



Bulletin de l'Institut français d'études andines

ISSN: 0303-7495

secretariat@ifea.org.pe

Institut Français d'Études Andines

Organismo Internacional

Pérez, Carlos; Poveda, Germán; Mesa, Oscar; Carvajal, Luis F.; Ochoa, Andrés
Evidencias de cambio climático en Colombia: tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos
anual y semianual

Bulletin de l'Institut français d'études andines, vol. 27, núm. 3, 1998

Institut Français d'Études Andines

Lima, Organismo Internacional

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627318>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's homepage in redalyc.org

redalyc.org

Scientific Information System

Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal

Non-profit academic project, developed under the open access initiative

EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA: TENDENCIAS Y CAMBIOS DE FASE Y AMPLITUD DE LOS CICLOS ANUAL Y SEMIANUAL

*Carlos A. PÉREZ, Germán POVEDA, Oscar J. MESA, Luis. F. CARVAJAL,
Andrés OCHOA **

Resumen

Se implementan varias técnicas estadísticas de análisis para identificar señales de cambio climático en registros hidrológicos y climáticos de Colombia. Hay clara tendencia de calentamiento que se observa en las series de temperaturas mínimas y que concuerda con las series de temperaturas medias. Las series de punto de rocío y presión de vapor indican un aumento en la humedad atmosférica. Esta tendencia coincide con el calentamiento. Las series de precipitación no muestran señal clara de cambio climático. Las principales cuencas presentan tendencia decreciente en los caudales. Los resultados de Demodulación Compleja ratifican los resultados descritos anteriormente y permiten establecer corrimientos en las fases de los ciclos anual y semianual de diversas variables climáticas en Colombia. Estos resultados tienen implicaciones fundamentales para la disponibilidad del recurso hídrico y para el planeamiento y manejo de sistemas hidráulicos.

Palabras claves: *Cambio climático, Colombia, análisis de homogeneidad, Demodulación Compleja, hidroclimatología, ciclo anual, series de tiempo.*

ÉVIDENCES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN COLOMBIE : TENDANCES, CHANGEMENTS DE PHASE ET AMPLITUDE DES CYCLES ANNUELS ET SEMI-ANNUELS

Résumé

On a utilisé plusieurs techniques d'analyse pour mettre en évidence des changements climatiques en Colombie. On a montré une nette tendance au réchauffement des températures minimales et moyennes. Les chroniques de points de rosée et de pression de vapeur d'eau indiquent une augmentation de l'humidité de l'atmosphère qui va de pair avec un réchauffement. Par contre les séries de précipitations ne montrent pas de tendance bien définie.

* Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, A. A. 1027, Medellín, Colombia, e-mail: gpoveda@perseus.unalmed.edu.co

Les débits des principaux bassins ont tendance à diminuer, ce qui pourrait être relié aux variations de l'évapotranspiration. Une analyse par démodulation complexe confirme ces tendances dans plusieurs parties de la Colombie. Ces résultats pourraient être d'une grande utilité pour l'estimation des ressources hydriques, la planification et la gestion des systèmes hydrauliques.

Mots-clés : *Changement climatique, Colombie, test d'homogénéité, démodulation complexe, hydroclimatologie, cycle annuel, séries chronologiques.*

EVIDENCES OF CLIMATE CHANGE IN COLOMBIA: TRENDS AND PHASE AND AMPLITUDE CHANGES OF ANNUAL AND SEMI-ANNUAL CYCLES

Abstract

Several statistical techniques and tests are performed trying to detect signals of climatic change in hydroclimatic records of Colombia, including identifying possible changes in the mean and the variance of the records, as well as detection of trends and non-homogeneities of the records. Results confirm positive trends in minimum and mean temperature records throughout Colombia. Precipitation series exhibit no clear spatial signal. Most important rivers basins appear to exhibit decreasing trends in discharge. Deforestation and changes in evapotranspiration could account for the observed trends. Complex Demodulation (CD) is used to examine the evolution of amplitude and phase of climatic records. CD confirms shifts in phase and amplitude of annual and semi-annual cycles. These results have tremendous impact on water resources availability and their planning and operation.

Key words: *Climatic Change, Colombia, Homogeneity Analysis, Complex Demodulation, Hydro-climatology, Annual cycle, Semi-annual cycle, Time series.*

INTRODUCCIÓN

La temperatura promedio del planeta ha aumentado aproximadamente 0.6°C en los últimos 135 años; con el mayor calentamiento concentrado en los últimos 15 años (WMO, 1995). Hay evidencias serias sobre la relación de este calentamiento con el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (Thomson, 1995). Tanto en los escenarios de calentamiento dramático, como en los de un calentamiento moderado, el agua es uno de los factores principales. Esto incluye cambios en los regímenes de lluvias, evaporación y escorrentía. A nivel mundial hay evidencia contundente sobre tendencias crecientes en los caudales en Norteamérica y en la antigua Unión Soviética (Lins & Michael, 1994). Hay evidencia observacional de disminución de la evaporación en esas regiones (Peterson *et al.*, 1995). En Colombia hay reportes acerca del incremento de algunas variables atmosféricas (Hense *et al.*, 1988). Smith *et al.* (1996) no encuentran un aumento en las lluvias de la región Amazónica de Colombia, lo cual contrasta con los hallazgos de Chu *et al.* (1994) a través del análisis de OLR para la región. En este trabajo se efectúan una serie de pruebas estadísticas para tratar de detectar señales de cambio climático en registros hidrológicos de Colombia, en términos de cambios en la media, en la varianza y existencia de tendencias lineales en los registros. Por otra parte se examina el cambio en la fase y la amplitud de los ciclos anual y semianual de series de diversas variables climáticas.

1. ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD DE SERIES CLIMÁTICAS

Se emplean dos tipos de análisis para la detección de cambios y tendencias:

Análisis exploratorio: incluye los aspectos de análisis gráfico y cálculo de estadísticos básicos. Para el análisis gráfico de homogeneidad de las series se utilizaron los siguientes gráficos: Gráficos de series de tiempo, Gráficos de masa simple, Gráficos de doble masa, Gráficos de cuartiles o *box plots*, Gráficos S-S, Gráficos Q-Q, Gráficos suavizados.

Análisis confirmatorio: tiene el objetivo de confirmar estadísticamente la presencia o ausencia de ciertas propiedades en los datos.

En las pruebas estadísticas de homogeneidad se utilizaron pruebas de cambio y pruebas de tendencia. Se recurrió al Análisis Bayesiano para identificar posibles puntos de cambio. Para el estudio de homogeneidad en la media y la varianza se usaron pruebas paramétricas y no paramétricas, pruebas de cambio y de tendencia, y pruebas de independencia. Las pruebas utilizadas para detección de cambios en la media incluyen (Salas *et al.*, 1992): Prueba T Simple, Prueba T modificada, Prueba de Sumas Acumuladas, Análisis Bayesiano, Prueba de Homogeneidad de Abbe, Prueba de Wilcoxon Rank Sum o Mann-Whitney, Prueba de Friedmann, Análisis de Doble Masa, Prueba del Signo, Prueba de Kruskal-Wallis y Prueba de Pettit (Pettit, 1979).

Pruebas utilizadas para detección de tendencia en la media, aplicadas solamente a las series anuales: Prueba de Mann-Kendall, Prueba de tendencia lineal, Prueba de Hotelling-Pabst, Prueba Kendall estacional, Prueba de Sen, Prueba de homogeneidad estacional y Prueba de Kendall-Mann-Sneyers (Kendall & Stuart, 1979). Las pruebas utilizadas para detección de cambios en la varianza fueron (Salas *et al.*, 1992): Prueba F simple, Prueba F modificada, Prueba de Bartlett, Prueba de Levene, Prueba de Ansari-Bradley. La prueba de homoscedasticidad se utilizó para detección de tendencias en la varianza. Se utilizaron registros mensuales de diversas variables climáticas de Colombia incluyendo: precipitación, temperaturas mínima y media, tensión de vapor, evaporación y caudales de ríos. La calidad y cobertura de la información hidroclimática de Colombia es muy deficiente. Sólo se dispone de información en la zona andina y en algunas estaciones localizadas sobre las costas atlántica y pacífica, pero las zonas de la Orinoquia y la Amazonia no cuentan con registros confiables de larga duración. Las pruebas estadísticas mencionadas se aplicaron con un nivel de significancia de 0,05.

Sobre los resultados se destacan los siguientes puntos:

1. Los resultados obtenidos permiten concluir una clara tendencia de calentamiento que se observa en las series de temperaturas mínimas y medias. La causa del calentamiento está tanto en el efecto invernadero como en los procesos de urbanización y deforestación.
2. Las series de punto de rocío y presión de vapor indican un aumento en la humedad atmosférica. Esta tendencia coincide con el calentamiento.
3. Las observaciones de evaporación de tanque no permiten obtener conclusiones sobre tendencias generalizadas a todo el país. Sin embargo, hay consistencia en la relación inversa entre la humedad y la evaporación para las estaciones que tienen registro de ambas variables. Esto indicaría que hay una tendencia general hacia disminución de la evapotranspiración potencial.

4. Las series de precipitación no muestran señal clara de cambio climático.

5. Aunque la evidencia respecto a las tendencias en las series de caudales es mezclada, las principales cuencas del país presentan tendencia decreciente. Desde el punto de vista físico esto puede ser explicado por un aumento en la evaporación, lo cual no es claro en la evidencia sobre evaporación de tanque. La deforestación puede ser una posible causa de incremento de los caudales en algunas regiones particulares. Igual puede ser el efecto de los embalses. La figura 1 muestra la serie de caudales del río Magdalena en la estación Arrancaplumas.

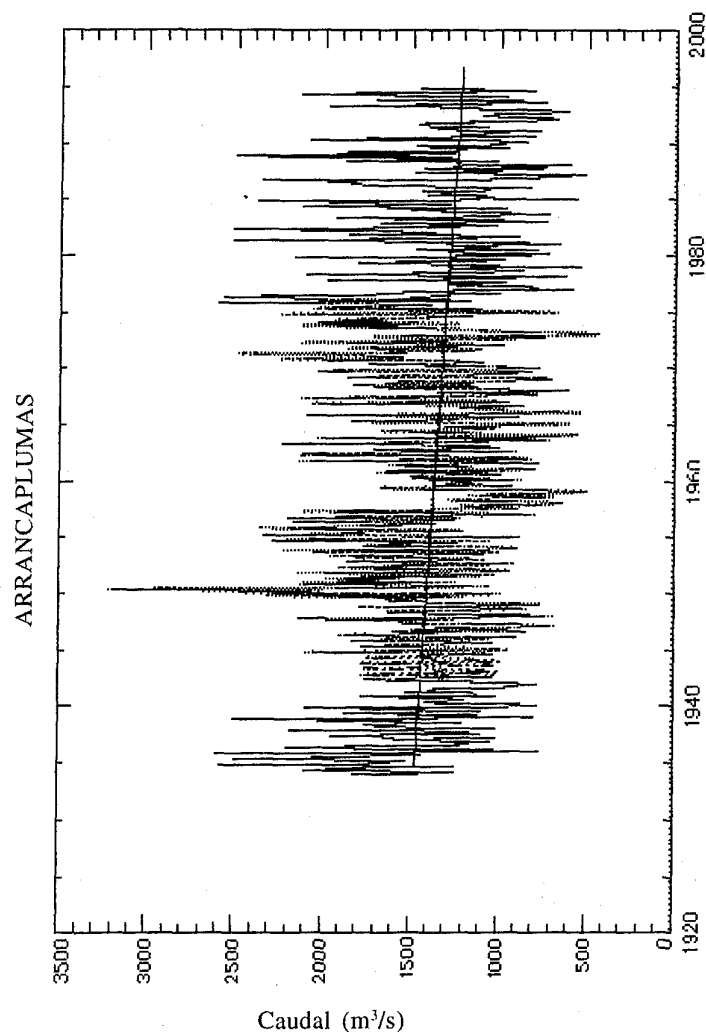


Fig. 1 - Serie de caudales promedios mensuales del río Magdalena en la estación Arrancaplumas. Nótese la leve tendencia decreciente.

6. Al aplicar la prueba de Punto de Cambio de Pettitt (1979) se identifica el período 1976-1977 como posible punto de cambio en la media. Este resultado podría ser consecuencia climática de los cambios abruptos que sufrió el clima del Océano Pacífico (Miller *et al.*, 1994), reflejado en cambios en el Índice de Oscilación del Sur (SOI) hacia valores más bajos, y en las temperaturas de la zona tropical hacia valores más altos. Sobre este punto debe refinarse la investigación.

2. DEMODULACIÓN COMPLEJA - EVOLUCIÓN DE LA FASE Y LA AMPLITUD DE LOS CICLOS ANUAL Y SEMIANUAL

En este numeral se trata de identificar cambios en la fase y en la amplitud de los ciclos anual y semianual, en las series hidrológicas y climatológicas de Colombia usando la metodología de Demodulación Compleja (DC; Thomson, 1995). La DC consiste en la transformada de Fourier de la serie de tiempo en convolución con un filtro matemático representado en una Secuencia Slepiana de orden cero (Percival & Walden, 1993). Dada una serie de tiempo $x(t)$, la demodulación compleja, $Y(t)$, se estima la amplitud y la fase mediante:

$$Y(t) = h(t) * [x(t) \exp(-i 2 \pi f t)],$$

donde f es la frecuencia en el origen, $\{h(t), t=0, \dots, N-1\}$ es el impulso respuesta a un filtro de pasa-baja frecuencia. Para este estudio, $h(t)$ se toma como una secuencia Slepiana de orden cero, $n_0(N, W)$, con el bloque de longitud N , que se ha definido como 5, 10, 15, y 22 años, con el ancho de banda W , definido en términos de $NW=1$. Las secuencias Slepianas minimizan los errores de estimación del espectro por enmascaramiento y el fenómeno de Gibbs. La Amplitud se obtiene como:

$$A(t) = 2|Y(t)|$$

la fase como,

$$\theta(t) = \arctan \left(\frac{\text{Im}[Y(t)]}{\text{Re}[Y(t)]} \right)$$

y el ciclo anual como,

$$2 \text{Re} [\exp(+i 2 \pi f t) Y(t)],$$

La metodología implica el cálculo de ajustadores ("tapers") ortogonales, en este caso una secuencia Slepiana de orden cero, mediante una matriz tridiagonal simétrica, aunque ésta presenta el problema de que los valores propios pueden ser muy cercanos aunque no sean menores que la unidad. En esta matriz (Percival & Walden, 1993) los elementos de la diagonal se estiman como $[(N-1-2t)/2]^2 \cos(2\pi W)$, $t=0, \dots, N-1$, y los elementos por fuera de la diagonal se estiman como $t(N-t)/2$, $t=1, \dots, N-1$. Generalmente W toma un valor correspondiente a un múltiplo entero pequeño (mayor que 1) de la frecuencia fundamental, de modo que $W=j/(N \Delta t)$, para $j=2, 3, \dots, 20$. Sin embargo, también pueden usarse múltiplos no enteros. El valor de W se determina indirectamente

como el producto entre la duración, N , y la mitad del ancho de banda $NW = j/(Dt)$ (o también $NW = j$, con Dt igual a la unidad).

Para la aplicación de la Demodulación Compleja se ha utilizado como filtro una secuencia Slepiana de orden cero con una longitud de 22 años, intentando estudiar las tendencias de más largo plazo en la fase y la amplitud. Se calcularon los diagramas de la evolución de las fases y la amplitud de los ciclos anual y semianual, y los correspondientes a la diferencia entre el ciclo semianual y el anual, para evaluar la contribución del ciclo anual a la señal del ciclo semianual.

La técnica de Demodulación Compleja fue aplicada a registros de temperatura mínima, temperatura media, tensión de vapor, precipitación y caudales medios mensuales. Con el propósito de evaluar la existencia de tendencias en la fase y la amplitud se ajustaron regresiones lineales tanto para el total del período, así como para la primera y segunda mitades del diagrama de evolución de fase y amplitud con el tiempo. Para cada uno de estos diagramas se obtiene la pendiente, el intercepto, el estadístico F calculado, el estadístico F crítico y el coeficiente de determinación del ajuste. En la figura 2 se presentan los diagramas de evolución de la fase y amplitud de los ciclos anual y semianual de la serie de temperatura mínima en Ospina Pérez. Allí se aprecia el cambio en casi 30 grados de arco (casi 30 días) en la fase del ciclo anual, así como el aumento en la amplitud del mismo. La fase del ciclo semianual ha sufrido cambios a través del tiempo; asimismo es clara la tendencia creciente en la amplitud del ciclo semianual y en la fase de la superposición de los dos ciclos. Es necesario aclarar sobre las unidades en las que se expresan las pendientes de la fase y la amplitud. La pendiente de la fase del ciclo anual está dada en grados de arco por año ($^{\circ}/\text{año}$). La pendiente de la fase del ciclo semianual también está dada en grados de arco por año ($^{\circ}/\text{año}$), aunque la interpretación es diferente en este caso, ya que 360° de arco corresponden a 180 días calendario. Las modificaciones correspondientes rigen para la pendiente del diagrama de la diferencia entre la fase del ciclo semianual y la fase del ciclo anual. Las dimensiones de la pendiente de las amplitudes de los ciclos anual, semianual y su diferencia corresponden todas a $\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$ para los caudales, y de manera análoga para las demás variables. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las diversas variables climáticas.

Los resultados principales obtenidos mediante Demodulación Compleja permiten establecer para las distintas variables las siguientes conclusiones:

Temperatura Mínima. La tendencia en la fase del ciclo anual coincide con la tendencia creciente en la serie de tiempo. La mayoría de las series muestra tendencia positiva en amplitud del ciclo anual, lo mismo que para la fase y la amplitud del ciclo semianual. Casi todas las estaciones con tendencia creciente en la fase del ciclo anual coinciden con las estaciones que presentan clara tendencia creciente en la serie de tiempo. Esta es una fuerte evidencia de la existencia de un cambio climático en Colombia, ilustrada con las series de temperatura mínima. Los resultados para la amplitud del ciclo anual también confirman la presencia de un cambio climático en Colombia. Las tendencias crecientes en temperatura mínima están asociadas a tendencias crecientes en la amplitud del ciclo anual.

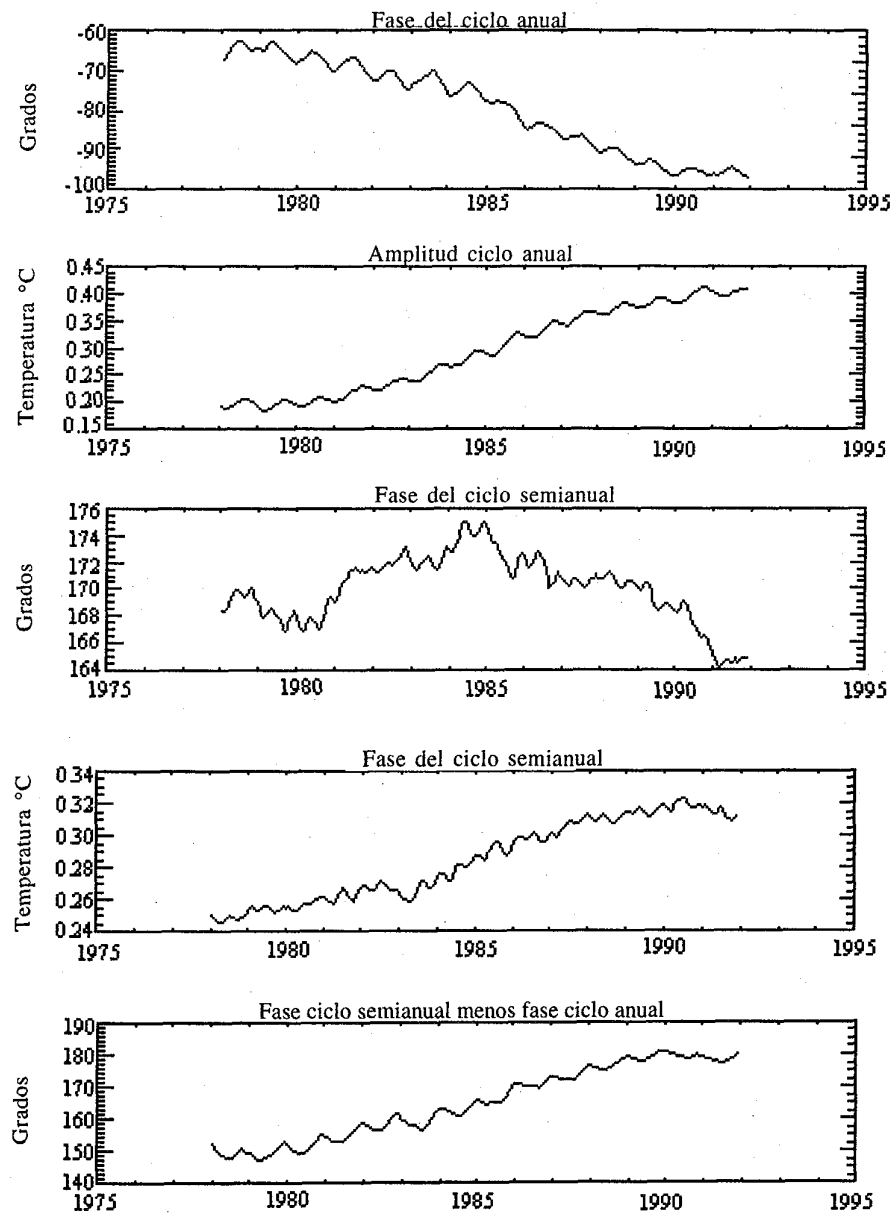


Fig. 2 - Diagramas de evolución de la fase y amplitud de los ciclos anual y semianual y superposición de los mismos, para las temperaturas mínimas en Ospina Pérez.

Tabla 1 - Número de series con tendencia creciente (↑) y decreciente (↓) en la fase y amplitud de los ciclos anual, semianual y en la fase de la superposición de ambos.

	CICLO ANUAL		CICLO SEMIANUAL		Fase ciclo semi-anual menos anual
	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	
Temperatura mínima	21 ↓ 15 ↑	27 ↓ 11 ↑	26 ↓ 10 ↑	26 ↓ 12 ↑	23 ↓
Temperatura Media	19 ↓ 15 ↑	Todas ↓	26 ↓ 10 ↑	33 ↓	19 ↓ 14 ↑
Punto de Rocío	12 ↓ 10 ↑	20/22 ↓	14 ↓ 8 ↑	19 ↓ 3 ↑	12 ↓ 9 ↑
Tensión de vapor	18 ↓ 8 ↑	22 ↓ 4 ↑	16 ↓ 10 ↑	20 ↓ 6 ↑	16 ↓ 10 ↑
Precipitación	77 ↓ 56 ↑	66 ↓ 67 ↑	169 ↓ 18 ↑	67 ↓ 62 ↑	75 ↓ 52 ↑
Caudales medios	8 ↓ 15 ↑	7 ↓ 16 ↑	20 ↓ 3 ↑	8 ↓ 15 ↑	5 ↓ 18 ↑

Precipitación. Hay mezcla entre tendencias positivas y negativas en la fase y la amplitud del ciclo anual. En casi todo Colombia hay tendencia creciente en la fase del ciclo semianual, pero no para la amplitud del ciclo semianual.

Temperatura Promedio. Clara evidencia de cambios climáticos.

Tensión de Vapor. En general, los resultados del análisis de la fase de los ciclos anual y semianual son consistentes con los resultados obtenidos en el análisis de homogeneidad. Los resultados de Amplitud del ciclo anual también confirman las evidencias del cambio climático en el país.

Caudales Promedios Mensuales. Los registros de los ríos Magdalena y Cauca muestran una disminución en la amplitud del ciclo anual, lo cual concuerda con las tendencias decrecientes identificadas en las series de tiempo correspondientes. Los resultados de la Demodulación Compleja apuntan a demostrar un decrecimiento de la amplitud del ciclo anual y un aumento de la fase del mismo (por ejemplo, el veranillo de junio-julio presentándose en la actualidad más temprano en el año). Estos resultados demuestran la fuerte asociación entre las tendencias de largo plazo y los comportamientos intraanuales. Nótese que una tendencia creciente en la amplitud del ciclo anual sugiere que los extremos hidrológicos se están intensificando con el tiempo, es decir que los períodos secos se han vuelto más secos y los períodos húmedos se han vuelto más húmedos. Esta puede ser una consecuencia hidrológica de la deforestación y una evidencia muy fuerte del cambio climático. Dada la generalidad y la consistencia del

signo de este cambio en la fase del ciclo semianual, estamos frente a un fenómeno casi generalizado en Colombia. De nuevo se observa que la fase del ciclo semianual está aumentando en las estaciones de los ríos Cauca y Magdalena. Las estaciones que presentan tendencia decreciente son casi las mismas de la fase del ciclo anual. Casi la totalidad de las series que presentan tendencia creciente en la fase del ciclo semianual coinciden con aquellas que presentan tendencia creciente en la serie de tiempo. Este resultado también confirma la presencia de cambio climático en Colombia: tendencias crecientes en temperatura mínima están asociadas a tendencias en la fase del ciclo semianual.

3. CONCLUSIONES GENERALES

La calidad y cobertura de la información hidroclimática de Colombia deja mucho que desear. Sólo se dispone de información en la zona andina y las costas; media Colombia no tiene registros. Las variables climáticas son de muy regular calidad. Todas las conclusiones que se extraigan son dependientes de los datos y como tal deben considerarse con cuidado. Hay una clara tendencia de calentamiento, que se observa en las series de temperaturas mínimas y que concuerda con las series de temperaturas medias. La causa del calentamiento está tanto en el efecto invernadero como en los procesos de urbanización y deforestación. Las series de punto de rocío y presión de vapor indican un aumento en la humedad atmosférica. Esta tendencia coincide con el calentamiento. Las observaciones de evaporación de tanque no permiten sacar conclusiones sobre tendencias generalizadas a todo el país. Sin embargo, hay consistencia en la relación inversa entre la humedad y la evaporación para las estaciones que tienen registro de ambas variables. Esto indicaría que hay una tendencia general hacia disminución de la evapotranspiración potencial. Las series de precipitación no muestran señal clara de cambio climático. Aunque la evidencia respecto a las tendencias en las series de caudales es mezclada, las principales cuencas presentan tendencia decreciente. Desde el punto de vista físico esto puede ser explicado por un aumento en la evaporación, lo cual no es claro en la evidencia sobre evaporación de tanque. La deforestación puede ser una posible causa de incremento de los caudales en algunas regiones particulares. Igual puede ser el efecto de los embalses. Los resultados de Demodulación Compleja ratifican los resultados descritos anteriormente y permiten establecer corrimientos en las fases de los ciclos anual y semianual de diversas variables climáticas en Colombia. Estos resultados tienen implicaciones fundamentales para la disponibilidad del recurso hídrico y para el planeamiento y manejo de sistemas hidráulicos.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

Referencias citadas

- CHU, P.-S., YU, Z.-P. & HASTENRATH, S., 1994 - Detecting climatic change concurrent with deforestation in the Amazon basin: Which way has it gone? *Bull. Amer. Met. Soc.*, **75**: 579-583.
- HENSE, A., KRAHE, P. & FLOHN, H., 1988 - Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapor content in the tropics. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **38**: 215-227.
- KENDALL, M. & STUART, A., 1979 - *The advanced theory of Statistics. Vol. 2. Inference and relationship*; Ch. Griffin and Co. Ltd.
- LINS, W. & MICHAELS, P. J., 1994 - Increasing U. S. streamflow linked to greenhouse forcing, *EOS*, **75**, N° 25.
- MILLER, A. J., CAYAN, D. R., BARNETT, T. P., GRAHAM, N. E. & OBERHUBER, J. M., 1994 - The 1976-1977 climate shift of the Pacific Ocean, *Oceanography*, **7**, N° 1: 21-26.
- PERCIVAL, D. & WALDEN, A., 1993 - *Spectral Analysis for Physical Applications*, 583p.; Cambridge: Cambridge University Press.
- PETERSON, T. C., GOLUBEV, V. S. & GROISMAN, P. YA., 1995 - Pan evaporation in the United States and Former Soviet Union", Sometido a *Nature*.
- PETTTT, A. N., 1979 - A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statis.*, **28**: 126-135.
- SALAS, J. D., SMITH, R. A., TABIOS, G. & HEO, J., 1992 - *Statistical Computer Techniques in Hydrology and Water Resources*, 2 vol., 258p.; Fort Collins: Colorado State University.
- SMITH, R. A., POVEDA, G., MESA, O. J., PÉREZ, C. A. & RUÍZ, D., 1996 - En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia. in: *Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología*: 200-208; Bogotá: IDEAM.
- THOMSON, D. J., 1995 - The seasons, global temperature, and precession. *Science*, **268**: 59-68.
- WMO, 1995 - World Meteorological Organization, *WMO Statement on the Global Climate in 1994*, WMO Report No. 826, Geneva, 1995.