

CAMBIOS EN LA ONDA ANUAL DE TEMPERATURA EN EL SUDESTE DE SUDAMÉRICA

Natalia Zazulie - Matilde Rusticucci

**Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos – FCEN- Universidad de
Buenos Aires**

nzazulie@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

El cambio climático global, medido principalmente a través del aumento de temperatura media anual, se manifiesta también en cambios de otros aspectos del clima. Cambios en la duración de las estaciones, un verano más persistente o un invierno más moderado, producen alteraciones en la onda media anual de temperatura. Este trabajo se propone como objetivo principal caracterizar y evaluar la variabilidad a largo plazo de la onda anual de temperatura máxima y mínima diaria tomando la información de estaciones ubicadas en la región sudeste de Sudamérica.

ABSTRACT

Global climate change is evident in many aspects of climate, particularly in mean annual temperature. Changes in the length of the different seasons, for example more persistent summers or less intense winters, can produce alterations in the mean annual cycle. The main objective of this work is to characterize and evaluate the long term variability of the annual cycle of maximum and minimum temperature taking information of stations in southeastern South America region.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo anual medio de la temperatura de superficie ha sido estudiado en forma global por White y Wallace (1978), quienes presentan la amplitud y fase del ciclo anual y semi-anual de la temperatura mediante análisis armónico. La variabilidad a largo plazo de la onda anual de temperatura para el último siglo, fue extensamente estudiada por Mokhov a través de la una metodología propuesta de caracterización de la amplitud y fase de la onda anual en el hemisferio norte (Mokhov, 1985). Continuando con este trabajo, Eliseev y otros (2004b) emplearon modelos atmosféricos de circulación general y modelos acoplados para estudiar la variabilidad de la onda anual y su relación con forzantes locales y remotos de circulación en el hemisferio norte. Estos modelos subestimaban la amplitud de los armónicos 1 y 2, sobre tierra, y afuera de los trópicos fallaban en representar la fase de onda anual. Al comparar la performance de los modelos acoplados versus los modelos atmosféricos, encontraron que los modelos acoplados representaban de manera más adecuada las características de amplitud y fase que los modelos atmosféricos. Adicionalmente, Eliseev y otros 2004a, estudian la representatividad de las características de amplitud y fase por modelos y por datos de reanálisis. Encuentran que la mayor dificultad en representar estas características se da en latitudes altas, entre 60° y 70°N y en la Antártida.

Recientemente Stine y otros (2009) encontraron cambios en la amplitud y fase de la onda anual en latitudes extratropicales, principalmente un adelanto en la fase de la onda anual de temperatura. Ellos exploraron posibles forzantes de estos cambios a través de modelos climáticos globales utilizados en el cuarto informe del IPCC y encontraron también que los

modelos no eran capaces de reproducir los cambios hallados en la fase y la amplitud de la onda anual.

Si bien existen algunos trabajos que exploran cambios en la amplitud y fase de la onda anual, ninguno de ellos se centra particularmente en nuestra región. La motivación de este trabajo está basada en que se han registrado cambios sustanciales y en distintos sentidos, en las temperaturas máximas y mínimas medias y en sus extremos, en distintas épocas del año, (ver por ejemplo Rusticucci y Barrucand 2004, Barrucand 2008) se han registrado cambios en la precipitación por lo tanto, se desea evaluar si estos cambios se reflejan también como cambios en la onda anual de temperatura máxima y mínima.

2. DATOS Y METODOLOGÍAS UTILIZADAS

En este trabajo se utilizó la bases de datos CLARIS construida en el marco del proyecto 'European Project CLARIS (A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies) of the 6th PCRDT of the European Union 2004-2007. La misma cuenta con datos diarios de alta calidad de estaciones de Argentina, Chile, Uruguay, Brasil y Paraguay de las variables temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, provenientes de los servicios meteorológicos nacionales o de la red de aeropuertos (Brasil) de esos países. Se seleccionó como región de estudio el área comprendida entre 35° y 20°S, limitada al oeste por la cordillera y al este por el Océano Atlántico. Se tomó como período de estudio 1950-2006. Si bien la base de datos utilizada presenta una buena distribución, en este trabajo se intentó densificar la cobertura espacial agregando estaciones. Para ello se seleccionaron otras estaciones directamente de la base de datos provista por el Servicio Meteorológico Nacional.

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la onda anual de temperatura. Para esto se utilizó Análisis Armónico, ya que la onda anual de temperatura se puede describir en un altísimo porcentaje de varianza con pocas armónicas, y se puede determinar así su amplitud y fase. En este trabajo se quiere caracterizar y estudiar la evolución de la onda anual de temperatura máxima y mínima a partir de observaciones diarias, por consiguiente, se aplicó análisis armónico a cada año de datos diarios y se estudió el primer armónico que presenta el mayor porcentaje de varianza explicada.

El método tiene algunas restricciones sobre la serie a la cual se le desea realizar el análisis armónico: la serie debe tener un número par de puntos (observaciones) y no puede tener datos faltantes. Para solucionar estos problemas y poder aplicar análisis armónico se procedió de la siguiente manera. Primero se calcularon promedios diarios cada 4 años, es decir, se tomaron 4 años consecutivos, por ejemplo 1959-1960-1961-1962. Para cada día del año se calculó un promedio entre los 4 días de cada año, y ese valor fue asignado al año 1960. Luego desplazándose un año, se procedió de la misma manera, en el ejemplo: 1960-1961-1962-1963, y cada valor promedio entre los 4 años fue asignado al año 1961, y así sucesivamente. De esta forma, está asegurada la existencia del día 29 de febrero para todos los años, aunque repitiendo este valor por cada 4 años. Luego, se prestó especial atención a la cantidad de datos utilizados en el cálculo de la nueva serie, estableciendo como criterio, al menos 2 datos para cada día. Los casos que no cumplieron con esto, fueron generalmente en aquellas series en donde se había dejado de medir por un período de varios años. En estos casos, el año fue eliminado. Esto último no afecta al análisis inicial, ya que se aplicó el método a cada año por separado. A pesar de haber promediado, y de esta forma reducido de manera significativa el número de datos faltantes, siguieron apareciendo días en los cuales no se tenía datos, i.e. en los cuatro años no se había medido ese día, o justo no se midió algún 29 de febrero. En estos

casos, se rellenó la serie con una interpolación lineal entre el día anterior y el día posterior al faltante, ya que el objetivo es el análisis de la onda anual media, y este cálculo no afecta significativamente a la misma. De acuerdo a la forma en que se realizó el cálculo de los promedios, la mayoría de las series que llegaban hasta el año 2006, fueron ahora transformadas, obteniendo series hasta el año 2004 (promedio 2003-2006) que representan hasta el año 2006.

Con las nuevas series reconstruidas se aplicó entonces el análisis armónico. Estos cálculos fueron realizados para temperatura máxima y para temperatura mínima. Se obtuvieron los parámetros del análisis armónico para cada variable y para cada año de la serie estudiada.

3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA AMPLITUD DEL ARMÓNICO 1

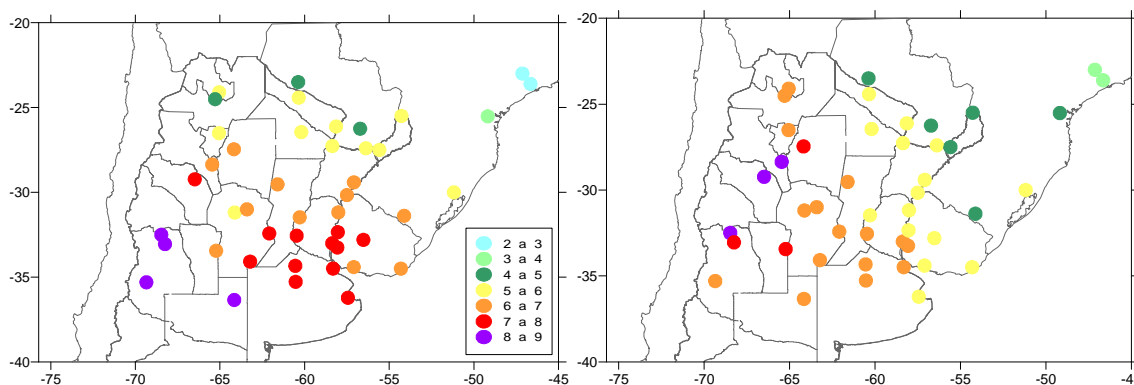


Figura 1. Amplitud de la onda anual de temperatura máxima (izquierda) y temperatura mínima (derecha) en °C para el período 1961-2003. Los valores de amplitud se encuentran clasificados cada 1°C.

Se puede observar que la amplitud de la onda anual de temperatura es mayor al sur de la región, coherente con la componente astronómica. Sin embargo existen asimetrías zonales que tiene que ver con las características particulares de cada región. En el sudoeste de la región de estudio, en particular en Santa Rosa y en la provincia de Mendoza, las amplitudes son mayores que aquellas de las estaciones del este por encontrarse lejos del efecto moderador del océano. En el noreste de la región, los valores de menor amplitud tienen que ver con el régimen de precipitación de esa zona, que presenta poca variación a lo largo del año, con valores elevados de precipitación acumulada todos los meses, a diferencia del noroeste, en donde la onda anual de precipitación es marcadamente estacional.

Se observa una diferencia en la amplitud del armónico 1 de temperatura máxima entre las estaciones Salta y San Salvador de Jujuy que se ubican muy próximas entre si. Esta diferencia se debe a la altura de cada una de las estaciones; la estación Salta se encuentra a 1221 mts mientras que San Salvador de Jujuy se ubica a 905 mts de altura, es por esto que esta última presenta una amplitud mayor.

Por otro lado, se puede observar que en la mayoría de los casos la amplitud de la onda anual de temperatura máxima es mayor que la amplitud de la onda anual de temperatura mínima.

4. VARIABILIDAD TEMPORAL

4.1. Evolución temporal del armónico 1

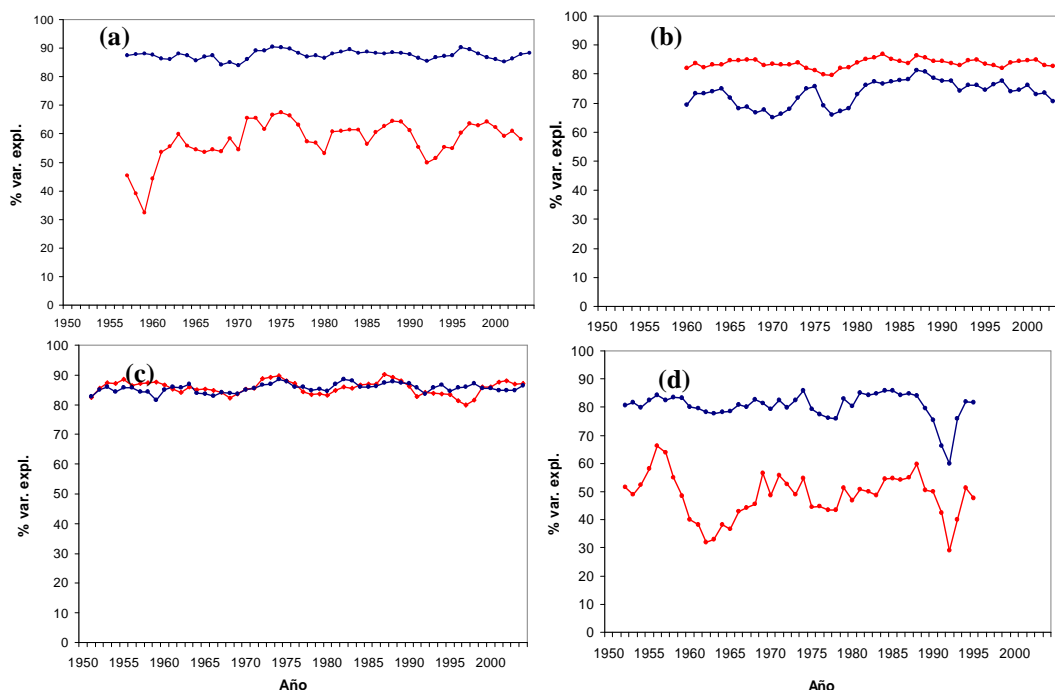


Figura 2. Algunos ejemplos del porcentaje de varianza explicada por el primer armónico de temperatura máxima (mínima): línea roja (línea azul) para las estaciones: (a) Salta, Argentina; (b) Rocha, Uruguay (derecha); (c) Laboulaye, Argentina; San Pablo, Brasil.

En el caso de la localidad de Salta, se puede observar que la temperatura mínima en esta estación tiene un ciclo anual más marcado (entre 89 y 90%), mientras que en la temperatura máxima tienen mayor relevancia ciclos de períodos más cortos. En la localidad de Rocha, se observa un comportamiento inverso: la temperatura mínima, si bien no es tan inferior siempre es menor que el de la temperatura máxima. La estación Laboulaye en cambio, muestra valores de varianza explicada por el armónico 1 entre el 80 y 90% en ambas variables, no siendo en ninguna de las dos más marcado el ciclo anual que en la otra. Por último, en la estación San Pablo se observa un comportamiento similar al encontrado en Salta, aunque en este caso el porcentaje de varianza explicada por la temperatura máxima es en promedio levemente menor que en Salta en todo el record estudiado.

La temperatura máxima diaria, es una variable que depende principalmente de la insolación recibida en la estación. Esto es lo que provoca que domine el ciclo anual sobre ciclos de menores períodos. Por otro lado, esta variable también está afectada por un gran número de factores de escala local o regional. La precipitación y la nubosidad o el contenido de humedad impactan en la distribución de temperatura, y sus cambios. De la tesis doctoral de Barrucand, en donde analiza el comportamiento de la nubosidad y la temperatura de rocío en algunas estaciones, se puede concluir que en la estación Salta, el porcentaje de días con cielo cubierto a la mañana y a la tarde presenta diferencias significativas en verano, y no en invierno. El porcentaje de cielo cubierto en primavera y verano es mayor en horas de la tarde (18 UTC) que a la mañana (12 UTC), mientras que en invierno el porcentaje es similar, indicando entonces que esto produzca una menor amplitud anual en la temperatura máxima

que en la temperatura mínima. Esto no ocurre en Corrientes, en donde no se presentan diferencias importantes de porcentaje de días de cielo cubierto entre la mañana y la tarde, y a lo largo del año. En Junín se observa un mayor porcentaje de días con cielo cubierto en invierno tanto a la mañana como a la tarde, y esto impacta de manera distinta en la temperatura máxima y la temperatura mínima. Esto resulta en una menor amplitud anual de temperatura mínima que en la temperatura máxima.

Al analizar las series temporales de todas las estaciones, se observan tres tipos de comportamiento en términos del porcentaje de varianza explicada que se presentan por regiones. En la figura 3 se ilustra la distribución espacial de los mismos. Se puede ver que al oeste de la región observada la temperatura mínima tiene un ciclo anual más marcado que la temperatura máxima. Lo mismo ocurre en el sur de Brasil. En el sudeste de la región, comprendido por el territorio uruguayo, el norte de la provincia de Buenos Aires y la provincia de Entre Ríos, presenta el comportamiento opuesto. En el medio de estas dos regiones, se observa una zona de transición en la cual ambas variables presentan una relevancia de la onda anual del mismo orden de magnitud durante todo el record estudiado.

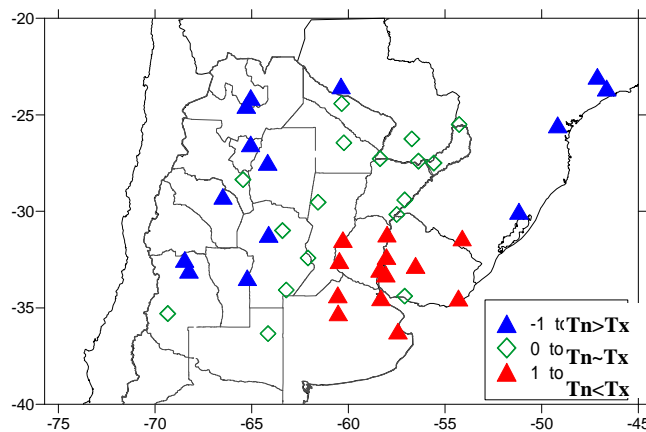


Figura 3. Triángulos azules indican estaciones donde la varianza explicada por el armónico 1 de temperatura mínima es mayor que la varianza explicada por el armónico 1 de temperatura máxima; triángulos rojos indican lo opuesto. Rombos verdes representan regímenes de transición, estaciones en las cuales el armónico 1 de las dos variables no tiene claramente una mayor representatividad

4.2. Tendencias en porcentaje de varianza explicada por el armónico 1

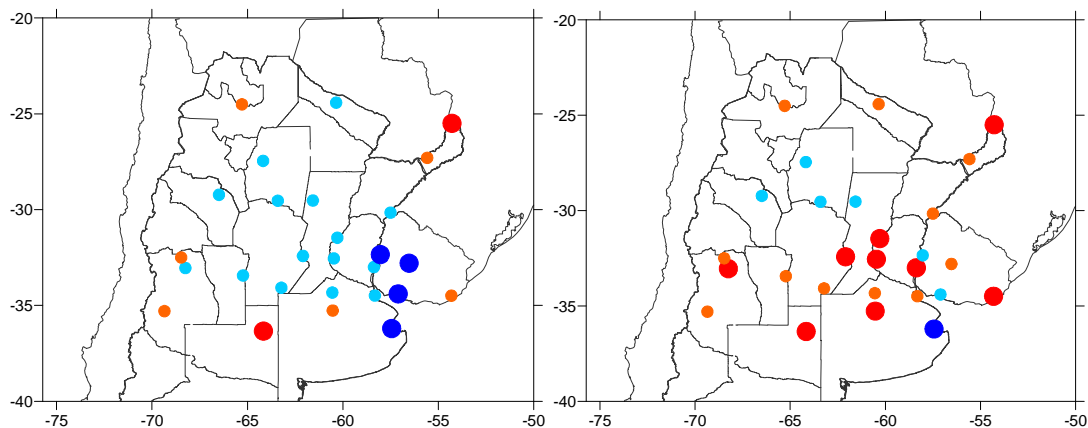


Figura 4. Tendencias 1961-2003 del porcentaje de varianza explicada por: el armónico 1 de la temperatura máxima (izquierda) y de la temperatura mínima (derecha). Los círculos más grandes indican tendencias significativas al nivel de confianza del 95%. Círculos rojos (azules) indican tendencias positivas (negativas).

Se puede observar que las tendencias (Mann Kendal, 95%) en el armónico 1 de temperatura máxima son negativas en la mayoría de las estaciones analizadas, aunque sólo son significativas en el este de la región. Las estaciones Santa Rosa e Iguazú en cambio son las únicas que presentan valores positivos significativos.

En el caso del armónico 1 de temperatura mínima, las tendencias son mayormente positivas. En el centro de la región se observan algunas disminuciones aunque no son significativas. Sólo se encontró una disminución significativa en la relevancia del armónico 1 en la estación Dolores.

Por otro lado, en Salta y Malargüe, el porcentaje de días con cielo cubierto por la mañana tiende a aumentar en verano en el período 1961-2000 (Barrucand, 2008), coherente con el aumento en la amplitud de la onda anual de temperatura mínima.

5. CONCLUSIONES

A través de la metodología de análisis armónico se pudo obtener la amplitud y porcentaje de varianza explicada por la onda anual de temperatura máxima y temperatura mínima. En una primera etapa se estudió la distribución espacial de estos parámetros tomando un período común suficientemente largo como para realizar estadísticas. Se eligió el período 1961-2003. La distribución espacial de amplitud de la onda anual de ambas variables se encuentra dominada por el ciclo de insolación recibida, con asimetrías zonales que reflejan la influencia de otros aspectos como la precipitación o la continentalidad. Al comparar la distribución espacial de amplitudes de onda anual de temperatura máxima con la de temperatura mínima, se observa que en la mayoría de los casos la amplitud de la onda anual de temperatura máxima es mayor que la amplitud de la onda anual de temperatura mínima. Al oeste de la región de estudio durante todo el record estudiado, la varianza explicada por la onda anual de temperatura mínima resultó ser siempre mayor que la varianza de la onda anual de temperatura máxima. En el sudeste de la región se encontró un comportamiento opuesto.

Algunos de los resultados obtenidos, podrían ser explicados tomando los resultados de la tesis doctoral de Barrucand (2008), en la cual se encontró, en Salta, que el porcentaje de cielo cubierto en horas de la mañana en verano y primavera es menor que en horas de la tarde; y en invierno no se observaron diferencias en la nubosidad entre mañana y tarde. Esto produce menor amplitud anual en la temperatura máxima que en la temperatura mínima. En la estación Corrientes la onda anual de porcentaje de días con cielo cubierto no presenta diferencias entre mañana y tarde, y a lo largo del año, y en la misma no se encontraron diferencias en varianza explicada de la onda anual de temperatura máxima y mínima. En la estación Junín, se observó que a lo largo de record estudiado la relevancia de la onda anual de temperatura máxima fue siempre mayor que la de la onda anual de temperatura mínima. En la tesis de Barrucand, se encontró en esta estación un mayor porcentaje de días con cielo cubierto en invierno a la tarde y la mañana, resultando en una menor amplitud anual de la temperatura mínima que la temperatura máxima.

Por último, se estudiaron las tendencias en el porcentaje de varianza explicada por el armónico 1 en el período 1961-2003. Se encontraron tendencias negativas en la mayoría de las estaciones analizadas para la varianza explicada por la onda anual de temperatura máxima,

mientras que en el caso de la onda anual de temperatura mínima las tendencias resultaron mayormente positivas.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los proyectos UBA X170, PICT05 38273-ANPCYT y CLARIS Project (European Commission Project)

6. REFERENCIAS

- Barrucand, M., 2008: Extremos de temperatura en Argentina: Cambios observados en la variabilidad espacio-temporal y su relación con otras características del sistema climático. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires, pp 162.
- Barrucand, M. y M. Rusticucci, 2001: Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Variabilidad temporal y espacial. *Meteorológica* 26: 85-101.
- Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 881.
- Eliseev, A. V., I.I. Mokhov y M. S. Guseva, 2006. Sensitivity of Amplitude-Phase Characteristics of the Surface Air Temperature Annual Cycle to Variations in Annual Mean Temperature. *Izvestiya Atmospheric Oceanic Physics* 42: 300-312.
- Eliseev, A. V., M. S. Guseva, I. I. Mokhov and K. G. Rubinshtein, 2004a. Amplitude-phase characteristics of the annual cycle of surface temperature: Comparison of AGCM output and reanalysis data. *Izvestiya Atmospheric Oceanic Physics* 40: 381-393.
- Eliseev, A. V., I. I. Mokhov, K. G. Rubinshtein and M. S. Guseva, 2004b. Atmospheric and Coupled Model Intercomparison in Terms of Amplitude-Phase Characteristics of Surface Air Temperature Annual Cycle. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21: 837-847.
- Eliseev, A.V., I.I. Mokhov and N.Yu. Vakalyuk, 2000. Tendencies of changes in the phase characteristics of the annual cycle of surface air temperature for the Northern Hemisphere. *Izvestiya Atmospheric Oceanic Physics*, 36(1): 11-20.
- Mokhov, I.I. and A. V. Eliseev, 1997. Tropospheric and stratospheric temperature annual cycle: Tendencies of change. *Izvestiya Atmospheric Oceanic Physics* 33(4): 415-426.
- Mokhov, I.I., 1985. Method of amplitude-phase characteristics for analyzing climate dynamics. *Soviet Meteor. Hydrol.* 5: 14-23.
- Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2001. Climatología de temperaturas extremas en la Argentina. Consistencia de datos. Relación entre la temperatura media estacional y la ocurrencia de días extremos. *Meteorológica* 26: 69-83.
- Stine, A. R., P. Huybers and I. Y. Fung, 2009. Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature. *Nature* 457: 435-440.
- Trenberth, K. E., 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Am. Met. Soc.*, vol. 9, 303-319.
- Van Loon, H., J. W. Kidson and A. B. Mullan, 1992. Decadal variation of the annual cycle in the Australian dataset. *J. Climate* 6: 1227-1231.
- White, G. H. and J. M. Wallace, 1978. The global distribution of the annual and semiannual cycles in surface temperature. *Mon. Weather Rev.* 106: 901-906.