

PATRONES ESPECTRALES DE VARIABLES CLIMÁTICAS EN RELACIÓN CON LOS ESCURRIMIENTOS EN CUENCAS EN SUDAMÉRICA

Walter M. VARGAS y Darío A. HUGGENBERGER

*Departamento de Ciencias de la Atmósfera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires*

RESUMEN

Se intenta relacionar las estructuras de variables climáticas, con los escurrimientos en la región sur de Sudamérica. Se fundamenta la estructura del espectro teórico de las series utilizando registros mayores de 40 años. Se identifican períodos relevantes en torno a los 25, 11, 9, 6, 3.5 y 2.3 años y, como proceso general, las series parecen ajustarse a modelos markovianos de primer orden. Se establecen inferencias sobre la existencia de eventos importantes para la región, como El Niño, y condiciones generales en el Pacífico. Se desarrolla una metodología para la clasificación y división en zonas homogéneas de caudales y variables climáticas específicas.

Palabras clave: Climatología, Extremos, Variabilidad Climática, Metodología.

ABSTRACT

We have tried to obtain relations between climatic variables structures, which are the input, with the streamflow in the south zone of Southamerica. We establish the theoretical spectral structure of the series using records of more than 40 years. We could see important periods around 25, 11, 9, 6, 3.5 and 2.3 years, and, as a general process, the series seem to adjust at a first order markovian model. We establish inferences about the existence of important events for the region, as El Niño, and general conditions in the Pacific ocean. We develop a methodology for the classification in homogeneous zones of streamflow and specific climatic variables.

Keywords: *Climatology, Extreme, Climatic Variability, Methodology.*

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la variabilidad climática en baja frecuencia ha sido estudiado por muchos autores. VINES (1986) analiza bajas frecuencias existentes en distintos lugares del mundo. En el Hemisferio Sur TYSON y DYER (1980) estudian las longitudes entre 10 y 22 años existentes en la presión, también encontradas por COMPAGNUCCI y VARGAS (1983) en la precipitación en Cuyo, mostrando a su vez una coherencia significativa entre las precipitaciones estivales en Sudáfrica y Sudamérica. La influencia de El Niño en esta región ha sido estudiada por ROPELEWSKI y HALPERT (1987, 1989), ACEITUNO (1988, 1989), CHU y KATZ (1989), ENFIELD y CID (1991) y

VARGAS *et al.* (1999). En el caso de los ríos, ciertas variabilidades de baja frecuencia han sido analizadas por GARCÍA y VARGAS (1996), y MINETTI y CARLETTO (1990).

Dada la gran importancia de la cuenca del Plata por sus extremos –inundaciones y sequías de gran intensidad– y las regiones hídricas cercanas en cuanto al balance hemisférico, se hace necesario el estudio de la relación entre las variables climáticas y las hidrológicas con el objetivo de ayudar al diagnóstico climático y a la construcción de modelos climático-hidrológicos.

Desde el punto de vista metodológico, las variables climáticas no presentan dificultades demasiado insalvables, en cambio los ríos, a pesar de que operan como integradores climáticos y ofrecen la posibilidad de obtener inferencias en escalas espaciales y temporales más amplias que otras variables climáticas, tienen especial dificultad en las formas de medición, muy especialmente en ríos como el Paraná, Uruguay, etc.

Por eso en la primera parte del trabajo se analiza la estructura espectral en baja frecuencia de un conjunto de series de caudales de ríos de Sudamérica y define el modelo teórico al cual se ajusta el comportamiento de los escurrimientos. En la segunda parte, sobre la base del patrón espectral en baja frecuencia, se establecen los períodos relevantes en relación con el continuo teórico. En una tercera sección de resultados se clasifican las series regionalmente de acuerdo con la estructura espectral. En la cuarta parte del trabajo se procura relacionar los caudales con procesos climáticos extraregionales por medio de las similitudes entre espectros.

Dado que es conocida la influencia de los procesos oceánicos Atlántico y Pacífico sudamericano en la climatología e hidrología de Sudamérica, se hace especial hincapié en la relación entre los índices que caracterizan los calentamientos y enfriamientos en esas regiones para entender los procesos que afectan a los caudales en cuencas de muy distinta naturaleza geográfica.

2. DATOS

Los registros de caudales se obtuvieron de las Estadísticas Hidrológicas Argentinas provenientes de EVARSA, las series de ríos de Brasil y del Uruguay fueron proporcionadas por la Dra. Susana Bischoff, las series de ríos chilenos fueron proporcionadas por Patricio Aceituno, la serie del río Piura fue obtenida a través de Internet (Rodolfo Rodríguez, Universidad de Piura), las series de los ríos Juazeiro, Campos, Negro (Palmar, Uruguay) provienen de los archivos de la UNESCO. Las series de presión de Tahiti, Darwin y el Índice de Oscilación del Sur se obtuvieron de los archivos del NCEP (Climate Prediction Center). Las series de temperatura de Comodoro Rivadavia y Río de Janeiro, y las de precipitación en Paso de los Libres y en Santiago de Chile de los archivos del NCAR en la base de datos del Departamento de Ciencias de la Atmósfera de la FCEyN de la UBA. Los índices Niño 1+2, 3, 3.4 y 4 se obtuvieron a través de Internet.

3. METODOLOGÍA

3.1 Modelo Teórico

Sobre una base de registros de totales (caudales y precipitación) y promedios mensuales (temperatura, presión e índices) se generó una serie desestacionalizada y estandarizada a partir de cada una de las series originales.

Para establecer la forma del continuo teórico correspondiente a las series de caudales se calculó el primer y segundo coeficientes de autocorrelación y sus significancias por una *t* de Student. Se

halló el intervalo de confianza del 95% del segundo coeficiente de autocorrelación y comparó el cuadrado del primer coeficiente con el segundo y su intervalo de confianza, como una medida de la persistencia, con objeto de fundamentar un modelo teórico de carácter markoviano.

3.2 Períodos relevantes

A partir de las series estandarizadas se realizó un análisis espectral de Blackmann-Tuckey y se obtuvo la estructura de cada serie. Se compara el espectro real con un modelo markoviano identificando los máximos significativos al 20% por una prueba chi-cuadrado. De esta manera se procura establecer las características de las estructuras espectrales en términos de los períodos que mínimamente se apartan del continuo teórico y conformar una clasificación en relación con los máximos significativos con respecto al continuo nulo. Se requiere luego significancias más restrictivas para evaluar la intensidad de los máximos espectrales.

3.3 Clasificación de espectros

Una primer clasificación no objetiva se realiza por medio de la inspección de los máximos espectrales significativos y agrupando los espectros en función de la importancia de estos máximos en cada serie. Se tiene en consideración aquí la distribución espacial de afloramientos y representatividad regional de las cuencas.

Se ha procurado sin embargo establecer procedimientos objetivos de clasificación por medio de la comparación entre espectros. Para ello se aplicaron un conjunto de filtrados y ajustes previos a la clasificación.

Para estandarizar los espectros en relación con la longitud de cada serie, cuyos registros oscilan entre 40 y 90 años, se consideró que en una secuencia de datos más corta, la varianza se distribuye entre un menor número de frecuencias con equiprobabilidad. Se calculó la varianza que contendría cada serie, de acuerdo con su correspondiente espectro nulo markoviano, si su longitud fuera de cien años. Se dividió la varianza real por la que tendría si el registro fuese de cien años y se multiplicó la estimación espectral en todas las bandas por el coeficiente resultante.

Se adoptó un conjunto de intervalos representativos de cada banda espectral sobre la base de considerar el error en términos de ancho de banda en relación con la longitud del registro. Los catorce intervalos seleccionados en términos de años son los siguientes [40, 20), [20, 16), [16, 12), [12, 10), [10, 8), [8, 7), [7, 6), [6, 5), [5, 4), [4, 3.5), [3.5, 3.0), [3.0, 2.6), [2.6, 2.2), [2.2, 1.9]. No se tuvieron en cuenta con fines de clasificación los períodos de variabilidad menores que dos años.

Se interpolaron los períodos obtenidos en los catorce rangos seleccionados y se aplicó una corrección de la varianza para evitar alteraciones espúreas introducidas por el método de interpolación.

Con el objeto de no favorecer la baja frecuencia en las estimaciones espectrales en relación con la alta frecuencia debido al carácter markoviano del espectro, se simula un comportamiento de ruido blanco dividiendo la estimación espectral interpolada por la correspondiente al espectro markoviano teórico.

Se aplicaron distintos métodos de clasificación bajo diferentes condiciones de filtrado, variantes y criterios. Se seleccionó el mejor método de clasificación de los inspeccionados en términos de definición de grupos, observándose que la estructura general de la clasificación no depende del método ni del criterio elegido, excepto en lo que respecta a la ubicación de miembros extremos de cada grupo. Se observa una influencia del filtrado en la clasificación resultante, el cual elimina

efectos espúreos asociados con la longitud de cada serie y la componente markoviana del espectro, revelando estructuras de asociación profundas, ocultas tras las componentes filtradas.

Se interpreta cada estructura espectral como un vector en un espacio de catorce dimensiones. Un método de clasificación objetiva adoptado se fundamenta en la búsqueda de elementos con máxima proximidad. Se calcula la distancia euclideana entre los vectores y conforma una jerarquía de proximidades relajando progresivamente el requisito de distancia mínima. Cuando se ha formado un grupo o integrado un nuevo miembro a uno preexistente, la proximidad de los elementos aún no clasificados se evalúa en relación con la distancia al centroide del grupo, e incorpora el siguiente elemento al grupo más próximo. Puede notarse que el método presenta problemas de condicionamiento, viéndose muy influenciado por la incorporación de nuevos elementos a la clasificación, por lo cual las series testigo extraregionales o de otras variables fueron incorporadas una a la vez a la clasificación y observado el efecto sobre los grupos preestablecidos.

Se aplicó una clasificación progresiva de dos, tres, cuatro y cinco grupos de espectros por medio del método "k-medias" (no presentada en el resumen), consistente en una separación iterativa que minimiza la variabilidad dentro de cada grupo y la maximiza entre grupos. Criterios de estabilidad y la observación de un gráfico de autovalores de la matriz de correlación de espectros sugiere la separación en cuatro grupos representativos. Son los resultados de esta clasificación los que se discuten con más profundidad en el trabajo y se aplican a la determinación de vinculaciones entre patrones extraregionales de variabilidad. Este método presenta también problemas de condicionamiento, por lo cual se observa el efecto de la incorporación y sustracción de elementos a la clasificación, detectando las estructuras estables de agrupamientos y los elementos extremos cuya clasificación es más dependiente del método.

3.4 Vinculaciones con patrones de variabilidad extraregionales

Se analiza la estructura espectral de series de otras variables e índices con el objeto de inferir relaciones con posibles forzantes. Tras una primera inspección no objetiva se aplica el método "k" y el de encadenamientos incorporando una a una nuevas series espectrales, sometidas a los mismos procedimientos de filtrado y ajuste, de variables posiblemente relacionadas con los caudales en estudio. Una reclasificación del conjunto incorpora a la nueva serie dentro de alguno de los grupos previamente formados o bien impone un reagrupamiento del conjunto de espectros. Se evalúa la distancia media entre espectros dentro de cada grupo y se compara con la distancia de la nueva serie incorporada al centroide del grupo.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Modelo teórico markoviano

Para evaluar el ajuste a un modelo markoviano se calculó el primer coeficiente de autocorrelación y su nivel de significancia por t de Student, el cual resultó significativo al 1% en todos los casos, excepto en la precipitación en Santiago de Chile (1%) y en la de Paso de los Libres (no significativo). Se calculó el segundo coeficiente de autocorrelación y su significancia, del 1% en todos los casos, excepto en la precipitación en Paso de los Libres y Santiago de Chile (5%) y en la temperatura de Comodoro Rivadavia (1%). Se hallaron los límites del intervalo de confianza al 5% del segundo coeficiente de autocorrelación y se comparó con el cuadrado del primero.

Se observa así que hay persistencia en todas las series de caudales. Ésta es menor en la temperatura y la presión y sensiblemente menor en la precipitación.

En los caudales del Sur de Chile sólo el río Bio-Bio y en la Patagonia solamente el río Negro tienen el cuadrado del primer coeficiente ligeramente menor y mayor respectivamente que los límites del intervalo de confianza del segundo. Es en varios ríos del Noroeste y en los Campos y Juazeiro (Brasil) donde el cuadrado del primer coeficiente es ligeramente menor que el límite inferior del intervalo de confianza del segundo. Esto también se observa en la presión en Darwin, Tahiti y en el Índice de Oscilación del Sur, y en la temperatura en Río de Janeiro. En el caso del Paraná en Santa Fé, y en los ríos Colastiné y Setúbal (Santa Fé, afluentes del Paraná), el Paraguay, el río Negro y el Bío Bío el cuadrado del primer coeficiente es algo mayor que el límite superior del intervalo de confianza del segundo.

El hecho de que en los ríos del Noroeste argentino el cuadrado del primer coeficiente de autocorrelación sea menor que el segundo, es decir, que la autocorrelación teórica ($r(1)^2$) sea menor que la real ($r(2)$), revela que el efecto de persistencia observado es mayor que el esperable, por lo tanto esta memoria del sistema puede asociarse a la baja frecuencia en el proceso generador del caudal más que a la escasa retención del suelo en las cuencas del Noroeste.

Es posible que el efecto inverso en el caudal del Paraná y el Paraguay se deba en parte el lento escurrimiento de esta cuenca, el cual filtra la variabilidad de alta frecuencia, reteniendo sólo los procesos de largo período, así como a la presencia de variabilidad de muy baja frecuencia y/o tendencias.

En general el cuadrado del primer coeficiente de autocorrelación es menor que el segundo. Quizá pueda interpretarse considerando que la persistencia impuesta por el suelo, contenida en forma más pura en el cuadrado del primer coeficiente de autocorrelación, se superpone a la variabilidad de baja frecuencia del proceso generador, contenidas ambas en el segundo coeficiente de autocorrelación.

En síntesis, puede proponerse un proceso de tipo markoviano como espectro teórico en todos los caudales. Sin embargo, hay ríos donde se detecta una tendencia o variabilidad de muy baja frecuencia, con períodos del orden de la longitud de la serie. Puede verse así el efecto del suelo en relación con la persistencia en las series y la memoria del sistema hidrológico.

4.2 Períodos relevantes que se apartan del continuo teórico

En la Tabla 1 se presenta el período significativo al 20% de cada serie de caudales. Para cada río y sitio de aforo se indica en la columna XX la onda más larga detectada en la serie cuando excede los 50 años aproximadamente y en la columna xx la segunda onda más larga. En el resto de las columnas se informa el período en años asociado a la onda de acuerdo con la siguiente nomenclatura: 20 (20 a 30 años), 18 (16 a 20 años), 14 (12 a 16 años), 11 (10 a 12 años), 9 (de 8 a 10 años), 6/7 (6 a 8 años), 5/6 (5 a 6 años), 4/5 (4 a 5 años), 3.5 (3.5 a 4 años), 3.0 (3.0 a 3.5 años), 2.5 (2.5 a 3.0 años), 2.0 (2.0 a 2.5 años).

Se identifican los tipos por su numeración en la primer columna (clasificación primaria). Se indica el período correspondiente al máximo espectral dentro del rango asociado a cada columna y subrayan los períodos principales que caracterizan el tipo.

Tabla 1 (Continuación)

4	Capanema						8.9		5.2		3.6			
4	Rosana	62							5.2		3.6			
4	Jupia	62	31											
4	Guairá	73	36				8.1							
4	Itaipú	62					8.9							
4	Paraguay			27			9.1							2.3
4	Paraná (Pos.)	90	45				8.8	6.0			3.6			
4	Paraná (Cor.)	90	45				8.8				3.5			
4	Paraná (Tún)	91	45				8.8				3.6	3.4		2.3
4	Paraná (Tím)	90	45				8.8					3.3		2.3
4	Colastiné	92					8.7				3.4	3.0		
4	Setúbal	90	45				8.8					3.3		2.4
5	Uruguay (ST)						8.9	6.5		4.2	3.5			2.4
5	Uruguay (PL)	80			13		8.9	6.2		4.2	3.5			2.4
5	Uruguay (C)	80					8.9	6.2		4.2	3.5			2.4
5	Uruguay (MC)	80			13		8.9	6.2		4.2	3.5			2.4
5	Negro (Palm.)	70					8.8		5.4	4.6	3.5			2.3
5	(P) Darwin		49		14			6.5	5.4	4.3	3.6		2.9	2.3
5	(P) Tahiti				14			7.0	5.4		3.5		2.6	2.3
5	IOS				14		8.9	6.5	5.4	4.3	3.5		2.9	2.3
2	(T) C. Rivadav											3.2		2.5
5	(T) Río de J.	90	45					6.3			3.9			
5	(P) P. de Lib.	60				10.0	8.6	6.0		4.3				2.3
1	(T) Sgo. de Ch.	85					12.1				3.7			2.4
¿	Niño 1+2									4.8	3.7		2.8	2.1
¿	Niño 3									4.8	3.7		2.5	2.1
¿	Niño 4									4.8	3.7		2.5	
¿	Niño 3,4									4.8	3.7		2.5	2.1

De la Tabla precedente se concluye que los períodos dominantes, que destacan del continuo teórico, corresponden a unos 20 a 25 años en el Noroeste y Centro de Argentina, de unos 10 a 11 años en el Norte y Centro de Chile, con influencia en el Norte de Patagonia, de unos 9 años en la cuenca del Paraná y Brasil, en torno a los 6 años en la Cordillera Central y en la Cuenca del Uruguay, de unos 3,5 años en la misma región además de en la cuenca baja del Paraná y en algunos afloramientos de Brasil, y de 2,3 años en la Cordillera, el Centro de Argentina, el Uruguay y en la cuenca baja del Paraná.

4.3 Tipificación primaria sobre la base de la estructura espectral

La observación de la presencia de máximos espectrales permite agrupar las series de caudales en cinco tipos básicos, indicados en la primera columna de la Tabla 1. El primer tipo agrupa los ríos del centro de Chile y los de Cuyo y Noroeste de la Patagonia. Quizá los períodos que caracterizan en forma más pura el comportamiento espectral de esta región son el de 3,6 a 3,8 años, el de 6,5 a 7 años y el de 11 años.

El segundo tipo agrupa los ríos del sur de Chile y de la Patagonia argentina. No presentan una clara estructura espectral, excepto por la presencia de una onda de 2,3 a 2,4 años.

El tipo tres agrupa todos los caudales del Noroeste y Centro de la Argentina. Puede obtenerse como conclusión de carácter general la presencia de una onda dominante del orden de los 20 a 27 años. Esta onda posiblemente esté presente hasta la latitud del río Chubut hacia el sur y, hacia el norte, hasta el río Piura (Perú), Campos, Juazeiro y Capanema (Brasil) y en el río Paraguay.

La aplicación del método de clasificación por proximidad de vectores permite distinguir hasta nueve grupos, a su vez relacionados entre sí.

La observación de las agrupaciones por otros métodos, criterios y omisión de filtrados no alteran la esencia de las agrupaciones, pero ocultan algunas estructuras de asociación y conducen a clasificar en cuatro grupos principales.

Puede concluirse que la región de Cuyo y Centro de Chile y en parte el norte de Patagonia responden a un régimen climático de variabilidad análoga a la impuesta al río Uruguay y el Paraná. Este grupo es susceptible de subdividirse en dos subgrupos. El Noroeste, Centro de Brasil y quizá Perú responden a un régimen de precipitaciones claramente distinto en el que también participa gran parte de la región cordillerana. Las cuencas centrales de Argentina participan de un régimen de transición vinculado pero a la vez diferenciado de los precedentes.

5. CONCLUSIONES

Se ha fundamentado el carácter markoviano del espectro teórico en las series de caudales, determinado por la retención de agua por el suelo, predominantemente en cuencas con lento escurrimiento, configurando el caudal un filtro para la variabilidad de alta frecuencia e integrador climático de procesos de largo período.

Se identificaron los períodos relevantes, con respecto al continuo teórico, de 20 a 27 años, 9 años, 6 a 7 años, en torno a los 3,5 años y alrededor de 2,3 años.

Se clasificaron las series de caudales cualitativamente en cinco grupos y definieron las ondas que caracterizan a cada tipo.

Los períodos de 6 a 7 años, 3,5 años y 2,3 años, presentes en los tipos 1 y 5, sugieren una conexión climática entre Chile central y Cuyo, y la cuenca del Uruguay.

Los métodos objetivos de clasificación confirman esta conexión y permiten inferir una clasificación en cuatro grandes regiones.

6. AGRADECMIENTOS

Se agradece a la Dra. Susana Bischoff el aporte de series hidrológicas de Brasil y la discusión de aspectos relevantes durante diferentes etapas de la elaboración del trabajo. Nuestro agradecimiento al Dr. Patricio Aceituno por el aporte de series hidrológicas de Chile.

7. REFERENCIAS

ACEITUNO, P. (1988): "On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface Climate". *Monthly Weather Review*, Vol. 116, p. 505.

ACEITUNO, P. (1989): "On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-Air Circulation". *Journal of Climate*, Vol. 2, p. 341.

- CHU, P.S. y KATZ, R.W. (1989): "Spectral estimation from time series models with relevance to the Southern Oscillation". *Journal of Climate*, Vol. 2, p. 86.
- COMPAGNUCCI, R. y VARGAS, W.M. (1983): "Análisis espectral de las series de precipitación estival". *Meteorológica*, Vol. XIV, N° 1-2, p. 213.
- ENFIELD, D.B. y CID, S.L. (1991): "Low-frequency changes in El Niño-Southern Oscillation". *Journal of Climate*, Vol. 4, p. 1137.
- GARCÍA, N.O. y VARGAS, W.M. (1996): "The spatial variability of runoff and precipitation in the Río de la Plata basin". *Hidrological Sciences. Journal des Sciences Hydrologiques*, 41 (3).
- MINETTI, J. L. y CARLETTO, M. C. (1990): "Estructura espectral espacial de las precipitaciones en ambos lados de la Cordillera de los Andes en Chile y Argentina". *Revista de Geofísica*, Vol. 46, p. 65.
- ROPELEWSKI, C. y HALPERT, M. (1987): "Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño / Southern Oscillation". *Monthly Weather Review*, Vol. 115, p.1606.
- ROPELEWSKI, C. y HALPERT, M. (1989): "Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation". *Journal of Climate*, Vol. 2, p.268.
- TYSON, P.D. y DYER, T.G.J. (1980): "The likelihood of droughts in the eighties in South Africa". *S. African J. Sci.*, 76, p.340.
- VARGAS *et al.* (1999): "Las precipitaciones mensuales en zonas de la Argentina y el ENOS". *Meteorologica*, Vol 24, p.3
- VINES, R.G. (1986): "Rainfall Patterns in India. *Journal of Climatology*". Vol. 6, p.135.
- WMO (1971): "*Climate Change*". Tech. Note, 79, (Annex 1), 33, Geneva.