

ANÁLISIS DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS TEMPERATURAS EXTREMAS DURANTE 100 AÑOS EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

María Paula LLANO ^(1,2), Walter VARGAS ^(1,2)

^(1,2) Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos - Universidad de Buenos Aires,
Argentina – CONICET

mpllano@at.fcen.uba.ar | vargas@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

El presente trabajo pretende estudiar la variabilidad de las temperaturas extremas en la ciudad de Buenos Aires, mediante el uso de diferentes parámetros estadísticos. Las series diarias de temperaturas máximas y mínimas de la estación Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) son empleadas para tal fin. Las mismas cubren el período 1909 – 2013. Las distribuciones de las temperaturas y de las amplitudes diarias presentan modificaciones que pueden ser atribuibles a la existencia de la tendencia debido al calentamiento urbano. Se trabaja con la serie original de los datos y con una serie en donde la tendencia es removida para hacer los registros comparables, tanto en un estado llamado natural como en otro llamado moderno. Uno de los parámetros estadísticos utilizados es la covarianza. La misma nos permite ver el comportamiento día a día de las temperaturas. Dicho parámetro permite discriminar entre los eventos persistentes y los antipersistentes a nivel mensual, tanto en la época invernal como estival y más específicamente a nivel diario exhibiendo los cambios abruptos que se producen en las temperaturas debido al pasaje de los sistemas frontales. A la largo del tiempo la función covarianza no presenta una tendencia significativa. A lo largo de los 105 años de estudio hay presentes diferentes tendencias según el período analizado. Otro de los puntos de estudios es analizar la homogeneidad de los inviernos y de los veranos, los mismos fueron categorizados en terciles y los meses que los integran también fueron evaluados en las mismas categorías. Así mismo, se analizan los ciclos característicos presentes en cada uno de los años de estudio, lo que revela una coherencia con los años en sus diferentes categorías de persistentes o antipersistentes. Los resultados de este análisis exploratorio de los datos muestran que es posible ajustar modelos estadísticos a la distribución de las temperaturas extremas diarias con el fin de describir cambios a lo largo de los años.

Palabras clave: variabilidad, extremos, temperatura.

ABSTRACT

This paper aims to study the variability of extreme temperatures in Buenos Aires city, by using different statistical parameters. The daily series of maximum and minimum temperatures of Buenos Aires Central Observatory (OCBA) station are used for this purpose. They cover the period from 1909 to 2009. A correlation analysis between close stations shows that OCBA is representative of the urban climate. Linear trends are estimated and these are positive. Assuming the existence is due to the urban warming, it is removed to make comparable winters.

The statistical parameters used are the covariance, the positive and negative component of it. This makes it possible to analyze the behaviour of persistent synoptic situations and others with sign change separately. The covariance function does not have a significant lineal trend. The 105 years of study exhibit different trends depending on the period. Another point of research is to analyze the homogeneity of the winters and summers, they are categorized and the months that

comprise them are also evaluated in the same categories. The results show that it is feasible to fit models to distributions of daily maximum and minimum temperature to describe changes through time.

Keywords: winter, extreme temperatures.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad climática y en especial sus valores extremos son de especial interés por su efecto en diferentes aspectos de la sociedad. El impacto de las temperaturas extremas ocurridas durante períodos prolongados afecta entre otros factores a la salud y a las provisiones de energía.

El análisis de las temperaturas máximas y mínimas diarias en las ciudades y sus alrededores tiene la importancia de poder realizar ensayos para el ajuste de las series a modelos matemáticos, la elaboración de pronósticos probabilísticos y la aplicación a consumos de energía por calefacción y refrigeración. A su vez, es de importancia estudiar las condiciones iniciales del análisis exploratorio de ondas o frecuencias específicas que hacen a la aparición de eventos extremos tales como olas de calor o de frío, eventos de precipitación persistente, así como también los de humedad extrema.

Para la realización de esto es necesario introducirse en el estudio de las funciones de autocovarianza, con sus componentes positiva (persistencia) y negativa (antipersistencia), con las cuales es posible detectar el proceso general que gobierna las series. En meteorología la persistencia permite describir una sucesión de días con las mismas características y también presenta utilidad para el pronóstico del tiempo, al emplear las características de hoy para predecir el tiempo de mañana. Diferentes autores analizan la persistencia de las series, entre ellos se puede mencionar a Dickson (1966) que estudia la persistencia en serie mensuales de temperatura en Estados Unidos encontrando patrones espaciales de similar comportamiento. Naumann et al. (2011) analizan la persistencia en series de temperatura de Sudamérica a partir de los coeficientes de autocorrelación. Minetti y Vargas (1997) buscan la relación entre las anomalías de temperatura diaria como producto de la persistencia y de ondas anuales.

Así mismo los análisis espectrales, nos permiten detectar las ondas sinópticas y más allá de ellas que condicionan el pronóstico. En el orden de las bajas frecuencias es importante estudiar los efectos antropogénicos y naturales de largo plazo que hacen a la separación de efectos por los cambios climáticos originados por el hombre o la naturaleza.

Esto requiere de una base de información lo más extensa posible como así también la garantía de buena calidad de la estación meteorológica y de métodos de consistencia de la información. De las estaciones regionales Observatorio Central Buenos Aires configura la serie más completa y mejor controlada de la región, a pesar de que tiene un notable efecto de ciudad por lo que podría cuestionarse su valor de estación de referencia de la Región del Plata. Los estudios que se desarrollan y que constituyen el objetivo de este trabajo pueden sintetizarse en las siguientes etapas:

- Análisis de la representatividad regional,
- Estudio del efecto ciudad y de la tendencia que parcialmente o completamente provoca.
- Clasificación de los años en categorías térmicas obtenidas de las temperaturas máximas y mínimas, tales como años o estaciones fríos, cálidos, normales, persistentes y antipersistentes.

- Análisis de proceso general que representa a las series y ondas más representativas, incluyendo las ondas sinópticas.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio se emplean los registros de las temperaturas diarias máximas y mínimas de diferentes estaciones de la ciudad de Buenos Aires y zonas aledañas.

	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Período
OCBA	34,35	58,29	1909-2012
Ezeiza	34,49	58,32	1956-2010
Aeroparque	34,34	58,25	1957-2009
La Plata	34,58	57,54	1961-2009

Tabla 1: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES DE ESTUDIO Y SU CORRESPONDE PERÍODO.

Se decide tomar como estación de referencia a Observatorio Central Buenos Aires (OCBA) por ser la que presenta un registro centenario que permite estudiar las variabilidades de un amplio rango de frecuencia. Las series de las estaciones cercanas son correlacionadas y testeadas con un test t-Student con un 95% de significancia, con el fin de analizar el comportamiento regional de las temperaturas de la ciudad de Buenos Aires, ya que como es sabido, esta variable presenta un comportamiento homogéneo en zonas cercanas. Las correlaciones se estiman sin extraer la tendencia con el fin de ver si este efecto está presente en todas las estaciones, de acuerdo a Hoel (1971). Para estimar la tendencia lineal se utiliza la expresión de la recta de regresión a nivel anual y mensual. Se emplea el test t-Student para verificar la existencia de una tendencia significativa al 95 % de confianza.

Para continuar con el análisis de las series a las mismas se les calcula la función de la covarianza (Wilks, 2006), cuya expresión es la siguiente:

$$covarianza = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})$$

La función covarianza es calculada en base a una nueva variable llamada “delta”. En principio se emplea la serie de temperatura sin tendencia y para cada día del año se calcula su valor medio en base a los 105 años de estudio. El valor delta es la diferencia entre el valor sin tendencia y el valor medio. Todo el análisis se realiza con estas anomalías.

Otro de los puntos centrales de la evolución de las variables es encontrar ondas significativas presentes en ellas, para llevar a cabo este estudio se aplica un análisis espectral en las series de autocorrelación de cada uno de los años (Nota Técnica N° 79, Cambio Climático, de la Organización Meteorológica Mundial). Las estimaciones espectrales presentan la siguiente expresión:

$$B_i = \frac{r_0}{m} + \frac{2}{m} \sum (r_L \cos\left(2\pi i \frac{L}{2m}\right)) + \frac{r_m}{m} (-L)^i$$

m = 30% de los datos, para otorgarle estabilidad estadística.

L= lag r = coeficiente de correlación

3. RESULTADOS

4. 3.1 Análisis de las series y el efecto ciudad

Los promedios anuales de las temperaturas medias para las diferentes estaciones utilizadas en este estudio durante el período común son presentados en la Figura 1. En un primer análisis de su evolución a lo largo del tiempo es posible visualizar un comportamiento similar entre las cuatro estaciones.

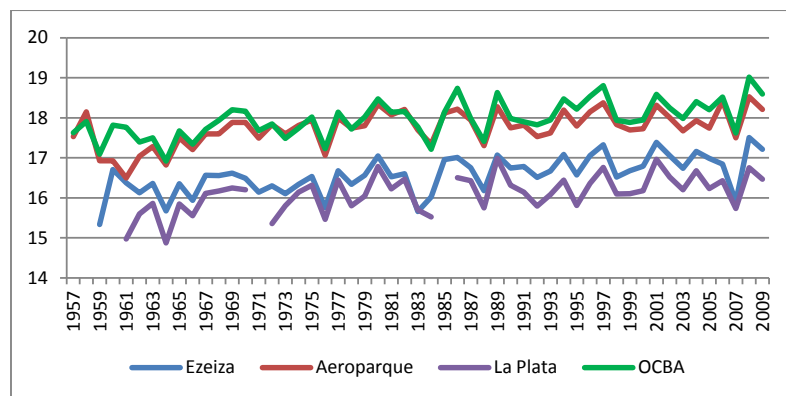


Fig. 1: Evolución de las temperaturas medias anuales.

Los valores medios anuales de las series de temperatura presentan una fuerte correlación significativa con la estación OCBA (0.89 con Ezeiza, 0.85 con Aeroparque y 0.84 con La Plata). Es decir que esta estación representa el comportamiento areal de la zona de la ciudad de Buenos Aires y sus alrededores, por otro lado se observa una fuerte tendencia en la serie de OCBA desde mitad del siglo XX. Este comportamiento también es compartido por las otras estaciones en el período común de estudio.

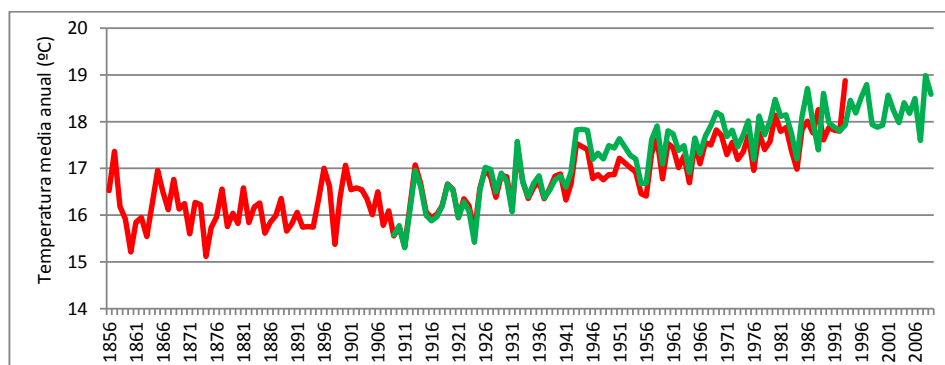


Fig. 2: Evolución de la temperatura media anual de la serie histórica de temperaturas medias mensuales de la estación OCBA (línea colorada) y de la serie de obtenida por medio de las temperaturas extremas diarias (línea verde).

Para realizar este estudio también se cuenta con información de la serie histórica de datos mensuales de OCBA desde la segunda mitad del siglo XIX. Con ella se puede analizar el comportamiento de la temperatura media en la ciudad de Buenos Aires en un record de más de 150 años. En la Figura 2 se presenta la serie histórica superpuesta con la serie obtenida por medio

de las temperaturas extremas diarias. De la inspección visual se observa una clara tendencia lineal desde aproximadamente la segunda década del siglo XX en concordancia con el crecimiento de la ciudad. Dada la baja autocorrelación anual de las temperaturas es lógico suponer que esto también ayuda a estimar la tendencia en forma lineal.

La evolución de las temperaturas medias mensuales para meses característicos es presentada en la Figura 3, la elección se basa en que el mes de octubre presenta la mayor tendencia positiva para las temperaturas mínimas, mientras que en las temperaturas máximas de febrero no se halla la presencia de tendencia lineal significativa. En todos los casos a excepción de la temperatura máxima de febrero la tendencia es positiva significativa, por ello se decide estimar la tendencia por mes para luego ser extraído lo que se asume como el efecto de la ciudad. En promedio las temperaturas máximas sufren un aumento de 1,5 °C en 100 años, mientras que las temperaturas mínimas alcanzan los 3,2 °C. Siendo el mes de octubre el que mayor aumento presenta, con las temperaturas máximas 2,5 °C y con las mínimas 3,8 °C. Estas tendencias lineales observadas a nivel mensual (con un nivel de significancia del 95%) son removidas de los datos diarios de temperatura. A estas nuevas series sin tendencia se las llama *estado natural*, ya que los valores de temperatura se condicen con los de principio de siglo.

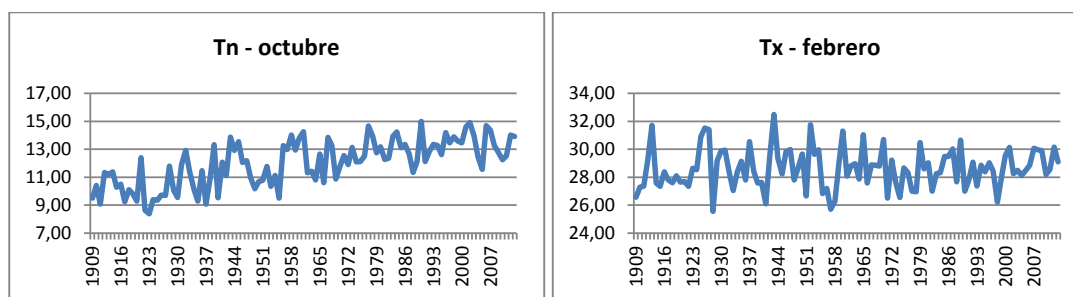


Fig. 3: Evolución de la temperatura mínima media mensual para el mes de octubre (izquierda) y temperatura máxima media mensual para el mes de febrero (derecha).

3.2 Representatividad de las clasificaciones anuales a nivel mensual

Para evaluar lo que llamaremos la homogeneidad entre los rangos de las temperaturas medias anuales y mensuales de los años, se separa en terciles la información, por tal motivo los años quedan clasificados en tres categorías según su valor medio anual (frío, medio, cálido). El mismo procedimiento se realiza para cada uno de los meses. Esta metodología permite evaluar el comportamiento de las temperaturas extremas a lo largo de cada año, ya que existen años en donde se los clasifica como fríos o cálidos, pero los meses que los componen presentan un comportamiento disímil. En las temperaturas máximas para ambos extremos, es decir, el primer y tercer tercil, aproximadamente un 50% de los meses se ubican en la misma categoría extrema. Con las temperaturas mínimas sucede algo similar (Tabla 2).

Pero para realizar un análisis más detallado, se divide al año en un semestre frío (abril-septiembre) y otro cálido (enero-marzo y octubre-diciembre). La homogeneidad de los valores presenta resultados interesantes, en las temperaturas máximas no se encuentran grandes diferencias a lo visto en el año completo. Mientras que en las temperaturas mínimas es el semestre frío el que define en mayor porcentaje las características del año (Tabla 3).

		ANUAL					ANUAL		
meses	Tx	1° tercil	2° tercil	3° tercil	meses	Tn	1° tercil	2° tercil	3° tercil
	1°	51,2	28,3	20,5		1°	47,1	32,9	20,0
	2°	30,5	36,7	32,9		2°	34,5	30,5	35,0
	3°	18,3	35,0	46,7		3°	18,3	36,7	45,0

Tabla 2: PORCENTAJE DE CATEGORIZADOS EN LA MISMA CLASIFICACIÓN QUE A NIVEL ANUAL.

El año más frío en lo que respecta a las temperaturas máximas es 1911, en él 10 meses se encuentran en la misma categorización de fríos, los 2 restantes se ubican uno en el semestre frío y otro en el cálido. En el caso del año más cálido (1932) el comportamiento es totalmente aleatorio, ya que solamente 7 meses se encuentran en la misma categorización. Con las temperaturas mínimas se observa que el año 1924 (el más frío) presenta 9 meses con la misma clasificación y en el año más cálido (1914) 7 meses pertenecen a la misma categoría de los cuales 5 se ubican en el semestre frío.

		Invierno			Verano		
meses	Tx	1° tercil	2° tercil	3° tercil	1° tercil	2° tercil	3° tercil
	1°	51,0	30,5	18,6	51,4	26,2	22,4
	2°	29,0	37,1	33,8	31,9	36,2	31,9
	3°	20,0	32,4	47,6	16,7	37,6	45,7
		Invierno			Verano		
meses	Tn	1° tercil	2° tercil	3° tercil	1° tercil	2° tercil	3° tercil
	1°	51,0	31,0	18,1	43,3	34,8	21,9
	2°	34,8	31,9	33,3	34,3	29,0	36,7
	3°	14,3	37,1	48,6	22,4	36,2	41,4

Tabla 3: PORCENTAJE DE CATEGORIZADOS EN LA MISMA CLASIFICACIÓN QUE A NIVEL SEMESTRAL.

3.3 Evolución y análisis de los parámetros estadísticos

El objetivo de este punto es analizar las componentes de la función covarianza, es decir su parte positiva llamada persistencia y su parte negativa denominada antipersistencia, que nos dan información acerca de la evolución del comportamiento diario de las temperaturas al analizar su magnitud y la cantidad de días con o sin persistencia.

Con todos estos parámetros es posible analizar su evolución a lo largo del registro centenario, para determinar su comportamiento. El analizar la cantidad de veces en donde la covarianza es positiva o negativa, nos ayuda principalmente a encontrar los cambios abruptos en las temperaturas, los que podemos asociar en una primera instancia al pasaje de sistemas frontales.

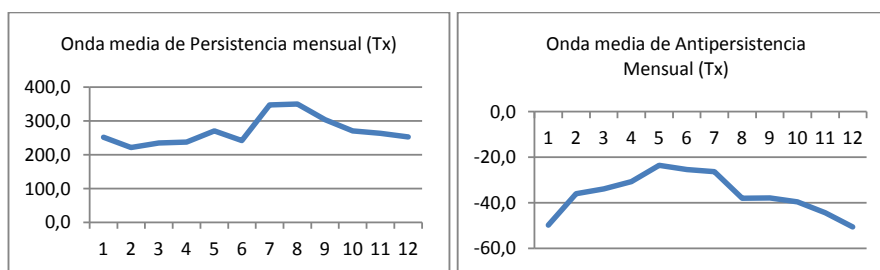


Fig. 4: Onda media de la persistencia (izquierda) y antipersistencia (derecha) mensual para la serie de temperaturas máximas.

Para las temperaturas máximas (Figura 4) se observa que el invierno (meses de julio y agosto) son más persistente en términos medios (valores positivos), esto se puede deber a que los sistemas sinópticos tienden a permanecer más tiempo. Mientras que la mayor antipersistencia (valores negativos) se producirían en verano (diciembre y enero) por los cambios abruptos en las condiciones meteorológicas, como son los sistemas frontales y los procesos dentro de las masas de aire. Esto puede relacionarse con la cantidad de días con precipitación, ya que estadísticamente en la ciudad de Buenos Aires los meses de invierno presentan en promedio 6 días con precipitación, mientras que este valor asciende a 9 en los meses de verano. (Estadísticas Climatológicas 1960-1990 del Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina).

En el caso de las temperaturas mínimas, las antipersistencias no presentan una onda anual tan marcada, todos los meses se encuentran con un valor cercano a los -30. En cambio la persistencia tiene una clara onda anual, nuevamente con un máximo en los meses invernales (Figura 5).

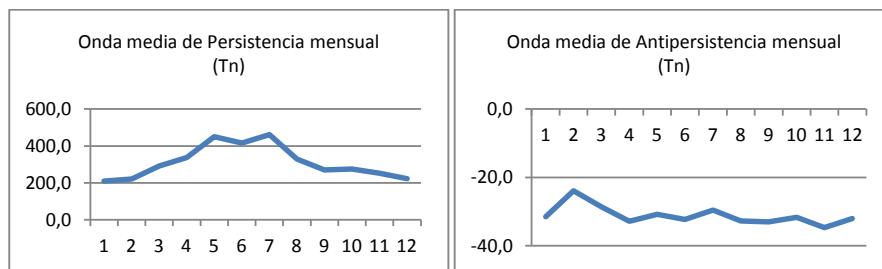


Fig. 5: Onda media de la persistencia (izquierda) y antipersistencia (derecha) mensual para la serie de temperaturas mínimas.

Las series de los valores anuales de persistencia y antipersistencia para ambas temperaturas presentan diferentes comportamientos. Las series de persistencia exhiben una tendencia negativa, pero solo significativa (95 %) en el caso de las temperaturas mínimas. Las series de antipersistencia presentan tendencias positivas significativas. Estos cambios tienen que ser evaluados junto con la cantidad de días bajo estas condiciones. En el caso de las temperaturas máximas, la serie de cantidad de días con antipersistencia al año presenta una tendencia negativa pero no significativa, con este comportamiento es posible inferir que la disminución de la antipersistencia y la no variación de la cantidad de días estarían indicando que los cambios en los registros de temperatura son cada vez menos abruptos. En las temperaturas mínimas la cantidad de días con antipersistencia presenta una tendencia positiva significativa. Al analizarlo conjuntamente con la disminución de la antipersistencia nos permite inferir nuevamente que las variaciones día a día de la temperatura no son tan bruscas.

3.4 Distribución de las componentes de la covarianza en años característicos

Se seleccionan años en donde a nivel anual la persistencia y la antipersistencia es máxima y mínima. Se calculan los histogramas de distribución tanto de la componente positiva como negativa de la covarianza. Estos años particulares están caracterizados por períodos prolongados en donde las temperaturas se mantienen por encima o por debajo de su valor promedio, dando lugar a secuencias cálidas o frías de larga duración.

La mayor frecuencia se registra para valores entre 0 y 25, es decir cuando los días consecutivos no presentan gran diferencia de su valor medio mensual.

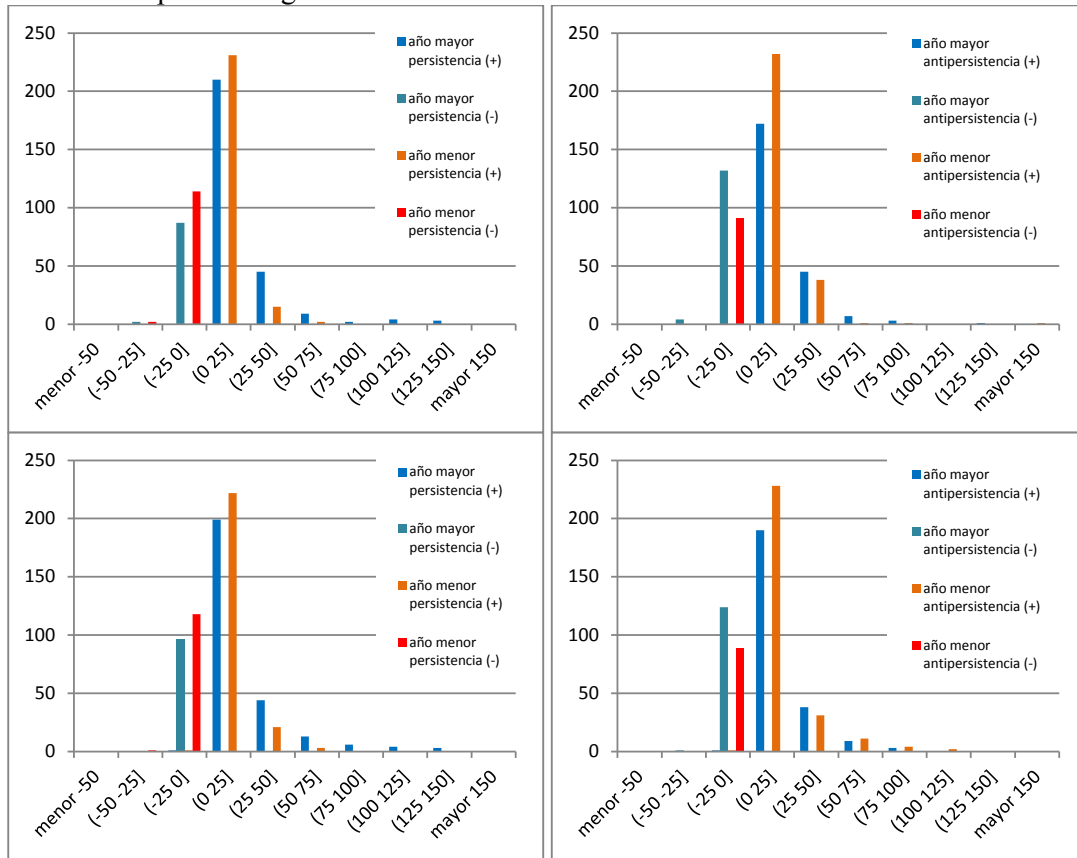


Fig. 6: Distribución de la covarianza, para años característicos de persistencia (izquierda) y de antipersistencia (derecha), para las temperaturas máximas (gráficos superiores) y temperaturas mínimas (gráficos inferiores).

Algunos casos particulares se registran por ejemplo en 1958 (el año en donde la persistencia anual es la mayor para las temperaturas máximas) en él se observa una frecuencia absoluta de 3 para valores mayores a 125, esto se debe a una secuencia cálida ocurrida en el mes de julio en donde por más de 5 días los valores de temperatura máxima superaron la media en casi 10 °C. (Fig. 6 superior izquierda).

Otro caso atípico se registra en 2001, ese año presenta la menor antipersistencia, y se halla un valor superior a los 150 en la covarianza, esto es producto de que en agosto la temperatura máxima alcanzó los 24 y 28°C en días consecutivos. (Fig. 6 superior derecha).

En las temperaturas mínimas las particularidades las encontramos en el año 1965, en donde para el mes de junio se registran 11 días en donde las temperaturas superan en 10°C los valores medios, esta secuencia cálida se ve reflejada en el valor de la covarianza anual. (Fig. 6 inferior izquierda).

En el caso de la máxima antipersistencia (año 1961) no se halla un patrón de comportamiento claro, los valores negativos de la funciones covarianza se encuentran distribuidos a lo largo del año. Este máximo se puede deber a diferentes particularidades que provocan un importante cambio en las temperaturas, tal es el caso de septiembre en donde las

temperaturas mínimas rondan los 10°C y por el pasaje de un frente frío alcanzan los 2°C, para luego recuperarse y superar los 12°C, estos cambios abruptos en días consecutivos son los que más aportan al término de la antipersistencia. (Fig. 6 inferior derecha).

3.5 Análisis espectral

Se realiza un análisis espectral a cada una de las series anuales en los 105 años de estudio, con el objetivo de poder inferir resultados del comportamiento sinóptico de las series. Para que la onda anual no afecte el resultado los cálculos se realizan con las series de anomalías denominadas “delta”. El análisis del comportamiento año a año, permite hallar ondas características. Así mismo se procede a categorizar los años según las condiciones de los parámetros para identificar comportamientos particulares en años fríos o cálidos o persistentes o antipersistentes.

En el análisis año por año se identifican las ondas significativas en cada uno de ellos y se las agrupa en diferentes intervalos de cuasi-período. De este estudio se desprende que la mayor cantidad de ondas significativas en la temperatura máxima se encuentra dentro de los 3 a 5 días y los 5 a 7 días de duración, dando un resultado que sería coherente con la longitud de las ondas sinópticas.

En las temperaturas mínimas nuevamente son estas dos longitudes las que mayor cantidad de años las presentan, pero a diferencia de la otra temperatura extrema, la longitud de 7 a 10 días también presenta una cantidad considerable de casos.

Temp.	Período	[2-3]	[3-5]	[5-7]	[7-10]	[10-15]	[15-20]	[20-30]	[30-40]	[40-50]	[50-60]	[60-100]	[100-200]	[200-)
Máxima	Cantidad	11	50	54	24	24	4	3	0	1	1	0	0	0
Mínima	Cantidad	9	83	73	56	24	7	5	0	0	1	1	0	1

Tabla 4: CANTIDAD DE ONDAS CARACTERÍSTICAS EN LOS 105 AÑOS DE ESTUDIO PARA DIFERENTES PERÍODOS DE DÍAS. PARA LA TEMPERATURA MÁXIMA (SUPERIOR) Y TEMPERATURA MÍNIMA (INFERIOR).

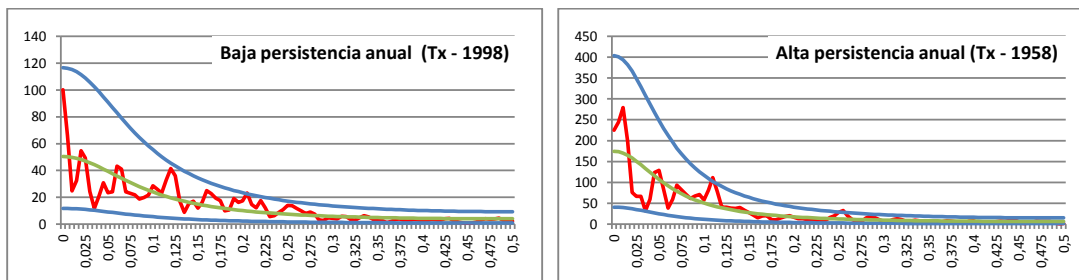


Fig. 7: Espectros de años particulares para la temperatura máxima.

El análisis espectral de años específicos muestra para las temperaturas máximas que el año de menor persistencia presenta una onda significativa de 5 días, esta onda sinóptica es la que puede estar provocando los cambios en las temperaturas que hacen que al concluir el mismo la persistencia sea baja. (Fig. 7, izquierda). En el año 1958 la persistencia es alta y está de acuerdo con el hecho de que la onda significativa que se halla es la de aproximadamente 9 días, este período de tiempo se puede asociar con una mayor duración en las secuencias de días con valores

por encima o por debajo del valor medio que hace que al finalizar el año la persistencia sea elevada. (Fig. 7, derecha).

5. CONCLUSIONES:

La estación OCBA representa a la ciudad de Buenos Aires y alrededores. Donde hay un proceso generalizado de efecto de ciudad, aunque no se descarta alguna componente climática en la tendencia positiva que se observa.

La autocorrelación de los valores anuales y medias mensuales en cada uno de los meses son no significativas y la visualización de las temperaturas extremas permite estimar en forma lineal la tendencia general de la serie. Las series mensuales tienen tendencias positivas con excepción de la temperatura máxima de febrero.

Estudiada la homogeneidad mensual de las características anuales de los años discriminados por categorías se puede concluir que el 50 % de los mismos pertenecen a la misma categoría, y un análisis específico por semestres demuestra que son los inviernos quienes frecuentemente definen las características anuales.

Las componentes de la función de autocovarianza permiten discriminar claramente los años en persistentes y antipersistentes. Los años de mayor persistencia nos permiten identificar secuencias de días con las mismas condiciones anómalas, hallándose en este estudio principalmente secuencias cálidas.

El proceso dominante que denuncia el espectro de la serie completa des-estacionalizada es markoviano bien definido. A su vez aparecen ondas de distintos períodos con especial manifestación de los ciclos sinópticos. Las frecuencias anuales de aparición de las ondas nos muestran un amplio espectro de ondas posibles en las que sobresalen las sinópticas y las de Madden Julian.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los subsidios UBA 20020100100628, y Agencia PICT 2012-1507 por solventar el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Dickson, R. (1966). "The climatological relationship between temperatures of successive months in the United States". *Journal of Applied Meteorology*, 6. pp 31-38.
- Hoel, P. (1971). "Introduction to mathematical statistics". John Wiley and Sons. New York.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M. (1997). "Interaction processes between the annual wave and the disturbances in series of daily temperature". *Journal of Climate*, 10. pp 297-305.
- Naumann, G., Vargas, W.M., Minetti, J.L. (2011). "Persistence and long-term memories of daily maximum and minimum temperatures in southern South America". *Theoretical & Applied Climatology*, 105. pp 341-355.
- Wilks, D. (2006). "Statistics Methods in the Atmospheric Sciences". International Geophysics Series 91. Ed. Elsevier.