Biblioteca Digital
F C E N - U B A

BIBLIOTECA CENTRAL LUIS F LELOIR
BIBLIOTECA CENTRAL LELOIR
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES UBA

Tesis de Posgrado

Variabilidad interanual de la precipitación en la Pradera Pampeana y su relación con algunos índices de circulación atmosférica

Scian, Beatriz Viviana

1999

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:
Scian, Beatriz Viviana. (1999). Variabilidad interanual de la precipitación en la Pradera Pampeana y su relación con algunos índices de circulación atmosférica. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3215_Scian.pdf

Cita tipo Chicago:
Scian, Beatriz Viviana. "Variabilidad interanual de la precipitación en la Pradera Pampeana y su relación con algunos índices de circulación atmosférica". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1999.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3215_Scian.pdf

EXACTAS UBA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

UBA
Universidad de Buenos Aires

Dirección: Biblioteca Central Dr. Luis F. Leloir, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA - Tel. (++54 +11) 4789-9293

Contacto: digital@bl.fcen.uba.ar

VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACION EN LA PRADERA PAMPEANA Y SU RELACION CON ALGUNOS INDICES DE CIRCULACION ATMOSFERICA

Beatriz Viviana Scian

Tesis Doctoral para optar al grado de

Doctor de la Universidad de Buenos Aires
Area: Ciencias Atmosféricas

Director: Dr. Vicente R. Barros

Universidad de Buenos Aires
1999

A Guillermo, Gustavo y Gabriela.

A mis hermanas, Lydia y Alicia.

A la memoria de mis padres, Lydia y Pedro.

AGRADECIMIENTOS

- Al Dr. Vicente R. Barros por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo bajo su dirección, por sus conocimientos científicos y su libertad de criterio.
- A la Profesora Margarita Donnari del Dpto. de Agronomía de la UNS, por su colaboración desinteresada, sentido crítico y apoyo durante la realización de este trabajo.
- A la Dra. Inés Velasco por el estímulo y amistad brindados en numerosas oportunidades.
- A la Dra. María Luz Duarte por sus valiosos comentarios sobre algunos enfoques de esta investigación.
- Al Dr. Gustavo Orioli, del Dpto. de Agronomía de la UNS, porque sin saberlo, aportó la herramienta elemental para este trabajo, el sistema de computación personal.
- A la Dra. Nélida Winzer y al Lic. Ricardo Camina del Dpto. de Matemáticas de la UNS, por sus esclarecedoras charlas sobre métodos estadísticos.
- A mi familia en Buenos Aires.

Este trabajo de investigación fue llevado a cabo en dependencias del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional de Sur, Bahía Blanca, donde la tesista tiene su lugar de trabajo como miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

INDICE

RESUMEN 1

ABSTRACT 3

1. INTRODUCCION 5

2. ANTECEDENTES 7
   2.1 Variabilidad de la precipitación en la región, extremos hídricos, sequías 7
   2.2 Fenómeno ENSO, relación con anomalías de precipitación. El ENSO como predictor 9

3. MATERIALES Y METODOS 17
   3.1 Datos y Aspectos climáticos 17
   3.1.1 Datos 17
   3.1.2 Aspectos climáticos 19
   3.2 Metodología 20
   3.2.1 Normalización y estandarización de la precipitación 20
   3.2.2 Regionalización según el método de Clusters 22
   3.2.3 El SOI y sus fases 23
   3.2.4 Correlaciones 24
   3.2.5 Test estadísticos 25

4. INDICES HIDRICOS 29
   4.1 Porcentaje de Precipitación, Método de Deciles, Indice de Anomalía de Humedad, Indice de Sequía de Palmer e Indice de Precipitación Estandarizado 29
   4.2 Comparación de índices 31
   4.3 Aplicación del Indice de Precipitación Estandarizado 36
   4.4 Comentarios sobre los resultados 38

5. EPISODIOS ENSO EN LA PRADERA PAMPEANA 47
   5.1 Asociando el IPE mediante Clusters 47
   5.2. Eventos ENSO cálidos (WE) y fríos (CE) 50
   5.2.1 WE 50
   5.2.2 CE 51
   5.3 Evolución en las anomalías de lluvia 52
   5.3.1 Anomalías de lluvia según WE y CE 52
   5.3.2 Cambios en el siglo 53
   5.4 Correlaciones del IPE con el SOI y la SST3 54
   5.5 Comentarios sobre los resultados 56

6. FASES DEL SOI Y SU RELACION CON LAS ANOMALIAS DE PRECIPITACION 72
   6.1 Análisis mensual de las precipitaciones según las fases 72
   6.2 Estudio del corrimiento de las medianas del IPE 74

6.3 ¿Hay cambios en el SOI que inciden en la lluvia? 77
6.4 Predicción de las anomalías de precipitación 79
6.5 Comentarios sobre los resultados 80

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 96

BIBLIOGRAFIA 101

ANEXO I 108

ANEXO II 111
II. 1 Método de Clusters 111
II. 2 Análisis de la varianza por rangos de Kruskal-Wallis y comparación de medianas 112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficiente de correlación entre la serie del SOI y varias series temporales de Indices definidos según anomalías mensuales de la Temperatura Superficial del Mar, (ver texto). 11
Tabla 2. Estación, ubicación, precipitación anual media (Pam), fecha inicio(I) y fecha de finalización (F) del registro de datos disponibles. 17
Tabla 3. Lista de Episodios Cálidos (WE) y Fríos (CE) de la Oscilación del Sur durante el presente siglo y hasta 1988, según RH96 y K-vL88. Año de inicio con últimos dos dígitos. 19
Tabla 4. Categorías de Sequías (McKee, 1993). 21
Tabla 5. Clasificación de los deciles para períodos húmedos y secos. 29
Tabla 6. Indice Z de Palmer, umbrales y categorización según frecuencias. 30
Tabla 7. Clasificación del ISP para períodos húmedos y secos. 30
Tabla 8. Comparación de Indices Hídricos para algunas localidades de la región durante 1995. Meses con cero lluvia y su impacto en los índices mínimos están subrayados. 31
Tabla 9. Equiparación y agrupación de categorías de sequías y símbolos. 34
Tabla 10. Número de episodios secos (S) y húmedos (H) según la escala (t) en meses para la localidad de Azul y de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, período 1951-1996. 37
Tabla 11. Magnitud del IPE12 y deficiencia de la precipitación acumulada de algunas sequías extremas en Bahía Blanca. 38
Tabla 12. Precipitación anual media (Pam) en mm para dos períodos de información, su variación (DP) y cantidad acumulada promedio por estación del año, para las tres subregiones. 49
Tabla 13. IPE medio por región y por número de eventos cálidos (WE) y fríos (CE). 53

Tabla 14. Matriz de correlación de los valores mensuales del SOI y el IPE. Los valores subrayados son significativos al nivel del 5%. 54
Tabla 15. Matriz de correlación de los valores mensuales de SST3 y el IPE. Los valores subrayados son significativos al nivel del 5%. 55
Tabla 16. Frecuencia relativa (%) de ocurrencia de fases del SOI. 72
Tabla 17. Anomalías de precipitación mensual climática comparadas con la de la fase del SOI (entre paréntesis), expresada en los percentiles 30, 50 y 70 para tres regiones de la llanura pampeana. El signo + ó - delante del mes indica el sentido de los corrimientos de la mediana respecto al valor climático. El asterisco (*) señala rechazo del test K-W. 75
Tabla 18. Valores del IPE de Noviembre en F4 para la región Sudoeste. 77
Tabla 19. Meses y fases del SOI (entre paréntesis) con desplazamientos significativos positivos(+) o negativos (-) de la mediana del IPE. 79
Tabla 20. Medias y medianas de las anomalías de lluvia en la región Sudoeste para los casos de mayor correlación entre las fases del SOI y el IPE. NovJl1 significa: anomalías del IPE de Noviembre con SOI en F1, para Julio. Igual convención para los otros meses en F1 a F5. En negrita: valores significativos. 80
Tabla II. 1. Clasificación de las observaciones por fases del SOI. 113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la anomalía de precipitación en el suelo como parte del sistema hidrológico.(Fuente:Changnon, 1987). 14
Figura 2. Regiones del Océano Pacífico (definidas en el texto) empleadas por Zhang y otros (1997) para determinar las correlaciones entre el índice SST y el SOI, sobre un mapa original de Ropelewski y Halpert (1987). 15
Figura 3. Anomalías de precipitación (mm) y corrimientos de las medianas expresados en percentiles (%) asociadas al SOI en el Sudeste de Sud América: a) y b) período Nov(0)-Feb(+) asociado a un SOI bajo, c) y d) período Jun(0)-Dic(0) asociado a un SOI alto. (Fuente: Ropelewski y Halpert, 1996). 16
Figura 4. Distribución Normal (0,1) y porcentajes del Area (A) para distintos intervalos de la variable x. (Fuente: Feller, 1965). 27
Figura 5. Gráfico representativo de la marcha del índice SST3 y del SOI para un evento cálido o El Niño. F1 a F5 indica el tipo de fase mensual del SOI, según SA92. 28
Figura 6. Subregiones ecológicas trigueras. (Fuente: INTA, 1981). 39
Figura 7. Correlación del IPE(t) con el ISP para Azul. 40
Figura 8. Correlación del IPE(t) con Z para Azul, 1900-1988. 41
Figura 9. Análisis comparativo de la sequía de 1995 para algunas localidades de la región semiárida pampeana. 42

Figura 10.	Distribución del IPE3, Feb 1963, en la región de la pradera pampeana. Categorías según la Tabla 4. Línea de puntos: límite del cultivo.	43
Figura 11.	Idem **Figura 10**, para el IPE12.	44
Figura 12.	ISP medio, para el verano 1962/63.	45
Figura 13.	Serie temporal del IPE calculado para Bahía Blanca usando escalas de 12 y 24 meses, 1860-1995.	46
Figura 14.	Serie temporal del IPE calculado para Azul con escalas de 3 y 12 meses, 1888-1996.	46
Figura 15.	Regiones de la pradera pampeana determinadas por el método de clusters para las anomalías de precipitación mensual y régimen de precipitación por región. Línea de puntos: límite del cultivo.	58
Figura 16.	Región Triguera Argentina, concentración en siembra. (Fuente: INTA, 1981).	59
Figura 17.	Serie de promedios móviles con filtro de 12 meses para el IPE y ajuste por cuadrados mínimos para a) Región Sudoeste, b) Región Norte y c) Región Este.	60
Figura 18.	Anomalías de la precipitación para los meses nov0 a feb+, definidos según RH96, para la región Sudoeste. Los años WE se indican con W.	63
Figura 19.	Idem **Figura 18**, para la región Norte.	64
Figura 20.	Idem **Figura 18**, para la región Este.	65
Figura 21.	Anomalías de la precipitación para los meses de jun0 a dic0, definidos según RH96, para la región Sudoeste. Los años CE se indican con C.	66
Figura 22.	Idem **Figura 21**, para la región Norte.	67
Figura 23.	Idem **Figura 21**, para la región Este.	68
Figura 24.	Evolución de las anomalías de precipitación estandarizada por trimestres desde la instalación de un evento Niño-Niña, MAM(0), hasta OND del año +1 y para los años no-ENSO, en la región Sudoeste.	69
Figura 25.	Idem **Figura 24**, para la región Norte.	70
Figura 26.	Idem **Figura 24**, para la región Este.	71
Figura 27.	Indice de Precipitación Estandarizado (IPE) para la Región Sudoeste.	83
Figura 28.	Distribución del IPE para casos del SOI en F1 en la Región Sudoeste.	83
Figura 29.	Idem **Figura 28** para F2.	84
Figura 30.	Idem **Figura 28** para F3.	84
Figura 31.	Idem **Figura 28** para F4.	85
Figura 32.	Idem **Figura 28** para F5.	85
Figura 33.	Distribución mensual del IPE para la Región Norte.	86
Figura 34.	Distribución del IPE para los casos del SOI en F1 en la Región Norte.	86
Figura 35.	Idem **Figura 34** para la F2.	87
Figura 36.	Idem **Figura 34** para la F3.	87
Figura 37.	Idem **Figura 34** para la F4.	88
Figura 38.	Idem **Figura 34** para la F5.	88
Figura 39.	Distribución mensual climática del IPE para la Región Este.	89

Figura 40.	Distribución del IPE para los casos del SOI en F1, en la Región Este.	89
Figura 41.	Idem **Figura 40** para la F2.	90
Figura 42.	Idem **Figura 40** para la F3.	90
Figura 43.	Idem **Figura 40** para la F4.	91
Figura 44.	Idem **Figura 40** para la F5.	91
Figura 45.	Meses con anomalías de la precipitación significativas (*) asociadas a las fases del SOI, entre paréntesis. Recuadro superior: condiciones según RH96.	92
Figura 46.	Ciclo del SOI y F4 en Noviembre para los años Niño a) 1918, b) 1969 y c) 1976.	93
Figura 47.	Anomalías de la precipitación de Noviembre según las fases del SOI en el mes de Julio.	94
Figura 48.	Anomalías de la precipitación de Noviembre según las fases del SOI en el mes de Agosto.	94
Figura 49.	Anomalías de la precipitación de Diciembre según las fases del SOI en el mes de Julio.	95
Figura 50.	Anomalías de la precipitación de Diciembre según las fases del SOI en el mes de Agosto.	95
Figura II.1	Gráfico de cajas comparando la distribución de las anomalías de precipitación según las fases del SOI, para la región Sudoeste en Enero.	115
Figura II.2.	Idem **Figura II.1**, Febrero.	115
Figura II.3.	Idem **Figura II.1**, Marzo.	116
Figura II.4.	Idem **Figura II.1**, Abril.	116
Figura II.5.	Idem **Figura II.1**, Mayo.	117
Figura II.6.	Idem **Figura II.1**, Junio.	117
Figura II.7.	Idem **Figura II.1**, Julio.	118
Figura II.8.	Idem **Figura II.1**, Agosto.	118
Figura II.9.	Idem **Figura II.1**, Setiembre.	119
Figura II.10.	Idem **Figura II.1**, Octubre.	119
Figura II.11.	Idem **Figura II.1**, Noviembre.	120
Figura II.12.	Idem **Figura II.1**, Diciembre.	120
Figura II.13.	Gráfico de cajas comparando la distribución de precipitación según las fases del SOI, para la región Norte en Enero.	121
Figura II.14.	Idem **Figura II.13**, Febrero.	121
Figura II.15.	Idem **Figura II.13**, Marzo.	122
Figura II.16.	Idem **Figura II.13**, Abril.	122
Figura II.17.	Idem **Figura II.13**, Mayo.	123
Figura II.18.	Idem **Figura II.13**, Junio.	123
Figura II.19.	Idem **Figura II.13**, Julio.	124
Figura II.20.	Idem **Figura II.13**, Agosto.	124
Figura II.21.	Idem **Figura II.13**, Setiembre.	125
Figura II.22.	Idem **Figura II.13**, Octubre.	125
Figura II.23.	Idem **Figura II.13**, Noviembre	126
Figura II.24.	Idem **Figura II.13**, Diciembre.	126
Figura II.25.	Gráfico de cajas comparando la distribución de precipitación según las fases del SOI, para la región Este en Enero.	127

Figura II.26. Idem **Figura II. 25**, Febrero. 127
Figura II.27. Idem **Figura II. 25**, Marzo. 128
Figura II.28. Idem **Figura II. 25**, Abril. 128
Figura II.29. Idem **Figura II. 25**, Mayo. 129
Figura II.30. Idem **Figura II. 25**, Junio. 129
Figura II.31. Idem **Figura II. 25**, Julio. 130
Figura II.32. Idem **Figura II. 25**, Agosto. 130
Figura II.33. Idem **Figura II. 25**, Setiembre. 131
Figura II.34. Idem **Figura II. 25**, Octubre. 131
Figura II.35. Idem **Figura II. 25**, Noviembre. 132
Figura II.36. Idem **Figura II. 25**, Diciembre. 132

VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA PRECIPITACION EN LA PRADERA PAMPEANA Y SU RELACION CON ALGUNOS INDICES DE CIRCULACION ATMOSFERICA

Beatriz Viviana Scian

RESUMEN

En este trabajo de investigación se amplian los conocimientos de las relaciones entre los incrementos o deficiencias de las lluvias observadas en la pradera pampeana y las anomalías en la circulación de la atmósfera a través de algunos índices hemisféricos, en particular, el Indice de Oscilación del Sur (SOI) y las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial (SST3).

Los datos utilizados son las lluvias mensuales de más de 40 localidades de la llanura pampeana con una longitud de registros desde comienzos de siglo hasta al menos la década del '80. Se hace una comparación de índices hídricos que acordes a la finalidades de sus concepciones: agronómica, climática, hidrológica, están mejor detallados en algunos rangos de valores extremos, que en otros. A fin de estudiar dichos extremos, sobre todo las sequías, se hace evidente los beneficios del Indice de Precipitación Estandarizada y normalizada, IPE, a escala mensual. Demuestra ser un buen indicador de sequías y episodios húmedos en la región, no sólo por su escala temporal variable sino por su mejor definición en rangos de bajos porcentajes de frecuencia.

Empleando métodos estadísticos de clusters se circunscribe la zona de estudio a tres subregiones de la pampa central de Argentina: Sudoeste, Norte y Este, respectivamente. Los coeficientes de correlación del IPE para los meses estivales (Nov-Dic-Ene) con el SOI mensual muestran valores significativos al nivel del 5%, desde Junio a Agosto alcanzando un valor de -0.56 entre el SOI de Agosto y el IPE de Diciembre. El signo indica que una alteración en la posición del Anticiclón del Pacífico, que origina SOI negativos/positivos, producirá anomalías positivas/negativas en la precipitación de los meses de Noviembre y Diciembre cuando esta fase negativa/positiva del SOI se anticipa a partir del mes de Junio. Las correlaciones entre el IPE mensual y la serie de temperatura superficial del mar en la región Niño3 (SST3), a partir de 1949, son positivas y con valores máximos en las regiones Este y Norte; observándose valores de los coeficientes de hasta 0.58 entre la SST3 de Julio con el

IPE de Diciembre y la SST3 de Octubre con el IPE de Noviembre, respectivamente. En la región Sudoeste sólo alcanza el 0.38 entre la SST3 de Octubre con el IPE de Noviembre. Este resultado sugeriría una mayor influencia del SOI que la SST3 sobre las lluvias en el sudoeste pampeano. Las anomalías de la precipitación para los episodios cálidos o fríos definidos por Ropelewski y Halpert (1996) tienen sus extremos al fin de la primavera y comienzos del verano. Los desfasajes en el comportamiento de las dos curvas se producen entre Noviembre y Diciembre, este último es el mes extremo húmedo. Existe un segundo pico, más débil entre 4 a 7 meses más tarde.

Se analizan las anomalías del IPE mensual con las cinco fases del SOI establecidas por Stone y Auliciems (1992). En general, resulta en la región de estudio que la fase 2 y la fase 4 están asociadas a corrimientos negativos en la precipitación mediana, deficiencias de lluvia. Por otra parte, las fase 1 y 3 coinciden en relacionarse con desplazamientos positivos de las medianas de lluvia. Sin embargo, pueden darse situaciones con perturbaciones dentro de un ciclo positivo o negativo del SOI que verifican lo opuesto. De la inspección de los corrimientos medianos para la primera mitad del período de estudio, 1900-1940, y para la segunda, 1941-1988, se nota en toda la región la influencia positiva del mes de Marzo en fase 4 durante el último período pero no se encuentra notorio aumento (como era de esperar por las tendencias positivas de la lluvia en las últimas décadas) en los meses estivales, ni en fase 1 ni en fase 3, con respecto al primer período. Se obtuvieron buenos resultados al analizar los corrimientos significativos en las medianas de la precipitación de los meses de Noviembre y Diciembre ya que pueden anticiparse a partir de las condiciones del SOI (fases) desde el mes de Julio. Se considera a Agosto como el mejor mes predictor, con cuatro fases significativas, ya que las fases 1 y 3 del SOI provocarían anomalías positivas y fases 2 y 4 anomalías negativas para el mes de Diciembre, en la región Sudoeste.

Palabras clave: Anomalías de precipitación. SOI. SST3. Indice de Precipitación Estandarizado. Clusters. Correlaciones. Episodio cálido. Episodio frío. Fases del SOI. Pradera pampeana.

INTERANNUAL VARIABILITY OF RAINFALL AND ITS RELATIONSHIP WITH SOME GLOBAL CIRCULATION INDEXES FOR THE PAMPEAN PRAIRIE

Beatriz Viviana Scian

ABSTRACT

In this study the relationship between anomalies in the pampean prairie precipitation and the anomalous behaviour of the atmospheric circulation, particularly focused on the Southern Oscilation Index (SOI) and the sea surface temperature anomalies in the equatorial Pacific (SST3) is examined. Data consist of secular monthly precipitation for more than 40 selected stations over the pampean plains. A comparison between different precipitation indexes based on agricultural, climatic and hydrological concepts is performed. In analyzing extreme events, such as drought, the Standarized Precipitation Index (SPI) or IPE in spanish, shows adequacy at a variable time scale. It has shown good properties when monitoring drought or wet episodes in the region, particularly, when classifying extreme conditions.

Three coherent subregions in the central pampas of Argentina, Southwest, North and East, respectively were determined by clustering methods. The results indicate that precipitation over the whole region is significantly influenced by the SO phenomenon. A leading SOI correlated with the summer (Nov-Dec-Jan) anomalous rainfall shows significant coefficients, at 5% significance level, from June to August (peak values of -0.56, for August SOI-December IPE). A negative sign implies an anomalous position of the Pacific High that gives rise to negative SOI starting from June onwards, which in turn would produce positive anomalies in November and December precipitation. A positive SOI phase for the same two months, would be related to negative rainfall anomalies. Correlations were performed too, between monthly SPI values and the sea surface temperature of the Equatorial Pacific Niño3, SST3. From the latter, possitive and maximun coefficients result for the East and North regions, with values of 0.58 for each of July SST3 -December IPE and October SST3 - November IPE, respectively. The Southwest portion reaches only a coefficient of 0.38 for October SST3 - November IPE, suggesting a stronger SOI impact on the southwest prairies rainfall compare to that of the SST3. Anomalous precipitation for warm and cold events as defined by Ropelewski and Halpert (1996) have extreme values for

spring and early summer. Maximum out of phase values between the two cases is reached in November and December, being the latter the extreme wet. A second and weaker peak occurs 4 to 7 months later.

In order to clarify this behaviour SPI anomalies are analized through the SOI five phases established by Stone and Auliciems (1992). Results from the region evidence that: phases 2 and 4 are related to a negative shift in the median precipitation (rainfall deficit), while phases 1 and 3 are associated with a positive shift in median precipitation. Nevertheless, small perturbations during a positive or negative SOI cycle may produce opposite results. A significatively positive shift during March in phase 4 was observed in the period from 1941-1988, when an increase in summer rainfall during phase 1 and phase 3 had been expected as a consecuence of the high positive precipitation trends of the last decades in the region.

Significative median rainfall shifts (α=0.05) for November and December are able to be forecasted from SOI conditions starting on July phases. August is the best predictor SOI month for December rainfall anomalies in the Southwest region. It shows four significative phases, 2 and 4 producing negative IPE shifts, and 1 and 3 positive ones.

Key words: Precipitation anomalies. SOI. SST3. Standarized Precipitation Index. Clusters. Correlations. Warm event. Cold event. SOI phases. Pampean prairie.

1. INTRODUCCION

El territorio argentino se caracteriza por poseer un 70% de su superficie bajo condiciones de clima árido y semi-árido, del 30% restante casi la mitad le corresponde a la pradera pampeana. Esta es una región fitogeográfica que abarca las provincias de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sur de Córdoba y este de La Pampa. Es una región fundamental para la economía argentina y la responsable de la mayor producción agropecuaria del país. Para la agricultura de secano, la ocurrencia de situaciones climáticas anómalas es sin duda un factor de riesgo importante, principalmente por cambios inusuales tanto en la temperatura del aire como en la precipitación, en mayor grado esta última por ser la lluvia un elemento de gran variabilidad interanual. La región pampeana tiene la particularidad de soportar sequías e inundaciones que según su intensidad, duración y la escala espacio-temporal repercuten en mayor o menor medida en la economía del país.

Numerosos estudios realizados en el exterior y en el país analizan las posibles vinculaciones entre las anomalías hídricas y procesos atmosféricos en escala regional o hemisférica. Generalmente, se las relaciona con alteraciones en la circulación superficial, fluctuaciones en las posiciones de los sistemas semi-permanentes de alta presión, anomalías en las temperaturas de la superficie del mar y con una variedad de indicadores atmosféricos regionales o hemisféricos en escalas anuales, estacionales o mensuales.

Aunque hace ya tiempo que se conoce la existencia de una relación entre las lluvias estivales y los episodios El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) en el sur de Sud América, se ha considerado que un enfoque en forma de análisis localizado y para cada mes del año, según las distintas variaciones del SOI en su ciclo de vida, esclarecería los alcances de este fenómeno de gran escala a una región de gran importancia económica como es la región pampeana. Por tal motivo, se ha limitado el área de estudio al centro de Argentina. Asimismo, permitiría ampliar el conocimiento sobre la incidencia del ENSO en el sudeste de Sud América que fuera estudiada por Ropelewski y Halpert (1996), RH96.

En un estudio sobre las relaciones entre el SOI y las precipitaciones en el este de Australia desarrollado por Stone y Auliciems (1992), SA92, se emplea el análisis de clusters aplicado a la serie de los valores mensuales del SOI para determinar

categorías o fases de su ciclo. Los autores determinan 5 fases:

Fase 1: SOI extremo negativo

Fase 2: SOI extremo positivo

Fase 3: SOI en rápido descenso

Fase 4: SOI en rápido ascenso

Fase 5: SOI con valores cercanos a cero y poco cambio con el mes anterior.

Los dos trabajos mencionados fueron los motores de esta investigación ya que suscitaron los cuestionamientos que se proponen analizar.

El orden que se sigue en esta presentación, previo al estudio de las correlaciones entre anomalías de precipitación y la circulación atmosférica de gran escala es proceder a analizar las anomalías de la precipitación para la región, en sus distintas escalas temporales y describir los episodios húmedos y secos a través de la aplicación de un índice conocido como Indice de Precipitación Estandarizado (IPE). Luego se aplica un procedimiento estadístico de asociación (Método de Clusters) a fin de determinar subregiones espacialmente coherentes. Se evalúan y comentan brevemente las características del régimen de lluvia de las mismas. En cada subregión se analizan los episodios definidos como evento caliente (WE) y evento frío (CE) o fases caliente y fría del Indice de Oscilación del Sur (SOI). Siguiendo la línea iniciada por SA92 sobre las fases del SOI, se encamina finalmente la investigación hacia el análisis mensual, entre dichas fases y las anomalías de la precipitación media regional. Usando series medias areales de precipitación estandarizada sobre las regiones previamente determinadas por análisis de cluster, se comparan las medianas mensuales climáticas con las correspondientes a las diversas fases del SOI.

Se particulariza sobre dos aspectos que constituyen los objetivos fundamentales:

- - Empleo del índice de precipitación IPE, a escalas variables y su comparación con otros índices hídricos para el estudio de extremos de lluvia y sus bondades para la clasificación y seguimiento de sequías.
- - Estudio de áreas dentro de la pradera pampeana y meses del año para los cuáles los desvíos de la lluvia mensual responden en forma significativa (estadísticamente) a una fase determinada del SOI.

2. ANTECEDENTES

2.1 Variabilidad de la precipitación en la región, extremos hídricos, sequías.

Los estudios sobre la variabilidad de las precipitaciones en la región se remontan a los realizados por Schwerdtfeger y Vasino (1954), Prohaska (1952) y Diaz (1959), entre otros, para la primera mitad del siglo. En los últimos años se reconoce la evidencia de un incremento considerable en la precipitación a partir de la década del 60, no sólo en la región pampeana sino en gran parte del país. Así lo confirman los resultados de Hoffmann y otros (1987) en un análisis en forma decádica y con una base de datos rigurosamente corregida, Vargas (1987), Krepper y otros (1987, 1989), entre otros. Al tratamiento de la problemática localizada a subregiones dentro de la llanura pampeana se le suma el trabajo de Castañeda y Barros (1994), quienes hacen un completo análisis de las tendencias anuales de la precipitación para el sur de Sud América.

Dentro de las formas de estudiar la variabilidad de las series climáticas se consideran dos ópticas: i) a través de la frecuencia de ocurrencia o tiempo de retorno de las condiciones anómalas extremas ocurridas en un período del orden de los 100 años y ii) según las variaciones en el desvío estandard de una variable entre un período predeterminado y el siguiente, (Ratcliffe, 1981). En el análisis de los extremos de precipitación en la región semiárida, Scian y Donnari (1997a) han encontrado los tiempos de retorno de las situaciones anómalas de extremos secos, 20 años y húmedos, 50 años, analizando las series del Indice de Sequía de Palmer, (Palmer, 1965) desde comienzos de siglo. Además de este índice como medida de condiciones extremas de las precipitaciones se emplean otros métodos, entre los que se encuentran el de deciles, percentiles, por ciento de la Normal y una variedad de índices y coeficientes. En Argentina, el Servicio Meteorológico Nacional, (SMN) emplea el Método de los deciles de Gibbs y Maher (1967) que usa los límites de cada 10% (o deciles) de la distribución. Otros trabajos sobre sequías con características regionales son los de Prohaska (1960), Falasca y Forte Lay (1991), Ravelo (1990), Donnari y Scian (1993) que emplean distintos Indices de sequías o anomalías de humedad.

En la región de El Sahel, en Africa y en el Noreste de Brasil se ha usado el Indice de Anomalía Estandarizado (Standardized Anomaly Index) según Katz y Glantz (1986). El Indice de Palmer es de uso rutinario en los EEUU. y aunque presenta varios

puntos débiles, señalados por Alley (1984), es usado climáticamente para representar sequías históricas. Briffa y otros (1994) lo aplican para definir la variabilidad de la humedad en el suelo durante el verano en Europa, donde la finalidad de los autores es comparar la naturaleza real de la variabilidad de la humedad con la derivada de los modelos globales climáticos. Actualmente, uno de los índices que está recibiendo atención tanto por meteorólogos como hidrólogos es el Indice de Precipitación Estandarizado (IPE) presentado por McKee y otros (1993, 1995), o Standarized Precipitation Index (SPI) en inglés en su original y es un indicador de sequías tanto como de períodos húmedos, para escalas temporales múltiples. Requiere sólo una variable de entrada que generalmente, es la precipitación pero puede ser también el caudal de un cauce o el agua subterránea.

En los trabajos donde se emplea la variable precipitación mensual, debido a las características de su distribución suele transformarse previamente de distintas formas. McBride y Nicholls (1983) usan totales trimestrales en cada estación del año para su correlación con el Indice de Oscilación de Sur, pero como no en todas las escalas ni regiones la lluvia se distribuye normalmente, deben transformarla mediante la raíz cúbica. Otros, como Shukla y Mooley (1987) prefieren la Anomalía Normalizada de la precipitación. También se menciona otra técnica empleada en el tratamiento de la precipitación que es a través del análisis por Componentes Principales, donde los datos originales de las series temporales de precipitación pasan a formar parte del conjunto de los autovectores cuyos valores (como anomalías de cada localidad), se expresan en unidades de un desvío standard (Pittock, 1980).

Cuando se analiza el concepto de sequía, sin duda el común denominador es una condición de insuficiencia de humedad causada por un déficit en la precipitación para cierto período de tiempo. Este tiempo determina la escala temporal o período fundamental de integración de la serie de precipitación y es esencial, pues separa diferentes tipos de sequía. Las sequías agrícolas, por ejemplo, tienen una escala temporal típica más corta que las hidrológicas. A medida que una anomalía en la precipitación se adentra en el ciclo hidrológico de superficie su retardo aumenta debido al almacenaje asociado a cada componente y las fluctuaciones se amortiguan. Changnon (1987) presenta en forma esquematizada este retardo y amortiguación (Figura 1). Es decir que para la hidrología, el suelo actúa como un filtro pasa bajo, tanto en el espacio como en el tiempo y el resultado de una sequía meteorológica es

una sequía hidrológica retrasada. Una pregunta que se formula Entekhabi (1995) es cual sería el efecto a la inversa, si la deficiencia regional de humedad en el suelo afectara al forzante atmosférico. Estos mecanismos de retroalimentación producirían las persistencias de los eventos anómalos hasta que las fluctuaciones de las fuerzas externas fueren lo suficientemente grande como para restablecer el estado normal.

En Argentina, Alessandro y Lichtenstein (1996) observan persistencia en las anomalías de la circulación atmosférica durante la sequía del invierno de 1995 en Argentina, principalmente radicada al sur de los 50°S además de una confluencia en 500 mb entre 30° S y 40° S, lo que confirma la subsidencia sobre el centro del país que generó las condiciones de sequía. Otro aporte interesante para puntualizar procesos atmosféricos que actúan en el establecimiento de una situación anómala de precipitación está consignado en el trabajo de Trenberth y Guillemot (1996). En él se discuten los procesos físicos y mecanismos dinámicos relacionados con los eventos extremos de la sequía de 1988 y la inundación de 1993 en el Hemisferio Norte como ser: teleconecciones extratropicales más fuertes en primavera que en verano, una retroalimentación de la humedad en el suelo importante en el verano que es cuando se debilitan los oestes y una redistribución de las trayectorias de las corrientes en chorro.

2.2 Fenómeno ENSO-Relación con las anomalías de precipitación-El ENSO como predictor.

Una detallada explicación y discusión sobre las fluctuaciones en el sistema climático a escala interanual e interdecádica es la que presentan Peixoto y Oort (1992), donde analizan el fenómeno El Niño/ Oscilación del Sur (ENSO) y las teleconecciones regionales. Hay numerosa bibliografía acerca de las teorías sobre la ocurrencia del ENSO así como de modelos numéricos de simulación y predicción del fenómeno (Bjerkness, 1966, 1969; Davis, 1976; Wyrtki, 1975, 1979; Zebiak y Cane, 1987; Philander y otros, 1992; Wang, 1995, Zhang y Levitus, 1997). Los episodios de El Niño son parte del balanceo o ciclo alternado de cambios de las presiones atmosféricas a través del Pacífico llamado Oscilación del Sur. La presión del aire se alterna entre los dos extremos del Pacífico Sur; cuando en un lado hay alta presión el otro presenta baja presión. Esta oscilación se mide mediante la diferencia de la presión media a nivel del mar entre el Pacífico Central, en Tahiti y el norte de

Australia, en Darwin. La diferencia estandarizada es un índice llamado de Oscilación del Sur (SOI), (Troup, 1965) y junto con las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST) en algunas regiones del Pacífico tropical, es un indicador del estado del fenómeno ENSO. Este balanceo fue computado por Julian y Chervin (1978) empleando las presiones mensuales de Puerto Darwin y Santiago de Chile desde 1882 hasta 1973. Según el cálculo de la coherencia cuadrada (estadística) el fenómeno tendría una periodicidad cuyo rango varía entre 87 y 27 meses o sea entre 7.2 y 2.2 años. En ese mismo trabajo los autores encuentran elementos suficientes para considerar la existencia de un acoplamiento atmósfera-océano en la zona, con una escala temporal del orden de los años y una escala espacial de decenas de miles de kilómetros abarcando las regiones tropicales y al menos, parte de las subtropicales.

El Niño era la palabra que originalmente aplicaban los lugareños a una corriente marina cálida y débil que, de tanto en tanto aparece en la época de Navidad en las costas del Perú. Posteriormente, se fue asociando el nombre a un fenómeno mucho más extenso, como es la escala de la cuenca del Pacífico y la escala global. Trenberth (1996, 1997) analiza varias definiciones y recomienda procedimientos objetivos para determinar en forma consistente los períodos de El Niño y su intensidad. Kiladis y van Loon (1988), KvL88, imponen condiciones conjuntas sobre la temperatura superficial del mar (SST) en el Pacífico ecuatorial y sobre el Indice de Oscilación del Sur (SOI) para definir episodios fríos (CE) y cálidos (WE). El índice de la SST representa la anomalía estacional integrada dentro de los ± 4° del Ecuador desde 160° W hasta la costa de Sud América. Sin embargo, Trenberth (1996) propone el empleo de un índice para una región clave en los fenómenos de interacción mar-atmósfera del Pacífico Tropical. Esta región estaría comprendida entre 170° W y 129° W y ±5° del Ecuador, y el índice es llamado SST3.4, pues toma parte de la regiones conocidas como Niño3 (N3) y Niño4 (N4).

Cuando el SOI es negativo (indicando una presión anómala baja sobre Tahiti o anómala alta sobre Darwin), los alisios se debilitan o incluso pueden revertirse y el cinturón de lluvias se desarma. Cuando el SOI es positivo e intenso, los alisios soplan fuertemente a través del Pacífico cargándose de humedad. Esta es la situación en el ENSO. Quinn y otros (1978) demostraron que las fluctuaciones en las tendencias anómalas del SOI representaban fluctuaciones interanuales en los alisios del sudeste y en la fuerza de los vientos del este ecuatoriales. Fue significativa la sugerencia

hecha de que la actividad de El Niño podría encerrar dos o tres estados de desarrollo dentro de un marco total de un ciclo de la Oscilación del Sur. Es decir, en un análisis de la serie del SOI existen fases no solamente ENSO y su opuesto anti-ENSO, sino también "pre-ENSO" y "post-ENSO" y posiblemente "no-ENSO". Quinn prefería usar el término "tipo" de El Niño para precisamente, evitar el hecho de si era o no era un "verdadero El Niño" y usar un sistema de clasificación subjetivo para distinguir los sucesos del tipo El Niño. En forma similar, se puede emplear un sistema objetivo de clasificación (por ejemplo, el análisis por clusters) para definir fases o tipos del SOI y así identificar los varios estadíos de la Oscilación del Sur en su progresión y ciclo de vida. El empleo de fases del SOI permite el agrupamiento de meses (o estaciones) en una tipología.

En un reciente trabajo, Zhang y otros (1997) calculan los coeficientes de correlación de varias series temporales basadas en las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar para distintos dominios sobre el Océano Pacífico con la serie convencional del SOI. Los autores definen las siguientes regiones: a) región del Pacífico tropical, 20° N-20° S; 160° E-80° W, (TP), b) Lengua Fría, 6° N - 6° S; 180° W- 90°W (CT) y c) el Océano Global entre 40° S y 40° N (G). Basándose en datos medios mensuales para el período 1950-1993, obtienen los coeficientes de correlación que se presentan en la Tabla 1, donde se han agregado los valores de Brassington (1997) para la regiones d) El Niño 3 (5° N-5° S; 150° W-90 °W) y e) El Niño 4 (5° N-5° S; 160° E-150° W) durante el período 1951-1995. Estas regiones se muestran en el mapa de la Figura 2.

Tabla 1. Coeficiente de correlación entre la serie del SOI y varias series temporales de Indices definidos según anomalías mensuales de la Temperatura Superficial del Mar, (ver texto).

	a) TP	b) CT	c) G	d) N3	e) N4
- SOI	0.87	0.82	0.84	0.70	0.72

Estos altos coeficientes de correlación indican que la asociación negativa entre las variables es considerable pero deja un porcentaje de varianza sin explicar que oscila entre el 25% y el 50%. El índice denominado Lengua Fría (CT) por Zhang y otros (1997) está mejor correlacionado con la serie del SOI que El Niño 3, definida por Rasmusson y Carpenter (1982).

Las diferencias en las precipitaciones interanuales y su relación con la

Oscilación del Sur han sido tema de investigación desde comienzos de siglo. Para destacar un trabajo básico de los últimos años, en relación con índices hemisféricos se hace mención a Pittock (1980), quien obtuvo correlaciones significativas con los modelos de precipitación anual de las primeras componentes principales en el sur de Sud América, no sólo con el SOI sino con otros tres índices; un Indice Transpolar, la latitud del cinturón de altas presiones sobre la costa de Chile y un Indice para medir la circulación tipo Hardley en el Atlántico tropical. Aceituno (1988) en un detallado estudio que involucra vastas regiones oceánicas, analiza las relaciones bimensuales entre varias variables meteorológicas en Sud América y la Oscilación del Sur en fases altas y bajas. Barros y otros (1996) detectan un modo climático de estructura bipolar sobre Paraguay y el este de Argentina al analizar las correlaciones del autovector 1 de la matriz de correlación de las precipitaciones anuales con las variaciones en el gradiente meridional de temperatura, durante los últimos treinta años. También se deben mencionan los aportes de los trabajos a escala global de Ropelewski y Halpert (1987, 1989) en relación al impacto del SOI sobre las anomalías de lluvia.

En particular, un reciente trabajo de Ropelewski y Halper (1996), RH96, determina empíricamente los corrimientos en la distribución de probabilidades observados en la precipitación, para distintas regiones del globo asociados a los extremos del SOI. En particular, para la región sur de Sud América los autores destacan las regiones con anomalías extremas de precipitación y las proporciones en que éstas se ven afectadas bajo condiciones de bajos valores del SOI ó con altos valores del SOI (ver Figura 3). Pese a la escala de las figuras se puede establecer que en el primer caso, las mayores anomalías de lluvia se observan en una región con centro en aproximadamente, 30° S - 60° W, mientras que el núcleo de las anomalías negativas extremas se desplaza y se expande hacia el este de esta posición.

La intensa investigación desarrollada a nivel mundial sobre el fenómeno ENSO brinda cierta espectativa sobre la posibilidad de la predicción de sequías o de condiciones húmedas anormales con algunos meses de anticipación. Investigadores como Rasmusson y Carpenter (1982), Nicholls (1984) y Lindesay (1988) sostienen este punto de vista. Sin embargo, debido a la complejidad de los procesos atmosféricos responsables de la formación de lluvias y de la variabilidad climática, no siempre la sequía o los extremos húmedos están relacionados con el ENSO. A la inversa muchos episodios ENSO estarían relacionados con sequías, como lo

demuestran Matarira (1990) y Lindesay y Tyson (1994), para algunas regiones de Africa. Nicholls (1993) y Matarira y Unganai (1994) afirman que las precipitaciones en Sud Africa responden a la severidad de las anomalías de la temperatura superficial del mar y de la tendencia del SOI con distintos tiempos de retardo. En Australia, los esquemas de predicción de lluvias a largo plazo en forma operativa están basados en el SOI y se aplican a ciertas regiones del país para guía de los procesos de toma de decisión agrícola. Los valores de probabilidad de la precipitación para las distintas fases del SOI fueron calculados por Stone y Auliciems (1992), SA92, para varios meses y localidades en Australia. De esta forma, con el pronóstico de la fase del SOI puede obtenerse una predicción de valores probables de precipitación para una localidad basados en cantidades similares obtenidas previamente durante esa fase y mes. La mayoría de los nuevos esquemas de pronóstico recaen sustancialmente en la predictabilidad del fenómeno.

Previo al desarrollo de esta investigación se realizó un análisis exploratorio, que no se presenta aquí, pero que resultó sumamente provechoso. Empleando siete localidades de la región pampeana fueron estudiadas las series del IPE a escalas de 3, 6 y 12 meses. Se calcularon las cuatro primeras componentes principales y se correlacionaron los coeficientes temporales con varios índices hemisféricos. Las mayores correlaciones se obtuvieron entre el SOI y la primera componente principal del IPE, aumentando los valores de las correlaciones con la escala temporal del IPE. Las otras correlaciones se hicieron con índices de temperatura meridional (Boden y otros, 1994). Se usaron las anomalías del gradiente de temperatura superficial y del espesor 850/300 hPa, para latitudes subtropicales, medias y polares. Se calcularon para las cuatro estaciones del año y sólo dieron como resultado valores significativos para el caso de Latitudes Medias en otoño, entre Superficie y el Autovector 3, y en verano, entre el Espesor 850/300 y el Autovector 4. En Latitudes Subtropicales sólo en primavera las correlaciones demuestran ser significativas para Superficie con el Autovector 2. Estos resultados ayudaron a definir que índices hemisféricos emplear y se seleccionaron el SOI y la SST3 mientras que para las anomalías de la precipitación se eligió el IPE a escala mensual.

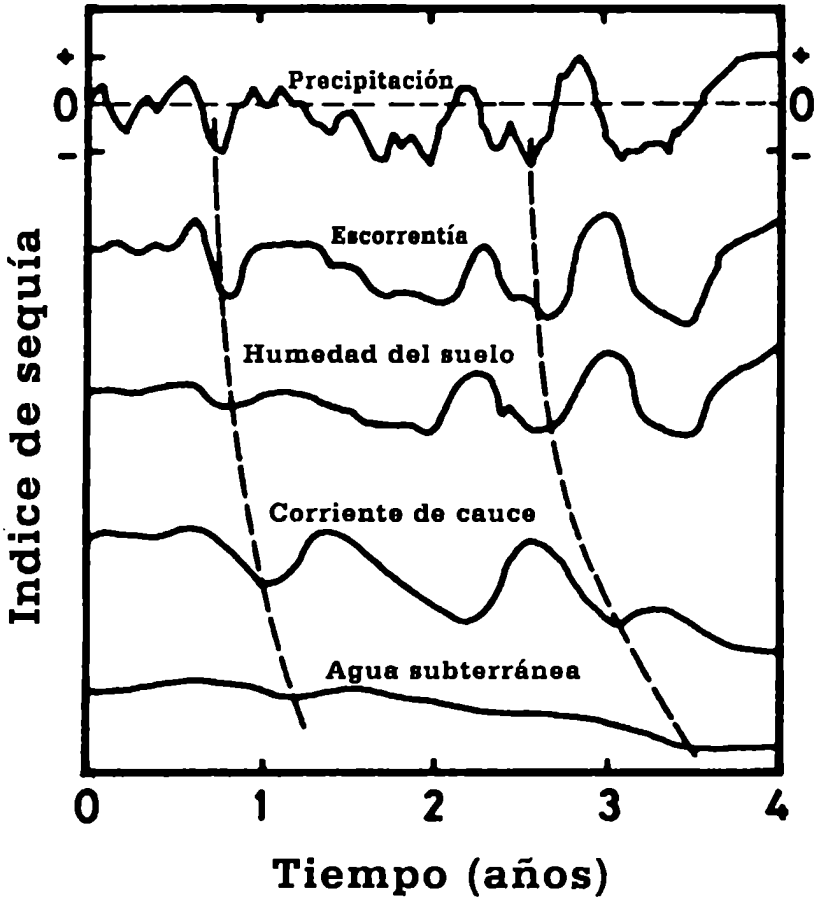

Figura 1. Esquema de la anomalía de precipitación en el suelo como parte del sistema hidrológico. (Fuente: Changnon, 1987)

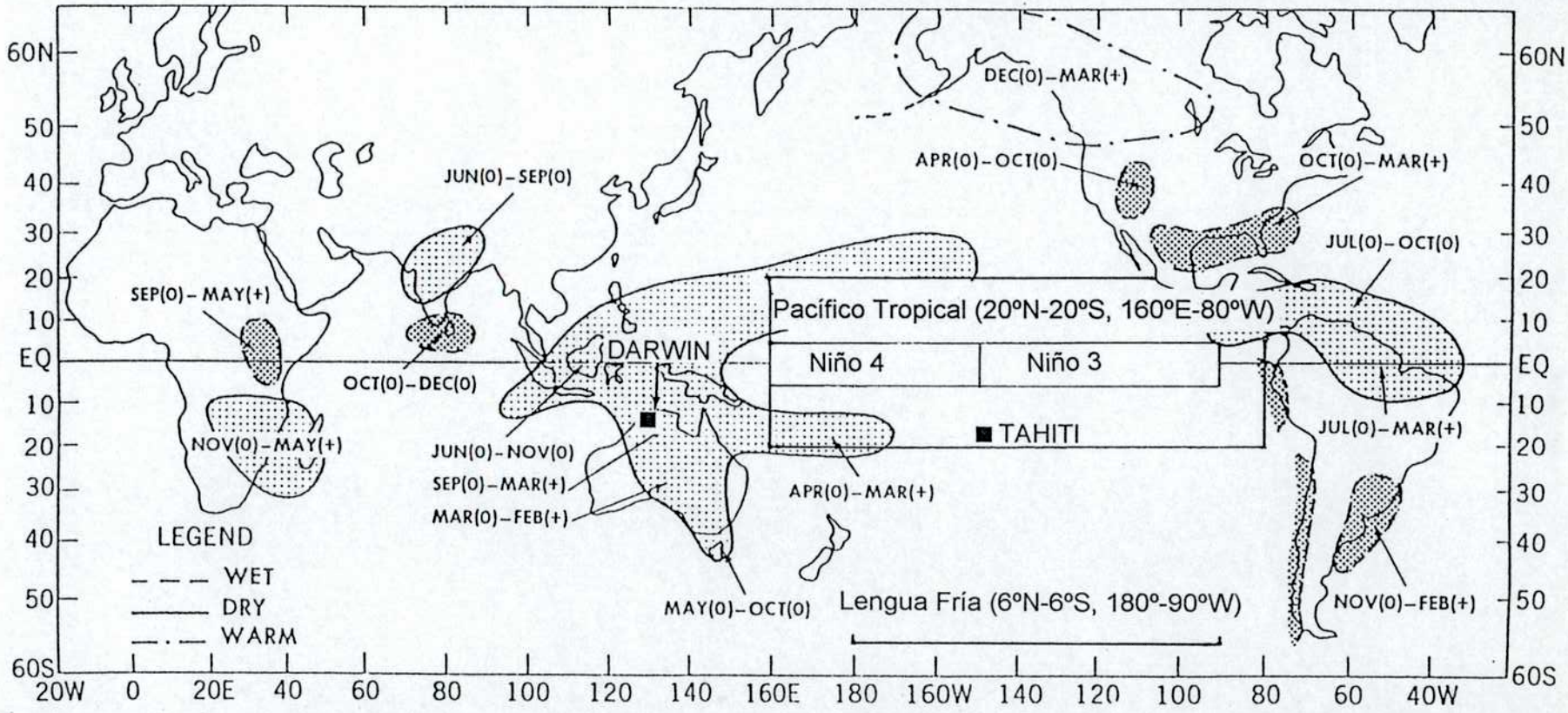

Figura 2. Regiones del Océano Pacífico (definidas en el texto) empleadas por Zhang y otros (1997) para determinar las correlaciones entre el índice SST y el SOI, sobre un mapa original de Ropelewski y Halpert (1987).

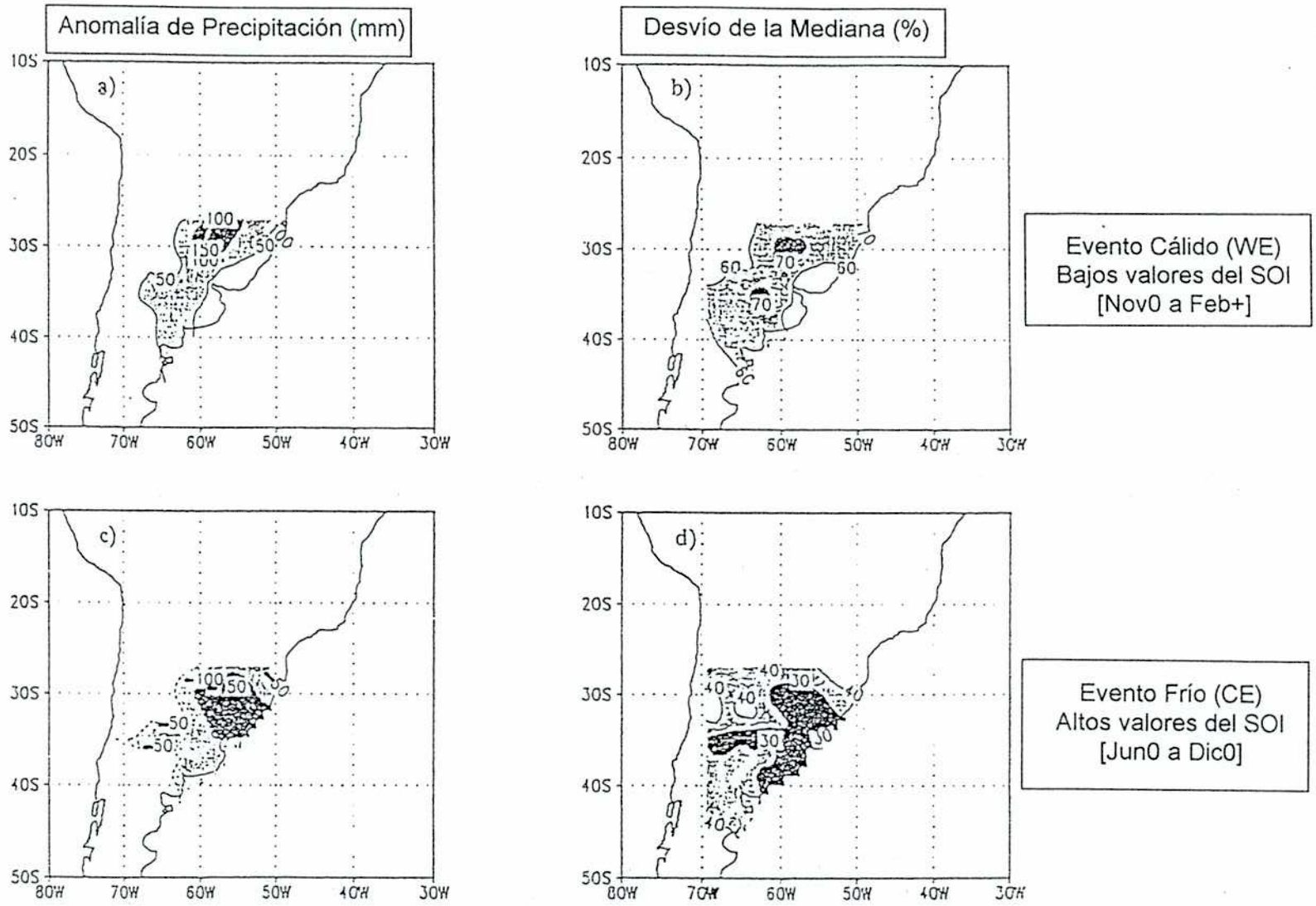

Figura 3. Anomalías de precipitación (mm) y corrimientos de las medianas expresadas en percentiles (%) asociadas al SOI en el Sudeste de Sud América: a) y b) período Nov(0)-Feb(+) asociado a un SOI bajo, c) y d) período Jun(0)-Dic(0) asociada a un SOI alto. (Fuente: Ropelewski y Halpert, 1996)

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Datos y Aspectos climáticos

3.1.1 Datos

La variable indiscutida en esta investigación es la precipitación. Para la pradera pampeana se utilizaron series de datos mensuales de lluvia de más de 50 localidades, la gran mayoría provenientes de datos diarios de los archivos pluviométricos del Servicio Meteorológico Nacional, que ya fueran utilizados por el autor en varios trabajos sobre climatología de la precipitación en la región, (Krepper y otros, 1987; Krepper y Scian, 1994) y en los estudios sobre sequía empleando el Indice de Palmer (Scian y Donnari, 1997a). Se considera una base de datos bien controlados y consistidos. Unas pocas localidades provienen de las estaciones agrometeorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Las actualizaciones de las estaciones de la Provincia de La Pampa, desde 1989 hasta 1995, se deben a la red pluviométrica de la Universidad Nacional de La Pampa. En el tratamiento de la información y según las metodologías empleadas no todas las localidades fueron utilizadas, en particular cuando significaba duplicar la información por ser estaciones muy cercanas y que no aportaban rasgos nuevos a la estructura de los datos. En gran parte del trabajo se emplea el Indice de Precipitación Estandarizado a escala de un mes (IPE1) en lugar de la precipitación mensual. Los meses del año se escriben con mayúscula y ocasionalmente abreviados (Ene para Enero) o con la letra inicial mayúscula (JJA para indicar Junio, Julio y Agosto). Un análisis exhaustivo de la aplicación del IPE como Indice de sequía y su comparación con otros índice hídricos se detalla en el punto 4. En la Tabla 2 se presenta una lista de las localidades con su ubicación y período de registros. La Precipitación anual media (Pam) es calculada sobre el período total.

Tabla 2. Estación, ubicación, precipitación anual media (Pam), fecha inicio y fecha de finalización del registro de datos disponibles.

Estación	Lat(S)	Lon(O)	Pam (mm)	Inicia	Finaliza
Azul	36.75	59.83	920	1888	1995
Gral. Acha	37.37	64.92	491	1898	1995
Bahía Blanca	38.73	62.25	531	1860	1995
Balcarce	37.83	58.25	813	1893	1988
Bernasconi	37.92	63.75	540	1896	1995
Bolívar	36.25	61.10	855	1899	1988
Bordenave	37.51	63.01	638	1928	1995

Tabla 2. (Cont.)

Estación	Lat(S)	Lon(O)	Pam (mm)	Inicia	Finaliza
Buenos Aires(Obs)	34.58	58.48	1020	1881	1988
Casilda	33.05	61.18	900	1901	1988
Carhué	37.13	62.44	625	1911	1988
Chascomús	35.34	58.01	890	1888	1988
Chivilcoy	34.92	60.00	928	1897	1988
Dolores	36.32	57.70	880	1889	1988
Cnel. Dorrego	38.02	61.27	646	1893	1995
Espartillar	37.23	62.26	778	1911	1995
Guaminí	37.05	62.40	699	1900	1995
Huinca Renancó	34.83	64.27	662	1912	1995
Junín	34.58	60.95	806	1896	1988
Laboulaye	34.13	63.40	774	1903	1988
Gral. La Madrid	37.28	61.25	730	1888	1988
La Plata	34.93	57.95	935	1913	1983
Laprida	37.57	60.78	755	1904	1988
Las Flores	36.10	59.02	880	1888	1988
Luro	39.52	62.70	688	1913	1985
Marcos Juárez	32.70	62.12	820	1898	1988
Mar del Plata	37.98	57.57	800	1888	1988
Mercedes(BUE)	34.68	59.45	1005	1897	1988
Nueve de Julio	35.45	60.87	915	1897	1988
Olavarría	36.90	60.33	790	1888	1988
Patagones	40.80	63.00	352	1898	1988
Pehuajó	35.82	61.90	830	1897	1988
Pergamino	33.87	60.58	930	1898	1988
Gral. Pico	35.65	63.73	675	1907	1995
Pigüé	37.38	62.24	695	1913	1988
Puan	37.57	62.75	683	1900	1995
Río IV	33.13	64.33	807	1900	1988
Rosario	32.55	60.47	940	1887	1988
Rufino	34.27	62.72	780	1902	1981
Saavedra	37.48	62.21	680	1911	1988
Saladillo	35.38	59.46	860	1893	1988
Santa Rosa	36.62	64.32	600	1902	1995
Cnel . Suárez	37.52	61.92	702	1888	1995
Tandil	37.32	59.13	835	1888	1988
Tornquist	38.08	62.22	634	1889	1995
Trenque Lauquen	35.58	62.44	743	1897	1988
Tres Arroyos	38.38	60.27	720	1888	1988
Gral. Villegas	35.02	63.02	814	1898	1988
Villa María	32.25	63.15	773	1899	1988
Victorica	36.22	65.43	519	1905	1995

Los episodios cálidos y fríos, definidos como WE y CE respectivamente, que se emplean en esta investigación se basan en KvL88, y en van Loon (1995). Los sucesos clasificados a partir de 1950 están bien estudiados y determinados. Coinciden con la bibliografía anterior otras fuentes como: Ropelewski y Jones (1987), Trenberth (1996), RH96, Grimm y Barros (1998). Para los episodios de la primera mitad del siglo se adoptaron los enumerados por RH96. En la Tabla 3 se presenta la lista de los

episodios empleados en este estudio desde principio de siglo hasta 1988. Se hace la aclaración que se usa indistintamente episodio o año cálido (WE) para las condiciones de SOI extremo negativo y episodio o año frío (CE) para los valores del SOI extremo positivo.

Tabla 3. Lista de Episodios Cálidos (WE) y Fríos (CE) de la Oscilación del Sur durante el presente siglo y hasta 1988, según RH96 y K-vL88. Año de inicio con últimos dos dígitos.

Años WE (Mín SOI)	02, 05, 11, 14, 18, 23, 25, 30, 32, 39, 41, 51, 53, 57, 63, 65, 69, 72, 76, 82, 86
Años CE (Máx SOI)	04, 09, 10, 15, 17, 24, 28, 38, 50, 54, 56, 61, 64, 66, 70, 73, 75, 88

La serie mensual del SOI, definida según Troup (1965) como los desvíos de la presión normalizados entre Tahiti y Darwin, y la serie mensual de anomalías de la temperatura del mar en la región 4° N-4° S; 150° W-90° W, (región El Niño 3), SST3, se obtuvieron del Climate Analysis Center, Climate Diagnostic Bulletin.

Para las fases mensuales del SOI se emplearon los resultados de SA92, quienes definen cinco fases mediante una clasificación objetiva empleando el análisis de clusters. En el ANEXO I se presentan mes a mes, los años que conforman cada una de las fases desde 1900 hasta 1988.

3.1.2 Aspectos climáticos

Dentro de las regiones geográficas de Argentina la llamada Pradera pampeana desde el punto de vista fitogeográfico, ocupa el centro-este del país limitando al oeste con la isohieta de 600 milímetros, al este con los ríos Paraná, de la Plata y el Océano Atlántico, al sur con el Atlántico y al norte con el Monte de algarrobo y el Parque chaqueño. Comprende las provincias de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sur de Córdoba y este de La Pampa. Se caracteriza por su clima templado y húmedo al norte donde el suelo está cubierto por gramíneas que conforma la subregión de los pastos tiernos, y por condiciones de clima sub-húmedo seco hacia el sur con precipitaciones inferiores a 700mm anuales donde las gramíneas no alcanzan a cubrir el suelo de consistencia arenosa que constituye la subregión de los pastos duros, (Dagnino Pastore, Cabrera, 1971). Los grandes cereales y los bovinos se concentran en esta inmensa región de cerca de 500.000 km^2 en lo que constituye la más valiosa región de explotaciones agrícolo-ganaderas de Argentina. Esta pradera recibe las mayores

cantidades de precipitación durante el semestre cálido, con un máximo en primavera y otro al fin del verano y comienzos del otoño. Además de esta distribución espacial y temporal de las lluvias existe una variabilidad interanual considerable.

Los dos sistemas de presión más importantes que controlan el clima en la pradera pampena de Argentina son los dos anticiclones semipermanentes ubicados en los océanos Atlántico Sur y Pacífico Sur, respectivamente. En medio de ambos se desarrolla durante todo el año, aunque con distintas intensidades, la llamada Baja del Noroeste. Esta depresión se extiende desde el noroeste de Argentina hasta el sur de Bolivia y se origina por la existencia de la cordillera de Los Andes, la circulación del oeste en altura y el fuerte calentamiento superficial.

Las fuentes de vapor de agua en la región pampeana provienen del Atlántico Sur y de la selva tropical amazónica. González y Barros (1996) observaron una estrecha relación entre la onda anual de precipitación en la Argentina Subtropical y la onda anual de los gradientes zonal y meridional de presión, que influyen sobre el aporte de humedad desde las dos fuentes posibles. La advección de aire húmedo del Atlántico tiene su máximo en setiembre, marcando el comienzo de la época lluviosa y se mantiene hasta enero. La advección de aire húmedo tropical es importante en verano.

3.2 Metodología

3.2.1 Normalización y estandarización de la precipitación

La precipitación mensual que constituye la serie de datos de cada localidad se transforma en el Indice de Precipitación Estandarizado, según el método de MacKee y otros (1993, 1995). Es un índice práctico pues además de la escala temporal variable se distribuye según una distribución Normal y puede emplearse para evaluar tanto los períodos húmedos como secos.

3.2.1.1Método de cálculo del IPE

Este índice se calcula con la serie de precipitación mensual de una localidad de al menos 30 años de registro contínuo. Se reconoce que la precipitación no se distribuye normalmente para períodos menores que el anual, por eso se trabaja con una distribución Gamma incompleta, por ser una de las distribuciones teóricas de mejor ajuste para este tipo de dato (Thom, 1966). Se emplea el método de máxima

verosimilitud para la estimación de los dos parámetros de la distribución que son el parámetro de forma y el de escala (Johnson y Kotz, 1970).

Se forman nuevas series de precipitación con los valores acumulados de t meses, según sea la escala típica seleccionada. Estas series son móviles en el sentido que cada dato mensual es reemplazado por el total de los t meses anteriores que incluyen al presente y la serie comienza en el dato t-1. Luego de un ajuste a una distribución Gamma incompleta, se determina la probabilidad acumulada corregida por casos de meses con precipitación nula y aplicando la función inversa se calcula la nueva variable respecto a una distribución Normal estandard, con promedio cero y varianza uno, que es el valor del IPE

3.2.1.2El IPE como Indice de Sequía

Utilizando el IPE se puede definir en forma cuantitativa y funcional una sequía. Al estar normalizado con respecto al tiempo, tiene significación para la estimación de condiciones de sequías. Las categorías se establecen según la severidad de la sequía para todo t, y se toma los valores de truncado como muestra la Tabla 4:

Tabla 4. Categorías de Sequías (McKee, 1993)

IPE	Categoría
0 a -0.99	Sequía débil
-1.0 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
≤ -2.00	Sequía extrema

Un episodio de sequía para una escala t es un período durante el cual el IPE es siempre negativo y además debe alcanzar al menos una vez el valor -1. El comienzo de la sequía se establece cuando el IPE es menor que cero y finaliza cuando por primera vez toma un valor positivo. Esto define la Duración de la sequía. La Severidad la establecen los valores de la Tabla 4. En términos de sequía resta definir la Magnitud, que es la desviación media respecto de un nivel de truncado o el déficit medio acumulado durante el período de sequía, (Dracup y otros, 1980a) y b); Beran, 1979 y 1989; Gibbs, 1965). La Magnitud tiene unidades de meses y sería equivalente a la duración, si todos los meses tuvieran un IPE de -1.0.

El IPE está directamente relacionado con la probabilidad y los porcentajes de frecuencia teórica se distribuyen como muestra la Figura 4, que es la función densidad de la distribución Normal, (Feller, 1965). Los porcentajes en el semi-eje negativo

corresponderı a los límites de las categorías de sequías presentados en la Tabla I. El valor del IPE que se ha establecido en la categoría de Sequía Extrema corresponde a 2 σ (σ es el desvío estandard) ya que en realidad expresa el 2.2 % de probabilidad de ocurrencia y es lo suficientemente baja como para caracterizar un suceso "raro".

3.2.2 Regionalización según el método de Clusters

La metodología empleada en una parte de la investigación es la llamada anáilisis de Clusters que asocia las variables en grupos que constituyen subregiones.

El objetivo de operar con clusters es el de clasificar nuevos elementos y reconocerlos como miembros de una categoría u otra que se han establecido previamente. En un conjunto de observaciones, de las cuales se desconoce la categoría de sus asociaciones, hay que descubrir una estructura por categorías que se adecúe a las observaciones. Expresado en una forma más concreta, es ordenar las observaciones en grupos tales que el grado de asociación natural sea el más elevado entre miembros del mismo grupo y el más bajo entre miembros de grupos diferentes. Al elegir las variables se requiere que éstas sean bien definidas en términos de sus características, atributos y propiedades.

La mayoría de los métodos de anáilisis de cluster requieren la medida de la semejanza para definir cada par de combinaciones entre entes que serán "clusterizados". Al hacerlo, la proximidad entre individuos se expresa generalmente como una distancia. El hacer un cluster entre variables involucra una correlación u otra medida de asociación. Cuando se logra combinar: 1.- la elección de variables, 2.- la transformación y 3.- la medida de la semejanza entonces se ha logrado aclarar más el término "Asociación Natural" (Anderberg, 1973).

¿Cuál es la cantidad adecuada de clusters para el problema entre manos? La respuesta es que los clusters no son importantes en sí mismo, el punto está en las inferencias acerca de la estructura de los datos. Es recomendable repetir el análisis para diferentes números de clusters y tener así una variedad de alternativas de clasificación. Puede darse el caso de intentar aplicar algún test de significación estadística a las medias de los distintos grupos o aún, hacer el cociente entre la suma de cuadrados entre grupos y la suma de cuadrados dentro del grupo. El problema al hacer estos test es que no son relevantes. El propósito del criterio de "clusterizar" y el

algoritmo empleado ya en si mismo conduce a dar un conjunto de clusters que estén bien diferenciados uno del otro.

Cuando se procede a clusterizar variables es necesario aplicar ciertas mediciones numéricas de similaridad o semejanza para caracterizar las relaciones entre variables. El enfoque convencional es calcular una medida de la asociación entre un par de variables, que en el caso de N variables consiste en combinaciones de N elementos tomados de a dos,

$$\binom{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}$$

Todos los métodos de análisis de clusters tienen como suposición básica que estas medidas numéricas de asociación son todas comparables unas a otras. El método empleado en esta investigación es el del k-medio o método de MacQueen (1967) que se detalla en el Anexo II. En lugar de emplear la precipitación como variable se trabajó con el Indice de Precipitación Estandarizado (IPE) para la escala de un mes.

3.2.3 El SOI y sus fases.

Como indicador del fenómeno ENSO se emplea el Indice de Oscilación del Sur (SOI) según calcula Troup (1965).

En el procedimiento para determinar las fases del SOI por medio del análisis de clusters realizado por SA92, no sólo utilizaron la serie de los valores mensuales del SOI sino que se emplearon las diferencias con el mes anterior y con dos meses antes, para incorporar de esta forma los cambios o tendencias de las variable. Así quedan establecidas cinco categorías o fases del ciclo del SOI que son: Fase 1 (F1): SOI extremo negativo, Fase 2 (F2): SOI extremo positivo, Fase 3 (F3): SOI en rápido descenso, Fase 4 (F4): SOI en rápido ascenso y Fase 5 (F5): SOI con valores cercanos a cero y poco cambio con el mes anterior.

La serie temporal del SOI que muestra ciclos positivos y negativos queda entonces transformada en valores de 1 a 5, correspondientes a las fases e identifican de este modo los diferentes estados del SOI en su transcurso y ciclo de vida. El empleo de estas fases permite agrupar meses según una tipología.

Conviene presentar aquí un gráfico generalizado como el de la Figura 5, que muestra las marchas de las anomalías de la SST3 y del SOI en un ciclo que incluye un evento cálido donde se han marcado, según la definición de KvL88, las condiciones de El Niño en lo que hace a duración e intensidad. También se anotan las fases del SOI, según SA92. Se debe considerar tan sólo como una esquematización pués en realidad se dan casos de meses con cambios en la pendiente del SOI y no corresponde por eso, a una finalización o inicio de un evento Niño.

3.2.4 Correlaciones

Como en este estudio se intenta dilucidar relaciones del SOI y de la SST sobre la precipitación se aplica el análisis de correlaciones. Al aplicar esta metodología estadística, convendría establecer que correlación no implica causa sino la existencia de la asociación lineal entre variables. Las correlaciones entre variables medida a través de los coeficientes de correlación y de correlación cruzada, fueron calculados con las fórmulas estandards que se presentan en la bibliografía, (Jenkins y Watts, 1968; Box y Jenkins, 1976). La correlación entre dos series temporales x(t) e y(t), para un retardo λ, se define por:

$$r_{xy}(\lambda) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N-\lambda}(x_t - \bar{x})(y_{t+\lambda} - \bar{y}) \,/\, s_x s_y$$

donde N es el número de términos de las series, y para z = x,y; $\bar{z}$ se define como

$$\bar{z} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} z_i$$

y s_z es la raíz cuadrada, con signo positivo de:

$$s_z^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(z_i - \bar{z})^2 .$$

Las variables empleadas, como el IPE(t), son de distribución normal y cuando corresponde se deben corregir para garantizar la estacionariedad de las series, como en el caso de tendencia lineal. En meteorología es común correlacionar dos series temporales para ver si tienen o no variaciones similares. Cuando las series de datos tienen una distribución gaussiana y autocorrelación nula, estimar la significación estadística de una correlación es sencillo. Muchas veces estas series tienen una autocorrelación distinta de cero y más aún si se le ha pasado un filtro pasabajo para suavisarla. Para evitar este inconveniente, lo que comunmente se hace es dividir la

muestra tomando los datos separados para un mes y así se supone que son estadísticamente independientes, lo que en general se comprueba.

Las funciones de autocorrelación de las series del IPE1 fueron analizadas y se observó un comportamiento de ruido blanco. Los datos temporales de anomalías de precipitación usados en la matriz de correlación con el SOI mensual o con la SST3 están separados 12 meses. Por ejemplo: la serie de IPE de Enero está formada por todos los Enero de los n años del record, para evitar meses secuenciales que afecten los grados de libertad. Para las pruebas de hipótesis se estableció un valor de α=0.05.

3.2.5 Test estadísticos

Un importante problema a tener en cuenta antes de aplicar cualquier test de significación estadística es que muchos test de uso común son de aplicación válida solamente si la distribución de frecuencias de la variable es gaussiana o, en algunos casos muy especiales, de una distribución de forma muy específica.

Si la distribución empírica es la misma que la distribución para la cual es válido el test se está en condiciones de aplicarlo. De otra manera, se deberá recurrir a alguno de los test no-paramétricos de significancia estadística; estos test son independientes de la forma de la distribución en cuestión.

Vale la pena agregar que en el caso de algunas variables climatológicas que no tienen una distribución gaussiana pero que se conoce la forma de distribución de frecuencia teórica, se puede transformar en otras variables que sí, respondan a una normal, (WMO, 1966). En el caso de la precipitación mensual los totales acompañan generalmente una distribución tipo Gamma.

3.2.5.1Test de la Mediana y Kruskal-Wallis

Estos son test no-paramétricos para comparar grupos, (Siegel, 1956). Son test por rangos y asumen que la variable es contínua y las muestras a comparar provienen de la misma distribución o de distribuciones con la misma mediana. Se emplea para decidir si k muestras independientes provienen de poblaciones diferentes. Especificamente, se procede a contar para el caso de dos muestras, el número de casos por encima y por debajo de la mediana común y se prepara una tabla de contingencia para calcular el valor de Chi cuadrado (χ^2) para las 2x2 muestras. La hipótesis nula es que todas las muestras provienen de poblaciones con las mismas

medianas y se espera que un 50% de casos de cada muestra caigan por encima y otro 50% por debajo de la mediana común.

Para el estadístico de Kruskal-Wallis se calcula:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^{k} \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

donde N es el número total de observaciones en las k muestras, R_j es la suma de los rangos asignados a las observaciones en la muestra j de n_j elementos y la sumatoria se realiza sobre las k muestras. Si $H \geq \chi^2$, se puede rechazar la H_0 pero aún queda la pregunta de cuales son las muestras entre las que existen diferencias, para lo cual se emplea un procedimiento de comparaciones múltiples (Daniel, 1978) que se ejemplifica en el Anexo II.

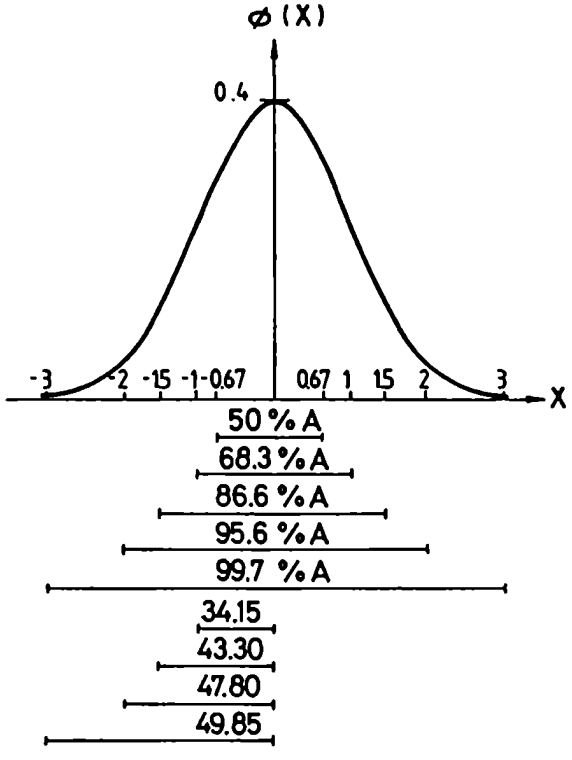

Figura 4. Distribución Normal (0,1) y porcentajes del Area (A) para distintos intervalos de la variable x. (Fuente: Feller, 1965).

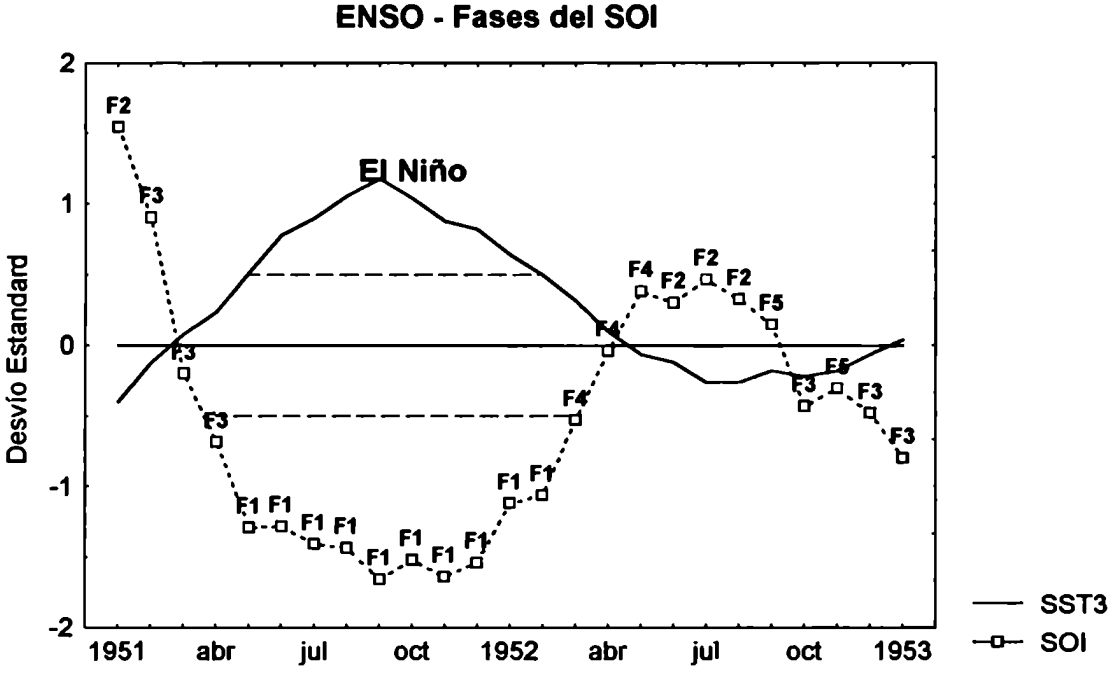

Figura 5. Gráfico representativo de la marcha del índice SST3 y del SOI para un evento cálido o El Niño. F1 a F5 indica el tipo de fase mensual del SOI, según SA92.

4. INDICES HIDRICOS

4.1 Porcentaje de Precipitación, Método de Deciles, Indice de Anomalía de Humedad, Indice de Sequía de Palmer e Indice de Precipitación Estandarizado.

En el estudio de las condiciones de sequía, su intensidad y duración se emplean diversos índices según la aplicación que de ellos se requiera. Una de las medidas más simples de las condiciones hídricas representativa de una región o de una estación del año es el Porcentaje de la Precipitación Normal. La Precipitación Normal de una localidad determinada está expresada como el 100%, y el cociente de la precipitación Real con la Normal resulta en el índice en cuestión, que se puede expresar en escala mensual, estacional o anual. Como la distribución de la precipitación en las dos primeras escalas se aleja de la normal, no coinciden la media con la mediana.

El método de los Deciles de la precipitación mensual es otra técnica empleada para determinar períodos húmedos o de sequía. Gibbs y Maher (1967) presentaron este método que consiste en dividir la distribución de ocurrencia de precipitaciones de un período histórico de datos en secciones que corresponden al 10% de la distribución. El primer decil contiene las precipitaciones que no son excedidas por el 10% de los datos. El segundo decil es la cantidad de precipitación que no excede el 20% de las ocurrencias. Así siguiendo con los restantes deciles hasta el décimo que contiene el 10% de las precipitaciones mayores del récord de información. Por definición el quinto decil es la mediana y es la cantidad de precipitación que no excede el 50% de ocurrencia sobre el récord total de datos. Los deciles se suelen agrupar en cinco categorías según la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de los deciles para períodos húmedos y secos.

Deciles	Porcentajes	Clasificación
1 – 2	< 20%	Muy por debajo de lo Normal
3 – 4	entre 20% y 49%	Por debajo de lo Normal
5 – 6	entre 40% y 60%	Casi Normal
7 – 8	entre 60% y 80%	Por encima de lo Normal
9 – 10	>80%	Muy por encima de lo Normal

Algo diferente en cuanto a su complejidad, debido a las suposiciones iniciales y las variables involucradas en el cálculo es el Indice de Sequía de Palmer (ISP)

desarrollado por Palmer (1965) basado en el concepto de demanda-suministro de la ecuación de balance hídrico. El ISP se calcula con datos mensuales de precipitación y temperatura así como con las condiciones de agua disponible en el suelo. En el procedimiento de cálculo se cumplen dos etapas de las cuales se obtienen dos índices, a saber: de la aplicación del balance de agua según Palmer se obtiene el Indice de Anomalía de Humedad, Z, y de la aplicación de la ecuación de Palmer, el Indice de Severidad de Sequía, ISP. Una descripción detallada del método, además del original, se encuentra en Donnari y Scian, (1993) y en Scian y Donnari (1995) donde se hace una aplicación del ISP para el sudoeste bonaerense y una propuesta de ecuación de pronóstico de rendimientos de trigo en función del índice Z. Los umbrales para la región de estudio que se transcriben en la Tabla 6, fueron establecidos por Donnari y Scian (1997) y las regiones a que se refiere son las llamadas Regiones Ecológicas del Trigo que se muestran en el mapa de la Figura 6.

Tabla 6. Indice Z de Palmer, umbrales y categorización según frecuencias.

Frecuencias Acum (%)	Reg. II Sur (mm)	Reg. IV (mm)	Reg. V Sur (mm)	Categoría
<4	< -66	< -72	< -72	Sequía Extrema
5-10	-54	-57	-59	Sequía Severa
11-30	-29	-30	-31	Sequía Moderada
31-70	+18	+20	+19	Normal
71-90	+63	+66	+62	Humedad Moderada
91-96	+98	+99	+98	Humedad Severa
>96	>98	>99	>98	Humedad Extrema

El ISP varía entre 6 y –6 y la escala para las condiciones de humedad fueron elegidas por Palmer en forma arbitraria, pero Karl (1986) propone las clases para períodos húmedos y secos que se presentan en la Tabla 7 acompañadas de los porcentajes de frecuencia acumulada.

Tabla 7. Clasificación del ISP para períodos húmedos y secos.

Indice	Clasificación	Frecuencia Acumulada (%)
≥4.0	Extremadamente húmedo	> 95
3.0 a 3.9	Muy húmedo	90 - 95
1.5 a 2.9	Moderado a leve húmedo	73 - 89
-1.5 a 1.5	Casi Normal	28 - 72
-1.5 a -2.9	Sequía débil a moderada	11 - 27
-3.0 a -3.9	Sequía severa	5 - 10
≤-4.0	Sequía extrema	< 5

Finalmente, se menciona el IPE que ya se definiera en el punto 3.2.1, cuyas categorías de Sequía se presentaron en la Tabla 4.

4.2 Comparación de índices

Para varias localidades de la región semiárida pampeana se comparan los resultados de los índices hídricos. Las localidades empleadas corresponden al sudoeste y centro de la región pampeana y son: Azul, Anguil, Bahía Blanca, Bordenave, Dorrego, Gral. Acha, Gral. Pico, Guaminí y Huinca Renancó. En particular, se analiza el año 1995, año que se caracterizó por intensas sequías en el centro del país a partir del mes de mayo, y que estudiaron, entre otros, Alessandro y Lichtenstein (1996), Núñez y otros (1996), Navarro Dujmovich y Aguas (1996).

En la Tabla 8 se presentan, para algunas localidades y mes a mes, los índices hídricos estudiados que son: el Porcentaje de la Precipitación Normal, (%PN), los Deciles de Precipitación, la Anomalía de Humedad, (Z en mm), el ISP y el IPE para las escalas de 1, 3, 6 y 12 meses correspondiente al año 1995. Se ha subrayado el mes con precipitación nula, coincidente con el mes de Julio, aunque en algunas localidades la sequía comenzó en Mayo, y su impacto en los demás índices.

Tabla 8. Comparación de Indices Hídricos para algunas localidades de la región durante 1995. Meses con cero lluvia y su impacto en los índices mínimos están subrayados.

a)

Gral. ACHA	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	125	7	23	1.4	0.54	-0.03	-0.33	0.32
Febrero	72	6	-21	0.9	-0.01	0.14	-0.65	0.22
Marzo	135	8	29	1.3	0.65	0.39	-0.12	0.33
Abril	167	8	38	1.6	0.87	0.57	0.27	0.52
Mayo	122	7	20	1.7	0.52	0.89	0.56	0.32
Junio	40	5	-12	1.4	-0.23	0.64	0.55	0.24
Julio	0	1	-32	0.8	-0.90	-0.26	0.33	-0.09
Agosto	36	4	-31	0.3	-0.34	-1.01	0.42	-0.36
Setiembre	44	4	-42	-0.2	-0.38	-1.14	-0.10	-0.25
Octubre	109	8	-4	-0.3	0.36	-0.29	-0.54	-0.06
Noviembre	163	9	41	0.3	0.91	0.46	-0.01	0.36
Diciembre	0	1	-22	-0.1	-1.64	0.00	-0.50	0.02

b)

Ba. BLANCA	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	96	6	-8	2.1	0.22	1.60	0.96	0.61
Febrero	67	6	-29	1.6	-0.10	0.95	0.61	0.69
Marzo	148	7	40	1.9	0.80	0.32	1.03	0.79
Abril	82	6	-18	1.5	0.09	0.24	1.19	0.98
Mayo	5	1	-63	0.5	-1.44	0.08	0.64	0.56
Junio	16	3	-42	-0.1	-0.79	-0.90	-0.32	0.46
Julio	0	1	-50	-0.7	-1.31	-2.41	-0.57	0.26
Agosto	38	4	-43	-1.2	-0.45	-1.52	-0.59	0.03
Setiembre	7	1	-73	-2.0	-1.76	-2.18	-1.89	-0.04
Octubre	81	5	-29	-2.2	-0.04	-1.05	-2.11	0.11
Noviembre	146	8	28	-1.6	0.80	-0.21	-0.87	-0.04
Diciembre	144	7	-77	-2.5	0.74	0.63	-0.30	-0.48

c)

BORDENAVE	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	137	8	87	2.4	0.68	1.18	0.76	0.25
Febrero	42	4	-28	1.8	-0.53	1.38	0.24	0.28
Marzo	154	9	64	2.5	0.90	0.55	0.79	0.76
Abril	147	8	47	2.8	0.74	0.58	1.16	1.05
Mayo	2	1	-61	1.7	-1.77	0.54	1.27	0.64
Junio	15	1	-36	1.1	-0.87	-0.30	0.16	0.53
Julio	0	1	-37	0.5	-1.58	-2.15	-0.30	0.31
Agosto	85	6	-09	0.3	0.16	-1.27	0.04	0.12
Setiembre	27	4	-53	-0.4	-0.78	-1.23	-1.07	0.14
Octubre	67	5	-41	-0.9	-0.28	-0.76	-1.91	0.17
Noviembre	48	3	-66	-1.7	-0.62	-1.21	-1.77	0.33
Diciembre	101	6	-15	-1.7	0.28	-0.54	-1.08	-0.60

d)

Gral. PICO	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	88	7	-19	-2.2	0.03	-0.38	-0.40	-0.85
Febrero	92	2	-12	-2.1	0.09	0.26	-0.73	-0.90
Marzo	72	4	-32	-2.3	-0.15	-0.29	-0.61	-0.65
Abril	153	8	32	-1.7	0.80	0.14	-0.28	-0.30
Mayo	229	9	76	-0.5	1.24	0.64	0.51	-0.09
Junio	13	3	-21	-0.7	-0.65	0.94	0.22	-0.14
Julio	0	1	-36	-1.1	-0.92	0.30	0.15	-0.28
Agosto	28	4	-30	-1.4	-0.42	-1.73	0.08	-0.60
Setiembre	36	3	-42	-1.8	-0.58	-1.55	0.06	-0.59
Octubre	85	6	-21	-1.9	0.01	-0.66	-0.50	-0.54
Noviembre	97	6	-16	-1.9	0.17	-0.35	-0.99	-0.11
Diciembre	48	3	-67	-2.6	-0.67	-0.48	-1.07	-0.52

e)

H. RENANCO	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	103	6	16	3.8	0.27	-0.11	0.86	0.65
Febrero	95	6	5	3.5	0.11	0.41	0.36	0.79
Marzo	16	1	36	3.6	-1.85	-0.69	0.00	0.34
Abril	70	2	-24	2.9	-0.11	-1.10	-0.80	0.30
Mayo	181	9	31	3.0	0.93	-0.86	-0.18	0.24
Junio	54	6	-9	2.6	-0.03	0.20	-0.58	0.24
Julio	23	4	-27	2.0	-0.36	0.33	-0.84	0.16
Agosto	9	4	-46	1.2	-0.52	-0.91	-1.29	-0.36
Setiembre	50	4	-40	0.5	-0.36	-1.19	-0.62	-0.34
Octubre	45	2	-53	-0.2	-0.82	-1.33	-0.87	-1.19
Noviembre	78	4	-33	-0.6	-0.12	-0.90	-1.29	-0.86
Diciembre	38	2	-83	-1.6	-1.19	-1.26	-1.68	-1.45

f)

AZUL	%PN	Deciles	Z(mm)	ISP	IPE1	IPE3	IPE6	IPE12
Enero	51	3	40	-0.5	-0.83	-0.43	-0.17	-0.93
Febrero	127	6	20	-0.2	0.60	0.15	0.14	-0.61
Marzo	59	3	-48	-0.8	-0.63	-0.56	-0.13	-0.50
Abril	269	9	150	1.2	1.86	1.04	0.44	0.27
Mayo	2	1	-65	0.2	-1.93	0.36	0.26	0.00
Junio	3	1	-50	-0.4	-1.53	0.44	-0.19	-0.24
Julio	0	1	-59	-1.1	-2.09	-4.27	-0.22	-0.38
Agosto	27	3	-43	-1.6	-0.67	-2.93	-0.73	-0.42
Setiembre	9	1	-86	-2.6	-1.78	-3.28	-0.96	-0.72
Octubre	30	1	-84	-3.4	-1.24	-2.42	-4.43	-1.35
Noviembre	131	7	4	-3.4	0.69	-1.05	-2.37	-0.98
Diciembre	58	3	-61	-3.5	-0.52	-0.58	-1.94	-1.33

La localidad de Huinca Renancó se ubica en el borde norte de la región afectada por el episodio de sequía y es la menos perjudicada. En general, a excepción del ISP y el IPE a escala de 6 y 12 meses, los índices responden al mínimo de lluvia en forma instantánea. Para la escala de 3 meses, el IPE3 asociado a la sequía se retarda uno a dos meses, excepto en las localidades donde desde Mayo se detectan deficiencias de agua.

Para comparar los diferentes índices se calcularon los coeficientes de correlación, r, entre ellos y se encontró que existe una buena correlación entre el %PN, los deciles, Z e IPE1, con coeficientes r^2 superiores a 0.84. Por otro lado, también se encontraron altas correlaciones entre el ISP y el IPE12 como se muestra en la Figura 7. Se deduce que el IPE a escala de 12 meses es comparable al ISP.

Al relacionar el Indice de Anomalía de Humedad, Z con el IPE para las distintas escalas se encontró la mayor correlación para la escala mensual, como se presenta en la Figura 8, sólo para la localidad de Azul. El IPE1 refleja las condiciones de tiempo a corto plazo y su aplicación se relaciona estrechamente con la humedad en el suelo y el stress vegetativo durante el período de cultivo, por lo tanto era de esperar una buena correlación.

De hecho, por la forma en que se definen los índices, algunos reflejan la escasez de lluvia instantáneamente mientras que otros presentan un retardo. Es así que, como el ISP por su formulación incorpora un porcentaje del ISP del mes anterior infiriendo que el ISP actual refleja condiciones de humedad de los meses anteriores, va gradualmente, mes a mes, midiendo la sequía y los índices más intensos recién se producen en Diciembre, como se ve en la Tabla 9. Lo mismo ocurre con las escalas de 3, 6 y 12 meses en el caso del IPE(t), pues considera que cada dato es el acumulado de t meses anteriores. De ahí que estos índices sean prácticos para aplicaciones hidrológicas y agropecuarias. Para evaluar las condiciones reales del mes en curso deberá confiarse en los tradicionales deciles, en el IPE1 y el Z de Palmer. Este último resulta muy adecuado para uso agrícola pues para su cómputo se emplea un balance hídrico que incorpora parámetros del suelo de la región.

En lo que hace al análisis espacial de estos índices, nada mejor que un caso de sequía extrema, como el mencionado año 1995. Previamente, se estableció una clasificación única para lo cual se consideraron los porcentajes de frecuencia acumulada y se fijaron los rangos de variación de cada uno de los índices, como se

muestra en la Tabla 9, junto con la simbología. Naturalmente, como estos índices son diseñados con distintos objetivos responden a cada una de las metodologías seguidas y a las suposiciones planteadas y por ello se hace un poco difícil poner límites estrictos a los rangos. Se observa que el grado de detalle de los extremos de la distribución de los valores va variando con los métodos.

Observando las colas de la distribución se nota que, por el Método de los Deciles no se puede lograr más definición que el 10% de frecuencia, clasificado por el Decil 1. El ISP asigna aproximadamente el 4% para el valor -4 que se fijó como límite para sequía extrema y en cuanto a la distribución del IPE, el 2% recae en el valor -2 y el 8% le corresponde al valor de -1.5. Se consideran condiciones normales entre el 30% y 70% de la distribución que corresponden a los deciles 4 al 7, mientras que para valores del IPE le corresponden -0.5 y +0.5 y para el ISP entre -1.5 y +1.5.

Tabla 9. Equiparación y agrupación de categorías de sequías y símbolos.

Frec.	Deciles	Frec.	IPE(t)	Frec.	Z(mm)	ISP	Símbolo
		2%	-2.0				
<10%	1	4%	-1.7	4%	-70	-4	■
		7%	-1.5				
		10%	-1.3	10%	-57	-3	♦
10-20%	2	15%	-1.0				
		25%	-0.7				
20-30%	3	30%	-0.5	30%	-30	-1.5	•
31-70%	4-7	40%	-0.3				
		60%	0.3				o
71-80%	8	70%	0.5	70%	+19	1.5	Δ
		75%	0.7				
81-90%	9	85%	1.0				
>90%	10	90%	1.3	90%	+64	3.0	□
		96%	1.7	96%	+98	4.0	#
		98%	2.0				
		99%	>3.0				

Varias localidades de la región semiárida pampeana se listan en la Figura 9, a través de los valores de los índices: a) Deciles, b) Z, c) ISPalmer, d) IPE1, e) IPE3 y f) IPE12, desde Mayo a Diciembre de 1995, con la simbología de la Tabla 9. Se ubicaron las localidades de norte a sur y de oeste a este.

En el comportamiento de los deciles y del IPE1 se ve la alternancia de las condiciones de humedad deficientes y moderadas, respondiendo rapidamente a la precipitación mensual. Julio es netamente seco en la región y con condiciones de sequía severas, excepto en Huinca Renancó y le sigue un mes normal, pero septiembre nuevamente expresa condiciones severas a moderadas.

El índice Z, si bien tiene una buena correlación con los anteriores evidencia la continuidad de las condiciones de sequía durante varios meses seguidos, con distinta intensidad. Lo mismo vale para el IPE3 que indica las condiciones de sequía extrema y severa para los meses de Julio, Agosto y Setiembre. A estos dos índices se los considera apropiados para uso agrícola.

En lo que respecta al ISP, las respuestas a las anomalías de precipitación de Mayo a Julio se ven reflejadas varios meses después y con intensidad atenuada, alcanzando recién al fin del año la categoría de condiciones severas de sequía. Esto está indicando que a escala anual, que como se vió es la escala del ISP, el sistema se encuentra dentro de un ciclo húmedo pero a escala mensual o trimestral pueden estar ocurriendo situaciones de humedad desfavorables.

Se considera que el IPE es el índice que mejor se adapta al estudio de extremos (secos ó húmedos) pués tiene varias ventajas sobre los otros. Por ejemplo, para establecer porcentajes de frecuencia en las porciones extremas al caracterizar condiciones moderadas, severas o extremas de los eventos, se tiene la seguridad que son casos excepcionales con condiciones extremas de baja probabilidad, indicando lo poco probable de ese evento. No pasa lo mismo en los deciles donde ya está estipulado el mínimo en 10% y el tope en 90%. Con el ISP ocurren algunas inconsistencias según las regiones climáticas, pués se han observado porcentajes de casos extremos superiores al 20% (Scian y Donnari, 1997b), en desacuerdo con el hecho de que un evento extremo es un suceso "raro", que se produce excepcionalmente con un nivel de probabilidad bajo.

La extensión de una sequía y la ubicación de los centros de mayor intensidad se pueden establecer, mediante el IPE, cuando se dispone de una buena distribución de la información pluviométrica. A modo de ejemplo se presentan los mapas del IPE3 e IPE12 del mes de febrero de 1962 (Figuras 10 y 11) para la región pampeana. Las áreas de sequía detectadas a escala de 3 meses se ven modificadas en la escala anual, donde toda la provincia de Buenos Aires permanece bajo condiciones secas.

A fin de comparar la distribución de los centros de sequía con otro índice se presenta el mapa del ISP medio para el trimestre de verano dic-ene-feb 1962/63 (Figura 12), que debería guardar relación con el IPE3 de febrero, calculado también en base a las lluvias del trimestre dic-ene-feb de ese año particular.

En líneas generales ambos mantienen las mismas áreas de sequía aunque el ISP, al responder a una escala anual no llega a detectar la zona con condiciones húmedas favorables. En el borde oeste es donde se observan los mayores desajustes, en la región donde los gradientes en el IPE son más intensos.

Puede considerarse que a la escala de 3 meses el IPE refleja las condiciones de humedad a corto plazo y junto con el IPE12 provee una estimación estacional de las lluvias regionales.

4.3 Aplicación del Indice de Precipitación Estandarizado a las localidades de Azul y Bahía Blanca.

Analizando la aplicación del IPE(t) para dos localidades de la región pampeana se pone en evidencia la simplicidad y la representatividad de dicho índice para el análisis de episodios secos y húmedos. Se seleccionaron las localidades de Azul, por estar ubicada en el centro de la Provincia de Buenos Aires y Bahía Blanca por estar dentro de la región semiárida, ambas con series de precipitación mensual más que centenarias.

Un ejemplo del comportamiento de la serie del IPE para Bahía Blanca a escala 12 y 24 meses desde 1861 hasta 1995 se muestra en la Figura 13, mientras que en la Figura 14 se presenta el IPE a 3 y 12 meses, para la localidad de Azul durante el período 1888-1996.

A medida que aumenta el período t, que actúa como un suavizado, el IPE responde más lentamente a las variaciones de la precipitación, las áreas positivas y negativas se reducen y aumenta la duración. En el límite, cuando t tiende a infinito ($t \rightarrow \infty$), el IPE tiende a cero, a menos que se verifique una tendencia.

Observando las marchas de los IPE y recordando que –2 es el límite establecido para la categoría de sequía Extrema es inmediato que desde la década del 40 no se registran en Bahía Blanca, a escala anual, sequías de esa intensidad.

Con respecto a los extremos húmedos, éstos se intensifican en la década de 1970. Para la localidad de Azul y a una escala de 3 meses, las periodicidades son más cortas y la sequía de 1995 sólo es comparable a un episodio de fines del siglo pasado. En la escala temporal de los 12 meses se nota un incremento en los extremos húmedos de las cuatro últimas décadas.

Si se cuentan los episodios húmedos, H, como los períodos en que el IPE supera al valor +1 y vuelve a cero y los secos, S, como los períodos que superan el valor -1 y vuelven a cero se observa en la Tabla 10, para ambas localidades durante el período 1951-1996, como disminuye el número de casos según aumenta la escala.

Tabla 10. Número de episodios secos (S) y húmedos (H) según la escala (t) en meses para la localidad de Azul y de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, período 1951-1996.

t	AZUL		B. BLANCA	
	S	H	S	H
3	26	32	24	31
6	17	18	11	13
12	4	10	5	6
24	1	6	2	3
36	0	3	1	3
48	0	2	1	2

Los episodios húmedos son algo superiores en número a los secos. El mismo comportamiento para la región semiárida pampeana obtuvieron Donnari y Scian (1996), empleando el Indice de Sequía de Palmer.

Se determinaron para Bahía Blanca las magnitudes de los tres episodios secos más importantes del siglo y las deficiencias de precipitación acumulada que se calcula como la suma de los desvíos medios de la precipitación mensual durante ese episodio. Una ventaja del IPE es que permite calcular directamente la magnitud de un episodio de sequía a través de la suma acumulada de sus valores Los resultados se muestran en la Tabla 11, (segunda columna). En la tercer columna de dicha Tabla se transcribe la cantidad de mm de agua equivalente para esa localidad.

Tabla 11. Magnitud del IPE12 y deficiencia de la precipitación acumulada de algunas sequías extremas en Bahía Blanca.

Inicio y fin	Magnitud	Def.Acum(mm)
Oct-1927 a Jun-1930	50,6	-524
Ene-1962 a Jul-1963	16,3	-240
Feb-1971 a Mar-1972	7,5	-124

4.4 Comentarios sobre los resultados

Dentro de la gama de índices definidos para cuantificar condiciones húmedas o secas se mencionan los de aplicación meteorológica, agronómica e hidrológica. La escala temporal es un factor que los diferencia, lo mismo que la incorporación de

factores físicos del suelo como en los modelos de balance de agua superficial. Se encontró que índices de aplicación meteorológica y agronómica que guardan entre sí un comportamiento semejante debido a su buena correlación son: el Porcentaje de la precipitación normal, los Deciles, el índice de humedad del suelo (Z) y el IPE1; todos ellos son índices que se aplican a una escala temporal típica de un mes. Por otra parte, se encuentra una alta correlación entre el ISP y el IPE12 que se aplican en el ámbito agronómico e hidrológico y tienen una escala típica anual. A través de la Tabla de unificación de categorías se permite la comparación entre índices. Los Deciles resultan poco precisos para caracterizar situaciones extremas, menores del 10%.

En esta equiparación se observa que el grado de detalle para las situaciones extremas, colas del 10% y del 90% en la distribución de frecuencias, están mejor resueltas en los IPE(t). Por definición, al responder directamente a una distribución Normal de media cero y desvío estandard 1, N(0,1), las probabilidades están directamente relacionadas con las anomalías de lluvias, sean extremos secos o húmedos. Además, la media y la mediana coinciden y son cercanas a cero. Se considera que el IPE en todas sus escalas es práctico para estudiar características, probabilidades, áreas de extensión y magnitudes de extremos hídricos.

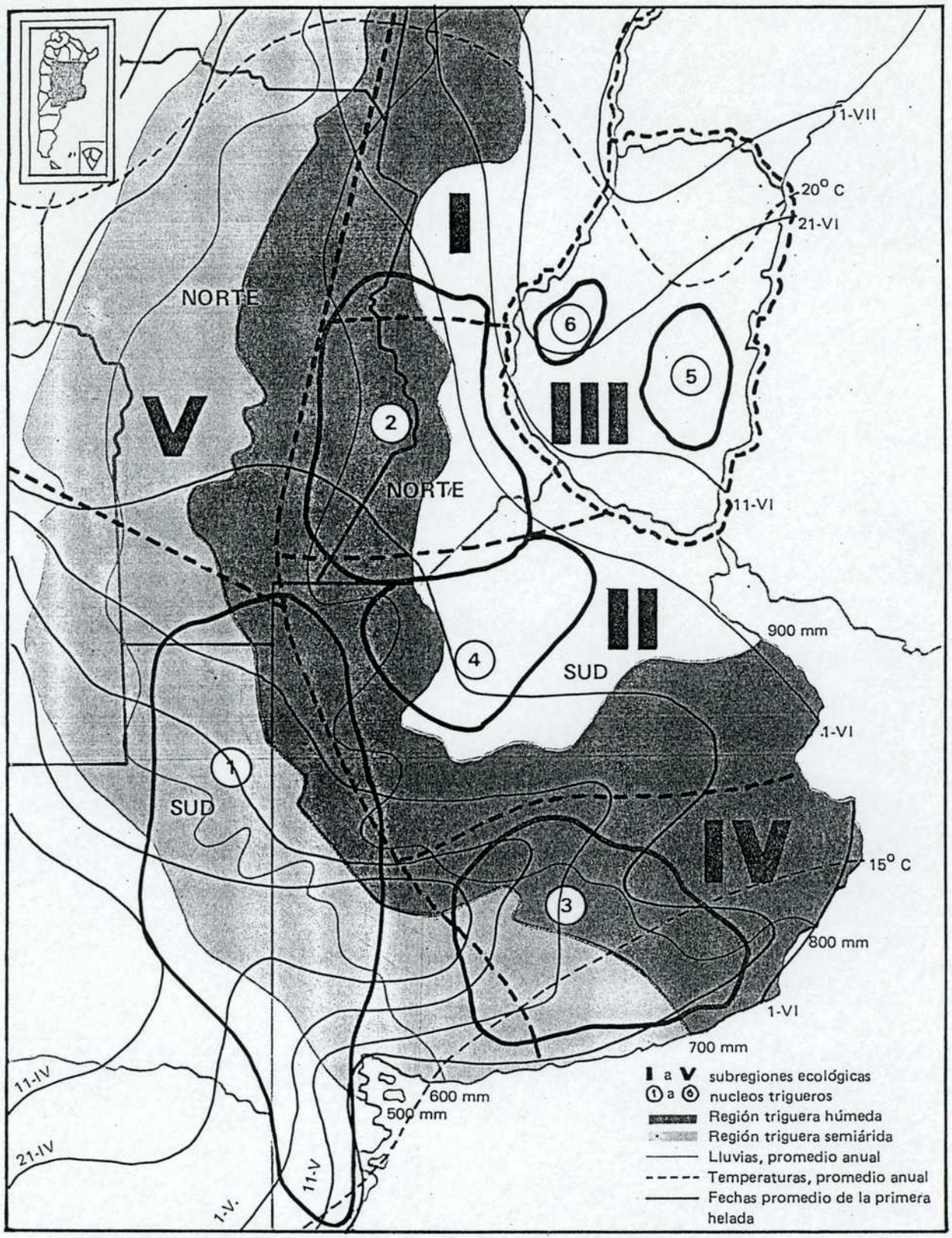

Figura 6. Subregiones ecológicas trigueras. (Fuente: INTA, 1981)

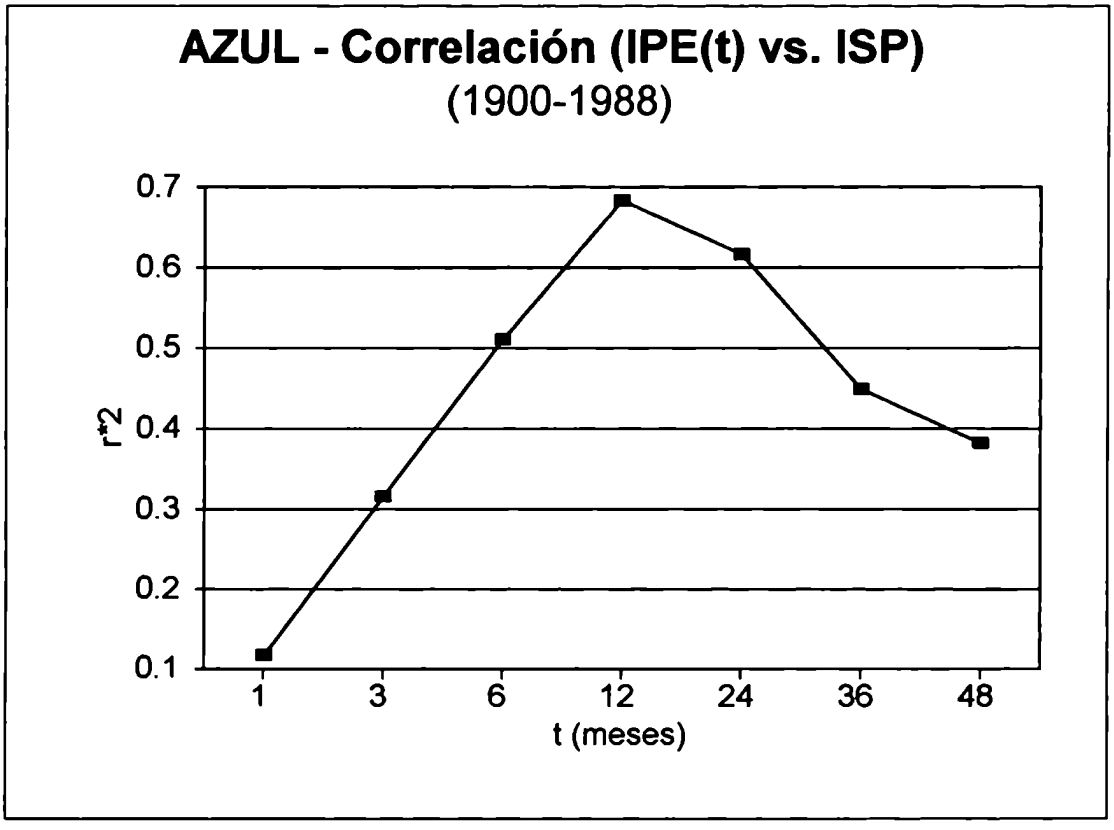

Figura 7. Correlación del IPE (t) con el ISP para Azul.

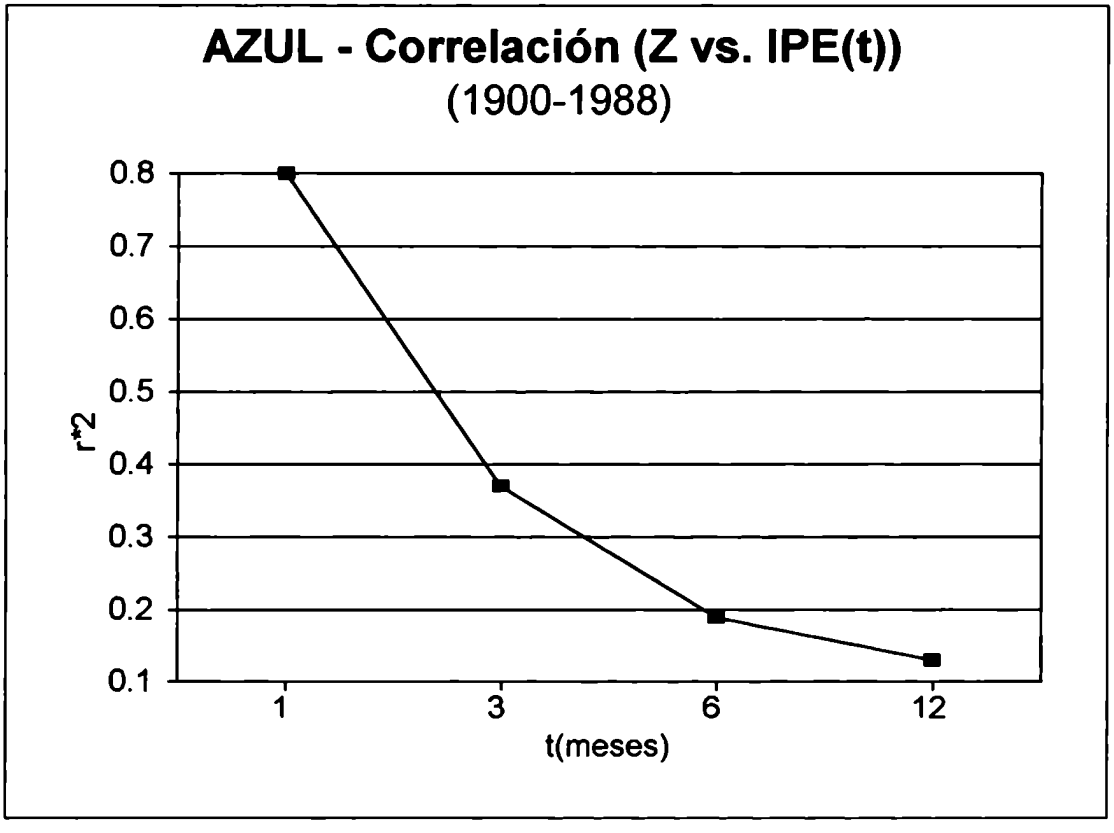

Figura 8. Correlación del IPE (t) con Z para Azul, 1900-1988.

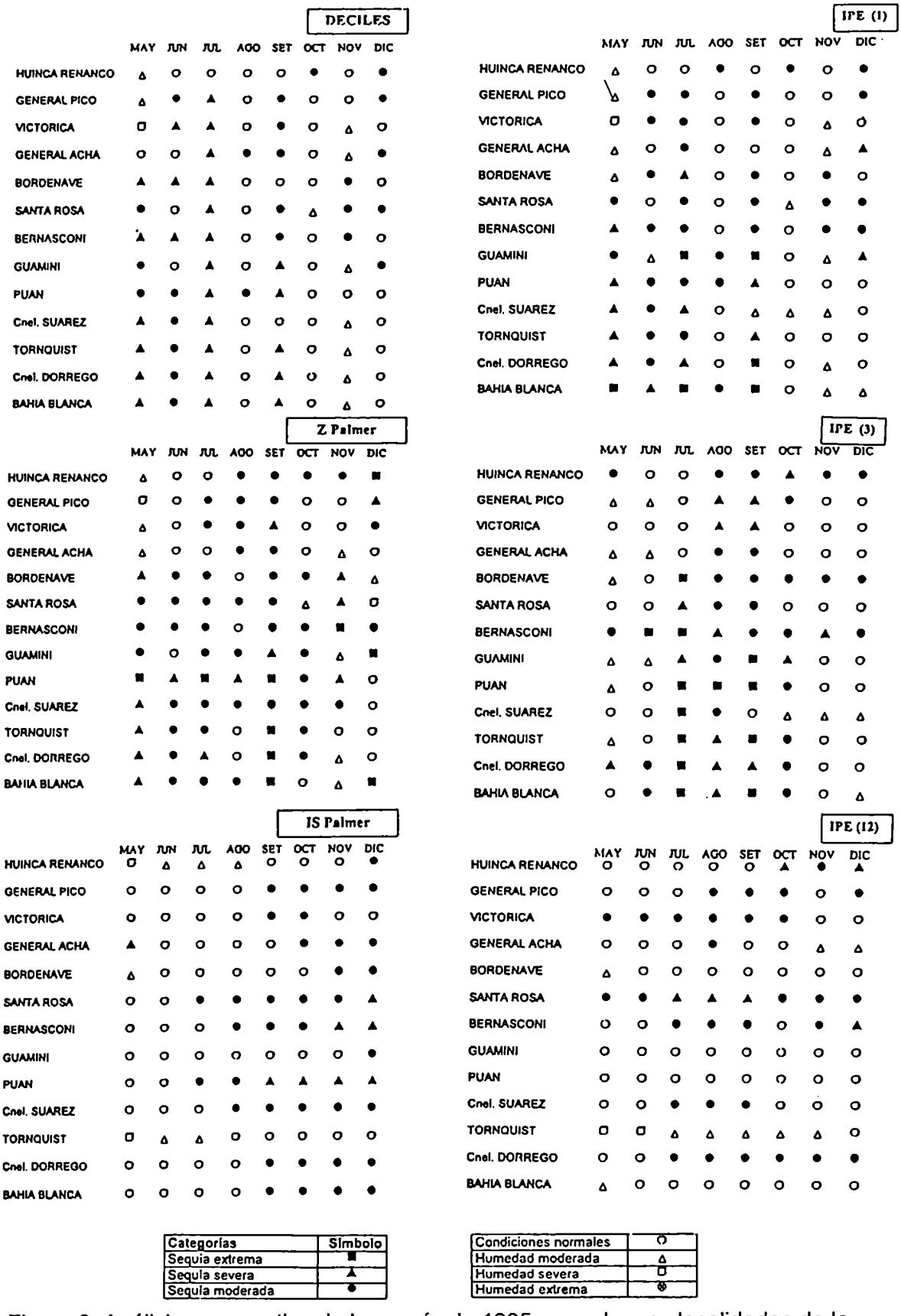

Figura 9. Análisis comparativo de la sequía de 1995 para algunas localidades de la región semiárida pampeana.

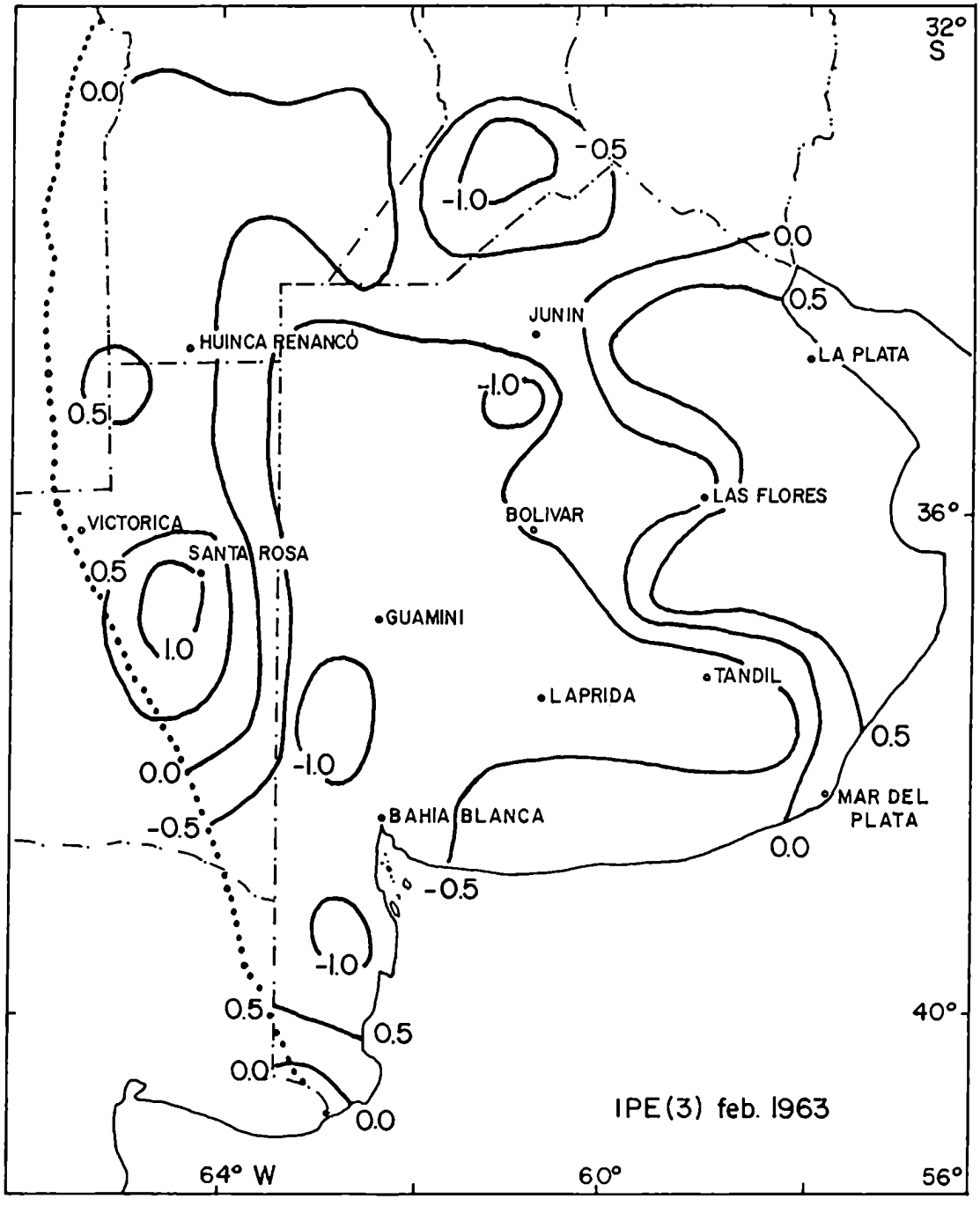

Figura 10. Distribución del IPE3, Feb 1963, en la región de la pradera pampeana. Categorías según la Tabla 4. Línea de puntos: límite del cultivo.

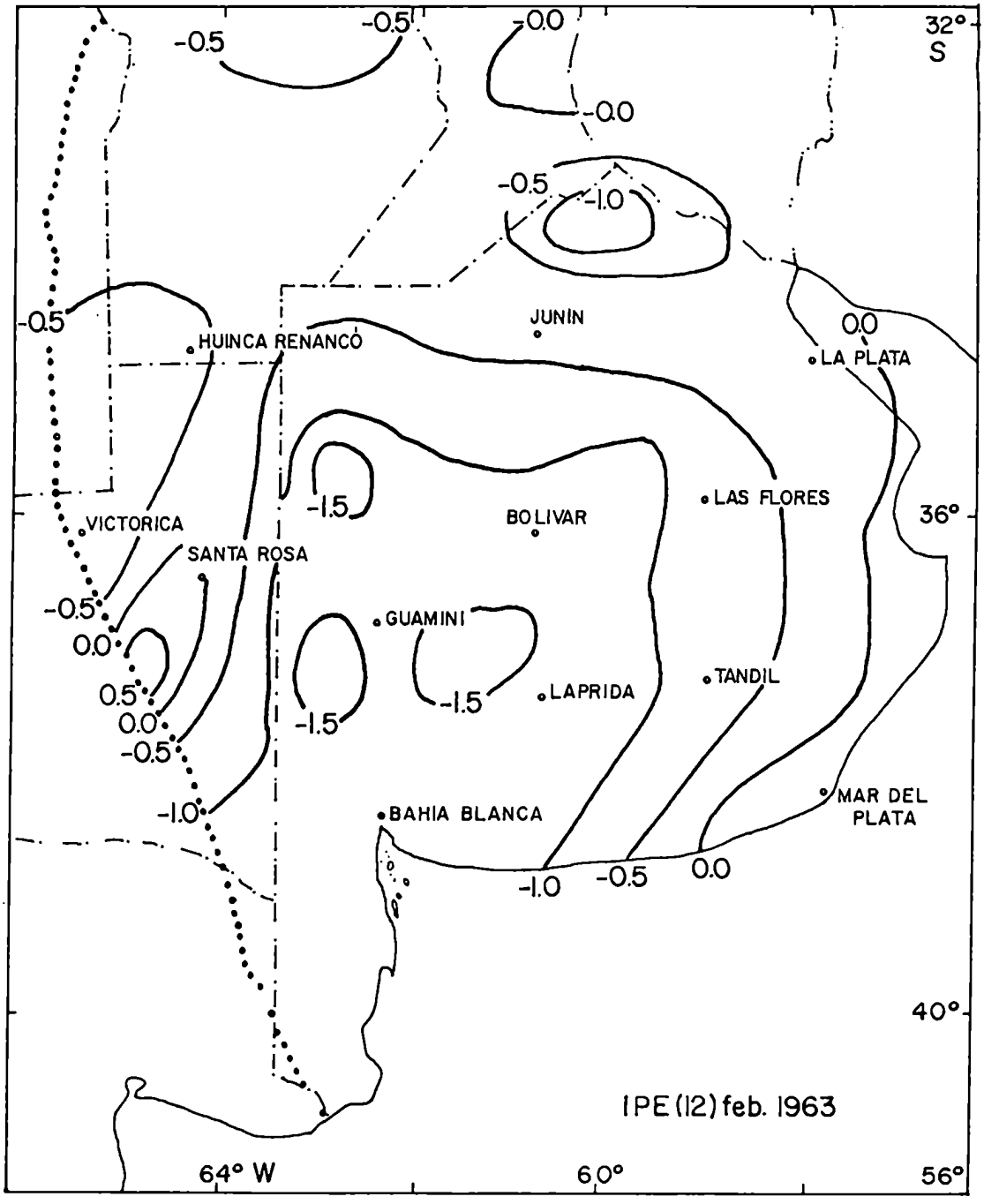

Figura 11. Idem Figura 10, para IPE12.

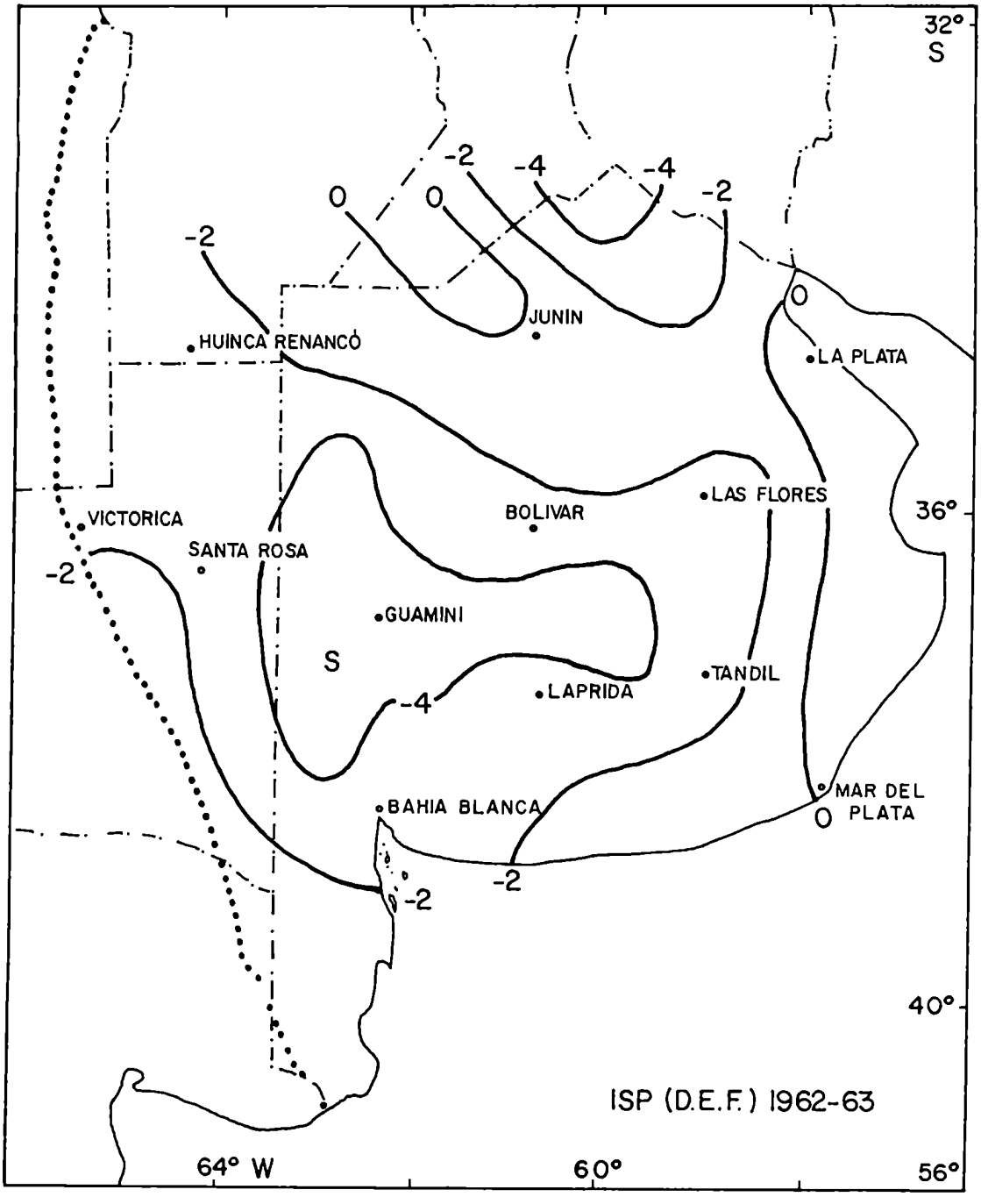

Figura 12. ISP medio, para el verano 1962/63.

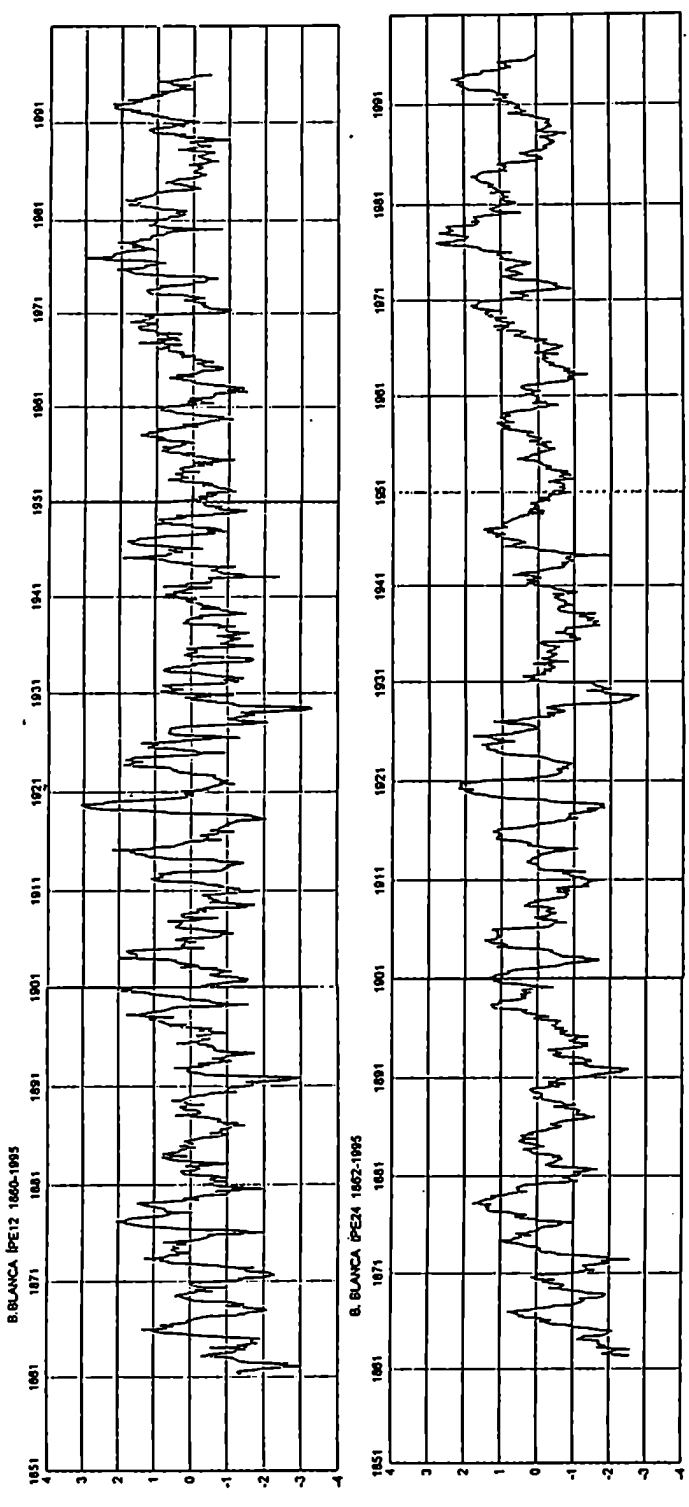

Figura 13. Serie temporal del IPE calculado para Bahía Blanca usando escalas de 12 y 24 meses, 1860-1995.

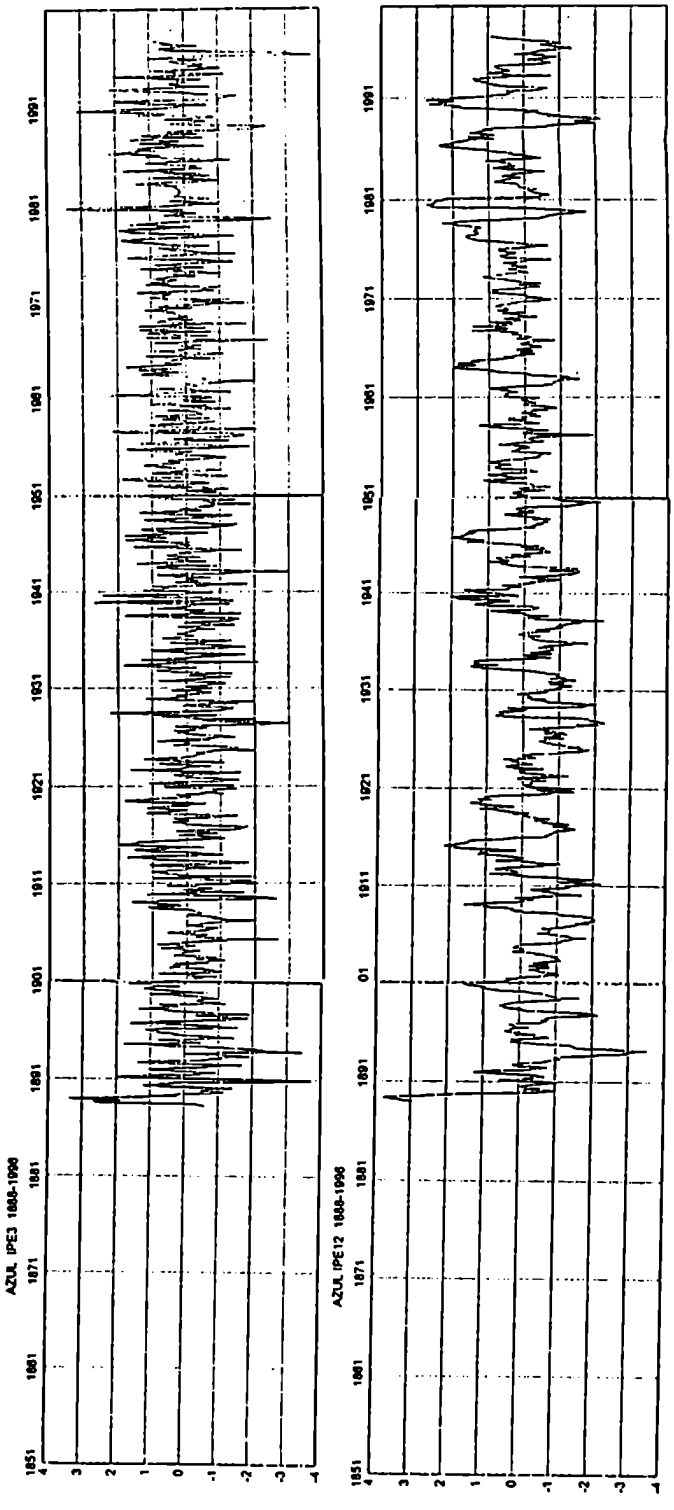

Figura 14. Serie temporal del IPE calculado para Azul con escalas de 3 y 12 meses, 1888-1996.

5. EPISODIOS ENSO EN LA PRADERA PAMPEANA

5.1 Asociando el IPE mediante Clusters.

Al emplear el método de Clusters a la variable IPE para una región física determinada de la Argentina se busca asociar localidades para delimitar subregiones que constituyan zonas homogéneas. Cada subregión estaría identificada por la serie media de anomalías de precipitación de las estaciones clasificadas con cierto criterio estructural pero sin la rigidez de límites estrictos o arbitrarios. En un principio se pensó seleccionar las localidades por división política, a nivel de provincia, dado que es más práctico para futuras relaciones con rendimientos de cosecha, área sembrada, etc., pero se consideró mas criterioso emplear el análisis por clusters pues asocia patrones de la variable con la mejor coherencia interna.

Para analizar las asociaciones se emplearon las series del IPE1 en localidades de la pradera pampeana y como de aquí en más se empleará la escala mensual se identificará siempre como IPE. La metodología se detalla en el punto 3.2.1 y en el Anexo II. En el punto 4. Indices Hídricos, se compara el IPE con otros índice hidrológicos y se comentan las ventajas de su uso.

Para aplicar el método de Clusters se formó la matríz de datos con 41 variables correspondientes a las localidades seleccionadas con el mayor registro de años posible. Se aplicó el método de k-medias para finalmente asociar las variables con un k=3, aunque previamente se hizo un tanteó con otros valores de k como ser: 4, 5 y 6. Este tanteo para elegir el criterio del k es bueno para mostrar distintas facetas de la estructura de las variables. Cuando se empleó una mayor partición (k=4, 5 ó 6) los resultados mostraron que se reducía sensiblemente el número de elementos en algunos clusters.

Los tres clusters resultaron formados por las localidades que se enumeran a continuación:

CLUSTER 1. (C1) 18 variables, a saber:

Gral Acha, Bahía Blanca, Bernasconi, Carhué, Cnel. Dorrego, Espartillar, Gral. Pico, Guaminí, Gral. La Madrid, Laprida, Patagones, Puan, Santa Rosa, Cnel. Suárez, Victorica, Tres Arroyos, Trenque Lauquen y Tornquist.

CLUSTER 2. (C2) 9 variables, a saber:

Casilda, Huinca Renancó, Laboulaye, M. Juárez, Pergamino, Río Cuarto, Rosario, Villa María y Villegas.

CLUSTER 3. (C3) 15 variables, a saber:

Azul, Balcarce, Bolívar, Buenos Aires, Chascomús, Chivilcoy, Dolores, Junín, Las Flores, Mar del Plata, 9 de Julio, Olavarría, Pehuajó, Saladillo y Tandil.

Las distancias encontradas entre clusters son: entre C1 y C2 :15.6; entre C1 y C3: 14.5; entre C2 y C3: 14.8. En el mapa de la Figura 15 se presentan las tres regiones obtenidas. Al cluster 1 se lo llamará región Sudoeste, al cluster 2, región Norte y al cluster 3, región Este. Como la finalidad del uso de clusters reside en el agrupamiento de las estaciones más afines para la obtención de las condiciones medias regionales se considera adecuado el resultado obtenido. En el caso elegido con k=3, cada cluster incluye más del 20% de las localidades involucradas. Aunque son poco diferenciadas entre sí en su estructura interna, cada cluster corresponde a diferentes regímenes en la precipitación.

Estos resultados demuestran que un método netamente estadístico logró manejar las variables asociando, con sentido físico, la distribución de la lluvia ya que éstas guardan relación con las regiones físicas de la llanura pampeana. Dentro de la bibliografía existen otras formas de subdividir esta región pero es interesante mencionar la que corresponde a una división ecológica basada en las características del suelo y en las condiciones climáticas de humedad y temperatura. Efectivamente, es la división de la Región Triguera Argentina en subregiones ecológicas, (INTA, 1981) donde la de mayor concentración en siembra es la subregión V-Sur junto con la II-Norte, la IV y la II-Sud. La ubicación geográfica se muestra en el mapa de la Figura 16 y conserva cierta semejanza con los tres clusters seleccionados, sobretodo entre la región semiárida o Sudoeste, con la V Sur.

Se aplicó un tratamiento de filtrado estacional a las series medias del IPE de cada región, lográndose distinguir una tendencia positiva a lo largo del período de estudio, como puede verse en los gráficos de la Figura 17 a), b) y c) con un ajuste por cuadrados mínimos. La tendencia lineal calculada para cada región es: Región Sudoeste: Tend1= 0.0379 por década, Región Norte: Tend2= 0.030 por década y Región Este: Tend3= 0.0244 por década. Debido a la no estacionariedad de las series cuando corresponde (análisis de correlaciones) se emplea la serie sin tendencia.

Corresponde una breve presentación de la climatología de la precipitación en términos de sus valores mensuales, en cada una de las tres regiones. Se observa que la onda media de precipitación tiene un máximo en Marzo y una estación seca en invierno entre Mayo y Setiembre, como puede verse en los gráficos insertados dentro de cada una de las regiones que muestra el mapa de la Figura 15. La mayor amplitud de la onda de precipitación es para la región Norte, explicada por su característica de región continental; los menores valores de precipitación anual media se dan en la región Sudoeste por ser la región limitante con la semiárida y la más húmeda es la región Este, por su posición litoral. En la región Sudoeste aparece levemente insinuado el doble máximo; el principal para Marzo y uno secundario para Noviembre.

A forma de resumen, en la Tabla 12 se presentan por región, los valores de la Precipitación anual media, Pam, para el record total de datos (columna 2) y para el período que comienza en 1941 (columna 3) así como la diferencia entre ambos, DP, (columna 4). También se incluye el total de las precipitaciones medias estivales (meses de Noviembre a Febrero) así como las precipitaciones acumuladas en el período de Junio a Diciembre para su posterior comparación.

Tabla 12. Precipitación anual media (Pam) en mm para dos períodos de información, su variación (DP) y cantidad acumulada promedio por estación del año, para las tres subregiones.

Subregión y Cantidad local	Pam (mm) Record Total	Pam (mm) Desde 1941	DP (mm)	Total Estío (mm) Nov a Feb-Prom	Total Inv-Pri (mm) Jun a Dic -Prom
Sudoeste (21)	610	670	60	265	316
Norte (12)	827	856	29	393	409
Este (17)	884	923	39	340	472

La región Sudoeste es la que mayor aumento ha experimentado en los últimos 50 años. Con el fin de comparar con algunos resultados de RH96 se calcularon las lluvias acumuladas en promedio para toda la región, promedio aritmético de los tres clusters, y para los períodos de los meses de verano (N-D-E-F) y de invierno y primavera, (Junio a Diciembre). Los valores obtenidos fueron de 330mm y 400mm, respectivamente. Si bien las regiones no coinciden con las de RH96, pues los autores delimitan el borde Norte hasta casi los 28° S, (ver Figura 3) los valores medios acumulados obtenidos aquí, concuerdan con los valores llamados "Base 1902" del período 1902-1992, a saber: 310mm para Nov(0)-Feb(+) y 425mm para Jun(0)-Dic(0), calculados para la llamada región Sudeste de Sudamérica (SESA).

5.2 Eventos ENSO cálidos (WE) y fríos (CE).

Siguiendo la metodología de KvL88 y otros, se analiza por región los casos de anomalías positivas en el IPE asociadas a eventos cálidos, (WE) y las anomalías negativas del IPE con los eventos frios, (CE) considerando los años de los episodios que figuran en la Tabla 3. Se toma como umbral para las anomalías del IPE los valores ± 0.5 σ.

5.2.1 WE

Dentro de cada región se compuso la serie de valores anuales promedio de las anomalías del IPE correspondiente a los meses de Noviembre del año en curso, Nov0, a Febrero del año siguiente, Feb+, que son los meses que constituyen el llamado evento cálido y que se reconocerá como W. Las Figuras 18, 19 y 20 muestran los resultados obtenidos, donde se ha marcado con W cada uno de los 21 eventos reconocidos en el presente siglo.

REGION SUDOESTE - Para la región Sudoeste se contabilizan 15 años con anomalías positivas sobre 21 eventos cálidos, (71.4%) pero sólo 5 superan el valor de 0.5 σ que corresponden a los años 11; 14; 18; 30 y 76. Hay 5 años W que le corresponden anomalías negativas y son el 02, 23, 39, 51 y 82. Sin embargo hay años que no son W con importantes anomalías positivas, (mayores que 0.5 σ) y son los años 66, 77, 84 y 85. Tanto el 66 como el 77 son años post-ENSO, pero no así el 84 y 85. Llama la atención la cantidad de anomalías negativas que superan el valor |-0.5 σ|; 11 casos. Los dos últimos años, 70 y 71 corresponden a años fríos o La Niña.

REGION NORTE. Analizando la región Norte, el 86% de los WE coinciden con anomalías positivas del IPE, de los cuales los más intensos (mayor que 0.5 σ) fueron el 14, 57, 72 y 76. Otros años que superan el valor de 0.5 σ son 19, 40, 46, 77, 81 y 83 de los cuales algunos son consecuentes con los WE 18, 39, 76 y 82, no así el 46 y el 81. Al igual que en la región Sudoeste, algunos WE tienen anomalía de precipitación negativa; son los años 05, 23, 39 y 51. En total hay 12 casos negativos intensos, los dos últimos en los años 49 y 88.

REGION ESTE. Por último, en la región Este son 15 los años WE con anomalías de precipitación positiva (71%), y 7 años intensos (mayor que 0.5 σ) a saber: 11, 14, 53, 57, 63, 72 y 76. Otros años que superan el valor 0.5 σ son: 40,

46, 77, 80 y 83, donde todos son continuación de WE de los años 39, 76, 79 y 82; salvo el 46. En esta región, como en la Norte aparece el año 46 con una importante anomalía positiva. En la bibliografía, Quinn y otros (1978) y Matarira y Unganai (1994), entre otros, consideran un Niño en 1946, pudiendo ser esta una explicación. Otros investigadores (Trenberth, 1996; Zhang y Levitus, 1997) marcan el año 1979 como un WE, lo que explicaría las anomalías del 80 en la región Este, no así las del 81 en la región Norte. Finalmente, los casos con anomalías negativas que corresponden a años definidos como WE son: 05, 18, 25, 39 y 82. Hay años con anomalías negativas intensas (menor que -0.5 σ) y son: 04, 06, 07, 10, 37, 42, 48, 49 y 56, donde los dos últimos no corresponden a un WE sino a un CE.

5.2.2 CE

De la misma forma que para los WE, se compuso la serie, año a año de los promedios del IPE para el período de Junio a Diciembre que constituye el llamado evento frío, CE. La serie compuesta se presenta en los gráficos de las Figuras 21, 22 y 23 donde se ha marcado con C al año correspondiente a cada evento frío.

REGION SUDOESTE. Para la región Sudoeste el 72% de los años correspondientes al fenómeno de "La Niña" presentan anomalías negativas del IPE. Los más intensos son el 10, 24 y 38. Hay 5 casos de CE con anomalías positivas: 04, 61, 64, 66 y 73 de los cuales todos son seguidos por años con anomalías negativas excepto el 66 que se continúa positivo por 3 años.

REGION NORTE. Se ve en la región Norte un 60% de anomalías negativas que coinciden con un CE y los años 10, 24 y 38 superan el valor límite junto con el 16 y el 37 que serían pre-ENSO.

REGION ESTE. Finalmente, para la región Este el 88% de los CE tienen anomalías negativas del IPE pero sólo dos años son intensas; el 10 y el 24 así como el 16 que sería pre-ENSO. Los años 50 y 61 tienen anomalías positivas pese a ser CE, pero son seguidos por años con anomalías negativas.

En general, para las 3 regiones los años más desfavorables en lo que se refiere a precipitación fueron los 16-17, 24 y 38 que correponden a CE, existiendo otros eventos secos pero siempre de menor intensidad y algunos no pertenecen a CE. También se observa que las anomalías positivas intensas en estos episodios se dan a lo largo de todo el siglo. En cuanto a las anomalías negativas no parecen ocurrir en

forma intensa, al menos durante la segunda mitad del siglo. Los picos negativos intensos (menores a -0.5 σ) se ven hasta la década del '30, sin embargo se sabe que la sequía de 1995 tuvo características de condiciones severas para, al menos, algunas localidades de la región Sudoeste, como se comenta en el punto 4.

5.3 Evolución en las anomalías de lluvia

5.3.1 Anomalías de lluvia según WE y CE

Una forma de identificar la marcha de las anomalías de la precipitación bajo casos de episodios Cálidos y Fríos es mediante la evolución de las anomalías del IPE para cada una de las regiones. Se formó la serie de los promedios estacionales del IPE de manera que MAM(0) , Marzo, Abril, Mayo, identifica al trimestre previo a la instalación de un evento y corresponde al mes de Abril; AMJ(0) es el promedio del trimestre Abril-Mayo-Junio y se lo asigna a Mayo, y así hasta OND(1) que es el trimestre Octubre-Noviembre-Diciembre(1) del año siguiente al del evento. De esta manera se superponen meses para evitar se enmascare alguna similitud que pueda existir en los meses entre estaciones correlativas, como ser el mes de Diciembre en OND(0) y el mes de Enero en EFM(1).

La marcha de las anomalías por región se muestra en las Figuras 24, 25 y 26. Estas series evidencian que las repercusiones más fuertes en las anomalías de la precipitación ocurren al final de la primavera y alcanzan sus valores picos en el verano, tanto los WE como los CE. Para OND(0) y NDE(1) las anomalías alcanzan valores de -0.3 y +0.3, respectivamente. Luego se debilitan y cambian de signo. Pese a tener el suavizado de tres meses se observa un segundo pico en la región Norte, en JJA(1), para el caso de los WE, y en FMA(1) para los CE. En dichas figuras, se incluye la serie promedio de los años restantes, o sea los años que no clasifican como Niño o Niña, los no-ENSO. Los valores oscilan alrededor de cero y no superan el ± 0.1. Los rasgos principales observados son los desfasajes entre las dos curvas, donde el extremo seco se produce en Noviembre mientras que el húmedo es en Diciembre. Hay otro pico secundario a 4-5 meses del seco y a 7 meses del húmedo.

5.3.2 Cambios a lo largo del Siglo

Algunos autores consideran que en la región, a partir de 1956 hubo un aumento en las tendencias positivas de la precipitación (Castañeda y Barros, 1994;

Barros y otros, 1996) y que el mismo se relaciona con cambios en las tendencias de algunos índices hemisféricos, como el SOI y en mayor medida con el gradiente meridional medio de temperatura. Según el comportamiento descripto en 5.2 y siguiendo a estos últimos autores, se dividió el período de estudio en dos subperíodos. Se calcularon los valores medios del IPE por regiones y para a) el número total de episodios cálidos (21) y fríos (18), b) los episodios cálidos antes de 1956, (WE=13), y de 1957 en adelante (WE=8) y c) los episodios fríos antes de 1956 (CE=10) y después de 1956 (CE=8).

En la Tabla 13 se resumen los resultados obtenidos. Se observa que las anomalías de la precipitación para todos los episodios cálidos de este siglo son mayores en la región Sudoeste, sin embargo considerando sólo el segundo período, se nota un mayor incremento en la región Este. Con respecto a las deficiencias relacionadas con los episodios fríos, las anomalías para el período total son menores en valor absoluto que las de episodios cálidos y menor también, su intensidad para la región Norte.

Tabla 13. IPE medio y desvío estándar (DE) por región y por número de eventos cálidos (WE) y fríos (CE), * diferencia de medias significativa.

Regiones	IPE/S-O	DE	IPE/Norte	DE	IPE/Este	DE	N Eventos
Prom WE Total	0.2697	0.509	0.2124	0.444	0.2451	0.454	WE(21)
Prom WE hasta '55	0.2158	0.528	0.1107	0.461	0.1335	0.476	WE(13)
Prom WE desde '56	0.3574	0.479	0.3776	0.418	0.4266	0.417	WE(8)
Prom CE Tot	-0.2065	0.606	-0.1008	0.652	-0.1989	0.572	CE(18)
Prom CE hasta '55	-0.3470*	0.535	-0.1821	0.647	-0.2551	0.538	CE(10)
Prom CE desde '56	-0.0011*	0.695	0.0008	0.658	-0.1288	0.613	CE(8)

Estos resultados son otra forma de corroborar las tendencias crecientes en las precipitaciones durante el período de estudio. Para los 8 WE desde 1956, en las tres regiones, las anomalías positivas de precipitación superaron y casi duplicaron los valores medios. Durante los 8 CE a partir de 1956 las anomalías negativas no se intensificaron sino que por el contrario, se debilitaron a tal punto que en la región Norte el IPE medio cambia de signo. Este comportamiento evidencia que existen procesos que influyen en forma más contundente que el ENSO, (Barros y Doyle, 1998).

5.4 Correlaciones espaciales y temporales del IPE con el SOI y la SST3

Como se menciona en 5.3.1 los extremos en las series del IPE compuestas para los casos Niño y Niña se presentan en las estación OND(0) y en NDE(1). Debido a ello

se prefirió analizar para cada uno de los meses de la época estival las correlaciones entre las anomalías del IPE y las series del SOI mensual. Para ello, cada serie del IPE correspondiente a cada una de las tres regiones se descompuso en subseries, para cada uno de los meses de Octubre a Febrero. Estas series usadas en la correlación con el SOI mensual o con la SST3, están formadas por valores separados 12 meses. Por ejemplo: la serie del IPE de Enero está formada por todos los Eneros de los n años del record, para evitar meses secuenciales que afecten los grados de libertad.

Los resultados demuestran que la relación entre el SOI y las anomalías de precipitación mensual son significativas estadísticamente para algunos casos,como lo muestran los coeficientes de correlación con el SOI se presentan en la Tabla 14 a), b) y c) para cada subregión. Los meses de Enero y Febrero no correlacionan en forma significativa.

Tabla 14. Matriz de correlación de los valores mensuales del SOI y el IPE. Los valores subrayados son significativos al nivel del 5%.

a) Región Sudoeste

SOI / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	.05	-.08	-.01	-.08	-.09	-.14	-.21	-.14	-.10	-.00	-.17
Nov	.17	.04	-.00	-.17	-.18	**-.28**	**-.24**	**-.25**	-.14	-.12	-.19
Dic	-.07	**-.23**	-.10	**-.26**	**-.45**	**-.44**	**-.56**	**-.37**	**-.31**	**-.28**	**-.41**

b) Región Norte

SOI / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	.10	.03	.07	-.01	-.10	-.15	-.16	-.11	-.09	-.15	-.09
Nov	-.14	**-.21**	-.03	**-.29**	-.18	**-.31**	**-.45**	**-.40**	**-.34**	**-.26**	**-.36**
Dic	-.18	**-.25**	**-.22**	**-.31**	**-.42**	**-.42**	**-.48**	**-.42**	**-.36**	**-.23**	**-.46**

c) Región Este

SOI / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	-.07	-.13	-.14	-.15	-.12	-.14	-.20	-.17	-.20	-.13	-.16
Nov	-.12	-.19	-.11	**-.26**	-.18	**-.28**	**-.28**	**-.34**	**-.32**	**-.25**	**-.30**
Dic	-.06	-.18	-.10	**-.28**	**-.45**	**-.44**	**-.46**	**-.33**	**-.27**	**-.22**	**-.39**

El signo negativo indica que SOI negativos conducen a anomalías positivas de la precipitación mientras que SOI positivos tienen el efecto contrario. En todos los casos el mes de mejor asociación es Diciembre. Los picos extremos de correlación corresponden a los meses de Junio, Julio y Agosto en las regiones Sudoeste y Este mientras que en la región Norte se extienden hasta Setiembre, con valores menores a

-0.40. También en esta región, el IPE del mes de Noviembre se relaciona fuertemente con el SOI de Agosto y Setiembre. El valor pico de r(x,y) es -0.56, correspondiente al SOI de Agosto con IPE de Diciembre en la región Sudoeste.

En forma semejante se analizó la matriz de correlación entre el IPE mensual y la serie de valores mensuales de la SST3. Los resultados se muestran en la Tabla 15 a), b) y c) donde nuevamente los meses de Noviembre y Diciembre son los que se correlacionan en forma significativa con la SST3 de Otoño, Invierno y Primavera.

Tabla 15. Matriz de correlación de los valores mensuales de SST3 y el IPE. Los valores subrayados son significativos al nivel del 5%.

a) Región Sudoeste

SST3 / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	.02	-.02	-.13	.07	.14	.03	-.07	.11	.05	.09	.06
Nov	-.15	-.11	-.02	-.05	.10	.31	.27	.29	**.38**	**.38**	**.37**
Dic	.06	.08	.18	.22	**.37**	**.37**	.28	.32	.31	**.37**	**.36**

b) Región Norte

SST3 / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	-.04	-.10	-.08	-.01	.09	-.08	-.14	-.11	-.09	-.09	-.03
Nov	.23	**.33**	**.38**	**.42**	**.53**	**.57**	**.54**	**.56**	**.58**	**.53**	**.56**
Dic	.09	.22	.21	.20	**.38**	**.37**	**.31**	**.35**	**.29**	**.34**	**.31**

c) Región Este

SST3 / IPE	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Oct	-.00	.01	.06	.18	.23	.15	.10	.18	.16	.19	.20
Nov	.16	.18	.18	.15	.24	**.42**	.28	**.37**	**.36**	**.40**	**.34**
Dic	.11	.26	.31	**.39**	**.53**	**.58**	**.56**	**.44**	**.43**	**.38**	**.37**

Los coeficientes tienen signo positivo y valores máximos de 0.38 para la región Sudoeste y 0.58 para las regiones Norte y Este. Estos resultados parecen indicar que mientras el SOI se relaciona más fuertemente con las anomalías de precipitación en la región Sudoeste, la SST3 lo hace en la parte Este y Norte. Por los altos valores de correlación, estos resultados ya están indicando la posibilidad para algunos meses, de la utilización de modelos de predicción mediante regresiones lineales.

Se analizaron las funciones de correlación cruzada entre el SOI como conducente y cada una de las tres series del IPE sin tendencia. La persistencia en dichas series es tan débil que pese a la estructura autoregresiva en la serie del SOI o de la SST3 (Trenberth y Shea, 1987), puede confiarse en los resultados de las

correlaciones entre series pues una de ellas consiste sólo en ruido blanco, la del IPE. Si ambas series a correlacionar tuvieran estructura autoregresiva, entonces sí, se vería afectado el número de grados de libertad (Greenhut, 1979) que a su vez, afectaría el resultado de la aplicación de los test estadísticos pudiendo llegar a rechazarse en forma errónea la hipótesis nula, que el coeficiente de correlación es cero, con una probabilidad mayor que la fijada como nivel de significación.

Los resultados muestran valores significativos máximos de r, para un retardo de un mes en la región Sudoeste, r(SOI,IPESudoeste,1) = -0.135 con un error estandard estimado como ruido blanco, EE= 0.029. Para las otras dos regiones los mayores valores de los coeficientes se observan para un retardo nulo y los valores son: r(SOI,IPENorte,0) = -0.112, EE=0.030 y r(SOI,IPEEste,0)= -0.118, EE=0.030. La diferencia en los errores de estimación se debe a que la serie de la región Sudoeste es levemente más larga que las otras dos, N1=1152, N2=N3=1068.

Las funciones de correlación cruzada entre la SST3 y las series del IPE también tienen coeficientes significativos débiles y los mayores valores son para un retardo de un mes en el caso de la región Sudoeste y Este. La región Norte no acusa coeficientes significativos. Los valores obtenidos son: r(SST3,IPESudoeste,1) = 0.132 y r(SST3,IPEEste,1) = 0.130, EE= 0.045. Los diferentes errores de estimación se deben a que la serie de SST3 es más corta que la del SOI, comienza en el año 1949.

5.5 Comentarios sobre los resultados

A las tres subregiones, Sudoeste, Norte y Este, en que fue dividida la región de la pradera pampeana después de la aplicación del método Clusters, se las analizó a través de las series media areales de las anomalías de la precipitación estandarizada. Dichas series fueron compuestas para los meses que conforman un Evento Cálido, WE en un total de 21 en el lapso de estudio, y un Evento Frío, CE en un total de 17. La mayor parte de los WE se asocian a anomalías positivas de lluvia, si bien se observan varios eventos W con anomalías negativas. Para los episodios fríos ocurre lo inverso. En ambos casos hay picos intensos que no correponden a un ENSO. Cuando se analiza la marcha a lo largo de los meses, desde la instalación del fenómeno, se observa un comportamiento notable de lo que ocurre durante estos eventos: los dos fenómenos no impactan sobre las anomalías de lluvia de la misma forma ya que no tienen su valor extremo en el mismo mes, en un WE es Diciembre y en un CE es Noviembre. Además, se produce un segundo pico al año siguiente de haberse

establecido el ENSO. En el caso positivo, a los 5-6 meses después del pico de NDE. En las anomalías negativas el segundo pico se produce a los 3-4 meses del pico de OND y es más intenso, como en el caso de la región Norte. Rasmusson y Carpenter (1982), destacan un comportamiento parecido en una localidad costera (Pto. Chicama, Perú) que muestra un máximo principal intenso en Mayo-Junio seguido por un segundo pico también intenso a los 7 meses (Diciembre o Enero).

Las correlaciones entre el índice de Oscilación del Sur y las anomalías de lluvia mensual tienen valores significativos al nivel del 5% y signo negativo para Junio, Julio y Agosto (JJA) del SOI con las lluvias de los meses de Noviembre y Diciembre. Así que, los picos míninos/máximos del SOI en invierno (JJA), significan anomalías positivas/negativas de la precipitación en el comienzo del verano siguiente (Nov-Dic). Enero y Febrero no correlacionan. Estos resultados se basan en los eventos Niño hasta 1988. Sin embargo, si se tiene en cuenta el máximo de lluvia de Enero de 1998, al menos para la región Sudoeste, dentro del último evento cálido (El Niño 97), queda planteada la duda sobre los cambios en los episodios ENSO, pues, al menos hasta los Niños considerados, Enero no era un mes que sintiese el impacto de El Niño.

Al realizar las correlaciones cruzadas entre las series temporales del IPE sin tendencia, con el SOI y la SST3 respectivamente, se muestra que la relación es muy débil. Los coeficientes son sensiblemente pequeños (0.135) con un atraso de un mes apenas visible o nulo, según la región.

No hay duda que uno de los resultados más destacados son las importantes correlaciones espaciales entre el SOI, la SST3 y las anomalías de lluvia. En particular, establece que el SOI desde Junio puede ser un buen predictor de las condiciones de precipitación en Noviembre y Diciembre, para la región pampeana.

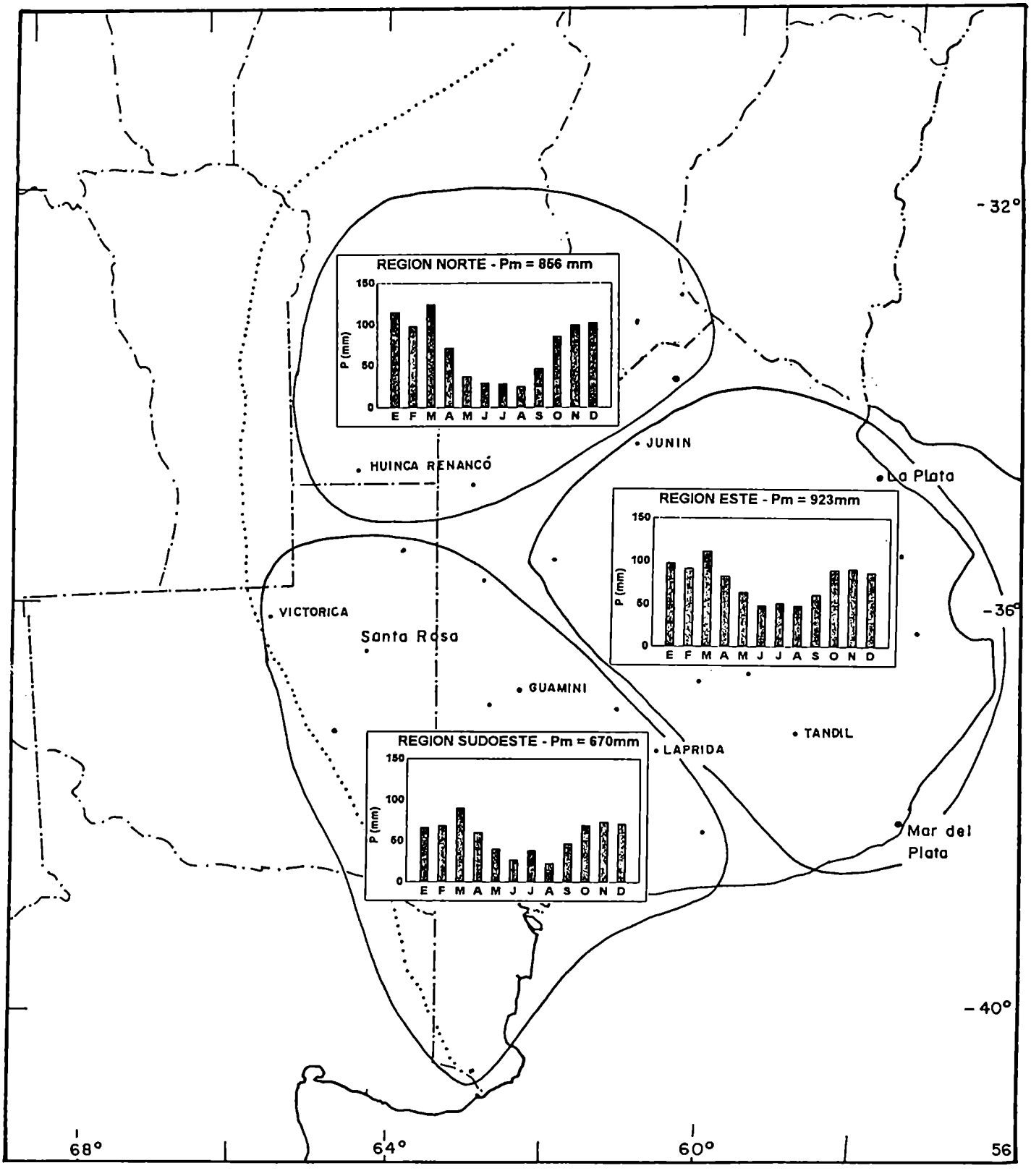

Figura 15. Regiones de la pradera pampeana determinadas por el método de clusters para las anomalías de precipitación mensual y régimen de precipitación por región. Línea de puntos: límite del cultivo.

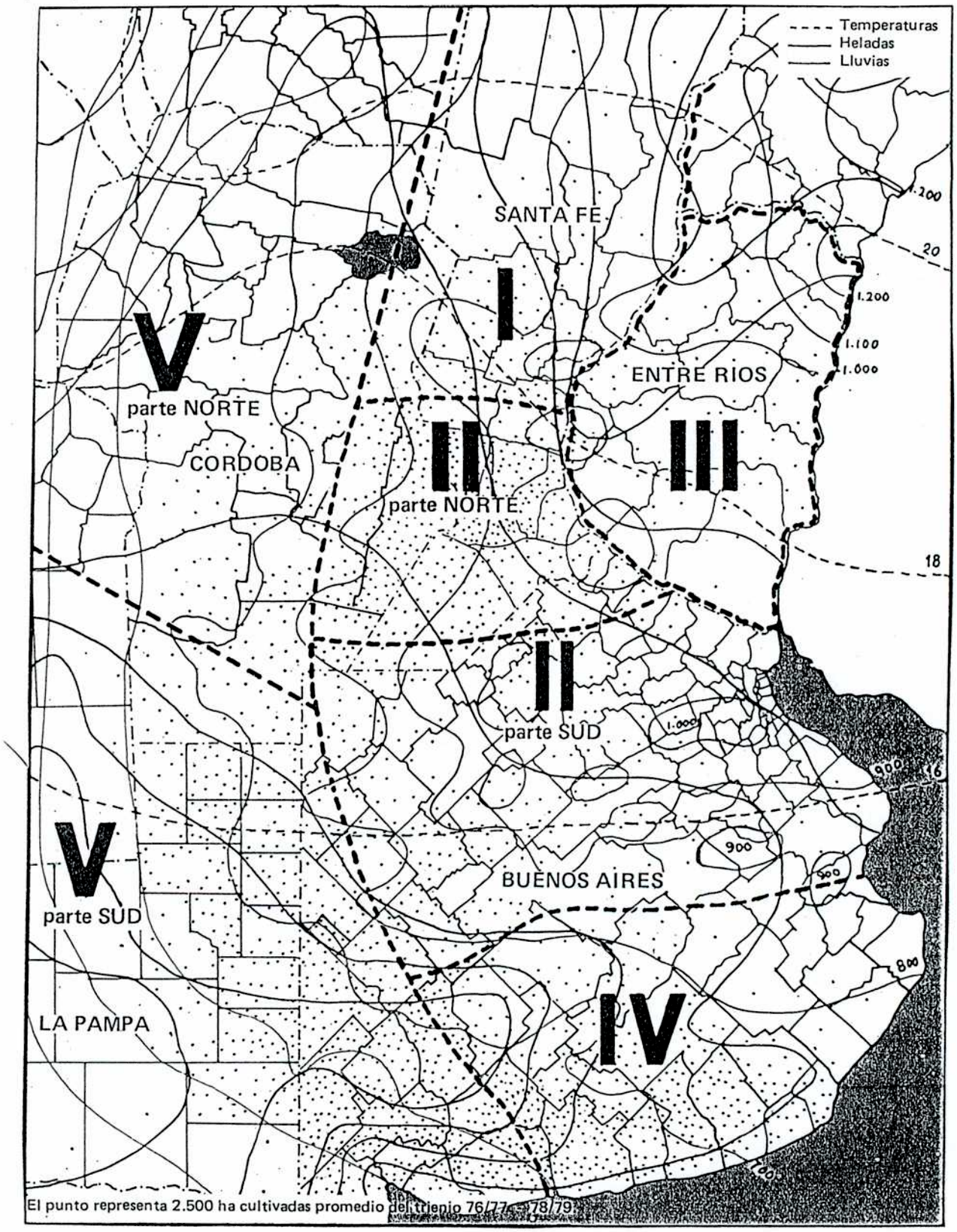

Figura 16. Región Triguera Argentina, concentración en siembra (Fuente: INTA, 1981)

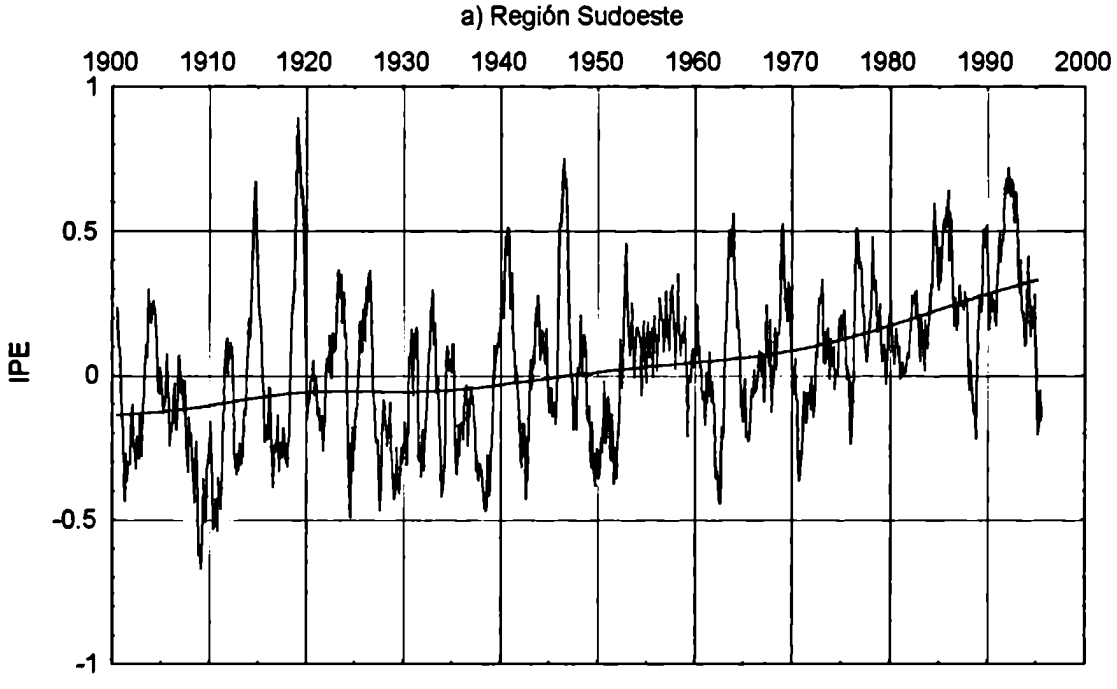

Figura 17. Serie de promedios móviles con filtro de 12 meses para el IPE y ajuste por cuadrados mínimos para a) Región Sudoeste, b) Región Norte y c) Región Este.

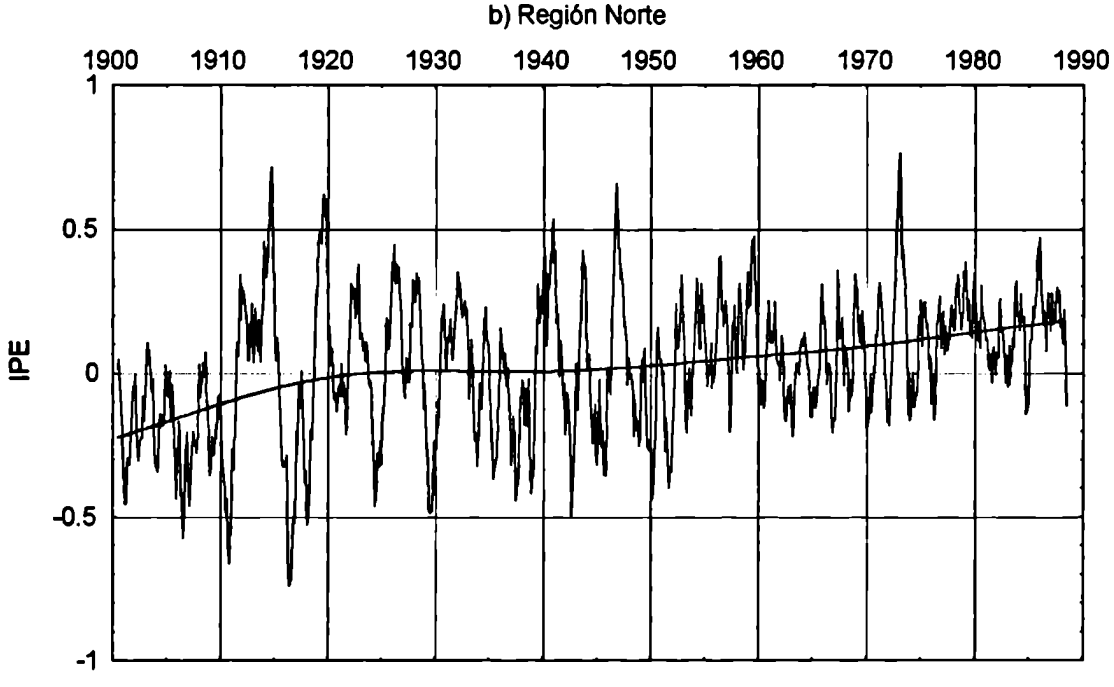

Figura 17. Cont.)

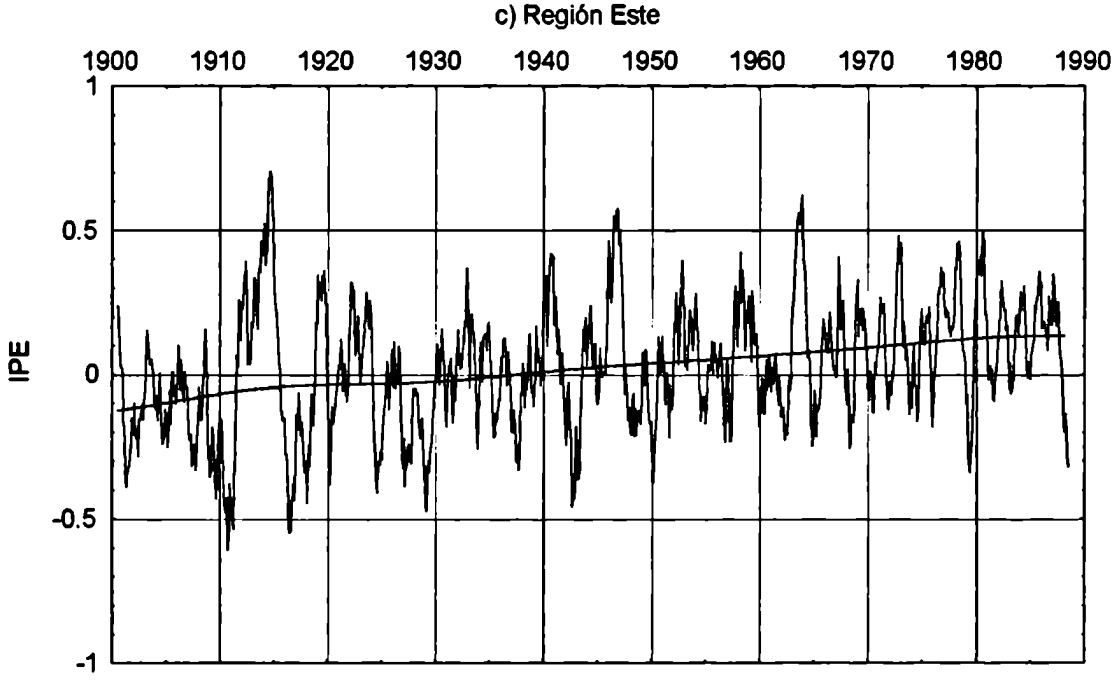

Figura 17. Cont.)

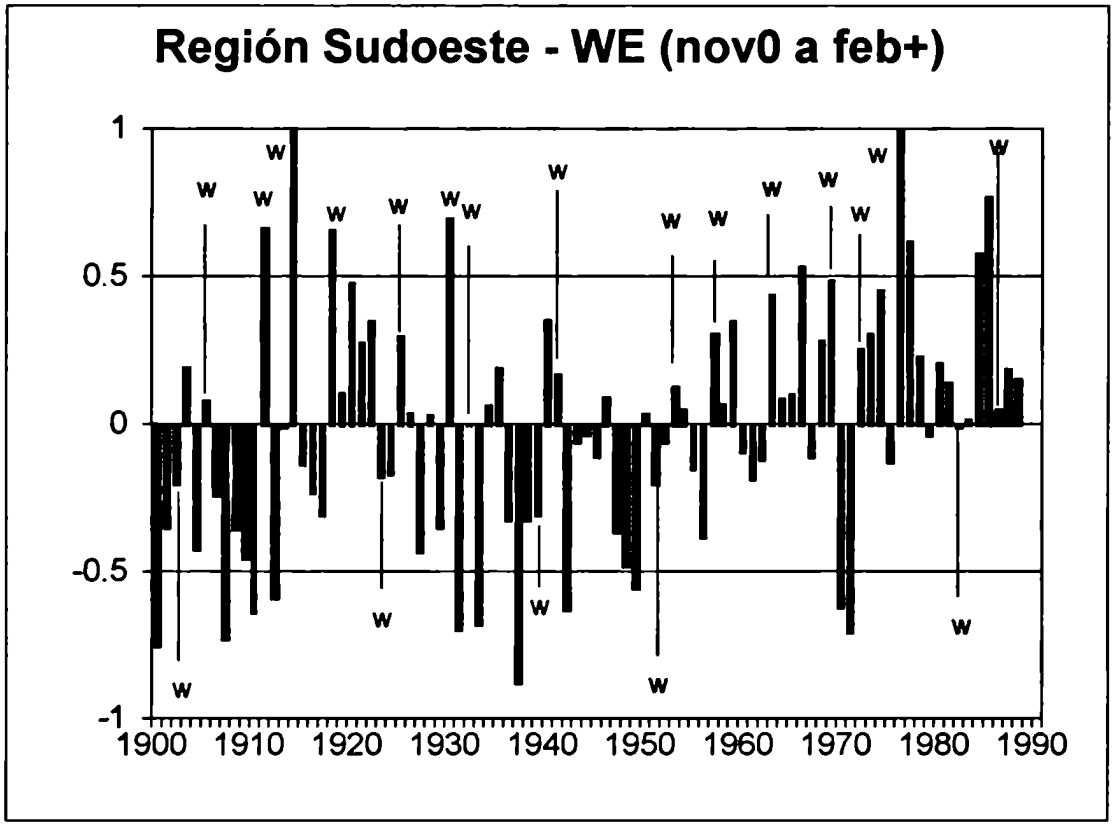

Figura 18. Anomalías de la precipitación para los meses nov0 a feb+, definidos según RH96, para la región Sudoeste. Los años WE se indican con W.

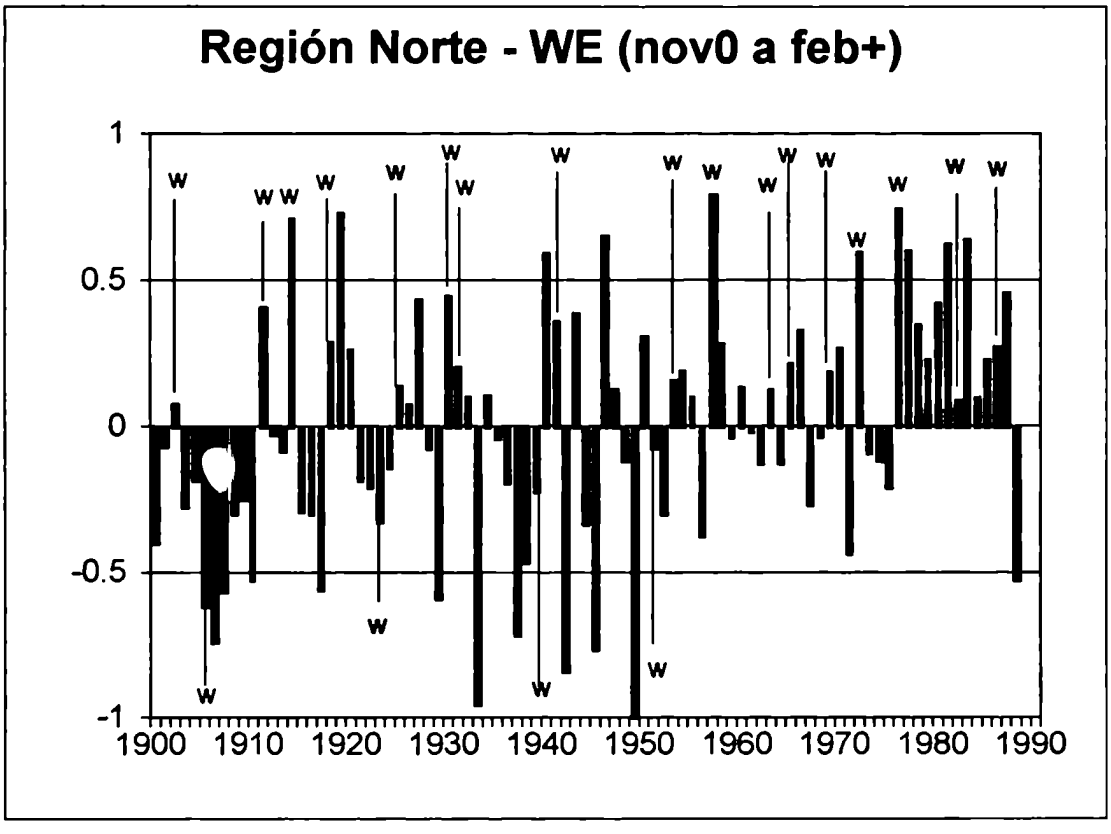

Figura 19. Idem Figura 18, para la región Norte.

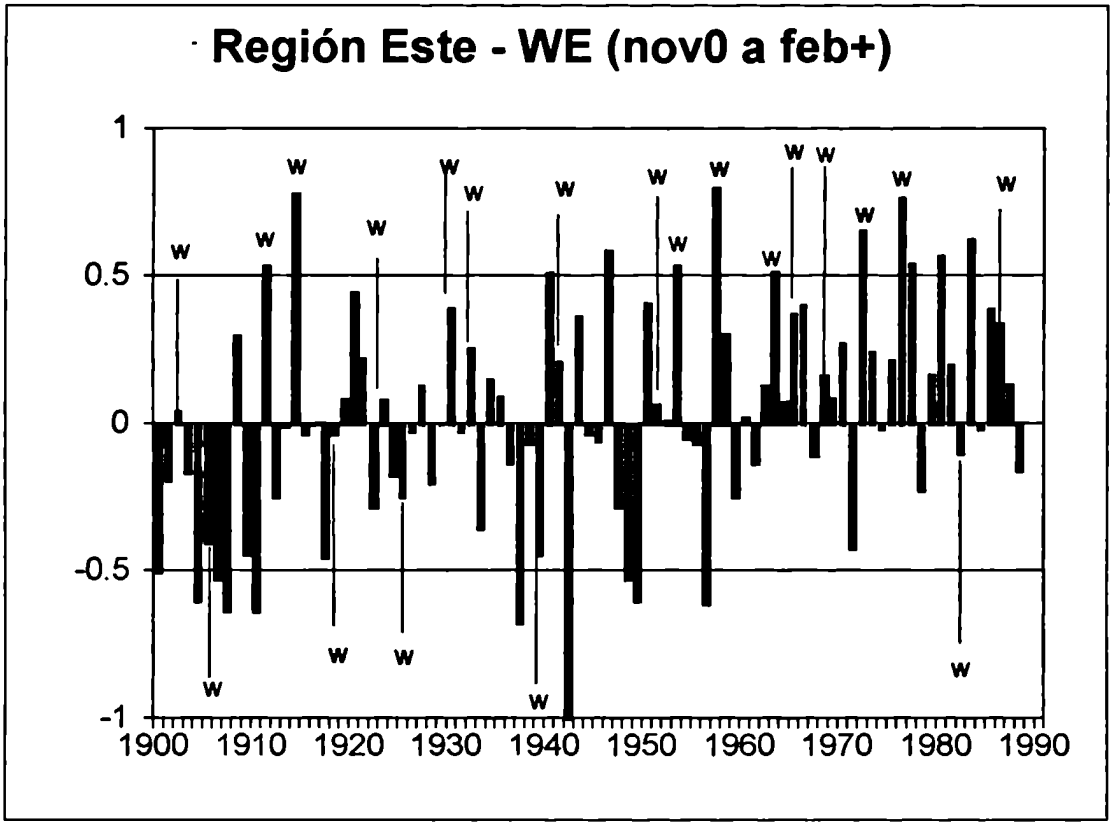

Figura 20. Idem Figura 18, para la región Este.

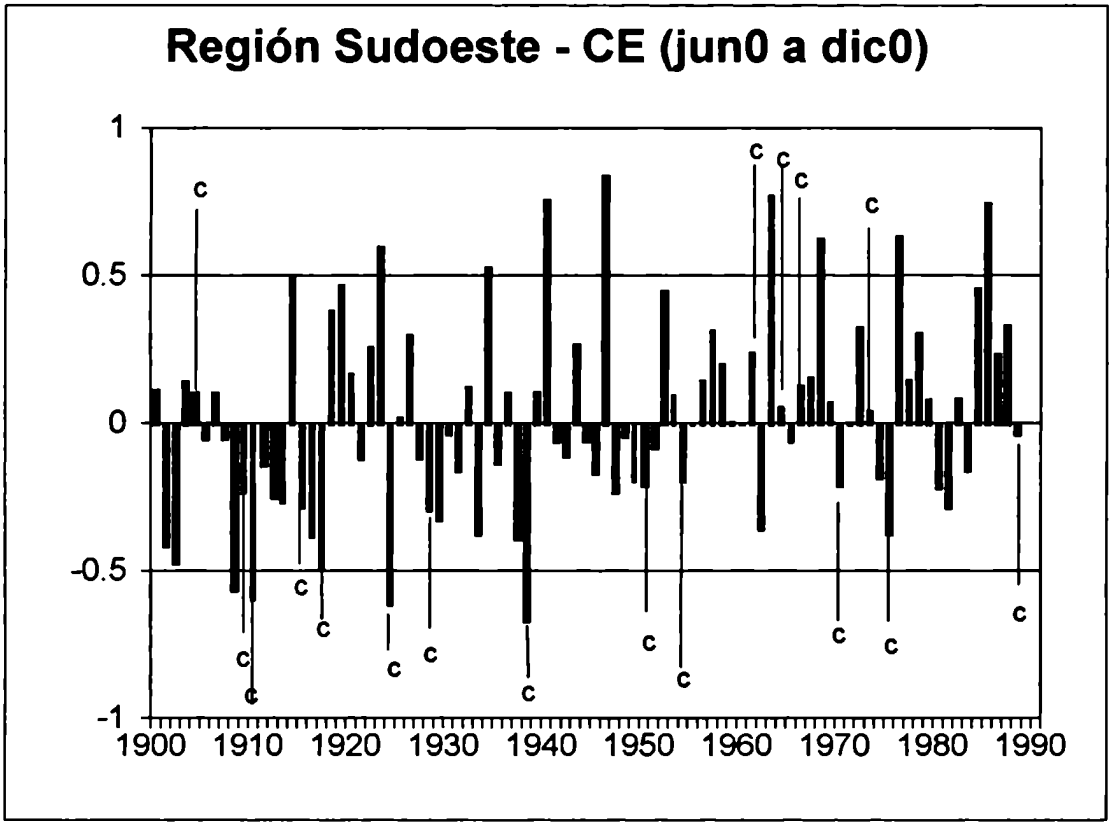

Figura 21. Anomalías de la precipitación para los meses de jun0 a dic0, definidos según RH96, para la región Sudoeste. Los años CE se indican con C.

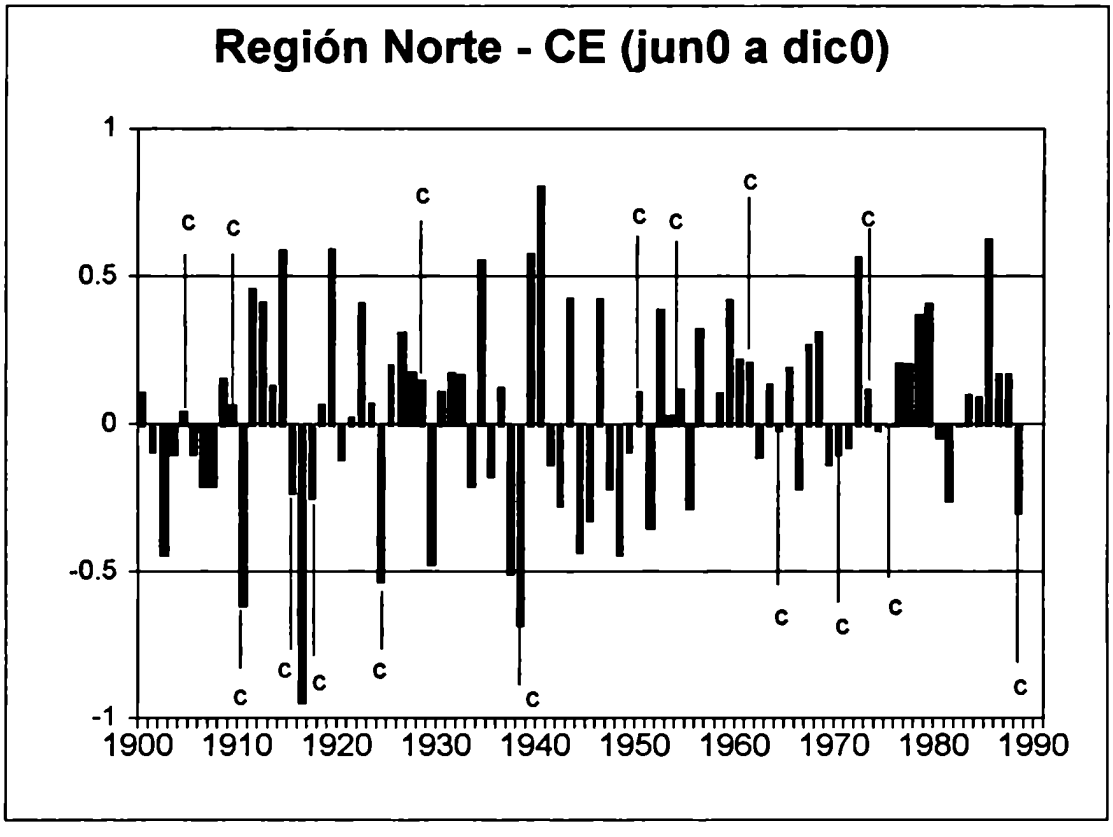

Figura 22. Idem Figura 21, para la región Norte.

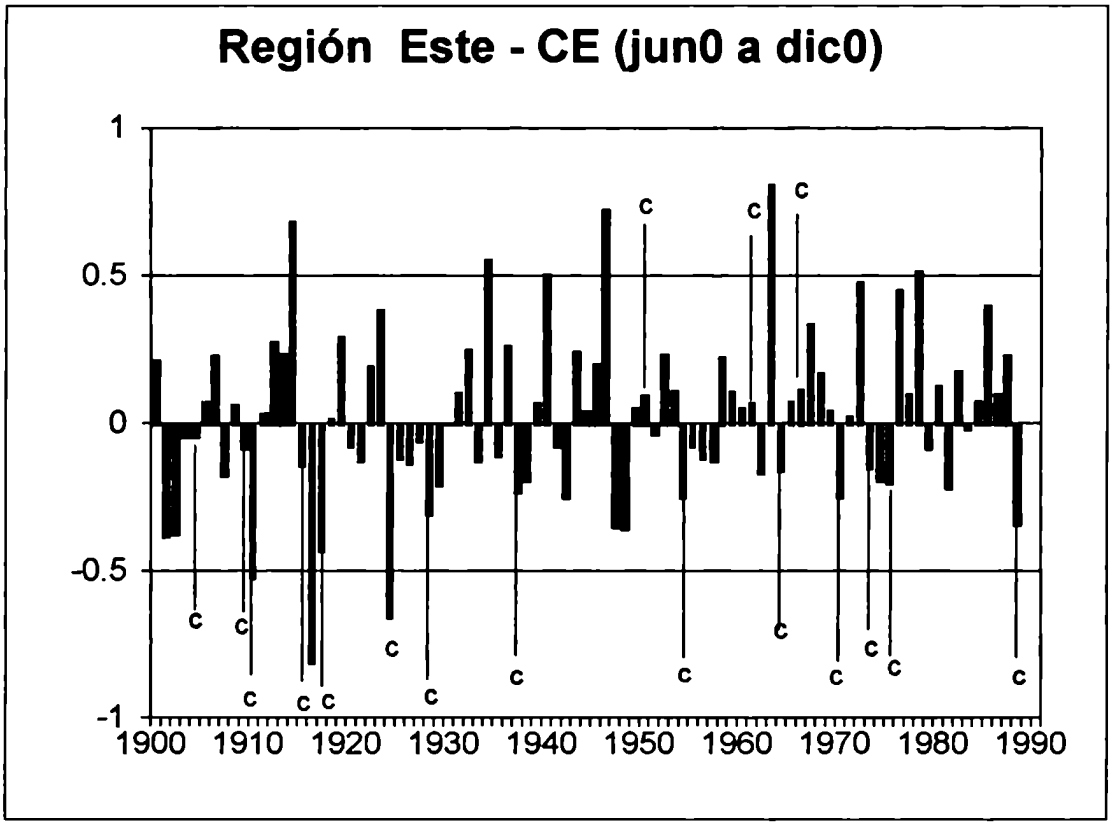

Figura 23. Idem Figura 21, para la región Este.

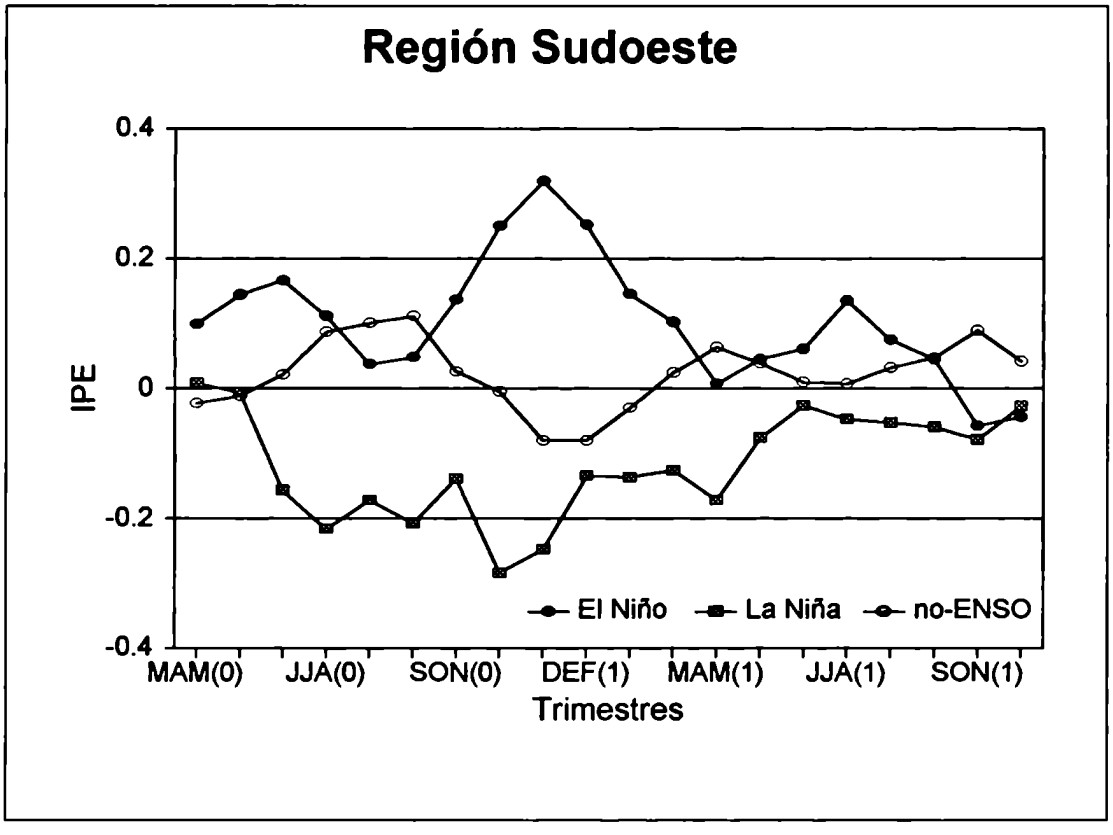

Figura 24. Evolución de las anomalías de precipitación estandarizada por trimestres desde la instalación de un evento Niño-Niña, MAM(0), hasta OND del año +1 y para los años no-ENSO, en la región Sudoeste.

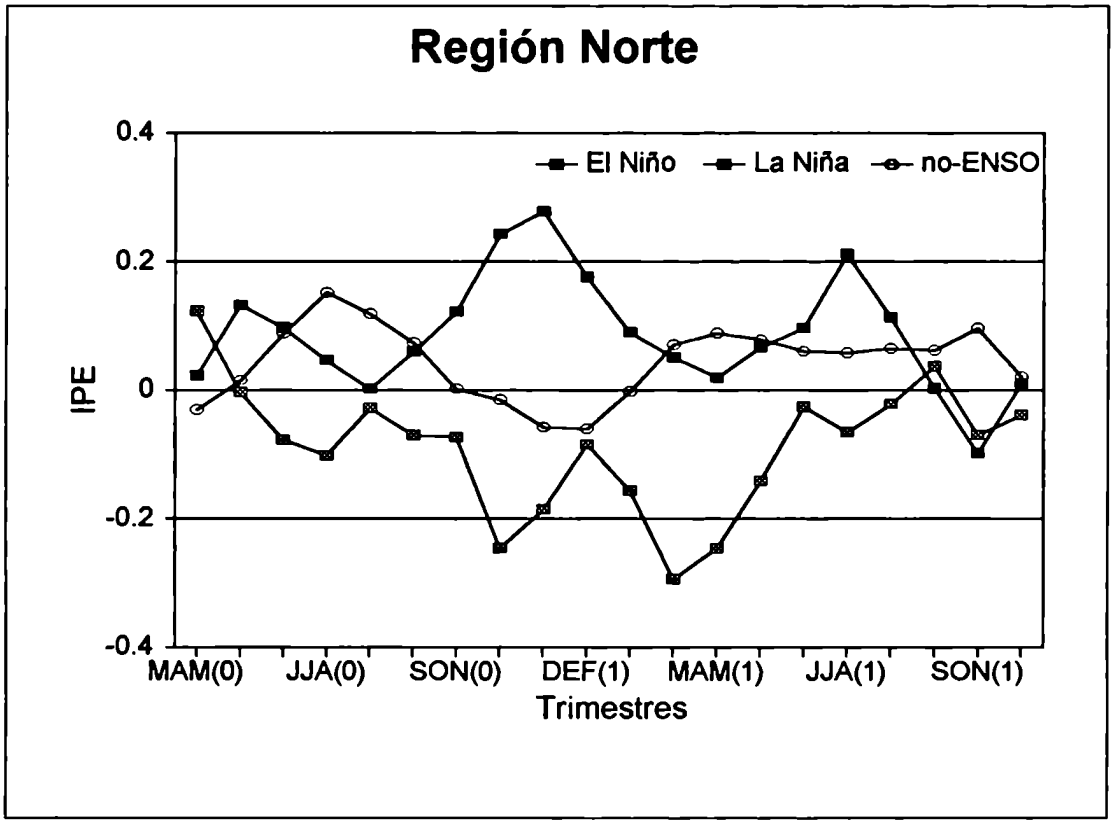

Figura 25. Idem Figura 24, para la región Norte.

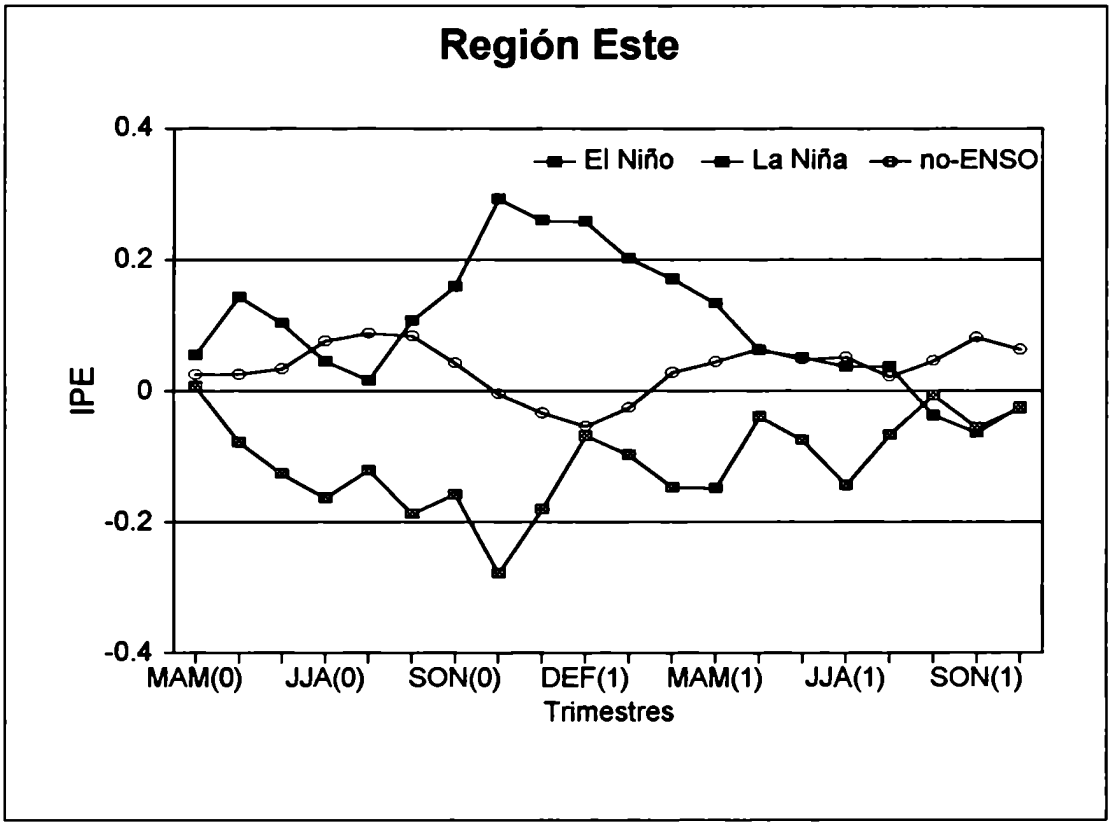

Figura 26. Idem Figura 24, para la región Este.

6. FASES DEL SOI Y SU RELACION CON LAS ANOMALIAS DE PRECIPITACION

6.1 Análisis mensual de las precipitaciones según las fases

Las cinco fases del SOI que se analizan en su relación con las anomalías de la precipitación fueron calculadas por SA92 y su procedimiento de cálculo se describe en el punto 3.2.3. Se consideran las fases a partir del año 1900 y hasta 1988, período que abarca este estudio. Se presentan sus valores en el ANEXO I, año por año y mes a mes. Como se mencionara en los antecedentes, el fenómeno ENSO es reconocido como el acoplamiento de las anomalías de la SST del Oceáno Pacífico ecuatorial y de las anomalías en la presión atmosférica sobre el Este y el Oeste del Océano Pacífico tropical y subtropical, que constituye la conocida Oscilación del Sur. Para comprender mejor la relación de las fases con El Niño se han esquematizado un evento cálido y las relaciones entre el ciclo del SOI y el de las anomalías de la SST3. En la Figura 5 se observa que las Fases 1 y 2 (F1 y F2), corresponderían a los extremos del ciclo. La F1 indica SOI negativo, equiparándose al extremo positivo en la SST3, mientras que la F2 define los extremos positivos del SOI y se asocia a mínimos SST3. La Fase 3, F3, descenso rápido del SOI, se relaciona con el comienzo de un ciclo de aumento en la SST3 y la Fase 4, F4, a la inversa; el fin de un ciclo positivo y descenso de la SST3. La Fase 5, F5, por definición está relacionada con variaciones intermensuales leves y valores cercanos a cero. En esta clasificación no se intenta describir proceso físico alguno que relacione el SOI con el fenómeno Niño sino categorizar los distintos estadíos del ciclo del SOI.

Para conocer las distribuciones de estas fases se calcularon las frecuencias relativas de cada una, para los doce meses del año. Los resultados se volcaron en la Tabla 16, donde se escriben en negrita las mayores frecuencias de cada fase.

Tabla 16. Frecuencia relativa porcentual de ocurrencia de fases del SOI.

Fase	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
F1	0.17	0.12	0.10	0.13	0.09	0.11	0.18	0.18	0.16	**0.19**	0.18	0.15
F2	0.24	0.21	0.23	0.24	0.24	0.23	0.25	0.22	**0.31**	0.30	0.26	0.23
F3	0.12	0.19	0.15	0.14	0.13	**0.21**	0.09	0.10	0.10	0.09	0.15	0.12
F4	0.19	0.23	0.24	0.17	**0.26**	0.23	0.25	0.23	0.14	0.13	0.15	0.20
F5	0.27	0.24	0.28	**0.32**	0.27	0.25	0.29	0.26	0.30	0.30	0.26	0.30

Analizando las fases más frecuentes, éstas oscilan entre el 30-32% para la F5 en Abril, Setiembre, Octubre y Diciembre y la F2 en los meses de Setiembre y Octubre. Las menores ocurrencias corresponden a la F3 en Julio y Octubre y a la F1 en Mayo con un 9%. Se verá más adelante que no son los meses en que una fase es

más frecuente, los que correlacionan mejor con las anomalías significativas de la precipitación; además, pareciera que la F5, con los mayores porcentajes para todos los meses, encierra casos variados y con amplio rango en los desvíos de las lluvias.

Seleccionando en cada mes los valores del IPE de los años que corresponden a cada fase se pudo estudiar la distribución y los corrimientos de las medianas, con respecto a las condiciones climáticas de las precipitaciones mensuales.

En las Figuras 27 a 44 se emplea la forma de representación por cajas o boxes, para las distribuciones mensuales del IPE para las condiciones climáticas medias y para cada una de las cinco fases del SOI. Los límites del box corresponden al 25% y 75% de la distribución, las barras se extienden hacia los valores extremos positivos y negativos y el símbolo cuadrado dentro de la caja corresponde a la mediana. Las Figuras 27 a 32 representan a la región Sudoeste, las Figuras 33 a 38, a la región Norte y a partir de la Figura 39 a la región Este. La primer figura de cada grupo representa las condiciones normales ó climáticas, por eso las 12 cajas (una por mes) están centradas en la mediana y ésta es nula o cercana a cero, (ver Figuras 27, 33 y 39). El resto de los gráficos corresponde a cada una de las fases del SOI. El desplazamiento de la mediana hacia valores positivos o negativos que se visualiza facilmente, es objeto de análisis.

Dentro de cada caja se destaca la existencia de distribuciones asimétricas según el valor de la mediana, así como la ocurrencia de extremos opuestos, desparejos en algunos meses. Por ejemplo, para Diciembre en la región Sudoeste y en la F1 se observa la mediana corrida hacia las anomalías positivas, lo cual hace pensar en una asociación de la F1 con más lluvia, sin embargo se deduce a través de la extensión del rango, la ocurrencia de valores extremo negativos cuyo valor absoluto supera al positivo; es decir que se dan también anomalías negativas intensas (ver Fig. 28). Estas observaciones permiten decir que se mezclan procesos no vinculados con la Oscilación del Sur, los cuales no han sido filtrados al analizar por fases. En otras palabras, los resultados del análisis de las relaciones entre el SOI y las anomalías de las precipitaciones indican que éstas pueden ser explicadas, en parte, por los cambios de presión a través del Océano Pacífico. Estos desplazamientos en las medianas, según las fases, deben evaluarse estadísticamente a fin de detectar cuales serán los meses con significación en las anomalías de lluvia.

6.2 Estudio del corrimiento de las medianas del IPE

Después de analizar los resultados anteriores y pensando en que la media es una medida que puede estar muy influenciada por los outliers, ya sean reales o espúreos, se descartó el análisis de diferencia de las medias. Se decidió en primer lugar estudiar los corrimientos en la mediana de la distribución de precipitación en base a los percentiles de 25% y 75% de los valores climáticos. En segundo lugar, emplear el test no-paramétrico de Kruskal-Wallis (K-W) para testear la hipótesis nula de que las medianas de los conjuntos no se diferencian entre sí pues provienen de una misma muestra o de muestras idénticas. En el punto 3.2.5 se describe la metodología y en el Anexo II.2 se detalla, para un caso particular, su aplicación junto con las Comparaciones Múltiples, para las distintas fases. En el mismo Anexo II se incluyen los gráficos de caja para cada mes y región que fueran empleados para visualizar los desvíos significativos de las medianas.

Se comparó la mediana poblacional con las medianas obtenidas para cada subconjunto de datos correspondiente al tipo de fase en ese mes, utilizando los percentiles de 25% y 75% del valor climático. En general, los meses cuya mediana, en alguna fase, se equipara o supera al valor de los cuartiles son Marzo, Noviembre y Diciembre.

Para intentar detectar si hay otros meses que podrían estar afectados se amplió el intervalo al 30%-70% de la distribución. Se obtuvieron así los resultados que se muestran en la Tabla 17 a), b) y c). En la misma se resumen para cada una de las regiones, los meses donde los valores de la mediana superan el intervalo establecido por los percentiles, la fase del SOI entre paréntesis y el signo del corrimiento. Cuando aparece el asterisco, éste indica rechazo del test K-W y aceptación de la existencia de diferencias entre la mediana climática y la de la fase en cuestión.

En la región Sudoeste cuatro meses del año, Marzo, Julio, Noviembre y Diciembre, sienten modificadas sus medianas de precipitación en forma significativa, según las fases del SOI mientras que para la región Norte, lo mismo ocurre para los meses de Enero, Febrero, Julio, Agosto, Noviembre y Diciembre y en la región Este, para Febrero, Marzo, Agosto, Setiembre, Noviembre y Diciembre.

Tabla 17. Anomalías de precipitación mensual climática comparadas con la de la fase del SOI (entre paréntesis), expresada en los percentiles 30, 50 y 70 en tres regiones de la llanura pampeana. El signo + ó - delante del mes indica el sentido de los desplazamientos de la mediana respecto al valor climático. El asterisco (*) señala rechazo del test K-W.

a) Región Sudoeste - 18 estaciones

	Mes	30%	50%	70%	
	FEBRERO	-0.507	0.045	0.408	
+	FEB(2)	0.185	0.428	0.676	
	MARZO	-0.373	0.083	0.355	(*)
+	MAR(1)	0.052	0.698	0.911	
	ABRIL	-0.306	0.057	0.407	
-	ABR(2)	-0.903	-0.467	0.448	
	JULIO	-0.418	-0.120	0.250	
+	JUL(1)	-0.158	0.380	1.002	
	AGOSTO	-0.575	-0.018	0.367	
-	AGO(2)	-0.657	-0.567	-0.050	
	OCTUBRE	-0.407	0.039	0.403	
+	OCT(3)	-0.070	0.468	0.696	
	NOVIEMB.	-0.338	0.045	0.350	(*)
-	NOV(2)	-0.802	-0.324	0.105	
+	NOV(4)	-0.101	0.439	0.869	
	DICIEMB.	-0.463	-0.002	0.405	(*)
+	DIC(1)	-0.201	0.433	0.841	
-	DIC(2)	-0.984	-0.538	0.038	

b) Región Norte - 9 estaciones

	Mes	30%	50%	70%	
	ENERO	-0.295	-0.162	0.343	(*)
-	ENE(2)	-0.703	-0.308	0.180	
+	ENE(3)	-0.076	0.341	0.674	
	FEB	-0.314	-0.058	0.310	(*)
+	FEB(1)	0.203	0.310	0.379	
	MARZO	-0.303	0.017	0.314	
+	MAR(1)	-0.756	0.326	0.478	
	JUN	-0.339	-0.037	0.422	
+	JUN(1)	-0.710	0.481	0.588	
	JUL	-0.489	-0.03	0.396	(*)
+	JUL(1)	-0.107	0.399	0.918	
-	JUL(3)	-0.650	-0.506	-0.127	
	AGOSTO	-0.439	0.062	0.482	(*)
-	AGO(3)	-0.841	-0.529	0.029	
	NOVIEM.	-0.372	0.050	0.478	(*)
-	NOV(2)	-0.867	-0.411	-0.001	
+	NOV(4)	0.404	0.612	0.841	
	DICIEMB.	-0.381	-0.025	0.294	(*)
-	DIC(4)	-0.671	-0.370	-0.162	

c) **Región Este - 15 estaciones**

	Mes	30%	50%	70%	
	FEBRERO	-0.426	0.036	0.379	(*)
+	FEB(4)	-0.198	0.395	0.729	
	MARZO	-0.342	0.034	0.423	(*)
+	MAR(1)	-0.575	0.616	0.741	
-	MAR(3)	-0.471	-0.345	-0.083	
	AGOSTO	-0.401	-0.017	0.441	(*)
-	AGO(2)	-0.903	-0.401	0.139	
	SETIEMB.	-0.356	0.019	0.540	(*)
+	SET(5)	-0.313	0.412	0.770	
	NOVIEMB.	-0.577	0.053	0.475	(*)
-	NOV(2)	-0.703	-0.427	0.122	
+	NOV(4)	-0.027	0.309	0.475	
	DICIEMB.	-0.375	-0.017	0.343	(*)
-	DIC(2)	-0.644	-0.393	-0.087	
+	DIC(3)	0.027	0.422	0.603	

Analizando en conjunto los meses que experimentan la señal de la Oscilación del Sur en las anomalías de la precipitación se resumen los resultados sobre el mapa de la Figura 45. Los meses comunes dentro de la región son Noviembre y Diciembre. En general, las F1 y F3 contribuyen con anomalías positivas y las F2 y F4 con negativas. Sin embargo, se observa que F3, como en Marzo, Julio y Agosto produce efectos negativos y la F4 en Noviembre y Febrero contribuye a los desplazamientos positivos en las medianas de anomalías. Enero, Julio y Setiembre son meses en que se encontró señal positiva pero no en todas las regiones. Se ha visto que en el reciente episodio de El Niño 97, el mes de Enerode 1998 fue anormalmente positivo en lluvias, no sólo en la región Norte sino también en la región Sudoeste lo cual estaría sugiriendo que el mes de Enero estaría afectado por el ENSO.

Según los resultados de RH96, la estación de Jun(0)-Dic(0) está afectada por anomalías negativas, involucrando los episodios fríos o de alto SOI, pero de este estudio surge que Julio y Agosto tienen el efecto contrario, anomalías positivas. Otra diferencia encontrada con ese trabajo, está relacionada con el período Nov(0)-Feb(+), que según los autores mencionados, por el efecto del bajo SOI los corrimientos anómalos en la precipitación son positivos. Debe agregarse que también Marzo, Junio, Julio, Setiembre y Octubre presentan el mismo comportamiento. En lo que hace a la siempre perjudicada región semiárida (región Sudoeste en este trabajo), se puede

resumir que los meses de Julio en F1, Noviembre en F4 y Diciembre en F1 evidencian corrimientos hacia anomalías positivas de la precipitación.

En general, se tiende a asociar la F4 con anomalías negativas de lluvias en esta región, por eso, llama la atención que los resultados indican que en Noviembre para condiciones de F4, se produce un incremento en la precipitación. Lo mismo se produce en Febrero bajo F2 y F4. Analizando los IPE de Noviembre para la F4 en la región Sudoeste, en un intento de dar una explicación a la aparente contradicción, se observó que de los trece años que a Noviembre le corresponde F4, cuatro son años Niño y en particular tres, presentan un IPE mayor que 1 σ. Se transcriben los valores en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de IPE de Noviembre en F4 para la región Sudoeste.

Año	IPE (Nov. F4)
1906	0.17
1912	-0.99 Niño
1918	1.44 Niño
1934	0.87
1946	0.67
1947	0.44
1959	0.33
1960	-0.86
1969	1.11 Niño
1973	-0.68 Niña
1976	1.96 Niño
1981	-0.10
1984	0.73

Se analizaron los comportamiento del SOI para cada episodio correspondiente a los años 1918, 1969 y 1976, sin suavizar, que se muestra en la Figura 46. a), b) y c). En todos los casos, dentro de la fase negativa del SOI que corresponde al WE, existen perturbaciones en escala mensual que provocan ascensos en el valor del SOI de un mes al otro. Justamente, el método de SA92 categoriza esos ascensos según la definición, como F4. Aquí es donde surge la contradicción. Debería prevalecer el hecho de estar en el semiciclo negativo del SOI, más que en F4 y de ahí, inferir que se asociaría con anomalías positivas de lluvia, por el signo y no la fase del SOI.

6.3 ¿Hay cambios en el SOI que inciden en la lluvia?

Desde hace un tiempo se está hablando de una variación en el comportamiento del ENSO a lo largo del siglo debido en parte al último episodio cálido 1990-95, por ser demasiado largo. Fue mencionado por Trenberth y Hoar (1996) como

insinuando que este episodio era una evidencia de un calentamiento global producto del efecto invernadero. Por otro lado, Rajagopalan y otros (1997) aplicando métodos estadísticos no-parámetricos, analizaron los períodos de retorno de eventos Niño del tipo del mencionado y encontraron que la probabilidad de una anomalía positiva en la presión de superficie de Darwin, como la observada y su persistencia presenta una variabilidad que es del orden de décadas a siglos. En lo que hace al cálculo de períodos de retorno de episodios como el mencionado, de una longitud de 22 estaciones (22x3= 66 meses) dichos autores calculan un tiempo de retorno de alrededor de 350 años. Por otra parte, empleando un modelo oceánico para ENSO, Zebiak y Cane (1987) encontraron, haciendo una corrida para 1000 años, que el período de retorno de un episodio cálido mayor o igual a 22 estaciones era de 330 años. Esto lleva a enfrentar el tema de lo limitado de la información cuando se tienen registros de 100 años, con datos correlacionados serialmente y se estiman períodos de retorno de condiciones extremas. El resultado puede llegar a ser bastante subjetivo y variable según las suposiciones y la sensibilidad del modelo empleado. La discusión que se plantea es la naturaleza de los cambios producidos, ya sea que se deban a la variabilidad natural o a efectos antropogénicos.

Dentro de los escasos datos instrumentales disponibles en la región que llegan apenas a cubrir una centuria, se intentó vislumbrar algún comportamiento anómalo de la precipitación, por simple comparación, que indique fluctuaciones en la lluvia por la incidencia de las del SOI.

Basándose en el método del apartado anterior, se separó la serie temporal del IPE en dos segmentos y trabajando con la misma clusterización, se buscó para el 30% y 70% de la distribución del IPE mensual, los corrimientos según la fase del SOI. Los segmentos establecidos abarcan de 1900 a 1940 y de 1941 a 1988 debido a que de esta forma se consideran igual número de WE que de CE. La presentación de los resultados se muestran en la Tabla 19, para las tres regiones.

Los meses con desplazamientos positivos en las medianas y fases comunes en ambos segmentos son Marzo en F1 y Noviembre en F4, que contribuyen con un incremento en las lluvias mientras que Noviembre en F2 lo hace con un déficit. Las diferencias que podrían explicar los aumentos en las precipitaciones de las últimas décadas estarían expresados por los aportes de Marzo en F4, que estaría relacionado con el final de un episodio El Niño.

Tabla 19. Meses y fases del SOI (entre paréntesis) con desplazamientos significativos positivos(+) o negativos (-) de la mediana del IPE.

1900-1940 (10 WE y 8 CE)			1941-1988 (11 WE y 8 CE)		
R. Sudoeste	R. Norte	R. Este	R.Sudoeste	R. Norte	R. Este
Feb(1) +		Feb(3) -	Feb(2) -	Feb(2) -	
Feb(5) -	Feb(5) -				
Mar(1) +	Mar(1) +	Mar(1) +	Mar(1) +	Mar(1) +	
Mar(3) -					Mar (3) -
			Mar(4) +	Mar(4) +	Mar(4) +
		Jun(2) -			
Jul(1) +	Jul(1) +		Jul(3) -	Jul(3) -	
Nov(2) -	Nov(2) -	Nov(2) -	Nov(2) -	Nov(2) -	Nov(2) -
Nov(4) +	Nov(4) +	Nov(4) +	Nov(4) +	Nov(4) +	
Dic(1) +	Dic(1) +				
Dic(2) -	Dic(2) -	Dic(2) -			Dic(2) -
		Dic(3) +			Dic(3) +
			Dic(4) -	Dic(4) -	

6.4 Predicción de las anomalías de precipitación

Si bien en esta investigación no se enfoca el tema de la predicción a largo plazo se considera interesante hacer uso de uno de los resultados obtenidos al analizar las correlaciones entre los estados del SOI y las anomalías de las precipitaciones en la región de estudio.

La estrecha relación entre las fases del SOI de los meses de Julio y Agosto con las precipitaciones de Noviembre y Diciembre se hace evidente en los coeficientes de correlación que muestra la Tabla 14. Por lo tanto, se trabajó para la región Sudoeste con los casos de ambos meses en sus distintas fases y las anomalías de la lluvia observadas en los meses de Noviembre y Diciembre.

En las Figuras 47 y 48 se representa la distribución en las anomalías de precipitación del mes de Noviembre según las fases de Julio y Agosto, respectivamente. El análisis de las medianas no indica diferencia significativa para Julio pero si, para Agosto. Efectivamente, resulta que una F2 en el mes de Agosto puede relacionarse significativamente con una deficiencia de lluvias en el mes de Noviembre, en la región Sudoeste.

Hecho el análisis para las lluvias que se producen en el mes de Diciembre con las fases de Julio y Agosto (ver Figuras 49 y 50), resulta que las medianas tienen corrimientos significativos para Julio en F1, con signo positivo y para Julio en F2 con signo negativo. Pero el caso de Agosto como predictor de Diciembre es mucho más significativo. Son cuatro las fases que producen anomalías significativas en la lluvia.

Se destacan las F1 y F3 con anomalías positivas en las lluvias de Diciembre mientras que las F2 y F4 indican deficiencias significativas para ese mismo mes. Los resultados de las medias y medianas de cada caso se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Medias y medianas de las anomalías de lluvia en la región Sudoeste para los casos de mayor correlación entre las fases del SOI y el IPE. NovJl1 significa: anomalías del IPE de Noviembre con SOI en F1, para Julio. Igual convención para los otros meses en F1 a F5. En negrita: valores significativos.

	NovJl1	NovJl2	NovJl3	NovJl4	NovJl5
Xmed	0.176	-0.164	0.461	-0.116	-0.015
Mediana	0.087	-0.101	0.121	0.108	0.086
N casos	10	21	8	22	25
	NovAg1	NovAg2	NovAg3	NovAg4	NovAg5
Xmed	0.381	-0.423	0.199	0.009	-0.069
Mediana	0.160	**-0.396**	0.265	-0.015	0.086
N casos	16	19	8	20	23
	DicJl1	DicJl2	DicJl3	DicJl4	DicJl5
Xmed	0.392	-0.402	0.221	-0.119	0.094
Mediana	**0.454**	**-0.551**	0.133	-0.032	0.045
N casos	10	21	8	22	25
	DicAg1	DicAg2	DicAg3	DicAg4	DicAg5
Xmed	0.430	-0.330	0.532	-0.317	0.129
Mediana	**0.453**	**-0.463**	**0.795**	**-0.426**	0.102
N casos	16	19	8	20	23

Estos resultados se consideran un paso importante hacia la predicción a mediano y largo plazo de las condiciones de precipitación en la región. Si se piensa que de la distribución, a la estimación de las probabilidades de lluvia hay un sólo paso, se estaría muy cerca de estimar condiciones para los próximos meses. Hay un factor que tendería a debilitar en parte los resultados estadísticos y es el relativamente bajo número de casos para estimar las probabilidades. Conociendo que en Julio y Agosto de este año, 1998, las características del SOI indican que se encontrará en F4, se puede concluir que para el mes de Diciembre, la región Sudoeste tendrá deficiencias de lluvias en forma significativa.

6.5 Comentarios sobre los resultados

El empleo de las cinco fases en el ciclo del SOI permite analizar en detalle su efecto sobre las anomalías de la precipitación en la llanura pampeana. La forma de definir las fases es novedosa porque emplea un método de asociaciones por grupos

homogéneos de las variables. Las frecuencias mensuales indican que la F5 es la de mayor ocurrencia, lo cual evidenciaría su relación con las condiciones climáticas medias mientras que, en las otras fases estarían incluídas la instalación, permanencia y disipación del fenómeno ENSO.

La forma de representación gráfica por medio de cajas (box plot) es ágil y esclarecedora. El haber utilizado una variable como el IPE contribuye a visualizar los corrimientos respecto del valor climático, pues al ser una anomalía, éste es nulo. Se observa en general, que las F1 y F3 corresponden a corrimientos positivos en las anomalías de la precipitación mientras que la F2 y F4 producen corrimientos hacia las anomalías negativas. Los casos con desplazamientos positivos significativos, Noviembre, Diciembre y Febrero en F4, que es la etapa de decadencia de El Niño, resultan inconsistentes en principio, pues se asocia esta fase a deficiencias de agua. El hecho parece radicar en que es una pseudo F4, pues ocurre como una perturbación dentro del ciclo del SOI definidamente negativo. Algo semejante ocurre con la F3 y su relación significativa con deficiencias de lluvias para algunos meses, cuando en realidad son sólo perturbaciones en el ciclo positivo del SOI. Este comportamiento sugiere que es ventajoso en primer lugar, identificar el signo del ciclo y luego analizar las consecuencias a través de la fase mensual. Otra sugerencia sería preveer un segundo pico con varios meses de retardo.

Los altos coeficientes de correlación entre los meses de Noviembre y Diciembre del IPE con las fases del SOI en Julio y Agosto se emplean para determinar las condiciones significativas de los corrimientos de las medianas de precipitación siendo la F2 en Julio y Agosto indicativa de deficiencias en las lluvias de Noviembre y Diciembre mientras que las F1 y F3 en Agosto repercuten en anomalías positivas para Diciembre.

De acuerdo a los resultados encontrados no se hace visible el impacto del SOI en las lluvias de Octubre pero si en Marzo, en las tres regiones. Este hecho, que no incida el SOI en un incremento de las precipitaciones en Octubre, permite deducir que el rápido incremento de Setiembre a Octubre corresponde a otros efectos, principalmente de las condiciones medias. Para el pico de Marzo, sin embargo, parecería que estando el SOI en F1, el mismo se refuerza.

Otra pregunta que puede surgir está relacionada con la mayor influencia del SOI en los casos de deficiencias de lluvia en la región. Se estima que ese hecho está

directamente relacionado con la frecuencia de ocurrencia de las fases del SOI que contribuyen con anomalías negativas como se observa en la Tabla 16. Los porcentajes de F2 y F4, entre 20 y 26%, son mayores que los de F1 y F3, entre 9 y 19%. Por eso en las regiones del globo donde la correlación es positiva, que no es el caso de la región de estudio, el SOI positivo equivale a anomalías positivas de lluvia y éstas son superabundantes, sólo por tener un mayor porcentaje de frecuencia. En base a este razonamiento y a los porcentajes de la F5, parecería que las condiciones normales estarían explicadas en el 30%, que es el porcentaje del tiempo que el SOI está en F5 y el resto se repartiría entre la instalación, desarrollo y decaimiento de La Niña y El Niño. Sin embargo, en un reciente trabajo de Trenberth (1997) indica que un 55% del tiempo con ENSO, los Trópicos se encuentran en una o en otra fase del ciclo y que las condiciones medias son menos comunes. Los resultados de este autor se obtuvieron analizando los episodios ENSO desde 1950. Se opina que con un registro más prolongado no se hubiesen alcanzado tan altos porcentajes, siendo que desde 1950 hasta ahora los eventos han sido más intensos y seguidos.

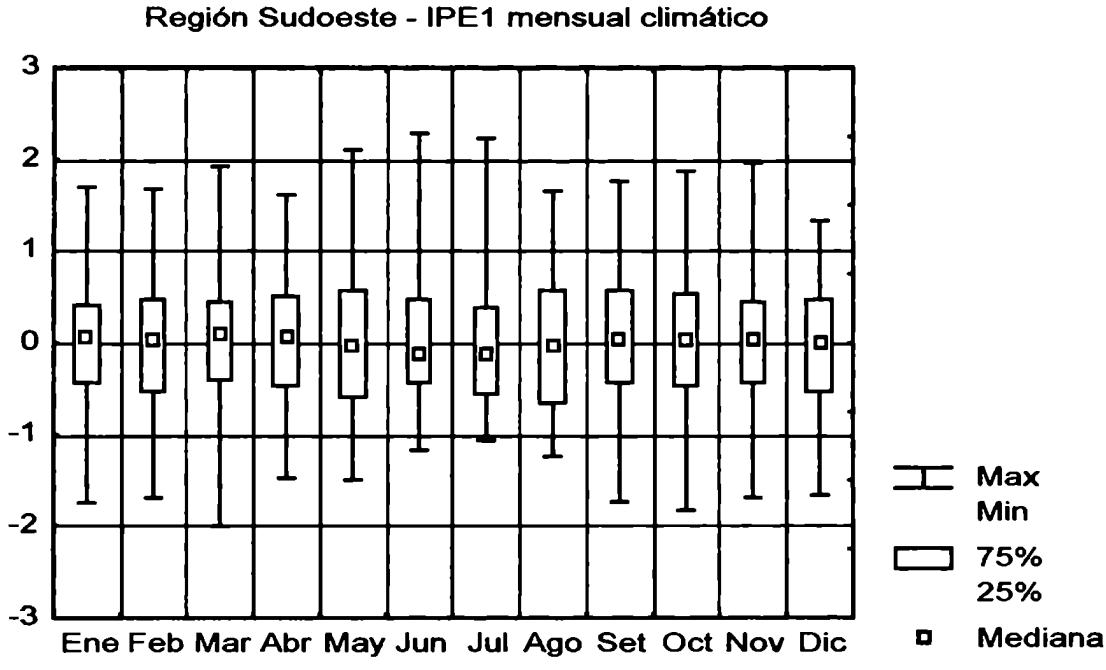

Figura 27. Indice de Precipitación Estandarizado (IPE) para la Región Sudoeste.

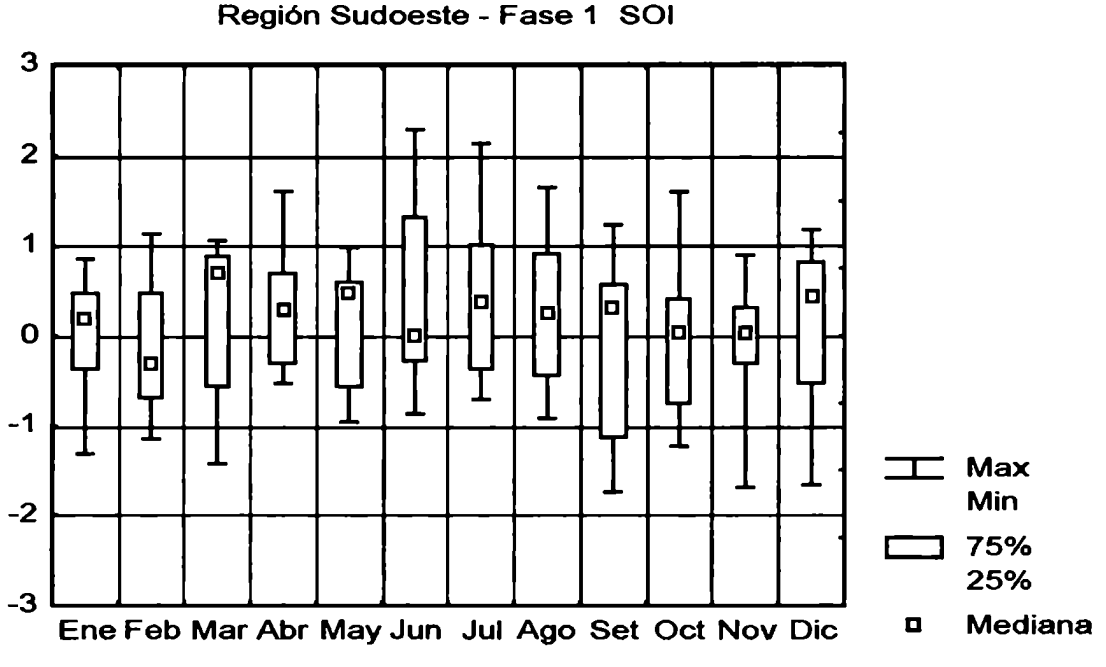

Figura 28. Distribución del IPE para los casos del SOI en F1 en la Región Sudoeste.

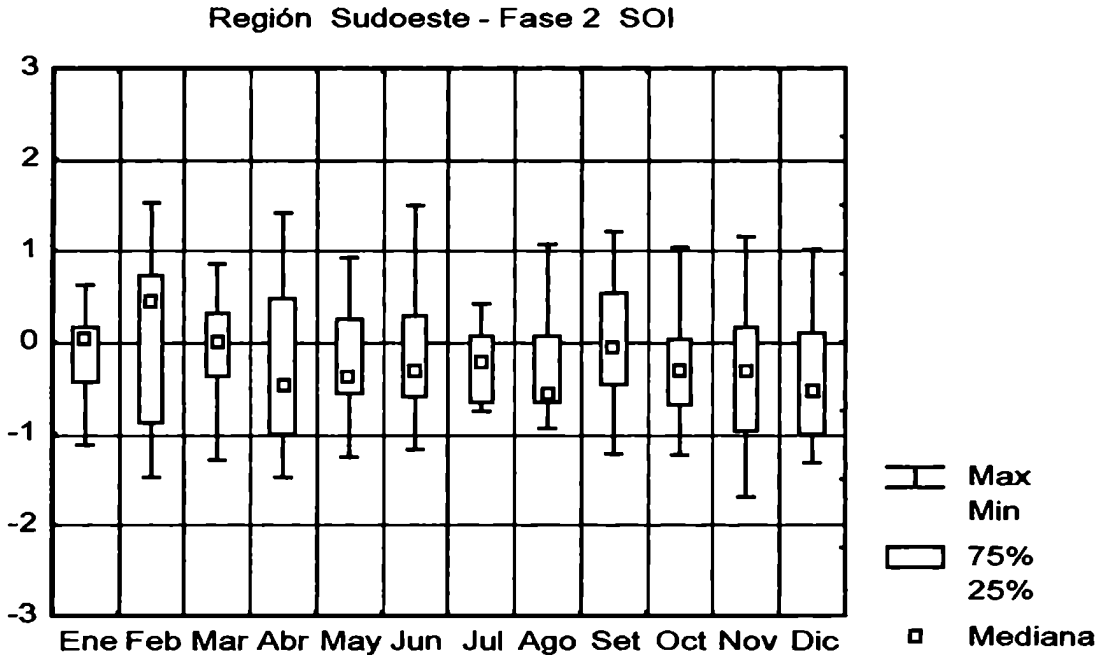

Figura 29. Idem Fig. 28, para F2.

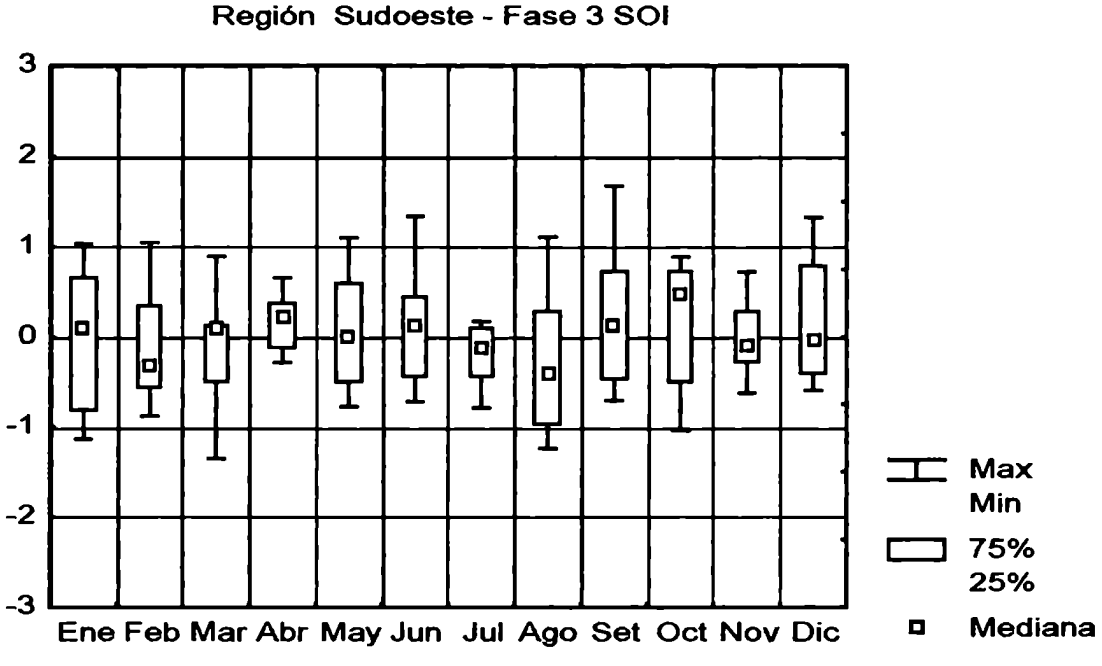

Figura 30. Idem Fig. 28, para F3.

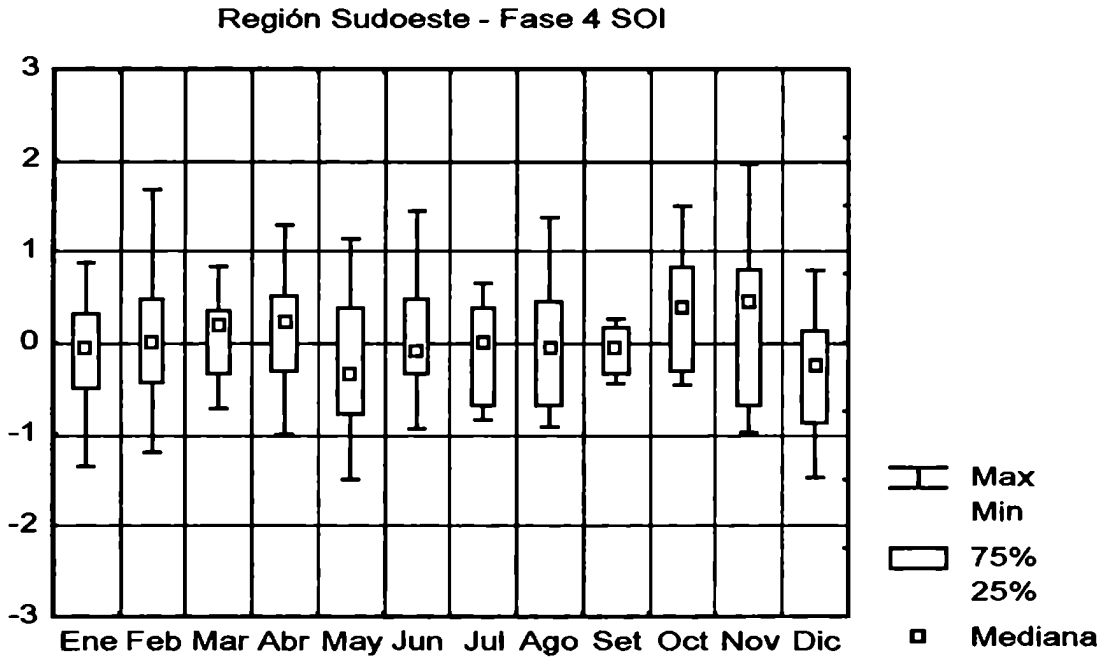

Figura 31. Idem Fig. 28, para F4.

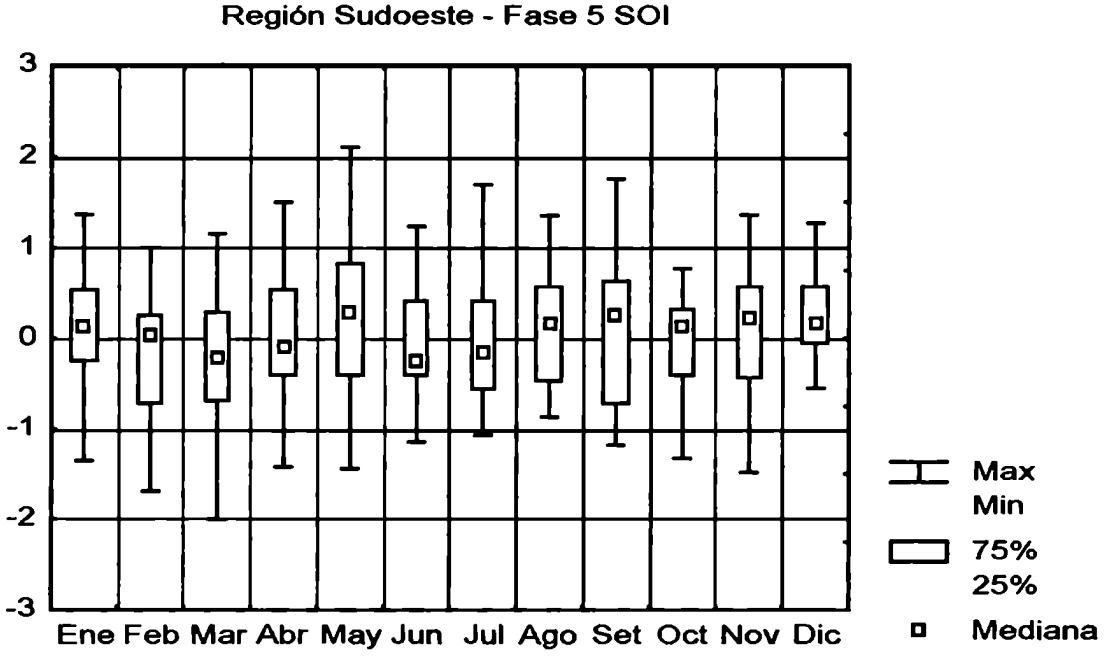

Figura 32. Idem Fig.28, para F5.

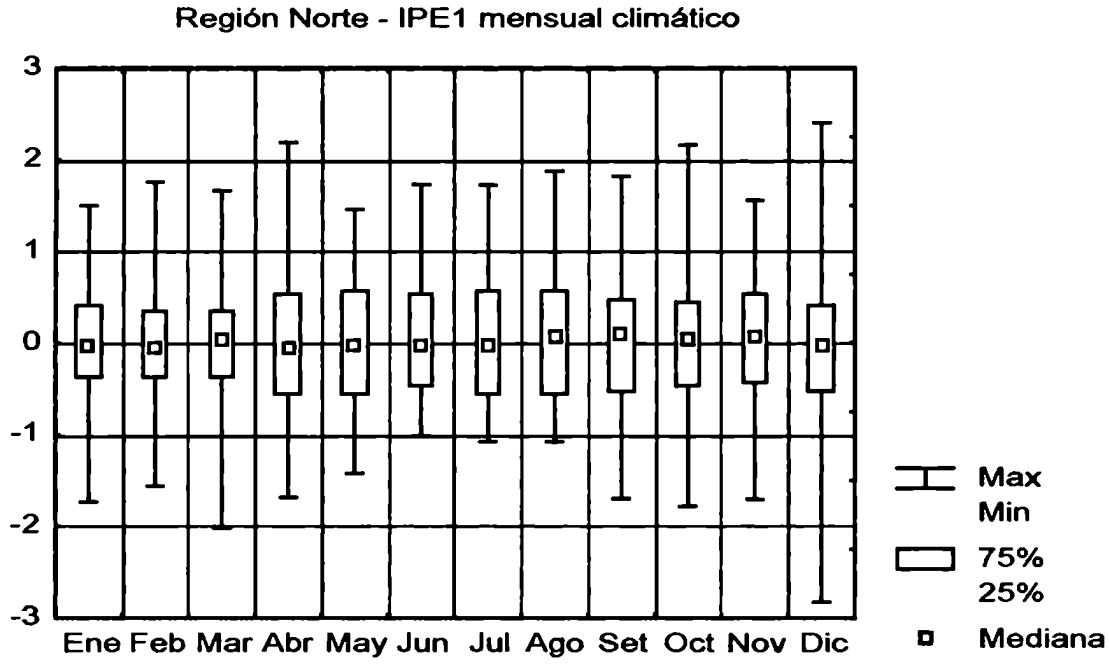

Figura 33. Distribución mensual del IPE para la Región Norte.

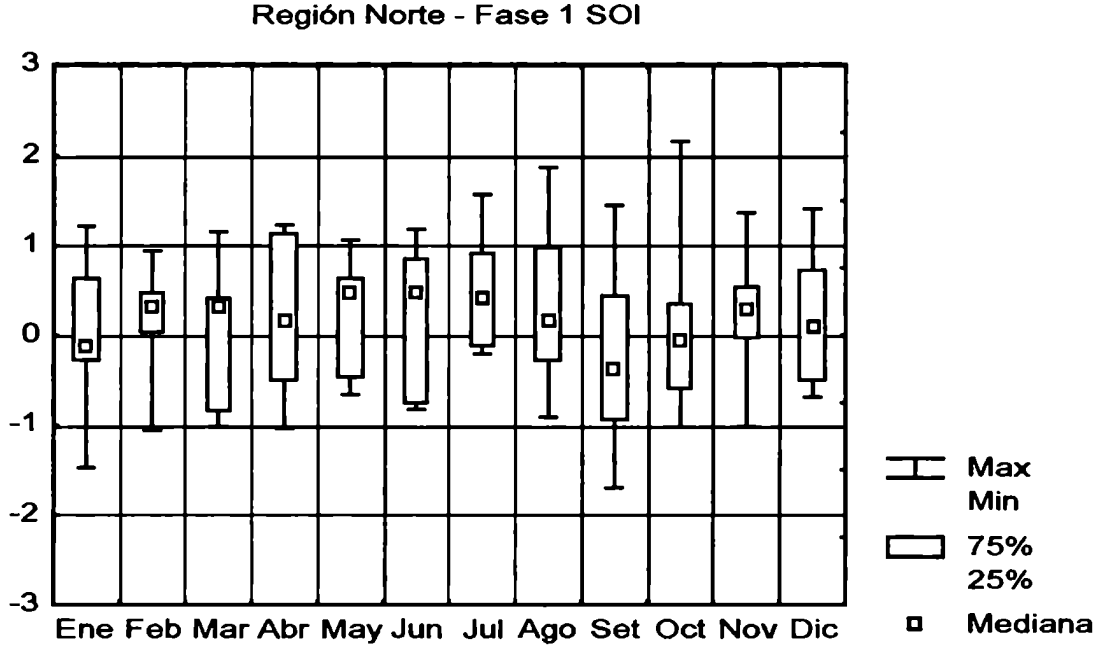

Figura 34. Distribución del IPE para los casos de SOI en F1 en la Región Norte.

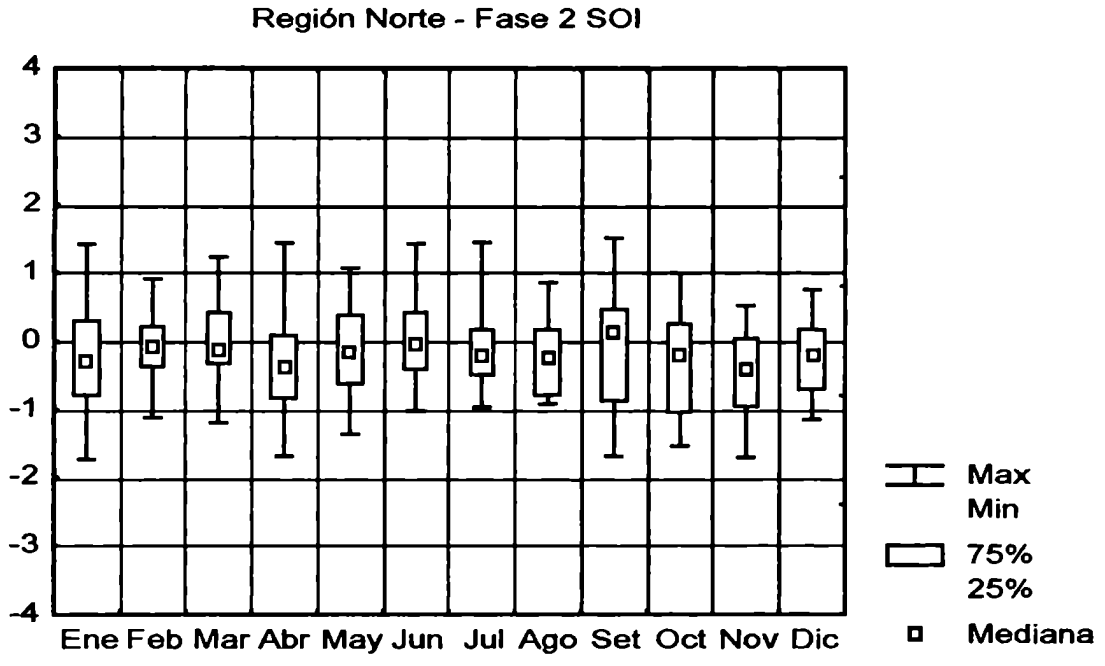

Figura 35. Idem Fig. 34, para la F2.

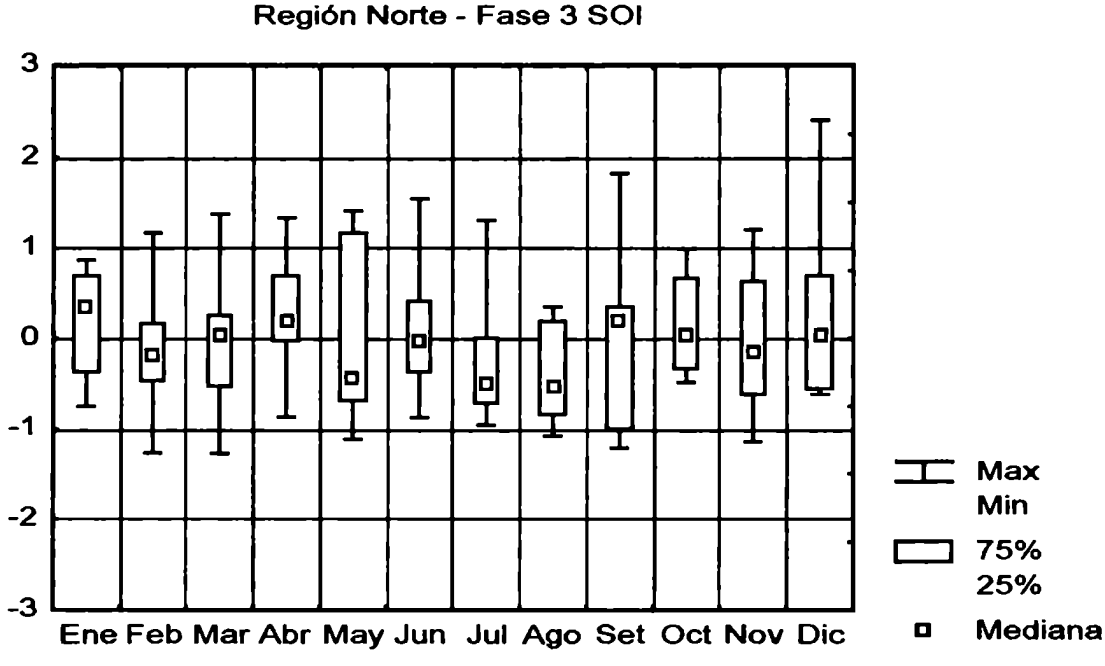

Figura 36.- Idem Fig. 34, para la F3.

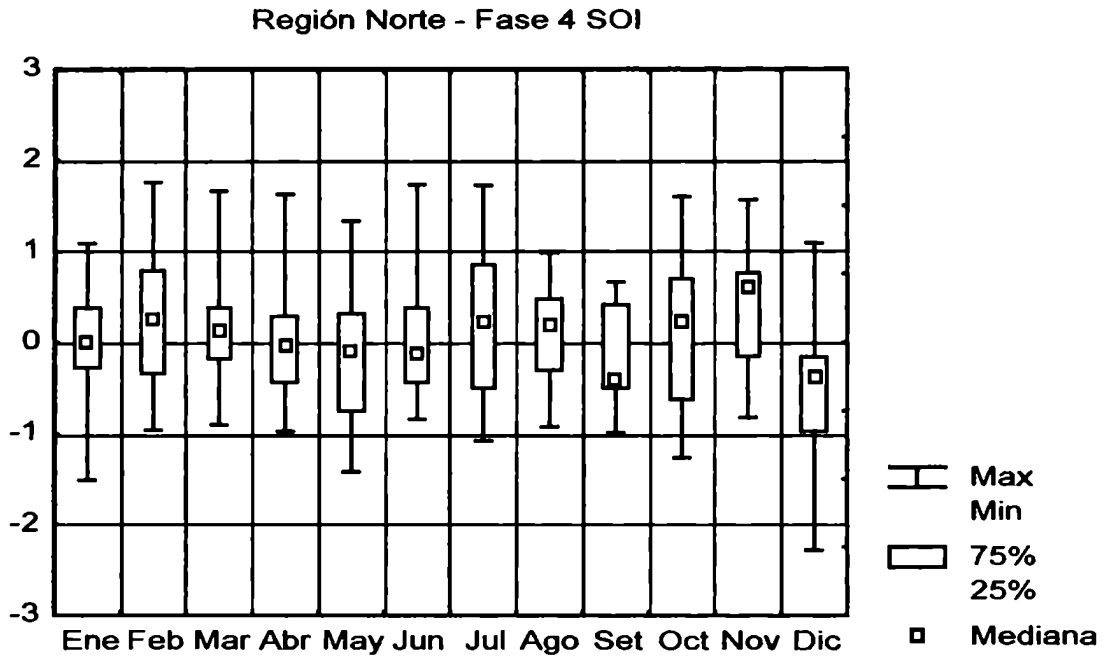

Figura 37. Idem Fig. 34, para la F4.

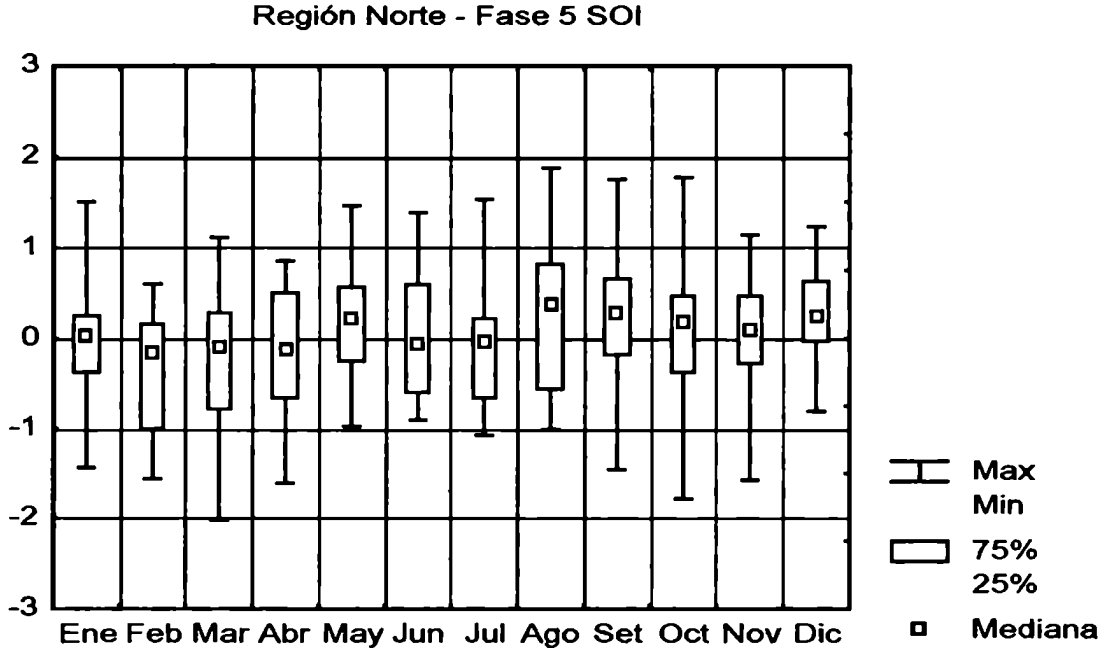

Figura 38. Idem Fig. 34, para la F5.

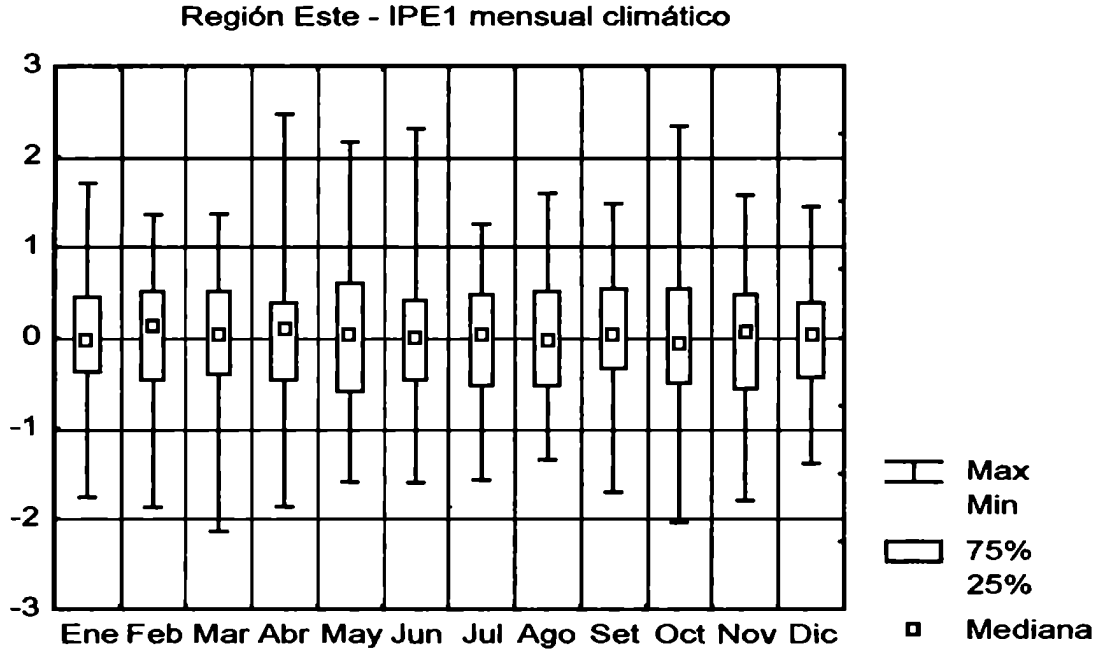

Figura 39. Distribución mensual climática del IPE para la Región Este.

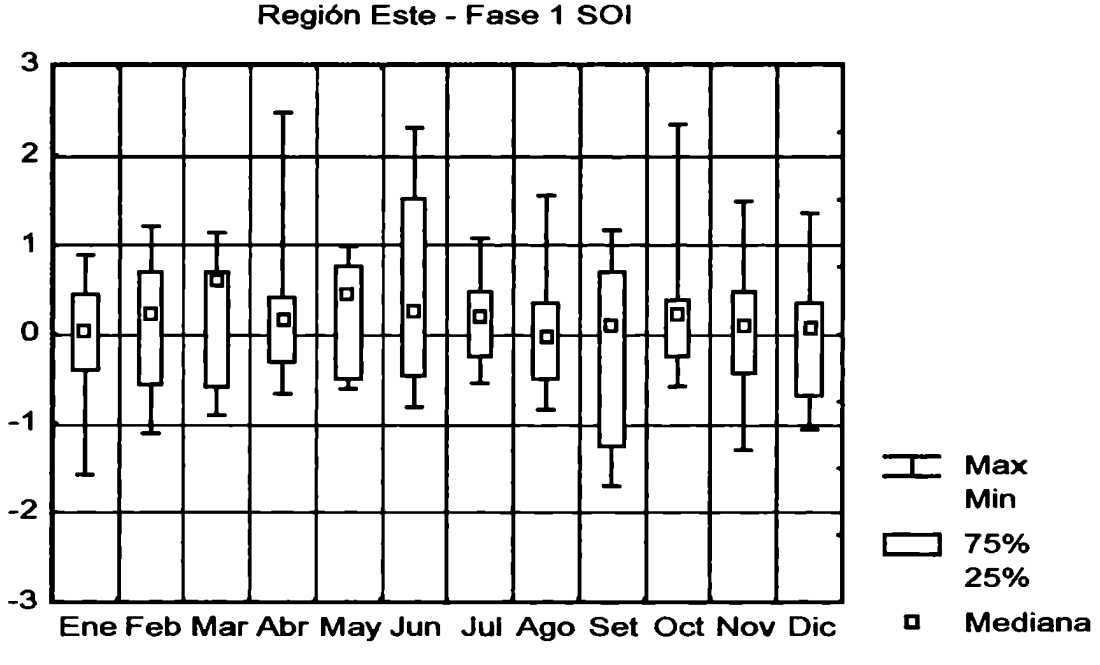

Figura 40. Distribución del IPE para los casos de SOI en F1 en la Región Este.

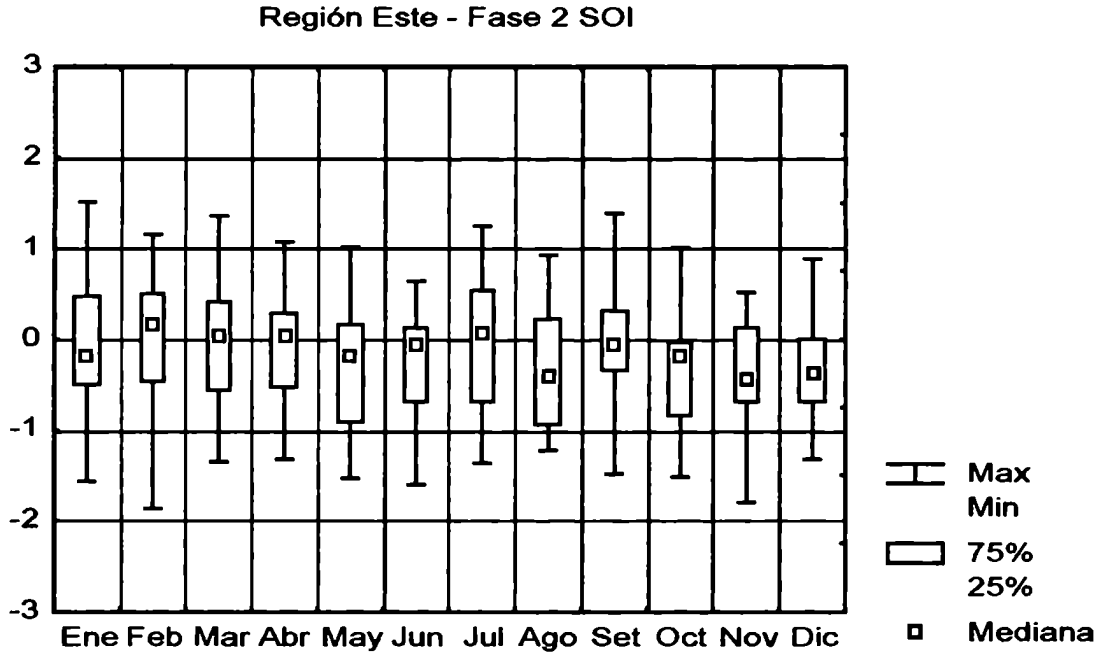

Figura 41. Idem Fig. 40, para la F2.

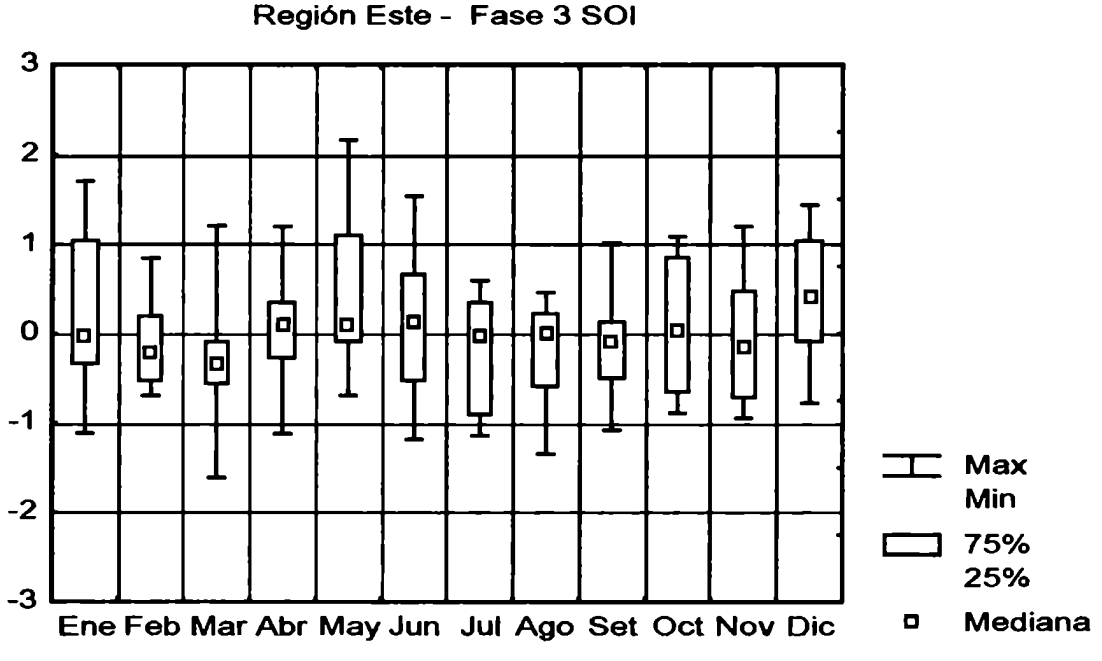

Figura 42. Idem Fig. 40, para la F3.

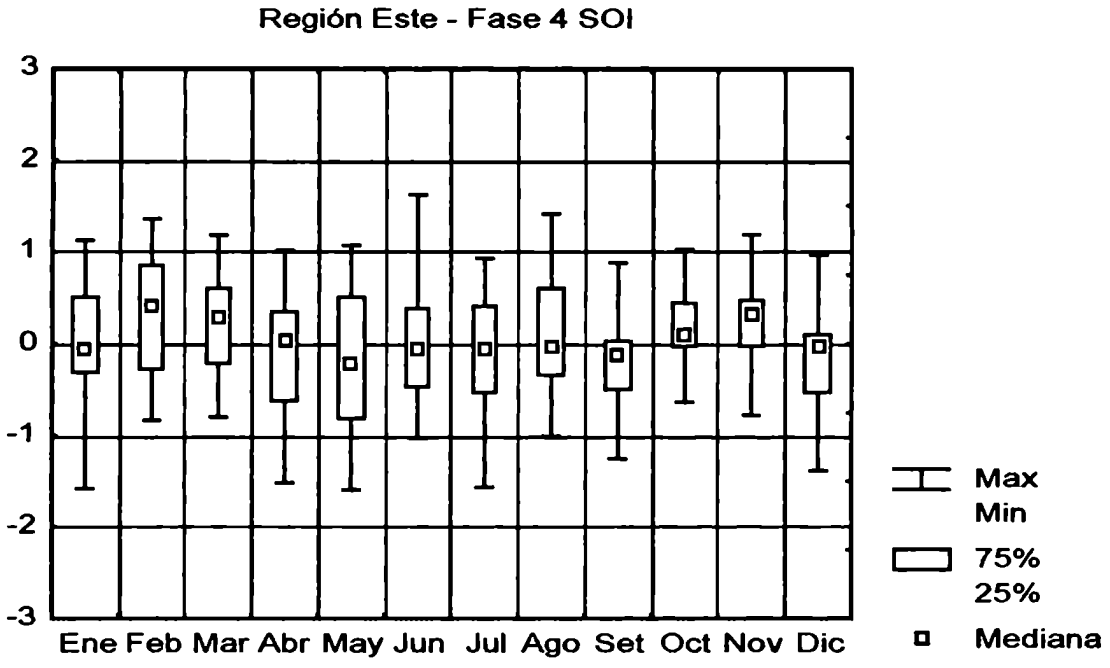

Figura 43. Idem Fig. 40, para F4.

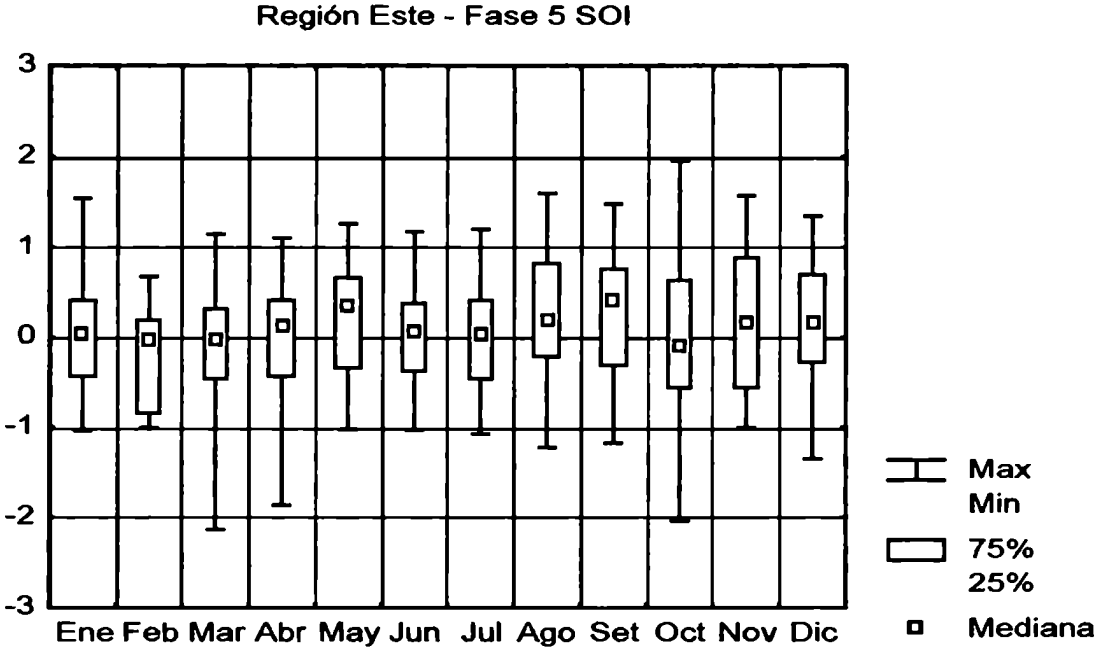

Figura 44. Idem Fig. 40, para la F5.

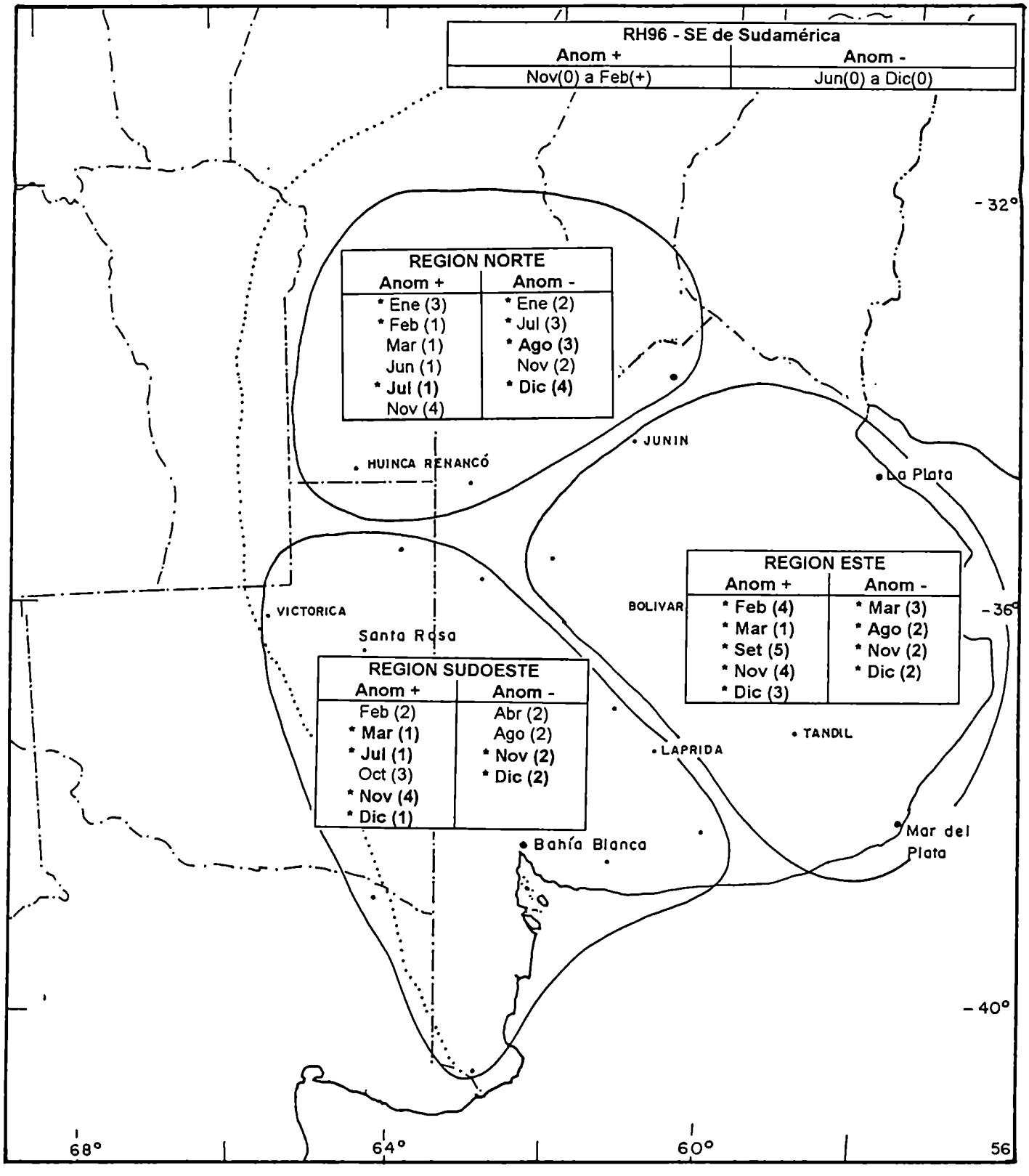

Figura 45. Meses con anomalías de precipitación significativas (*) asociadas a las fases del SOI, entre paréntesis. Recuadro superior: condiciones según RH96.

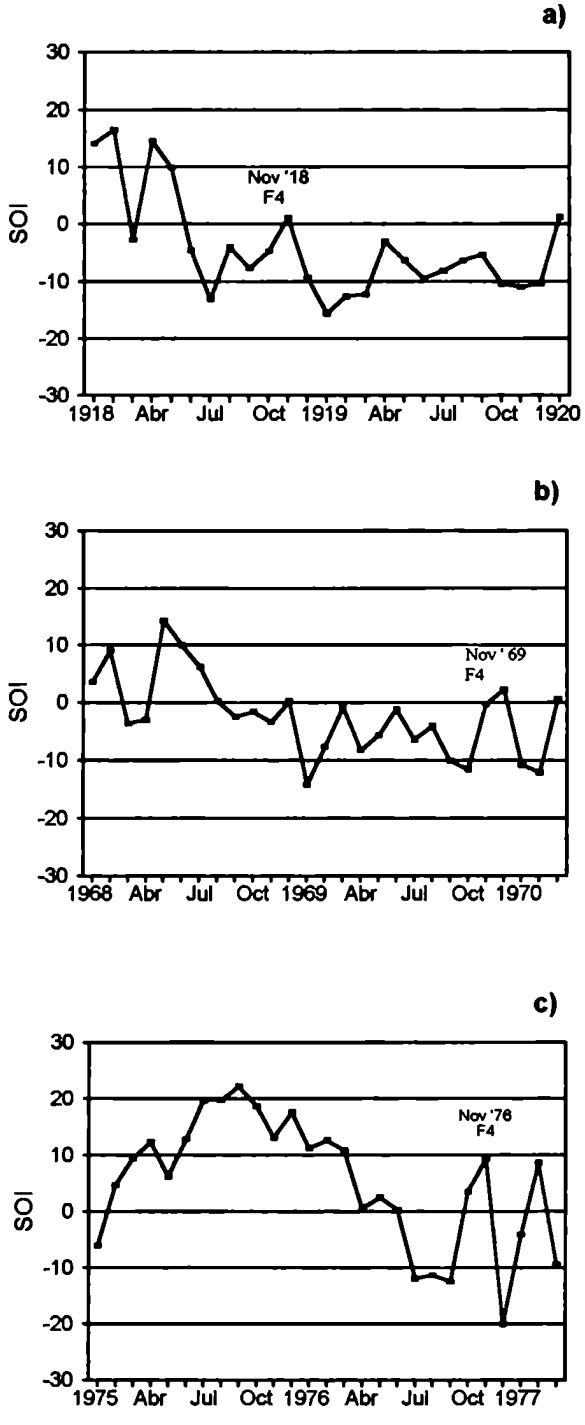

Figura 46. Ciclo del SOI y F4 en Noviembre para los años Niño a) 1918, b) 1969 y c) 1976.

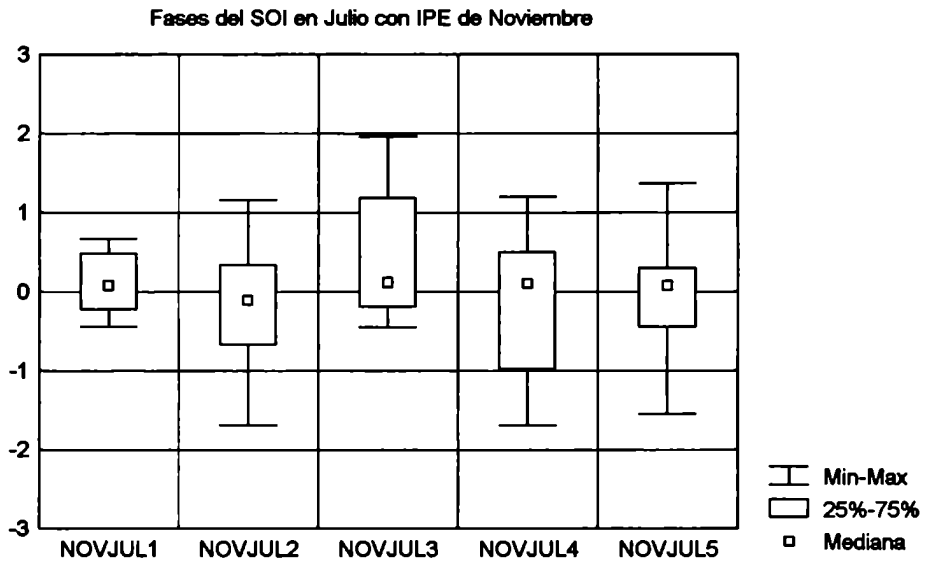

Figura 47. Anomalías de la precipitación de Noviembre según las fases del SOI en el mes de Julio.

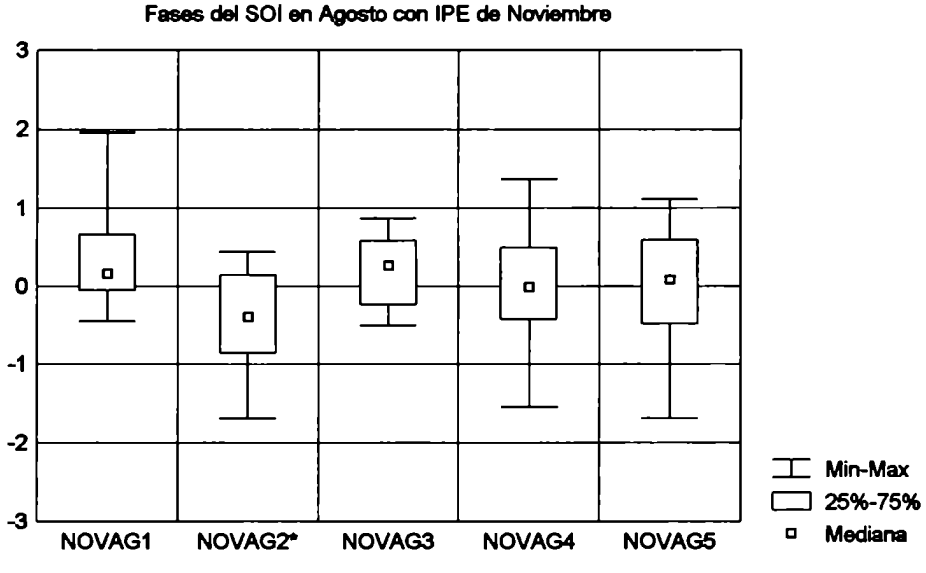

Figura 48. Anomalías de la precipitación de Noviembre según las fases del SOI en el mes de Agosto. * Corrimiento significativo.

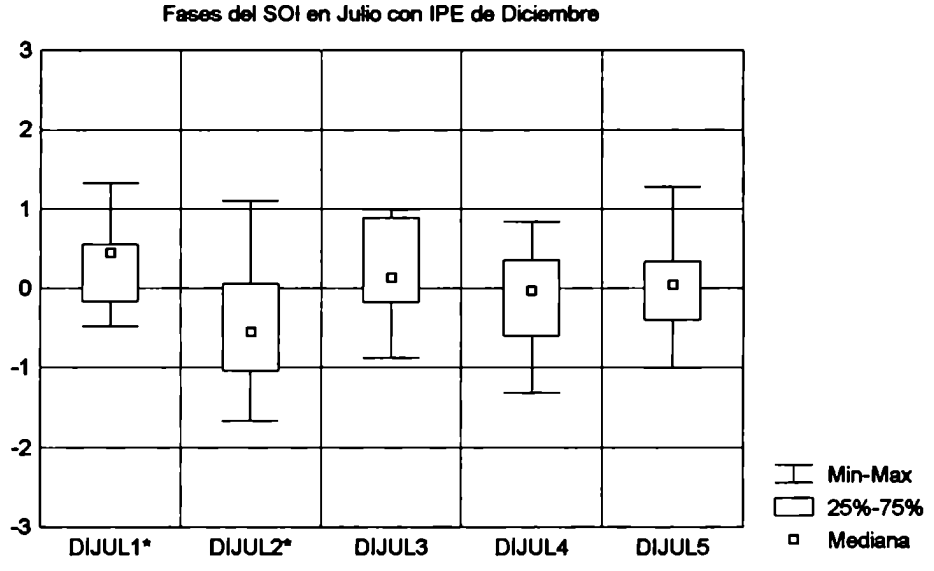

Figura 49. Anomalías de la precipitación de Diciembre según las fases del SOI en el mes de Julio. * Corrimiento significativo.

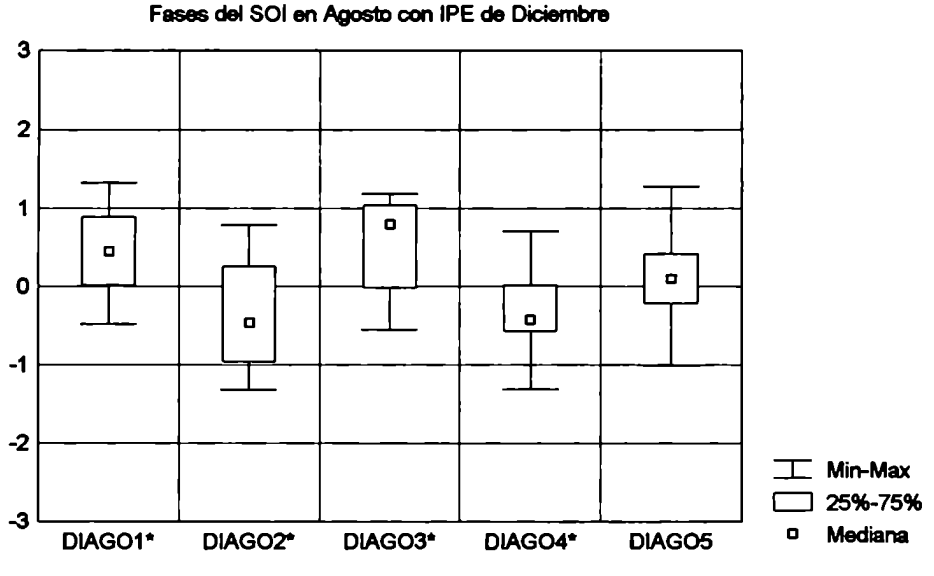

Figura 50. Anomalías de la precipitación de Diciembre según las fases del SOI en el mes de Agosto. * Corrimiento significativo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los comentarios y discusiones al final de los puntos 4, 5 y 6 complementan las conclusiones principales de esta investigación que se exponen a continuación. Ellas contribuyen con algunos elementos más hacia el conocimiento sobre la vinculación de los procesos atmosféricos de gran escala y las anomalías de precipitación.

Se ha podido detectar la influencia de los fenómenos conocidos como Oscilación del Sur y El Niño (ENSO) en la región de la pradera pampeana. Efectivamente, si bien la región que recibe en forma más fuerte el impacto del ENSO es la conocida como cuenca del Paraná en su parte argentina (Aceituno, 1988), también existe una teleconexión, aunque de menor intensidad, con la precipitación en el centro y sur de la llanura pampeana.

Al subdividir la región de estudio empleando el método de asociaciones (Clusters) a la variable precipitación en la forma de un Indice de Precipitación Estandarizado (IPE), se pudieron establecer tres subregiones coherentes en si mismas, las cuales presentan distintos valores medios de precipitación areal según su posición geográfica. Es así como los mínimos valores de precipitación media anual corresponden al cluster Sudoeste, seguido por el Norte y el Este, respectivamente. En el comportamiento estacional se observa un doble máximo de precipitación, Marzo (principal) y Noviembre/Diciembre (secundario), más marcado para la zona Sudoeste. Se evidencia en las tres series una tendencia positiva en la precipitación, principalmente en las últimas tres décadas.

El IPE se eligió por ser un valor estandarizado y tener la propiedad de estar distribuído en forma normal, además de describir bien las anomalías extremas ya que las probabilidades y los porcentajes de frecuencia teórica son biunívocos. La serie del IPE se emplea para correlacionar cada subregión con las series del Indice de Oscilación del Sur (SOI) y de la temperatura de superficie del mar en la región del Pacífico ecuatorial conocida como Niño3, SST3.

La serie del SOI desde Enero de 1900 a Diciembre de 1988, correlacionada con la serie del IPE, para cada una de las tres subregiones muestra una función de correlación con máximos significativos ($\alpha = 0.05$), para un retardo de 1 mes. Es decir que el impacto sobre la región de un máximo negativo/positivo en el SOI al tiempo t (meses), se traduce en una anomalía positiva/negativa en la precipitación a t+1.

Los análisis de correlación cruzada llevados a cabo entre la serie del IPE con la SST3, muestran en la función de correlación, valores significativos del mismo orden que para el SOI con un retardo en +1, apenas perceptible, pero sólo en las regiones Sudoeste y Este, no así en la Norte donde no hay señal significativa. Se piensa que en realidad, la señal debe ser más débil aún que la encontrada pues la serie SST3 empleada está suavizada con un pasabajo de 5 puntos. Otro factor a tener en cuenta es que la serie de anomalías de precipitación mensual tiene variabilidades intermensuales, que podrían estar influyendo para no definir bien un lag.

Al analizar los valores de los coeficientes de correlación de las series del SOI para meses individuales, con la serie del IPE mes a mes, se puede concluir que Noviembre y Diciembre son los meses que mejor se relacionan con los valores del SOI de Julio, Agosto, Setiembre y Diciembre. Las correlaciones no varían mucho entre regiones, siendo el SOI del mes de Agosto con el IPE de Diciembre, el par de la máxima correlación, -0.46, -0.48 y -0.52 para las regiones Este, Norte y Sudoeste, respectivamente. Como los signos son opuestos, si el ciclo del SOI es negativo en Julio, Agosto y Setiembre, la anomalía de precipitación será positiva en Noviembre y Diciembre y viceversa. Estos resultados indicando los meses de mejor asociación entre ambas variables permitirían inspeccionar modelos regresivos de predicción.

El comportamiento de la matriz de correlación de la SST3 con el IPE, muestra que los coeficientes significativos son para el IPE de Noviembre y Diciembre asociado a los valores de la SST3 de Marzo a Diciembre, dependiendo de la región. Los valores positivos máximos, entre 0.56 y 0.58, se encuentran para la SST3 tanto de Julio como de Agosto asociada al IPE de Diciembre, en la región Este y asociadas a Noviembre, en la región Norte.

Según la bibliografía, el período de meses correlativos de Noviembre a Febrero, Nov(0)-Feb(+), dentro de un episodio Niño constituyen los meses que en la región Sur de Sudamérica (Ropelewski y Halpert, 1996) reciben el mayor impacto en el campo de las anomalías positivas de la precipitación. Efectivamente, para la región Este la frecuencia durante este siglo de eventos cálidos (WE), con anomalías de precipitación superiores a 0.5 σ, supera a las encontradas en la región Norte y Sudoeste. Sin embargo, hay que destacar casos similares, en años que no son WE y anomalías negativas que no exceden los -0.5 σ, en años con WE. Por otra parte, el período Junio a Diciembre, Jun(0)-Dic(0), conocido como evento frío, CE, produce en

la región un impacto que desplaza las anomalías de lluvia hacia los valores negativos. En efecto, las regiones más afectadas son la Sudoeste y la Norte, donde las frecuencias de casos de anomalías negativas intensas, (casos menores que -0.5 σ), para CE, superan a la de la región Este. Esta conclusión está en desacuerdo con RH96, (Figura 3d), donde las mayores deficiencias aparecen también hacia el este de la provincia de Buenos Aires.

Los resultados obtenidos fraccionando en dos partes el período de datos, desde principio de siglo hasta 1955 y desde 1956 en adelante, no permiten establecer cambios significativos en el comportamiento de la precipitación asociados a eventos fríos o cálidos. Sólo en la región Sudoeste, para los casos de anomalías negativas del IPE en situaciones de bajo índice de la Oscilación Austral, se evidencia una diferencia significativa entre ambos períodos. Se corroboran las tendencias crecientes en las precipitaciones en los últimos años pero es evidente que hay otros procesos de mayor importancia.

Al agrupar los IPE en forma trimestral y analizados en su marcha estacional para años Niño y Niña demostraron un comportamiento linealmente opuesto, en el sentido de que a las anomalías negativas para La Niña le corresponden positivas para el Niño. Los extremos se dan en Noviembre (anomalía negativa) para La Niña y en Diciembre (anomalía positiva) para el Niño. Aparece un segundo pico (positivo) en Julio, en la región Sudoeste y también en la región Norte, no así en el Este. Observando las anomalías negativas, también hay una tendencia a un segundo pico cerca de Abril/Mayo, sugiriendo una cierta perturbación en el proceso de decadencia del fenómeno ENSO. Para el comportamiento de la marcha en el caso de no-ENSO, los valores fluctúan entre $\pm$ 0.1 σ y en fase casi opuesta a El Niño.

Si se reconocen en las fluctuaciones del SOI cinco fases, tal como fueran establecidas por Stone y Auliciems (1992), como Fase 1(F1): SOI extremo negativo; Fase 2(F2): SOI extremo positivo; Fase 3(F3): SOI en rápido descenso; Fase 4(F4): SOI en rápido ascenso y Fase 5(F5): SOI con valores casi nulos o poco cambio con el mes anterior; se puede notar, de acuerdo a las frecuencias de ocurrencia de cada fase en lo que va del siglo, que la F5 es la más común mientras que las otras fases están representando los estados de la instalación, duración y disipación del fenómeno de la Oscilación del Sur.

En líneas generales se resume que para la región Sudoeste los meses de

Diciembre, Marzo, Julio y Octubre experimentan aumentos en la precipitación mediana cuando la fase del SOI es F1 ó F3, mientras que Noviembre y Febrero lo hacen con el SOI en ascenso o positivo (F4 y F2). Los desvíos hacia anomalías negativas de lluvia se producen todos, bajo la F2 y en Abril, Agosto, Noviembre y Diciembre.

En la región Norte, Noviembre y Enero en F2 y Julio y Agosto en F3 se asocian a anomalías negativas de la precipitación mientras que los corrimientos positivos se observan en Enero en F3 y en Febrero, Marzo, Junio y Julio en F1. Nuevamente se da el caso de Noviembre en F4, con anomalías positivas como en la región Sudoeste.

Finalmente para la región Este, Diciembre en F3, Marzo en F1 y Febrero en F4 muestran anomalías positivas en el IPE y negativas para Marzo en F3 y Agosto y Diciembre en F2.

Los casos positivos observados en Noviembre y Febrero con F2 y F4 explicados como fluctuaciones en el SOI deberían ser considerados como perturbaciones dentro del semiciclo negativo del SOI. Es posible que el debilitamiento del ENSO en su fase de disipación no sea gradual sino que el regreso a una posición de equilibrio sea oscilante y quede registrado como perturbaciones en el campo de la precipitación.

Se pudo determinar que dentro del período establecido por RH96 como de influencia del WE, se destacan preferentemente dos meses: Noviembre y Diciembre altamente correlacionados, tanto en signo positivo como negativo, con las anomalías de precipitación. Haciendo referencia a la Tabla 13, estos resultados coinciden con RH96 para las anomalías negativas pero no ocurre lo mismo con las anomalías positivas en la región Este, pues son tan fuertes o más que en el Sudoeste y en el Norte.

Con respecto a la predictabilidad de la lluvia en la región mediante las fases del SOI, se considera que se las puede emplear para estimar desplazamientos respecto al valor de la mediana pero no cantidades de lluvia. Se pudo determinar que las F1 y F3 del SOI observadas en el mes de Agosto están fuertemente relacionadas con anomalías positivas de lluvias en Diciembre mientras que una F2 en Julio se asocia con deficiencias, también para el mes de Diciembre.

Se considera que deberían encaminarse algunas investigaciones futuras hacia el estudio de las asociaciones de las anomalías de precipitación como las descriptas, con las condiciones atmosféricas de altura, tanto en las configuraciones de los

campos de contorno de superficies isobáricas como en las posiciones y desplazamientos de las corrientes en chorro sobre latitudes subtropical y media y las anomalías en el flujo de humedad de la baja tropósfera. Se debería considerar no solamente os casos de eventos cálidos o fríos sino también los casos de extremos secos y húmedos, sean estos o no producto de fenómeno ENSO. Aquí sería fundamental incorporar los niveles atmosféricos intermedios, donde es factible evaluar los desplazamientos de lenguas húmedas o secas, flujos de vapor de agua y campos de convergencia y divergencia.

Sería favorable a corto plazo dirigir los esfuerzos para extender a todo el país la forma de la regionalización empleada aquí y determinar las fases del SOI mejor correlacionadas con las anomalías de precipitación mensual. También se estima de sumo interés indagar sobre la definición de un Indice de Circulación en la región del Atlántico Sur en latitudes medias, que identifique distintas circulaciones de gran escala para relacionarlo con las anomalías de lluvia y temperatura en el continente sudamericano.

Ya quedaron demostradas las condiciones potenciales de una predicción a largo plazo (4 a 5 meses) de las precipitaciones basadas en el comportamiento del SOI. Esta predictabilidad podría enfocarse de dos formas: i) a través de las probabilidades de precipitación asociadas a las fases del SOI o ii) con modelos de regresión lineal según las estaciones y las distintas regiones en donde las asociaciones con el SOI hayan resultado estadisticamente significativas.

BIBLIOGRAFIA

Aceituno, P. 1988. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: Surface Climate, Mon. Wea. Rev.,116, 505-524.

Alessandro A.P. y Lichtenstein, E.R. 1996. Anomalías persistentes de la circulación atmosférica durante la sequía del invierno de 1995, Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 315-316.

Alley, W.M. 1984. The Palmer drought severity index: Limitation and Assumptions, J.Climate Appl. Meteor., 23, 1100-1109.

Anderberg, M.R. 1973. Cluster Analysis for Applications, A.Press, NY,359 pág.

Barros, V.R., Catañeda M.E. y Doyle, M.E. 1996. Recent precipitation trends in Southern South America to the east of the Andes: an indication of a mode of climatic variability. Greenhouse Gas Emissions Under Developing Countries Point of View, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

Barros, V.R. y Doyle, M.E. 1998. Interannual precipitation variability over southern South America. Sometido al International Journal of Climatology.

Beran M. A. 1979. The effect of dependence on the assessment of hydrologic drought severity, Proc. Int. Sym. Hydrological Aspects of Drought, New Delhi, 103-111.

Beran, M.A.1989. Drought: processes and future, in Inter-regional Symposium on Ground Water Res. Management in Drought Prone Areas, New Delhi, 1-27.

Bjerknes, J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomaly of ocean temperature, Tellus, 18, 820-829.

Bjerknes, J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, Mon. Wea. Rev., 97, 163-172.

Boden, T.A., Kaiser, D.P., Sepansky, R. y Stoss, F.W. 1994. Trends'93: A compendium of data on Global Change. Carbon dioxide information analysis. Oak Ridge National Laboratory.

Box, G.E.P. y Jenkins, G. M. 1976. Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden Day ed., 575 pág.

Brassington, G. B. 1997. The modal evolution of the Southern Oscillation, J. Climate,10, 1021-1034.

Briffa, K.R., Jones, P.D. y Hulme, M. 1994. Summer moisture variability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer Drought Severity Index, Int.J.Climatol., 14, 475-506.

Cabrera, A.L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. Boletín Soc. Argentina de Botánica, 14, 1-42.

Castañeda M.E y Barros, V.R. 1994. Las tendencias de la precipitación en el cono Sur de América al Este de los Andes, Meteorologica, Vol 19, 23-32.

Changnon Jr. S. A. 1987. Detecting drought conditions in Illinois, ISWS/CIR-169-87, 36 pág.

Dagnino Pastore, L. Mi galaxia, Tomo 2. Editorial Nobis S.R.L.

Daniel, W.W. 1978 Applied nonparametric statistics, Houghton Mifflin Company, Boston, 473 pág.

Davis, R.E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean, J. Phys. Oceanogr., 6, 249-266.

Diaz, E.L. 1959. Fluctuaciones de la continentalidad y en las lluvias, Anales de la Sociedad Científica, Tomo CLXVII, 73-97.

Donnari M. y Scian, B. 1993. Sequías edáficas en Bordenave, Método de Palmer. Revista Geofisica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, No. 39, 87-99.

Donnari, M. A. y Scian, B.V. 1996. Estudio de episodios húmedos y secos en la región triguera V Sur, Argentina, Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 41-42.

Donnari M. y Scian, B. 1997. Relación entre variables agroclimáticas y rendimientos de trigo en la región pampeana, Rev. Fac. de Agronomía, 17(1), 19-23.

Dracup, J.A., Lee, K.S. y Paulson Jr., E.G. 1980a). On the statistical characteristics of Drought Events, Water Res. Resources, 16, 289-296.

Dracup, J.A., Lee, K.S. y Paulson Jr., E.G. 1980b). On the definition of droughts, Water Res. Resources, 16, 297-302.

Entekhabi, D. 1995. Recent advances in land-atmosphere interaction research, Reviews of Geophysics, Supplement, 995-1003.

Falasca, S.L. y Forte Lay, J.A. 1991. Caracterización climática de períodos secos y húmedos de la pampa deprimida de la Pcia. de Buenos Aires, Congremet VI, 111-113.

Feller, W. 1965. An introduction to probability theory and its applications. Wiley International Edition, Second Edition, Volume 1, 461 pág.

Gibbs, W.J. 1965. Drought - its definition, delineation and effects. WMO Special Environmental Report No. 5, 1-39.

Gibbs, W. y Maher, J.V. 1967. Rainfall deciles as drought indicators. Bulletin 48, Australian Bureau of Meteorology, Melbourne.

González, M.H. y Barros, V.R. 1996. Aspectos estadísticos del ciclo anual de precipitación y sus anomalías en Argentina Subtropical, Meteorologica, 21,15-26.

Greenhut, G.K. 1979. Reply to comments on "Correlations between rainfall and sea surface temperature during GATE", J. Phys. Oceanogr., 9, 1298-1299.

Grimm A.M., Doyle, M. y Barros, V.R. 1998. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. Part I : Precipitation anomalies. Sometido al Journal of Climate.

Grimm A.M. y Barros, V.R. 1998. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. Part II : Circulation anomalies. Sometido al Journal of Climate.

Hansen, J., Rind, D., DelGenio,A., Lacis, A., Lebedeff, S., Prather, M., Ruedy R. y Karl, T. 1989. Regional greenhouse climate effects, Proceeding of the Second North American Conference on Coping with Climate Change.

Hoffmann, J.A.J., Nuñez S. y Gómez, A. 1987. Fluctuaciones de la precipitación en la Argentina en lo que va del siglo, II Congreso Interamericano de Meteorología.

INTA, 1981. El Cultivo del Trigo, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Colección Principales Cultivos de la Argentina,185 pág.

Jenkins, G.M. y Watts D.G. 1968. Spectral analysis and its applications, Holden-Day Series, 525 pág.

Johnson, N.L. y Kotz, S. 1970. Continuous univariate distributions-1, Houghton Mifflin Co., 300 pág.

Julian, P. R. y Chervin, R.M. 1978. A Study of the Southern Oscillation and Walker Circulation Phenomenon, Mon. Wea. Rev. 106, 1433-1451.

Karl, T.R. 1986. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration, J. Climate Appl. Meteor. 25, 77-86.

Katz, R.W. y Glantz, M.H. 1986. Anatomy of a rainfall index, Mon. Wea. Rev., 114, 764-771.

Kiladis, G.N. y van Loon, H. 1988. The Southern Oscillation. VII: Meteorological anomalies over the Indian and Pacific sectors associated with the extremes of the oscillation, Mon. Wea. Rev. , 116, 120-136.

Krepper, C.M., Scian, B.V. y Pierini J.O. 1987. Variabilidad de la precipitación en la región sudoccidental pampeana, Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología, 12.2.1-12.2.5.

Krepper, C.M., Scian, B.V. y Pierini J.O. 1989. Time and space variability of rainfall in Central-east Argentina, J. Climate, Vol. 2, 39-47.

Krepper, C.M. y Scian, B. 1994. Climatología de la Precipitación en la región Pampeana: I.Variabilidad decádica, tendencias y eventos extremos, GEOACTA, 1, 159-174.

Landsberg, H. E. 1965. Drought, a recurrent element of climate, WMO No.403, Report No. 5, 89 pág.

Lindesay, J. 1988. South African rainfall, the Southern Oscillation and the Southern Hemisphere semi-annual cycle, J. Climatology, 8, 17-30.

MacQueen, J.B. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations, Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1. 281-297.

Matarira, C.H. 1990. Drought over Zimbabwe in a regional and global context, Int'l. J. Climatol., 10, 609-625.

Matarira, C.H. y Unganai, L.S. 1994. A Rainfall Prediction Model for Southern Africa based on the Southern Oscillation Phenomena, Technical Handbook, SADC/FAO, Early Warning System, 42 pág.

McBride J.L. y Nicholls, N. 1983. Seasonal Relationships between Australian Rainfall and the Southern Oscillation, Mon. Wea. Rev. 111, 1998-2004.

McKee, T. B., Doesken, N.J. y Kleist, J. 1993: The relation of Drought frecuency and duration to time scales. Pre-print, 8th Conf. on Applied Climatology, 179-184.

McKee, T. B., Doesken N.J. y Kleist, J. 1995: Drought Monitoring with multiple time scale. 9th. Conference on Applied Climatology, AMS, 233-236.

Navarro Dujmovich, M y Aguas, L. 1996. Caracterización de la sequía invernal de 1995 en el partido de Azul, Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 361-362.

Nicholls, N. 1984. Long range weather forecasting: recent research. Series 3, WMO.

Nicholls, N. 1993. What are the potential contributions of El Nino-Southern Oscillation research to early warning of potential acutefood-deficit situations?, Workshop on ENSO/FEWS, Budapest.

Núñez, S.E., Gentile, E.E. y Hordij, J.H. 1996. Anomalías de la precipitación en la Región Húmeda de Argentina durante 1995 y sus impactos en las actividades productivas. Actas del VII Congreso Argentino de Meteorología y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 313-314.

Palmer, W.C. 1965: Meteorologycal drought. U.S.Weather Bureau Res. Paper No.45, 58 pág.

Peixoto, J.P. y Oort, A.H. 1992. Physics of Climate, American Inst. of Physics, 520 pág.

Philander, S.G.H., Lau, N.-C., Pacanowski, R.C. y Nath, M.J. 1992. Simulation of ENSO with a global atmospheric GCM coupled to a high-resolution, tropical Pacific Ocean GCM, J. Climate, 5, 308-329.

Pittock, A.B. 1980. Patterns of climate variation in Argentina and Chile-I. Precipitation, 1931-60, Mon. Weath.Rev. 108, 1347-1360.

Prohaska, F.J. 1952. Regimenes estacionales de precipitación de Sudamérica y mares vecinos(desde 15S hasta Antártida), Meteoros, 1,66-100.

Prohaska, F.J. 1960. El problema de las sequías en la región semiárida pampeana y la sequía actual, Revista IDIA, Noviembre, 53-67.

Quinn, W.H., Zopf, D.O., Short, K.S. y Yang Kuo, R.T.W. 1978. Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian Droughts, Fish. Bull., 76, 663-678.

Rajagopalan, B., Upmanu Lall y Cane, M.A. 1997. Anomalous ENSO Ocurrences: An Alternate View, J. Climate, 10, 2351-2357.

Rasmusson E.M. y Carpenter, T.H. 1982. Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño, Mon. Wea. Rev., 110, 354-384.

Ratcliffe, R. A. 1981. Variability of weather over approximately the last century, Climatic Variations and Variability: Facts and Theories. D. Reidel Pub., 303-316.

Ravelo, A.C. 1990. Indices de sequía y humedad del cultivo, AADA, Córdoba.

Ropelewski C.F. y Halpert, M.S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev., 115, 1606-1626.

Ropelewski C.F. y Halpert, M.S. 1989. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation, J. Climate, 2, 268-284.

Ropelewski C.F. y Halpert, M.S. 1996. Quantifying Southern Oscillation-Precipitation relationships, J. Climate, 9, 1043-1059.

Ropelewski C.F. y Jones, P.D. 1987. An extension of the Tahiti-Darwin Southern oscillation index. Mon. Wea. Rev., 115, 2161-2165.

Schwerdtfeger, W. y Vasino, C.J. 1954. La variciación secular de las precipitaciones en el Este y Centro de la República Argentina, Meteoros, IV, No. 3, 174-193.

Scian B. y Donnari, M. 1995. El indice de anomalía de humedad Z y su relación con el rendimiento de trigo en Bordenave (Bs. As, Argentina), AgriScientia, 12, 47-51.

Scian B. y Donnari, M. 1997a). Retrospective Analysis of the PDSI in the Semi-arid Pampas region, Argentina, Int'l J. Climatology, Vol 17, 313-322.

Scian B. y Donnari, M. 1997b). Aplicación del indice Z de Palmer para la comparación de sequías en las regiones trigueras II, IV y V Sur de Argentina, Rev. Facultad de Agronomía, 17(1), 41-46.

Shukla J. y Mooley, D.A. 1987. Empirical Prediction of the Summer Monsoon Rainfall over India, Mon. Wea. Rev., 115 695-703.

Siegel S. 1956. Nonparametric statistics: for the behavioral sciences. McGraw Hill Kogakusha, Ltd., International Student Edition, 312 pág.

Smith T.M. y Ropelewski, C.F. 1997. Quantifying Southern Oscillation-Precipitation Relationships from an Atmospheric GCM, J. Climate, 10, 2277-2284.

Stone R. y Auliciems, A. 1992. SOI Phase relationships with rainfall in Eastern Australia, Int'l J. Climat., 12, 625-636.

Thom, H.C.S. 1966. Some methods of climatological analysis. WMO. Tech. Note 81. 53 pág.

Trenberth K.E. 1996. El Niño definition, CLIVAR-Exchanges, Vol 1, Nro 3, 6-8.

Trenberth K.E. 1997. The definition of El Niño, Bull. of AMS, 78, 2771-2777.

Trenberth K.E. y Guillemot, C.J. 1996. Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America, J. Climate, 9, 1288-1298.

Trenberth K.E. y Shea, D.J. 1987. On the evolution of the Southern Oscillation, Mon. Wea. Rev., 115, 3078-3096.

Troup, A.J. 1965. The Southern Oscillation, Quarterly J. Roy. Met. Soc., 91, 490-506.

Vargas, W.M. 1987. El clima y sus impactos. Implicancias en las inundaciones del noroeste de Buenos Aires, Boletín Informativo Techint, No 250.

van Loon, H. 1995. Apuntes Curso de Postgrado, UBA.

Wang, B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades, J. Climate, 8, 267-285.

W.M.O. 1966. Climatic Changes. Tech. Note 79, WMO, 79 pág.

Wyrtki, K. 1975. El Niño - The Dynamic Response of the Equatorial Pacific Ocean to Atmospheric Forcing, J. Phys. Oceanogr., 5, 572-584.

Wyrtki, K. 1979. The response of sea surface topography to the 1976 El Niño, J. Phys. Oceanogr., 9, 1223-1231.

Zebiak, E.S. y Cane, M.A. 1987. A model El Niño-Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev., 115, 2262-2278.

Zhang Y, Wallace, J.M. y Battisti, D. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-1993, J. Climate, 10, 1004-1020.

Zhang R-H y Levitus S. 1997. Interannual variability of the coupled tropical Pacific ocean-atmosphere system associated with El Niño-Southern Oscillation, J. Climate, 10, 1312-1330.

ANEXO I

FASES DEL SOI - 1900 a 1989

MES ENERO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1906	1904	1905	1901	1900
1913	1911	1912	1902	1903
1914	1916	1928	1920	1907
1919	1917	1931	1930	1908
1926	1918	1946	1931	1909
1941	1921	1955	1935	1910
1942	1922	1958	1937	1924
1944	1923	1961	1940	1925
1952	1929	1969	1953	1927
1959	1934	1970	1954	1936
1964	1938	1971	1963	1945
1973	1939		1967	1947
1978	1943		1968	1948
1983	1950		1977	1949
1987	1951		1980	1960
	1956		1982	1965
	1957		1986	1966
	1962			1972
	1974			1975
	1976			1979
	1989			1981
				1984
				1985
				1988

MES FEBRERO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1900	1904	1902	1910	1901
1903	1917	1905	1914	1906
1919	1918	1915	1924	1907
1941	1921	1916	1925	1908
1942	1922	1926	1928	1909
1952	1929	1931	1933	1911
1958	1930	1935	1944	1913
1959	1938	1937	1946	1920
1969	1939	1953	1949	1923
1970	1943	1954	1950	1927
1983	1945	1957	1955	1934
	1951	1962	1961	1936
	1956	1973	1965	1940
	1963	1978	1968	1947
	1967	1982	1971	1948
	1972	1986	1975	1960
	1974	1987	1977	1964
	1976		1979	1966
	1989		1984	1980
			1985	1981
				1988

MES MARZO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1905	1904	1900	1901	1909
1906	1910	1918	1902	1911
1912	1917	1951	1903	1916
1919	1921	1955	1907	1920
1926	1922	1961	1908	1924
1941	1923	1966	1913	1930
1978	1925	1968	1914	1933
1983	1928	1977	1927	1934
1987	1929	1979	1931	1936
	1939	1980	1935	1938
	1943	1981	1937	1940
	1945	1984	1947	1942
	1950	1985	1952	1944
	1956		1959	1946
	1967		1960	1948
	1971		1964	1949
	1974		1969	1953
	1975		1970	1954
	1976		1973	1957
	1989		1986	1958
			1988	1962
				1963
				1965
				1972
				1982

MES ABRIL

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1900	1901	1909	1904	1906
1905	1902	1912	1916	1907
1926	1903	1922	1918	1908
1940	1910	1924	1919	1911
1941	1917	1944	1933	1913
1966	1921	1945	1934	1920
1977	1923	1947	1936	1929
1980	1925	1952	1938	1930
1981	1927	1965	1943	1937
1983	1928	1967	1948	1942
1987	1931	1969	1954	1946
	1935	1976	1961	1949
	1939		1984	1951
	1950		1985	1953
	1956		1989	1955
	1959			1957
	1960			1958
	1963			1962
	1971			1964
	1974			1968
	1975			1970
				1972
				1973
				1978
				1979
				1982
				1986
				1988

MES MAYO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1900	1902	1911	1906	1901
1905	1903	1925	1909	1907
1912	1904	1928	1916	1908
1940	1917	1929	1924	1910
1941	1918	1934	1930	1913
1946	1921	1935	1938	1919
1951	1923	1947	1942	1920
1969	1927	1953	1945	1922
1977	1931	1957	1952	1926
1987	1936	1958	1955	1933
	1943	1972	1962	1937
	1950		1964	1939
	1956		1965	1944
	1960		1968	1948
	1961		1970	1949
	1963		1973	1954
	1971		1978	1959
	1974		1979	1966
	1975		1980	1967
	1985		1981	1976
	1989		1983	1982
			1988	1984
				1986

MES JUNIO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1905	1902	1903	1900	1907
1911	1916	1904	1901	1908
1912	1917	1906	1909	1913
1940	1921	1918	1910	1919
1946	1924	1930	1920	1923
1972	1931	1933	1922	1925
1977	1938	1941	1929	1926
1987	1942	1943	1934	1927
	1952	1948	1945	1928
	1955	1949	1947	1935
	1956	1959	1950	1936
	1962	1963	1951	1937
	1964	1965	1953	1939
	1968	1982	1957	1944
	1971	1983	1958	1954
	1974	1984	1966	1960
	1975	1985	1967	1961
	1978	1988	1970	1969
	1981		1973	1976
	1989		1986	1979
				1980

MES JULIO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1905	1900	1918	1903	1902
1911	1901	1923	1906	1904
1919	1910	1925	1909	1907
1940	1917	1937	1912	1908
1941	1920	1951	1916	1913
1946	1921	1965	1926	1922
1972	1924	1970	1928	1927
1977	1931	1976	1933	1929
1982	1934		1936	1930
1987	1938		1939	1935
	1945		1943	1942
	1950		1947	1944
	1952		1948	1953
	1955		1949	1957
	1956		1954	1958
	1964		1960	1959
	1968		1963	1961
	1973		1974	1962
	1975		1979	1966
	1981		1984	1967
	1986		1985	1969
	1989		1988	1971
				1978
				1980
				1983

MES AGOSTO

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1905	1900	1902	1901	1903
1911	1910	1921	1904	1907
1918	1915	1934	1906	1912
1919	1916	1936	1908	1913
1923	1917	1953	1909	1922
1925	1920	1957	1928	1926
1940	1924	1979	1937	1927
1941	1938	1986	1942	1929
1946	1947	1989	1943	1930
1951	1950		1944	1933
1965	1955		1945	1935
1972	1956		1954	1939
1976	1958		1962	1948
1977	1960		1964	1949
1982	1973		1966	1952
1987	1974		1967	1959
	1975		1970	1961
	1981		1971	1963
	1988		1983	1968
			1985	1969
				1978
				1980
				1984

MES SETIEMBRE

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1911	1906	1900	1903	1904
1923	1909	1901	1908	1905
1925	1910	1902	1921	1907
1934	1916	1932	1922	1912
1940	1917	1939	1926	1913
1941	1920	1946	1935	1915
1953	1924	1951	1936	1918
1957	1928	1958	1949	1919
1965	1938	1969	1970	1927
1972	1942		1979	1929
1976	1943		1983	1930
1977	1945		1989	1933
1982	1947			1937
1987	1950			1944
	1954			1948
	1955			1952
	1956			1959
	1960			1961
	1962			1963
	1964			1966
	1967			1968
	1971			1978
	1973			1980
	1974			1984
	1975			1985
	1981			1986
	1988			

MES OCTUBRE

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1900	1903	1915	1929	1904
1901	1906	1920	1930	1905
1902	1908	1925	1934	1907
1911	1910	1941	1948	1909
1913	1916	1944	1950	1912
1923	1917	1947	1952	1918
1932	1921	1963	1953	1919
1939	1922	1981	1956	1926
1940	1924		1957	1927
1946	1928		1976	1933
1951	1935		1986	1936
1965	1938			1937
1969	1942			1949
1972	1943			1954
1977	1945			1958
1982	1955			1959
1987	1962			1960
	1964			1961
	1970			1966
	1971			1967
	1973			1968
	1974			1978
	1975			1979
	1983			1980
	1988			1984
	1989			1985

MES NOVIEMBRE

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1900	1908	1904	1906	1902
1901	1909	1905	1912	1903
1911	1910	1915	1918	1907
1913	1916	1923	1934	1920
1919	1917	1936	1946	1926
1925	1921	1942	1947	1927
1939	1922	1943	1959	1930
1940	1924	1949	1960	1932
1941	1928	1956	1969	1937
1944	1929	1957	1973	1945
1951	1933	1974	1976	1952
1963	1935	1986	1981	1953
1965	1938	1989	1984	1955
1972	1948			1958
1977	1950			1966
1982	1955			1967
	1961			1968
	1962			1978
	1964			1979
	1970			1980
	1971			1983
	1975			1985
	1988			1987

MES DICIEMBRE

Fase1	Fase2	Fase3	Fase4	Fase5
1901	1906	1908	1903	1900
1905	1909	1912	1904	1902
1913	1910	1918	1915	1907
1919	1916	1934	1920	1911
1925	1917	1935	1923	1926
1939	1921	1940	1927	1930
1941	1922	1943	1928	1946
1951	1924	1948	1965	1953
1957	1929	1952	1936	1958
1963	1933	1972	1937	1962
1977	1947	1976	1938	1964
1982	1950		1942	1966
1986	1955		1944	1967
	1959		1945	1968
	1960		1949	1969
	1961		1954	1971
	1970		1956	1974
	1973		1965	1978
	1975			1979
	1988			1980
				1981
				1983
				1984
				1985
				1987
				1989

ANEXO II

II. 1 Método de Clusters

Los métodos más empleados son: Método del centroide, Método de Ward, Métodos no-jerárquicos para clusters, Método de MacQueen del k-medio. Este último es el método que se aplicó en esta investigación. MacQueen (1967) empleó el término " k-medios" para indicar el proceso de asignar cada dato a un cluster (de entre k clusters) con el centroide más cercano (media). La clave de este proceso es que el centroide del cluster se calcula según los elementos reales del cluster, más que según su membresía al final del ciclo de re-ubicación.

El algoritmo de MacQueen para elegir los m datos para el cluster k se compone de los siguientes pasos:

1) Toma los primeros k datos del conjunto de datos como clusters de un sólo elemento cada uno.

2) Asigna cada uno de los m-k datos restantes a un cluster con el centroide más cercano. Luego de cada selección recalcula el centroide del cluster obtenido.

3) Después que todos los datos han sido asignados a algún cluster k en el paso 2), toma los centroides existentes en cada cluster como "puntos fijos semillas" y hace una pasada más de los datos asignando cada uno a la semilla puntual más cercana. Como los puntos semilla son recalculados sólo después que el conjunto total de datos ha sido reubicado, los resultados no se ven afectados por la secuencia en que entran los datos unitarios dentro del conjunto.

La convergencia en el proceso de las k-medias se realiza hasta que ningún dato cambie su lugar en el cluster al comparar con la k-media; ello se logra en no más de 5 repeticiones.

Se puede esperar convergencia en estos métodos porque:

1. En un determinado cluster formado por datos unitarios, la suma de los desvíos al cuadrado respecto a un punto de referencia es un mínimo único cuando el punto de referencia se toma en forma tal que es el vector medio (o centroide) del Cluster. La suma de los desvíos cuadráticos alrededor del centroide del cluster k-ésimo se escribe como:

$$E_k = \sum_{j=1}^{j=m_k} \sum_{i=1}^{i=n} \left(x_{ijk} - \overline{x}_{ik} \right)^2$$

x_{ijk} = Valor de la i-ésima de n variables para el dato j-ésimo de m_k datos en el k-ésimo cluster de h clusters.

E_k =Suma de las distancias Euclídeas desde cada dato puntual al vector medio del cluster k, también llamado el error de la suma de cuadrados del cluster k.

$\overline{x}_{ik}$ = promedio de la variable i-ésima de los datos del cluster k-ésimo.

Para una partición en h clusters la suma de los cuadrados total dentro del grupo es:

$$E = \sum_{k=1}^{k=h} E_k .$$

II. 2 Análisis de la varianza por rangos de Kruskal-Wallis y comparación de medianas

Este test es una de las técnicas no-paramétricas más usadas para probar la hipótesis nula de igualdad de medianas. Se supone que los datos para analizar consisten en k muestras al azar de tamaño n_1 ,n_2 , ..., n_k. Las observaciones son independientes dentro de la muestra y entre las muestras. La variable es contínua. El nivel de la escala de medición es al menos ordinal. Las poblaciones son idénticas.

Las hipótesis son

H_0: Las funciones de distribución de las k poblaciones son idénticas.

H_1: Las medianas de las k poblaciones no son la misma.

Se hace una aplicación a los datos correspondientes a las fases para el mes de Noviembre en la región Este, que se muestran en la Tabla II.1.

Los datos originales se reemplazan por el rango que le corresponden después de haber ordenado de menor a mayor los N datos totales de las 5 muestras de n_i datos. Si la H_0 es cierta, las distribuciones de los órdenes de cada grupo será al azar, así que ya sean órdenes bajos o altos, no tenderán a concentrarse en una muestra. Se espera tener sumas casi iguales de los rangos de cada muestra luego de haber sido ajustadas según el tamaño de cada una. Cuando la suma de los rangos en una muestra sea lo suficientemente diferente como para indicar que es poco probable que provenga de la misma población se decide rechazar la H_0 .

Tabla II. 1. Clasificación de las observaciones por fases del SOI.

IPE F1	IPE F2	IPE F3	IPE F4	IPE F5
.053	.515	.454	.308	-.251
.491	.112	-.945	.919	-.823
.111	-.979	.474	.307	-1.009
.011	-.427	.067	1.138	.900
-.445	-1.670	-.151	1.186	.449
.223	-.663	-.933	-.027	.996
-1.295	-.462	.907	.475	.215
-.464	-.691	-.249	-.730	.009
.553	-.011	-.639	.476	-.536
-.435	-.482	-.171	-.777	-.684
1.485	-.683	-.839	.363	.809
.202	.211		.183	-.774
-.156	-1.795			1.245
.482	.138			1.337
-.529	-.703			-.212
	-.000			.087
	.391			.677
	.122			.170
	-.729			.720
	-.931			-.577
	-.287			1.572
	-.159			.944

El estadístico de Kruskal-Wallis, H, es el indicado pues es la sumatoria pesada de las diferencias al cuadrado entre la suma de los rangos observados y los esperados. El peso está dado por la inversa del tamaño de la muestra.

H se expresa así:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{n_i} \left[R_i - \frac{n_i(N+1)}{2} \right]^2$$

donde R_i es la suma de los rangos correspondientes a la muestra i-ésima y $n_i(N+1)/2$ es la suma de los rangos esperada.

Para determinar la significancia se compara el valor calculado con el valor de χ^2 para k-1 grados de libertad, ya que para valores de k mayores que tres y muestras mayores que cinco, H se aproxima a una distribución χ^2 de k-1 grados de libertad (Daniel, 1978).

Para el caso del ejemplo, se calculó un H= 9.88 para 4 grados de libertad y N=87. El valor de Tablas para χ^2 es 9.44 para 4 grados de libertad y p=0.95.

Como H $>\chi^2$, se rechaza la hipótesis H_0 y se acepta H_1 . Con lo cual se concluye que las medianas de las anomalías del IPE no son las mismas según los 5 casos estudiados.

Resta ahora conocer, en que casos las medianas son significativamente diferentes ya que es deseable distinguir donde están las diferencias entre cada mediana. Dentro de los métodos estudiados el que se presentó como más adecuado para el problema a resolver fue el procedimiento de las comparaciones múltiples (Daniel, 1978) que analiza la desigualdad,

$$\left|\overline{R}_i - \overline{R}_j\right| \leq z_{(1-[\alpha/k(k-1)])}\sqrt{\frac{N(N+1)}{12}\left(\frac{1}{n_i}+\frac{1}{n_j}\right)}$$

donde $\overline{R}_i$ es el promedio de los rangos de la muestra i-ésima y $\overline{R}_j$ el promedio de los rangos de la muestra j-ésima. El valor de z es el área bajo la curva Normal que tiene un área $\alpha/k(k-1)$ a su derecha. Eligiendo un valor α=0.5, se obtiene un valor de z de 1.96 con 0.025 del área a la derecha.

Para el caso del ejemplo, el promedio de los rangos para cada una de las muestra es:

R1 = 763/16 = 47.7; R2 = 723/23 = 31.3; R3 = 484/12 = 40.3;

R4 = 712.5/13 = 54.8 y R5 = 1145.5/23 = 49.8

con la mayor diferencia entre R2 y R4; que resulta 23.4 y que es mayor que $1.96*(25.26)*(\sqrt{(1/n_2)+(1/n_4)})$ = 49.5 * 0.347= 17.17. Es decir que la diferencia entre las medianas de las fases 2 y 4 son significativas. Luego, se determina el signo del desvío. Para M2 negativo y para M4 positivo.

Otro elemento de ayuda es recurrir a los gráficos de cajas (box plot) para cada mes y región, donde se puede visualizar el valor climático y los apartamientos de cada mediana por fase. Esto se representa en las Figuras II.1 a II.36.

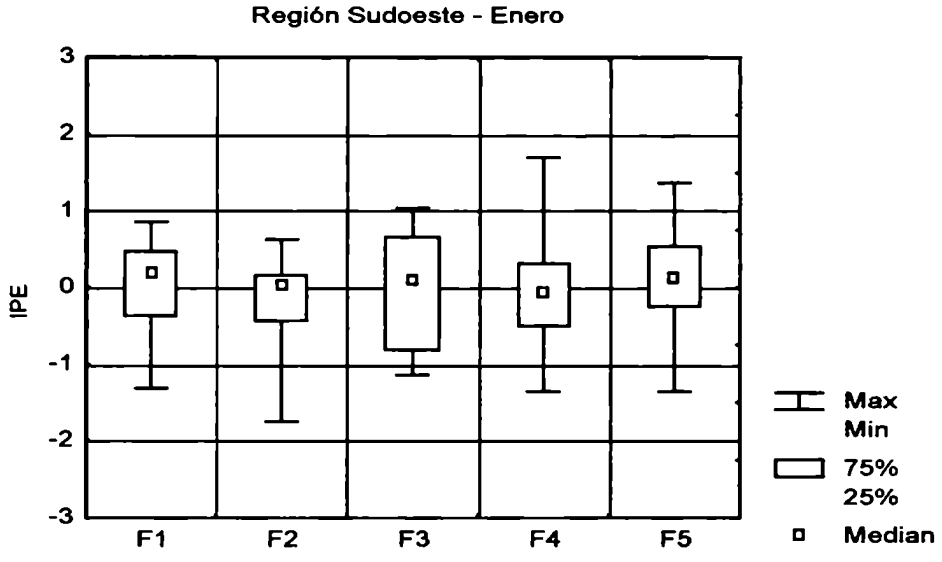

Figura II.1. Gráfico de cajas comparando la distribución de las anomalías de precipitación según las Fases del SOI, para la región Sudoeste en Enero.

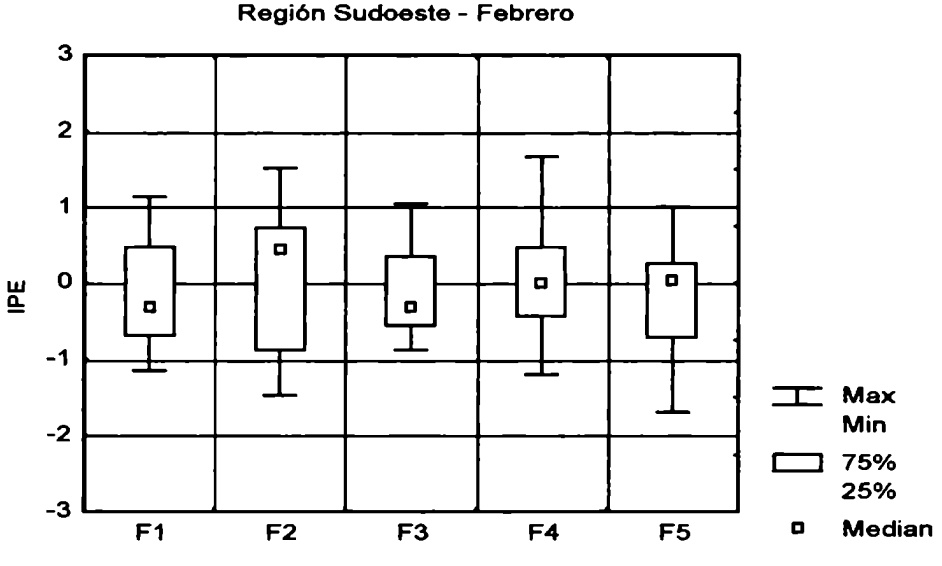

Figura II.2. Idem Figura II.1, Febrero.

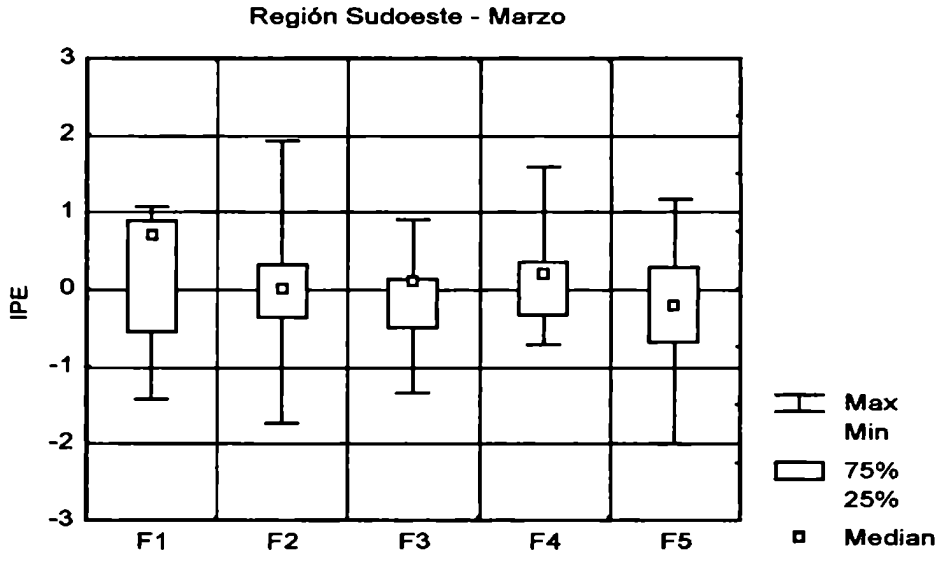

Figura II.3. Idem Figura II.1, Marzo.

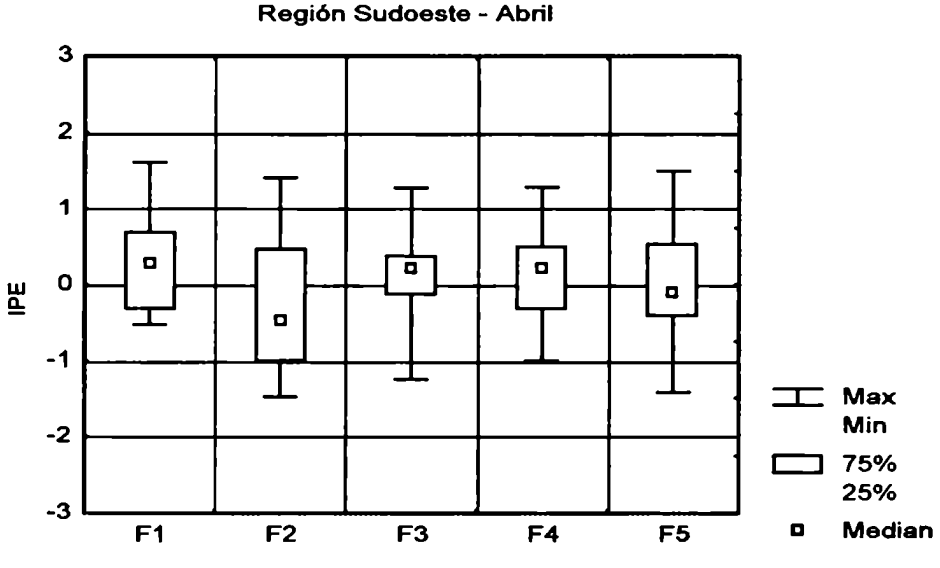

Figura II.4. Idem Figura II.1, Abril.

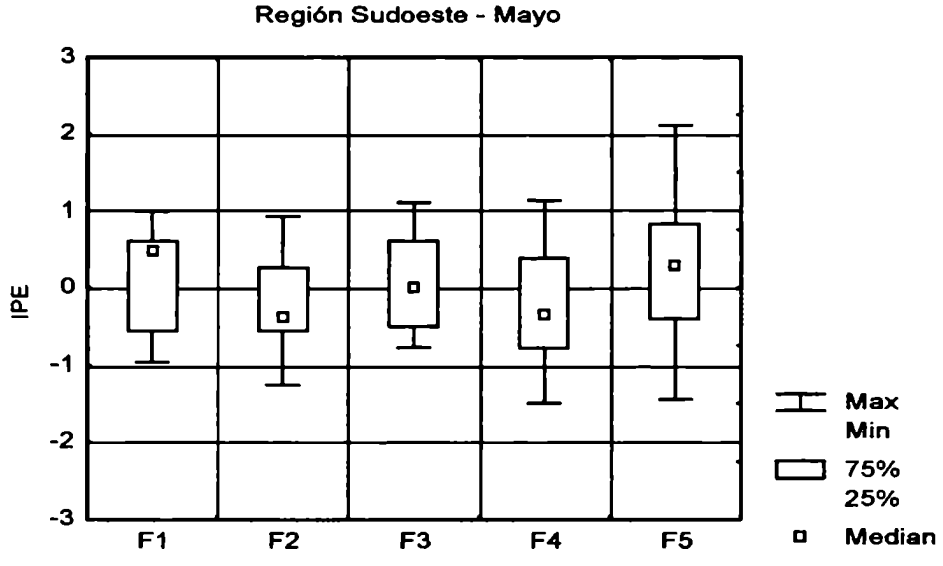

Figura II.5. Idem Figura II.1, Mayo.

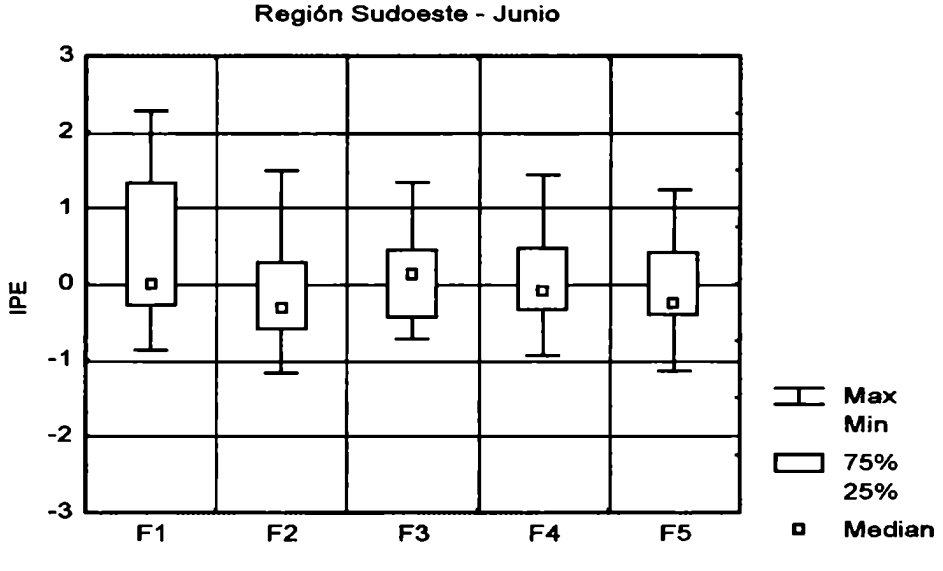

Figura II.6. Idem Figura II.1, Junio.

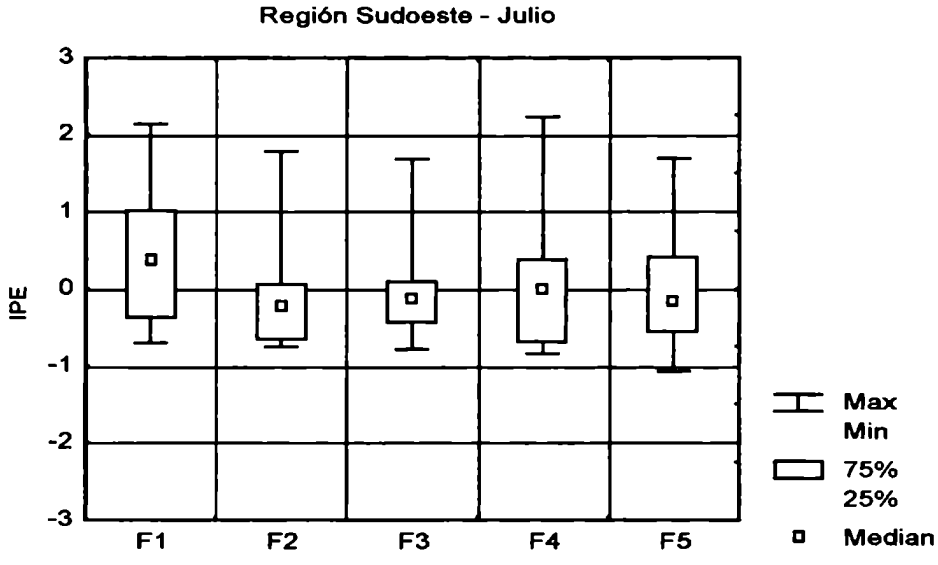

Figura II.7. Idem Figura II.1, Julio.

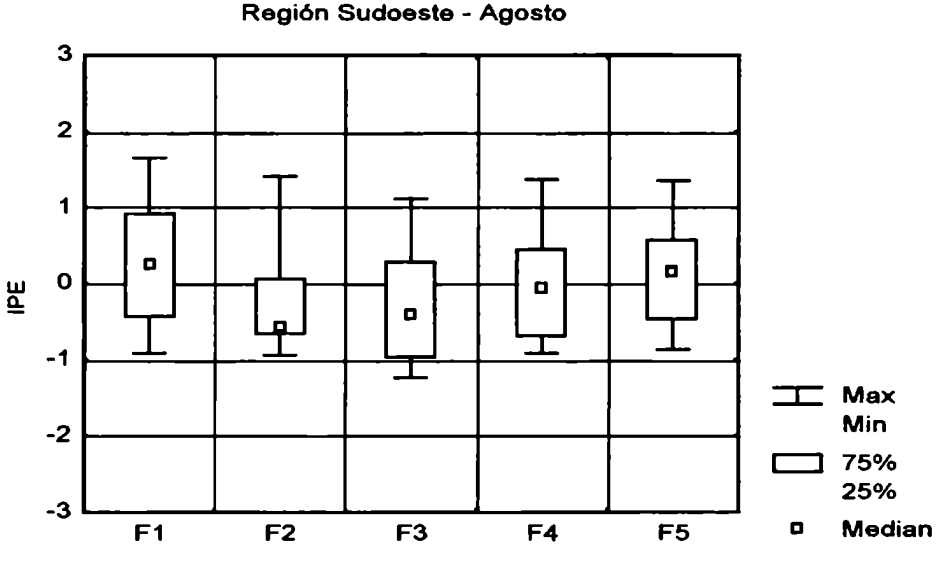

Figura II.8. Idem Figura II.1, Agosto.

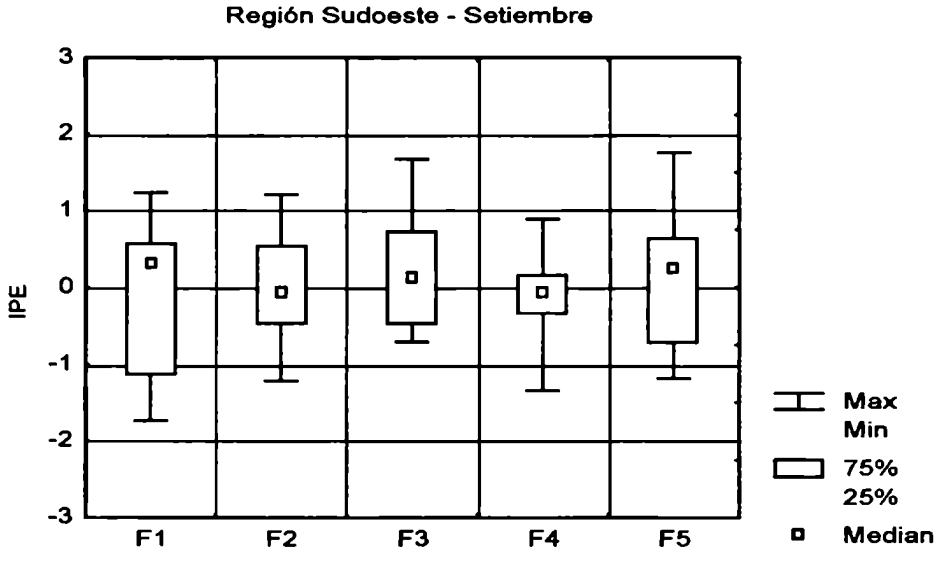

Figura II.9. Idem Figura II.1, Setiembre.

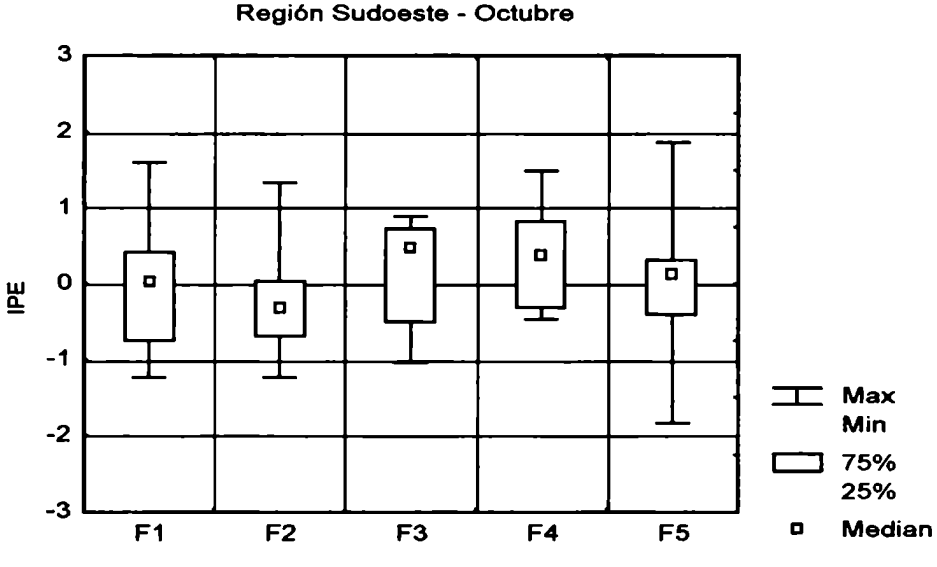

Figura II.10. Idem Figura II.1, Octubre.

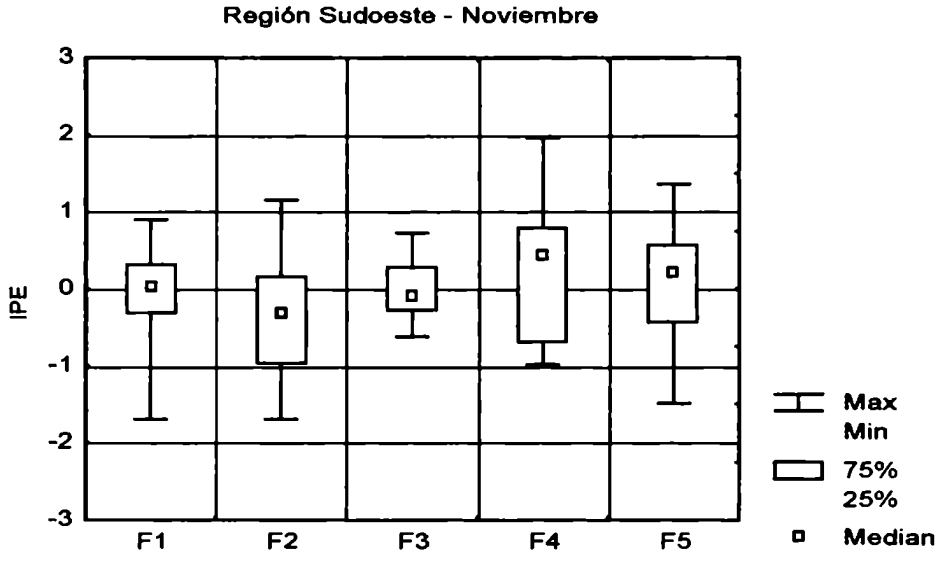

Figura II.11. Idem Figura II.1, Noviembre.

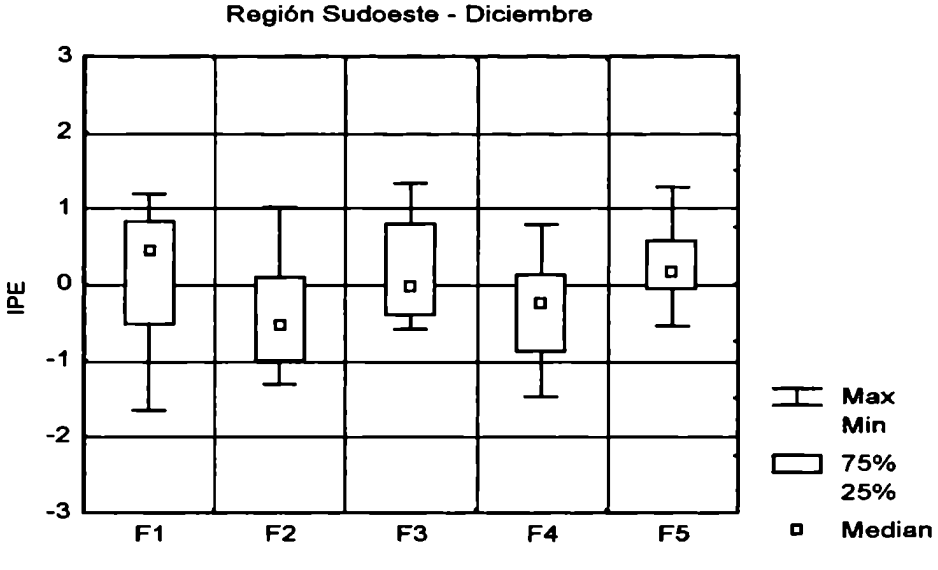

Figura II.12. Idem Figura II.1, Diciembre.

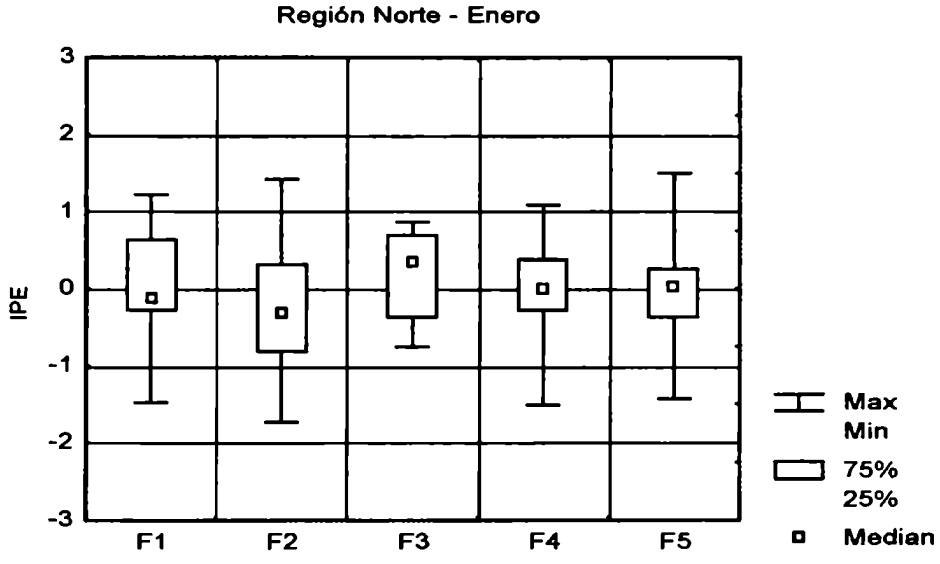

Figura II. 13. Gráfico de cajas comparando la distribución de precipitación según las fases del SOI, para la región Norte en Enero.

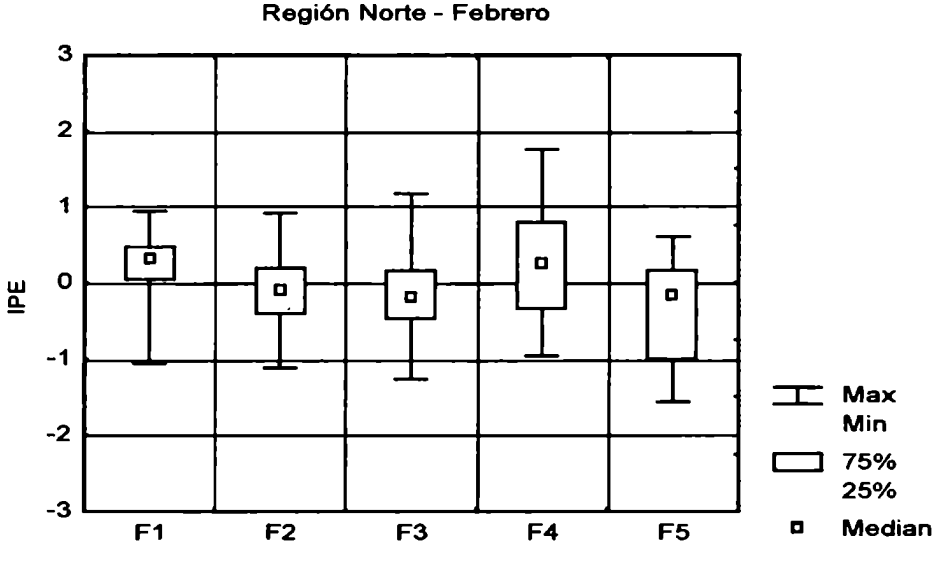

Figura II. 14. Idem Figura II.13, Febrero

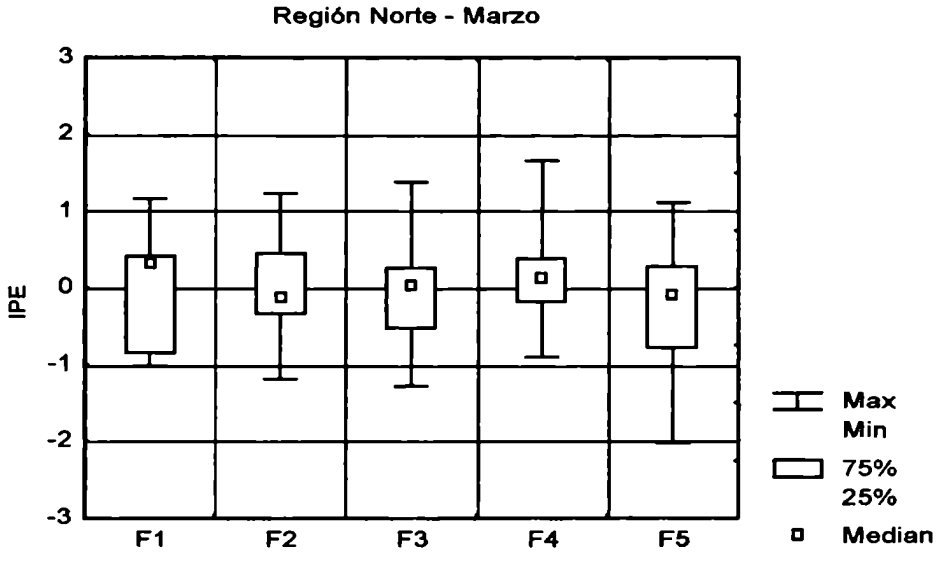

Figura II. 15. Idem Figura II.13, Marzo.

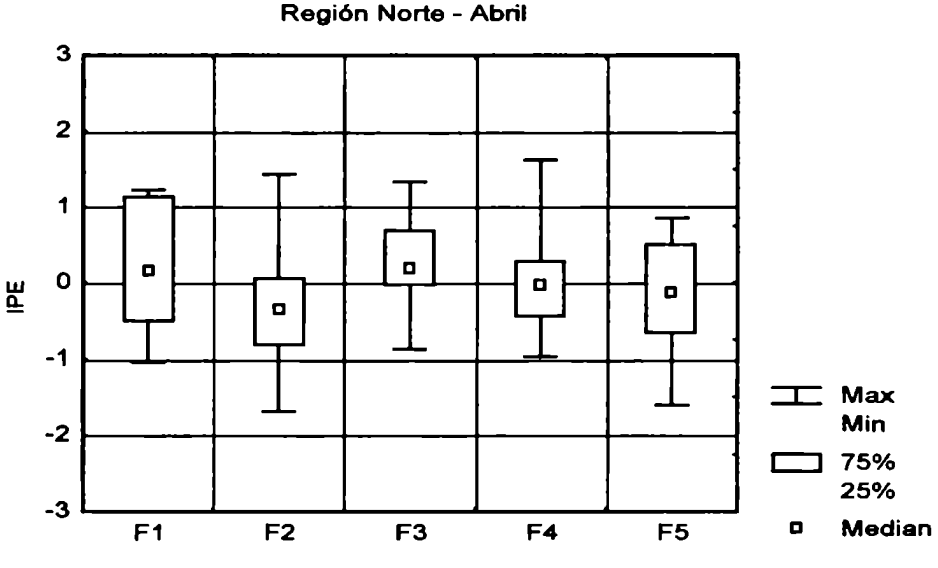

Figura II. 16. Idem Figura II.13, Abril.

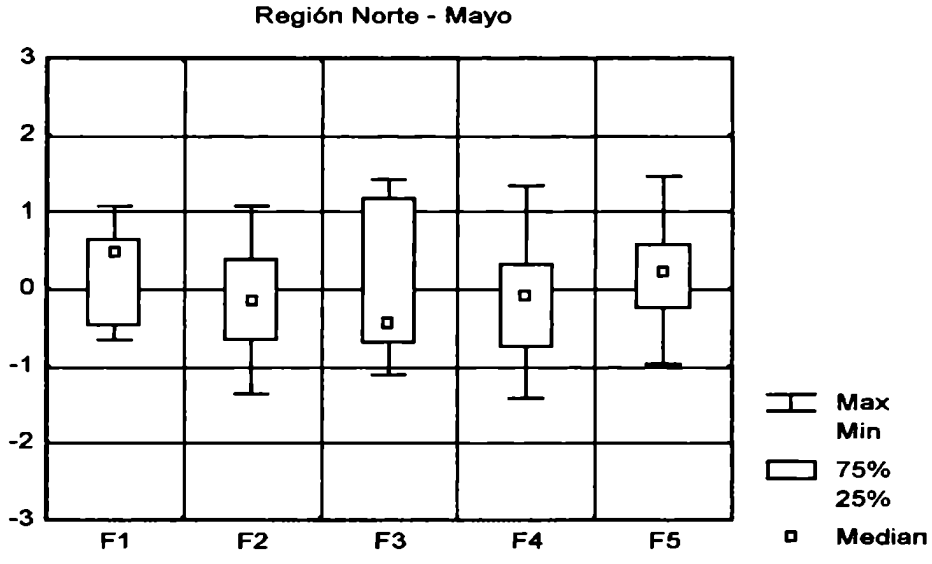

Figura II. 17. Idem Figura II.13, Mayo.

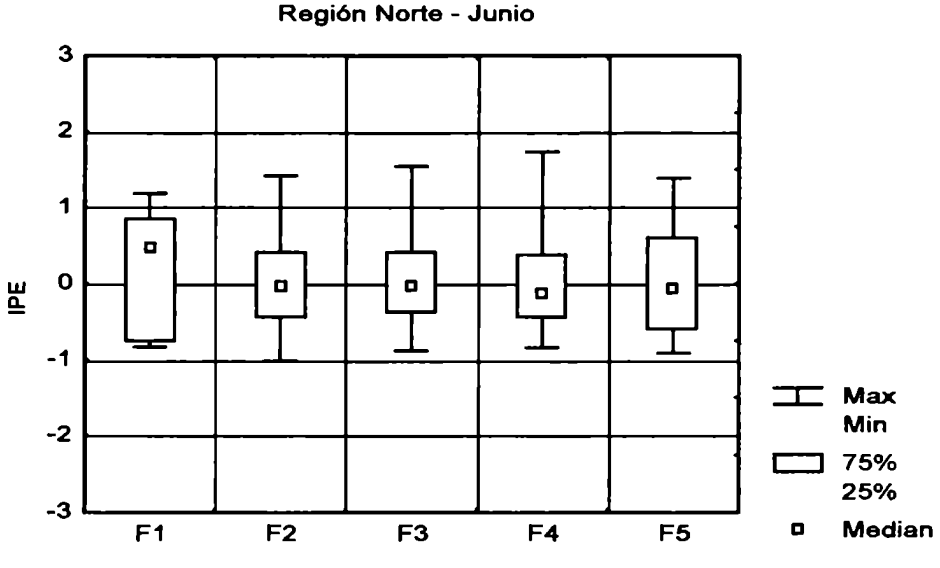

Figura II. 18. Idem Figura II.13, Junio.

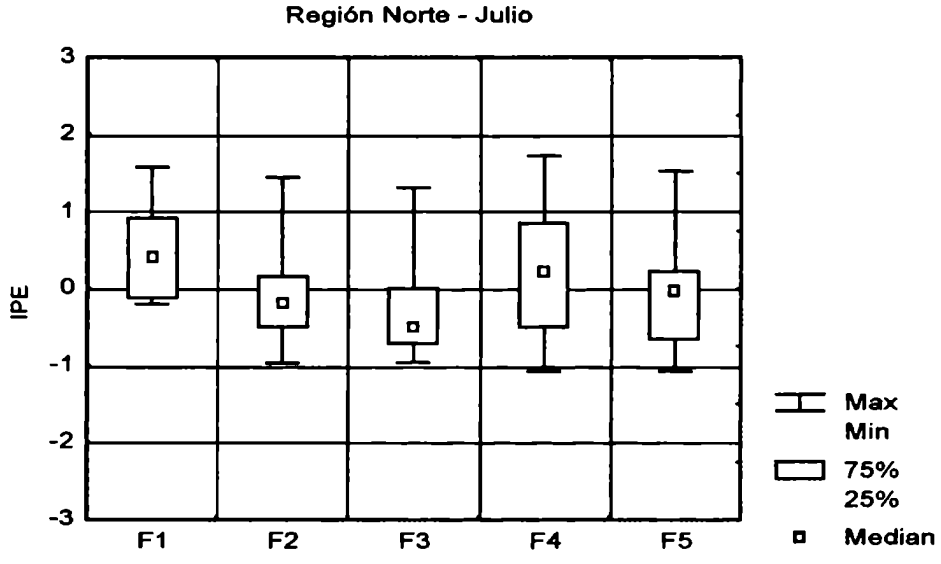

Figura II. 19. Idem Figura II.13, Julio.

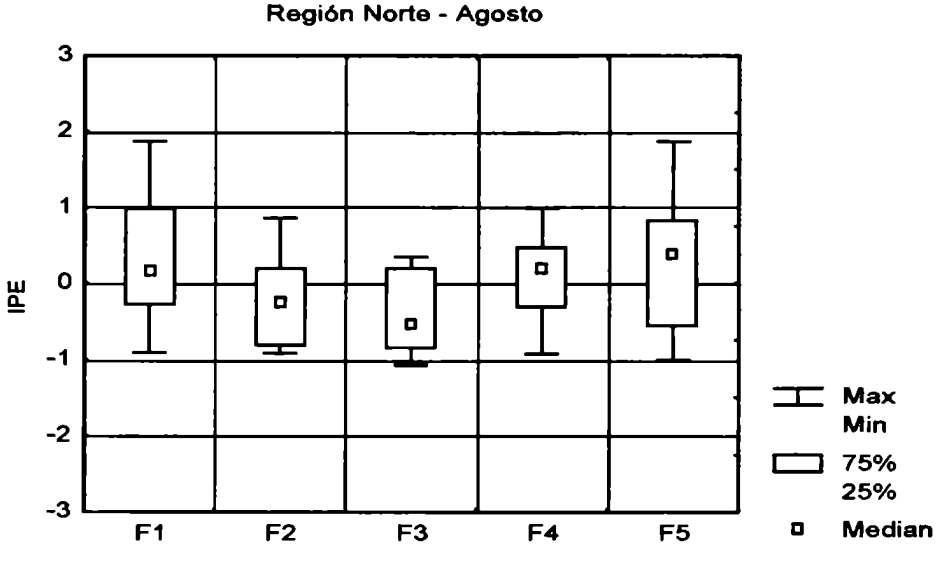

Figura II. 20. Idem Figura II.13, Agosto.

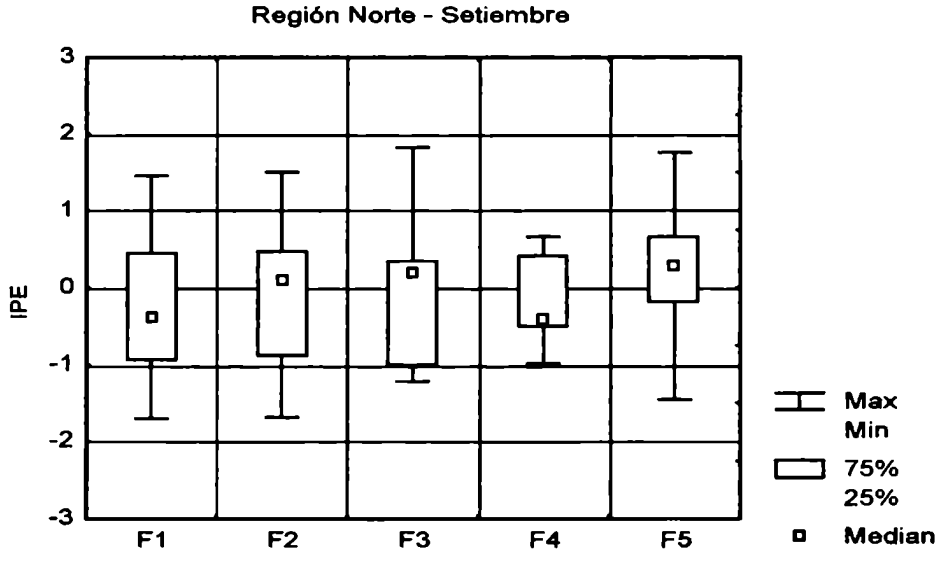

Figura II. 21. Idem Figura II.13, Setiembre.

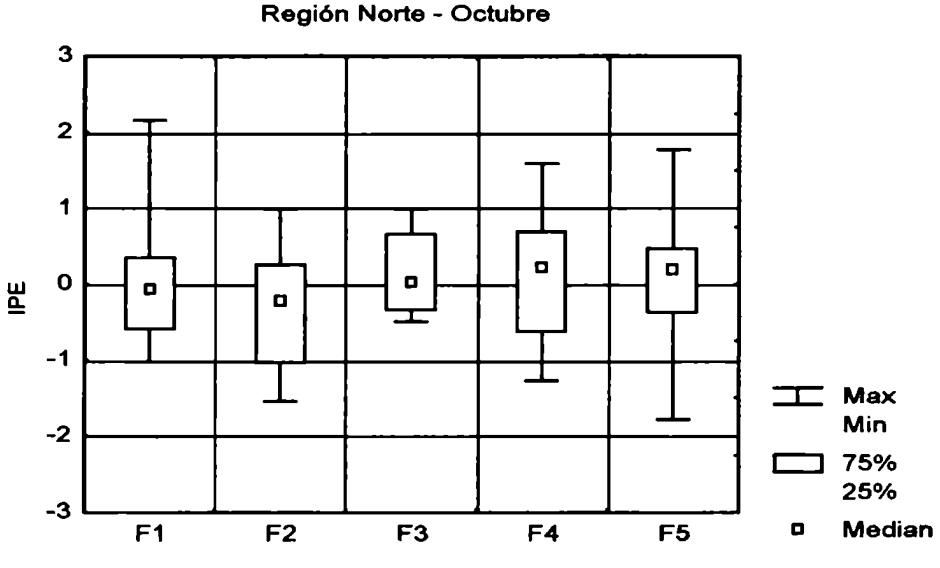

Figura II. 22. Idem Figura II.13, Octubre.

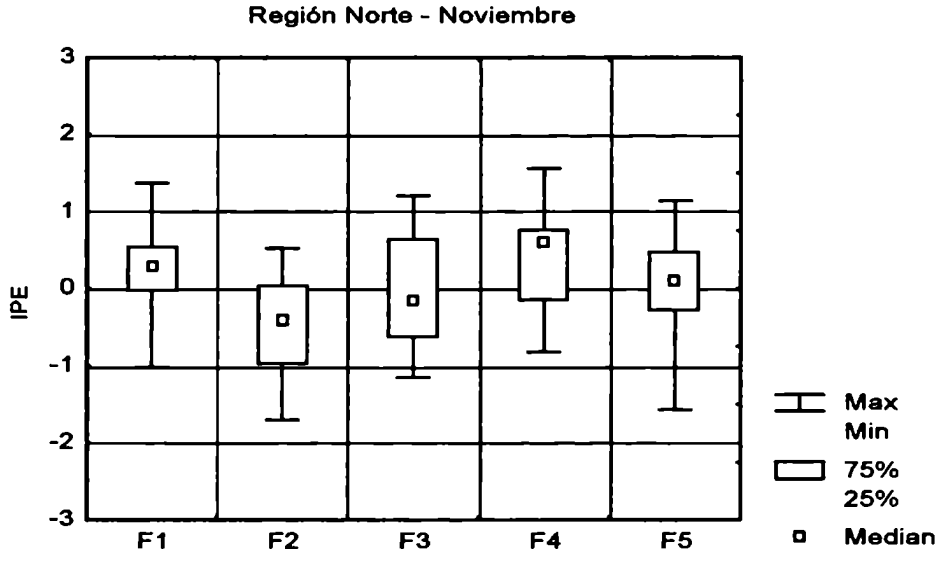

Figura II. 23. Idem Figura II.13, Noviembre.

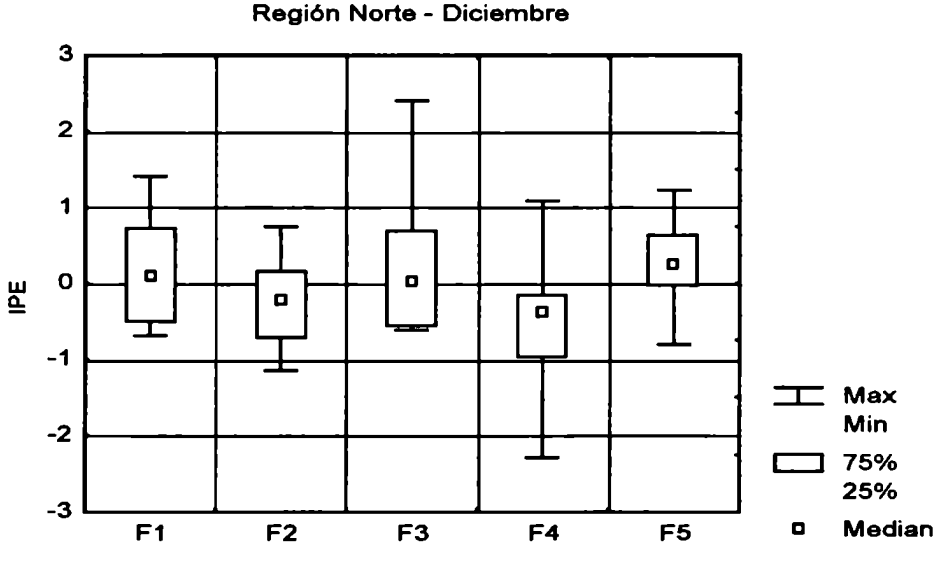

Figura II. 24. Idem Figura II.13, Diciembre.

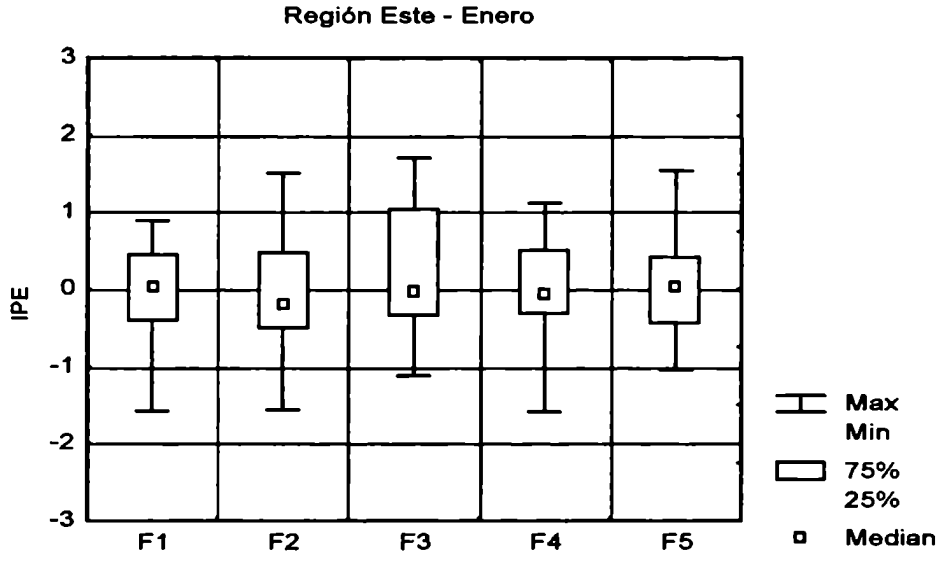

Figura II. 25. Gráfico de cajas comparando las distribución de precipitación según las fases del SOI, para la región Este en Enero.

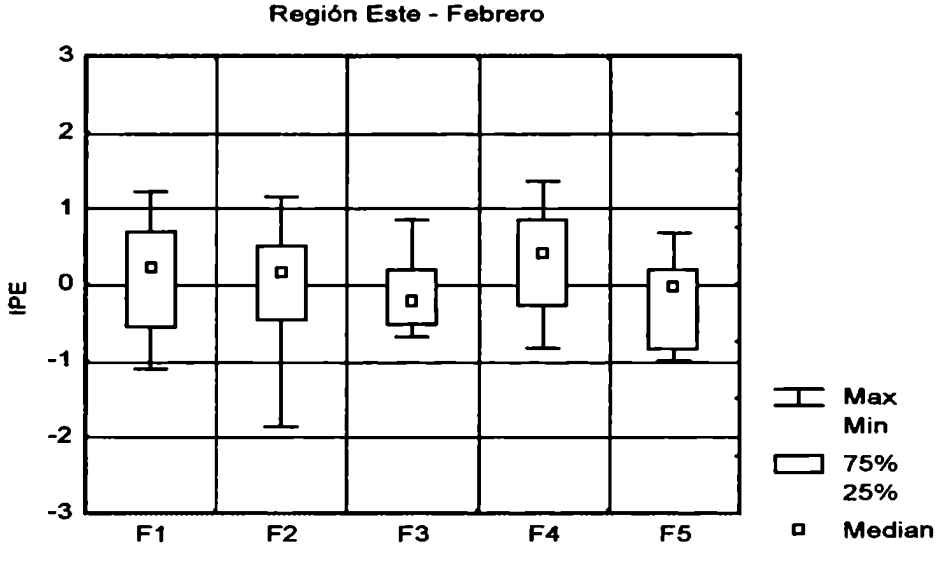

Figura II. 26. Idem Figura II. 25, Febrero.

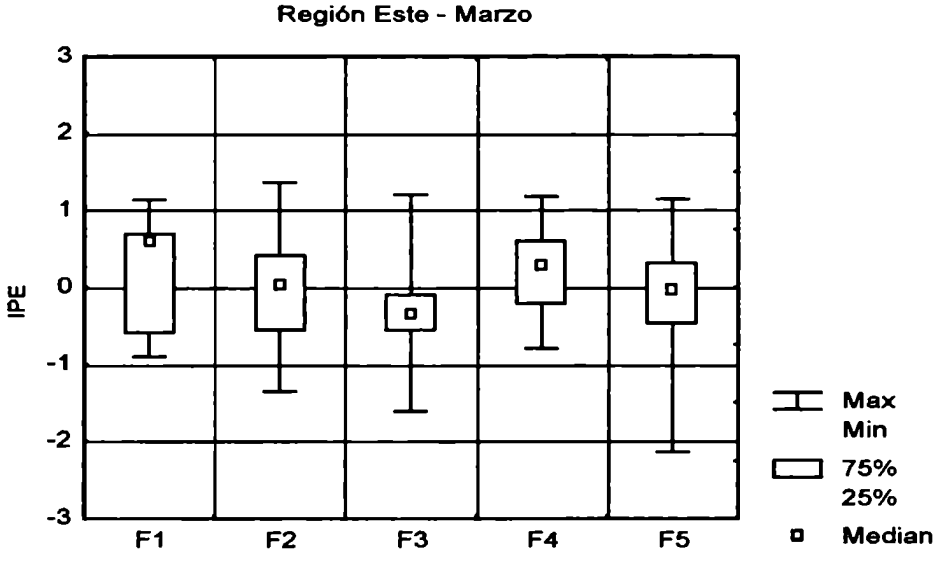

Figura II. 27. Idem Figura II. 25, Marzo.

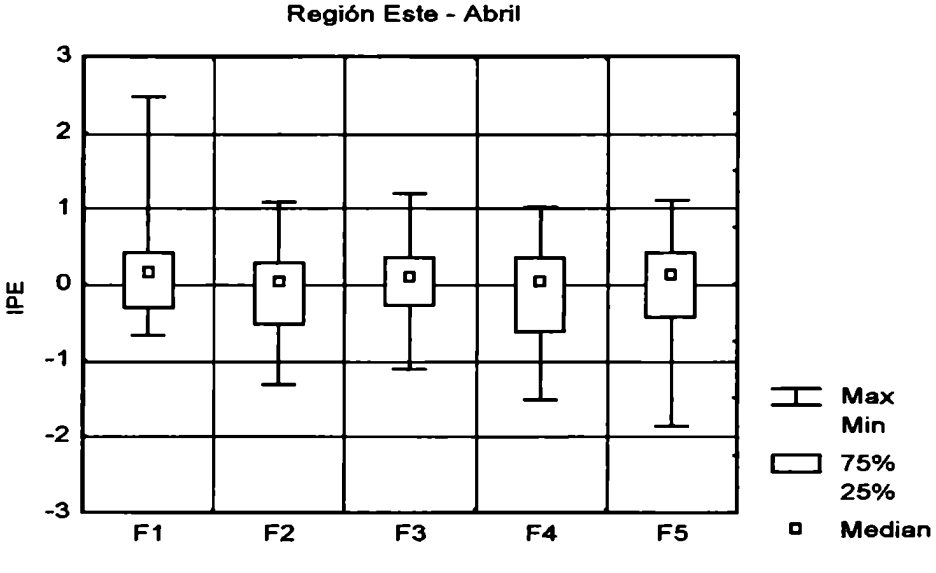

Figura II. 28. Idem Figura II. 25, Abril.

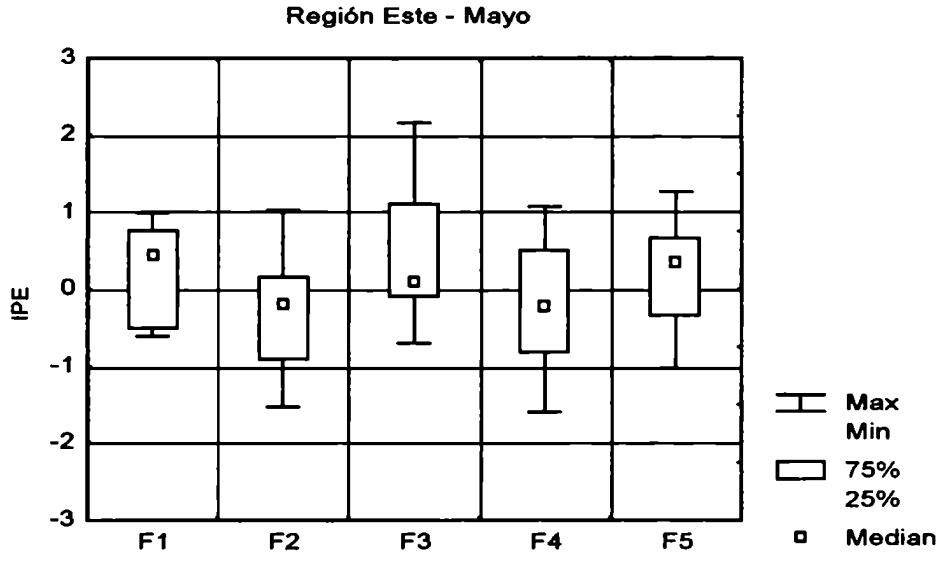

Figura II. 29. Idem Figura II. 25, Mayo.

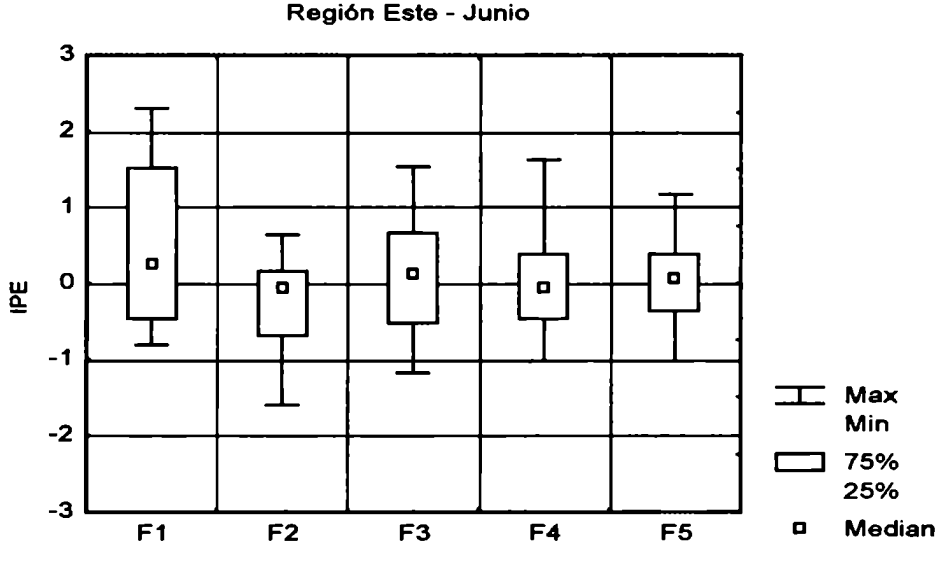

Figura II. 30. Idem Figura II. 25, Junio.

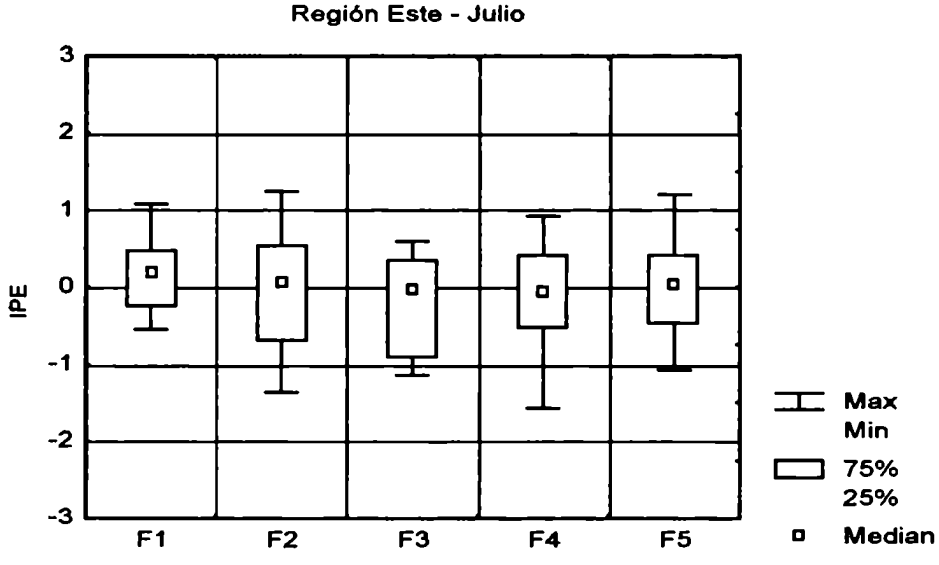

Figura II. 31. Idem Figura II. 25, Julio.

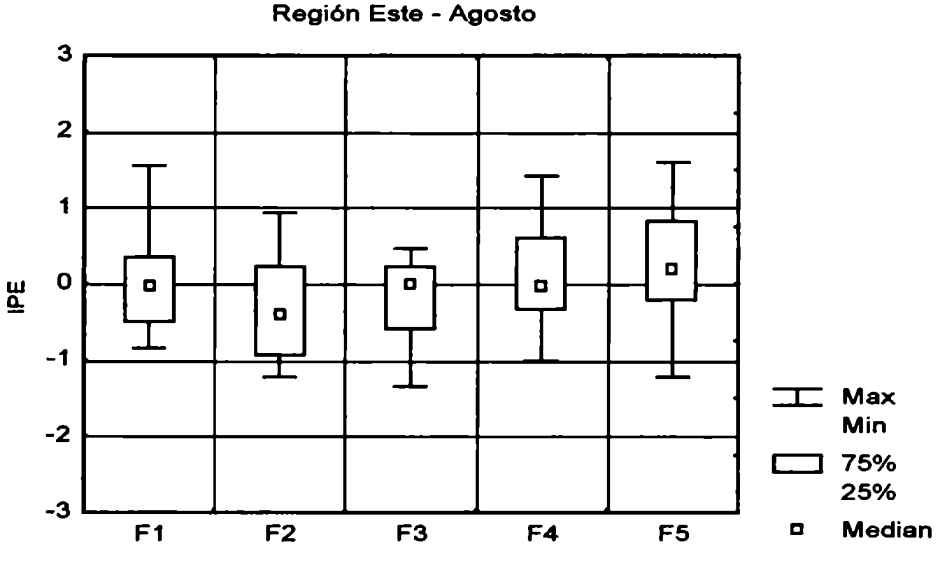

Figura II. 32. Idem Figura II. 25, Agosto.

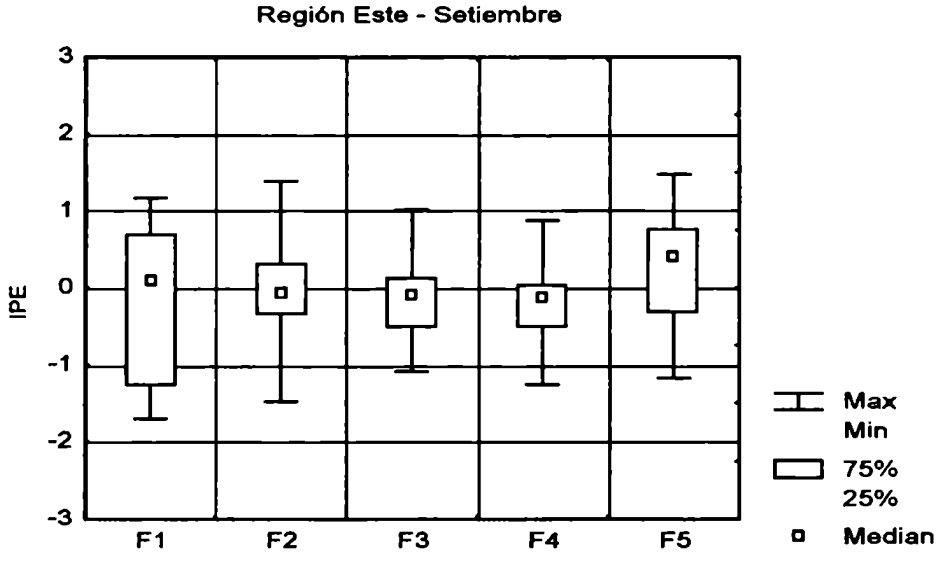

Figura II. 33. Idem Figura II. 25, Septiembre.

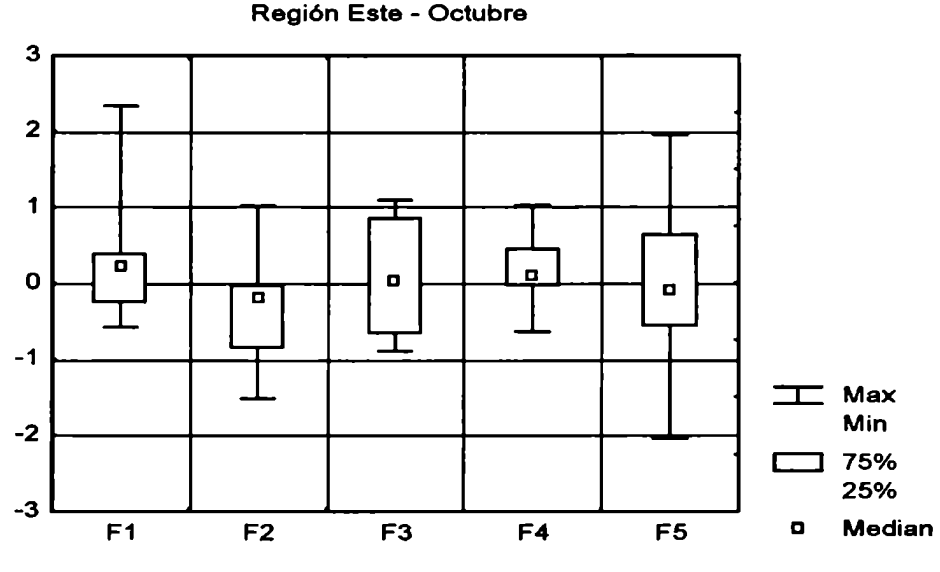

Figura II. 34. Idem Figura II. 25, Octubre.

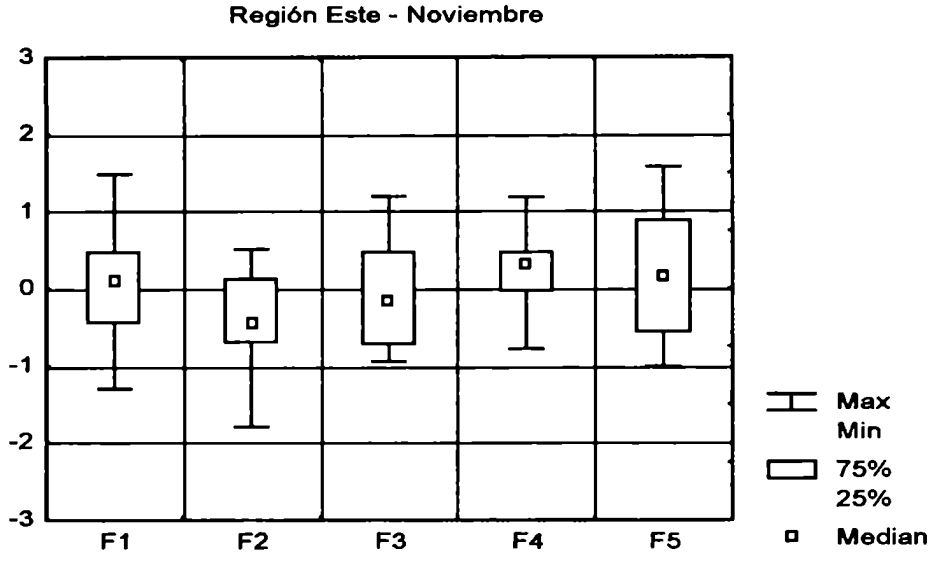

Figura II. 35. Idem Figura II. 25, Noviembre.

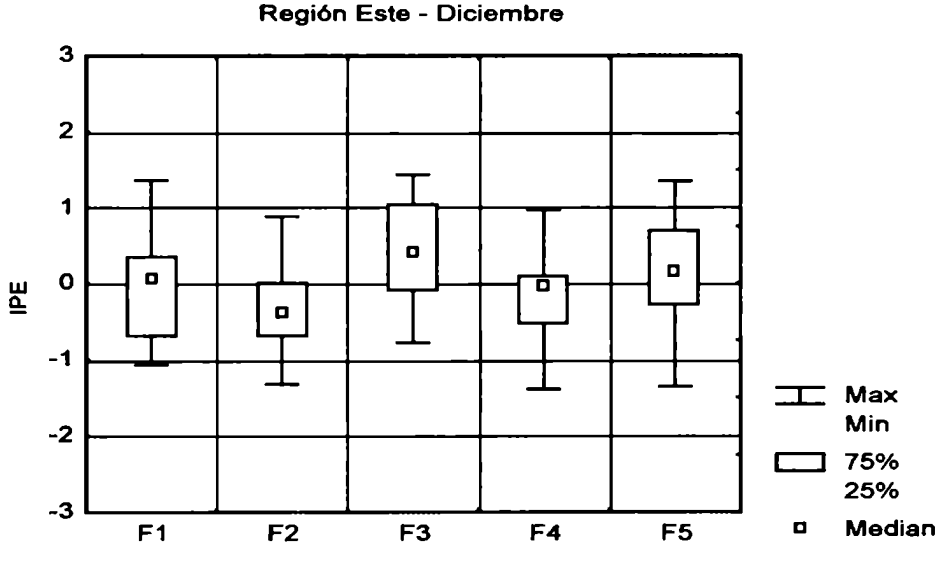

Figura II. 36. Idem Figura II. 25, Diciembre.