

# INUNDACIÓN DE SANTA FÉ EN ABRIL DEL 2003-PROCESOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS COADYUVANTES

Minetti, J.L. (\*), J. Nougués-Paegle (\*\*), W.M. Vargas (\*\*\*), A.G. Poblete (\*\*\*\*) y F. Figueroa (\*\*\*\*\*)

(\*) San Luis 183 - 4000- San Miguel de Tucumán. CONICET. Dpto. de Geografía-UNT. Laboratorio Climatológico Sudamericano (LCS). [minetti@arnet.com.ar](mailto:minetti@arnet.com.ar), (\*\*) Utah University, (\*\*\*) CONICET. Dpto. de Cs. de la Atmósfera y del Mar-UBA. LCS  
(\*\*\*\*) Dpto. de Geografía-UNSJ y LCS, (\*\*\*\*\*) Dpto. de Geografía-UNT y LCS.

## RESUMEN

Se analizan las situaciones climatológica, hidrológica y meteorológica previas a la inundación de la ciudad de Santa Fé. En la escala climática, la inundación estuvo asociada con tres años de excesos hídricos consecutivos en la cuenca del río Salado del Norte (Bajos Submeridionales) que saturaron los suelos de agua e inundó previamente al Norte de Santa Fé hacia fines del mes de marzo del 2003. Sobre el día 17 de abril de este año una profunda depresión se desarrolló sobre las provincias del NEA y Litoral Fluvial generando la precipitación volumétrica areal más importante del ciclo hidrológico 2002-03. Posteriormente entre los días 23-24, una activa zona de confluencia de masas de aire Tropical-Polar húmedas generó un sistema frontal estacionario que activó una gran región con tormentas y lluvias de gran volumen al Norte de la ciudad, presumiblemente en ocasión del paso de una primer onda de crecida generada por la primer tormenta.

## ABSTRACT

Climatological, hydrological and meteorological conditions prior and during the flood of the city of Santa Fe are discussed. In the climatic scale, the food was associate with three years of consecutive positive water anomalies in the river basin of the Salado river (in the Low Submeridionales) that satured the ground and flooded the northern Santa Fe province towards the end of March 2003. An deep low pressure on April 17 2003 over the Northeast and Litoral Fluvial of Argentina and produced the most significant precipitation event of the year 2002-03. This storm produced a wave crest which propagated downstream and reached the northern part of Santa Fe in conjunction with a stationary front over the region during April 23-24. This stationary front was characterized by an intense contrast of warm and humid tropical air from the north and cold humid air from the south, and contributed to rains with large water content to the north of the city.

## INTRODUCCIÓN

Para la generación de una inundación como la tratada aquí seguramente habrían actuado varios factores concurrentes, típicos para la producción de una precipitación de mesoescala de grandes proporciones. Uno de los factores de gran escala seguramente tuvo que ver con la persistencia de algún sistema meteorológico que produjera lluvias arriba de lo normal en el Este de Argentina, durante largo tiempo (más de un año en la escala climatológica). Este debería ser lo suficientemente importante como para arrojar excesos de agua que saturaran el suelo en un medio geográfico de escasa pendiente y baja densidad de drenaje (inundación local). Sobre esta inundación local la ocurrencia de tormentas de gran volumen, una o más, pueden generar una masa de agua de grandes proporciones, no absorbidas por el suelo, que puestas en movimiento (escurrimiento superficial), generen desastres sobre otras regiones laterales, como la del caso tratado. Las provincias del Litoral Argentino se han visto afectadas por inundaciones severas en el pasado derivadas de los grandes escurrimientos producidos por los ríos Paraná, Uruguay y Salado del Norte, particularmente durante

intensos eventos de El Niño (Valdez y Ereño, 1984). En los dos primeros ríos, en orden de importancia, sus cuencas de gran extensión han sido capaces de almacenar agua en una gran escala y generar escurrimientos apreciables de largo tiempo (ciclo hidrológico) (García, 2000), pero el tercero, el río Salado del Norte, sin importancia hidrológica para la generación de energía como los anteriores, tiene un régimen de escaso escurrimiento superficial y una cuenca favorable a los estados de inundación por su escasa densidad de drenaje y baja pendiente. Estos dos factores fisiográficos concurren simultáneamente junto a características meteorológicas de la región propensas a la generación de eventos de meso escala de gran intensidad (Minetti y Vargas, 2005). Estos eventos extremos han sido analizados en detalle durante el proyecto internacional SALLJEX que se ejecutó entre noviembre del 2002 y febrero del 2003. En estos casos extremos, un flujo persistente e intenso de humedad del Norte y Este concurre sobre sistemas sinópticos inestables, desde el punto de vista termodinámico y dinámico, favoreciendo la generación de tormentas de gran intensidad, ya sean estas individuales u organizadas. Estas tormentas que cubren a veces grandes áreas con precipitaciones superiores a 100mm/24 hs. pueden ser de tipo frontal o dentro de una misma masa de aire como lo son el caso de los MCCs (Velazco y Fritsch, 1987) y líneas de inestabilidad (Lichtenstein y Schwarzkopf, 1970) y son responsables de grandes inundaciones en terrenos llanos o periféricos a montañas con gran pendiente, donde se generan intensas y destructivas escorrentías (Mon y otros, 2004, Minetti y Vargas, 2005). En este trabajo se intenta describir primero el marco físico previo al día de la inundación, y luego la descripción del evento meteorológico en el día de la misma con el objeto de llevar comprensión sobre el funcionamiento de este complejo evento. Esto es importante a los efectos de facilitar su futuro pronóstico, sistema de alerta y la planificación del uso del espacio geográfico. Otros aspectos hidrológicos o hidráulicos del evento no se tratan.

## **METODOLOGÍA Y MATERIAL**

Para estudiar la evolución climática-meteorológica de larga escala hasta el mes previo a la inundación y durante la misma se utilizaron datos de la red meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional. Con esta información diaria-mensual se confeccionaron mapas de condiciones hídricas de los suelos para la vigilancia de condiciones de sequías y excesos, los que luego son verificados mediante visitas a las zonas afectadas por extremos. Paralelamente a esto se contó con alrededor de 300 puestos de observación de lluvia diaria complementarios (100 puestos más de los anteriores) que remiten información al LCS e implementadas a los efectos del proyecto SALLJEX. Esta red es operada por los servicios de meteorología e hidrología de varias provincias más otros puestos de observación monitoreados por la actividad privada. Información meteorológica más específica, proviene de la NOAA-USA, Servicio Meteorológico de Chile y CPTEC de Brasil se han usado para la descripción del fenómeno. Los análisis meteorológicos presentados corresponden al diagnóstico sinóptico corriente apoyado con imágenes satelitales.

## **RESULTADOS**

La **figura 1** muestra al comportamiento temporal mensual de un índice hídrico usado por Minetti y otros (2004) para la evaluación de sequías o excesos de agua climáticos en una región dada. La extensión del análisis abarca al período enero 1991- abril 2003 en cuatro provincias (Chaco, Santa Fé, Corrientes y Entre Ríos), estimándose al promedio móvil de cinco meses. En ella puede advertirse que este evento tuvo una memoria de tres años

previos con excesos de agua que culmina con la distribución de suelos saturados como la presentada en las **figuras 2 y 3**. Al finalizar el mes de marzo como resultado de un balance hídrico seriado, se pueden ver los suelos saturados sobre el Centro-Norte de Santa Fé, Corrientes y Entre Ríos (**figura 2**). Desde el punto de vista comparativo, la condición hídrica mostrada corresponde a la de un exceso de agua en el suelo respecto a un promedio observado en los últimos 25 años atrás, naturalmente los más lluviosos de los últimos 100 años (**figura 3**). Los excesos en este caso incluyen al SE de Santiago del Estero y S de Chaco, regiones que integran a los Bajos Submeridionales. Por la crítica situación atravesada en este espacio geográfico, este equipo de trabajo visitó la región los primeros días de abril constatando la condición de inundación en vastas áreas de los Bajos Submeridionales, al Norte de la ruta que une a las localidades de Tostado con Reconquista (Santa Fé). Como información de marco también es importante resaltar que los tres años de excesos hídricos de esta región geográfica han correspondido a temperaturas del mar más cálidas que lo normal frente a la costa de Brasil según lo indican las anomalías térmicas mínimas de Río de Janeiro, utilizada para esta evaluación (Minetti, 2003). Este exceso de evaporación advectado sobre el continente y descargada como precipitación, sería el principal motor de la anomalía de gran escala sugerida como paso previo a la inundación. Descartamos la incidencia de un El Niño débil durante el 2002 (NOAA, Climate Prediction Center) debido a que la extensión del período lluvioso es consistente con el mar cálido en la costa de Brasil. Anomalías térmicas del mar en este sector geográfico impactó en ocho meses del año a las anomalías de los índices hídricos de la región tratada. La **figura 4** representa a tres variables que monitorea la evolución del tiempo atmosférico en el Trópico-Subtrópico Argentino, la presión atmosférica en S.M. de Tucumán (SMT) a 12 UTC (PTUC), la temperatura del punto de rocío en esta localidad a 12 UTC (TROC) y un índice de la actividad anticiclónica sobre el Centro de Chile (AA) (Minetti y Vargas, 2005) que se construye con la amplitud térmica de Santiago de Chile y la temperatura máxima de Bs.As. Los valores positivos elevados de AA representan a intensos anticiclones desarrollados sobre la costa de Chile y valores bajos o negativos a anticiclones debilitados con ciclogénesis sobre este sector (Pacífico) y anticiclones desarrollados sobre la costa atlántica. La **figura 5** representa a tres gradientes de presiones para analizar los flujos de aire: a) Buenos Aires – Río Gallegos indicativo de la intensidad del flujo zonal, b) Río de Janeiro – Santiago del Estero indicativo de la intensidad del flujo del Norte y c) Buenos Aires – Santiago del Estero indicativo de la intensidad del flujo del Este. Del análisis de las **figuras 4 y 5** surge que:

-Durante los primeros trece días la AA sobre la costa chilena se mantuvo intensa y se han correspondido con tres períodos de alta presión sobre la zona continental de Argentina. En este período la TROC se mantuvo relativamente baja para la época del año con intensidades bajas en los flujos de aire del Norte y Este.

-A mediados del mes cae singularmente la actividad anticiclónica en la costa de Chile como producto de una importante ciclogénesis que se aproxima desde el Oeste favoreciendo los ascensos del aire en los niveles medio y superior de la atmósfera. Simultáneamente se debilitan los Oestes en latitudes altas y entre los días 17-18 se activa la convergencia de masas de aire en estas latitudes como producto de la intensificación del flujo del Sur y Norte respectivamente. Sobre Tucumán se registra un persistente aumento del TROC hacia valores normales de la época. El pasaje de aire frío y seco por SMT se registra sobre la noche del 17 de abril sin una actividad nubosa y precipitante importante.

-En cambio en el Este de Argentina, con mayor disponibilidad de humedad-energía, la profundización de una depresión en superficie favorecida por el campo bórico superior con el pasaje de una depresión en altura y la convergencia de masas de aire contribuyeron a un importante desarrollo nuboso con precipitaciones de gran volumen esparcidas en una gran región geográfica (**figuras 6, 7 y 8**).

-Con el pasaje de esta profunda depresión por el Norte Argentino, quedan las condiciones termodinámicas inestables por el aporte de vapor de agua del continente a la atmósfera más el que realiza la advección de humedad del Norte y del Este particularmente entre los días 21-26 de abril.. Esto puede verse en el TROC de SMT, bastante elevado frente a lo normal de la época. Por razones de espacio se muestran aquí sólo los mapas correspondientes a la situación del 24 de abril a las 00 UTC (**figuras 9, 10 y 11**). El transporte de humedad no solo es activo en capas bajas sino también en la atmósfera media y superior debido a la capacidad ascensional del aire al mantenerse hasta fin del mes el anticiclón del Pacífico Sur debilitado frente a la costa de Chile, debido al mantenimiento de la parte delantera de vaguada de onda larga sobre Argentina.

-Un flujo zonal del Oeste debilitado sobre Patagonia e invertido en sentido meridional S-N, converge sobre el Litoral Fluvial con una masa de aire tropical marítima persistente. La instalación de una zona frontal activa y persistente a la altura de Santa Fé con intensos gradientes térmicos latitudinales (baroclinicidad-IB estimado de acuerdo a Minetti y Vargas, 2005), agrega una componente de inestabilidad dinámica.

La **figura 12** muestra la cantidad de localidades con ocurrencia de precipitaciones iguales o superiores a 50mm observadas en alrededor de 400 localidades del Trópico-Subtrópico Argentino. Más de un cuarto de localidades de la red ha registrado lluvias de gran volumen en la región el día 17 de abril, siendo este un evento singular dentro de todo el año considerado. Más aún, las precipitaciones areales de este día superan a las del día 23-24, el día de ocurrencia de la inundación. La magnitud del evento del 17 de abril puede verse en la **figura 13**, donde una lámina de agua de más de 100mm ha caído sobre el Norte de Santa Fé y Sur de Chaco, dentro de la cuenca del río Salado del Norte.

El número de localidades con tormentas de más de 50mm observadas en el trópico-subtrópico Argentino es una función exponencial del IB. Valores de IB superiores a 25 son indicadores de condiciones húmedas e inestables propensas a la formación de lluvias de gran volumen en un área apreciable. El índice IB durante el día 16 de abril alcanzó a 27 y en los días 24-25-26 del mes a 35-34-33. Esto muestra la naturaleza diversa entre ambos sistemas precipitantes. Mientras que en el primer evento meteorológico la advección de humedad del Norte era muy localizada hacia el centro de la depresión y en poco tiempo (convergencia-**figura 7**) donde es posible que hubiera actuado un LLJEX (Nougués-Paegle y Berbery, 2000), la segunda se extendía a lo largo de una gran región geográfica y por varios días (confluencia persistente-**figura 10**).

-Las precipitaciones totales caídas entre los días 23-24 de abril justo al Norte de la ciudad de Santa Fé (**figura 14**) en momentos que posiblemente la onda de crecida lenta del río Salado del Norte proveniente del escurrimiento principal del evento anterior del día 17 de abril coincidieron para generar un efecto devastador. Esta suposición se basa en un análisis de semejanza realizado con el comportamiento del río Paraná medio. Raffo (1951) estimó sobre este río con la pendiente y condiciones hidráulicas del mismo una velocidad de la onda de crecida que aplicada al río Salado del Norte el agua de exceso de la precipitación del día 17 estaría en la ciudad de Santa Fé en 7-9 días (24-26 de abril). Por supuesto que el

río que nos ocupa no tendría la condición hidráulica del Paraná pero sí la pendiente. La ausencia de información sobre este aspecto motiva a usar este método de estimación.

-Otro aspecto importante en el proceso relevado, es la persistencia del sistema húmedo con epicentro en los últimos diez días de abril que arrojó más de 200mm de lluvia en el Centro de Santa Fé y provincia de Entre Ríos (**figura 15**). La **figura 16** muestra al correlograma de las TROC desestacionalizado en SMT en el período 01-08-02 al 31-07-03 que incluye al período donde ocurrió el evento. Estas igualmente que las temperaturas mínimas de SMT indican una persistencia de cuatro días, y la presencia de una onda larga del orden de 50 días con una inversión en los 25 días, similar a las estudiadas por Nougues-Paegle y Mo, (1997) y Nougues-Paegle y otros (2000) durante el verano. La presencia de una onda en la longitud del MJO (Madden y Julian, 1971) es un elemento alentador para su uso en la previsión intraestacional del clima en el largo plazo. En el caso que nos ocupa la fase positiva de la onda estaba situada sobre la última década de abril, lo que hacía suponer un importante aporte de humedad en los procesos de la atmósfera. La **figura 17** es la climatología de los espectros de las anomalías de temperaturas mínimas en SMT durante todos los años. Este comportamiento es semejante al del TROC. En el pasado la síntesis espectral (períodos de máxima densidad espectral por año) se ven con máxima frecuencia de aparición de espectros con máxima explicación de la varianza mantenido un promedio del orden de 51.2 días. Esto está en la longitud del MJO, y lo cual lo transforma en un útil indicador de los procesos climáticos intraestacionales.

## CONCLUSIONES

La inundación de la ciudad de Santa Fé fue producida por un complejo proceso natural que incluyen condiciones de contorno de tipo climático-hidrológico en el largo plazo y dos procesos meteorológicos regionales que ocurrieron en los días 17 y 23-24 de abril.

En el proceso climático de largo plazo estuvo presente, una elevada y persistente anomalía de temperatura del mar en la costa de Brasil, con humedad advectada sobre la llanura Argentina. Otros factores pueden haber sido de menor orden de importancia.

La inundación ocurrió sobre la fase final de un período lluvioso que colmató de agua los suelos, e inundó previamente al Norte de la cuenca del río Salado del Norte (Norte de Santa Fé y Sur de Chaco).

Dos situaciones meteorológicas que generaron lluvias de gran volumen sobre la cuenca, una en la superior (el 17 de abril) y otra en la inferior (el 23-24 de abril) produciendo una onda de crecida de grandes proporciones que concurrieron sobre la ciudad de Santa Fé.

La primer situación meteorológica se trató de una ciclogénesis profunda de corto tiempo de duración que produjo el mayor volumen de agua caída sobre la cuenca superior del río y donde el vapor de agua se advectó sobre ésta en forma convergente. La segunda situación más extendida en el tiempo y de menor área, se trató de una persistente confluencia de aire tropical y Polar húmedos sobre la cuenca inferior del río, generando precipitaciones de gran volumen en el momento en que supuestamente la primer onda de crecida pasaba por el lugar.

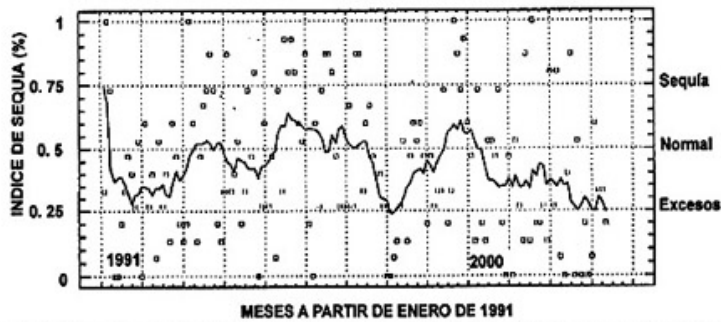
Durante el segundo proceso meteorológico la persistencia de humedad en el trópico Argentino estuvo asociada a una fase positiva de una onda MJO de más de 10 días, lo que muestra la importancia de este proceso en la previsión intraestacional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, Chile y a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de las provincias de Santiago del Estero, Chaco, Formosa por los datos diarios proporcionados. De igual manera al Ing. Guillermo Casagrande del INTA Anguil por los datos de La Pampa y a todas aquellas empresas que contribuyeron con sus datos a este proyecto.

## **REFERENCIAS**

- García, N.O., 2000: Análisis de la variabilidad climática de la cuenca del Río de la Plata, a través de los caudales de sus principales ríos. Tesis doctoral. INC.
- Lichtenstein, E.R. y M.L. Altinger, 1970: Aspectos estadísticos de las líneas de inestabilidad en la Argentina. *Meteorológica* Vol. I, N° 1, 3-12. CAM. Bs.As.
- Madden, R.A. and P.R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the tropics. *J. Atmos. Sci.* 28, 702-708.
- Minetti, J.L., 2003: Boletines mensuales de la Vigilancia Climática Regional. Laboratorio Climatológico Sudamericano.
- Minetti, J.L., W.M. Vargas, L.R. de la Zerda, A.G. Poblete, G. Casagrande, L.R. Acuña, I.J. Nieva, F.L. Frassetto, G.E. Ostertag, L.R. Minetti y E.M. Mendoza, 2004: Inventario de las sequías regionales en Argentina y Chile. Informe Técnico del Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl: Czon Caldenius.
- Minetti, J.L. y W.M. Vargas, 2005: La circulación regional en el Noroeste Argentino y condiciones del tiempo asociadas. *El Clima del Noroeste Argentino*. Ediciones Magna, 500 pgs.
- Mon, R., E. Eremchuk y J.L. Minetti, 2003: Características geológicas y geotécnicas de la vertiente oriental andina en la provincia de Tucumán. *Rev. Geol. Apl. A Ing. y Amb.* 19, 73-88. Bs.As.
- Nougués-Paegle, J. and K.M. Mo, 1997: Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon. Wea. Rev.*, 25, 279-291.
- Nougués-Paegle, J., L. Byerle and K.C. Mo, 2000: Intraseasonal oscillation of South American summer precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 837-850.
- Nougués-Paegle, J. y E.H. Berbery, 2000: Low-level jets over the Americas. *CLIVAR Exchanges*, 5. N° 2, 6-8.
- Raffo, J.M., 1951: Pronóstico de las crecientes del Río Paraná. *Meteoros Año I*, N° 1, 91-98. SMN. Bs.As.
- Valdez, A.J. y C.E. Ereño, 1984: El fenómeno denominado El Niño y las inundaciones del Paraná. Boletín informativo N° 235 de la Organización Techint. Pp. 25-75. Bs.As..
- Velazco, I., and J.M. Fritsch, 1987: Mesoscale Convective Complexes in the Americas. *Jou. Geophysical* 92, 9591-9613.



MESES A PARTIR DE ENERO DE 1991

Figura 1: Índice de sequía expresado como porcentaje de localidades secas en el Litoral Fluvial en el período enero 1991 hasta abril de 2003 (Entre Ríos, Corrientes, Santa Fe, Chaco).

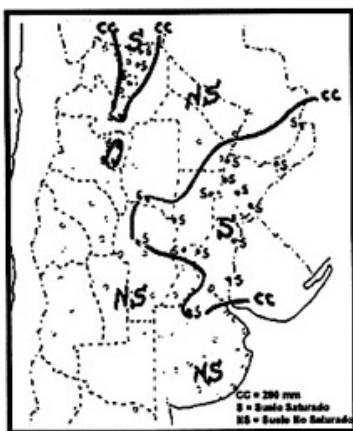


Figura 2: Almacenaje de agua en el suelo, marzo de 2003.



Figura 3: Anomalia del almacenaje de agua en el suelo, en marzo de 2003 con respecto a 25 años atrás.

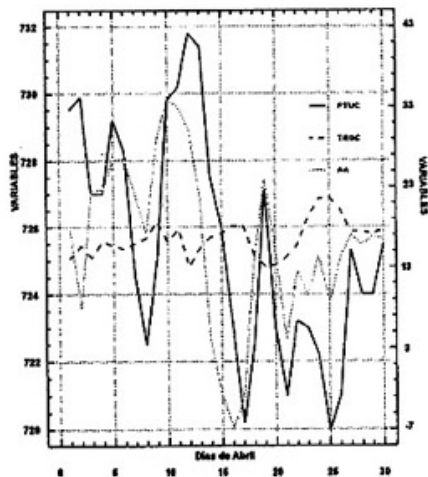


Figura 4: Presión atmosférica (en mm a la izquierda), temperatura de rocío de SMT (°C a la derecha) y Actividad Anticiclónica de Chile (Índice a la derecha) durante abril de 2003.

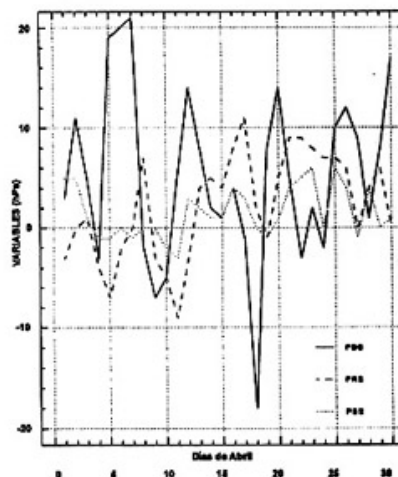


Figura 5: Gradientes de presión entre Buenos Aires y Río Gallegos (PBG), Río de Janeiro (Brasil) y Santiago de Chile (PRS), Buenos Aires y Santiago de Chile (PBS) durante abril de 2003.



Figura 6: Isobaras al nivel del mar y contorno de 500 hPa el día 18-04-03 a 00 UTC. Fuente: NOAA.



Figura 9: Isobaras al nivel del mar y contorno de 500 hPa el día 24-04-03 a 00 UTC. Fuente: NOAA.

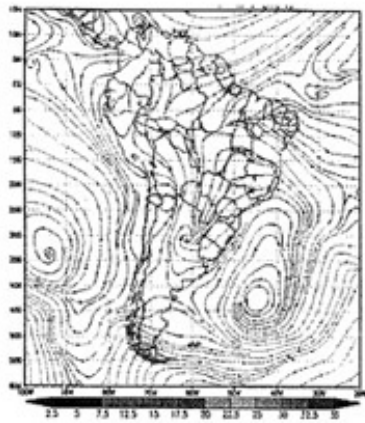


Figura 7: Líneas de corriente en 925 hPa el día 18-04-03 a 00 UTC. Fuente: CPTEC.



Figura 9: Líneas de corriente en 925 hPa el día 24-04-03 a 00 UTC. Fuente: CPTEC.

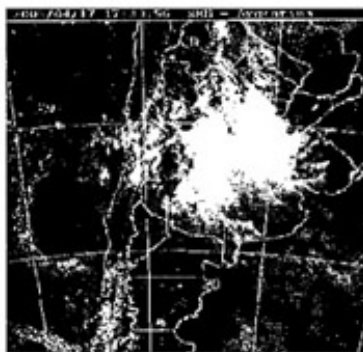


Figura 8: Foto infrarroja del campo nuboso el 17-04-03 a 17:40 UTC. Fuente: NOAA.

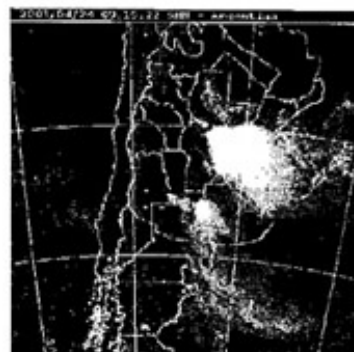


Figura 11: Foto infrarroja del campo nuboso el 24-04-03 a 09:15 UTC. Fuente: NOAA.

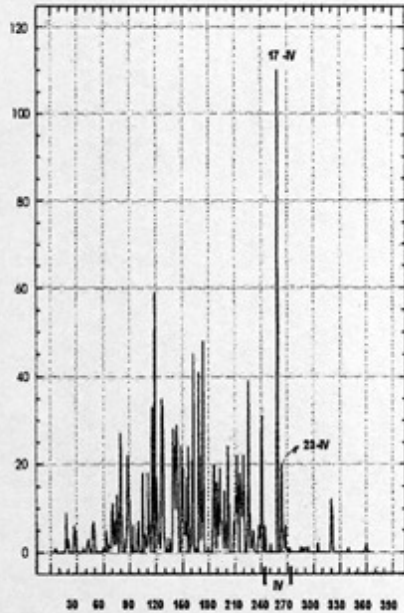


Figura 12: Número de localidades de la red en Argentina (área tropical-subtropical) con registros pluviométricos iguales o superiores a 50 mm en el período 01-08-02 al 31-07-03. El total de localidades observadas N = 400. Fuente: SMN, Provincias y LCS.

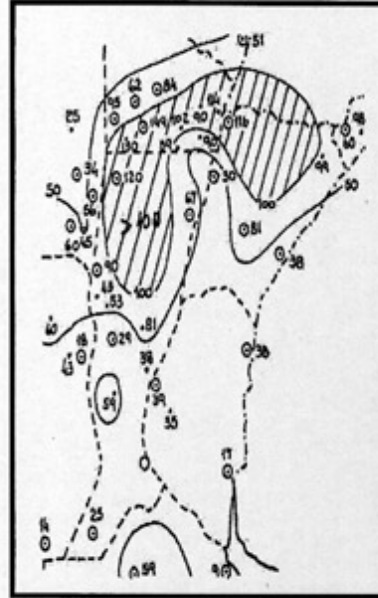


Figura 13: Isohietas del día pluviométrico 17-04-03. Se raya el área con más de 100 mm.

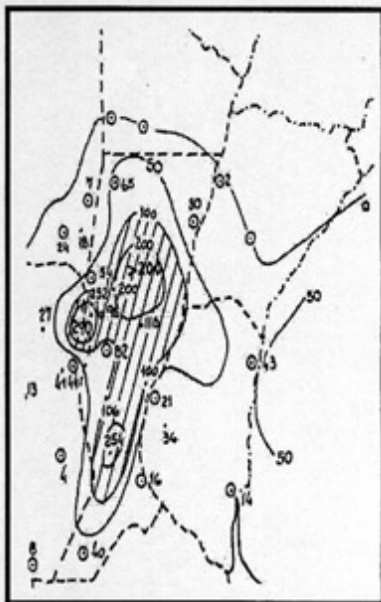


Figura 14: Isohietas del día pluviométrico 23/24-04-03. Se raya el área con más de 100 mm.

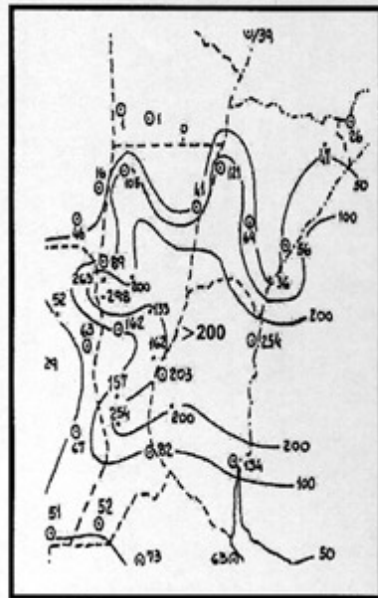


Figura 15: Isohietas del día pluviométrico 21/30-04-03.

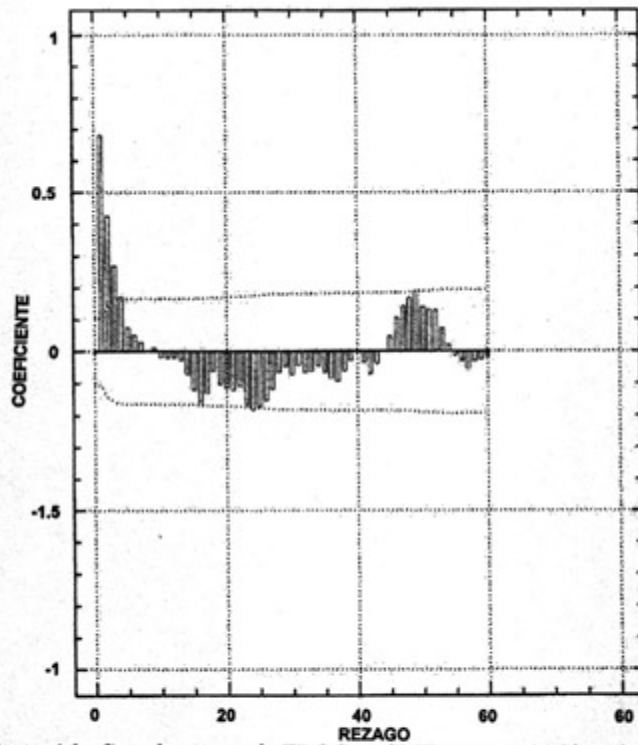


Figura 16: Correlograma de TROC en SMT con previo filtro de la onda anual en el período 01-08-02 al 31-07-03.

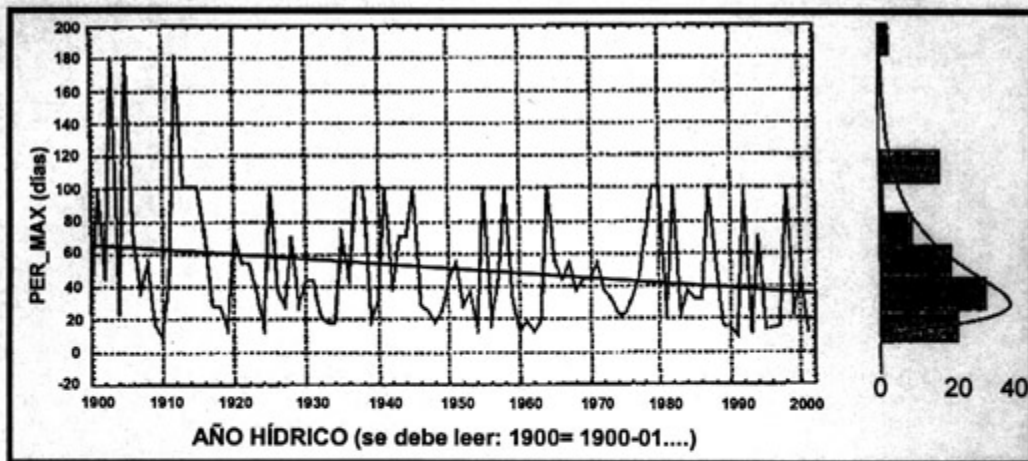


Figura 17: Marcha temporal de los máximos espectros de la varianza encontrados en las anomalías normalizadas de las temperaturas mínimas en SMT con tendencia. Sé grafica a la derecha su histograma.