

Análisis de Frecuencia de los Caudales Máximos Diarios en Ríos de Colombia Considerando las Fases del Fenómeno ENSO

Diana Milena Álvarez Vargas

Ingeniera Civil

Estudiante de maestría en Ingeniería del Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional

Sede Medellín

Germán Poveda Jaramillo

Ph.D en Ingeniería

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas

Resumen. Las dos fases del fenómeno ENSO modulan la hidrología Colombiana a escala de tiempo interanual. El Niño (fase cálida) está asociado con caudales mínimos y La Niña (fase fría) con caudales máximos extremos. El análisis tradicional de caudales extremos debe involucrar las fases del ENSO, ya que éstas generan muestras estadísticas provenientes de funciones de probabilidad diferentes. Se aplica una metodología para la estimación de eventos extremos de caudales máximos diarios en ríos de Colombia, mediante el uso de funciones de distribución de probabilidades mixtas que representan mejor el comportamiento de la hidrología a nivel interanual. Se concluye que es necesario modelar el comportamiento de caudales máximos con funciones de probabilidad mixtas que consideren las dos fases del ENSO. Este enfoque hace necesario replantear los análisis tradicionales de caudales extremos de distinto período de retorno en tareas de diseño hidrológico.

1. Introducción

Los denominados fenómenos de El Niño y La Niña dominan la variabilidad climática del planeta a escala de tiempo interanual. Ambos fenómenos son las dos fases opuestas del fenómeno llamado “El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)”, que ocurre como resultado de la interacción entre la circulación de los vientos y las temperaturas del mar sobre el Pacífico tropical. El Niño es el calentamiento anormal de las aguas del Pacífico (fase caliente) y durante La Niña ocurre un enfriamiento del mar. Tanto El Niño como La Niña ocasionan fuertes impactos sociales, ambientales, ecológicos y económicos. En general, en Colombia durante El Niño se presenta una disminución drástica de las lluvias y de los caudales de los ríos, así como una disminución en la cantidad de agua almacenada en los suelos, y por ende una disminución de la actividad vegetal y en la evapotranspiración, y un aumento en las temperaturas del aire (Poveda et al., 2001). Las alteraciones del clima que ocurren durante El Niño tienen efectos negativos sobre la agricultura, la

producción agropecuaria, la generación de energía eléctrica, el transporte fluvial, y ocasionan epidemias de malaria, incendios forestales y olas de calor en Colombia (Poveda et al., 2006). Durante La Niña ocurren los efectos contrarios, es decir que se presentan tormentas muy intensas, crecidas de ríos e inundaciones en las planicies aluviales, con las consecuentes pérdidas de vidas humanas, de infraestructura y de cosechas agrícolas (ver Poveda, 2004).

El análisis tradicional de eventos extremos que se usa con frecuencia en hidrología supone que la función de distribución de probabilidades de los eventos extremos es estacionaria en el tiempo. El conocimiento del ENSO y sus efectos pone de presente que esta suposición no es válida. Se hace necesario incorporar este efecto en la estimación de caudales extremos de distinto periodo de retorno. En este trabajo se enfrenta esta pregunta, usando una metodología de funciones de probabilidad mixtas, que consideran dos fases del ENSO: El Niño y La Niña, con el propósito de estimar los de caudales máximos de diferente periodo de retorno. El trabajo está distribuido de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta una revisión de la literatura actual, en la sección 3 se presentan los datos utilizados en el estudio y la metodología empleada en el mismo, en la sección 4 se presentan los resultados obtenidos y finalmente las conclusiones y la bibliografía

2. Revisión de Literatura

El trabajo de Gumbel (1940) es pionero en el análisis de frecuencia de caudales extremos. Allí se lee:

“Con el propósito de aplicar cualquier teoría suponemos que los datos son homogéneos, por ejemplo, que no hay cambios sistemáticos como el cambio climático ni cambios importantes en la cuenca durante el periodo de observación y estos se darán en el periodo para el cual las extrapolaciones son hechas”.

Más recientemente Khaliq (2006) plantea:

“El uso de estas técnicas (análisis de frecuencia) ha jugado un papel importante en la práctica ingenieril. Las suposiciones de independencia y estacionariedad son condiciones necesarias para proceder con estos análisis. Sin embargo, en el contexto de cambio climático, es posible que estas suposiciones no se conserven y los resultados del análisis hidrológico tradicional podrían ser dudosos. Bajo estas circunstancias, es importante recurrir a realizar otras aproximaciones que incorporen la no independencia y no estacionalidad de los extremos hidroclimatológicos”.

El fenómeno El NIÑO- Oscilación del Sur (ENSO) y el cambio climático ponen de presente la invalidez de los supuestos y las preocupaciones planteadas por Gumbel y Khalig. Es necesario

entonces encontrar métodos de análisis de frecuencia de caudales extremos que incorporen la variabilidad y el cambio climático. El trabajo de Waylen y Caviedes (1990) enfrenta este problema para el caso de ríos de Chile y Perú, usando una función de distribución de probabilidades mixta, condicionada a las dos fases del ENSO. Como se sabe, las dos fases del ENSO afectan de manera contraria la hidro-climatología de Chile y Perú, que la de Colombia, así mientras que durante El Niño se presentan estiajes y sequías en Colombia, en Chile y Perú se presentan aguaceros muy intensos y crecidas extraordinarias en los ríos de la región.

3. Datos y métodos

a. Métodos de análisis

En el presente trabajo se usa la metodología planteada por Waylen y Caviedes (1990), para la estimación de los caudales máximos de distinto periodo de retorno en ríos de Colombia, usando una función de distribución de probabilidades mixta tipo I, según las fases del ENSO. El análisis se realiza usando dos tipos de separación de las muestras estadísticas, así:

- Muestra 1: Caudales durante (1) El Niño y No ENSO y (2) caudales durante La Niña (2 poblaciones)
- Muestra 2: Caudales durante (1) El Niño, (2) caudales No ENSO y (3) caudales durante La Niña (3 poblaciones).

La distribución mixta será el resultado de la sumatoria de la función de distribución de probabilidad de cada muestra, afectada por un factor de ponderación dado por la relación entre los datos de cada muestra y los datos de la serie completa. La representación de la mezcla de funciones de distribución de probabilidades está dada según,

$$F_T(X \geq x) = \rho_1 F_1(X \geq x) + \rho_2 F_2(X \geq x) + \dots + \rho_i F_i(X \geq x) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1,$$

en donde F_T representa la función de distribución de probabilidad de toda la muestra de caudales extremos, F_i es la función de distribución de probabilidad de cada muestra resultante de la discretización, y ρ_i representa el factor de ponderación de cada muestra.

Para efectuar el análisis se usaron las funciones de probabilidad Lognormal, y las distribuciones de valor extremo tipo I (Gumbel) y tipo II (Frechet), cuyas funciones de distribución de probabilidades se definen como se muestra a continuación.

Distribución Lognormal (Chow,94)

$$F(X \geq x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (2)$$

en donde μ y σ representan la media y la desviación estándar de los logaritmos de la serie de caudales máximos anuales.

Distribución Gumbel (Waylen y Cavides,1990)

$$F(X \geq x) = 1 - (\exp(-\exp(-\alpha[x - \beta]))) \quad (3)$$

en donde $\alpha = 1.281/\sigma$ y $\beta = \mu - 0.45\sigma$, en donde μ y σ representan la media y la desviación estándar de los caudales máximos anuales, respectivamente.

Distribución Frechet (Chow,1994)

$$F(X \geq x) = 1 - (\exp(-\exp(-\alpha[\ln x - \beta]))) \quad (4)$$

Donde, por el método de los momentos se tiene que $\alpha = 1.281/\sigma$ y $\beta = \mu - 0.45\sigma$, siendo μ y σ , la media de los logaritmos de los datos y la desviación estándar de los logaritmos de los datos, respectivamente.

Prueba de bondad de ajuste

Para observar diferencias significativas entre las distribuciones ajustadas y las observadas, se aplicó la prueba Kolmogorov-Smirnov, de bondad de ajuste. Esta prueba se empleó con un nivel de significancia de 0.1, con el fin de reducir el riesgo de cometer error tipo II, que es el de aceptar la hipótesis nula, siendo falsa.

Gráficas de Probabilidad

Las gráficas de probabilidad se utilizan como verificación de que la distribución de probabilidad se ajusta a un conjunto de datos hidrológicos (Chow, 64. Las posiciones de graficación utilizadas para las probabilidades de excedencia se estiman mediante,

$$P(X \geq x) = \frac{m - 3/8}{n + 1/4}, \text{ para la Lognormal (Blom, 1958)} \quad (4)$$

$$P(X \geq x) = \frac{m - 0.28}{n + 0.28}, \text{ para la Gumbel (De, 19**),} \quad (5)$$

en donde m es la posición de un valor en una lista ordenada por magnitud descendente y n es el número de datos de la serie de caudales máximos anuales.

Se inicia con el ajuste de un mismo tipo de función de distribución para cada discretización obteniendo así tres funciones de distribución de probabilidad (LogNormal, Gumbel y Frechet) para los caudales diarios máximos observados durante los años de ocurrencia de La Niña, y para los caudales diarios máximos observados durante años de ocurrencia de El Niño y años normales ó “No ENSO”.

El factor de ponderación, ρ , en la ecuación (1) se estima mediante el cociente entre el número de datos de la discretización de las muestras y el número total de datos

El error estándar de estimación (eee) de los promedios muestrales estimados con una muestra de n datos, se estima mediante,

$$eee = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Prueba de hipótesis

Para comprobar que el comportamiento de los caudales máximos varían con las fases del ENSO se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon (Walpole y Myers, 1984), en la cual se prueba la hipótesis nula que el error estándar de la media de los caudales promedios correspondientes a la discretización de No ENSO se comporta de manera similar al error estándar de la media de los caudales promedios multianuales correspondientes a las otras dos discretizaciones, y que estas a su vez también se comportan similarmente. Por esto se utilizó una prueba de dos colas con un nivel de significancia del 0.05 (Walpole y Myers 1984).

3.2 Datos empleados

Los registros de las estaciones utilizadas provienen de la base de datos del Posgrado de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Las series usadas contienen datos diarios de, al menos, 17 años, con un promedio de faltantes del 4%. Las estaciones de aforo usadas se encuentran distribuidas en las regiones centro y occidental de Colombia.

Tabla 1. Estaciones empleadas en el estudio

CÓDIGO	CORRIENTE	NORTE	OESTE	COTA (m)	PERIODO DE REGISTRO	PORCETAJE DE FALTANTES
2618704	Arma	05:44:00.00 N	75:33:00.00 O	580	1.Enero.1974-31.Diciembre.1994	0.00%
1104701	Atrato	05:41:00.00 N	76:39:00.00 O	27	1.Enero.1974-31.Diciembre.1998	10.40%
2612709	Barbas	04:43:00.00 N	75:46:00.00 O	1162	1.Enero.1971-31.Diciembre.1999	7.08%
2612710	Barbas	04:43:00.00 N	75:43:00.00 O	1350	1.Enero.1979-31.Diciembre.1994	3.30%
2312702	Carare	06:31:00.00 N	74:05:00.00 O	92	1.Enero.1969-31.Diciembre.1998	3.42%
1606701	Catatumbo	09:00:00.00 N	72:50:00.00 O	45	1.Enero.1971-31.Diciembre.1998	7.29%
2602705	Cauca	02:57:00.00 N	76:41:00.00 O	1070	1.Enero.1947-31.Diciembre.1993	0.00%
2616707	Cauca	05:16:00.00 N	75:41:00.00 O	775	1.Enero.1972-31.Diciembre.1994	2.89%
2617703	Cauca	04:54:00.00 N	75:52:00.00 O	900	1.Enero.1969-31.Diciembre.1994	0.00%
3507712	Garagoa	05:03:00.00 N	73:24:00.00 O	1283	1.Enero.1974-31.Diciembre.1989	0.00%
2701703	Grande	06:30:00.00 N	75:26:00.00 O	2160	1.Enero.1956-31.Diciembre.1991	0.00%
2302706	Guarino	05:16:00.00 N	74:45:00.00 O	168	1.Enero.1980-31.Diciembre.1994	0.00%
3506704	Guavio	04:47:00.00 N	73:35:00.00 O	1620	1.Enero.1963-31.Diciembre.1996	0.00%
3502714	Guayuriba	04:03:00.00 N	73:46:00.00 O	520	1.Enero.1969-31.Diciembre.1994	5.12%
2612704	La Vieja	04:45:00.00 N	75:52:00.00 O	914	1.Enero.1971-31.Diciembre.1993	9.71%
2109707	Magdalena	02:59:00.00 N	75:18:00.00 O	430	1.Enero.1961-31.Diciembre.1995	0.00%
2614713	Mapa	05:03:00.00 N	75:56:00.00 O	1080	1.Enero.1978-31.Diciembre.1994	0.00%
2703701	Nechi	08:00:00.00 N	74:46:00.00 O	33	1.Enero.1969-31.Diciembre.1998	7.40%
2306702	Negro	05:30:00.00 N	74:33:00.00 O	286	1.Enero.1969-31.Diciembre.1997	4.19%
2613711	Otun	04:47:00.00 N	75:37:00.00 O	1530	1.Enero.1972-31.Diciembre.1994	2.65%
5201701	Patia	01:36:00.00 N	77:24:00.00 O	463	1.Enero.1967-31.Diciembre.2000	2.35%
2701736	Porce	06:33:00.00 N	75:13:00.00 O	1055	1.Enero.1973-31.Diciembre.1994	0.00%
2121719	Q. Las Perlas	04:35:00.00 N	75:20:00.00 O	1760	1.Enero.1972-31.Diciembre.1994	6.73%
2308703	Q La Mosca	06:13:00.00 N	75:24:00.00 O	2080	1.Enero.1955-31.Diciembre.1991	1.81%
1506705	Rancheria	11:12:00.00 N	72:30:00.00 O	110	1.Enero.1976-31.Diciembre.1999	8.62%
2614704	Risaralda	05:11:00.00 N	75:48:00.00 O	1140	1.Enero.1966-31.Diciembre.1994	3.23%
2614705	Risaralda	05:13:00.00 N	75:48:00.00 O	1183	1.Enero.1970-31.Diciembre.1994	10.55%
2614714	Risaralda	04:59:00.00 N	75:52:00.00 O	920	1.Enero.1975-31.Diciembre.1994	6.68%
1302702	Sinú	08:27:00.00 N	75:31:00.00 O	17	1.Enero.1969-31.Diciembre.2000	4.61%
1303701	Sinú	08:00:00.00 N	76:09:00.00 O	77	1.Enero.1968-31.Diciembre.1995	6.02%
2406701	Sogamoso	07:03:00.00 N	73:20:00.00 O	192	1.Enero.1969-31.Diciembre.1998	10.37%
3507708	Somondoco	04:59:00.00 N	73:30:00.00 O	1350	1.Enero.1974-31.Diciembre.1989	0.00%
2617701	Supia	05:26:00.00 N	75:39:00.00 O	1200	1.Enero.1978-31.Diciembre.1994	4.41%
3509709	upia	04:51:00.00 N	73:03:00.00 O	375	1.Enero.1983-31.Diciembre.2001	0.00%
3510704	upia	04:40:00.00 N	73:03:00.00 O	325	1.Enero.1983-31.Diciembre.2002	0.00%
3512702	yucao	04:21:00.00 N	72:09:00.00 O	160	1.Enero.1978-31.Diciembre.2001	10.30%

La definición de años El Niño, No ENSO y La Niña, fueron obtenidos de dos fuentes diferentes: los registros de Climate Prediction Center of Nacional Weather Center (NOAA) en el cual se presentan las anomalías en grados centígrados del Índice Oceánico del Niño en la región 3-4 (5°N-5°S, 120°-170°W). La segunda fuente es del Canadian Institute for Climate Studies

Se define el año hidrológico comenzando el 1° de junio del año (*i*) y terminando el 31 de mayo del año siguiente (*i+1*), debido a la dinámica del ENSO y su relación con el ciclo anual de la hidrología de Colombia (ver Poveda et al., 2001 y Waylen y Poveda, 2002).

4. Resultados

Para los registros discriminados en dos poblaciones (La Niña y El Niño+No ENSO). Se observa que en la costa Pacífica y en la región centro-oriental de Colombia, la media y la desviación estandar de los caudales máximos anuales observados aumenta con La Niña. En la zona de la costa Atlántica aparecen dos tipos de comportamiento, en la parte nororiental (La Guajira) hay decrecimientos en la media de los caudales máximos durante La Niña, pero en la parte noroccidental se presentan aumentos de los caudales máximos en La Niña. La zona de los Llanos Orientales presenta una tendencia contraria, es decir caudales más altos en El Niño que en La Niña, esto puede atribuirse a que esta región está más influenciada por el Chorro de Bajo Nivel Suramericano que por los vientos alisios que se deflectan en la costa Pacífica Colombiana.

Para la mayoría del territorio colombiano se encontró que existe una diferencia relevante entre los caudales de La Niña respecto a El Niño y al No ENSO. Esto hace que sea necesario diferenciar las muestras de caudales. Para la segunda muestra se hace notoria la diferencia de los valores de la media de los caudales máximos La Niña respecto a El Niño en el interior del país, representado en este caso por las estaciones de Caldas, Antioquia Santander y Norte de Santander.

En la Figuras 1 se muestran los resultados del ajuste de funciones de distribución de probabilidades Frechet, según las fases del ENSO, para el río Catatumbo en Santander

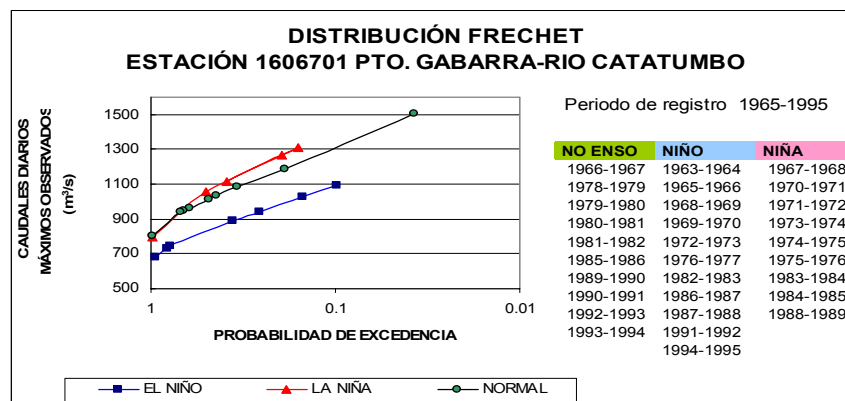


Figura 1. Función de distribución de probabilidades según las fases del ENSO, para el Río Catatumbo estación Puerto Gabarra

Teniendo en cuenta la variabilidad climática establecida, se realizaron los análisis estadísticos para establecer cual era la función de probabilidad más adecuada para la predicción de caudales máximos. Se compararon entonces las diferencias entre los caudales estimados para un periodo de retorno determinado por las funciones de distribución de probabilidad mixta y las funciones de probabilidad simples. Se encontró que las zonas donde es más notoria la diferencia entre los caudales estimados por las dos metodologías es en la Costa Atlántica Norte y en la región suroriental del país, en los ríos Sinú y Meta. En zonas como la costa Pacífica y el interior se encontraron diferencias negativas al comparar un caudal estimado para un periodo de retorno menor a 5 años generalmente con una distribución mixta y una distribución simple.

Para estaciones como la 1506705, en río Ranchería, se encontró que la función de probabilidad que encuentra mayores diferencias entre los caudales estimados de forma mixta y de forma simple, es la distribución Frechet. Esto se debe al decaimiento de tipo potencial de la cola de la función de distribución Frechet, lo que permite una mayor probabilidad de que ocurran eventos máximos. Se podría decir entonces que en las estaciones en donde es muy notoria la diferencia entre las dos metodologías se recomienda utilizar la distribución Frechet mixta que permite ser más conservativo en el momento de estimar caudales para periodos de retorno determinados.

Obsérvese que las estaciones que mostraron las menores diferencias entre las diversas fases del ENSO son las que mejor se adaptaron a la distribución de probabilidad mixta. Se plantean dos posibles causas, la primera, que la falta de longitud en los registros genere una sobre-estimación de los factores de ponderación en las funciones de probabilidad mixtas, durante la fase El Niño y No ENSO, afectando los caudales máximos estimados. La segunda causa podría ser que otros factores macroclimáticos que afectan la climatología colombiana inciden en forma local de una manera más acentuada que el fenómeno ENSO.

Con el propósito de analizar el efecto de la definición de los años El Niño y La Niña, se usaron las definiciones de NOAA y del Servicio Canadiense. El tipo de definición afecta los valores de los factores de ponderación en el cálculo de funciones mixtas. La Tabla 3 muestra un ejemplo de cambio en los factores de ponderación, en este caso para la estación 3509709 (La Rebentonera) en el río Upía en la costa Atlántica

Tabla3. Factores de ponderación para la estación 3509709 (Río Upia) con las dos fuentes

<i>Valor del factor de ponderación, p</i>	NOAA	CANADA
El Niño	0.22	0.27
La Niña	0.44	0.22
No ENSO	0.33	0.50

Nótese que el factor de ponderación para La Niña se reduce a la mitad y el factor de ponderación para condición de No ENSO aumenta en un 30%. Esto hace que los caudales estimados sean muy diferentes dependiendo de la fuente que se utilice, como se muestra en los resultados de la Tabla 4.

Tabla4. Factores de ponderación, p , estimados para el Río Upía, estación 3509709, según las dos fuentes

PERIODO DE RETORNO	DIFERENCIAS ENTRE CAUDALES ESTIMADOS (m³/s)	
	CANADA	NOAA
T	FRECHET MIXTA -FRECHET	
50	390.4853499	350.7690304

100	773.6587069	681.2873173
500	3206.346951	2691.682483
1000	5650.519439	4641.872232
T	GUMBEL MIXTA - GUMBEL	
50	28.39037795	-23.81123694
100	34.35114462	-28.81057959
500	48.12556643	-40.36329727
1000	54.04737986	-45.32996953
T	LOGNO ENSO MIXTA- LOG NO ENSO	
50	185.0615688	169.5127292
100	272.0702614	246.7868883
500	560.1354439	498.0329277
1000	727.4783019	641.8196378

Las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, aplicadas para las distribuciones LogNo ENSO Gumbel y Frechet con un nivel de significancia del 10%, no rechazan la hipótesis de que las series El Niño o No ENSO, y La Niña se ajustan a dichas distribuciones.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de dar una mirada cuidadosa al problema de la estimación de caudales extremos, para propósitos de diseño hidrológico. Es necesario modelar los caudales máximos en donde el fenómeno ENSO tenga una influencia muy notoria, con funciones de probabilidad mixtas.

Las diferencias más grandes en las estimaciones de caudal oscilan entre un 10-20%, y dependen de la localización de la estación debido a que el fenómeno ENSO no se manifiesta de la misma manera en el país.

La fuente de clasificación de los años para las diversas fases del ENSO es un factor primordial en el momento de emplear funciones de probabilidad mixtas debido a que pueden alterar los factores de ponderación utilizados en el cálculo de las probabilidades.

Reconocimientos. Esta investigación se hizo con el apoyo de COLCIENCIAS al Programa de Investigación para la Gestión Integral de Agua en Colombia, que realiza el Grupo Red de Cooperación para la Investigación del Agua en Colombia (GRECIA).

6. Bibliografía

CHOW, V. Hidrología aplicada. Ed McGraw-Hill, Santa Fé de Bogotá, 1994

GUMBEL E.J., 1941 The return period of flood flows. Ann Math Stat. 12 163-190

KATZ RICHARD, et.al. 2002 Statics of Extremes in hydrology. Advances in Water Resources 25 (1287-1304)

KHALIQ M.N, et al. 2006. Frecuency analysis of a secuance of dependent and or non stationary hydro-meteorological observations : A review. Journay of Hydrology. In Press 2006

POVEDA, G. 1998. El Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur y su Influencia sobre el Clima de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas. Universida Nacional de Colombia, Medellín

SHENG K. et.al. 2006 Simulation of probability distributions commonly used in hydrological frecuency analysis. In press 2006.

VER D. A new unbiased plotting position formula for Gumbel distribution

WALPOLE R.E y MYERS R.H. Probabilidad y estadística para ingenieros. Interamericana Mexico, 1984

WAYLEN, P. y C. CAVIEDES 1990. Annual and seasonal fluctuations of Precipitation and Streamflow in the Aconcagua River Basin, Chile. Journal of Hidrology 120 (79-101).

WAYLEN, P. y T. TAPLEY 1990. Spatial variability of annual precipitation and ENSO event in western Perú. Hydological Sciences Journal 35 (429-447)

http://www.cics.uvic.ca/index.cgi?/Products/About_CICS_Predictions

http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.sht