

Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia

Germán Poveda
Óscar J. Mesa

Universidad Nacional de Colombia

El Niño y La Niña constituyen las fases extremas del fenómeno oceanoatmosférico conocido como El Niño-Oscilación del Sur, ENSO. Ambas fases se encuentran asociadas a las anomalías hidrológicas que ocurren en el trópico sudamericano, entre otras regiones, básicamente en escalas de tiempo que van desde la mensual hasta la interanual. En general puede decirse que El Niño produce periodos secos más fuertes y prolongados, en cambio La Niña amplifica las lluvias y los caudales máximos. Se presenta un análisis cuantitativo de la influencia de ambas fases en los caudales de cincuenta ríos de Colombia en los que se cuenta con estaciones de medición. Se estimaron los histogramas de frecuencias, la media y la desviación típica de los caudales medios mensuales para los años de El Niño y La Niña, así como para el registro histórico completo. Para confirmar la fuerte influencia que ejercen los fenómenos oceanoatmosféricos que ocurren en el océano Pacífico sobre la hidrología de Colombia, se muestra un análisis de correlación con el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés) y con las temperaturas del mar de la cuenca indopacífica. Se muestran algunas ideas acerca de la predictibilidad del ENSO y de la hidrología de Colombia. El ciclo anual parece jugar un papel mucho mayor en la dinámica del ENSO, más allá de la pérdida de la capacidad de predicción en la primavera, ya que también, en apariencia, impone una alta capacidad de predicción en los meses del periodo diciembre-febrero.

Palabras clave: ENSO, Colombia, caudales, lluvias, anomalías hidrológicas, predicción.

Introducción

El proceso de toma de decisiones en planificación y operación de recursos hidráulicos se basa en la información histórica de las variables hidrológicas. El problema del cambio climático causado por el incremento en las emisiones de CO_2 y el efecto invernadero son hechos claramente demostrados (Thomson, 1995). A escalas continentales, el efecto de la deforestación y el cambio en el uso de la tierra pueden tener efectos climáticos de proporciones dramáticas, como lo sugieren los resultados de *Modelos de circulación general* para la cuenca amazónica (Shukla *et al.*, 1990; Elthair y Brass, 1993). Estos hechos imponen una mirada diferente de la información climatológica e hidrológica, dadas las incertidumbres que plantean y los escenarios que se deberán explorar.

Por otro lado, la consideración de la hidrología como

parte de los ciclos naturales, como el ENSO, que afectan a nuestro planeta y que operan en distintas escalas de tiempo, hacen que este problema se torne aún más delicado, a la vez que más interesante, tanto desde el punto de vista del estudio de la hidrología como ciencia, como de sus implicaciones prácticas.

El Niño es un calentamiento anómalo, tanto de las aguas superficiales del centro como del este del océano Pacífico tropical, que provoca una profundización de la termoclina oceánica y se encuentra asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del este y con el desplazamiento del centro de convección del oeste al centro del océano Pacífico tropical.

La Oscilación del Sur es una onda estacionaria en la masa atmosférica que produce un gradiente de presiones entre el oeste y el este del Pacífico ecuatorial. Generalmente, un centro de alta presión se localiza cerca de Tahití (18°S, 150°O) mientras que un centro

de baja presión se percibe en Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin (12°S, 131°E). Este gradiente de presión es comunmente representado por el SOI, definido como la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas de ambos sitios.

Las anomalías negativas del SOI están asociadas a los eventos cálidos sobre el océano Pacífico (El Niño) y las positivas con los eventos fríos (La Niña). El ENSO produce fuertes perturbaciones sobre la circulación atmosférica global, y sus efectos climáticos tienen grandes implicaciones socioeconómicas, entre otras:

- Sequías en África, en el trópico sudamericano y en Australia
- Inundaciones en California, el Perú, el Ecuador y en el sureste de América del Sur.

Diversas regiones experimentan efectos directos, mientras que otras son impactadas a través de teleconexiones atmosféricas (Horel y Wallace, 1981; van Loon y Madden, 1981; Glantz *et al.*, 1991).

El ENSO es un fenómeno cuasiperiódico con una recurrencia promedio cuatrianual que varía entre dos y siete años (Trenberth, 1991). La explicación de la importancia de estas anomalías climáticas radica en el hecho que durante el ENSO se perturba el transporte oceanoatmosférico de energía y el momento angular desde el ecuador a los polos. Las anomalías en la precipitación tienen mucho que ver en ello (Volland, 1988) y se convierten en un elemento activo de las perturbaciones climáticas.

Los efectos del ENSO sobre las variaciones del momento angular total de la Tierra, vía las anomalías en el momento angular atmosférico, son de tal magnitud que la longitud del día se alarga en el orden de 400 ms durante la fase cálida del ENSO, que se explica por razones de conservación del momento angular total de nuestro planeta (Dickey *et al.*, 1994).

La influencia del ENSO sobre la hidrología global se manifiesta en escalas de tiempo que van desde varios meses hasta décadas (Glantz *et al.*, 1991; Philander, 1990; Díaz y Markgraf, 1993) y es el resultado de las interacciones del sistema océano-tierra-atmósfera, y constituye la característica más dominante de las variaciones climáticas de corto plazo a nivel global (Díaz y Kiladis, 1992; Rasmusson y Carpenter, 1982; Trenberth, 1991; Ropelewsky y Halpert, 1987).

Las perturbaciones climáticas asociadas con el ENSO en América Latina son conocidas: México (Cavazos y Hastenrath, 1990), América Central y el Caribe (Rogers, 1988), Costa Rica (Waylen *et al.*, 1994), Panamá (Estoque *et al.*, 1985), Colombia (Poveda y Mesa, 1993; Poveda, 1994; Mesa *et al.*, 1994a), Venezuela

(Pulwarty *et al.*, 1992), el Ecuador (Gessler, 1995), el Perú (Waylen y Caviedes, 1986; Tapley y Waylen, 1990), en la cuenca Amazónica (Marengo, 1992; Marengo y Hastenrath, 1993; Richey *et al.*, 1989; Obregón y Nobre, 1990), Brasil (Kousky *et al.*, 1984; Rao y Hada, 1990; Hastenrath y Greischar, 1993; Kayano *et al.*, 1988; Chu, 1991), sureste de América del Sur (Menchoso y Pérez Iribaren, 1992), el trabajo comprehensivo sobre América del Sur de Aceituno (1988 y 1989). Ver también los trabajos de Kiladis y Díaz (1989), Hastenrath (1990), y Halpert y Ropelewsky (1992).

En general, las anomalías hidrológicas en el trópico sudamericano (Colombia, Venezuela, Guyana y la cuenca del Amazonas) son coherentes con las dos fases del ENSO. Con ciertas diferencias en el tiempo y en la amplitud, estas regiones exhiben anomalías negativas en lluvias y caudales durante El Niño, y lo contrario durante La Niña.

Durante El Niño se da un desplazamiento del centro de convección hacia el suroeste de su posición normal, dentro del Frente Intertropical de Convergencia, FIC, sobre el trópico Americano (Pulwarty y Díaz, 1993). Este desplazamiento es ocasionado por el calentamiento de la lengua fría de las aguas del océano Pacífico afuera de las costas del Ecuador y el Perú, y por los cambios en el contraste de las temperaturas entre la tierra y el mar. Esto favorece la ocurrencia de periodos secos en el norte de América del Sur y el Caribe, y causa lluvias extremas en el Ecuador y el Perú (Kousky *et al.*, 1984; Horel y Cornejo-Garrido, 1986; Waylen y Caviedes, 1986; Aceituno, 1988). Nos concentraremos en las anomalías hidrológicas de Colombia. Para ello, este trabajo se estructura de la siguiente forma:

- Se cuantifican los efectos de la ocurrencia de las dos fases del ENSO sobre los caudales medios mensuales de los ríos en Colombia. Se estiman los histogramas de frecuencias y los dos primeros momentos correspondientes a los años de las dos fases del ENSO y se comparan a la luz de los registros indiscriminados
- Se presentan mapas de isocorrelación entre las temperaturas de los océanos Índico y Pacífico y los caudales medios de ríos en diferentes regiones de Colombia, con el objeto de identificar las zonas del océano Pacífico que presentan las mayores correlaciones
- Se investigan las correlaciones cruzadas entre el SOI y los caudales medios
- Se examina el tema de la predictibilidad de El Niño y se discuten algunas implicaciones para la predicción de caudales.

Histogramas de frecuencias y estimación de parámetros en años de El Niño y La Niña

La planificación y manejo de recursos hidráulicos debe considerar la predicción y la ocurrencia de eventos como el ENSO. Así, las decisiones sobre operación de embalses que se adopten en los meses y los años para los que se tengan predicciones o se esté presentando El Niño, deberán ser diferentes de aquellas para los meses normales, para los años de La Niña, o para ambos periodos. Aquí es necesario hacer una salvedad: la señal del ENSO y las variables hidrológicas en Colombia (como en todas partes) no presentan una relación de uno a uno. Varios factores las producen: la intensidad, la amplitud y la duración de las fases del ENSO varían de evento a evento, además otros fenómenos influyen para modular la hidrología, a través de interacciones no lineales con el ENSO así como de las interacciones no lineales y de retroalimentación entre los fenómenos geofísicos que se suceden en diferentes escalas de tiempo y la componente aleatoria de los mismos. Sin embargo, la modulación de la hidrología colombiana por parte del ENSO es clara, más aún si se examinan con rigor los procesos físicos que causan las anomalías climáticas (Poveda y Mesa, 1995a, b).

Para cuantificar el tipo de impacto que El Niño y La Niña tienen sobre los caudales en Colombia, se estimaron los histogramas de frecuencias, así como los dos primeros momentos de las distribuciones (media y desviación típica) para la totalidad de los registros y para los años de El Niño y La Niña. Para discriminar los años de El Niño y La Niña se usó la clasificación dada por Kiladis y Díaz (1989), para el siglo XX:

- Años de El Niño: 1902, 1904, 1911, 1913, 1918, 1923, 1925, 1930, 1932, 1939, 1951, 1953, 1957-1958, 1963, 1965, 1969, 1972, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987 y 1991-1992
- Años de La Niña: 1903, 1906, 1908, 1916, 1920, 1924, 1928, 1931, 1938, 1942, 1949, 1954, 1964, 1970-1971, 1973, 1975 y 1988

Los valores mensuales estandarizados del SOI para el periodo 1951-1995 se presentan en el cuadro 2. La estimación de los histogramas de frecuencias y de los parámetros estadísticos se realizó a partir de junio (año 0) y se terminó en mayo del siguiente año (año +1), tanto para los caudales como para los valores del SOI del cuadro 1. Esto se hizo por varias razones, entre ellas porque hay evidencias que indican que el fenómeno ENSO está en fase con el ciclo anual (Webster, 1995), tal como se confirma en este mismo trabajo en el capítulo *Acerca de las predicciones del evento*

ENSO y de los caudales. Su fase cálida (El Niño) parece tener cierta tendencia a comenzar a desarrollarse en la primavera del hemisferio norte y a tener su máximo durante el invierno de ese hemisferio (el nombre de El Niño se debe a los pescadores peruanos, que notaban que el calentamiento del océano Pacífico se daba por el tiempo de Navidad).

La influencia sobre Colombia tiene un máximo para rezagos entre tres y cuatro meses (Mesa *et al.*, 1994b). Por otra parte, mayo parece ser el menos afectado por ambas fases del ENSO, de acuerdo con las estimaciones (no se incluyen en este trabajo) que se efectuaron con el año hidrológico considerado de enero a diciembre.

En la ilustración 1 se muestran los resultados para el río Magdalena en la estación de Puerto Berrío (Antioquia). Puede observarse que la media para los años de La Niña es 1.5 veces mayor que aquella para los años de El Niño y la desviación típica también es mayor. En la ilustración 2(a) se presentan los caudales promedio mensuales totales (línea gruesa) y los correspondientes a los años de El Niño (triángulos) y a los años de La Niña (cuadrados). En la ilustración 2(b) se ven los valores para la desviación típica. Y en las ilustraciones 2(c) y 2(d) se aprecian las relaciones anomalía/caudal, en porcentaje, tanto para la media como para la desviación típica mensuales.

Las ilustraciones 3 y 4 corresponden al caso del río Riogrande (RG-8, Antioquia). Los gráficos hablan por sí solos. En general, las tendencias en otras regiones de Colombia son similares, aunque con algunas variaciones regionales.

En el cuadro 1 se dan los resultados de la estimación de la media y la desviación típica para los caudales medios mensuales de cincuenta ríos de Colombia, en los que se cuenta con estaciones de medición, para el total de la muestra de caudales mensuales, así como para los años de El Niño y La Niña. Estos mismos análisis de la media y la desviación típica también se efectuaron para el nivel mensual (no se publican en este trabajo). Los resultados para el total de la muestra se presentan con el fin de contrastar los resultados en tareas de manejo de recursos hídricos.

Influencia de las temperaturas del océano Pacífico en los caudales medios mensuales

Para ilustrar la influencia de las temperaturas del océano Pacífico sobre los caudales medios en Colombia se estimaron sus coeficientes de correlación. Los registros de temperatura de la superficie del mar de COADS (Slutz *et al.*, 1985) se promediaron sobre una

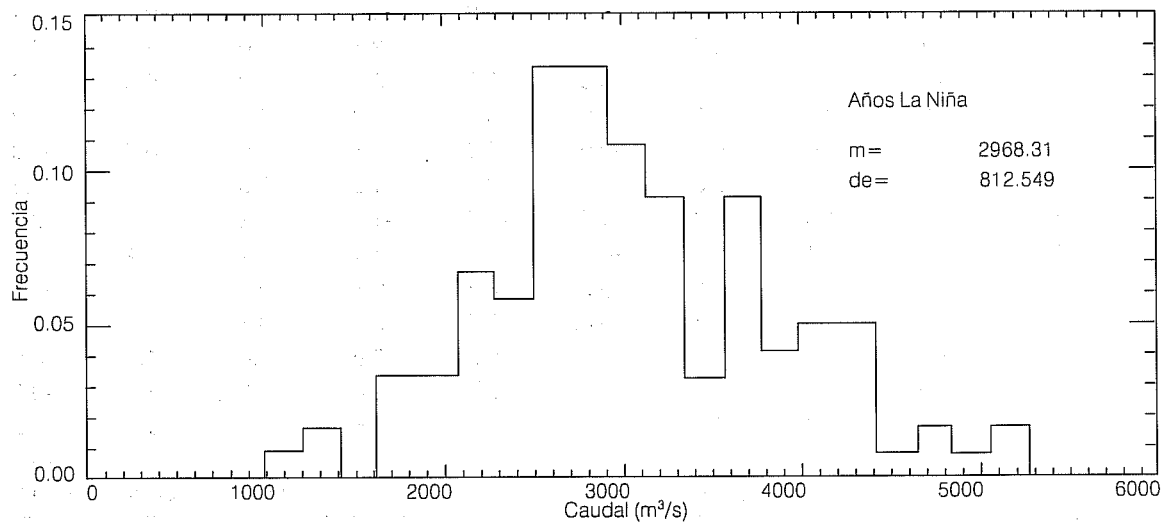
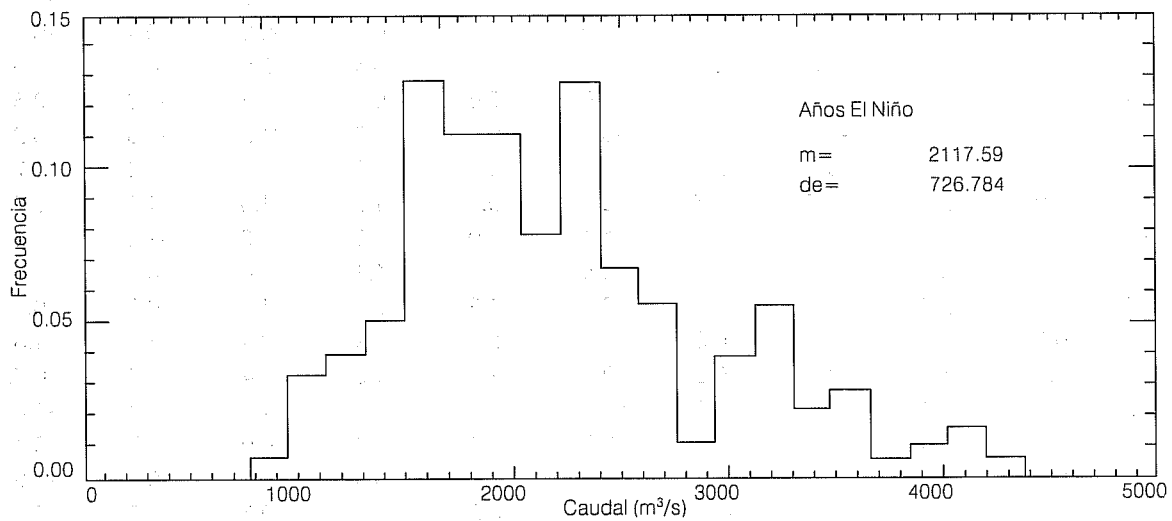
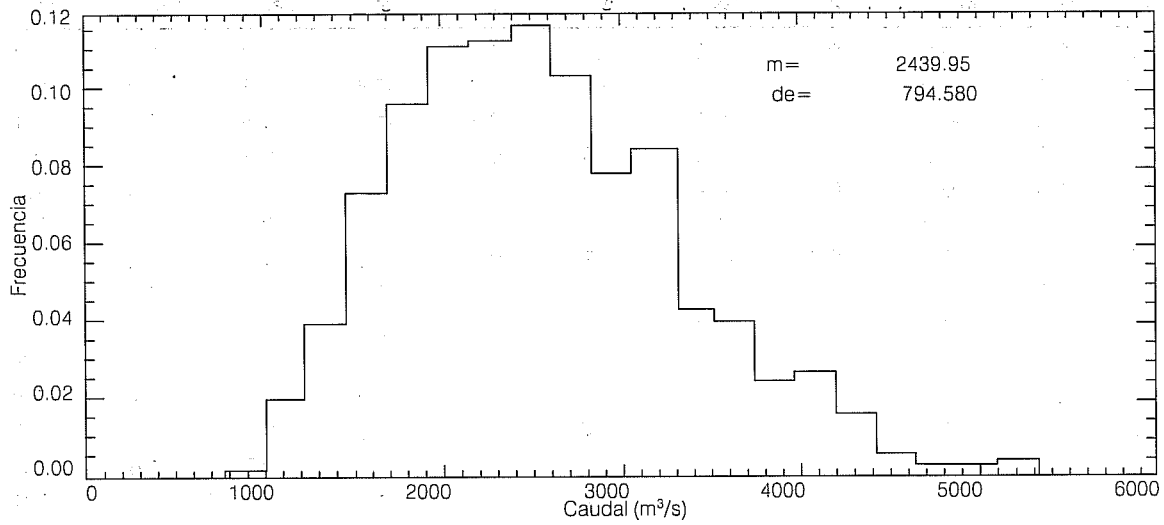
1. Media y desviación típica (m³/s) de los caudales medios mensuales en ríos de Colombia para el registro total y para los años de El Niño y La Niña. Los años hidrológicos se consideran de junio (0) a mayo (+1)

Río (Estación, departamento)	Registro total		Años El Niño		Años La Niña	
	Media	Desv. Tip.	Media	Desv. Tip.	Media	Desv. Tip.
Zona andina, occidente						
Nare (Santa Rita, Ant.)	46.5	19.7	37.3	16.0	62.1	21.1
Riogrande (RG-8, Ant.)	33.8	12.2	28.6	9.9	43.2	13.4
Guadalupe (Troneras, Ant.)	21.8	8.0	19.9	7.5	25.2	8.7
Sonsón (Sonsón, Ant.)	2.7	1.1	2.3	0.7	3.6	1.5
Tenche (TC-3, Ant.)	4.1	1.4	3.6	1.2	4.7	1.6
Nechí (La Esperanza, Ant.)	859.3	363.2	781.4	353.1	953.3	349.7
Chichiná (El Retiro, Cal.)	25.9	16.2	19.7	14.3	39.7	15.8
Otún (Bananera, Ris.)	12.1	5.1	10.7	4.2	16.0	5.6
La Vieja (Cartago, Val.)	91.6	55.8	69.4	41.3	135.8	74.2
Jamundí (Potrerito, Val.)	5.3	3.4	4.5	2.8	7.2	4.0
Cauca, (P. Valdivia, Ant.)	1209.8	480.4	967.6	399.2	1505.2	432.8
Cauca (La Pintada, Ant.)	744.1	386.5	564.5	282.2	1085.3	416.8
Cauca (Irrá, Cal)	672.0	343.6	515.0	263.9	988.6	371.4
Cauca (Anacaro, Val.)	414.1	211.2	319.9	164.6	593.6	232.1
Cauda (Juanchito, Val.)	277.3	140.1	222.9	107.5	374.0	173.3
Cauca (La Balsa, Cau.)	197.3	97.8	163.9	73.4	264.7	122.5
Cauca (Julumito, Cau.)	24.8	8.9	22.7	8.8	29.2	9.3
Piendamó (Carretero, Cau.)	8.2	4.1	7.3	3.5	9.8	4.3
Palo (Bocatoma, Cau.)	16.8	9.5	13.3	7.7	22.8	11.0
Micay (Angostura, Cau.)	280.4	126.1	229.2	111.8	343.4	120.1
Patía (Pusmeo, Nar.)	333.0	156.5	288.5	123.6	425.8	192.8
Blanco (Carlosama, Nar.)	3.8	2.5	3.4	2.0	4.7	2.2
Mayo (La Cañada, Nar.)	14.1	5.6	13.3	5.3	15.3	5.0
Zona andina, centro						
Saldaña (P. de Cobre, Tol.)	325.7	122.3	298.4	102.1	393.8	135.8
Prado (Boquerón, Tol.)	54.7	33.2	45.1	29.7	67.5	42.3
Luisa (Pavo Real, Tol.)	5.0	2.9	3.8	2.0	6.9	3.6
Magdalena (P. Santander, Hui.)	484.6	177.2	457.3	187.9	545.8	147.7
Magdalena (P/ficación, Tol.)	732.6	275.3	659.9	280.3	886.7	284.1
Magdalena (Arrancaplumas, Cun.)	1357.3	466.6	1168.0	428.3	1635.1	490.3
Magdalena (P. Berrío, Ant.)	2439.9	794.5	2117.0	726.7	2968.1	812.5
Zona andina, oriente						
Pampiona, (A. Claras, N. San.)	25.5	24.8	16.8	14.7	41.1	31.7
Sogamos (El Tablazo, San.)	447.9	248.9	392.1	242.4	552.1	242.9
Lebrija (Café Madrid, San.)	19.2	10.2	16.5	7.6	25.7	13.7
Sumapaz (El Profundo, Cun.)	19.7	13.2	15.6	11.3	25.7	12.1
Negro (Colorados, Cun.)	86.7	74.4	69.7	53.2	129.3	96.1
Chivor (Ubalá, Cun.)	3.8	3.2	3.8	3.5	4.3	3.4
Guavio (Chusneque, Cun.)	29.0	21.0	29.1	23.0	34.1	20.3
Lengupá (San Agustín, Boy.)	124.6	78.4	125.9	83.0	111.7	68.2
Costa del Caribe						
Ranchería (El Cercado, Gua.)	9.3	7.7	8.2	6.2	9.8	9.1
Garupal (Cantaclaro, Ces.)	1.8	2.2	1.3	1.4	1.9	1.9
César (P. Salguero, Ces.)	34.8	38.6	31.9	38.4	41.3	41.9
Ariguaní (La Aurora, Mag.)	16.6	7.9	15.8	7.1	18.8	10.3
Sinú (Urrá, Cor.)	348.4	169.3	312.5	165.3	379.9	168.0

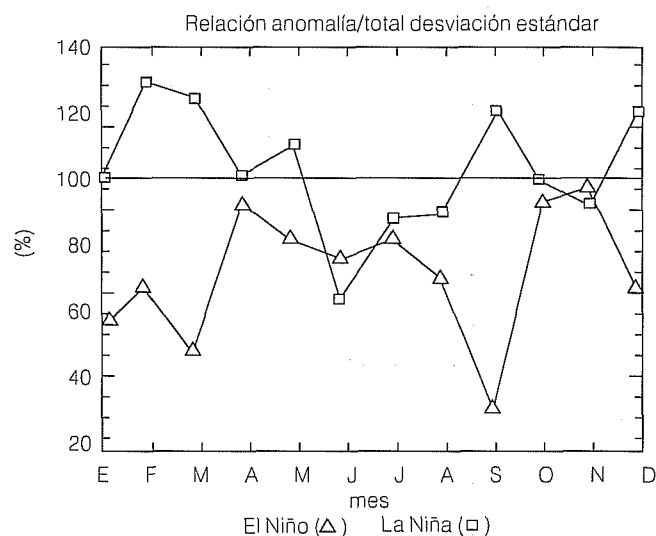
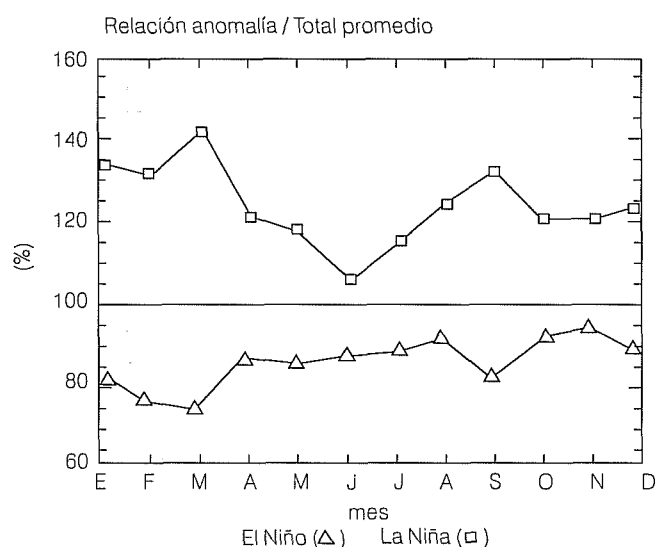
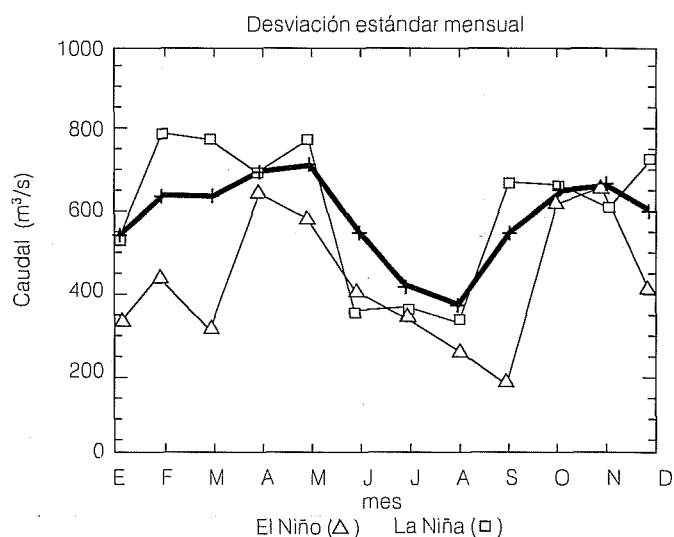
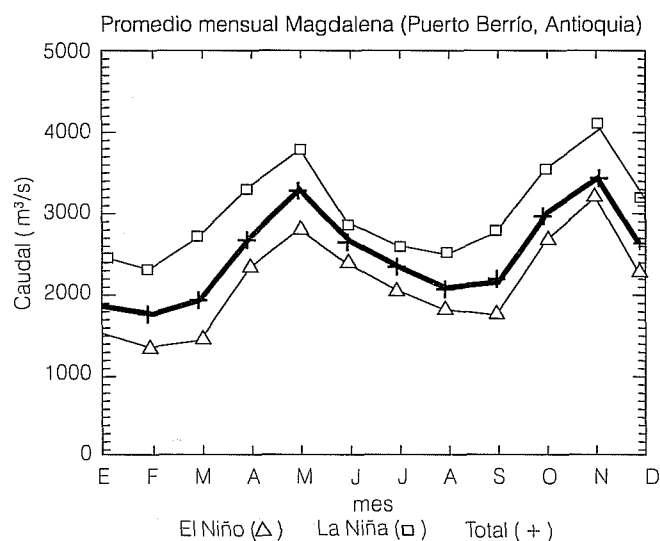
2. Valores mensuales del Índice de Oscilación del Sur, definido como la diferencia entre los registros estandarizados de las presiones atmosféricas a nivel del mar en Tahití y Darwin

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1951	1.7	0.6	-0.8	-0.6	-1.0	-0.3	-1.4	-0.7	-1.3	-1.4	-1.0	-1.0
1952	-1.2	-1.1	0.0	-0.5	0.6	0.5	0.4	-0.4	-0.3	0.2	-0.2	-1.6
1953	0.2	-1.0	-0.8	-0.1	-2.2	-0.3	-0.1	-1.9	-1.5	-0.2	-0.4	-0.7
1954	0.6	-0.7	-0.3	0.4	0.3	-0.3	0.3	0.8	0.2	0.1	0.1	1.5
1955	-0.7	1.8	0.1	-0.5	0.9	1.1	1.7	1.2	1.5	1.5	1.3	1.0
1956	1.4	1.5	0.9	0.7	1.3	0.8	1.1	0.9	0.0	1.9	0.1	1.0
1957	0.6	-0.5	-0.4	0.0	-1.0	-0.2	0.1	-1.0	-1.1	-0.2	-1.2	-0.5
1958	-2.3	-1.0	-0.3	0.1	-0.9	-0.2	0.3	0.6	-0.4	-0.2	-0.6	-0.9
1959	-1.2	-2.0	0.9	0.2	0.3	-0.6	-0.5	-0.6	0.0	0.3	1.0	0.8
1960	0.0	-0.3	0.6	0.6	0.3	-0.3	0.4	0.5	0.7	-0.1	0.5	0.8
1961	-0.4	0.7	-2.7	0.7	0.1	-0.3	0.1	-0.2	0.1	-0.7	0.6	1.6
1962	2.2	-0.7	-0.4	0.0	1.0	0.4	-0.1	0.3	0.5	0.9	0.3	0.0
1963	1.1	0.4	0.7	0.6	0.1	-1.0	-0.3	-0.5	-0.7	-1.6	-1.0	-1.6
1964	-0.5	-0.3	0.7	1.0	-0.1	0.4	0.4	1.3	1.4	1.3	0.0	-0.5
1965	-0.6	0.1	0.2	-0.8	-0.1	-1.0	-2.2	-1.2	-1.5	-1.2	-1.8	0.0
1966	-1.7	-0.7	-1.7	-0.5	-0.7	0.0	-0.1	0.3	-0.3	-0.4	-0.1	-0.6
1967	1.9	1.6	0.8	-0.3	-0.3	0.3	0.0	0.5	0.6	-0.2	-0.6	-0.8
1968	0.4	1.1	-0.5	-0.2	1.1	0.9	0.6	-0.1	-0.3	-0.3	-0.5	0.0
1969	-2.0	-1.1	-0.1	-0.6	-0.6	-0.2	-0.7	-0.6	-1.2	-1.3	-0.2	0.3
1970	-1.4	-1.6	0.0	-0.4	0.1	0.7	-0.6	0.2	1.3	0.9	1.7	2.1
1971	0.3	1.9	2.1	1.7	0.7	0.1	0.1	1.3	1.6	1.7	0.5	0.0
1972	0.4	0.8	0.1	-0.4	-2.1	-1.1	-1.9	-1.0	-1.6	-1.2	-0.5	-1.6
1973	-0.5	-2.0	0.2	-0.2	0.2	0.8	0.5	1.1	1.4	0.6	2.9	2.0
1974	2.7	2.0	2.2	0.8	0.9	0.1	1.2	0.5	1.3	0.8	-0.3	0.0
1975	-0.8	0.6	1.2	1.1	0.5	1.1	2.1	1.9	2.4	1.7	1.3	2.3
1976	1.5	1.6	1.3	0.1	0.2	-0.1	-1.2	-1.3	-1.4	0.2	0.7	-0.6
1977	-0.7	1.1	-1.3	-0.8	-0.9	-1.5	-1.5	-1.3	-1.0	-1.4	-1.6	-1.4
1978	-0.4	-3.5	-0.8	-0.6	1.3	0.3	0.4	0.0	0.0	-0.7	-0.1	-0.3
1979	-0.7	0.8	-0.5	-0.4	0.3	0.4	1.3	-0.6	0.1	-0.4	-0.6	-1.0
1980	0.3	0.0	-1.2	-1.0	-0.3	-0.4	-0.2	0.0	-0.6	-0.3	-0.5	-0.3
1981	0.2	-0.6	-2.1	-0.4	0.7	1.0	0.8	0.4	0.4	-0.7	0.1	0.5
1982	1.3	-0.1	0.1	-0.2	-0.7	-1.6	-1.9	-2.5	-2.0	-2.2	-3.2	-2.8
1983	-4.2	-4.6	-3.4	-1.3	0.5	-0.3	-0.8	-0.2	1.0	0.3	-0.2	-0.1
1984	0.1	0.6	-0.9	0.2	0.0	-0.8	0.0	0.0	0.1	-0.6	0.2	-0.4
1985	-0.5	1.0	0.2	1.0	0.2	-0.9	-0.3	0.7	0.0	-0.7	-0.3	0.1
1986	0.9	-1.6	0.0	0.1	-0.5	0.7	0.1	-1.0	-0.6	0.5	-1.5	-1.8
1987	-0.9	-1.9	-2.0	-1.9	-1.7	-1.7	-1.7	-1.5	-1.2	-0.7	-0.1	-0.7
1988	-0.2	-0.9	0.1	-0.1	0.8	-0.2	1.1	1.4	2.1	1.4	1.9	1.3
1989	1.7	1.1	0.6	1.6	1.2	0.5	0.8	-0.8	0.6	0.6	-0.4	-0.7
1990	-0.2	-2.4	-1.2	0.0	1.1	0.0	0.5	-0.6	-0.8	0.1	-0.7	-0.5
1991	0.6	-0.1	-1.4	-1.0	-1.5	-0.5	-0.2	-0.9	-1.8	-1.5	-0.8	-2.3
1992	-3.4	-1.4	-3.0	-1.4	0.0	-1.2	-0.8	0.0	0.0	-1.9	-0.9	-0.9
1993	-1.2	-1.3	-1.1	-1.6	-0.6	-1.4	-1.1	-1.5	-0.8	-1.5	-0.2	0.0
1994	-0.3	-0.1	-1.4	-1.8	-1.0	-0.9	-1.8	-1.8	-1.8	-1.6	-0.7	-1.6
1995	-0.6	-0.5	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9	-999.9

1. Histogramas de frecuencias de caudales medios mensuales para el río Magdalena en Puerto Berrío, Antioquia, para el registro total y para años de El Niño y La Niña (m: media, de: desviación típica)



2. (a) Ciclo anual de la media de los caudales mensuales del río Magdalena en Puerto Berrío, Antioquia, para el registro total (+), para los años de El Niño (Δ) y para los años de La Niña (\square). (b) Ciclo anual de la desviación típica. (c) y (d) Gráficos de las relaciones anomalía/caudal, en porcentaje, para la media y para la desviación típica, respectivamente

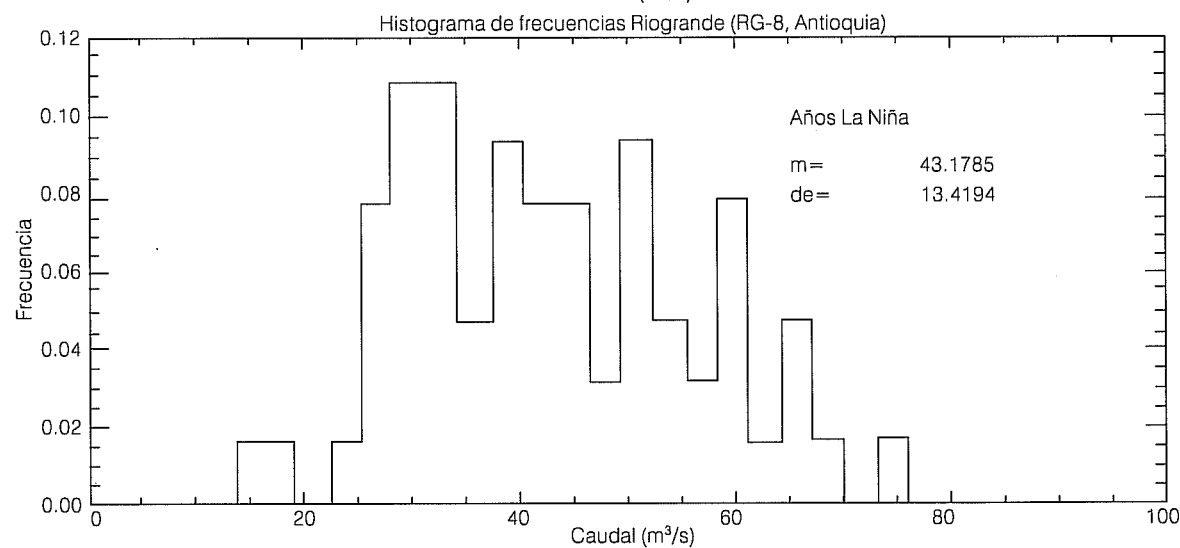
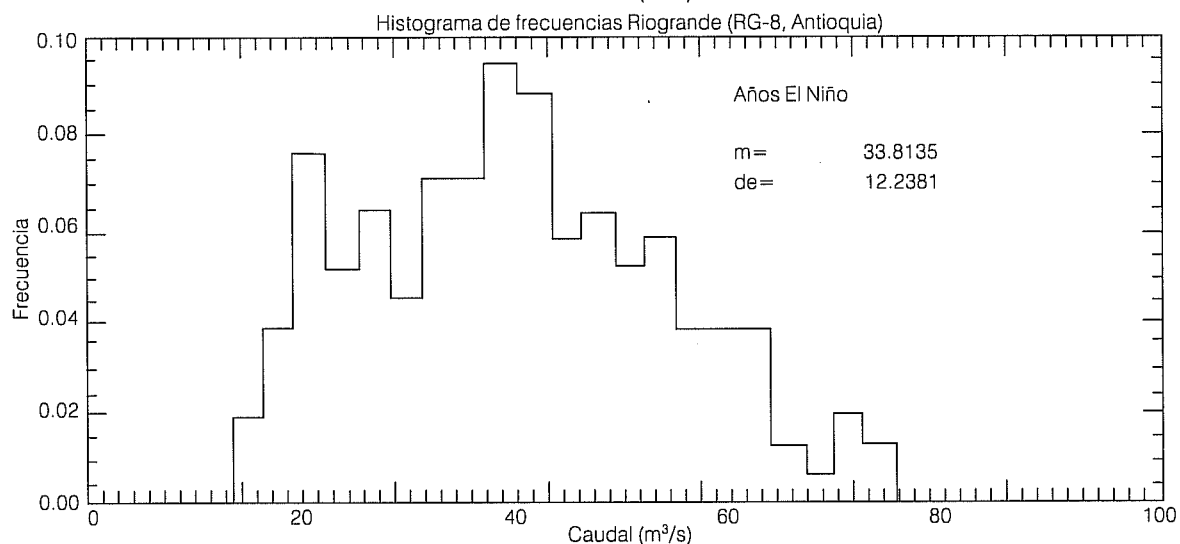
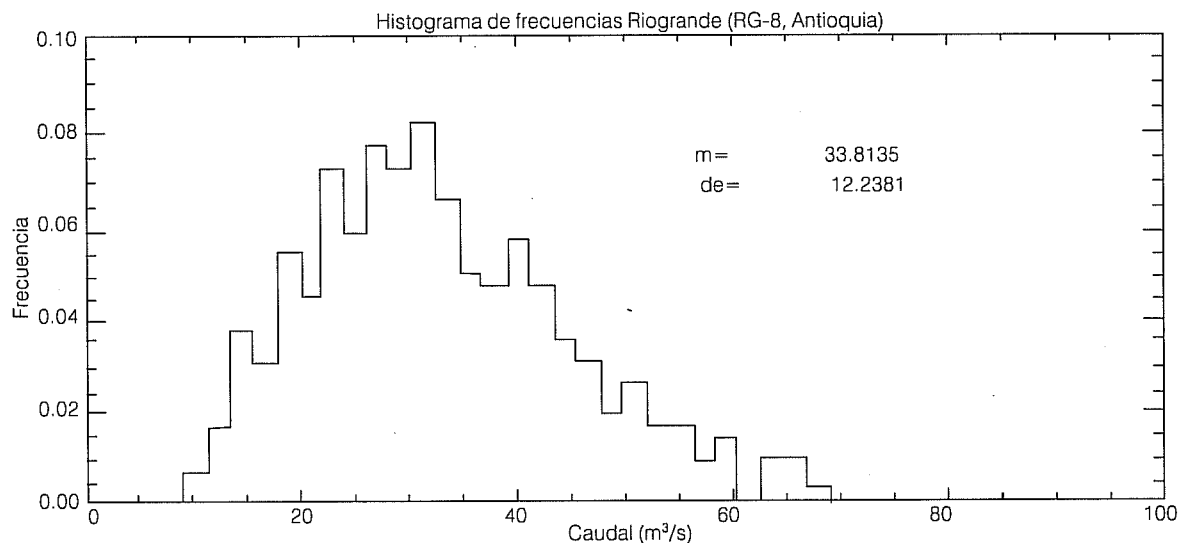


mallá de 4° (latitud) x10° (longitud) entre las latitudes 29°N-29°S y entre las longitudes 30°E-80°O, para un total de 342 sitios sobre el mar de la cuenca indopacífica, para el periodo 1959-1990.

Se estimaron los coeficientes de correlación de rezago cero entre tales series y las series de caudales mensuales de cincuenta ríos en Colombia, usando los promedios móviles de tres meses. La representación gráfica de los resultados se puede apreciar en los mapas de iso-correlaciones de la ilustración 5.

- 5 (a), para el río Magdalena en la estación de Puerto Berrío (Antioquia) localizada entre las cordilleras central y oriental en el centro de Colombia: correlaciones altas (negativas) con el promedio de las temperaturas del mar en las llamadas regiones Niño-3 (5°N-5°S, 150°O-90°O) y Niño-4 (5°N-5°S, 160°E-150°O) y en la región del monzón indoasiático
- 5 (b), las iso-correlaciones para el Riogrande en la estación RG-8 en Antioquia, localizada sobre la cordillera occidental

3. Correspondiente de ilustración 1 para el río Riogrande en la estación RG-8, Antioquia

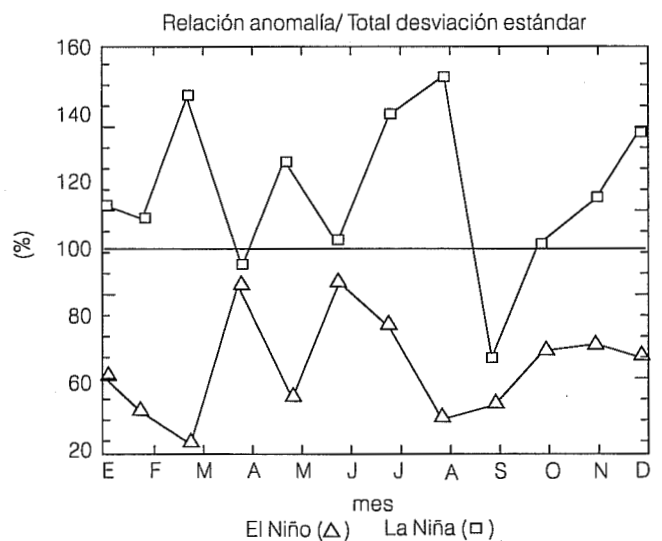
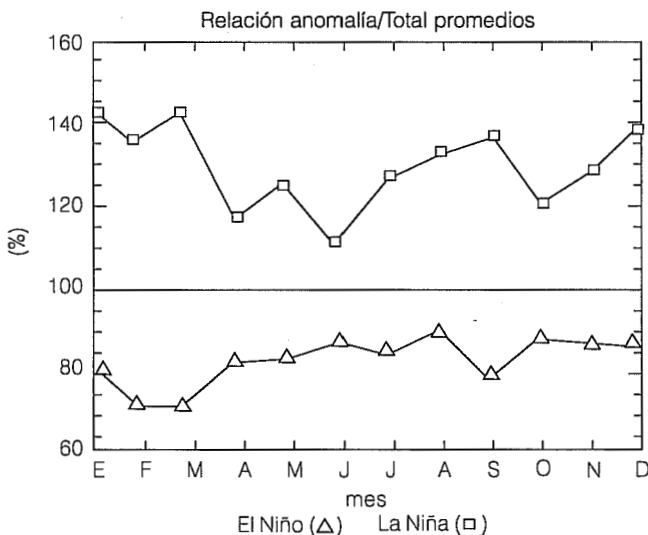
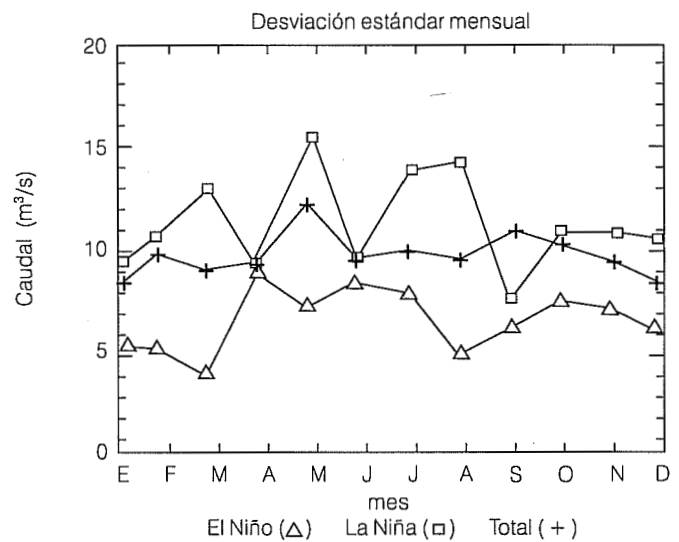
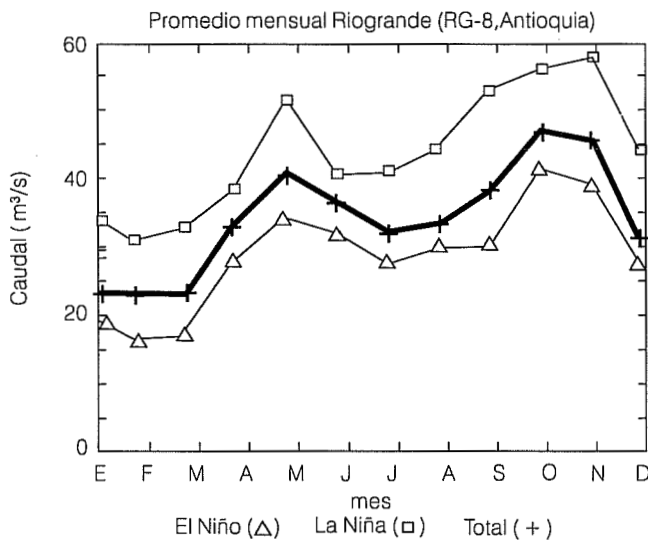


- 5 (c), para el río Lebrija (Café Madrid, Santander) en la zona norte de la cordillera oriental, las correlaciones son similares en signo pero más bajas que en los dos casos anteriores
 - 5 (d), para el río Ariguaní sobre la costa del mar Caribe, las correlaciones negativas son débiles en las regiones de Niño-3 y Niño-4, aunque las positivas en la zona de 130°E y 6°N no son despreciables
- En la costa caribeña de Colombia, la influencia de la llamada Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus

siglas en inglés) (Rogers, 1984) parece tener un efecto importante (Poveda y Mesa, 1995b). Todos estos resultados confirman que las regiones Niño-4 y Niño-3 exhiben las mayores correlaciones con las lluvias y los caudales en Colombia (Poveda *et al.*, 1994).

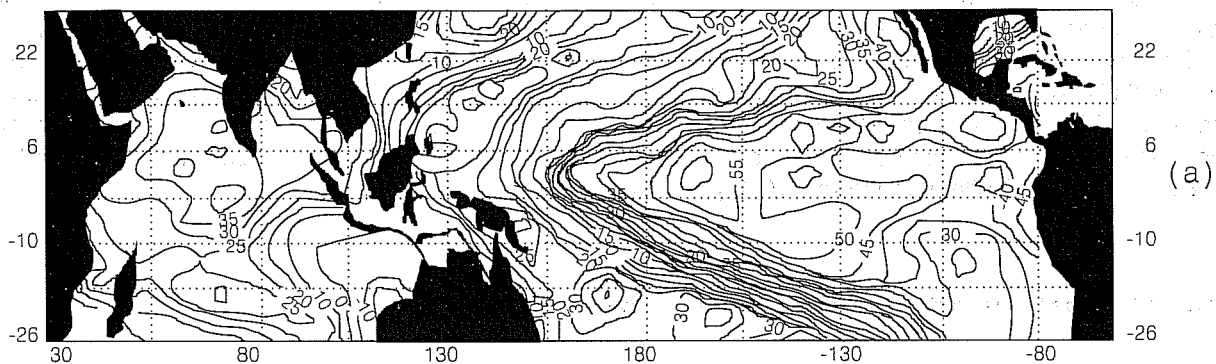
Otros resultados, no presentados aquí, muestran que el gradiente de las temperaturas del océano Pacífico entre las costas colombiana y peruana también es muy importante para explicar la situación hidrometeorológica de Colombia.

4. Correspondiente de la ilustración 2 para el río Riogrande en la estación RG-8, Antioquia

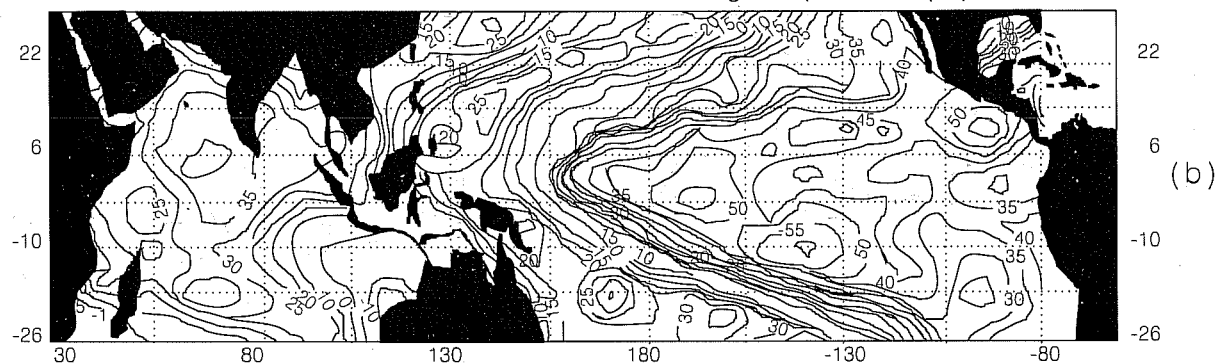


5. Iso-correlaciones (%) entre las temperaturas del mar en la cuenca indopacífica y los caudales medios de los ríos:
 (a) Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia), (b) Riogrande (RG-8 Antioquia), (c) Lebrija (Café Madrid, Santander), y (d) Ariguani (La Aurora, Magdalena)

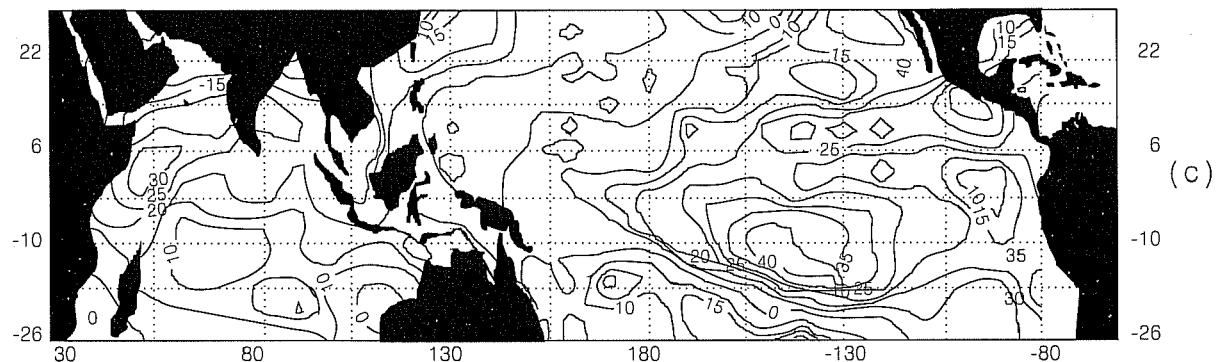
Coefficiente de correlación TSM vs caudales río Magdalena (Puerto Berrío, Antioquia)



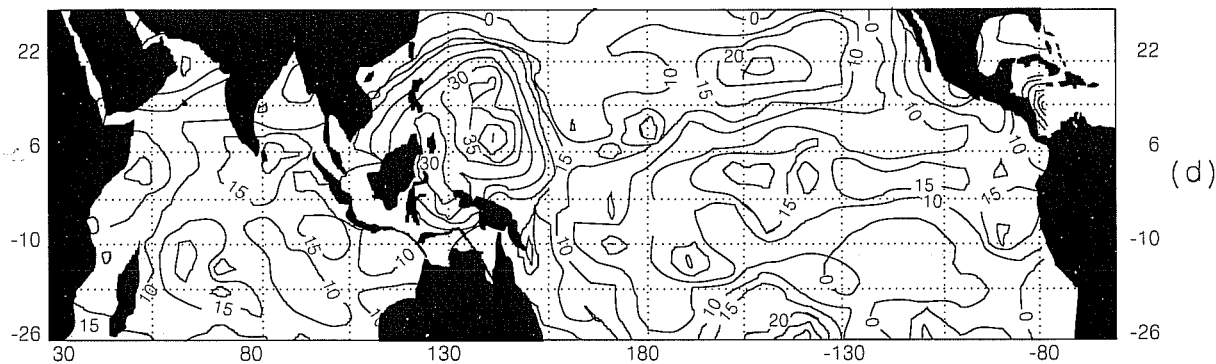
Coefficiente de correlación TSM vs caudales río Riogrande (RG-8, Antioquia)



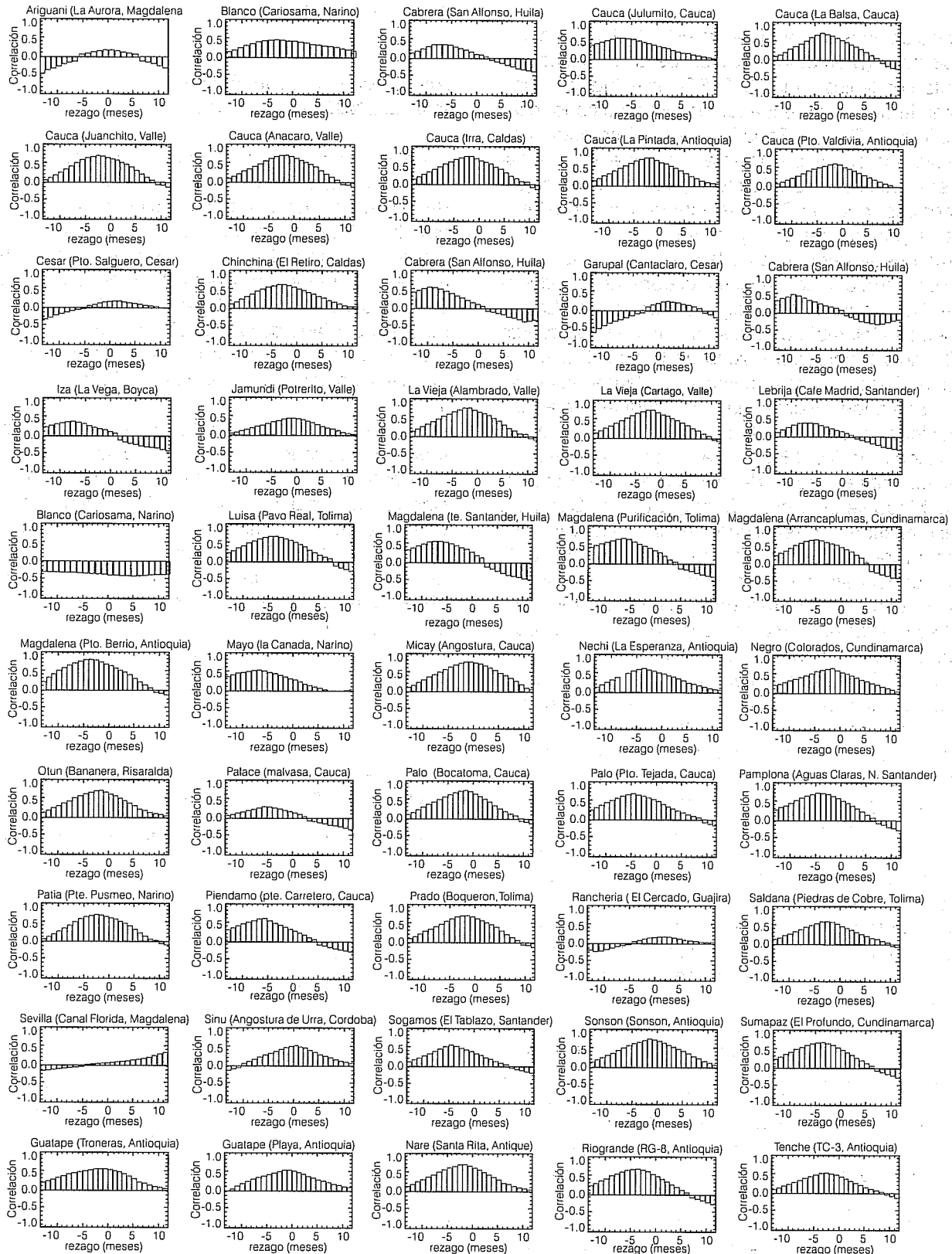
Coefficiente de correlación TSM vs caudales río Lebrija (Café Madrid, Santander)



Coefficiente de correlación TSM vs caudales río Ariguani (La Aurora)



6. Correlaciones cruzadas entre los caudales medios mensuales (promedios móviles de seis meses) y el SOI. Los valores negativos del rezago correspondiente al SOI adelante de los caudales



Correlaciones entre los caudales de Colombia y el SOI

Las correlaciones cruzadas entre el SOI y los caudales de Colombia (promedios móviles de seis meses) se presentan en la ilustración 6. El SOI es el índice definido como la diferencia entre las presiones estandarizadas de Tahití y Darwin. En la ilustración 6 se presentan los resultados de los coeficientes de correlación lineal para retrasos entre -12 y 12 meses. Los retrasos negativos corresponden al SOI adelante de los caudales y viceversa para los retrasos positivos.

Como puede deducirse de la ilustración 6, los valores de las correlaciones muestran claramente la influencia del SOI sobre la hidrología de Colombia. En las regiones de Colombia donde se siente con más fuerza tal influencia (occidente y zona andina de Colombia: Antioquia Chocó, la zona cafetalera, Cauca, valle del Cauca, Santander, Tolima, Nariño, Cundinamarca), las correlaciones crecen desde casi cero (en -12 meses) hasta valores de 0.5-0.6 en retrasos de -3 a 0 meses.

Los ríos sobre la costa de mar Caribe (departamentos de Magdalena, Cesar, Sucre, Guajira, Córdoba, Bolívar) muestran correlaciones mucho más bajas, ya que esta región parece estar más afectada por fenómenos oceanoatmosféricos que ocurren sobre el Atlántico, como en el caso de la NAO. La señal del ENSO se manifiesta como una onda que viaja del oeste al este sobre el océano Pacífico y sobre el norte de América del Sur, en atmósfera y en superficie. Así, la señal se manifiesta en Guyana con un retraso de alrededor de seis meses (Eagleson, 1994).

Todo lo que se ha discutido hasta ahora permitiría concluir que las anomalías en los fenómenos hidrológicos están supeditadas a aquellas de los fenómenos oceánicos y atmosféricos. Sin embargo, el sistema océano-tierra-atmósfera es un sistema acoplado en donde no es posible definir inequívocamente el principio y el fin en las cadenas de causalidad.

Los procesos que ocurren sobre tierra son fundamentales para determinar la evolución del clima: humedad del suelo, evaporación, calores sensible y latente, etc. (Delworth y Manabe, 1993; Koster y Suárez, 1995). En otro trabajo presentamos evidencias que sugieren que las anomalías en tales procesos hidrológicos en el norte de América del Sur pueden estar influyendo en las anomalías de las temperaturas del mar Caribe y del océano Atlántico tropical norte (Poveda y Mesa, 1995 a, b), lo que significa que están ejerciendo un papel fundamental como puente tierra-atmósfera para conectar las anomalías climáticas que ocurren en el Pacífico y el Atlántico. Allí se pone de manifiesto que la hidrología no es un espectador pasivo en la dinámi-

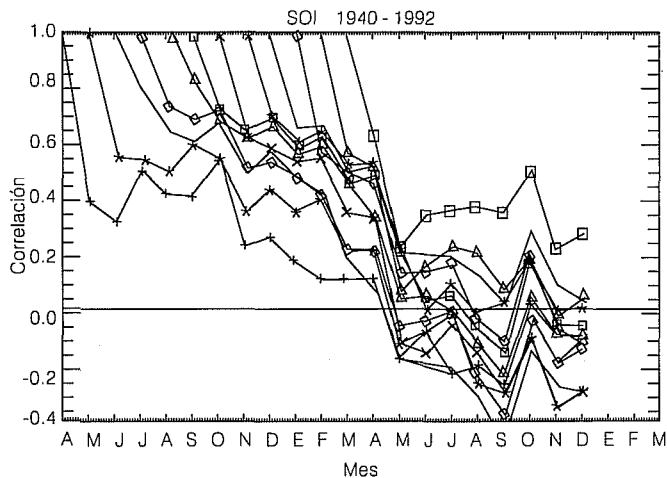
ca de los procesos climáticos de gran escala, sino que tiene un rol definitivo, más aún cuando nos referimos a los procesos hidrológicos en el trópico.

Acerca de las predicciones del evento ENSO y de los caudales

Cada vez es mayor el número y el tipo de metodologías que se reportan en la literatura para la predicción de los fenómenos oceanoatmosféricos asociados con el ENSO. Existen métodos dinámicos tales como el modelo acoplado híbrido de Barnett *et al.* (1993), el modelo acoplado del Centro Meteorológico Nacional de los Estados Unidos de América (Ji *et al.*, 1992), el modelo acoplado de Cane y Zebiak 1987), ver también Cane *et al.* (1986), y el modelo del la Oficina del Centro de Investigación Meteorológica de Australia (Kleeman, 1991).

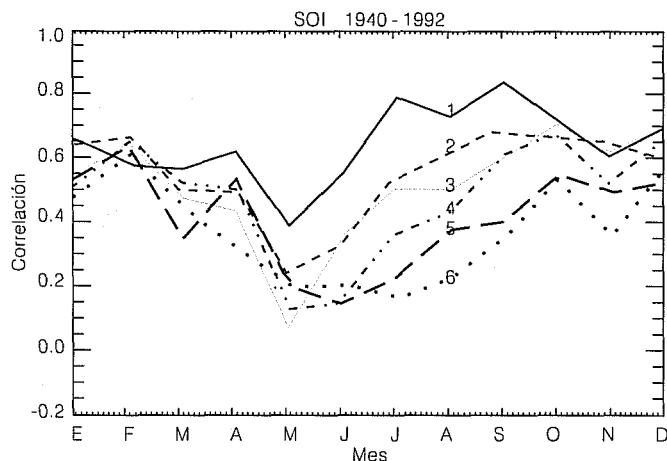
También se encuentran disponibles, entre otros, métodos estadísticos como el de modelación lineal inversa (Penland y Magorian, 1993), el de análisis espectral singular de Keppen y Ghil (1992), y el de correlación canónica de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos de América (NOAA, por sus siglas en inglés) (Barnston y Ropelewsky, 1992). Tales resultados se consignan en documentos de la NOAA, como el Boletín de Pronósticos y el Boletín de Diagnóstico del Clima, disponibles en *Mosaic* a través de Internet en la dirección: http://nic.fb4.noaa.gov/products/analysis_monitoring.

7. Coeficiente de correlación para el SOI entre los meses presentados en la abscisa y los meses que le siguen, para el periodo 1940-1992. Cada curva representa las correlaciones estimadas comenzando en los diferentes meses del año



8. Ciclo anual de los coeficientes de correlación mensual.

Se trata de las correlaciones entre los meses señalados en la abscisa y los meses precedentes. El rezago en meses se indica con el número sobre cada curva



Uno de los temas de mayor debate entre la comunidad predictiva del fenómeno ENSO es el de la llamada *barrera de predictibilidad*, que se refiere a una pérdida de la capacidad de predicción de los modelos (especialmente los denominados dinámicos) hacia la época de la primavera del hemisferio norte (marzo-mayo).

El análisis estadístico de la serie del SOI (Tahití-Darwin) presenta una caída en las correlaciones mensuales durante el mismo periodo del año (marzo-mayo), independientemente del mes en que se comienzan a estimar las correlaciones. Ver ilustración 7, en la que se presentan las correlaciones adelantadas del SOI donde las diferentes curvas reflejan los valores del coeficiente de correlación entre los meses que se muestran sobre la abscisa y los meses que le siguen, comenzando en los diferentes meses del año. El periodo de análisis es 1940-1992 y la estimación de los coeficientes de correlación se realizó sin remover el ciclo anual.

En la ilustración 7 también se puede observar que, independientemente del mes en que se comienzan las correlaciones rezagadas, se presenta una rápida caída en los meses de la primavera del hemisferio Norte. Este comportamiento sugiere la dificultad para predecir el comportamiento del SOI en los meses de la primavera, lo que a su vez parece indicar que el ciclo anual ejerce una influencia muy grande en la dinámica del ENSO. Véase una interesante discusión acerca de este punto en el trabajo de Webster (1995).

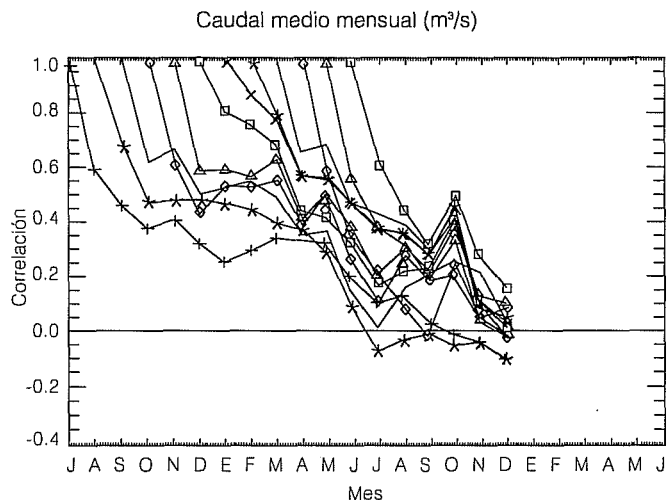
Aunque las ilustraciones 7 y 8 contienen básicamente la misma información, la presentación diferente de la segunda permite apreciar algo que no es obvio

en la primera: muestra el ciclo anual del coeficiente de correlación de retraso (hacia atrás) indicado por los números sobre las seis curvas. Allí se observa de nuevo que el coeficiente de correlación, entre los meses de la primavera y los meses precedentes, disminuye drásticamente para todos los retrasos, además se aprecia que para los meses del periodo diciembre-febrero, las correlaciones permanecen restringidas dentro de un intervalo estrecho de valores altos, independientemente del retraso con el que se quieran predecir tales meses. En el verano se presenta una alta dispersión en los coeficientes de correlación, para los diferentes retrasos. Estos resultados confirman la importancia del ciclo anual en la dinámica de El Niño-Oscilación del Sur.

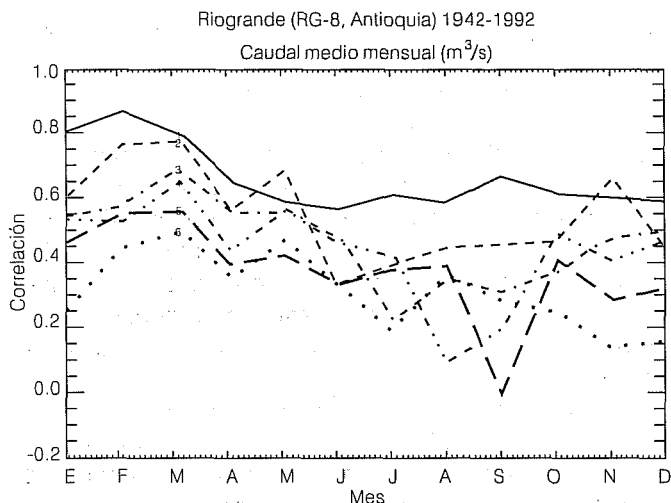
Cabe entonces preguntarse si las variables hidrológicas influenciadas fuertemente por el ENSO (lluvias y caudales) heredan esta misma pérdida de capacidad predictiva de la primavera. Para responder a esta pregunta estudiamos el caso de los caudales medios mensuales en los ríos de Colombia. Presentamos los resultados para los ríos Riogrande en la estación RG-8 (Antioquia) y para el Magdalena en Puerto Berrío.

Las ilustraciones 9 y 10 son correspondientes de las ilustraciones 7 y 8, respectivamente, para el caso del Riogrande, y las ilustraciones 11 y 12 lo son de las ilustraciones 7 y 8, para el caso del río Magdalena en Puerto Berrío (Antioquia). En la ilustraciones 9 y 11 se presentan las correlaciones comenzando en julio. Puede observarse que las correlaciones de los caudales decrecen más rápidamente en el periodo julio-noviembre, pero tienen más memoria en el periodo diciembre-febrero.

9. Correspondiente de la ilustración 7 para el río Riogrande (RG-8) Antioquia, y para el periodo 1942-1992



10. Correspondiente de la ilustración 8 para el río Riogrande (RG-8) Antioquia, y para el periodo 1942-1992



En los caudales no se presenta la caída en las correlaciones hacia el periodo marzo-mayo, pero se observa una reducción drástica para septiembre, si se estiman las correlaciones antes de julio, y aparece una recuperación en octubre. Aparentemente, la caída rápida en las correlaciones de los caudales se traslada al periodo julio-septiembre.

Los resultados de las ilustraciones 10 y 12 para el caso del Riogrande y el Magdalena sugieren la necesidad de considerar en mayor detalle las características del ciclo anual de las correlaciones rezagadas, para efectos de predicción. Estos rasgos deben reflejarse en la capacidad de predicción de los caudales en los diferentes meses del año.

El análisis de caudales sin remover el ciclo anual (como lo hemos comenzado a realizar aquí) debe arrojar luces acerca de la importancia del mismo ciclo anual en las anomalías hidrológicas asociadas a las fases extremas del ENSO. Estudiar únicamente las anomalías (desviaciones escaladas con respecto a la media) en sistemas y fenómenos no lineales, como son los de la interacción océano-tierra-atmósfera, puede conducir a resultados e interpretaciones erróneas.

La remoción del ciclo anual es una tarea delicada, y la estandarización común (restando la media y dividiendo entre la desviación típica mensual) produce resultados equivocados. Tal procedimiento deja de lado una definición precisa, delicada y fundamental del ciclo anual. Thomson (1995) realiza un cuidadoso análisis de este punto.

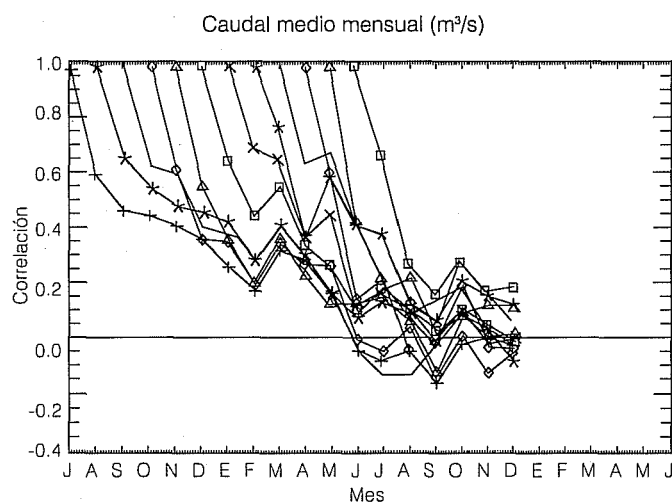
La predicción de las variables hidrológicas adquiere una nueva dimensión a la luz de la influencia que

ejercen los fenómenos oceanoatmosféricos, a escala global, que presentan ciclos largos (del orden de varios años), o que son aperiódicos pero recurrentes, plantean la necesidad de usar herramientas de predicción diferentes a las que se han empleado tradicionalmente en hidrología estocástica. La tarea de operación y manejo de embalses y de optimización de sistemas de recursos hidráulicos debe considerar tales efectos.

Todo el análisis de persistencia, *ciclicidades*, tendencias, tipo de memoria de los procesos hidrológicos; lo referente al llamado fenómeno de Hurst en series temporales (Mesa y Poveda, 1993) debe tener en cuenta fenómenos cíclicos en distintas escalas de tiempo, como por ejemplo, para citar sólo aquellos de interés en proyectos de ingeniería:

- Ciclo diurno, las oscilaciones de 4-5 días que se manifiestan en ondas del este sobre el océano Atlántico y el mar Caribe (Riehl y Malkus, 1958), las oscilaciones de 30-60 días en la atmósfera tropical (conocidas también como oscilaciones de Madden-Julian)
- Ciclo anual, la Oscilación Cuasi-Bienal, una señal coherente en toda la estratósfera tropical que también está presente en el ENSO (Barnett, 1991; Dickey *et al.*, 1994), y el ENSO mismo
- Ciclos de 11 años en el número de las manchas solares
- Ciclos del momento angular total de la Tierra asociados al acoplamiento de los movimientos del núcleo y el manto terrestres (Lambeck, 1980)

11. Correspondiente de la ilustración 8 para el río Magdalena, Puerto Berrío, Antioquia, y para el periodo 1936-1992



Las herramientas y métodos empleados actualmente en Colombia para predicción hidrológica en distintas escalas de tiempo, en las que se trata de incorporar el efecto del ENSO además de las características no lineales de los procesos hidrológicos, son las redes neuronales (Mesa *et al.*, 1994b), el análisis espectral singular (Carvajal *et al.*, 1994), las ecuaciones diferenciales estocásticas con potencial de doble pozo (Salazar *et al.*, 1994a), los procesos autoregresivos dependientes del régimen (Salazar *et al.*, 1994b), y la modelación lineal inversa (Poveda y Penland, 1994) entre otros. Los resultados muestran una mejora importante en la capacidad de predicción con respecto a métodos tradicionalmente usados en hidrología.

Conclusiones

Este trabajo presenta diversos análisis para cuantificar la dependencia de los caudales medios en Colombia con respecto al fenómeno ENSO y a las manifestaciones de sus fases extremas: El Niño y La Niña. El análisis de histogramas de frecuencias realizado a las series de caudales medios mensuales será de gran utilidad en las tareas de planificación y operación de sistemas de recursos hidráulicos.

Los demás análisis tratan de profundizar en el conocimiento de la influencia del ENSO sobre las características espaciotemporales de la hidrología de Colombia. El índice tradicional del SOI se convierte en una herramienta útil para la predicción, especialmente en los ríos de la región andina en Colombia.

Los mapas de iso-correlación entre las temperaturas del océano Pacífico y los caudales también permiten confirmar las zonas del océano Pacífico que tienen mayor influencia sobre la hidrología de Colombia. Finalmente, las características de predictibilidad del ENSO y de los caudales difieren, en términos de los coeficientes de correlación, ya que la barrera de predictibilidad no se presenta en el periodo marzo-mayo para los caudales, aunque podría pensarse que se desplaza para el periodo junio-septiembre.

El ciclo anual parece estar jugando un papel mucho mayor en la dinámica del ENSO, más allá de la conocida pérdida de la capacidad de predicción en la primavera, ya que también se presenta una alta capacidad de predicción en los meses del periodo diciembre-febrero, tal como se presenta en la ilustración 8.

Actualmente en Colombia estamos aplicando herramientas de predicción hidrológica, que involucran la dependencia hidrológica con respecto a los fenómenos oceanatmosféricos de gran escala, así como también tratando de incorporar las características no lineales inherentes a los fenómenos geofísicos.

Recibido: junio, 1995

Aprobado: julio, 1995

Reconocimientos

A COLCIENCIAS de Colombia. Parte de este trabajo se realizó en el Centro para el Estudio de la Tierra desde el Espacio, Instituto Cooperativo para la Investigación en Ciencias del Medio Ambiente (CSES, CIRES, respectivamente, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Colorado, Boulder, Colorado, Estados Unidos de América. Agradecemos la hospitalidad del personal de CSES/CIRES. Esta investigación se ha beneficiado de valiosas discusiones con los doctores Vijay K. Gupta, Cécile Penland, Peter Webster, Henry Diaz, Chester Ropelewsky, Kevin Trenberth, George Kiladis, Klaus Weickman, Victor Magaña, Ricardo Smith y José D. Pabón. C. Penland (CIRES) suministró los datos de temperaturas del océano Pacífico de COADS. K. Trenberth y D. Shea del Centro Nacional para Investigación Atmosférica (Boulder) proporcionaron los datos del SOI.

Referencias

- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Mon. Wea. Rev.* 116:505-524.
- Aceituno, P. 1989. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-air circulation. *J. Climate* 2:341-355.
- Barnett, T. P. 1991. The interaction of multiple time scales in the tropical climate system. *J. Climate* 4:269-285.
- Barnett, T. B.; M. Latif; N. Graham; M. Flugel; S. Pazan y W. White. 1993. ENSO and ENSO-related predictability: Part 1 - Prediction of equatorial Pacific sea surface temperatures with a hybrid coupled ocean-atmosphere model, *J. Climate* 6:1545-1566.
- Barnston, A. G. y C. F. Ropelewsky. 1992. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. *J. Climate* 5:1316-1345.
- Cane, M.; S. E. Zebiak y S. C. Dolan. 1986. Experimental forecast of El Niño. *Nature* 321:827-832.
- Cane, M. y S. E. Zebiak. 1987. Prediction of El Niño events using a physical model. En: H. Cattle (ed.), *Atmospheric and Oceanic Variability*, Royal Met. Soc. Press: 153-182.
- Carvajal, L. F.; O. J. Mesa, J. E. Salazar, y G. Poveda. 1994. Aplicación del análisis espectral singular a series hidrológicas en Colombia. IAHR, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile, Vol. 3:97-108.
- Cavazos, T. y S. Hastenrath. 1990. Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *Intern. J. Climatol.* 10:377-386.
- Chu, P-S. 1991. Brazil's climate anomalies and ENSO. En: Glantz, M., R. Katz, y N. Nicholls (eds.), *Linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press, p. 42-64.
- Delworth, T. y S. Manabe. 1993. Climate variability and land-surface processes, *Adv. Water Res.* 16:3-20.
- Díaz, H. F. y G. N. Kiladis. 1992. Atmospheric teleconnections associated with the extreme phases of the Southern

- Oscillation. En: Diaz, H. F. y V. Markgraf, (eds.). *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press.
- Diaz, H. F. y V. Markgraf (eds.). 1993. *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. Cambridge University Press. 476 p.
- Dickey, J. O.; S. L. Marcus; R. Hide; T. M. Eubanks, y D. H. Boggs. 1994. Angular momentum exchange among the solid Earth, atmosphere, and oceans: A case study of the 1982-1983 event. *J. Geoph. Res.* 99(B12):23921-23937.
- Eagleson, P. E. 1994. The evolution of modern hydrology (from watershed to continent in 30 years), *Adv. Water Res.* 17:3-18.
- Elthair, E. A. B. y R. Bras. 1993. On the response of the tropical atmosphere to large-scale deforestation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 119:779-793.
- Estoque, M. A.; J. Luque; M. Chandeck-Monteza y J. García. 1985. Effects of El Niño on Panama rainfall. *Geofísica Internacional* 24:355-381.
- Gessler, R. D. 1995. Precipitation variability over Ecuador associated with the El Niño/Southern Oscillation. Gainesville, Florida, U.S.A: Dept. Geograph., Universidad de Florida; 85 p. Tesis de Maestría.
- Glantz, M., R. Katz, y N. Nicholls (eds.). 1991. *Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. Cambridge University Press. 535 p.
- Halpert, M. S. y C. F. Ropelewsky. 1992. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J. Climate* 5:577-593.
- Hastenrath, S. 1990. Diagnostic and prediction of anomalous river discharges in northern South America. *J. Climate* 3:1080-1096.
- Hastenrath, S. y L. Greischar. 1993. Further work on the prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. *J. Climate* 6:743-758.
- Horel, J. D. y A. G. Cornejo-Garrido. 1986. Convection along the coast of northern Peru during 1983: Spatial and temporal variation of clouds and rainfall. *Mon. Wea. Rev.* 114:2091-2105.
- Horel, J. D. y J. M. Wallace. 1981. Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 109:813-829.
- Ji, M.; A. Kumar y A. Leetma. 1992. A coupled ocean-atmospheric climate forecast system for ENSO predictions. *Proceedings of the 7th Annual Climate Diagnosis Workshop*. Norman, Oklahoma, Octubre 18-23: 391-395.
- Kayano, M. T.; V. B. Rao y A. D. Moura. 1988. Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years. *J. Climatology* 8:477-488.
- Keppenne, C. y M. Ghil. 1992. Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation Index. *J. Geoph. Res. (Atmospheres)* 97:20449-20454.
- Kiladis, G., y H. F. Díaz. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate* 2:1069-1090.
- Kleeman, R. 1991. A simple model of the atmospheric response to ENSO sea surface temperature anomalies. *J. Atmos. Sci.* 48:3-18.
- Koster, R. D. y M. J. Suárez. 1995. The relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability: Summary of a GCM study. Sometido a *Jour. Geoph. Res.*
- Kousky, V. E.; M. T. Kayano y I. F. A. Cavalcanti. 1984. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus* 36A:490-504.
- Lambeck, K. 1980. *The Earth's variable rotation*. Cambridge University Press, New York.
- Marengo, J. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *Intern. J. Climatol.* 12:853-863.
- Marengo, J. A. y S. Hastenrath. 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *J. Climate* 6:617-627.
- Mechoso, C. R. y G. Perez Iribaren. 1992. Streamflow in southeastern South America and the Southern Oscillation. *J. Climate* 5:1535-1539.
- Mesa, O. J. y G. Poveda. 1993. The Hurst effect: The scale of fluctuation approach. *Water Res. Res.* 29:3995-4002.
- Mesa, O. J.; G. Poveda; L. F. Carvajal y J. E. Salazar. 1994a. Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile, Vol. 3:373-384.
- Mesa, O. J.; L. F. Carvajal; J. E. Salazar y G. Poveda. 1994b. Predicción hidrológica usando redes neuronales. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile. Vol. 3:385-396.
- Obregón, G. O., y C. A. Nobre. 1990. Principal component analysis of precipitation fields over the Amazon river basin. *Climanálise* 5:35-46.
- Penland, C. y T. Magorian. 1993. Prediction of Niño-3 sea-surface temperatures using linear inverse-modeling. *J. Climate* 6:1067-1076.
- Philander, S. G. 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA, U.S.A. 293 p.
- Poveda, G. y O. J. Mesa. 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Revista Atmósfera, Sociedad Colombiana de Meteorología*, Bogotá 20:26-39.
- Poveda, G. 1994. Funciones ortogonales empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile, Vol. 4:131-144.
- Poveda, G.; O. J. Mesa; L. F. Carvajal y J. E. Salazar. 1994. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile. 4:93-105.
- Poveda, G. y C. Penland. 1994. Predicción de caudales medios en Colombia usando Modelación Lineal Inversa. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile. 4:119-129.
- Poveda, G. y O. J. Mesa. 1995a. The Relationship between ENSO and the hydrology of tropical South America. The case of Colombia. *Proceedings of the Fifteenth Annual*

- American Geophysical Union Hydrology Days, Atherton, CA, USA, Hydrology Days Publications, p. 227-236.
- Poveda, G. y O. J. Mesa. 1995b. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic-atmospheric phenomena. Sometido a J. Climate.
- Pulwarty, R. S.; R. G. Barry y H. Riehl. 1992. Annual and seasonal patterns of rainfall variability over Venezuela. *Erdkunde*. 46:273-289.
- Pulwarty, R. S. y H. F. Díaz. 1993. A study of the seasonal cycle and its perturbation by ENSO in the tropical Americas. *IV Inter. Conf. South. Hem. Met. Ocean*, American Meteorological Society. p. 262-263.
- Rao, V. B. y K. Hada. 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.* 42:81-91.
- Rasmusson, E. M. y T. Carpenter. 1982. Variations in tropical SST and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.* 110:354-380.
- Richey, J. E.; C. Nobre y C. Deser. 1989. Amazon river discharge and climate variability: 1903 to 1985. *Science* 246:101-103.
- Riehl, H. y J. S. Malkus. 1958. On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica* 6:505-538.
- Rogers, J. C. 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern oscillation in the northern hemisphere. *Mon. Wea. Rev.* 112:1999-2015.
- Rogers, J. C. 1988. Precipitation variability over the Caribbean and tropical Americas associated with the Southern Oscillation. *J. Climate* 1:172-182.
- Ropelewsky, C. F. y M. S. Halpert. 1987. Global and regional scales precipitation associated with El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 115:1606-1626.
- Salazar, J. E.; O. J. Mesa; G. Poveda y L. F. Carvajal. 1994a. Aplicación de un modelo continuo no lineal de series hidrológicas. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile, Vol. 4:169-180.
- Salazar, J. E.; O. J. Mesa; G. Poveda y L. F. Carvajal. 1994b. Modelamiento del fenómeno ENOS en la hidrología colombiana mediante procesos autoregresivos dependientes del régimen. IAHR. *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, Santiago de Chile. Vol. 4:181-191.
- Schukla, J.; C. A. Nobre, y P. Sellers. 1990. Amazon deforestation and climate change. *Science* 247:1322-1325.
- Slutz, R. J.; S. J. Lubker; J. D. Hiscox; S. D. Woodruff; R. L. Jenne; D. H. Joseph; P. M. Steurer y J. D. Elms. 1985. *Comprehensive ocean-atmosphere data set*, Release 1, NOAA ERL, Boulder, Colorado. p. 268
- Tapley, P. R. y P. R. Waylen. 1990. Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru. *Hydrological Sciences J.* 35:429-446.
- Thomson, D. J. 1995. The seasons, global temperature and precession. *Science* 268:59-68.
- Trenberth, K. 1991. General characteristics of El Niño-Southern Oscillation. En: Glantz, R. M.; R. Katz y N. Nicholls (eds.). *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. Cambridge University Press. p. 13-42.
- Van Loon, H. y R. A. Madden. 1981. The Southern Oscillation, I, Global associations with pressure and temperature in northern winter. *Mon. Wea. Rev.* 109:1150-1162.
- Volland, H. 1988. *Atmospheric Tidal and Planetary Waves*, Kluwer. Dordrecht. 348 p.
- Waylen, P. R. y C. N. Caviedes. 1986. El Niño and annual floods on the northern Peruvian littoral. *J. Hydrol.* 89:141-156.
- Waylen, P. R.; M. E. Quesada y C. N. Caviedes. 1994. The effects of El Niño-Southern Oscillation on precipitation in San José, Costa Rica. *Inter. J. Climatol.* 14:559-568.
- Webster, P. J. 1995. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. En imprenta en *Meteorol. Atmos. Phys.*

Abstract

Poveda G., and O.J. Mesa, "Extreme Phases of the ENSO Phenomenon (El Niño and La Niña) and its Effects on the Hydrology of Colombia" *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XI. Num 1, pages 21-37, January- April, 1996.

El Niño and La Niña constitute the extreme phases of the oceanic-atmospheric phenomenon known as El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Both phases influence hydrological anomalies in tropical South America, over seasons or even decades. In general, El Niño produces harsher than normal and more prolonged dry periods, and La Niña intensifies maximum rainfall and discharges. The quantification of the influence of the phenomenon is illustrated using frequency histograms and the two first moments (mean and standard deviation) of monthly mean values at 50 rivers in Colombia for El Niño and La Niña years, and for the entire record. Ocean-atmospheric phenomena over the Pacific Ocean strongly influence the hydrology of Colombia as shown here through lagged correlation analysis between streamflow records, the Southern Oscillation Index and sea surface temperature data over the Indo-Pacific basin. Some general ideas about the predictability of both ENSO and streamflows in Colombia are presented. The annual cycle seems to be playing a fundamental role in the dynamics of ENSO beyond the loss of predictability during the months of the northern spring, as we found an improved predictability during the months of the northern winter.

Key words: ENSO, Colombia, streamflows, rainfall, hydrological anomalies, prediction.