):



- Imagen LANDSAT MSS, del 25/12/91



- Imagen LANDSAT MSS, del 17/01/92



- Imagen LANDSAT 5 TM de fecha 26/11/98 (el croquis de esta imagen es idéntico al correspondiente al de fecha 25/12/91).

- Imagen LANDSAT 5 TM de fecha 20/01/99 (el croquis de ella es semejante al de fecha 17/01/92).

Las imágenes LANDSAT MSS fueron adquiridas al USGS-EROS Data Center (United States Geological Survey) y suministradas en discos ópticos². Del mismo modo que las imágenes del LANDSAT 5 TM, fueron provistas por la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales)³. En este estudio se hizo un remuestreo de los mismos, para uniformar las bases de datos de todas las imágenes, como se detalla más adelante.

² Tamaño de píxeles remuestreados a 57 x 57 m y con 8 bits por píxeles (256 niveles de gris).

³ Tamaño de los píxeles de 30 x 30 m.

Los sitios de relevamiento fueron ubicados con GPS (global positioning system⁴). En este estudio se utilizó un GPS portable (Magellan, mod. NAV 5000 PRO, con precisión de ± 12 m).

Para el procesamiento parcial de las imágenes se utilizó el programa para computadora ERDAS-IMAGINE⁵ (ERDAS, 1995) del Laboratorio de Percepción Remota de la Facultad de Ciencias Forestales - Univ. Nac. de Santiago del Estero.

Para la corrección geométrica de las imágenes, se utilizaron imágenes georreferenciadas por el Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero correspondientes al satélite LANDSAT 5 TM de los años 1994 y 1997 (recorridos 229/079 y 228/079 respectivamente), que cubren el área de estudio. Las imágenes georreferenciadas sirvieron de base al Departamento de Agrimensura para confeccionar la Carta Imagen Satelitaria de la Dirección General de Catastro de la Provincia de Santiago del Estero en Escala 1:100.000⁶.

En la Figura N° 9 se presenta un diagrama de flujo de los distintos procesos y pasos que se siguieron hasta obtener los mapas temáticos de las superficies ocupadas con fines agropecuarios.

⁴ El GPS es un sistema de posicionamiento global mediante una constelación de satélites orbitando la Tierra a gran altura. Esto permite que el aparato determine la posición geográfica de un punto durante las 24 horas. El GPS realiza la ubicación geográfica del punto mediante triangulación, con la lectura de por lo menos 4 satélites (Hurn, 1989). El GPS debe ser previamente programado con el sistema de coordenadas con el cual se desea identificar el punto.

⁵ ERDAS-IMAGINE es un programa comercial que permite el procesamiento de imágenes digitales, manipulación de diversos tipos de datos raster, integración de datos vectoriales y producción de imágenes cartográficas.

⁶ Primera impresión en diciembre de 1997

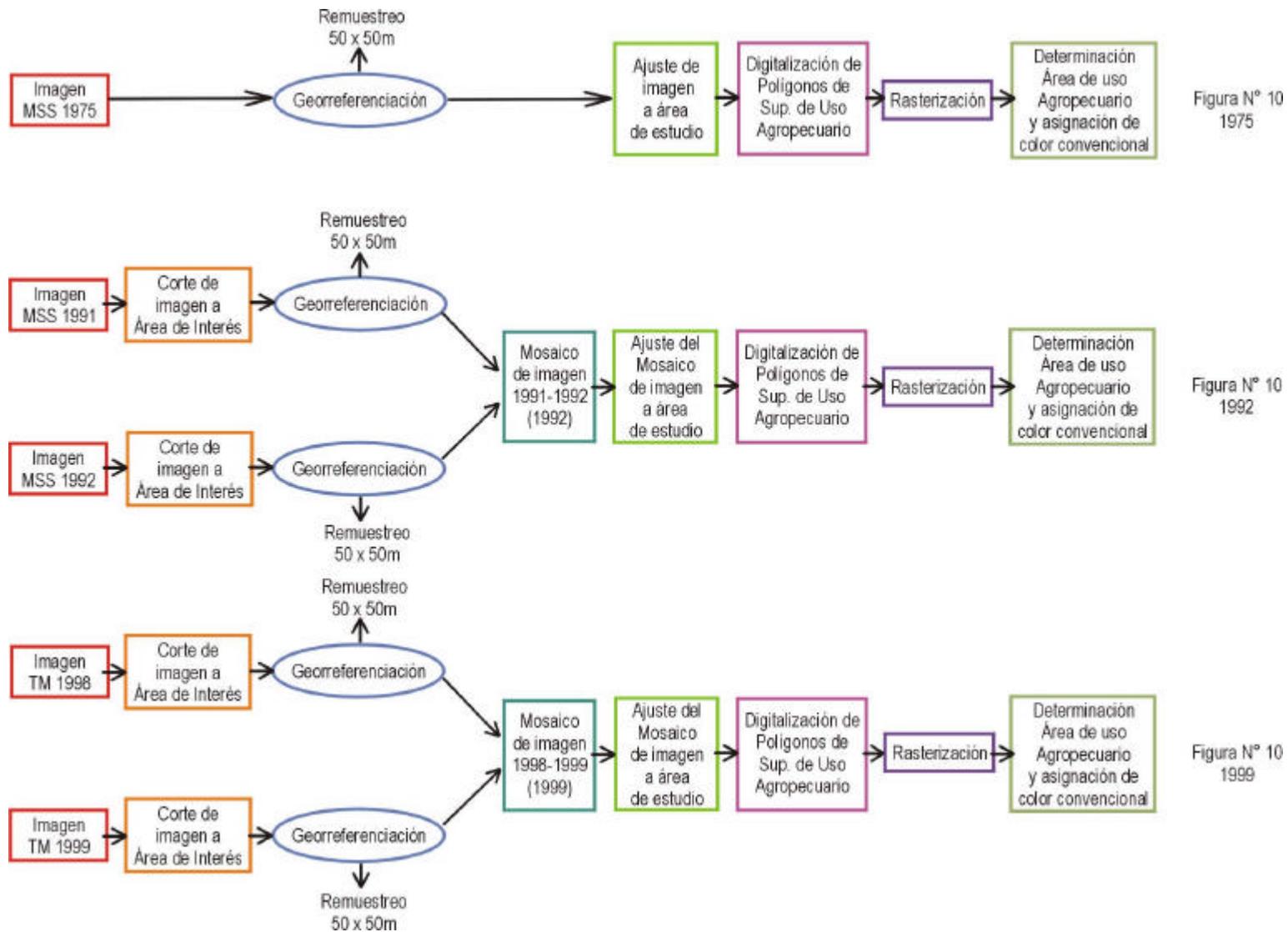


Figura N° 10
1975

Figura N° 10
1992

Figura N° 10
1999

Figura N° 9. Diagrama de flujo del procesamiento de las imágenes satelitales para obtener las superficies ocupadas con fines agropecuarios.

La corrección geométrica comprende un cambio en la posición que ocupan los píxeles que forman la imagen. Esta corrección no pretende modificar los niveles digitales, sino sólo su posición (coordenadas)⁷.

El método utilizado para georreferenciar las imágenes se basó en la alternativa empírica citada por Chuvieco (1996), que corrige la geometría de las imágenes mediante ecuaciones que utilizan una serie de puntos de control terrestre, de los cuales se conocen tanto las coordenadas de la imagen a corregir (filas y columnas), como las de la imagen de referencia. Las coordenadas planas utilizadas corresponde a una proyección Transversal Mercator conforme Gauss-Krüger, que es la utilizada por el Instituto Geográfico Militar (IGM, 1991). Los puntos de control representan generalmente cruces de caminos, límites de propiedades y otros tipos de infraestructura fácilmente identificables en la imagen, mapas de referencia y en el terreno (Chen y Lee, 1992).

La cantidad de puntos de control tomados para la corrección se determinó siguiendo la recomendación de Bernstein (1978), citado por Richards (1986), que aconseja seleccionar para una escena completa MSS entre 14 y 20 puntos, y la sugerencia de Chuvieco (1996), que indica la ubicación de la mayor cantidad de puntos posibles y luego desechar los que no sean convenientes o deseables, según el coeficiente de error.

En lo que respecta a la localización de los puntos de control, se tomó en consideración lo recomendado por Jensen (1996), que habla de que los puntos deben estar distribuidos lo más homogéneamente posible en la imagen, de tal suerte que no haya sectores con mayor densidad de puntos que otros, que puede resultar en una modificación defectuosa de la imagen⁸.

⁷ La deformación geométrica es un defecto introducido en la imagen por la rotación terrestre en el momento de adquisición de la misma (Chuvieco, 1996; Jensen, 1996).

⁸ En la imagen correspondiente a 1975 se presentó, precisamente, la dificultad en lograr una distribución homogénea de los puntos de control, dado que los cambios experimentados en el paisaje hasta 1994 y 1997 (fechas de las imágenes georreferenciadas de LANDSAT 5 TM tomadas como referencia) fueron de tal magnitud que resultó bastante difícil lograr la ubicación de puntos de manera homogénea.

Para georreferenciar las imágenes se utilizó el programa ERDAS-IMAGINE (ERDAS, 1995). Con el programa Stacklayer (ERDAS, 1995) se hizo previamente la composición de las cuatro bandas, permitiendo hacer la corrección de todas en forma simultánea. (ver Anexo: Procesamiento de imagen).

En el Cuadro N° 17, se muestran los puntos de control que fueron considerados después de eliminar los que contribuían con un error elevado y que quedaron para corregir geoméricamente la imagen MSS 245/ 079 del año 1975, y sus respectivos RMSE. (ver Anexo: Procesamiento de imágenes).

Cuadro N° 17. Puntos de control considerados, para la corrección geométrica de la imagen MSS 245/079 del año 1975.

GCP N°	X Fuente	Y Fuente	X Destino	Y Destino	X Residual	Y Residual	RMS Error
1	470.750	1446.250	4508760.5	6973700.5	-0.631	0.372	0.807
2	515.250	1205.750	4508685.5	6959800.5	-1.672	0.658	1.797
3	510.750	872.250	4505060.5	6941175.5	0.393	1.425	1.478
4	913.250	951.250	4528535.5	6941500.5	0.917	0.389	0.996
5	1133.750	865.750	4539469.25	6934469.25	-0.613	-0.0349	0.706
7	1758.250	1796.25	4584829.25	6980356.75	-0.205	-0.254	0.326
8	1882.375	2296.875	4597066.75	7007231.75	0.790	0.835	1.150
9	1819.625	2643.375	4597216.75	7027256.75	0.654	0.528	0.841
10	1028.625	1505.375	4540804.25	6971356.75	0.602	-0.454	0.754
11	798.125	1174.375	4524329.25	6955081.75	-0.0083	-1.220	1.223
12	333.125	756.875	4493829.25	6936406.75	0.049	-0.148	0.157
13	438.125	723.875	4499429.25	6933506.75	0.777	0.043	0.778
15	111.283	1511.144	4489279.25	6980856.75	0.470	-1.014	1.118
17	318.221	1453.002	4500254.25	6975606.75	-0.655	0.314	0.726
18	547.665	974.420	4508154.25	6946431.75	-0.192	-0.460	0.499
19	630.816	679.330	4509729.25	6929081.75	-0.376	0.064	0.381
20	1062.509	1847.809	4546279.25	6990231.75	0.192	-0.137	0.236
21	2697.342	1300.226	4632466.50	6943137.5	0.497	0.005	0.497
22	3114.584	3208.283	4675902.75	7045936.25	-0.037	0.643	0.644
25	2797.735	2892.014	4654750.88	7031328.13	-0.241	-0.491	0.547
26	2623.062	2865.900	4644610.88	7031628.13	-1.072	-0.45	1.162
27	3106.460	2608.243	4669165.88	7012323.13	0.341	-0.411	0.534
28	3003.782	2186.371	4659025.88	6989748.13	1.160	0.451	1.244
30	2873.347	712.081	4636150.88	6908433.13	-0.363	0.336	0.494
31	3213.230	1695.673	4665505.88	6960108.13	-1.327	-0.612	1.461
33	1434.801	500.438	4553110.88	6910983.13	0.624	0.064	0.627

X RMS Error = 0,69

Y RMS Error = 0,58

RMSE total = 0,90

	X'	Y'
Constante	- 54687,070196	- 132850,721279
X	0,017213	0,003082
Y	- 0,003219	0,017265

Se procedió luego a realizar la ubicación de los puntos de control en el área de interés de la imagen de 1992 y a corregirla geoméricamente de la forma ya descripta. El mismo procedimiento se siguió con la imagen de 1991 (ver Anexo).

A continuación, se procedió a crear un mosaico de imágenes para cubrir toda el área de estudio de la manera indicada en el diagrama de flujo presentado en la Figura N° 20 (Anexo). Del mosaico de imágenes se obtuvo el área correspondiente al Departamento Moreno mediante el corte con un archivo vectorial.

La superficie de interés correspondiente al verano de 1999 se obtuvo corrigiendo geoméricamente las partes correspondientes de las imágenes de 1998 y 1999 y obteniendo finalmente el mosaico respectivo (ver Anexo). Luego se obtuvo el área de interés según lo ya indicado.

Clasificación de las imágenes

Se hizo una clasificación supervisada en las imágenes, sobre la base de bs sitios de relevamiento georreferenciado analizados “in situ” y empleando un GPS, que sirvió para identificar en las imágenes los sitios de muestreo espectral y extraer las firmas espectrales. El resultado obtenido no fue satisfactorio, dado que las áreas con actividades agropecuarias se confundían en la clasificación temática con sitios con distintos grados de cobertura natural, en su mayor parte pastizales. Esto se debe a que, según lo que se pudo observar sobre el terreno en visita previa de campo, y por las consultas hechas a los productores, la siembra se realiza en distintas fechas, y muy espaciadas en el tiempo, siendo sumamente difícil poder lograr una discriminación por los valores de sus firmas espectrales.

Para solucionar este inconveniente, se optó por una clasificación híbrida, digitalizando polígonos con las superficies de uso agropecuario y formando un archivo vectorial de los mismos. Esto se realizó haciendo uso de una imagen falso color compuesto de las bandas 231 RVA (rojo,

verde, azul) para las dos primeras, que son adquiridas por el sensor MSS, y de las bandas 543 RVA para la última, que corresponde a la obtenida por el sensor TM, mediante interpretación visual en el monitor. Para ello se toma en consideración la forma geométrica de la superficie (los predios y/o lotes destinados a la actividad agropecuaria tienen una geometría particular, fácil de distinguir en el monitor) y los distintos matices de color indicadores de la evolución de los cultivos que siempre son de tonalidad homogénea en el predio implantado, que se diferencian en el contraste de la coloración de la cobertura de la vegetación natural con diferente espesura y en distintas etapas de degradación.

Una vez realizada la digitalización de los polígonos de las superficies de uso agropecuario y obtenidos los archivos correspondientes se procedió a editar un mapa de superficie de uso agropecuario (ver Anexo).

Para la edición de las superficies con uso agropecuario de la imagen, correspondientes a los veranos de 1992 y 1999 se procedió de la forma ya descrita.

Con la finalidad de unificar las superficies de las imágenes, para el análisis en el espacio multitemporal, se decidió adoptar la superficie registrada por la imagen de 1975. En base a ella se ajustaron las correspondientes a 1992 y 1999.

Con la finalidad de conocer la superficie desmontada en el área de estudio destinada a actividades agropecuarias, se calculó la superficie en hectáreas (ha) y se indicó la clase (tema) con el color y el nombre con el cual se la identifica (denomina). Este procedimiento se realizó para los veranos de 1975, 1992 y 1999.

Resultados y Discusión

A. Imágenes de los veranos de 1975, 1992 y 1999

En el Cuadro N° 18, se presentan los datos correspondientes del verano de 1975 y en la Figura N° 10 se puede observar la extensión y ubicación de las superficies desmontadas con fines agropecuarios hasta esa fecha.

Cuadro N° 18. Superficie desmontada del departamento Moreno (hasta el verano de 1975).

Fila	Color	Clases	Area (ha)
1	Blanco	Uso no agropecuario	1.493.442,3
2	Naranja oscuro	Uso agropecuario	30.893,3

En el Cuadro N° 19 se presenta la superficie ocupada con actividades agropecuarias en el verano de 1992 y en la Figura N° 10 se puede apreciar la distribución de las superficies desmontadas con fines agropecuarios.

Cuadro N° 19. Superficie desmontada con fines agropecuarios en el Departamento Moreno (verano de 1992).

Fila	Color	Nombre de la clase	Area (ha)
1	Blanco	Uso no agropecuario	1.331.688,5
2	Naranja oscuro	Uso agropecuario	192.637

En el Cuadro N° 20 se presenta la superficie ocupada con actividades agropecuarias en el verano de 1999 y en la Figura N° 10 se muestra como está distribuida en el área ésta actividad en esa fecha.

Cuadro N° 20. Superficie desmontada en el Departamento Moreno (verano de 1999).

Fila	Color	Nombre de la clase	Area (ha)
1	blanco	Uso no agropecuario	1.166.050,65
2	Naranja oscuro	Uso agropecuario	358.199

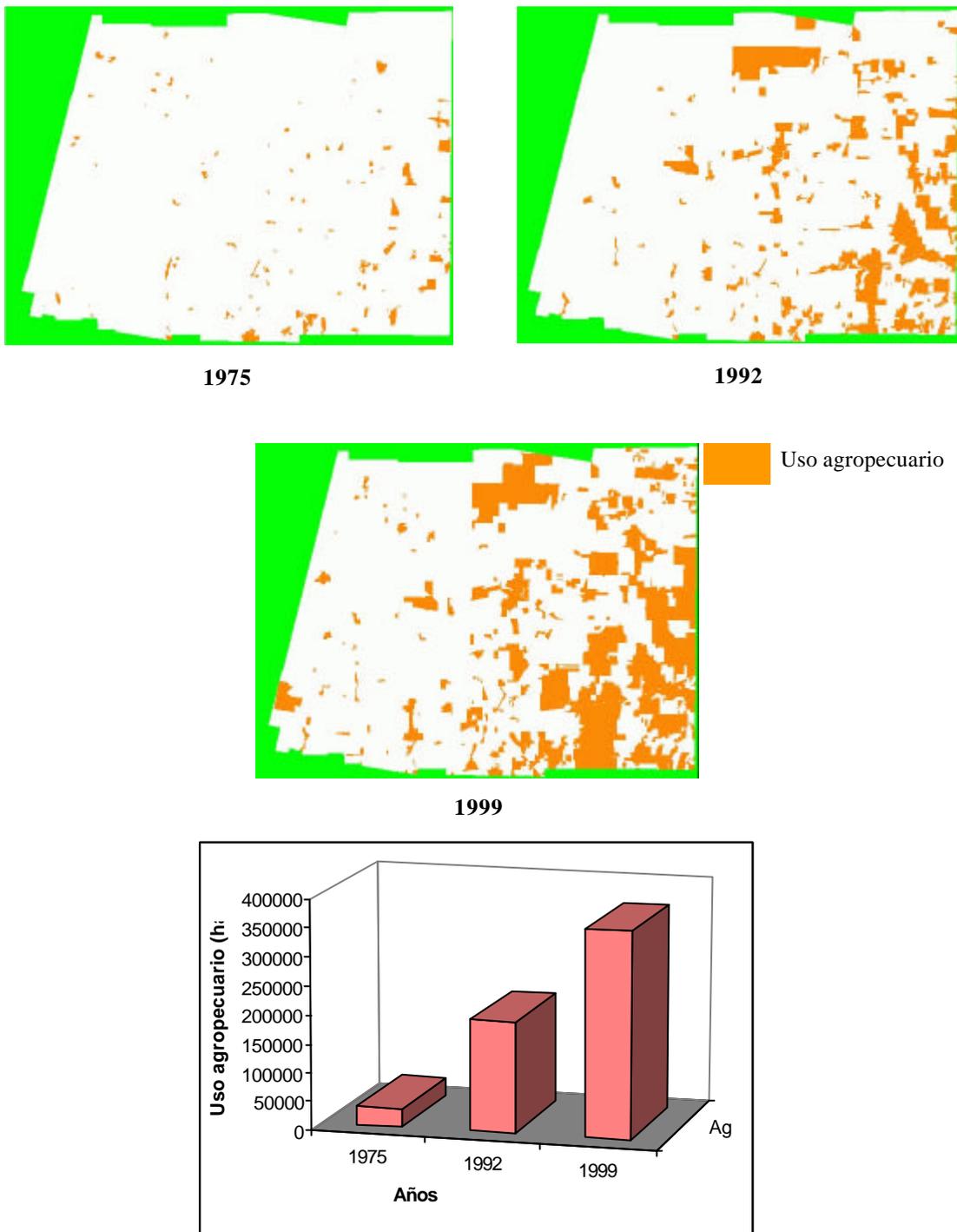


Figura N° 10. Mapas de uso agropecuario en el Departamento Moreno y gráfico que muestra la dinámica del incremento de la actividad agropecuaria en el área de estudio.

B. Actividades agropecuarias

La situación en el área de estudio del Departamento Moreno en el verano de 1975 indica una superficie desmontada de 30.893 has con actividad agropecuaria y una superficie no determinada con establecimientos ganaderos (denominados “*puestos*” en la región - ganadería de caprinos y bovinos sin potreroamiento) situados dentro del área boscosa, principalmente esta última en la parte Oeste del territorio, donde se observan áreas de suelo desnudo en forma de parches, típicos de esta modalidad de explotación en la región chaqueña.

En el verano de 1992, la superficie desmontada con actividad agropecuaria es de 192.637 has y se observa un gran crecimiento de las áreas desmontadas que en un gran porcentaje no han respetado las legislaciones de régimen legal sobre desmonte vigentes hasta ese momento (ver Anexo).

En la imagen del verano de 1999, se puede comprobar que son mínimos los lotes que se incorporaron al área desmontada en los cuales se ha cumplido con lo establecido por la legislación que fija las normas del desmonte, y que la superficie ocupada con fines agropecuarios se incrementó a 358.199 has.

En la Figura Nº 11, se muestran las distintas formas de degradación que sufre el bosque del Parque Chaqueño según las distintas actividades antrópicas a las que es sometido y que han ido variando con el correr de los años. En sus comienzos, y hasta fines de la década de los años setenta, ha prevalecido la actividad extractiva a través de los obrajes y la ganadería (caprinos y bovinos) dentro del bosque y, a partir de la década del ochenta, con la subasta pública de tierras fiscales y la autorización de los desmontes con fines agropecuarios, se produjo un cambio de modalidad en los tipos de explotación y por consiguiente en la degradación del ecosistema. El desmonte irracional llevado a cabo en grandes superficies es una de las causas principales de la degradación de los suelos, las que se pueden resumir en las siguientes:

- Erosión hídrica y eólica
- Disminución acelerada del contenido de materia orgánica
- Disminución de la fertilidad
- Alteración de la estructura

Casas y Mon (1988) objetaban la forma en que el desmonte se llevaba a cabo. En nuestra visita previa de campo (septiembre de 1999), para determinar los sitios de relevamiento para la clasificación temática de las coberturas en las imágenes satelitales, comprobamos que la forma en que se lo está ejecutando en estos momentos es mucho más perjudicial que las que ellos mencionan. Los desmontes en curso, que pudimos observar en septiembre de 1999, eran a tala rasa, con rolos trozadores de grandes dimensiones y topadoras que voltean todo el material leñoso (Fotos N° 1 y 2) y que luego lo arrastran formando cordones a distancia de aproximadamente 30 m uno de otro (Fotos N° 3 y 4). En estos cordones, además del citado arrastre de material leñoso por falta de habilidad del maquinista o desidia, se produce un gran arrastre de suelo, que en algunos casos puede llegar a eliminar 6 o 7 cm de la parte superior, la que posee el mayor contenido de materia orgánica y que constituye un verdadero decapitado de la parte más rica (Fotos N° 3 y 4).

En la Foto N° 5, se puede apreciar la parte de suelo que ha quedado amontonado después de la quema del material leñoso de los cordones a los que habíamos hecho referencia.



Figura N° 11. Distintas vías de degradación del Bosque natural por la actividad de la explotación forestal irracional (obrajes) y agropecuaria.

En el Norte Argentino, entre los productores que hacen uso de pasturas naturales para la cría de ganado, existe una práctica muy arraigada que es la quema de los campos de pastoreo a fines del invierno y comienzos de la primavera, como se puede observar en las Fotos N° 6 y 7. La acción del fuego durante el incendio provoca un fuerte incremento de la temperatura del suelo, afectando la microflora y microfauna del suelo (Albanesi et al., 1999a; 1999b). Posterior a la quema, el suelo permanece muy oscuro por bastante tiempo (2 o 3 meses), lo que determina un fuerte incremento en la absorción de radiación solar, que eleva considerablemente su temperatura del mismo. Esto trae como consecuencia la degradación de los suelos de los ambientes pirógenos. Lorenz y Bonelli (1996) compararon dos ambientes sometidos al impacto repetitivo del fuego, con una antigüedad de 8 y 30 años, con el suelo virgen de las adyacencias sin desmontar y sin efecto de quemas, encontrando las siguientes alteraciones: a) un incremento de la densidad aparente (0,95 a 1,29 g/cm³) en el horizonte A y una disminución de la proporción de macroporos (25 a 5 %) b) una disminución en el contenido de materia orgánica (entre un 27 y 52 %) en el horizonte A y c) una pérdida en las reservas de materia orgánica en todo el perfil (de un 20 % en el ambiente más antiguo). La consecuencia del efecto de compactación del suelo (incremento de la densidad aparente), es el abandono de campos (Foto N° 8).

Con la finalidad de poner de manifiesto el cambio de uso del suelo en el tiempo, se procedió a graficar las superficies con ocupación agropecuaria de los veranos de 1975, 1992 y 1999, que se presentan en las Figura N° 12.

La relación entre el uso agropecuario (desmontado) y los años, sugiere una tendencia exponencial. Si bien, el análisis de tendencias no se realizó por no tener la cantidad suficiente de datos para poder validarla estadísticamente la distribución de los valores muestran que en el transcurso de los años el desmonte fue en aumento. Con el objeto de dar mayor sustento a nuestra suposición se obtuvieron los porcentajes de las superficies ocupadas con fines agropecuarios en los veranos de 1975, 1992 y 1999. Los porcentajes con uso agropecuario fueron: 2,03 % en 1975, 12,64 % en 1992 y 23,50 % en 1999, valores estos que confirman nuestra suposición.

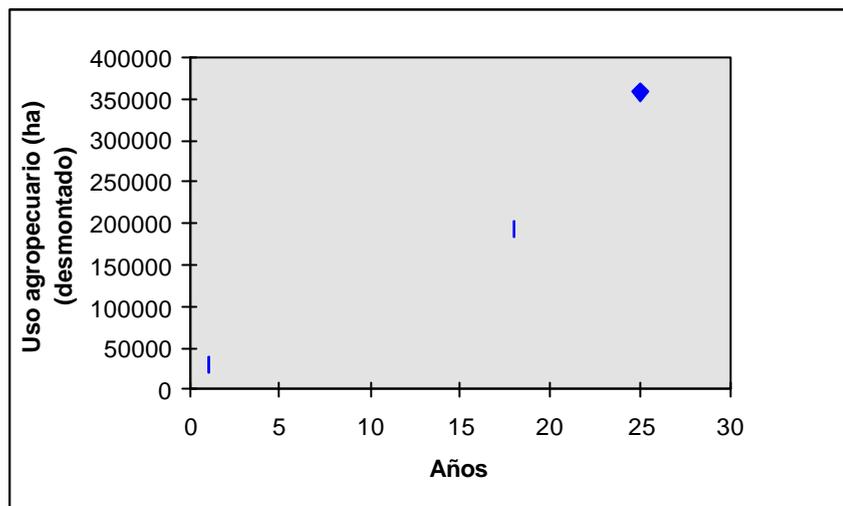


Figura N° 12. Cambio de uso del suelo en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).



Foto N° 1. Topadora utilizada para el desmonte.



Foto N° 2. Rolo trozador de grandes dimensiones y muy pesado utilizado para aplastar los componentes más bajo de la cobertura forestal y facilitar el trabajo de la topadora.



Foto N° 3. Cordones de material leñoso en proceso de secado para su quema posterior. En la foto se puede observar el suelo acumulado en el cordón.



Foto N° 4. Cultivo de trigo en ciclo vegetativo, material leñoso y una importante cantidad de suelo acumulado en los cordones.



Foto N° 5. Suelo acumulado durante el acordonado y los restos de ceniza del material leñoso quemado.



Foto N° 6. Campo sometido recientemente a la acción del fuego para el rebrote de pastos tiernos. En la vista se puede apreciar el negro intenso de la superficie del suelo después del incendio.



Foto N° 7. Comienzo de rebrote de pastos tiernos en un campo que fue sometido a la acción del fuego (en esta vista se puede observar el lavado de la ceniza por el efecto de la escorrentía y la erosión hídrica que se produce).



Foto N° 8. Campo que fuera desmontado para actividades ganaderas y luego abandonado. (Se puede apreciar el suelo compactado y el inicio de la invasión de arbustal – fachinal).



Foto N° 9. Campo con labranza tradicional en la pampa húmeda.

Capítulo 4

DETERMINACIÓN DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO

UTILIZANDO INFORMACIÓN SATELITAL

Introducción

Las imágenes satelitales han sido utilizadas para el reconocimiento, estudio e identificación de muchos aspectos de los recursos naturales renovables de la superficie terrestre. Se las ha usado para la clasificación de distintos tipos de cobertura y uso del suelo y en el análisis de la expansión y contracción del Desierto del Sahara (Tucker et al., 1985, 1991). También se las ha empleado para determinar las superficies afectadas por incendios forestales, superficies reforestadas, identificación de ocurrencia de sequías, estudios de desertificación y para optimizar la explotación forestal por características de cobertura (Chuvieco y Congalton, 1989; Coleman et al., 1990; González Sánchez y Calvo Herrero, 1994; Copping y Bauer, 1996; Zerda, 1998).

La provincia de Santiago del Estero, en convenio con el CFI y la DIGID, confeccionó en el año 1979 un mapa de uso de la tierra con información satelitaria. En fecha más reciente, Thren y Zerda (1994) hicieron el inventario forestal de los Departamentos Copo y Alberdi de la Provincia de Santiago del Estero.

Objetivos

Los objetivos de este capítulo son:

- Determinación e identificación de tipos de cobertura y su variación en el tiempo.
- Poner en evidencia que el incremento de superficies ocupadas con arbustales es un indicador de desertificación.

Materiales y Métodos

- Se hizo uso de las imágenes corregidas geoméricamente y ajustadas a la superficie del Departamento Moreno, correspondientes a los veranos de los años 1975, 1992 y 1999.
- Se utilizaron las imágenes de ocupación del suelo con fines agropecuarios de la misma estación del año y de los años 1975, 1992 y 1999, para ser usadas en las máscaras para la clasificación temática multitemporal de las imágenes.
- Fotografías con vistas de distintas ocupaciones del suelo, para su uso en la extracción de firmas espectrales de las clases temáticas (áreas de muestreo espectral) utilizadas en la clasificación supervisada.
- Mapa de Uso de la Tierra. Escala 1:250.000. Provincia de Santiago del Estero, CFI - DIGID, 1979. Evaluación de Recursos Naturales por información obtenida mediante teledetección satelitaria.
- Programa para computadora ERDAS-IMAGINE (ERDAS, 1995), para la clasificación temática de las imágenes.
- Programa para computadora IDRISI para Windows 2.0¹. para determinados análisis de las imágenes.

Clasificación temática de las Imágenes

En la Figura N° 13 se presenta un diagrama de flujo que permite indicar en forma sintética los distintos procesos y pasos que se siguieron en la clasificación temática de las imágenes hasta la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

¹ IDRISI es un sistema de información geográfica (SIG) y procesamiento digital de imágenes raster. Los programas IDRISI y ERDAS-IMAGINE se complementan, dado que uno tiene ventajas sobre el otro para determinadas operaciones.

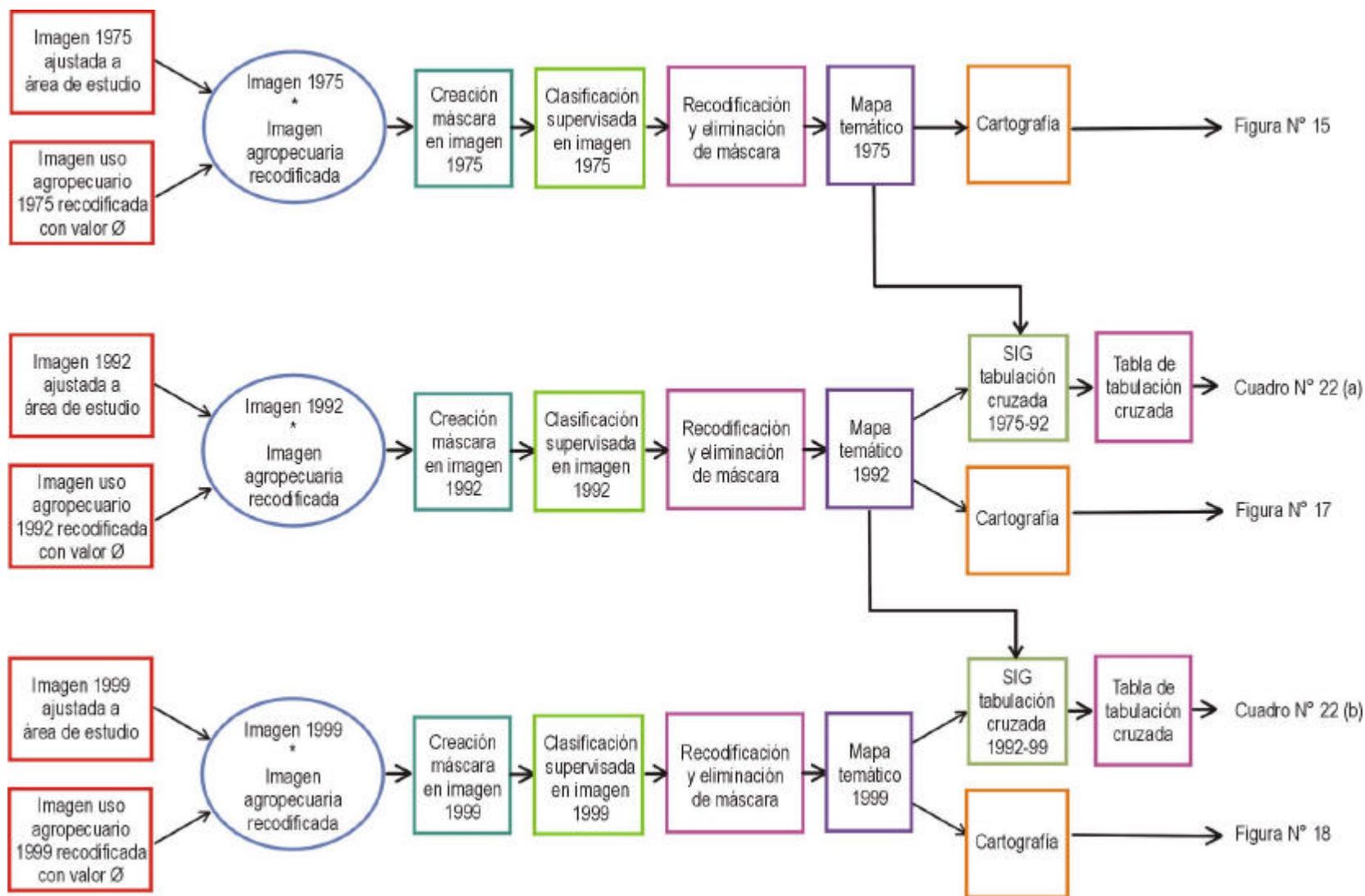


Figura N° 13. Diagrama de flujo de los procesos y pasos seguidos para la clasificación temática hasta lograr el SIG.

Con la finalidad de evitar los inconvenientes que se indicaron en el Capítulo 3 (confusión entre pastizales naturales y cultivos), se recurrió a una clasificación híbrida, supervisada y rígida (ver Anexo). Por lo tanto, previo a esto, se procedió a realizar una máscara con la superficie ocupada para fines agropecuarios, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

- Se generó una imagen booleana, para lo cual se realizó la recodificación del valor asignado a las superficies ocupadas con fines agropecuarios dándosele un valor igual a cero (0) y al resto de la superficie un valor igual a uno (1).

- Se realizó una máscara para la extracción de datos del sector de interés.

- Se realizó una clasificación supervisada en la superficie no ocupada para fines agropecuarios, basado en un criterio de separación de clases temáticas generales (p.e. bosque, arbustal, pastizal y suelo desnudo) dada la finalidad de esta investigación, que es la de poner de manifiesto el cambio de uso del suelo por efectos antrópicos y, como consecuencia de ello, el avance de la desertificación.

Se escogieron las siguientes clases temáticas:

- **Bosque** (Foto N° 10). Esta clase se caracteriza por la presencia en el estrato superior de las dos especies principales de esta formación fitogeográfica, el quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis quebracho-colorado*) y el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*). Al quebracho colorado se lo identifica por sus ramas anfitonas y al quebracho blanco por su copa globosa y ramas péndulas.



Foto N° 10. Perfil de bosque del Departamento Moreno (Sgo. del Estero).

- **Arbustal.** En esta clase hay un predominio de arbustos, pero también están presentes en forma aislada individuos arbóreos y especies herbáceas que, por la resolución de la imagen, son imposibles de discriminar (Foto N° 11).



Foto N° 11. En primer plano con la clase temática arbustal.

- **Pastizal.** Hay un predominio en esta clase de especies herbáceas, pero en forma aislada hay ejemplares de especies arbustivas que por resolución de la imagen no se han logrado discriminar (Fotos N° 12 y 13).



Foto N° 12. Pastizal iniciando el rebrote después del efecto del fuego al que fue sometida el área.



Foto N° 13. Pastizal seco (primer plano, en el sector izquierdo).

- **Suelo desnudo.** Comprende aquellas zonas sin o con muy escasa cobertura vegetal (por ej., campos arados, límites de propiedades, pastizales degradados y áreas peridomésticas).

- **Uso agropecuario.** Superficies que han sido desmontadas para ser destinadas a la actividad ganadera y cultivos de ciclo anual (ver Fotos N° 3, 4, 6 y 9 del Capítulo 3).

- Se desplegó la imagen correspondiente para la extracción de las firmas espectrales de cada una de las clases temáticas arriba indicadas. Para poder extraer las firmas espectrales se seleccionó el área de interés (ADI) de cada clase temática para marcar las muestras correspondientes a las áreas de relevamiento. Una de las herramientas utilizadas permite

digitalizar polígonos de las áreas de muestreo espectrales escogidas en la imagen. Para poder seleccionar los juegos de muestras espectrales y digitalizar, se recurrió al Mapa de Uso de la Tierra del año 1979 de la Provincia de Sgo. del Estero. Se procedió a determinar las áreas de muestreo espectral² para la extracción de las correspondientes firmas espectrales. La muestra con menor número de píxeles abarcó 171.

Se procedió a verificar las firmas espectrales de los ADI seleccionados en cada una de las bandas a través de sus respectivos valores digitales (VD), las que se presentan en la Figura N° 14. Se puede apreciar a priori que las clases temáticas escogidas y los ADI elegidos poseen firmas distintas y que son separables. Utilizando otras herramientas, se pueden visualizar las áreas de la imagen donde hay superposición de clases, lo que indica una indefinición de las clases temáticas respecto de las espectrales o una mala determinación del área de muestreo (Zerda, 2000)³.

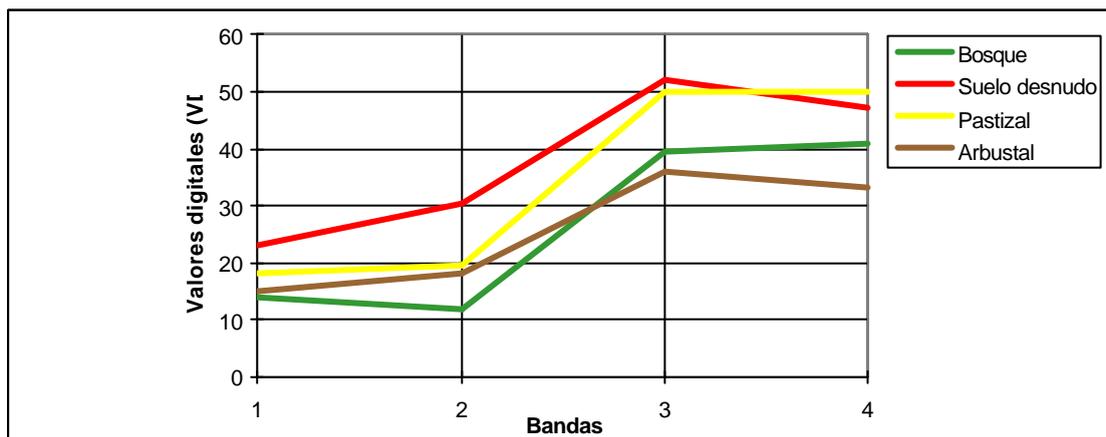


Figura N° 14. Perfil espectral de las firmas de las clases temáticas de la imagen MSS 1975

² El número mínimo de píxeles de la muestra se determinó siguiendo el criterio indicado por Zerda (2000), que aconseja que como regla general las muestras debe ser de un tamaño mínimo igual a **10 n**, donde **n** = número de bandas o canales espectrales; también dice Zerda que hay autores que sugieren incrementar el tamaño de la muestra entre [$> 10 n$, $100 n$].

³ Para usar con eficiencia esta herramienta, previamente hay que elegir cuidadosamente un color que resalte la superposición entre las clases utilizadas en las áreas de muestra y que no sea algunos de los colores que se le haya asignado a las clases seleccionadas (Zerda, 2000).

Con el objeto de tener una mayor seguridad de la separabilidad de los distintos grupos numéricos que representan a las firmas espectrales y que estas a su vez corresponden a clases informacionales, se recurrió al análisis multivariado. El análisis a que hacemos referencia es el de la Divergencia Transformada (TD) de Swain y Davis (1978), citada por ERDAS (1991) y Chuvieco (1996). Es un estadístico que permite evaluar la divergencia entre las clases determinadas mediante la selección de áreas de muestreo. Los valores de este estadístico varían entre 0 (cero) y 2000 (dos mil), para firmas espectrales no separables y totalmente separables, respectivamente (ver Anexo).

A continuación, se detalla el listado que arrojó el análisis TD de la imagen MSS 1975:

Medición de distancia: Divergencia Transformada

Bandas utilizadas: 1, 2, 3, 4

Tomadas de a 4 a la vez

Clases

- 1 Pastizal
- 2 Arbustal
- 3 Bosque
- 4 Suelo desnudo
- 5 Quema 1

Mejor Mínimo de Separabilidad

Pares de Clases												
Bandas	Prom.	Mín.	1:2	1:3	1:4	1:5	2:3	2:4	2:5	3:4	3:5	4:5
1 2 3 4	1999	1995	1995	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Mejor Promedio de Separabilidad

Pares de Clases												
Bandas	Prom.	Mín.	1:2	1:3	1:4	1:5	2:3	2:4	2:5	3:4	3:5	4:5
1 2 3 4	1999	1995	1995	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

El análisis de TD demostró que las firmas espectrales de las clases seleccionadas y las bandas escogidas son completamente separables, procediéndose a efectuar la clasificación, que se realizó según el criterio de Maximun Likelihood (ver el Anexo).

En la imagen del año 1975, se decidió agrupar junto con suelo desnudo, la superficie que había sido clasificada como quema, que a nuestro criterio es una forma de suelo desnudo, pero que arrojaba valores distintos en el perfil espectral en cada una de las bandas, por los restos de ceniza.

En lo que se refiere a las jerarquías de las clases y los colores con los cuales se las identificará en los Mapas Temáticos, se detallan a continuación:

1	Bosque	Verde oscuro
2	Arbustal	Verde claro
3	Pastizal	Amarillo
4	Suelo desnudo	Rojo
5	Agropecuario	Naranja oscuro
6	Urbano	Violeta
7	Nubes	Blanco
8	Sombras	Negro

En la Figura N° 15 se presenta la distribución de las clases temáticas y la superficies ocupadas por cada una de ellas en el verano de 1975.

A continuación, se procedió a clasificar la imagen correspondiente al verano de 1999, contándose con los sitios de relevamiento determinados con GPS y con las fotografías que documentan las clases temáticas escogidas para una clasificación supervisada. Se siguió el procedimiento ya descrito, y la separabilidad de las clases fue confirmada por el análisis TD, que arroja para las bandas (LANDSAT TM) 3, 4 y 5 los siguientes valores:

- Mejor mínimo de separabilidad 1974.
- Mejor promedio de separabilidad 1998.

En esta imagen se puede apreciar que hay un sector ocupado por nubes y sombras; sus valores temáticos son 7 y 8, respectivamente⁴.

⁴ Las nubes en la imagen clasificada se identifican con el color blanco y las sombras con negro.

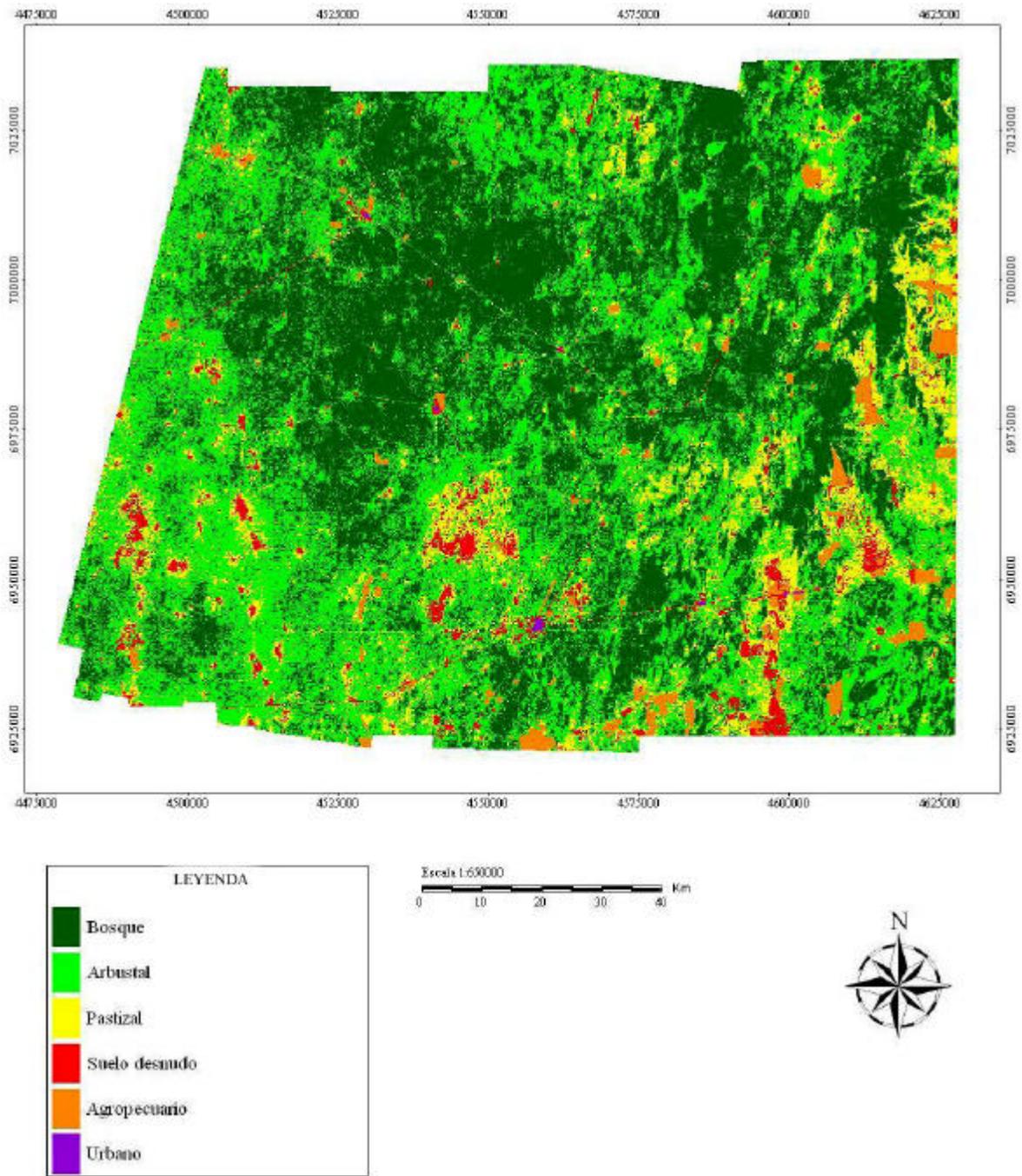


Figura N° 15. Mapa temático de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1975.

La clasificación de la imagen correspondiente al verano de 1992 se hizo desplegando en el monitor la imagen, ya clasificada. El procedimiento que se siguió se basó en la aplicación de criterios de fotointerpretación (matices, textura, etc.) y considerando que sectores de la imagen ocupados con bosque en 1999, también lo estaban en 1992, debido al corto tiempo transcurrido, muy breve como para que se alcance a producir un cambio sustancial en este tipo de cobertura. También se buscaron en ambas imágenes sectores que no habían sufrido cambios entre una fecha y otra, lo que permitió seleccionar las muestras y extraer las firmas espectrales de cada uno de los temas. Estas fueron analizadas según el perfil correspondiente (Figura N° 16) y por la comparación entre clases con el análisis de TD, que arrojó:

- Mejor mínimo de separabilidad 1998.
- Mejor promedio de separabilidad 2000.

Lo cual indica que las firmas espectrales extraídas son perfectamente separables. A continuación, como en los casos anteriores, se procedió a eliminar la máscara y asignar el valor igual a 5 a las superficies ocupadas con fines agropecuarios. Finalmente, se procedió a calcular el área ocupada por cada clase y a nominar e identificar cada una con los colores estandarizados que ya se citaron.

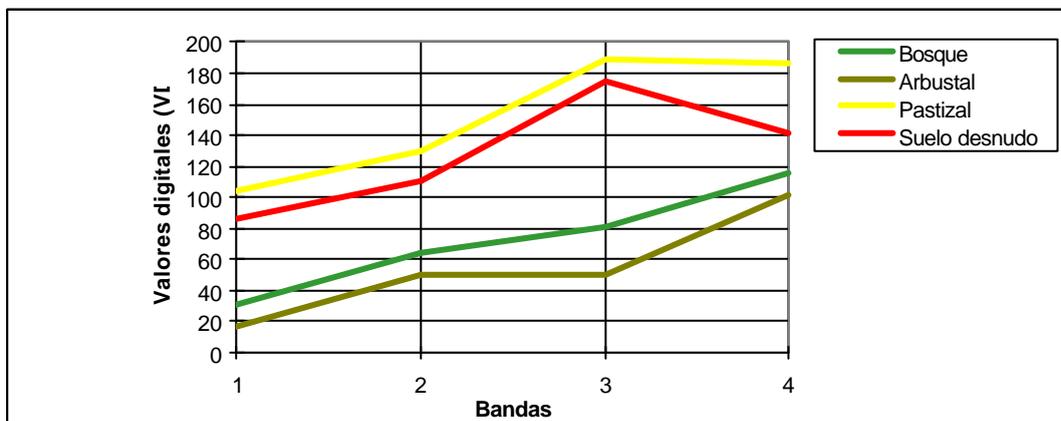


Figura N° 16. Perfil espectral de las firmas de las clases temáticas de la imagen MSS 1992

Se procedió posteriormente a obtener superficies homólogas, con la finalidad de que las matrices de las imágenes sean comparables. Además, se digitalizaron los polígonos con las poblaciones principales del área de estudio correspondientes al año 1999, a fin de considerar este tema constante en el tiempo, desplegándose en cada una de las imágenes con el color de identificación convenido (violeta).

Los resultados de las clasificaciones temáticas (cartografía) correspondientes a los veranos de 1992 y 1999 son presentados en las Figuras N° 17 y 18 respectivamente.

Se realizó finalmente el cruce de los archivos de las imágenes temáticas de 1975 y 1992, y de 1992 y 1999, para obtener las salidas tabulares, mediante el empleo de la herramienta SIG.

Resultados y Discusión

En el Cuadro N° 21 se presentan los tipos de cobertura (clases) para cada uno de los años analizados y la superficie ocupada por cada una de ellas en hectáreas, para el área de estudio.

Cuadro N° 21. Clases temáticas y área ocupada en los veranos de 1975, 1992 y 1999 en el Departamento Moreno, Sgo. del Estero.

Año	Clases (ha)							
	Bosque	Arbustal	Pastizal	Suelo desnudo	Uso Agrop.	Urbano	Nubes	Sombra
1975	719689	566911	160221	45643,8	30983,3	977,5	-	-
1992	920155	235648	5501	169407	192637	977,5	-	-
1999	646543	378338	29569,8	69522,8	358199	977,5	31920,3	9179,25

Sobre la base de los resultados presentados en el Cuadro N° 21, se obtuvieron los modelos de cobertura proporcionales, para cada una de las instancias analizadas y que se detallan a continuación:

$$\text{Mod. Cob.}_{75} = 0,472 \text{ Bo} + 0,372 \text{ Ar} + 0,105 \text{ Pa} + 0,03 \text{ Sd} + 0,02 \text{ Ag} + 0,0006 \text{ Ur}$$

$$\text{Mod. Cob.}_{92} = 0,604 \text{ Bo} + 0,155 \text{ Ar} + 0,004 \text{ Pa} + 0,111 \text{ Sd} + 0,126 \text{ Ag} + 0,0006 \text{ Ur}$$

$$\text{Mod. Cob.}_{99} = 0,424 \text{ Bo} + 0,248 \text{ Ar} + 0,019 \text{ Pa} + 0,046 \text{ Sd} + 0,235 \text{ Ag} + 0,0006 \text{ Ur} + 0,021 \text{ Nb} + 0,006 \text{ Somb}$$

Donde:

Mod. Cob = Modelo de cobertura
 Bo = Bosque
 Ar = Arbustal
 Pa = Pastizal
 Sd = Suelo desnudo

Ag = Agropecuario
 Ur = Urbano
 Nb = Nubes
 Somb = Sombras

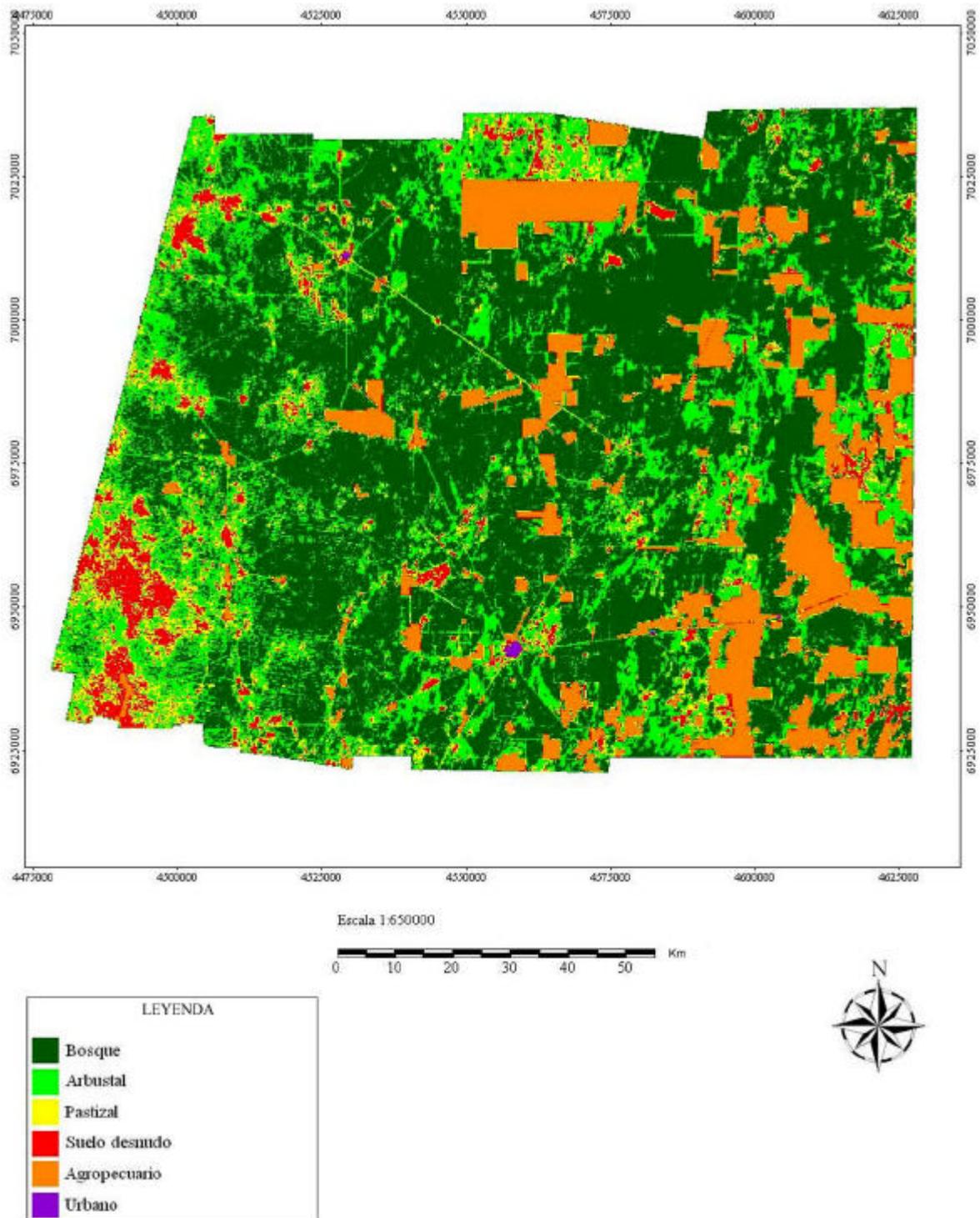


Figura N° 17. Mapa temático de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1992.

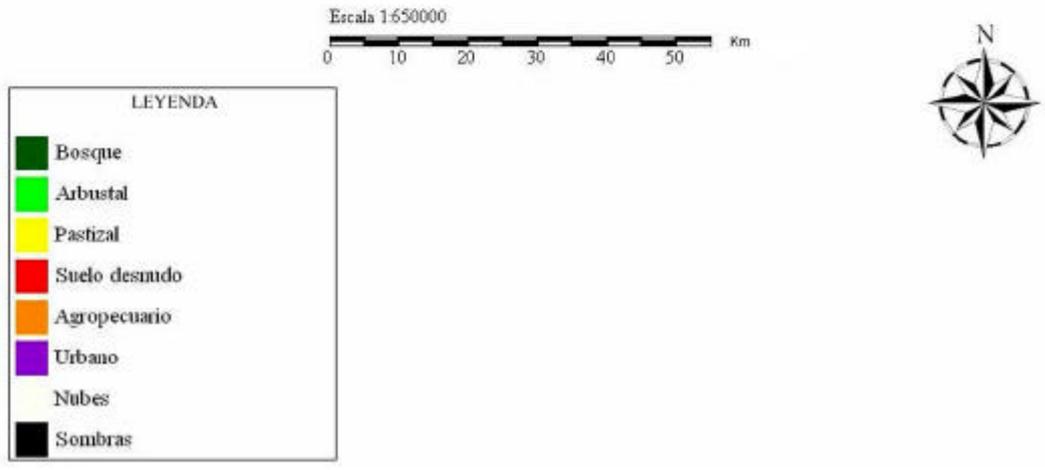
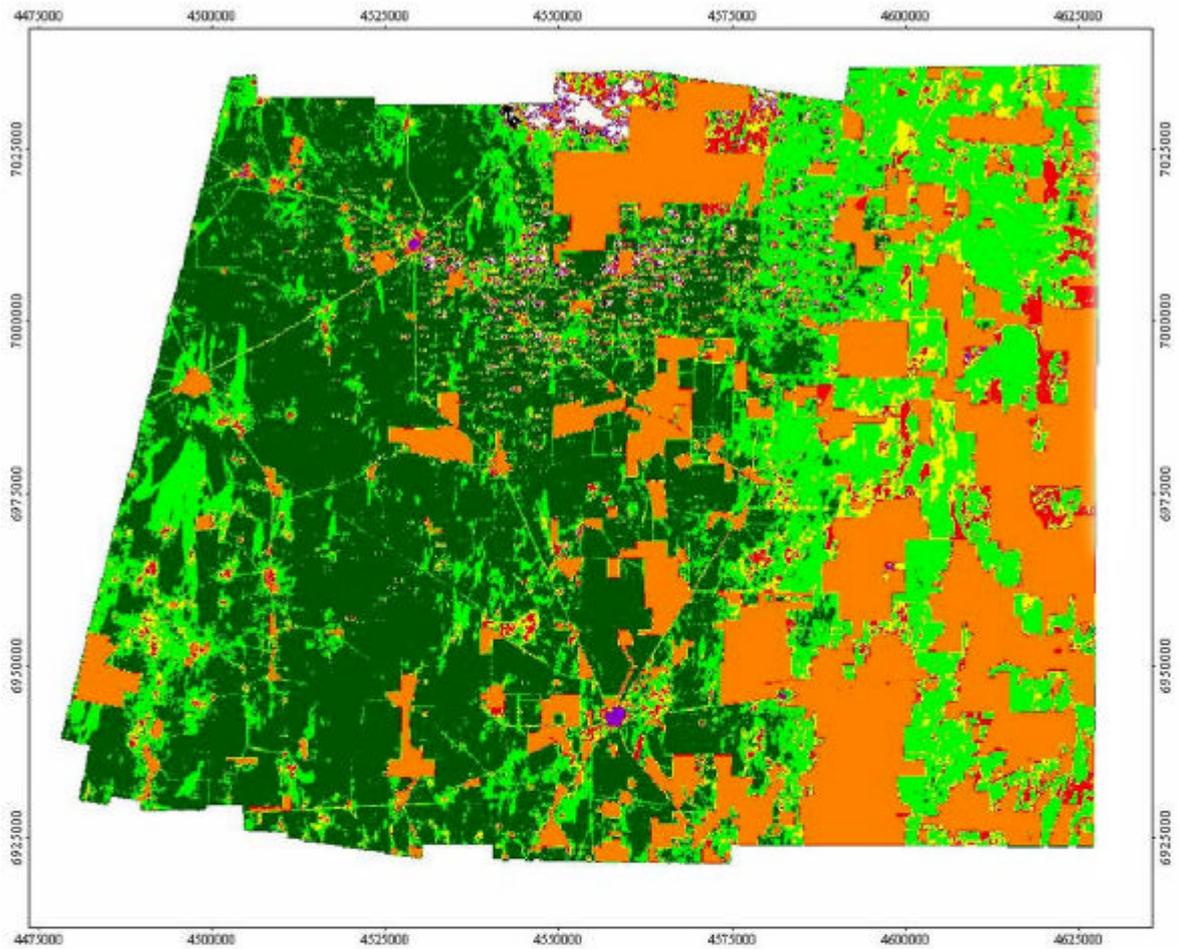


Figura N° 18. Mapa de ocupación del suelo en el Departamento Moreno en el verano de 1999.

Analizando el cuadro de resultados y los modelos de cobertura, se puede apreciar que, si bien se produjo un paso importante de superficie forestal a uso agropecuario desde 1975 a 1992, también se ha puesto en evidencia que en el lapso de 17 años hubo un cambio importante de la clase arbustal a la clase bosque. La explicación a la que llegamos es que en el año 1975 muchos individuos del estrato superior (árboles) estaban en estado de crecimiento, formando parte de la clase arbustiva (estrato bajo) y que hasta 1992, creció en altura hasta pasar a ser parte de la clase bosque.

Para visualizar mejor esta afirmación, se presenta un gráfico en 3D en la Figura N° 19.

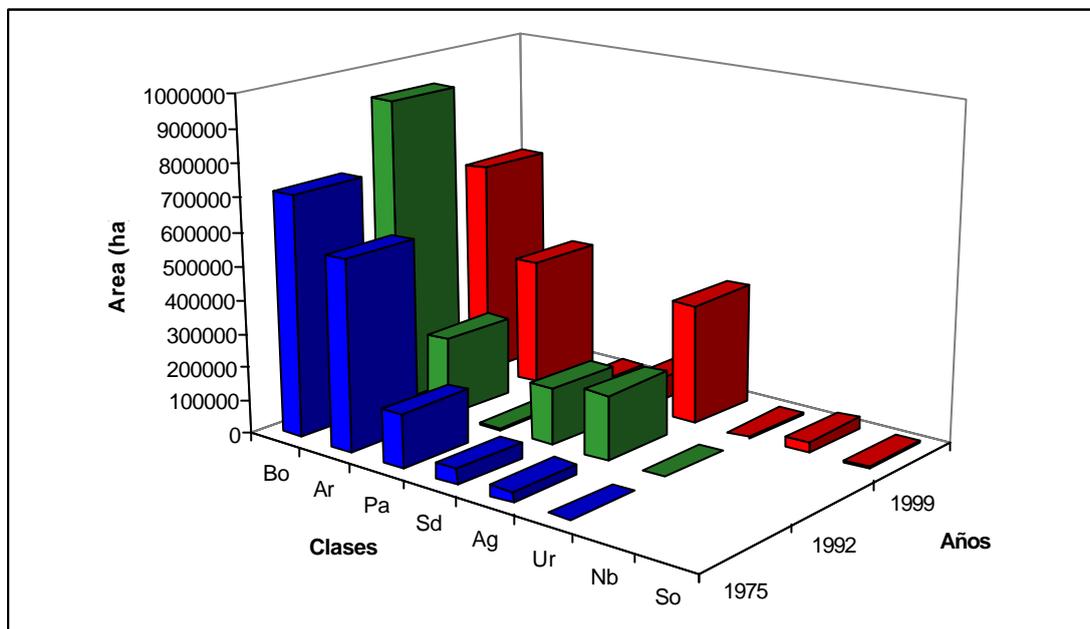


Figura N° 19. Dinámica del cambio de ocupación del suelo en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).

En la Figura N° 19, se pone de manifiesto que la mayor dinámica del cambio de tipos de cobertura tiene lugar a partir de 1992. Esto se debió, a nuestro entender, a la venta de tierras fiscales de grandes superficies a precios relativamente bajos en comparación con la Región Pampeana, y a la expansión de la frontera agropecuaria, motivada por los altos costos del valor de la tierra en la denominada pampa húmeda.

En el Cuadro N° 22, se presentan en forma conjunta las salidas tabulares de la intersección de las matrices de las imágenes de los años 1975 con 1992 y 1992 con 1999, para efectuar la comparación de los cambios de tipo de cobertura y uso del suelo en el área de estudio.

Cuadro N° 22. Datos comparativos de las intersecciones entre las matrices de las imágenes de
a) 1975 con 1992 y b) 1992 con 1999, en el Departamento Moreno (Sgo. del Estero).

a)			b)		
Área (ha)	Clase 1975	Clase 1992	Área (ha)	Clase 1992	Clase 1999
560000	1	1	523210	1	1
71961.5	1	2	262651	1	2
1168.75	1	3	10266.8	1	3
36243.3	1	4	17032	1	4
50325	1	5	85571.5	1	5
0	1	6	14543.8	1	6
315794	2	1	6857.25	1	7
106590	2	2	46778	2	1
2599	2	3	75488	2	2
78748.8	2	4	14469.5	2	3
63178.8	2	5	26089.8	2	4
0	2	6	60812.5	2	5
39155.3	3	1	10255.5	2	6
43624.5	3	2	1752	2	7
1007.5	3	3	129.5	3	1
35034.5	3	4	997.75	3	2
41399.5	3	5	317.5	3	3
0	3	6	1220.5	3	4
4050.25	4	1	2341.25	3	5
9076	4	2	473.5	3	6
551.75	4	3	21	3	7
15829	4	4	75351.3	4	1
16136.8	4	5	36176.5	4	2
0	4	6	3436	4	3
1155.75	5	1	20815.5	4	4
4395.5	5	2	26993.5	4	5
174	5	3	6066.25	4	6
3560.5	5	4	517.25	4	7
21597.3	5	5	1074.5	5	1
0	5	6	3024.25	5	2
0	6	1	1080	5	3
0	6	2	4365	5	4
0	6	3	182477	5	5
0	6	4	581.25	5	6
0	6	5	31.75	5	7
977.5	6	6	23.25	6	1
			172	6	2
			106.5	6	3
			279	6	4
			1.25	6	5
			395.5	6	6

Capítulo 5

CONCLUSIONES

En la región de estudio, el índice de sequía de Palmer experimenta un incremento gradual de su valor de Este a Oeste y confirma el riesgo climático de desertificación.

Se pone de manifiesto que la tendencia de la pérdida de cobertura vegetal arbórea mediante la práctica del desmonte, para utilizar el suelo con fines agropecuarios, potencia el riesgo climático de desertificación, dado que se incrementa la temperatura del suelo y la velocidad del viento y, por consiguiente, la pérdida de agua por evapotranspiración.

Mediante el análisis de imágenes obtenidas con los satélites de la serie LANDSAT, se mide la expansión de la actividad agropecuaria en el área de estudio, siendo de 30.893 ha en 1975, de 192.637 ha en 1992 y de 358.199 ha en 1999, ajustándose a una función exponencial.

En las áreas con uso agropecuario, se detectaron erosión eólica e hídrica.

Se comprueba que el desmonte a tala rasa, mediante el uso de topadoras, propicia el proceso de desertificación antes de la iniciación de la actividad agropecuaria, dando comienzo a la degradación del suelo.

Las prácticas repetitivas de quema de campos para promover el rebrote de pastos tiernos, han contribuido a la degradación del suelo del área.

En el análisis temporal de las imágenes, queda demostrado que pese a la explotación irracional del bosque mediante la extracción de los individuos de edades superiores existe capacidad de recuperación, dado que las clases de edades menores que quedan, con el paso del tiempo alcanzan la altura dominante típica de la clase bosque, en contraste con el desmonte a tala rasa, que elimina esta posibilidad por la carencia de árboles semilleros de las especies principales y más ricas de esta formación fitogeográfica.

Se pone en evidencia que los motivos principales desencadenantes de los procesos de desertificación en la región son las actividades desarrolladas por el hombre. El riesgo climático potencial solo se manifiesta al eliminar la cobertura boscosa natural de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- Albanesi, A.; A. Anríques; E. Suarez, y R. Ledesma, 1999a. Actividad deshidrogenasa como indicador de la calidad de suelos en el Centro Este de Santiago del Estero, Argentina. II° Reunión Científico - Técnica de Biología del Suelo y Fijación Biológica del Nitrógeno. Stegmayer, A. R., Pernasetti, D. S. y Gómez Bello, C. (Eds.). ISBN 950-746-016-0. 1 (A): 29-33. Catamarca, Argentina.
- Albanesi, A.; A. Anríques; E. Suarez, y R. Ledesma, 1999b. Potencial de mineralización de carbono como indicador de la calidad de suelos en el Centro Este de Santiago del Estero, Argentina. *Statistics and Environment*. Almorza, D., Boggio, R. y Cortés, J. (Eds.). The Gibraltar Ornithological and Natural History Society, Gibraltar. VI:133-144.
- Bardgett, R. D.; R. D. Lowell; P. J. Hobbs, y S. C. Jarvis, 1999. Seasonal Changes in soil microbial communities along a fertility gradient of temperature grasslands. *Soil Biol. Biochem.* 31: 1021-1030.
- Berstein, R., 1978. Digital image processing of Earth observation sensor data, in: *Digital Image Processing for Remote Sensing*, (R. Bernstein, De.), IEEE Press, New York, p. 55-72.
- Beyer, L.; C. H. Wachendorf; D. C. Elsner, y R. Knabe, 1993. Suitability of dehidrogenase activity assay as an index of soil biological activity. *Soil Fertil. Soils.* 16: 52-56.
- Boletta, P. E., 1988. Clima del Chaco Semiárido, Cap. I, pág. 7-21. En: *Desmonte y Habilitación de Tierras en la Región Chaqueña Semiárida*. Ed. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Santiago, Chile.
- Boletta, P. E.; L. R. Acuña y M. L. Juárez, 1989. Análisis de las características climáticas de la Provincia de Santiago del Estero y comportamiento del tiempo durante la sequía de la campaña agrícola 1988/89. *Convenio INTA-UNSE*, 23 pág. y Anexo. Santiago del Estero, Rep. Argentina.

- Bonelli, L., 1994. Alteración en el suelo luego del desmonte y posterior uso agrícola en la zona de Quimilí. Exposición Oral en 2^{das} Jornadas de Suelos de la Prov. de Santiago del Estero, 25 y 26 de agosto de 1994.
- Bremer, E.; B. H. Ellert y H. H. Janzen, 1995. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. *Soil Sc. Am. J.* 59: 1398-1403.
- Cabrera, A. L., 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 14 (1-2): 1-42. Buenos Aires.
- Cabrera, A. L., 1976. Regiones Fitogeográficas Argentinas. En: *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II, Fascículo 1. Ed. Acme SACI. Buenos Aires, Argentina.
- Casas, R. R. y R. Mon, 1988. La erosión y degradación de los suelos en áreas de expansión de la frontera agropecuaria en la Región Chaqueña Semiárida, pág. 189-220. En: *Erosión: Sistemas de producción, manejo y conservación del suelo y del agua*. Ed. Fundación Cargill, Buenos Aires, Rep. Argentina.
- Casas, R. R.; C. B. Iruetia; R. Mon y Wawrzyk, 1983. Desmonte y habilitación de tierras en Santiago del Estero. INTA, IDIA N° 413-416, mayo-agosto. Buenos Aires.
- Coleman, T. L.; L. Gudapati y J. Derrington, 1990. Monitoring forest plantation using LANDSAT Thematic mapper data. *Remote Sensing of Environment*. 33:211-221
- Copping, P. R. y M. E. Bauer, 1996. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Review*, Vol. 13:207-234.
- Curci, M.; M. D. R. Pizzigallo; C. Crecchio; R. Mininni y P. Ruggiero, 1997. Effects of conventional tillage on biochemical properties of soils. *Biol. Fertil. Soils*. 25: 1-6.
- Charney, J. G., 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101: 193-202.
- Charney, J. G.; P. H. Stone y W. J. Quirk, 1975. Drought in the Sahara, A biogeophysical feedback mechanism, *Science* 187: 434-435.

- Charney, J.; W. J. Quirk; S. Chow y J. Kornfield, 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions, *Journal of Atmospheric Sciences* 34: 1366-1385.
- Chen, L. y L. Lee, 1992. Progressive Generation of Control Frameworks for Image Registration, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58 (9): 1321-1328.
- Chuvieco, E. y R. G. Congalton, 1989. Application of remote sensing and geographic informations systems to forest FIRE hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*. 29(2):147-159.
- Chuvieco, E., 1996. *Fundamentos de Teledetección espacial*. Tercera edición revisada. Ed. RIALP, SA. Madrid.
- Da Porta, A. W. y G. Camaño Nelli, 1996. La evaporación potencial y su relación con las temperaturas psicrométricas. Ed. CIHRSA-INCYTH (Asociado al CONICET), 12 pág. Córdoba, Argentina.
- Da Porta, A. W. y G. E. Caamaño Nelli, 1993. Fontes de erro na estimação de evapotranspiração com o modelo baseado na relação complementaria potencial-real. En: *Actas Xº Simposio Brasileiro de Recursos Hidricos y Primer Simposio Latinoamericano do Cone Sul*. Pág. 363-372. Gramados, Brasil.
- Damario, E. A. y C. L. Cattáneo, 1982. Estimación Climática de la Evapotranspiración Potencial en la República Argentina Según el Método de Penman 1948. *Rev. Facultad de Agronomía*, 3 (3): 271-292. Buenos Aires.
- Decreto del Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero, 1980. Régimen Legal Sobre Desmonte (Decreto-Acuerdo Serie "B" N° 2.340, Mayo/1980). Santiago del Estero.
- Decreto del Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero, 1980. Decreto-Acuerdo Serie "B" N° 5.670, Septiembre/1980 (Establecen medidas complementarias al Decreto-Acuerdo Serie "B" N° 2.340). Santiago del Estero.

- Decreto del Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero, 1997. Régimen Legal Sobre Desmonte. Decreto Serie "A" N° 1.759/97 (Modificadorio de los Decretos Acuerdos Serie "B" N° 2.340/80 y 5.670/80). Santiago del Estero.
- Di Rienzo, J. A.; C. W. Robledo; F. Casanoves; F. G. Bolgarini; L. A. González; A. W. Guzmán y E. M. Taboada, 1999. InfoStat versión beta. Estadística y Biometría. Fac. de Cs. Agropecuarias, Univ. Nac. De Córdoba. Córdoba.
- Dick, R. P., 1992. A review: Long-Term Effects of Agricultural Systems on Soil Biochemical and Microbiological Parameters. *Agricult. Ecosys. Environ.* 40:25-36.
- Dick, R. P., 1994. A conceptual model for the role of a biotic soil enzymes in microbiological ecology: a potencial analogue for soil quality, p 167-168. En: Pankhust, C. E., Doube, B. M., Crupta, V. V. S. R., Grace, P. R. (Eds.) *Soil Biota: Management in sustainable farming systems*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia.
- Digilio, A. P. y P. R. Legname, 1966. Los árboles indígenas de Tucumán. Opera Lilloana 15. Tucumán, Argentina.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt, 1977. Crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, N° 24. Roma, Italia.
- Dregne, H. E., 1983. Desertification of the Arid Lands. *Advances in Desert and Land Technology arid Development*. Vol. 3, Hardwood Acad. Publisher. New York.
- Dregne, H. E. y C. J. Tucker, 1988. Desert encroachment. *Desertification Control Bulletin* 16:16-19.
- Duffau, R. A., 1995. Inventario de mapas de suelos de la Provincia de Santiago del Estero. En: C. Angueira y D. Prieto (Editores). 2^{das} Jornadas de Suelos de la Prov. de Santiago del Estero, 25 y 26 de Agosto de 1994. Actas pág. 7-11. Santiago del Estero.
- ERDAS, 1991. Field Guide. Second Edition. Erdas Inc., Atlanta, USA, 394 p.
- ERDAS, 1995. ERDAS-IMAGINE, Product Guide Ver. 8.2 Erdas Inc. Atlanta, Georgia. USA

- García, C.; T. Hernandez y F. Costa, 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbiological activity in degraded soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28 (1 & 2): 123-134.
- Geiger, R., 1965. *The climate near the ground*. Cambridge: Harvard University Press.
- González Sánchez, E. y R. Calvo Herrero, 1994. Estudio de la desertificación mediante imágenes LANDSAT. *El Campo* 131:109-116. Bilbao (España).
- Haines, D. A., V. J. Johnson, 1976. An assessment of three measures of long term moisture deficiency before critical fire periods. USDA Forest Service Research Paper NC-131. USA.
- Hassink, J; L. A. Bowman; K. B. Zwart; J. Bloem; L. Brussaard, 1993. Relationships between soil texture, physical protection of Organic Matter, Soil Biota, and C y N Mineralization in Grassland Soils. *Geoderma* 57:105-128.
- Heddinghaus, T. R., 1985. The Palmer Drought Index and its Availability as an Indicator of Forest Fire Watch Areas. En: *Weather - The Drive Train Connecting the Solar Engine to Forest Ecosystems*. Proceedings of the Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology, p. 104-106. Detroit, Michigan, April 29- May 2, 1985. Eds. L. R. Donoghue and R. E. Martin, Society of American Forester. USA
- Heuveland, J.; J. P. Tasis; S. Quiros Conejo y L. Espinoza Prieto, 1986. *Agroclimatología Tropical*. Ed. Univ. Est. a Distancia, San José, Costa Rica.
- Hurn, J., 1989. *GPS - A guide to the next utility*. Ed. Trimble Navigation. Sunnyvale, CA. USA.
- Huss, D., 1993. El papel del ganado doméstico en el control de la desertificación. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el caribe, Santiago, Chile.
- IGM, 1991. *Lectura de Cartografía*. Instituto Geográfico Militar, Ejército Argentino. Buenos Aires.
- Jensen, J. R., 1996. *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, (2nd Ed.), Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River N. J.
- Kittredge, J., 1948. *Forest influences*. New York, Mc. Graw Hill.

- Kittredge, J., 1960. La influencia de los montes sobre el clima y otros factores ambientales. Capítulo 3. En: La influencia de los montes. FAO, Roma, Italia. págs. 335.
- Kogan, F. N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15:91-100.
- Kogan, F. N., 1997. Global Drought Watch from space. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78:621-636.
- Ledesma, N. R. y P. E. Boletta, 1972. Clima de las Regiones Forestales Argentinas. En: Actas del VII° Congreso Forestal Mundial, Tomo II pág. 2151-2155. VII° Congreso Forestal Mundial, 4 al 18 de octubre de 1972, Centro Cultural San Martín. Buenos Aires, Argentina.
- Lee, R., 1978. *Forest microclimatology*. Ed. Columbia University Press.
- Legname, P. R., 1982. Árboles indígenas del Noroeste Argentino. *Opera Lilloana* 34. Tucumán, Argentina.
- Lewis, T., 1998. The effect of deforestation on ground surface temperatures. *Global and Planetary Change* 18 (1998) 1-13.
- Ley N° 6.321 de la Provincia de Sgo. del Estero, 1996. Normas Generales y Metodología de Aplicación para la Defensa, Conservación y Mejoramiento del Ambiente y los Recursos Naturales. Honorable Cámara de Diputados de la Provincia de Santiago del Estero, sancionada el 06 de noviembre de 1996. Santiago del Estero.
- Lillesand, T. M. y R. W. Kiefer, 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Ed. John Wiley and Sons. New York.
- López Bermudez, F., 1995. Las sequías: ¿un riesgo de desertificación para las tierras mediterráneas en el siglo XXI?. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, El Boletín N° 26. España.
- Lorenz, G. y C. L. Bonelli, 1996. Degradación de suelos en ambientes pirógenos del Chaco Semiárido. En: CD- XIII° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Solo-Suelo, realizado del 4 al 8 de agosto de 1996, Aguas de Lindóia, SP, Brasil.

- Morello, J. y C. Saravia Toledo, 1979. El bosque chaqueño. La ganadería y el bosque en el oriente de Salta. Rev. Agr. del Noroeste Argentino N° 2 (1-2). Tucumán. Rep. Argentina.
- Morello, J. y J. Adámoli, 1968. Las Grandes Unidades de vegetación y ambiente del Chaco Argentino. Primera parte: Objetivos y metodología. INTA, Serie Fitogeográfica N° 10. Buenos Aires, Argentina.
- Morton, F. I., 1983. Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and their Significance to the Science and Practice of Hidrology. Journal of Hidrology, 66: 1-76 Elvesier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Morton, F. I.; F. Ricard y S. Fogarasi, 1985. Operational Estimates of Areal Evapotranspiration and Lake Evaporation-Program WREVAP. NHRI PAPER N° 24. National Hydrology Research Institute, Ottawa, Canadá.
- Ogalló, L. A., 1994. Sequía y desertificación: una visión general. Boletín de la OMM, Vol. 43, 1:18-22
- Palmer, W. C., 1965. Meteorological Drought. United State Weather Bureau Research Paper N° 45, 58 p. Washington, D. C.
- Parodi, L. R., 1964. Las regiones fitogeográficas argentinas, en L. R. Parodi, Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería 2(1):1-14. Ed. Acme S.A.C.I. Buenos Aires.
- Pascale, A. S. y E. A. Damario, 1983. Variación del agua edáfica disponible para los cultivos en la Región Oriental de la Argentina. Rev. Fac. de Agronomía, 4(2):141-181. Buenos Aires.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., A 193: 120-146. London.
- Peña-Zubiate, C., 1979. Carta de Suelo de la Subregión Chaco de llanuras suavemente onduladas (Parte de los Departamentos Ibarra y Moreno). En: INTA-Gobierno de la Prov. de Santiago del Estero (1982): Informe de diez años de labor. Tomo III pág. 4-24, Santiago del Estero.

- Prohaska, F. J., 1959. El polo de calor en América del Sur INTA, IDIA, N° 141. Buenos Aires, Argentina.
- Provincia de Santiago del Estero, CFI-DIGID, 1979. Evaluación de Recursos Naturales por información obtenida mediante teledetección satelitaria – Mapa de Uso de la Tierra. Escala 1:250.000. Santiago del Estero.
- Quintela, R. M. y O. E. Scarpati, 1991. Resultados obtenidos de la aplicación del modelo de Morton para evaluar la evapotranspiración real, en distintos intervalos de tiempo. En: Actas V Reunión Argentina de Agrometeorología, pág.45-49. 9-11 de Octubre de 1991, Vaquerías (Cba.), Argentina.
- Ragonese, A. E., 1967. Vegetación y ganadería en la República Argentina. Colección Científica del INTA. Buenos Aires.
- Ravelo, A. C. y V. H. Rotondo, 1987a. Caracterización climática de las sequías en Río Cuarto, Córdoba. Actas de la III Reunión Nac. de Agrometeorología, Vaquerías, Córdoba, (Argentina):165-169.
- Ravelo, A. C. y V. H. Rotondo, 1987b. Variabilidad de las sequías en regiones semiáridas y húmedas. Actas de las 1^{ras} Jornadas Nac. de Zonas Áridas y Semiáridas. Univ. Nac. de Santiago del Estero.
- Ravelo, A. C. y A. J. Pascale, 1997. Identificación de la ocurrencia de sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre. Rev. Fac. de Agronomía, 17(1):101-105. Buenos Aires.
- Ravelo, A. C. y M. Herrero, 1999. PDIWIN versión 1.0. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) - Fac. de Cs. Agropecuarias. Univ. Nac. de Córdoba. Córdoba.
- Ravelo, A. C., 2000. Caracterización agroclimática de las sequías extremas en la Región Pampeana Argentina. Rev. Fac. de Agronomía, 20(2):187-192. Buenos Aires.
- Richards, J. A., 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Ed. Springer-Verlag.

- Rosenberg, N. J., B. L. Blad, y S. B. Verma, 1983. Microclimate - The Biological Environment. Second Edition, John Wiley & Sons. New York.
- Rusin, N. y L. Flit, 1960. El hombre cambia el clima. Ed. MIR. Moscú.
- Saravia Toledo, C., 1986. Influencia humana en el Chaco Occidental antes de los desmontes masivos. Informe del Curso Taller Internacional Desmonte y Habilitación de Tierras en Zonas Semiáridas. Tomo I. Castelar, Rep. Argentina.
- Schroeder, M. J. y C. C. Buck, 1970. Fire Weather. A guide for application of meteorological information to forest fire control operations. Agriculture Handbook 360, U. S. Department of Agriculture-Forest Service, 229 p. USA.
- SMN, 1980. Estadística Climatológica 1951-1960. Serie B Nº 6 (Sexta Edición). Servicio Meteorológico Nacional - Fuerza Aérea Argentina. Buenos Aires.
- Statistical Graphics Corp., 1992. User manuals Statgraphics v. 6.0. Cambridge, MA.
- Surfer, 1994. User's Guide. Ed. Golden Software, Inc. Golden, Colorado.
- Thomas, D. S. G. y J. Middleton, 1994. Desertification: Exploding the Myth. Ed. John Wiley and Sons Ltd., New York, USA.
- Thornthwaite, C. V., 1948. An approach a rational classification of climate . Reprinted from The Geographical Review, XXXVIII (1): 55-94, 13 figs, 4 tabl.
- Thren, M. W. y H. R. Zerda, 1994. Inventario forestal de la Provincia de Santiago del Estero, Departamento Copo y Alberdi. Convenio: Provincia de Santiago del Estero – CFI, UNSE, GTZ, Facultad de Ciencias Forestales. 114 pág.
- Tortorelli, L., 1956. Maderas y Bosques Argentinos. ACME.
- Tucker, C. J.; J. R. G. Townshend y T. E. Goff, 1985. African land-cover classification using satellite data. Science 227:369-375.
- Tucker, C. J.; B. J. Choudbury, 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. remote Sens. Environ. 23:143-151.

- Tucker, C. J.; H. E. Dregne y W. W. Newcomb, 1991. Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990. *Science* 253:299-301.
- UNCED, 1992. Report of the United Nations Conference on Environment and Development at Río de Janeiro, *Managing Fragile Ecosystems: Combating Desertification and Drought*. Chapter 12. United Nations. New York.
- UNEP (United Nations Environment Programme), 1991. Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification, UNEP/GCSS. III/3, Nairobi.
- Unganai, L. S. y F. N. Kogan, 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. *Remote Sens. Environ.* 63:219-232.
- Vargas Gil, J. R., 1990. Suelos de la Prov. de Santiago del Estero, escala 1:500.000 En: CIRN-INTA (Editor) Atlas de Suelos de la República Argentina. Tomo II SAGyP, Proyecto PNUD Arg. 85/019. 677 páginas. Buenos Aires, Argentina.
- Williams, M. A. J. y R. C. Jr. Balling, 1996. *Interactions of Desertification and Climate*. Ed. Arnold, Londres. Inglaterra.
- Zerda, H. R., 1998. *Monitoring der Vegetations - und Landnutzungsveränderungen durch Brandrodung und Übernutzung im Trocken - Chaco Argentinien mit Satellitenfernerkundung und GIS*. Disertation, Universität Göttingen, Germany. Ed. Cuvillier Verlag Göttingen.
- Zerda, H. R., 2000. *Procesamiento digital de imágenes satelitales utilizando ERDAS Imagine (v. 8.2)*. Parte I: programas y módulos principales, clasificaciones y correcciones geométricas. Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques - Facultad de Ciencias Forestales, Univ. Nac. de Santiago del Estero, 37 p. Santiago del Estero (inédito).

ANEXO

Cuadro N° 23. Datos del balance hídrico seriado de la localidad de Quimilí, correspondientes a los años 1970 y 1971, ejecutado con ETP mensuales.

AGUA UTIL EN LA CAPA SUPERIOR = 25.0 mm. y EN LA CAPA INFERIOR = 125.0mm

DICCIONARIO DE VARIABLES:

P: Prec.
 ETP: Evapotrans. Potencial
 ALMAC: Almacenaje
 RP: Recarga Potencial
 R: Recarga
 APE: Agua potenc. extraible
 AE: Agua extraida
 ETR: Evapotrans. real
 ESC: Escurrimiento

MES	P	ETP	ALMAC.	RP	R	APE	AE	ETR	ESC.
FECHA: 1970									
1	57.0	257.0	.0	.0	.0	150.0	150.0	207.0	.0
2	13.0	243.0	.0	150.0	.0	.0	.0	13.0	.0
3	43.0	170.0	.0	150.0	.0	.0	.0	43.0	.0
4	27.0	156.0	.0	150.0	.0	.0	.0	27.0	.0
5	30.0	63.0	.0	150.0	.0	.0	.0	30.0	.0
6	5.0	33.0	.0	150.0	.0	.0	.0	5.0	.0
7	10.0	73.0	.0	150.0	.0	.0	.0	10.0	.0
8	4.0	123.0	.0	150.0	.0	.0	.0	4.0	.0
9	36.0	165.0	.0	150.0	.0	.0	.0	36.0	.0
10	9.0	199.0	.0	150.0	.0	.0	.0	9.0	.0
11	32.0	276.0	.0	150.0	.0	.0	.0	32.0	.0
12	8.0	282.0	.0	150.0	.0	.0	.0	8.0	.0
FECHA: 1971									
1	99.0	203.0	.0	150.0	.0	.0	.0	99.0	.0
2	70.0	179.0	.0	150.0	.0	.0	.0	70.0	.0
3	51.0	137.0	.0	150.0	.0	.0	.0	51.0	.0
4	46.0	113.0	.0	150.0	.0	.0	.0	46.0	.0
5	.0	92.0	.0	150.0	.0	.0	.0	.0	.0
6	.0	46.0	.0	150.0	.0	.0	.0	.0	.0
7	7.0	74.0	.0	150.0	.0	.0	.0	7.0	.0
8	20.0	117.0	.0	150.0	.0	.0	.0	20.0	.0
9	.0	154.0	.0	150.0	.0	.0	.0	.0	.0
10	107.0	209.0	.0	150.0	.0	.0	.0	107.0	.0
11	119.0	249.0	.0	150.0	.0	.0	.0	119.0	.0
12	10.0	313.0	.0	150.0	.0	.0	.0	10.0	.0

Cuadro N° 24. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Gancedo (Chaco).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	283	245	178	163	75	36	76	120	166	206	280	292	2120
1971	216	184	140	118	92	45	78	118	160	212	263	326	1952
1972	283	260	153	111	81	21	61	86	162	210	205	213	1846
1973	220	187	147	42	66	33	19	88	128	215	237	218	1600
1974	245	123	135	114	66	55	64	96	122	223	271	248	1762
1975	287	225	155	107	68	47	59	71	140	200	227	265	1851
1976	205	208	141	145	80	62	64	112	171	235	267	252	1942
1977	238	176	153	112	51	47	37	95	161	213	204	212	1699
1978	240	192	207	154	107	41	55	108	195	190	209	255	1953
1979	292	183	165	88	87	52	73	102	129	185	203	208	1767
1980	250	235	188	117	54	31	69	100	185	189	183	252	1853
1981	203	163	178	90	83	43	72	112	128	230	185	255	1742
1982	261	177	170	117	106	17	30	92	132	213	180	221	1716
1983	239	181	177	87	24	49	32	87	174	214	218	276	1758
1984	227	212	134	97	70	11	55	83	149	179	169	213	1599
1985	252	164	180	95	94	50	66	83	91	178	210	234	1697
1986	270	215	167	98	76	36	56	80	125	184	172	247	1726
1987	203	210	189	98	73	61	48	88	173	200	200	216	1759
1988	231	223	195	120	73	47	57	101	115	255	287	300	2004
1989	288	265	170	92	89	31	72	132	158	195	216	248	1956
1990	240	160	145	66	75	42	47	125	129	169	198	207	1603
PROMEDIO	246.33	199.42	165.09	106.23	75.71	40.80	56.66	99	147.28	204.52	218.28	245.61	1805
DESV. EST	29.04	35.49	20.863	27.33	18.64	13.45	16.18	16.25	26.18	21.09	36.06	32.92	142.11
CV%	11.79	17.79	12.63	25.72	24.62	32.97	28.55	16.42	17.78	10.31	16.52	13.40	7.87

Cuadro N° 25. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Quimilí.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	257	243	170	156	63	33	73	123	165	199	276	282	2040
1971	203	179	137	113	92	46	74	117	154	209	249	313	1886
1972	275	250	151	112	77	23	63	81	158	203	207	205	1805
1973	221	183	142	43	60	30	18	89	136	213	233	216	1584
1974	232	115	135	107	60	52	56	99	118	223	270	235	1702
1975	273	214	150	107	63	44	55	76	143	205	223	270	1823
1976	207	199	134	133	70	54	62	107	163	231	264	254	1878
1977	233	162	142	107	44	37	33	92	155	216	202	202	1625
1978	219	182	180	147	96	37	55	101	185	180	200	240	1822
1979	270	177	153	94	78	45	64	95	122	183	187	180	1648
1980	232	224	177	104	55	27	63	101	180	185	188	246	1782
1981	190	165	174	83	75	44	71	110	130	227	183	250	1702
1982	253	170	160	110	97	12	29	85	127	219	183	215	1660
1983	232	175	164	76	24	44	29	84	175	215	217	264	1699
1984	220	203	125	96	59	12	42	84	147	168	162	215	1533
1985	241	156	172	93	87	43	61	79	82	173	192	217	1596
1986	260	207	162	90	69	33	49	66	130	195	167	240	1668
1987	200	217	186	97	66	56	44	85	170	206	191	201	1719
1988	220	215	185	114	64	47	50	95	106	250	293	300	1939
1989	290	267	172	96	81	26	65	135	161	202	220	241	1956
1990	240	155	125	58	70	46	41	119	116	170	205	204	1549
PROMEDIO	236.57	193.23	156.95	101.71	69.04	37.66	52.23	96.33	143.95	203.42	214.85	237.61	1743.61
DESV. EST	27.13	36.18	19.43	25.73	17.18	12.49	15.69	17.32	26.56	21.48	36.83	34.53	141.17
CV%	11.47	18.72	12.38	25.30	24.88	33.17	30.04	17.98	18.45	10.56	17.14	14.53	8.09

Cuadro N° 26. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Roversi.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	270	245	174	158	67	34	74	122	164	200	277	286	2071
1971	209	181	139	116	92	44	76	117	156	210	256	320	1916
1972	277	254	152	112	79	22	59	84	160	205	205	208	1817
1973	220	186	144	40	63	30	18	88	134	214	234	216	1587
1974	238	118	135	111	62	53	59	97	120	221	270	240	1724
1975	279	218	152	107	65	45	57	73	141	202	224	265	1828
1976	207	204	136	140	74	58	62	108	165	232	264	253	1903
1977	236	168	146	110	48	42	35	93	157	213	203	205	1656
1978	230	191	190	150	101	38	57	104	190	183	204	245	1883
1979	278	180	160	89	83	48	68	98	125	184	194	189	1696
1980	240	230	184	110	49	28	65	100	182	186	186	248	1808
1981	192	165	176	87	78	43	71	110	127	227	185	252	1713
1982	255	174	165	114	100	14	30	89	130	217	180	218	1686
1983	236	178	168	82	24	46	29	83	172	214	220	268	1720
1984	223	208	129	96	64	11	52	83	147	173	166	223	1575
1985	247	160	176	94	90	46	63	81	86	174	201	225	1643
1986	265	210	164	94	73	34	52	73	125	188	170	244	1692
1987	202	213	187	98	70	58	46	86	171	203	200	211	1745
1988	226	218	190	116	68	47	51	97	111	248	290	300	1962
1989	288	266	170	95	85	28	68	132	159	198	220	245	1954
1990	240	157	134	61	72	44	44	122	123	168	201	205	1571
PROMEDIO	240.85	196.38	160.52	103.80	71.76	38.71	54.09	97.14	145	202.85	216.66	241.23	1769.04
DESVEST	27.60	35.73	19.83	26.67	17.99	12.92	15.71	16.54	25.96	20.77	35.93	33.48	139.18
CV%	11.46	18.19	12.35	25.69	25.07	33.39	29.04	17.03	17.90	10.24	16.58	13.88	7.86

Cuadro N° 27. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Sachayoj.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	280	245	180	162	73	35	79	125	177	212	281	295	2144
1971	214	190	140	112	90	47	84	121	167	217	260	330	1972
1972	295	260	156	105	78	18	55	85	166	227	215	216	1876
1973	220	195	145	35	65	31	21	90	138	225	240	218	1623
1974	241	122	133	112	70	60	60	97	128	235	275	250	1783
1975	290	230	155	111	68	50	57	75	150	203	230	265	1884
1976	207	212	145	150	82	63	67	115	170	243	276	255	1985
1977	235	175	155	110	48	45	42	96	165	215	203	215	1704
1978	240	185	205	150	110	42	70	112	205	200	210	265	1994
1979	290	185	160	85	85	52	75	102	150	188	200	188	1760
1980	245	230	185	114	52	30	72	104	192	195	185	253	1857
1981	180	157	177	88	85	44	76	120	140	242	185	257	1751
1982	262	170	165	114	107	18	29	96	123	210	210	214	1718
1983	232	176	175	80	18	52	27	89	180	216	223	275	1743
1984	225	212	127	93	67	10	53	87	153	183	164	220	1594
1985	253	157	177	90	95	48	69	84	91	182	210	229	1685
1986	262	216	164	98	73	34	52	80	125	185	167	240	1696
1987	193	213	195	95	73	62	48	91	178	210	200	216	1774
1988	229	220	190	115	75	51	53	104	113	260	300	295	2005
1989	290	258	168	96	86	31	74	135	164	203	215	245	1965
1990	238	165	146	65	76	46	48	140	130	175	205	212	1646
PROMEDIO	243.85	198.71	163.95	103.80	75.04	41.38	57.66	102.28	152.61	210.76	221.61	245.38	1817.09
DES. VEST	32.70	35.74	20.83	28.37	20.01	14.60	17.68	18.17	28.07	22.491	37.67	34.47	149.10
CV%	13.41	17.98	12.71	27.33	26.66	35.29	30.66	17.76	18.39	10.67	17.00	14.04	8.20

Cuadro N° 28. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Suncho Corral.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	233	247	158	148	44	24	72	129	156	182	272	267	1932
1971	189	173	130	103	92	44	66	115	149	207	234	293	1795
1972	269	237	148	114	67	24	61	72	152	188	212	198	1742
1973	220	187	136	34	54	23	16	87	140	213	227	220	1557
1974	215	105	133	101	52	46	45	103	111	223	267	214	1615
1975	258	201	145	113	57	38	51	85	147	217	216	271	1799
1976	211	186	126	130	57	42	59	106	153	228	260	261	1819
1977	232	143	125	103	36	28	28	88	148	222	201	188	1542
1978	184	181	140	142	82	32	45	92	174	171	188	218	1649
1979	236	170	139	92	67	36	50	85	112	182	167	160	1496
1980	204	206	165	87	30	20	52	105	174	180	197	238	1658
1981	191	165	168	72	63	48	73	110	135	228	190	246	1689
1982	242	162	145	102	84	6	29	79	123	230	180	207	1589
1983	226	168	147	57	22	37	29	82	178	219	208	246	1619
1984	211	190	111	96	43	13	38	86	153	154	152	195	1442
1985	238	143	163	93	78	33	52	73	66	168	167	195	1469
1986	245	194	154	77	63	31	43	47	127	215	162	233	1591
1987	196	230	183	98	57	48	42	85	168	215	204	169	1695
1988	214	203	172	105	48	48	40	87	92	232	261	306	1808
1989	295	278	175	99	68	20	56	138	165	215	225	230	1964
1990	245	148	98	46	60	52	31	111	92	170	216	200	1469
PROMEDIO	226.38	186.52	145.76	95.80	58.28	33	46.57	93.57	138.80	202.80	209.80	226.42	1663.76
DESVEST	27.77	39.50	21.46	28.06	17.69	12.68	15.09	20.53	30.21	24.44	35.21	38.64	149.19
CV%	12.26	21.17	14.72	29.28	30.35	38.42	32.41	21.95	21.76	12.05	16.78	17.06	8.96

Cuadro N° 29. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Tintina.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	249	245	169	152	56	31	75	127	168	195	274	279	2020
1971	198	179	133	103	88	45	76	118	157	211	241	310	1859
1972	283	245	151	112	69	20	54	77	155	210	213	205	1794
1973	219	183	142	65	57	29	18	90	138	217	230	215	1603
1974	218	110	136	104	61	52	52	100	118	227	270	233	1681
1975	270	210	147	111	62	43	56	81	150	211	222	265	1828
1976	210	192	132	133	68	52	62	112	159	238	267	255	1880
1977	230	158	137	106	42	37	35	91	155	217	198	200	1606
1978	210	178	170	144	95	38	53	102	191	185	196	238	1800
1979	248	174	140	86	75	45	63	93	122	184	182	169	1581
1980	220	214	172	95	39	24	62	105	183	186	189	242	1731
1981	180	157	167	77	73	46	74	115	135	232	185	250	1691
1982	248	162	149	104	95	12	29	89	121	217	175	204	1605
1983	225	168	157	64	18	43	27	84	175	217	213	255	1646
1984	215	198	114	92	56	11	44	84	150	165	155	210	1494
1985	241	146	167	87	86	40	60	78	79	174	183	207	1548
1986	248	201	156	87	67	33	47	62	125	197	162	234	1619
1987	189	221	186	96	62	54	46	86	171	212	200	187	1710
1988	210	207	178	107	60	49	47	96	102	247	300	295	1898
1989	295	265	168	96	78	25	65	135	165	198	220	234	1944
1990	237	157	118	56	67	48	39	116	112	173	205	204	1532
PROMEDIO	230.61	189.04	151.85	98.90	65.42	37	51.61	97.19	144.33	205.38	213.33	232.90	1717.61
DESV. EST	29.28	37.04	19.63	24.22	18.48	12.87	15.93	18.24	28.56	22.11	38.75	35.75	147.25
CV%	12.69	19.59	12.93	24.49	24.49	34.79	30.87	18.77	19.79	10.76	18.16	15.35	8.57

Cuadro N° 30. Valores mensuales de ETP para cada uno de los meses del año de la serie 1970/90, promedio, desvío estándar y coeficiente de variación, correspondientes a la localidad de Vilelas.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1970	253	245	166	152	55	32	71	123	157	191	273	275	1993
1971	198	175	136	113	93	43	70	115	148	206	247	308	1852
1972	258	245	148	115	76	25	64	80	156	195	204	200	1766
1973	220	185	140	39	58	29	17	88	137	211	231	214	1569
1974	225	113	136	106	56	49	53	100	116	218	267	228	1667
1975	267	209	147	107	61	41	57	78	141	205	219	265	1797
1976	207	197	129	133	65	51	59	104	160	226	258	255	1844
1977	227	155	136	107	41	35	30	90	151	214	197	195	1578
1978	212	188	166	145	91	34	50	97	178	174	196	230	1761
1979	259	176	152	91	75	42	58	90	118	182	180	176	1599
1980	225	221	175	100	40	24	59	101	178	181	192	242	1738
1981	192	165	172	79	70	44	70	107	128	226	190	246	1689
1982	248	168	158	108	97	10	30	82	127	218	210	214	1670
1983	236	174	157	73	24	41	29	83	173	214	214	257	1675
1984	218	198	122	95	55	12	44	83	147	164	160	200	1498
1985	245	155	169	95	84	40	58	76	77	170	185	211	1565
1986	257	202	159	85	68	32	47	60	125	198	167	238	1638
1987	201	220	184	98	64	54	42	83	167	207	206	194	1720
1988	217	212	183	112	59	46	50	92	104	239	296	301	1911
1989	288	268	173	96	77	24	61	132	160	204	222	239	1944
1990	240	152	115	54	66	47	38	117	112	168	206	202	1517
PROMEDIO	233	191.57	153.47	100.14	65.47	35.95	50.33	94.33	140.95	200.52	215.23	232.85	1713.85
DESV. EST	25.24	36.52	19.81	26.39	18.03	12.04	14.97	17.50	26.38	21.03	35.65	35.35	139.71
CV%	10.83	19.06	12.90	26.35	27.54	33.49	29.75	18.55	18.71	10.48	16.56	15.18	8.151

Cuadro N° 31. Medidas de posición, dispersión y probabilidad del Test de Shapiro-Wilk, para las localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.

a) Gancedo

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	0,15	-0,19	0,06	0,12	0,004	-0,037	0,03	0,03	0,14	0,18	0,007	0,007
Mediana	0	-0,45	-0,2	-0,7	-0,5	-0,8	-0,8	-0,6	-0,3	-0,2	-0,4	-0,4
Desviación Estandar	2,09	1,96	1,96	2,15	2,26	2,32	2,34	2,46	2,33	2,30	2,13	2,17
Asimetría	0,26	0,63	0,68	0,93	0,76	0,85	0,66	0,71	0,62	0,48	0,48	0,43
Asimetría Estandarizada	0,56	1,32	1,44	1,93	1,61	1,80	1,41	1,52	1,32	1,02	1,02	0,91
Kurtosis	-0,79	0,33	-0,02	0,74	0,10	0,004	-0,60	-0,50	-0,42	-0,36	-0,35	-1,11
Kurtosis Estandarizada	-0,83	0,34	-0,02	0,77	0,10	0,04	-0,64	-0,53	-0,45	-0,38	-0,38	-1,18
Coficiente de Variación	1347	-1018	3113	1801, 5	61014	-6276	7888	9503	1701	1245	27798	-29265
Probabilidad de Test S-W	0,19	0,56	0,16	0,13	0,21	0,06	0,07	0,06	0,08	0,15	0,41	0,06

b) Quimilí

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	-0,13	-0,14	-0,11	-0,07	-0,08	-0,204	-0,19	-0,21	-0,19	-0,19	-0,24	-0,11
Mediana	-0,6	-0,8	-0,5	-0,7	-0,6	-0,7	-0,8	-0,7	-0,4	-0,3	-1,0	-0,8
Desviación Estandar	2,33	2,29	2,04	2,2	2,37	2,14	2,12	2,18	1,9	1,81	2,03	2,30
Asimetría	1,03	0,98	0,67	0,44	0,57	0,40	0,45	0,62	0,38	0,48	0,90	0,75
Asimetría Estandarizada	2,18	2,09	1,42	0,94	1,21	0,84	0,96	1,31	0,80	1,01	1,92	1,59
Kurtosis	0,92	0,88	0,59	-0,73	-0,65	-1,06	-1,09	-1,03	-0,56	-0,19	0,12	0,09
Kurtosis Estandarizada	0,98	0,93	0,63	-0,78	-0,69	-1,13	-1,16	-1,10	-0,59	-0,20	0,13	0,10
Coficiente de Variación	-1797	-1586	-1778	-3308	-2913	-1052	-1125	-1051	-1007	-939	-845	-2072
Probabilidad de Test S-W	0,36	0,41	0,27	0,30	0,19	0,06	0,08	0,14	0,17	0,07	0,12	0,06

c) Roversi

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	-0,03	-0,17	-0,25	-0,21	-0,14	0,04	0,05	0,04	0,19	0,02	-0,16	-0,07
Mediana	-0,3	-0,8	-1,1	-1,2	-1,3	-0,9	-1,0	-1,1	-0,4	-0,5	-0,8	-1,1
Desviación Estandar	2,47	2,56	2,48	2,54	2,59	2,44	2,40	2,45	2,34	2,18	2,26	2,35
Asimetría	1,07	1,11	0,94	0,90	0,83	0,68	0,67	0,77	0,52	0,73	1,23	1,13
Asimetría Estandarizada	2,26	2,36	1,99	1,90	1,77	1,44	1,41	1,64	1,10	1,54	2,61	2,40
Kurtosis	0,64	0,70	-0,14	-0,50	-0,72	-0,88	-0,92	-0,72	-1,07	-0,29	1,79	0,68
Kurtosis Estandarizada	0,68	0,75	-0,15	-0,53	-0,76	-0,93	-0,98	-0,76	-1,14	-0,31	1,90	0,72
Coefficiente de Variación	-8347	-1471	-998	-1205	-1839	5986	4987	6005	1214	11797	-1385	-3531
Probabilidad de Test S-W	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,06

d) Sachayoj

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	0,01	-0,01	0,09	0,26	0,21	0,1	-0,01	0,03	-0,01	-0,15	-0,07	-0,02
Mediana	0	-0,02	0	0,5	0	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5	-0,7	-0,9	-0,8
Desviación Estandar	2,41	2,57	2,36	2,30	2,45	2,51	2,42	2,48	2,54	2,50	2,51	2,58
Asimetría	0,47	0,53	0,70	0,38	0,46	0,62	0,73	0,65	0,58	0,81	0,93	0,66
Asimetría Estandarizada	0,99	1,13	1,49	0,81	0,98	1,31	1,54	1,38	1,24	1,72	1,98	1,41
Kurtosis	-0,44	-0,16	0,33	-0,29	-0,32	-0,37	-0,15	-0,24	-0,46	0,005	0,50	-0,62
Kurtosis Estandarizada	-0,47	-0,17	0,35	-0,30	-0,34	-0,39	-0,16	-0,25	-0,48	0,006	0,53	-0,66
Coefficiente de Variación	1627 2	-23119	2655	889	1182	2515	16358	7432	22900	-1687	-3570	-11627
Probabilidad de Test S-W	0,36	0,41	0,27	0,30	0,19	0,06	0,08	0,14	0,17	0,07	0,12	0,06

e) Suncho Corral

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	0,06	-0,09	-0,19	-0,27	-0,24	-0,14	-0,26	-0,23	-0,26	-0,01	0,09	0,05
Mediana	-0,2	-0,6	-0,9	-0,9	-1,2	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-0,4	0	-0,3
Desviación Estandar	2,25	2,35	2,42	2,44	2,58	2,55	2,39	2,42	2,09	2,03	1,74	1,97
Asimetría	0,29	0,43	0,41	0,41	0,66	0,72	0,95	1,09	1,06	0,58	0,94	0,45
Asimetría Estandarizada	0,62	0,90	0,86	0,86	1,4	1,53	2,02	2,31	2,25	1,23	1,99	0,95
Kurtosis	-0,67	-0,54	-0,73	-0,86	-0,77	-0,65	0,04	0,40	0,39	-0,44	2,14	-0,47
Kurtosis Estandarizada	-0,71	-0,57	-0,77	-0,92	-0,81	-0,69	0,05	0,42	0,42	-0,47	2,27	-0,49
Coefficiente de Variación	3578	-2650	-1281	-901	-1057	-1765	-909	-1039	-805	-13704	1877	4089
Probabilidad de Test S-W	0,47	0,33	0,22	0,09	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,18	0,68	0,38

f) Tintina

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	-0,08	-0,11	-0,1	-0,1	-0,07	-0,03	-0,03	-0,02	-0,09	-0,03	-0,03	-0,25
Mediana	-0,3	-0,8	-0,7	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7
Desviación Estandar	2,03	2,24	2,40	2,34	2,41	2,36	2,29	2,29	2,19	2,06	2,28	2,08
Asimetría	0,95	1,12	1,22	1,06	0,90	0,74	0,79	0,83	1,10	1,19	1,07	1,20
Asimetría Estandarizada	2,01	2,38	2,6	2,24	1,90	1,58	1,67	1,77	2,33	2,52	2,26	2,54
Kurtosis	1,39	1,84	2,16	1,54	0,75	0,11	-0,004	-0,08	0,71	1,06	0,75	2,07
Kurtosis Estandarizada	1,47	1,95	2,29	1,63	0,79	0,11	-0,005	-0,09	0,76	1,13	0,8	2,19
Coefficiente de Variación	-2487	-2087	-2399	-2256	-3422	-9107	-8847	10326	2465	-6941	-8815	-813
Probabilidad de Test S-W	0,13	0,24	0,11	0,13	0,23	0,26	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09

g) Vilelas

Estadísticos	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Media Aritmética	-0,21	-0,30	-0,20	-0,30	-0,23	-0,28	-0,25	-0,07	-0,12	-0,007	-0,09	0,04
Mediana	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8	-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	0
Desviación. Estandar	1,74	1,98	2,12	2,0	2,18	1,99	2,07	2,14	1,99	2,06	1,88	1,75
Asimetría	0,12	0,79	0,79	0,62	0,79	1,15	1,17	1,28	1,11	0,60	0,45	0,43
Asimetría Estandarizada	0,26	1,67	1,68	1,33	1,68	2,45	2,49	2,72	2,35	1,28	0,96	0,92
Kurtosis	-0,14	0,93	0,06	-0,15	0,41	1,38	1,16	1,36	1,22	-0,38	-0,33	0,07
Kurtosis Estandarizada	-0,15	0,98	0,06	-0,16	0,44	1,47	1,23	1,44	1,29	-0,4	-0,35	0,07
Coefficiente de Variación	-838	-652	-1081	-666	-935	-709	-811	-3038	-1683	-27785	-2172	3944
Probabilidad de Test S-W	0,06	0,22	0,12	0,30	0,34	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,62	0,49

Cuadro N° 32. Valores de los índices de sequía mayores o iguales a: X_1 , X_2 , X_3 , con probabilidad de 90 %, 95 % y 99 % respectivamente, para las localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.

a) Gancedo

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,37	-0,70	-0,43	-0,43	-0,57	-0,62	-0,56	-0,60	-0,45	-0,40	-0,53	-0,56
$X_2 = 95 \%$	-0,53	-0,85	-0,58	-0,60	-0,74	-0,80	-0,74	-0,78	-0,63	-0,57	-0,69	-0,72
$X_3 = 99 \%$	-0,84	-1,15	-0,87	-0,93	-1,07	-1,14	-1,08	-1,15	-0,97	-0,91	-1,01	-1,04

b) Quimilí

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,72	-0,72	-0,63	-0,63	-0,68	-0,75	-0,73	-0,76	-0,67	-0,65	-0,75	-0,69
$X_2 = 95 \%$	-0,89	-0,90	-0,78	-0,79	-0,86	-0,91	-0,88	-0,92	-0,81	-0,79	-0,91	-0,87
$X_3 = 99 \%$	-1,24	-1,24	-1,09	-1,12	-1,21	-1,23	-1,20	-1,15	-1,10	-1,05	-1,21	-1,21

c) Roversi

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,65	-0,82	-0,87	-0,85	-0,79	-0,58	-0,56	-0,58	-0,40	-0,53	-0,73	-0,66
$X_2 = 95 \%$	-0,84	-1,01	-1,06	-1,04	-0,99	-0,76	-0,74	-0,76	-0,57	-0,70	-0,90	-0,84
$X_3 = 99 \%$	-1,21	-1,39	-1,43	-1,42	-1,37	-1,12	-1,09	-1,13	-0,92	-0,84	-1,24	-1,19

d) Sachayoj

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,59	-0,66	-0,51	-0,32	-0,41	-0,54	-0,63	-0,59	-0,65	-0,78	-0,71	-0,67
$X_2 = 95 \%$	-0,77	-0,85	-0,68	-0,50	-0,60	-0,72	-0,81	-0,78	-0,85	-0,97	-0,89	-0,87
$X_3 = 99 \%$	-1,13	-1,24	-1,03	-0,84	-0,96	-1,10	-1,17	-1,15	-1,22	-1,34	-1,27	-1,25

e) Suncho Corral

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,51	-0,68	-0,80	-0,89	-0,90	-0,79	-0,87	-0,85	-0,79	-0,53	-0,35	-0,45
$X_2 = 95 \%$	-0,68	-0,86	-0,98	-1,07	-1,09	-0,98	-1,04	-1,03	-0,94	-0,68	-0,48	-0,60
$X_3 = 99 \%$	-1,01	-1,21	-1,34	-1,43	-1,48	-1,36	-1,40	-1,39	-1,25	-0,98	-0,74	-0,89

f) Tintina

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,59	-0,67	-0,71	-0,69	-0,68	-0,62	-0,61	-0,56	-0,46	-0,55	-0,60	-0,78
$X_2 = 95 \%$	-0,75	-0,84	-0,89	-0,87	-0,86	-0,80	-0,78	-0,73	-0,63	-0,70	-0,78	-0,94
$X_3 = 99 \%$	-1,05	-1,18	-1,24	-1,22	-1,15	-1,12	-1,07	-0,96	-1,01	-1,12	-1,12	-1,25

g) Vilelas

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$X_1 = 90 \%$	-0,65	-0,80	-0,73	-0,80	-0,78	-0,79	0,78	-0,61	-0,62	-0,52	-0,56	-0,40
$X_2 = 95 \%$	-0,78	-0,95	-0,89	-0,96	-0,95	-0,94	-0,94	-0,77	-0,77	-0,68	-0,71	-0,53
$X_3 = 99 \%$	-1,04	-1,25	-1,21	-1,25	-1,27	-1,23	-1,24	-1,09	-1,07	-0,99	-0,99	-0,79

Cuadro Nº 33. Probabilidades de ocurrencia de determinados niveles del Índice de Sequía de Palmer en los meses del año, para la localidades de: a) Gancedo, b) Quimilí, c) Roversi, d) Sachayoj, e) Suncho Corral, f) Tintina y g) Vilelas.

a) Gancedo

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0237	0,026	0,0191	0,0276	0,0382	0,0441	0,0423	0,0511	0,038	0,0350	0,0301	0,0330
ISP ≤ -3,0	0,066	0,0758	0,059	0,0732	0,092	0,1012	0,0974	0,1097	0,0892	0,0835	0,0793	0,084
ISP ≤ -2,0	0,1518	0,1779	0,1462	0,1619	0,188	0,1991	0,1925	0,2054	0,1797	0,1715	0,1733	0,1790
ISP ≤ -1,0	0,291	0,334	0,294	0,3015	0,328	0,3393	0,3297	0,3385	0,313	0,3053	0,3183	0,3235
ISP ≤ -0,5	0,38	0,4375	0,387	0,3866	0,412	0,421	0,41	0,4155	0,3923	0,3831	0,406	0,4101

b) Quimilí

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0483	0,0462	0,0285	0,0372	0,0494	0,0382	0,0364	0,0409	0,0225	0,0176	0,0324	0,0456
ISP ≤ -3,0	0,1090	0,1063	0,0788	0,0917	0,1095	0,0959	0,0920	0,10	0,0697	0,0602	0,0876	0,1047
ISP ≤ -2,0	0,2111	0,2090	0,1779	0,1903	0,2095	0,2009	0,1970	0,2054	0,1704	0,1587	0,1937	0,2059
ISP ≤ -1,0	0,3544	0,3544	0,3323	0,3361	0,3494	0,3551	0,3513	0,3581	0,3349	0,3275	0,3545	0,3497
ISP ≤ -0,5	0,4368	0,4383	0,4252	0,4221	0,43	0,445	0,4418	0,4466	0,435	0,4325	0,4493	0,4329

c) Roversi

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0542	0,0676	0,0648	0,0682	0,0680	0,0488	0,0459	0,0493	0,0364	0,0330	0,0446	0,0474
ISP ≤ -3,0	0,1148	0,1349	0,1332	0,1364	0,1347	0,1062	0,1021	0,1070	0,0860	0,0835	0,1045	0,1063
ISP ≤ -2,0	0,2128	0,2379	0,2396	0,2409	0,2363	0,2013	0,1968	0,2021	0,1741	0,1777	0,2079	0,2057
ISP ≤ -1,0	0,3474	0,3735	0,3807	0,3782	0,370	0,3348	0,3312	0,3353	0,3050	0,3205	0,3554	0,3459
ISP ≤ -0,5	0,4246	0,4494	0,4595	0,4548	0,4448	0,4122	0,4097	0,4125	0,3835	0,4062	0,4407	0,4270

d) Sachayoj

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0479	0,0602	0,0416	0,0323	0,0431	0,0515	0,050	0,0517	0,0585	0,0616	0,0589	0,0618
ISP ≤ -3,0	0,1055	0,1223	0,0953	0,0787	0,0954	0,1089	0,1090	0,1104	0,1200	0,1269	0,1218	0,1246
ISP ≤ -2,0	0,2016	0,2194	0,1881	0,1635	0,1840	0,2019	0,2063	0,2059	0,2172	0,2293	0,2212	0,2220
ISP ≤ -1,0	0,3369	0,3501	0,3223	0,2924	0,3112	0,3309	0,3421	0,3383	0,3488	0,3666	0,3557	0,3526
ISP ≤ -0,5	0,4154	0,4245	0,4015	0,3709	0,3865	0,4057	0,4206	0,4148	0,4238	0,4440	0,4321	0,4266

e) Suncho Corral

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0357	0,0484	0,0576	0,0629	0,0731	0,0652	0,0590	0,060	0,0366	0,0248	0,0092	0,0199
ISP ≤ -3,0	0,0870	0,1082	0,1227	0,1313	0,1431	0,1313	0,1261	0,1268	0,0947	0,0707	0,0376	0,0608
ISP ≤ -2,0	0,1799	0,2086	0,2271	0,2389	0,2484	0,2333	0,2337	0,2330	0,2022	0,1641	0,1143	0,1491
ISP ≤ -1,0	0,3185	0,3494	0,3687	0,3823	0,3850	0,3686	0,3787	0,3759	0,3614	0,3137	0,2648	0,2972
ISP ≤ -0,5	0,4013	0,4307	0,4488	0,4624	0,4609	0,4445	0,4605	0,4562	0,5441	0,4055	0,3666	0,3903

f)Tintina

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0266	0,0412	0,0520	0,0480	0,0513	0,0462	0,0416	0,040	0,0310	0,0270	0,0410	0,0357
ISP ≤ -3,0	0,0749	0,0985	0,1134	0,1079	0,1118	0,1039	0,0974	0,0939	0,0793	0,0743	0,0966	0,0931
ISP ≤ -2,0	0,1719	0,1993	0,2142	0,2088	0,2114	0,2015	0,1947	0,1891	0,1702	0,1690	0,1939	0,2004
ISP ≤ -1,0	0,3252	0,3452	0,3585	0,3508	0,3497	0,340	0,3355	0,3280	0,3096	0,3185	0,3350	0,360
ISP ≤ -0,5	0,4182	0,4305	0,4338	0,4327	0,4292	0,4204	0,4181	0,4010	0,3940	0,4095	0,4178	0,4531

g) Vilelas

ISP	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ISP ≤ -4,0	0,0146	0,031	0,0365	0,0320	0,0422	0,0312	0,0354	0,0330	0,0258	0,0262	0,0188	0,0105
ISP ≤ -3,0	0,0541	0,0866	0,0932	0,0884	0,1024	0,0866	0,0928	0,0853	0,0743	0,0730	0,0609	0,0412
ISP ≤ -2,0	0,1513	0,1958	0,1977	0,1975	0,2091	0,1946	0,2000	0,1834	0,1728	0,1665	0,1549	0,1217
ISP ≤ -1,0	0,3242	0,3625	0,3524	0,3621	0,3627	0,3594	0,3598	0,3318	0,3293	0,3148	0,3141	0,2756
ISP ≤ -0,5	0,4332	0,4605	0,4431	0,4601	0,4514	0,4564	0,4531	0,4204	0,4242	0,4054	0,4135	0,3780

Procesamiento de imágenes

A. Corrección geométrica

a. Imagen 1975

En la selección de los puntos de control se utilizó la opción Raster → GCP Editor, que despliega en el monitor una tabla para el ingreso de puntos de control con el número de orden y las coordenadas correspondientes (filas y columnas) en la imagen sin corregir. La tabla desplegada en la parte superior tiene una barra de herramientas, en la cual hay que seleccionar Parwise → Select Viewer y se activa la imagen georreferenciada apareada y en la tabla citada después de realizada esta operación aparecen incluidas dos columnas más. Para ubicar los puntos de control se van observando ambas imágenes en el mismo sector cuando se visualiza un punto común en las mismas, perfectamente identificable, como ser un cruce de ruta o camino vecinal con el Zoom se amplifica el sector en ambas imágenes para poder ubicar con mayor precisión el punto y disminuir el error. Luego se ingresa en la tabla el número de orden del punto y a continuación se escoge GCP Editor y se lleva el puntero hasta el punto seleccionado en la imagen y se lo marca. La marca del punto de control determina que en forma automática en la tabla se registre sus coordenadas (filas y columnas), para que el punto tenga las coordenadas correspondientes en la proyección Gauss-Krüger, se debe activar nuevamente el GCP Editor y marcar el mismo punto en la imagen de referencia, hecha esta operación igual que en el caso anterior queda registrada en la tabla las coordenadas correspondientes en metros, o sea, en Gauss-Krüger.

La versión de ERDAS-IMAGINE que se utilizó permite trabajar solamente en forma automática con una imagen fuente (sin corregir) y una imagen destino (corregida), para seleccionar puntos de toda la Escena 245/079, se apeló a la imagen del LANDSAT TM 229/079 del año 1994 que cubre la mayor porción de la zona de estudio en su parte occidental y se grabó el archivo correspondiente de los puntos de control escogidos. Luego se desplegó la imagen 228/079 de referencia del año 1997, apareada con la imagen fuente (245/079), se seleccionaron los puntos de control en la imagen a corregir y automáticamente se registró en la

tabla las coordenadas (filas y columnas), con el cursor se ubicó el mismo punto en la imagen de referencia y se leyó que coordenadas en la proyección Gauss-Krüger le correspondía y se ingreso vía teclado su valor en la tabla, para solucionar la restricción citada.

En la imagen de LANDSAT MSS 1975 se tomaron 33 puntos de control (GCP), dado que, la bondad del grado de ajuste conseguido se mide por la importancia de los residuales. Los residuales como se sabe, surge de la regresión de la diferencia entre el valor estimado y el observado, para cada uno de los puntos muestrales utilizados en el proceso. Cuanto mayor sea el valor, el ajuste entre las variables independientes y dependientes es menor. En el caso que nos ocupa, la calidad de la corrección geométrica se valora, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las coordenadas reales. En referencia a la corrección geométrica de imágenes satelitales, algunos autores (Jensen, 1996, Chuvieco, 1996) denominan al promedio de los residuales al cuadrado como (RMSE) y se lo calcula como la raíz cuadrada de las desviaciones al cuadrado entre los valores observados y los estimados por la regresión. Calculado el RMSE total con los 33 GCP dio como resultado 34,5 que es un error muy alto, por lo que se procedió a borrar el GCP N° 23 por ser el punto que más contribuía al error y se procedió a recalcularlo el RMSE total que disminuyó a un valor igual a 11. Como el valor de RMSE total continuaba siendo alto se borró el GCP N° 32 y se recalculó el RMSE total que bajó a un valor igual a 8,3. A continuación se borró el GCP N° 29 y ya el RMSE total obtenido fue de 1,09. Se continuó borrando uno a uno los GCP que contribuían en mayor medida al RMSE total y a recalcularlo nuevamente al mismo. De la forma descripta se borraron los GCP que aportaban un error demasiado alto, obteniéndose con 26 GCP un valor de RMSE total = 0,90, que está dentro del error permitido, dado que se acepta un valor ≤ 1 pixel (Chuvieco, 1996) y también en el número de GCP dado que supera con holgura el número de 14 a 20 aconsejado para una Imagen MSS. También se calculó el RMSE para cada punto, como la raíz cuadrada de los residuales al cuadrado para ese punto. El valor no es más que la distancia entre sus coordenadas reales y las estimadas por la regresión, como se muestra en el cuadro correspondiente.

Para llevar a cabo la corrección geométrica se ingresa en el módulo editor de transformación y se selecciona Edit → Transformation Order se elige la opción “orden de transformación 2”. Luego se prosiguió con el comando correspondiente a dar la orden de realizar

la corrección geométrica, para este proceso se escoge el método del vecino más próximo por ser el aconsejado cuando se trabaja con clasificación temática, que es el caso que nos ocupa y en el mismo proceso se indica que se remuestree los tamaños de los píxeles a 50 por 50 metros (Jensen, 1996; Chuvieco, 1996; Zerda, 1998, 2000).

b. Imagen 1992

A continuación se procede a analizar la imagen del mes de enero de 1992 que cubre la mayor parte del área de estudio en su parte occidental. Con la finalidad de no ocupar tanto espacio en disco se hace un corte de la imagen ubicando en forma visual en el monitor aquellas zonas que exceden la superficie de interés y se graba la sub-escena en un archivo identificado con el nombre MSS22979Subset_4b_92.img. Para el proceso de la georreferenciación se procede a desplegar en el monitor la sub-escena MSS22979Subset_4b_92.img apareada con la imagen georreferenciada identificada como 22979_94geo.img, y se ubican los GCP de la forma ya descrita más arriba. En esta sub-escena se seleccionaron en total 33 GCP, se procedió a calcular el RMSE total y se fueron desechando uno a uno los GCP que más contribuían al RMSE total y a recalcular el mismo nuevamente hasta que se obtuvo un RMSE total aceptable que arrojó un valor de 0,87 con un total final de 26 GCP. En el Cuadro N° 34 se presentan los GCP con su número de identificación, sus filas y columnas en la imagen sin corregir y las coordenadas correspondientes en Gauss-Krüger que le corresponde en la imagen georreferenciada.

Cuadro N° 34. Puntos finales de control en la georreferenciación de la Sub-escena MSS 229/079 de enero de 1992.

GCP N°	X Fuente	Y Fuente	X Destino	Y Destino	X Residuo	Y Residuo	RMS Error
1	2830.06	1585.08	4553013.7	6945943.5	-0.022	0.854	0.855
2	2981.96	1682.49	4562382.9	6949956.0	-1.373	-0.607	1.501
3	3063.91	1467.18	4565150.1	6937108.0	0.557	-0.155	0.578
6	3165.57	1873.44	4574499.5	6959028.6	-1.174	-0.176	1.187
7	3087.10	2186.16	4572997.3	6977312.3	0.004	-0.271	0.271
8	3164.41	2282.41	4578195.7	6982075.9	-0.891	0.687	1.125
9	3116.10	2459.45	4577128.4	6992433.3	-0.095	0.134	0.164
10	3196.50	2365.52	4580804.9	6986384.9	-0.008	-0.391	0.391
11	3047.29	2715.35	4575626.1	7007435.8	0.633	-0.002	0.633
12	3215.44	2877.70	4586537.0	7015026.0	-0.369	-0.056	0.373
13	2923.98	2999.85	4571238.1	7024573.0	0.024	0.118	0.12
15	2188.30	2820.49	4528192.5	7021207.8	1.559	-0.187	1.571
16	2008.24	2949.21	4519149.5	7030112.5	0.488	-0.082	0.494
17	2068.93	3003.48	4523379.4	7034322.6	1.039	0.537	1.17
18	1505.34	3077.55	4491872.3	7041972.1	-1.07	0.219	1.092
20	1335.36	2915.29	4480813.1	7034372.0	-0.764	-0.413	0.868
21	1497.51	2633.11	4487424.9	7017007.5	0.045	-0.523	0.525
22	1515.30	2379.92	4486140.1	7002617.8	0.481	-0.33	0.584
23	1511.82	2074.93	4483096.1	6985559.7	-0.715	0.457	0.848
24	1341.35	1965.93	4472501.5	6980954.2	-0.312	-0.217	0.38
25	1334.78	1755.64	4470198.7	6969252.7	-0.655	0.786	1.023
26	1378.07	1139.87	4466996.6	6934187.6	-0.788	-0.149	0.802
30	3008.54	1280.38	4560300.0	6927123.7	0.193	-0.057	0.202
31	1998.48	1445.63	4504895.7	6945693.9	1.11	0.333	1.159
32	1840.00	1205.20	4493767.3	6933587.2	1.376	-0.415	1.438
33	2598.02	1621.90	4540296.7	6950082.0	0.724	-0.092	0.73

X RMS Error = 0,78

Y RMS Error = 0,39

RMSE Total = 0,87

Editor de transformación (Sub-escena MSS 229/079 de enero de 1992)

	X'	Y'
Constante	- 56307,6228	-131623,243
X	-0,0172	0,00282
Y	-0,00281	0,01733

En la corrección geométrica se procedió de la misma forma que en el caso ya descripto.

c. Imagen 1991

Para cubrir el resto de la superficie del área de estudio se tomó una sub-escena de la parte occidental de la imagen MSS228079 del mes de diciembre de 1991 (25/12/1991). El corte de la sub-escena se la efectuó, como ya se explicó con anterioridad a fin de ahorrar espacio de disco y se la hizo mediante apreciación visual en el monitor, tomando una superficie algo superior a la necesaria, para no correr riesgos de falta de cobertura del área de interés, el archivo de la sub-escena seleccionada se lo grabó con la identificación MSS22879_4b_Subset_91.img. A continuación se la apareó en el monitor con la imagen georreferenciada (22879_94geo.img) y se procedió a ubicar los GCP de la forma ya descrita. En total en esta sub-escena para la corrección geométrica intervinieron 22 GCP, con un RMSE total = 0,76. En el Cuadro N° 35, se presentan los GCP finales considerados en la georreferenciación, sus filas y columnas, las coordenadas correspondientes a cada uno de ellos, sus residuales en X e Y, y sus respectivos RMSE.

Cuadro N° 35. Puntos finales de control de la georreferenciación de la Sub-escena MSS 228/079 de diciembre de 1991

GCP N°	X Fuente	Y Fuente	X Destino	Y Destino	X Residuo	Y Residuo	RMS Error
1	1128.48	3044.77	4622206.5	7043307.5	-0.774	0.184	0.795
2	834.09	2959.45	4604821.5	7041417.5	-0.612	0.208	0.646
3	699.54	3044.77	4598116.5	7047462.5	-0.051	-0.761	0.763
4	1124.43	2535.91	4617061.5	7014822.5	0.76	0.471	0.894
5	801.63	2344.46	4597021.5	7007202.5	0.876	-0.568	1.045
6	676.19	2052.76	4587106.5	6992142.5	0.857	0.482	0.963
7	850.69	1452.01	4590976.5	6956742.5	0.314	0.244	0.398
8	1020.82	1829.53	4604281.5	6976212.5	0.787	-0.048	0.789
9	1295.31	1344.61	4614931.5	6946317.5	0.568	-0.336	0.66
10	1731	1525.36	4641166.5	6952152.5	-0.141	-0.748	0.761
11	1552.61	2505.64	4640806.5	7008912.5	0.158	0.263	0.307
12	1637.59	2701.57	4647496.5	7019052.5	-0.1	0.074	0.125
13	1568.46	3021.92	4646731.5	7037682.5	-0.584	-0.152	0.603
14	1102.09	2726.52	4617586.5	7025742.5	-0.908	0.448	1.013
15	1613.48	1758.21	4636861.5	6966342.5	0.133	-1.019	1.028
16	1756.12	1870.16	4646026.5	6971307.5	0.584	0.677	0.894
17	1188.75	656.69	4602136.5	6908817.5	-0.074	-0.152	0.169
18	870.70	759.44	4585261.5	6917697.5	-0.065	-0.243	0.251
19	974.12	620.03	4589626.5	6908907.5	-1.549	0.228	1.566
20	1078.29	637.78	4595716.5	6908862.5	-0.512	0.125	0.528
21	1352.53	948.01	4614226.5	6923547.5	0.135	0.034	0.139
22	1668.09	930.27	4631806.5	6919482.5	0.199	0.59	0.623

X RMS Error = 0.62
Y RMS Error = 0.45
RMSE Total = 0.76

Editor de Transformación (Sub-escena 228/079 de diciembre de 1991)

	X'	Y'
Constante	-57292,93	-132837,94
X	0,017253	0,003024
Y	-0,003028	0,017308

Se procedió a realizar la corrección geométrica de la forma ya descripta mas arriba.

1. Mosaico de imágenes

Para poder considerar en el espacio multitemporal la situación del área a comienzos del verano de 1992 fue necesario crear un mosaico de imágenes con las sub-escenas MSS22879 (25/12/91) y MSS22979 (17/01/92), para contar con el cubrimiento de toda la zona de interés en este estudio. Para este fin fue necesario realizar la lista de archivos de las imágenes de entrada que intervendrían en el proceso con la extensión *.fls, para lograr una imagen de salida con el cubrimiento continuo y uniforme de la zona de estudio. El diagrama de flujo del procedimiento involucrado en esta operación se exhibe en la Figura N° 20, en el cual se muestra en forma sucinta los pasos que se llevan a cabo en esta operación.

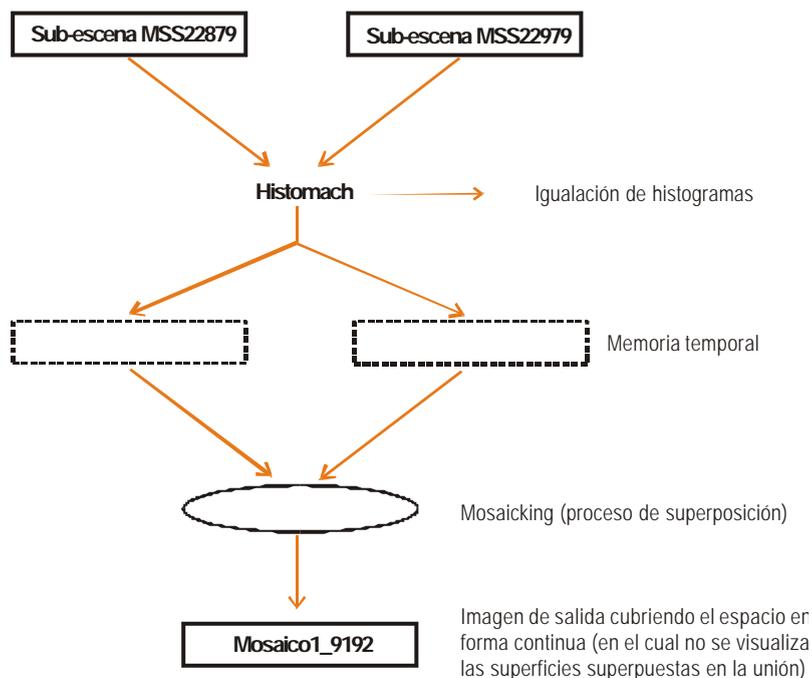


Figura N° 20. Diagrama de flujo del mosaico de las sub-escenas de las imágenes MSS22879 y MSS22979.

A continuación mediante un archivo vectorial del Departamento Moreno se procedió a cortar la imagen MSS24579 y el Mosaico1_9192 de las imágenes MSS en todas las bandas, para ajustarlas a la superficie del citado Departamento, que corresponde al área de estudio.

d. Imagen 1998

Para considerar la situación del área de estudio en el verano de 1999 y realizar el mosaico de imágenes se utilizaron por su calidad las imágenes del satélite LANDSAT 5 TM 228/79 del 26/11/98 y la del mismo satélite de fecha 20/01/99 del recorrido 229/79.

Se procedió como ya se detallara en el caso anterior a cortar en forma visual en el monitor, para ahorrar espacio en el disco la porción occidental de la imagen correspondiente al recorrido 228/079 necesaria para su uso en el mosaico. Luego se desplegó en el monitor la sub-escena sin georreferenciar y se la apareó con la imagen georreferenciada (22879_94geo.img) y se procedió a localizar los GCP en la forma ya descrita. En total se seleccionaron 24 GCP, los cuales intervinieron en la corrección geométrica con un RMSE total = 0,57. En el Cuadro N° 36, se presentan los GCP finales considerados en la georreferenciación, sus filas y columnas, las coordenadas correspondientes a cada uno de ellos, sus residuales en X e Y, y sus respectivos RMSE.

Cuadro N° 36. Puntos finales de control de la georreferenciación de la Sub-escena LANDSAT 5 TM 228/079 de noviembre de 1998

GCP N°	X Fuente	Y Fuente	X Destino	Y Destino	X Residuo	Y Residuo	RMS Error
1	1002.03	4505.58	4586083.3	7024341.1	-0.038	0.179	0.183
2	969.65	5080.96	4586118.1	7041498.8	-0.159	-0.325	0.362
3	1561.48	5586.93	4608236.1	7053417.9	-0.512	0.702	0.869
4	1825.08	561.83	4616282.6	7053354.7	0.256	0.033	0.258
5	2276.18	5634.72	4629627.0	7051100.6	0.015	-0.053	0.056
6	2618.80	5424.24	4638784.7	7043942.4	-0.795	0.172	0.813
7	2531.70	5611.60	4637080.7	7049099.2	0.617	0.270	0.674
8	3153.14	5164.93	4653106.6	7032675.6	-0.172	0.079	0.189
9	3052.55	4836.96	4648431.2	7023488.1	0.055	-0.422	0.425
10	2864.82	4134.25	4639214.0	7003693.5	-0.345	-0.478	0.589
11	2939.20	2872.29	4634873.0	6965999.7	0.480	-0.735	0.877
12	3008.76	2416.95	4634560.8	6952203.7	0.329	-0.025	0.330
13	2844.01	1934.06	4627164.8	6938809.1	-0.249	0.651	0.697
14	3023.21	1320.52	4629275.8	6919735.5	-0.063	0.281	0.288
15	2439.73	1286.99	4611841.2	6921757.3	-0.300	-0.155	0.337
16	2163.22	1011.24	4602241.2	6915022.8	0.118	-0.701	0.710
17	2196.17	805.25	4602144.6	6908801.2	-0.081	0.521	0.527
18	1038.26	1833.09	4573274.0	6945171.9	0.559	0.356	0.663
19	734.96	2496.15	4567721.4	6966341.7	-0.554	0.203	0.590
20	701.24	2940.31	4569037.1	6979617.4	-0.315	-0.635	0.709
21	1115.72	3439.39	4583918.4	6992224.1	0.676	-0.286	0.734
22	2099.24	4738.93	4619753.9	7025547.1	0.551	0.170	0.577
23	2242.61	1769.69	4608522.3	6937062.3	-0.437	0.405	0.596
24	1748.34	2957.65	4600107.9	6974711.5	0.364	-0.208	0.419

X RMS Error = 0.40

Y RMS Error = 0.40

RMSE Total = 0.57

Editor de transformación (de la Sub-escena LANDSAT 5 TM 228/079 de noviembre de 1998)

	X'	Y'
Constante	- 108914.236063	- 252447.937943
X	0.032811	0.005755
Y	- 0.005774	0.032823

Se procedió a realizar la corrección geométrica de la forma ya citada mas arriba, pero en este caso en el remuestreo en la opción de tamaño de celda (pixel) de salida se indicó 50 m x 50 m, para que las bases de datos de todas las imágenes (multitemporales) sean comparables.

e. Imagen 1999

A continuación se procedió a realizar un corte de la imagen TM 229/79 correspondiente al mes de enero de 1999 de la superficie necesaria y al archivo de la sub-escena se lo denominó Sub22979_99_345.img. A fin de georreferenciar la sub-escena se procedió a exhibirla apareada en el monitor con la imagen georreferenciada del LANDSAT 5 TM 229-79-97geo.img y a seleccionar los GCP de la forma ya mencionada. Después de desechar los GCP que contribuían con un RMSE demasiado alto en la corrección geométrica intervinieron 17 GCP con RMSE total = 0,53. En el Cuadro N° 37, se presentan los GCP finales considerados en la georreferenciación, sus filas y columnas, las coordenadas correspondientes a cada uno de ellos, sus residuales en X e Y, y sus respectivos RMSE.

Cuadro N° 37. Puntos finales de control de la georreferenciación de la Sub-escena LANDSAT 5 TM 229/079 de enero de 1999

GCP N°	X Fuente	Y Fuente	X Destino	Y Destino	X Residuo	Y Residuo	RMS Error
2	5980.53	3861.51	4578196.2	6982060.4	-0.102	0.275	0.294
5	6079.15	4990.97	4586543.3	7015043.7	-0.184	0.062	0.194
7	6263.22	5712.25	4595459.1	7035529.1	-0.340	0.116	0.360
9	6247.57	5236.09	4592713.8	7021501.7	-0.135	0.327	0.353
17	5812.55	2054.13	4564528.3	6929310.8	-0.189	-0.039	0.193
19	4541.89	1864.64	4525988.8	6929808.1	0.371	-0.507	0.628
26	2798.17	5517.06	4491869.9	7046451.5	-0.296	-0.077	0.306
31	2996.49	4436.54	4492548.0	7013478.6	-0.410	-0.160	0.432
32	2925.11	4216.47	4489377.4	7007304.3	-0.354	-0.077	0.362
33	2835.74	3466.58	4483119.8	6985530.1	-0.606	0.331	0.691
37	2741.35	2665.59	4476503.0	6962251.4	0.376	0.440	0.579
38	2860.78	2103.50	4477318.9	6945020.7	-0.293	0.314	0.429
41	2850.14	1457.04	4473898.2	6925918.6	-0.233	0.345	0.416
43	3555.73	1598.55	4495500.2	6926682.1	0.522	-0.419	0.669
44	4218.23	3793.80	4525665.2	6988531.0	0.089	-0.466	0.475
45	4114.45	4964.32	4528243.4	7023708.6	0.975	-0.460	1.079
46	3903.96	5751.30	4525787.5	7048055.7	0.371	-0.507	0.628

X RMS Error = 0.44

Y RMS Error = 0.31

RMSE Total = 0.53

Editor de transformación (de la Sub-escena LANDSAT 5 TM 229/79 de fecha 20/01/99)

	X'	Y'
Constante	- 107332.008230	- 250232.026265
X	0.032887	0.005353
Y	-0.005335	0.032882

Se hizo la corrección geométrica siguiendo el procedimiento ya descrito anteriormente, pero en este caso en el remuestreo igual que en el caso de la sub-escena 228/79 del mes de noviembre de 1998 en la opción de tamaño de celda (pixel) de salida se indicó 50 m x 50 m para que las bases de datos de todas las imágenes (multitemporales) sean comparables.

2. Mosaico de imágenes

A continuación se procedió a crear un mosaico de imágenes para cubrir toda el área de estudio de la manera ya indicada en el diagrama de flujo presentado en la Figura N° 20. Al mosaico de imágenes obtenido mediante un archivo vectorial del Departamento Moreno se le hizo un corte en todas las bandas para ajustarla a la superficie del área de estudio.

3. Edición de mapa de uso agropecuario

En primer lugar se debe abrir el archivo raster del Departamento Moreno_blanco.img y se lo renombra Moreno_agrop75.img, realizada esta operación se procede a abrir el archivo Moreno75_agropec.aoi, y se selecciona el comando Raster Editor y se activa el ADI (área de interés) e indicamos en la ventana que se despliega el nombre del archivo raster de salida, que se lo identificó con Moreno_agrop75.img. En esta ventana se indica que se trata de tema y en el tipo de opción marcamos constante, al hacer esta operación se activa en la ventana un cuadro que permite asignarle un valor a la constante, en nuestro caso se le dio el valor 2, completada la ventana de Raster Edit, se escoge el comando Apply.

B. Clasificación de las imágenes

En este estudio se utilizó una clasificación híbrida (supervisada y rígida). La clasificación rígida se usó en los campos con actividad agropecuaria, mediante la digitalización de polígonos en el monitor por su geometría, matiz y textura. Con los polígonos digitalizados que se los denomina ADI agropecuarios se crea un archivo vectorial, que luego se utiliza para crear una máscara (imagen booleana) que permite clasificar las partes de la imagen que posee otro tipo de cobertura.

La clasificación supervisada recibe esta denominación por que requiere un cierto conocimiento previo de las clases informacionales, y la localización en el terreno de las parcelas

de pruebas de firmas espectrales, de las cuales el programa utilizado extraerá las firmas espectrales de cada uno de las clases temáticas seleccionadas.

Creación de la máscara

Con el módulo Spatial Modeler, de ERDAS-Imagine, mediante el proceso que se indica a continuación:

En el módulo se escoge la opción Model Maker, que abre una ventana que permite ingresar un New Model, mediante las herramientas correspondientes, en nuestro caso lo que se hizo fue realizar la operación de multiplicar los archivos Moreno75-agrop.img * Moreno75.img, que dio como resultado el archivo Moreno75-masked.img. El archivo Moreno75-masked.img, contiene las superficies destinadas a fines agropecuarios con valor de ND = 0, y al desplegarse la imagen de este archivo dichas superficies se visualizan en el monitor de color negro. Al poseer las superficies agropecuarias valor = 0, no intervienen en la clasificación y de esta forma se evita el problema a que hicimos referencia en el capítulo 3, de las interferencias que producían los cultivos en esas superficies en distintas etapas de su ciclo vegetativo

Divergencia Transformada (TD)

Este estadístico se trata en esencia de lo siguiente: Es una medición estadística de la distancia entre dos o más firmas. La divergencia se calcula mediante la combinación de las bandas que serán usadas en la clasificación y permite desechar las bandas que no son útiles a la clasificación o las firmas mal seleccionadas. Las fórmulas utilizadas para calcular la divergencia están relacionadas con la regla de la clasificación de máxima verosimilitud. Estas fórmulas toman en consideración la covariancia de las firmas en las bandas que son sometidas a la comparación, y también el vector medio de las firmas. Las fórmulas que intervienen en la determinación de TD son las siguientes:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr} ((C_i - C_j) (C_i^{-1} - C_j^{-1})) + \frac{1}{2} \text{tr} ((C_i^{-1} - C_j^{-1}) (\mu_i - \mu_j) (\mu_i - \mu_j)^T),$$

$$Td_{ij} = 2 (1 - \exp (- D_{ij} / 8))$$

Donde:

D_{ij} indica la medida de divergencia entre las firmas i y j ,

i y j son las dos firmas (clases) que son comparadas,

C_i y C_j son las matrices de varianza-covarianza de las firmas i y j ,

μ_i y μ_j es el vector medio de las firmas y ,

tr es la traza o suma de los elementos de la diagonal de la matriz indicada (álgebra matriz),

T es la función de transposición.

Para aplicar este estadístico se debe seleccionar en Signature Editor → Evaluate → Separability, realizada esta operación se abre una ventana de diálogo que indica las bandas que se analizarán en la escena (en nuestro caso son 4 bandas, que definirán cuales son la mejores para ser utilizadas en la clasificación). Se marcan en la ventana las opciones Transformed Divergence, Best Average y Best Minimum. Se ordena la ejecución y se obtiene como resultado un listado que muestra las mejores bandas y los valores de la mínima y la máxima separabilidad entre las clases.

Eliminación de la máscara y recodificación

La imagen clasificada se la visualiza ordenando el despliegue de la imagen contenida en el archivo Moreno75-clasif-super01.img, como en esta imagen las superficies con uso agropecuario no han intervenido en la clasificación dado que le habíamos asignado un valor de $ND = 0$, para poder clasificar esas superficies se debe eliminar la máscara. Para ese propósito se hace lo siguiente: Sobre la imagen desplegada con el archivo Moreno75-clasif-super01.img se despliega el archivo Moreno75-agrop.aoi, que contiene los polígonos de las superficies ocupadas con fines agropecuarios; a continuación se activa el AOI, Tools y Commands y luego en la opción Raster → Raster Editor, ordenada esta sentencia se abre una ventana de dialogo en la cual en las opciones de la misma marcamos constantes y le damos un valor apropiado y distintos a lo de los temas ya clasificados, en nuestro caso se le dio el valor 5; para que este valor sea asignado a las superficies de uso agropecuario con la herramienta correspondiente se van marcando por partes las superficies, siguiendo una secuencia en la imagen y ordenando su ejecución hasta cubrir toda la superficie. Previo al cierre de la ventana, se marca en la misma la opción que al cerrarse ejecute los estadísticos correspondientes. Luego para dar los colores deseados a las clases

temáticas y ordenarlas por orden jerárquico y asignarle en base a ello el valor con el cual se identificará la clase (tema) y también reagrupar clases temáticas según el criterio del analista, se activa el módulo Image Interpreter → Recode, cuando se realiza esta sentencia se abre una ventana de dialogo en la cual hay que indicar el nombre del archivo de ingreso (Moreno75-clasif-super01.img) y el nombre que se le quiere asignar al archivo de salida, que se lo denominó Moreno75-clasif-final.img, se escoge la opción Setup Recode y se abre una ventana que permite recodificar los temas (agrupar temas, asignar colores, otorgar nombres a las clases, adicionar el valor de las áreas de la imagen en la unidad deseada, etc.).

Régimen legal sobre desmontes

Decreto-Acuerdo Serie “B” 2340/80 y Decreto-Acuerdo Serie “B” 5670/80 del Gobierno de la Provincia de Santiago del Estero. El Decreto-Acuerdo Serie “B” 5670/80 dice en el Artículo 1º) “**Establécese** que al realizarse Trabajos de Desmonte en zonas de secano deberán dejarse franjas de monte natural no menor de **Cincuenta (50) Metros** de ancho cada **Trescientos (300) Metros** de superficie desmontada en sentido perpendicular de los vientos dominantes y/o dañinos de la región”. Las franjas de monte natural a que hace referencia el Decreto esta compuesta de especies arbóreas y arbustivas de distinto porte que se la puede asimilar a una cortina forestal densa en su comportamiento, como reductora de la velocidad de los vientos.