

LA HIDROCLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA: UNA SÍNTESIS DESDE LA ESCALA INTER-DECADAL HASTA LA ESCALA DIURNA

por

Germán Poveda¹

Resumen

Poveda, G.: La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **28** (107): 201-222, 2004. ISSN: 0370-3908.

Se hace una revisión de la variabilidad de la hidro-climatología de Colombia, en escalas temporales que incluyen la escala interdecadal, principalmente afectada por la presencia de tendencias en las variables del clima del país, que evidencian el cambio climático. El análisis de la escala de tiempo interanual se centra en el estudio del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y la consistencia de sus efectos sobre las principales variables del ciclo hidrológico: precipitación, caudales medios y extremos de ríos, humedad de suelo y actividad vegetal. La escala de tiempo anual se centra en el análisis de la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, asociada con la actividad de los vientos alisios del este. Se precisa la influencia del chorro del Chocó sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia, y se cuantifica el balance anual de largo plazo de la humedad atmosférica. La dinámica de los Sistemas Convectivos de Mesoescala se presenta en relación con el ciclo anual y con la actividad del chorro del Chocó. A la escala de tiempo intra-anual se presentan las evidencias de los efectos de la oscilación de 30-60 días y de las ondas tropicales del este sobre los registros de precipitación en Colombia. A la escala de variabilidad diurna se presentan las evidencias de la alta variabilidad de la precipitación sobre los Andes tropicales.

Palabras clave: Hidroclimatología, cambio global, El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), Zona de Convergencia Intertropical, chorro del Chocó.

Abstract

This study presents a synthesis of Colombia's hydro-climatology variability in time. The range of time scales goes from the inter-decadal one to the diurnal cycle. Interdecadal timescale is affected by signals of climate change, evidenced in the presence of trends of most important climatic records. The interannual time scale is focused on the dynamics of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and the consistency of its effects on most relevant hydrologic variables, namely precipitation, mean and extreme river discharges, soil moisture, and vegetation activity as a surrogate for evapotranspiration.

¹ Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

The annual time scale is dominated by the meridional migration of the Intertropical Convergence Zone, associated with the circulation of the surface moisture-laden trade winds. The importance of the winds of the Chocó low-level jet is pointed out within the annual cycle and its linkages with the activity of Mesoscale Convective Systems over western Colombia. The long-term annual atmospheric water budget is quantified for Colombia. The intra-annual time scale is illustrated with the effects of the 30-60 days intra-seasonal oscillation, as well as by the influence of the tropical easterly waves over the Atlantic and Caribbean. The extreme spatial variability of the diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia is illustrated and quantified.

Key words: Climatology, Global change, El Niño/Southern Oscillation (ENSO), Intertropical Convergence Zone, Chocó low-level jet.

1. Introducción

El entendimiento de la variabilidad climática en un amplio rango de escalas espaciales y temporales es uno de los temas más relevantes en ciencias geofísicas. Las escalas espaciales incluyen la escala planetaria, continental, regional, local y puntual. El clima varía de un año, una década o un milenio a otro. Las escalas temporales abarcan desde la escala paleo-climática (millones de años) hasta la escala de la turbulencia atmosférica de la capa límite, pasando por las escalas milenial, secular, decadal, interanual, anual, intra-anual, y diurna. La naturaleza compleja de esta variabilidad dificulta la identificación de los cambios globales inducidos por la acción humana. Hay tres tipos de fenómenos involucrados en la variabilidad climática: (i) Variaciones causadas por forzamientos externos periódicos, tales como los ciclos anual y diurno de insolación, son aparentemente los más fáciles de entender y predecir, y están asociados a la translación de la Tierra alrededor del Sol y a la rotación alrededor de su eje, respectivamente. En escalas de tiempo mayores, la variabilidad de los parámetros astronómicos de la relación Tierra-Sol produce múltiples ciclicidades o cuasi-periodicidades, como en la teoría de los ciclos de Milankovich que explican los cuasi-períodos de 100.000 años presentes durante el Pleistoceno tardío. (ii) Variaciones debidas a la interacción no lineal y efectos de retro-alimentación dentro de los distintos sub-sistemas del sistema climático terrestre. Estos dan lugar a oscilaciones climáticas auto-reguladas, las cuales son mucho más difíciles de entender y predecir que las anteriores, dado que las no linealidades inducen comportamientos altamente complejos y aun de naturaleza caótica. Los mejores ejemplos de este tipo de mecanismos de retroalimentación son (Barry & Carleton, 2001): temperatura y vapor de agua, hielo-nieve y albedo planetario, las retroalimentaciones positivas y negativas asociados con el doble papel de enfriamiento y calentamiento que juegan las nubes, y la retroalimentación debida a la biosfera, ejemplificada en la teoría Gaia (Lovelock, 2000). (iii) Variaciones asociadas con fluctuaciones aleatorias en los factores físicos o químicos, las cuales son las más difi-

les de predecir en cualquier escala de tiempo. Estas pueden ser externas (erupciones volcánicas, meteoritos) o internas del sistema climático (tiempo atmosférico de corto plazo). Esta alta complejidad del clima en distintas escalas temporales se conjuga la variabilidad en distintas escalas espaciales, las cuales invocan inmediatamente la complejidad de la geografía terrestre.

Colombia está situada en el trópico Americano, “*como una isla entre tres océanos*” (Snow, 1976), si se piensa que además del Caribe y del Pacífico, Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica. La presencia de la barrera orográfica que constituyen los tres ramales de la cordillera de los Andes, induce la formación de climas locales y regionales de alta complejidad y dificultad de predicción a distintas escalas de tiempo. La existencia de un “*óptimo pluviográfico*” (Oster, 1979; Mesa, Poveda & Carvajal, 1997) sobre los valles interandinos, es un rasgo característico del gradiente altitudinal de la precipitación en tal región de Colombia. Entre los Andes y la cuenca Amazónica existe una retroalimentación positiva, ya que los vientos alisios del sureste transportan gran cantidad de humedad hacia los Andes, la cual contribuye a la precipitación sobre el pie de monte Andino, y ésta a su vez nutre los caudales (agua, sedimentos y nutrientes) de los ríos de la Amazonia Colombiana. Esta doble retroalimentación contribuye a la riqueza hidro-ecológica y de biodiversidad de ambas regiones, grandemente amenazadas (Myers *et al.*, 2001). La interacción que se presenta entre el suelo, la vegetación y la atmósfera también juega un papel importante en la modulación del clima tropical. El porcentaje de precipitación reciclada, es decir aquella que se origina en los procesos de evapotranspiración local, es del orden del 35-50% en la Amazonia (Elthair & Bras, 1994). La primera estimación hecha para Colombia de la cantidad de precipitación reciclada indica que entre el 30%-40% de la lluvia tiene origen en la misma humedad evaporada por el suelo y la vegetación del país (Cuartas & Poveda, 2002). La significancia de este resultado pone de presen-

te la gran amenaza hidrológica y climática impuesta por la deforestación de los bosques Colombianos. En este contexto geográfico se debe entender la variabilidad del clima de Colombia en las distintas escalas temporales. Este trabajo presenta una síntesis de diagnóstico y de los elementos y mecanismos físicos más preponderantes de la variabilidad climática de Colombia, desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria, con base en registros y observaciones instrumentales de distintas variables climáticas e hidrológicas.

2. Escala Inter-Decadal

La variabilidad climática global a escala de varias décadas está dominada por el cambio climático y el cambio ambiental global de largo plazo, así como por fenómenos macroclimáticos que operan en tal escala temporal. Nos referiremos al primero. Las temperaturas medias y mínimas de la troposfera baja están aumentando y, a su vez, las temperaturas de la estratosfera están disminuyendo en casi todo el planeta. El balance neto de las evidencias indica que la acción humana está ejerciendo un impacto discernible sobre el clima global (IPCC, 2000), a través de la inyección de altas cantidades de CO_2 como resultado de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) y por la deforestación de bosques, que son sumideros de Carbono. Las evidencias de cambio climático en Colombia son múltiples: retroceso de glaciares tropicales, aumento de enfermedades de transmisión vectorial asociadas con el clima, tales como malaria y dengue, perturbaciones de largo plazo y cambios en la fase y en la amplitud de los regímenes hidrológicos, aumentos graduales del nivel del mar, cambios en ecosistemas, etc. En los trabajos de **Smith et al.**, (1996), **Mesa, Poveda & Carvajal** (1997), **Pérez et al.**, (1998), y **Poveda, Rave & Mantilla** (2001) se presenta un completo estudio de tendencias y cambios estadísticos, mediante pruebas de hipótesis rigurosas, en las series de registros de diversas variables climáticas de Colombia, durante los últimos 30-40 años. Tales estudios apuntan a confirmar las evidencias de cambio ambiental en el país. En esos estudios no se profundizó en el análisis de la coherencia espacial de los cambios identificados. En la Figura 1 se presenta la distribución espacial de las tendencias en las series mensuales de temperaturas mínimas y de humedad relativa, para el período 1955-1995. En tal figura el diámetro del círculo es correlativo con la tendencia identificada en cada estación de registro localizada en el centro del círculo, y se puede comparar con la convención mostrada en cada mapa. Se observa un generalizado aumento (tendencias crecientes) en ambas variables. Las tendencias encontradas en los registros de temperatura mínimas indican

un incremento del orden de $1\text{EC}/20$ años, y de $0.6\text{EC}/20$ años para los registros de temperatura media. En forma consistente, este calentamiento de la troposfera también se presenta en los registros de presión de vapor de agua ($0.5\text{ hPa}/20$ años), y de punto de rocío ($0.6\text{EC}/20$ años). Todas estas tendencias sugieren que la humedad relativa del aire debe aumentar, consistentemente con la ecuación de Clausius-Clapeyron. La tendencia identificada en los registros de humedad relativa es de $0,03/20$ años. Las series de precipitación muestran tendencias positivas y negativas, y no hay una señal clara, pero los caudales de las principales cuencas hidrográficas exhiben tendencias decrecientes de $4\text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$. De acuerdo con la elevación sobre los Andes, los resultados muestran (**Ochoa & Poveda**, 2003) que las tendencias decrecientes en los registros de punto de rocío, presión de vapor y humedad relativa se presentan para estaciones por debajo de la cota 1700 m. No solo se han identificado tendencias en los registros de las principales variables del clima en Colombia, sino que además se han identificado cambios en la fase y la amplitud del ciclo anual y semi-anual (**Pérez et al.**, 1999), es decir corrimientos de las temporadas lluviosas dentro del año, con importantes implicaciones en agricultura y en generación de energía hidro-eléctrica, para citar solo dos ejemplos.

Hay varios fenómenos macro-climáticos que operan a escalas de tiempo decadales, tales como la llamada Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que tienen una influencia significativa sobre el clima de Colombia. La primera ha sido estudiada por **Poveda et al.**, (2002), y la segunda por **Poveda & Mesa** (1996b) y **Poveda et al.**, (1998). Estos últimos dos fenómenos son parte de la variabilidad natural del clima de la Tierra. La superposición de los efectos combinados del cambio climático (antropogénico) y de la variabilidad climática (natural) es un tema central de investigación en geofísica actual y de indudables implicaciones sociales, ambientales, ecológicas y económicas.

3. Escala Interanual (ENSO)

La variabilidad climática global a escala de tiempo interanual está fuertemente controlada por la ocurrencia del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El ENSO tiene una variabilidad estacional (asociada con su enfasamiento con el ciclo anual), ya que comienza durante la primavera del hemisferio Norte (marzo-mayo), y alcanza su máximo desarrollo durante el tiempo de la Navidad, y de allí el nombre de El Niño. Pero también tiene una componente cuasi-bienal con un tiempo de recurrencia entre 2 a 2,5 años, así como una baja

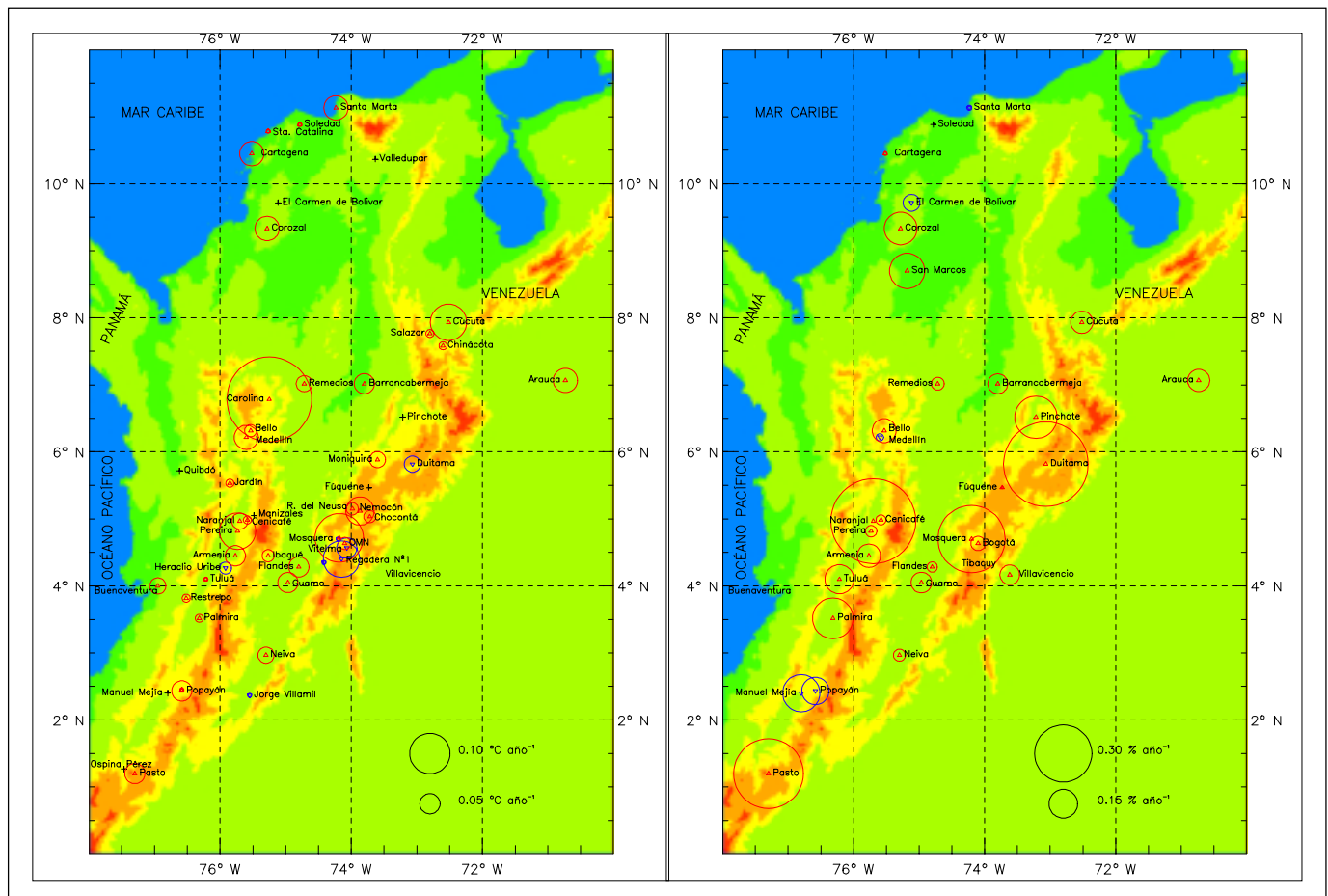


Figura 1. Mapas de tendencias estadísticas crecientes (rojo) y decrecientes (azul), identificadas en los registros mensuales de temperaturas mínimas (izquierda) y de humedad relativa (derecha) en estaciones de registro localizadas en el centro del círculo respectivo. El diámetro del círculo es correlativo con la magnitud de la tendencia de referencia, la cual se lee en la esquina inferior derecha.

frecuencia, con una recurrencia entre 4-5 años. El Niño es la fase cálida del ENSO, en la que se presenta un aumento de las temperaturas superficiales del mar, en particular sobre el centro y el oriente del Pacífico tropical, lo cual conduce a alteraciones en los patrones de circulación de vientos, de presiones atmosféricas superficiales y de precipitación sobre todo el Océano Pacífico. La Niña es la fase fría del ENSO.

La magnitud de los cambios en los balances de agua y energía globales que ocurren durante las dos fases del ENSO, ocasiona fuertes perturbaciones hidro-climáticas, particularmente en los cinturones tropicales y sub-tropicales de la tierra, con amplias repercusiones sociales, ambientales, ecológicas y económicas. Referencias obligadas para entender la dinámica del fenómeno ENSO son los trabajos de **Neelin et al.**, (1998), **Battisti & Sarachick**

(1995), **Federov & Philander** (2000), **Trenberth** (1996), **White & Cayan** (2000), **Chan & Xu** (2000), **Neelin et al.** (2000), **Webster & Fasullo** (2000).

Los impactos sociales y económicos del ENSO se estudian en los trabajos de **Díaz & Markgraf** (2000), **Glantz et al.** (1991), **Glantz** (2000), **Rosenzweig** (2001). Información detallada y análisis sobre el ENSO y sus efectos globales y regionales se encuentra en las siguientes URL de Internet:

- http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/nino-home.html,
- http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/,
- <http://nsipp.gsfc.nasa.gov/enso/>

<http://iri.ldeo.columbia.edu/outreach/education/enso/>

La variabilidad del clima de Colombia a la escala interanual asociada con el ENSO y otros fenómenos de macro-escala ha sido estudiada por nuestro grupo de investigación en el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín. Entre ellos: **Poveda** (1994a y b, 1996, 1997, 1998, 2001), **Poveda & Mesa** (1995, 1996a, 1997, 2000), **Mesa et al.** (1994a y b, 1997a y b), **Poveda et al.** (1994, 1998, 2001a, 2002a, b, c, d), **Gil & Quiceno** (1997), **Hoyos** (1999), **Poveda & Jaramillo** (2000), **Waylen & Poveda** (2002). El tema de la predicción de la hidro-climatología de Colombia en relación con el fenómeno ENSO y otros fenómenos macro-climáticos ha sido estudiado en los trabajos de **Poveda & Mesa** (1993), **Poveda & Penland** (1994), **Carvajal et al.** (1994), **Salazar et al.** (1994), **Poveda et al.** (2002, 2003). Otros grupos de investigación también han hecho aportes al estudio de los efectos del ENSO en Colombia, como los del IDEAM (**Montealegre & Pabón**, 1992, 2002; **Montealegre**, 1996), el de la Universidad del Valle (**Carvajal et al.**, 1999), el CCCP de Tumaco y el CIOH de Cartagena, ambos de la Armada Nacional, y el Observatorio Sismológico del Occidente Colombiano.

Los efectos hidro-climáticos del ENSO se pueden resumir en los siguientes aspectos principales. En general, durante El Niño se presenta una disminución en la precipitación y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, así como una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal (**Poveda & Jaramillo**, 2000; **Poveda et al.**, 2001; **Poveda, Ramírez & Jaramillo**, 2001). Consistentemente se presenta un incremento en las temperaturas medias del aire. Todas estas anomalías hidro-climáticas presentan alguna variabilidad regional y temporal, y están asociadas con efectos adversos a la agricultura y a la producción agropecuaria, a la generación de energía eléctrica (**Poveda, Mesa & Waylen**, 2003), al transporte fluvial, y a las epidemias de malaria en Colombia (**Poveda & Rojas**, 1996, 1997; **Poveda et al.**, 2000, 2001b), y a muchos ecosistemas. En general, los efectos de El Niño son más fuertes y más inmediatos sobre el occidente que sobre el oriente del país (**Poveda & Mesa**, 1997). Durante La Niña ocurren anomalías contrarias, con eventos de precipitación muy intensos, crecidas de ríos, avalanchas e inundaciones de planicies aluviales, con las consecuentes pérdidas de vidas humanas, infraestructura y cosechas agrícolas. Para ilustrar estos resultados, en la Figura 2 se muestran los valores de los coeficientes de correlación estacional entre las series

de caudales medios trimestrales de ríos de Colombia el Índice Multivariado del ENSO (MEI), proporcionada por K. Wolter de la National Oceanographic and Atmospheric Administration de Estados Unidos (<http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/>), en dos temporadas del año. Las correlaciones son especialmente altas entre el MEI del trimestre septiembre-noviembre (SON) y el caudal del trimestre DEF, a igual que entre el MEI de DEF y los caudales de DEF. Se observa un decaimiento de las correlaciones entre un trimestre determinado del MEI y los caudales de trimestres posteriores a MAM, especialmente en SON y DEF. Esta conclusión concuerda con **Poveda & Mesa** (1996a) y **Gil & Quiceno** (1997).

Los mecanismos físicos por los cuales se presentan déficits hidrológicos en Colombia durante El Niño se pueden resumir como (**Poveda**, 1998; **Poveda et al.**, 2001): (1) el debilitamiento del chorro del Chocó (ver numeral siguiente); (2) el debilitamiento de la corriente de chorro ecuatorial de los 700 hPa; (3) la reducción en número e intensidad de las ondas tropicales del este sobre el Atlántico tropical norte; (4) el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur-oeste de su posición normal, como consecuencia del establecimiento de una celda de Hadley anómala sobre el trópico Americano; (5) alteración del balance de humedad atmosférica, en particular en los niveles más bajos de la atmósfera (ver numeral 4.4, y **Cuartas & Poveda**, 2002); y (6) retro-alimentación positiva entre procesos tierra-atmósfera, ya que se presentan déficits de humedad de suelo, de evapotranspiración y de actividad vegetal durante El Niño en Colombia (**Poveda & Jaramillo**, 2000; **Poveda et al.**, 2001a y b), y por tanto la precipitación reciclada de origen local tiende a disminuir como resultado de una menor disponibilidad de agua en el suelo y en la atmósfera.

Este diagnóstico todavía es parcial, y significa que todavía se requiere mucho trabajo para entender la dinámica del ENSO sobre la hidro-climatología de Colombia. Varios factores contribuyen a la alta complejidad de esta relación. Uno de ellos es que además del ENSO, existen otros fenómenos como los ya mencionados de la PDO y la NAO, que también afectan la hidro-climatología de Colombia a la escala de tiempo interanual. No parece existir una influencia de la oscilación cuasi-bienal de los vientos estratosféricos (QBO), con las precipitaciones en Colombia, a pesar de la fuerte componente cuasi-bienal existente en los registros de lluvia del país (**Zuluaga et al.**, 2001). Estas interacciones son altamente no lineales y por tanto difíciles de predecir. Otra complejidad proviene del hecho de que todos los eventos del ENSO son diferentes en duración y amplitud, entonces los efectos sobre la hidro-climatología del país son diferentes para cada

evento de El Niño. La evidencia se muestra en la Figura 3, en la cual se presenta la evolución de los caudales medios mensuales de cuatro ríos de Colombia: La Vieja (Cartago, Valle), Luisa (Pavo Real, Tolima), Sumapaz (El Profundo, Cundinamarca), y Lengupá (San Agustín, Boyacá). Allí se presentan los caudales correspondientes a los tres años alrededor de cada evento de El Niño, para los distintos eventos registrados (líneas de diferente color). Se observa la altísima variabilidad de los caudales durante las distintas ocurrencias del evento El Niño, aunque los promedios de los distintos eventos (línea roja más gruesa) confirman el fuerte efecto de El Niño durante el año (0, de inicio) y el año (+1, de finalización), con efecto mayor y más temprano sobre los ríos del occidente, pero más débil y más tardío sobre los ríos del oriente del país.

Desde el punto de vista físico se deduce que, además de los caudales medios mensuales, las dos fases del ENSO afectan los caudales extremos (máximos y mínimos) de distinto período de retorno. Cuando se quiere representar el comportamiento futuro de una variable hidrológica y se conoce una clara influencia de condiciones climáticas globales como el ENSO, no es apropiado emplear una única distribución de probabilidad debido a que la influencia que ejercen dichos fenómenos depende de su fase. En este caso, una serie de tiempo hidrológica se puede tomar como la combinación de varias series provenientes de diferentes distribuciones determinadas por las distintas fases del ENSO. Con estas distribuciones es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo, como la combinación de las probabilidades individuales en cada fase del fenómeno. Para ilustrar la pertinencia e importancia de este tipo de análisis discriminado por fases del ENSO, la Figura 4 muestra el ajuste de una función de distribución de probabilidades log-Normal a los caudales máximos anuales del Río Negro (estación Colorados, código 2306702 del IDEAM) durante los años El Niño, La Niña, y durante años normales. El análisis se ha efectuado según el procedimiento de **Waylen & Caviedes** (1986). Se observa que la función de distribución de probabilidades es muy diferente en cada caso. El análisis de los caudales máximos o mínimos anuales de diferente período de retorno, que son clásicos en diseño hidrológico, deben efectuarse diferenciando las fases del ENSO.

Se ha avanzado en el entendimiento de la dinámica del ENSO sobre Colombia, pero es necesario continuar las investigaciones. En particular, es preocupante ver el despliegue de resultados erróneos de los efectos del fenómeno El Niño sobre la hidrología Colombiana. Por ejemplo, en el reporte de IDEAM sobre los efectos de El Niño (www.ideam.gov.co/fenomenonino/DOCUMENTOEL

NINO.pdf), se indican excesos de precipitación en toda la costa Pacífica Colombiana durante la ocurrencia de El Niño. La evidencia muestra que la situación es exactamente la opuesta, es decir que se presenta una disminución de las lluvias sobre la costa Pacífica durante El Niño, como se observa en los registros en Buenaventura, Quibdó, Lloró y otras estaciones (no mostrados aquí).

4. Escala Anual

El ciclo anual de la hidro-climatología de Colombia está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este, la actividad del chorro del Chocó y de los sistemas convectivos de mesoescala. Nos referiremos a estos fenómenos, pero no podemos dejar de mencionar la importancia de la interacción suelo-atmósfera en la regulación del ciclo anual de la hidrología del país (**Cuarteras & Poveda**, 2002; **Vélez et al.**, 2002a).

4.1 Migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical

La oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que se da como resultado del ciclo anual de temperaturas superficiales por efecto de la insolación, constituye el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual (o semi-anual) de la hidro-climatología de Colombia. Sobre el centro de Colombia se presentan dos temporadas lluviosas (abril-mayo y octubre-noviembre), y dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto), como resultado del doble paso de la ZCIT sobre el territorio. En lugares extremos de la oscilación de la ZCIT, el ciclo anual es unimodal.

En la Figura 5 se muestra el ciclo anual de precipitación obtenido para estaciones sobre los Andes tropicales de Colombia. Es posible observar un comportamiento bimodal en todas las estaciones, con valores máximos en los períodos abril-mayo y octubre-noviembre, y valores mínimos en diciembre-enero y julio-agosto. Durante octubre-noviembre la ZCIT se encuentra desplazándose hacia el sur, para llegar a su máximo desplazamiento septentrional en el mes de enero (verano del hemisferio sur). Durante la temporada de abril-mayo, la ZCIT se encuentra desplazándose hacia el norte, buscando su posición más meridional durante el mes de julio (verano del hemisferio norte). La posición de la ZCIT está asociada con la intensidad de los vientos alisios del este del hemisferio contrario, y su oscilación no es simétrica alrededor del ecuador terrestre, ya que su posición media se

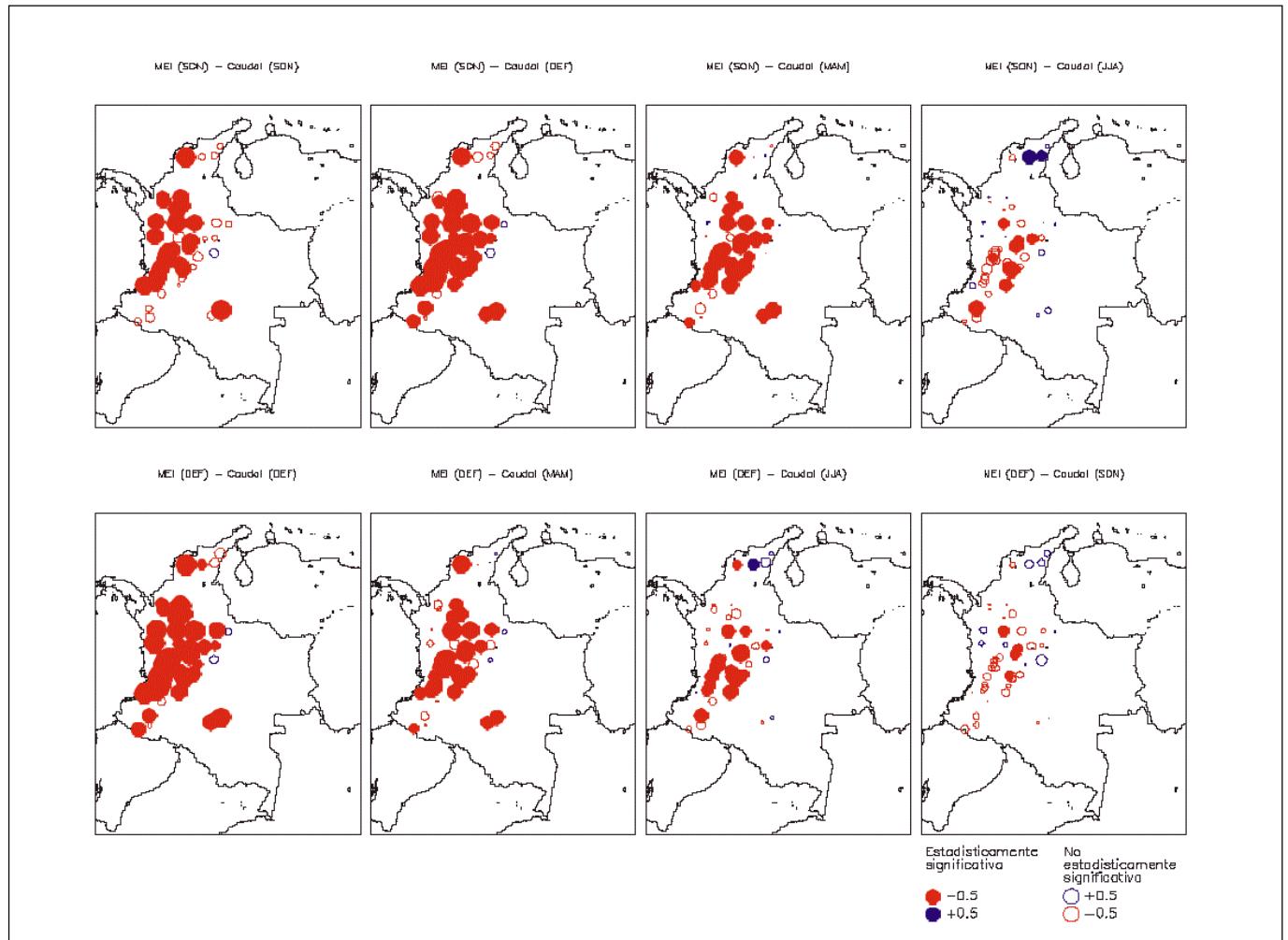


Figura 2. Mapas de las correlaciones trimestrales cruzadas entre la serie del Índice Multivariado del ENSO (MEI), en los trimestres de septiembre-noviembre (SON, arriba) y diciembre-febrero (DEF, abajo), con los registros de caudales medios de ríos de Colombia, durante los trimestres simultáneos y siguientes. El diámetro del círculo es relativo al valor del coeficiente de correlación de referencia (inferior derecha).

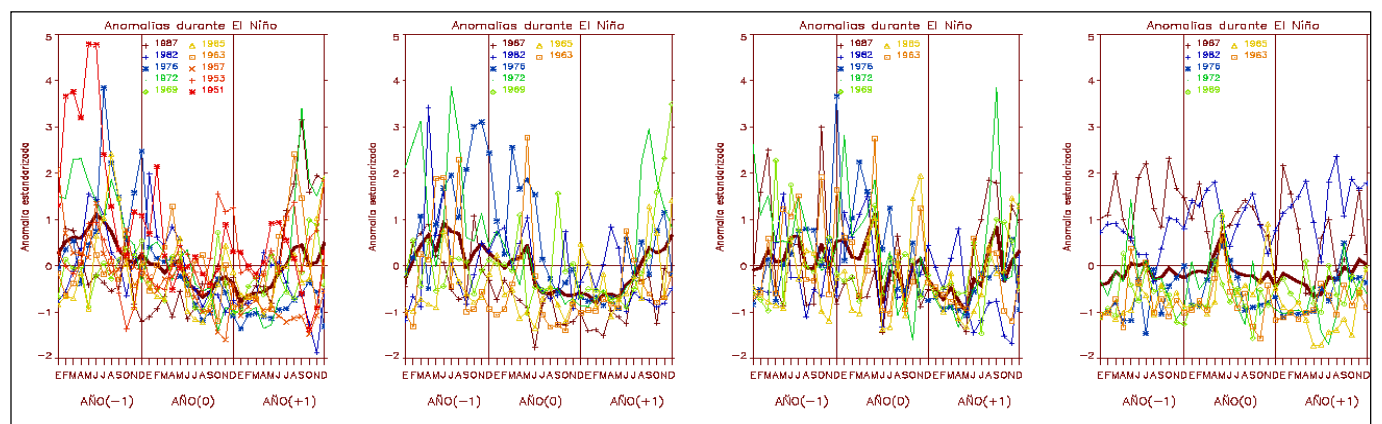


Figura 3. Evolución de las anomalías estandarizadas de los caudales medios mensuales de cuatro ríos de Colombia durante la evolución de eventos El Niño. El Año (-1) corresponde al año previo, el Año (0) corresponde al inicio de El Niño y el Año (+1) corresponde al año de finalización del evento. Las anomalías durante los distintos eventos El Niño se distinguen por el color. La línea gruesa denota el promedio de las anomalías en los eventos registrados de El Niño.

encuentra desplazada alrededor de 5°-10°N (**Philander et al.**, 1996). La ZCIT constituye el lugar preferente para la convergencia superficial de los vientos alisios, y es una región preferente de bajas presiones atmosféricas superficiales, ascenso de vientos húmedos, desarrollo de mecanismos de convección profunda, alta nubosidad y divergencia en la alta atmósfera. En la Figura 6 se muestra

el ciclo anual del campo de divergencia de vientos horizontales a los 925 hPa, y en la Figura 7 el correspondiente al campo de divergencia de vientos a los 200 hPa. La Figura 6 pone de manifiesto la posición de la ZCIT, ya que las zonas con valores negativos del campo de la divergencia de humedad, corresponden a alta convergencia superficial, y por tanto zonas de alta convección atmosférica que desencadena procesos de alta precipitación en el trópico. A su vez, la Figura 7 pone de manifiesto la alta divergencia en el nivel de 200 hPa, asociada con la circulación de la celda de Hadley sobre el trópico Americano. Los mapas de las Figuras 6 y 7 han sido estimados con información del Reanálisis climático del NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / Nacional Center for Atmospheric Research) de Estados Unidos, con información del período 1958-1998 (**Kalnay et al.**, 1996).

4.2 El Chorro del Chocó

El Océano Pacífico ejerce un control muy importante sobre la hidro-climatología de Colombia, en particular del occidente y centro del país (**Poveda**, 1998), pero a su vez las lluvias sobre los Andes de Colombia ejercen un efecto importante en las precipitaciones del Pacífico al frente de las costas Colombianas (**Mapes et al.**, 2003). Esta doble retroalimentación es un reto de investigación futura. La costa Pacífica de Colombia es una de las regiones más lluviosas del planeta, con precipitaciones sobre

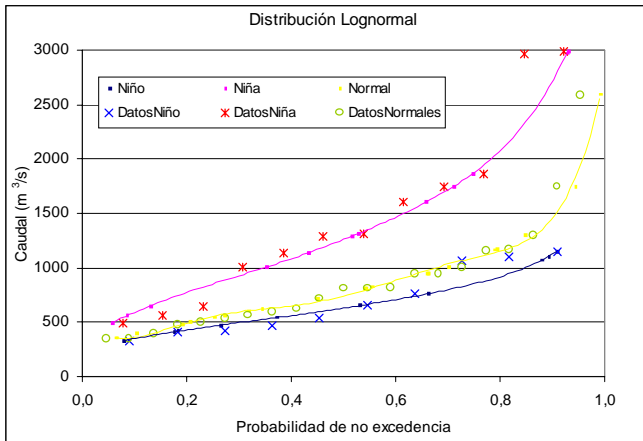


Figura 4. Función de distribución de probabilidad Log-Normal ajustada a los registros de caudales máximos anuales del río Negro (estación Colorados, Cundinamarca), discriminada según los años El Niño, La Niña y años Normales. La abscisa representa la probabilidad de no excedencia de los caudales máximos.

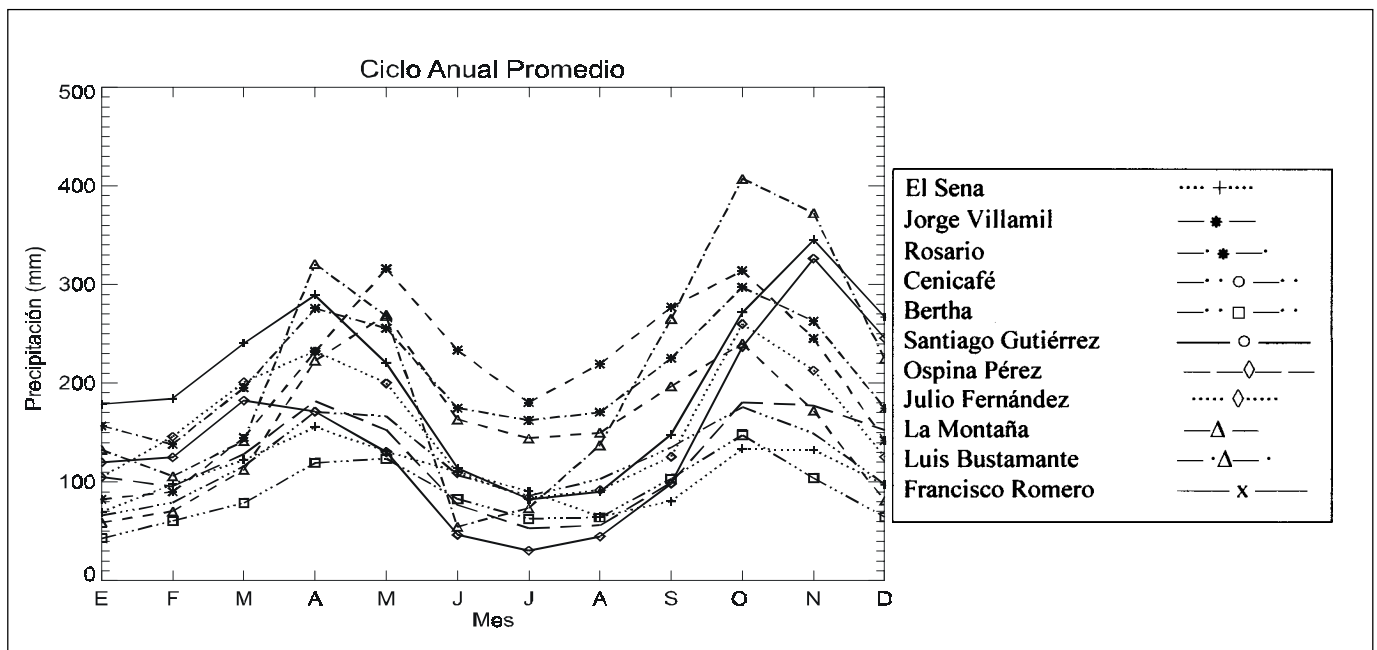


Figura 5. Ciclo anual promedio de la precipitación en diversas estaciones localizadas en los Andes de Colombia (**Poveda et al.**, 2001c).

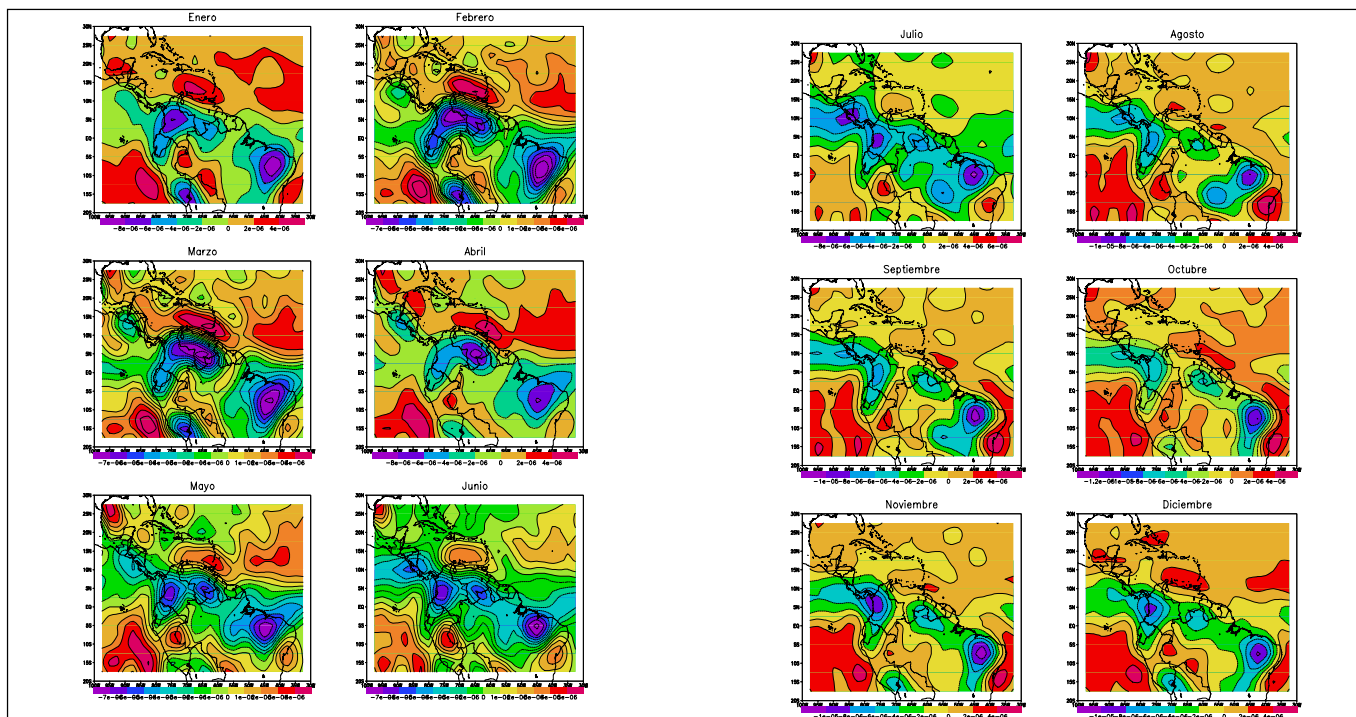


Figura 6. Ciclo anual promedio de la divergencia del viento horizontal [1/s] por 925 hPa, sobre el trópico Americano. Fuente de datos: Reanálisis Climático NCEP/NCAR para el período 1958-1998.

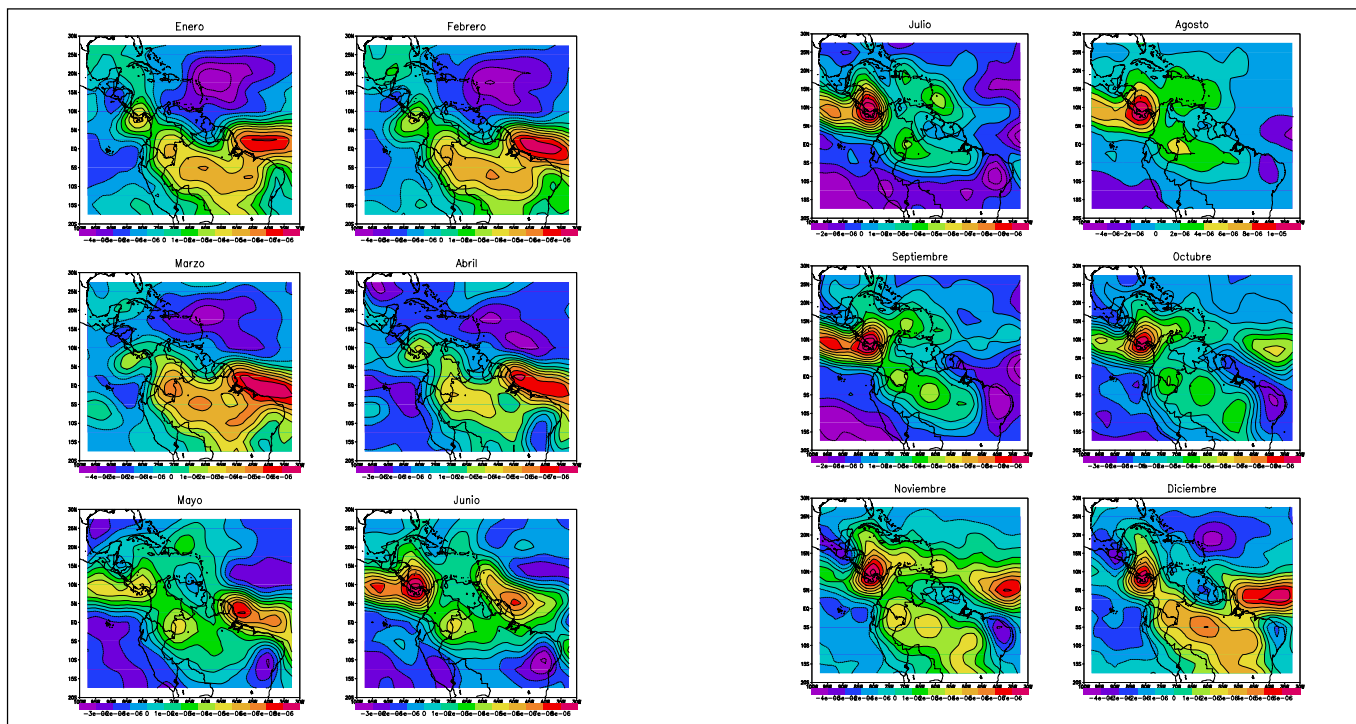


Figura 7. Ciclo anual promedio de la divergencia del viento horizontal [1/s] por 200 hPa, sobre el trópico Americano. Fuente de datos: Reanálisis Climático NCEP/NCAR para el período 1958-1998.

tierra entre 8.000 y 13.000 mm en el promedio anual (López, 1966; López & Howell, 1967; Arnett & Steadman, 1970; Snow, 1976, p. 371; Nieuwolt, 1977; Eslava, 1993). La distribución de la precipitación media anual sobre la región tropical de América del Sur no puede ser explicada únicamente en términos de la advección de humedad por los vientos alisios del este, desde el Caribe y la cuenca Amazónica.

La corriente de vientos en chorro del occidente de Colombia, o chorro del Chocó (Poveda, 1998; Poveda & Mesa, 1999 y 2000), transporta grandes cantidades de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior del país. Usando los datos del Reanálisis de NCEP/NCAR para el período 1958-1998, recientemente hemos estimado que el transporte de humedad promedio anual por los vientos del chorro del Chocó es de $3,78 \times 10^6$ kg/s ($11,9 \times 10^{13}$ kg/año), que equivalen a $3774 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua; casi la mitad del caudal del río Magdalena en su desembocadura. El chorro del Chocó interactúa con la topografía de los Andes occidentales y con los vientos alisios del este para favorecer la convección profunda y que contribuye a producir grandes cantidades de precipitación sobre el occidente del país. La corriente de chorro del Chocó es una corriente de chorro tropical de bajo nivel según la caracterización de Hastenrath (1991, p. 132).

El chorro del Chocó exhibe todos rasgos característicos de los chorros superficiales, según la caracterización de Stensrud (1996). Los vientos del chorro del Chocó exhiben un marcado ciclo anual, siendo más fuertes en los meses de septiembre-noviembre y más débiles durante los meses de febrero-marzo. Tal comportamiento contribuye a explicar las razones por las cuales la segunda temporada lluviosa de septiembre-noviembre es más intensa que la primera de abril-mayo en muchas partes del occidente de Colombia. La corriente de chorro del Chocó obtiene su energía del gradiente de temperaturas superficiales que existe entre la zona de temperaturas más frías de la llamada "lengua fría" de las aguas del Pacífico en Ecuador y Perú, y las temperaturas más cálidas del Pacífico al frente de las costas de Colombia. Este gradiente de temperaturas está asociado con presiones atmosféricas superficiales que inducen la circulación de los vientos desde el Pacífico al interior de Colombia; vientos alisios trans-ecuatoriales del Pacífico que se recurvan e ingresan por el oeste de Colombia.

En la Figura 8 se presenta el ciclo anual del transporte de humedad por los vientos de la corriente del chorro del Chocó, y su comportamiento durante los eventos de El Niño y La Niña. Se observa que el índice del chorro del Chocó se debilita durante El Niño y se intensifica duran-

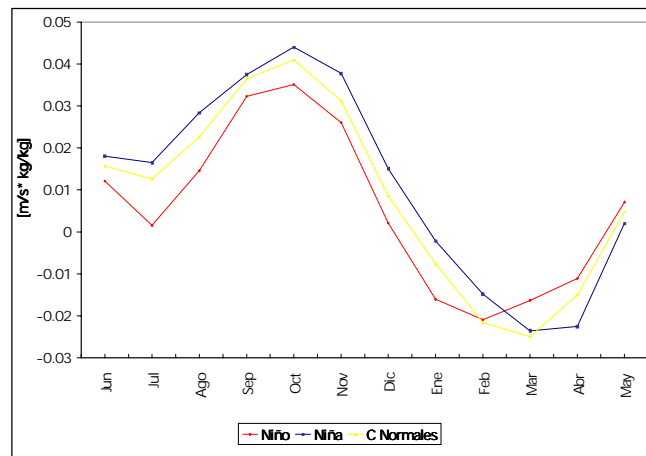


Figura 8. Ciclo anual del transporte de humedad por los vientos de la corriente del chorro del Chocó, y su comportamiento durante los eventos de El Niño y La Niña (Rendón, 2001). El año hidrológico se considera de junio (Año 0) a mayo (Año +1).

te La Niña. Esto contribuye a explicar las anomalías hidrológicas en Colombia durante ambas fases del ENSO. Eso mismo sucede con el gradiente de temperaturas del mar sobre el Océano Pacífico que energizan los vientos del chorro del Chocó (Rendón, 2001; Poveda, 2002), lo cual es consistente con la disminución de las lluvias y los caudales de los ríos colombianos durante El Niño, en particular del centro y occidente del país.

En la Figura 9 se presenta el perfil vertical de los flujos zonales de humedad en 77.5°O y 5°N . La advección de humedad hacia Colombia es más fuerte en el trimestre SON, alcanzando valores hasta de $600 \text{ mm}/\text{mes}$, ya que el chorro del Chocó se presenta desde el Ecuador, de manera débil, se va intensificando hasta alcanzar su máximo hacia $5\text{E}-6\text{EN}$, y luego disminuye cerca de los 10°N . Se observa una fuerte advección de humedad hacia Colombia (del oeste) en JJA y se intensifica en SON, de los 800 hPa hacia abajo, correspondiente con la dinámica de transporte de humedad por los vientos del chorro del Chocó (Cuartas, 2001). Los efectos de ambas fases del ENSO son obvios en la Figura 9.

Existen dos corrientes de vientos en chorro del este de latitud tropical, actuando sobre la geografía de Colombia. Una primera corriente de chorro del este a la altura de los $700-600 \text{ hPa}$, que penetra al continente suramericano proveniente del Océano Atlántico y que es posible detectarla desde el oeste de África, y la segunda se presenta sobre el mar Caribe, pasa sobre la Guajira y San Andrés. Ver los detalles en los trabajos de Poveda (1998), y Poveda & Mesa (1998).

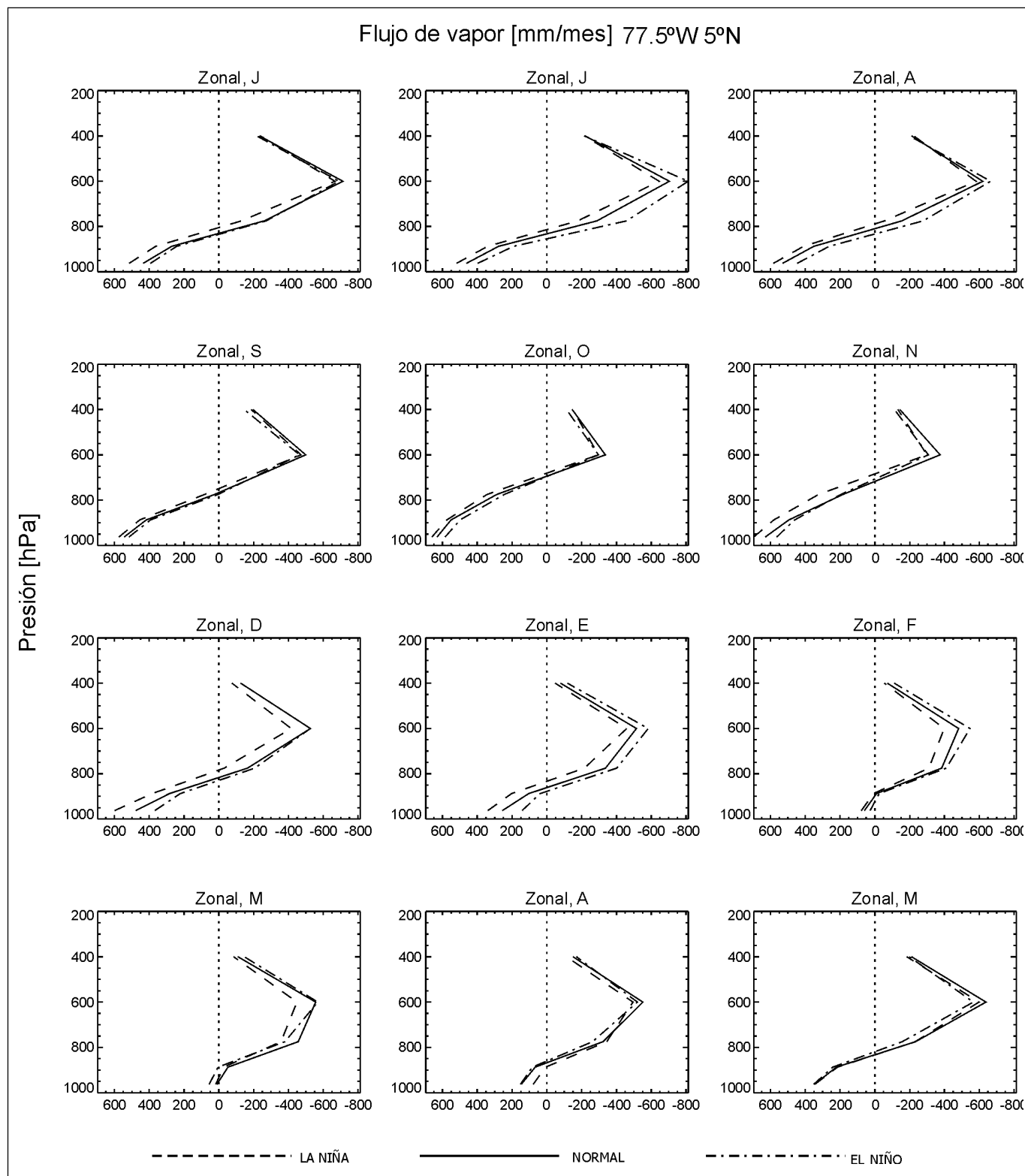


Figura 9. Ciclo anual (junio-mayo) de los perfiles verticales de flujo de humedad zonal [mm/mes] en 77.5°O y 5°N, para los años normales y años El Niño y La Niña (Cuartas, 2001).

4.3 Sistemas Convectivos de Meso-escala

Muchos de los eventos más intensos de precipitación en Colombia se desarrollan en Sistemas Convectivos de Meso-Escala (SCM). La presencia y algunos rasgos de la dinámica de los SCM en el territorio de Colombia fue evidenciada por **Velasco & Frisch** (1987). El trabajo de **Poveda** (1998) conecta la dinámica del chorro del Chocó con la de los SCM sobre el Pacífico Colombiano. El chorro del Chocó y las ondas de gravedad que se generan térmicamente en la atmósfera de Colombia tienen un efecto discernible sobre la precipitación al oeste del país (**Mapes et al.**, 2003). La importancia del ciclo diurno en la dinámica de los SCM y los ambientes atmosféricos (dinámicos, termodinámicos y cinemáticos) en los cuales se desarrollan los SCM se han comenzado a estudiar en **Mejía & Poveda** (2003 a y c), mediante información de satélite de la misión TRMM (“Tropical Rainfall Measuring Mission”), para el año 1998. El diagnóstico permitió identificar la ocurrencia 75.616 eventos durante 1998, con una frecuencia un poco mayor sobre la región oceánica (53.1%) que sobre el continente (46.9%). Del total, sólo se desarrollaron SCM en un 7.1% de los eventos oceánicos y en un 5.9% de los continentales, pero su contribución al total de precipitación anual es extraordinariamente alta, sobre océano (44%) y sobre el continente (38%). La distribución espacial de los eventos con y sin SCM está fuertemente determinada por la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Inter-tropical, durante el ciclo anual. La Figura 10 muestra un sistema convectivo de mesoescala sobre el territorio de Colombia, y la Figura 11

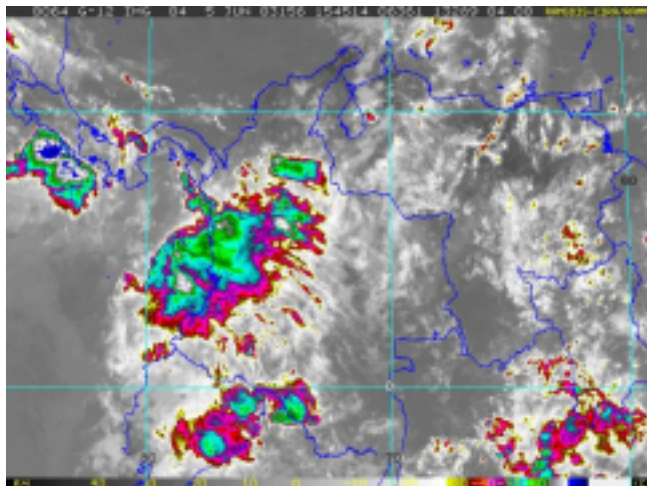


Figura 10. Imagen del satélite geoestacionario GOES, mostrando un sistema convectivo de meso-escala sobre el occidente de Colombia, el 5 de junio de 2003, a las 15:45 UTM.

muestra el ciclo anual de los eventos de precipitación con SCM sobre Colombia, durante 1998. Una de las zonas cuyo ambiente atmosférico es más favorable para la formación de eventos con SCM está al este del Pacífico y sobre la Costa Pacífica Colombiana. Sobre la región Andina en Colombia, el valle del Río Magdalena y el Norte de Antioquia presentan la mayor cantidad de SCM. La cuenca Amazónica y la región del Orinoco en Colombia también presentan alta frecuencia de SCM. Las zonas con menos densidad de eventos están al norte de Colombia y Venezuela y al occidente del Perú. Se observó un predominio de los mayores tamaños de los eventos sobre el océano durante 1998, así como los mayores valores de la intensidad promedio de precipitación en el primer trimestre de 1998, posiblemente asociado a los efectos oceánicos de El Niño.

4.4 Balance de Humedad Atmosférica

El trabajo de **Cuartas** (2002) marca un hito al haber estimado el balance de humedad atmosférica en Colombia, usando la ecuación de largo plazo de conservación de agua atmosférica, con los datos del Reanálisis NCEP/NCAR para el período 1958-1998. Allí se hace el análisis de los flujos de humedad que entran y salen de Colombia, mediante un volumen de control que definido entre 77,5°O y 67,5°O, y entre 2,5°S y 10°N, y en la vertical de 1000 hPa a 300 hPa. La estimación del balance neto de humedad atmosférica de largo plazo, sobre Colombia, es de 1914 mm ± 131 mm (**Cuartas & Poveda**, 2002). La precipitación promedio de largo plazo de 2898 mm/año. La cuantificación de la evaporación real depende del método usado para su cálculo. El estudio de **Vélez, Poveda & Mesa** (2000) presenta una estimación de distintos campos distribuidos de la hidroclimatología de Colombia, y ha dado lugar a la construcción del “Atlas Hidrológico de Colombia” en lenguaje Java, “HidroSIG Java” (**Vélez et al.**, 2002b; **Poveda et al.**, 2003). Allí se ha estimado que la evaporación promedio sobre Colombia es de 1361 mm/año, según el método de la relación complementaria de **Morton** (1983, 1978), y de 1146 mm/año, según el método de Penman. Según la información del Reanálisis NCEP/NCAR para el período 1958-1998, la evaporación promedio multianual sobre Colombia es estimada en 1420 mm/año.

En la Figura 12 se muestran los flujos de humedad zonal y meridional como promedio multianual. La mayor advección de humedad hacia Colombia se presenta en los niveles bajos de presión, y en todas las direcciones. Esta humedad proviene principalmente de los vientos alisios del este y alisios del oeste. El influjo neto entre los 1000 y 925 hPa es igual a 5156 mm/año, entre los 925 y 850 hPa es de 4163 mm/año, y de los 850 hPa hasta el tope de

la atmósfera se da un flujo neto total de humedad fuera de Colombia igual a 3603 mm/año, para un flujo neto total de 5716 mm/año, entrando a Colombia. Hacia el este, el influjo total es igual a 24541 mm/año. Al oeste el influjo de humedad se da en los niveles bajos de presión (entre 1000 y 925 hPa), principalmente a cargo de los vientos del chorro del Chocó, y en los demás niveles se da un transporte de humedad del interior de Colombia hacia el Pacífico tropical. En promedio, al oeste de Colombia el transporte de humedad hacia fuera del país es de 13966 mm/año. Al sur y norte del país se presenta influjo de humedad en los niveles bajos, como ya se dijo, y en los niveles medios y altos se da un fuerte transporte de humedad fuera de Colombia, siendo en promedio de 2686 y 2173 mm/año, por el sur y el norte de Colombia, respectivamente. También se encontró que el mayor transporte de humedad hacia Colombia se da en los trimestres diciem-

bre-febrero y marzo-mayo, con valores promedio de 607 y 505 mm/año, respectivamente. En la Figura 12 se observa que la mayor advección de humedad se presenta por la componente zonal de los vientos, ya que estos transportan mayor cantidad de humedad hacia Colombia (Cuartas, 2001). Durante la ocurrencia de las dos fases del ENSO, la advección neta de humedad hacia Colombia cambia significativamente, con valores de 5036 mm/año en los años El Niño, y de 6690 mm/año en los años La Niña, y en los años normales de 5736 mm/año.

5. Escala Intra-anual

Los fenómenos que mayor influencia ejercen sobre la hidro-climatología de Colombia a la escala intra-anual (días a estaciones), son las oscilaciones de 30-60 días (Poveda, 1998; Hoyos, 1999; Poveda *et al.*, 2002), las

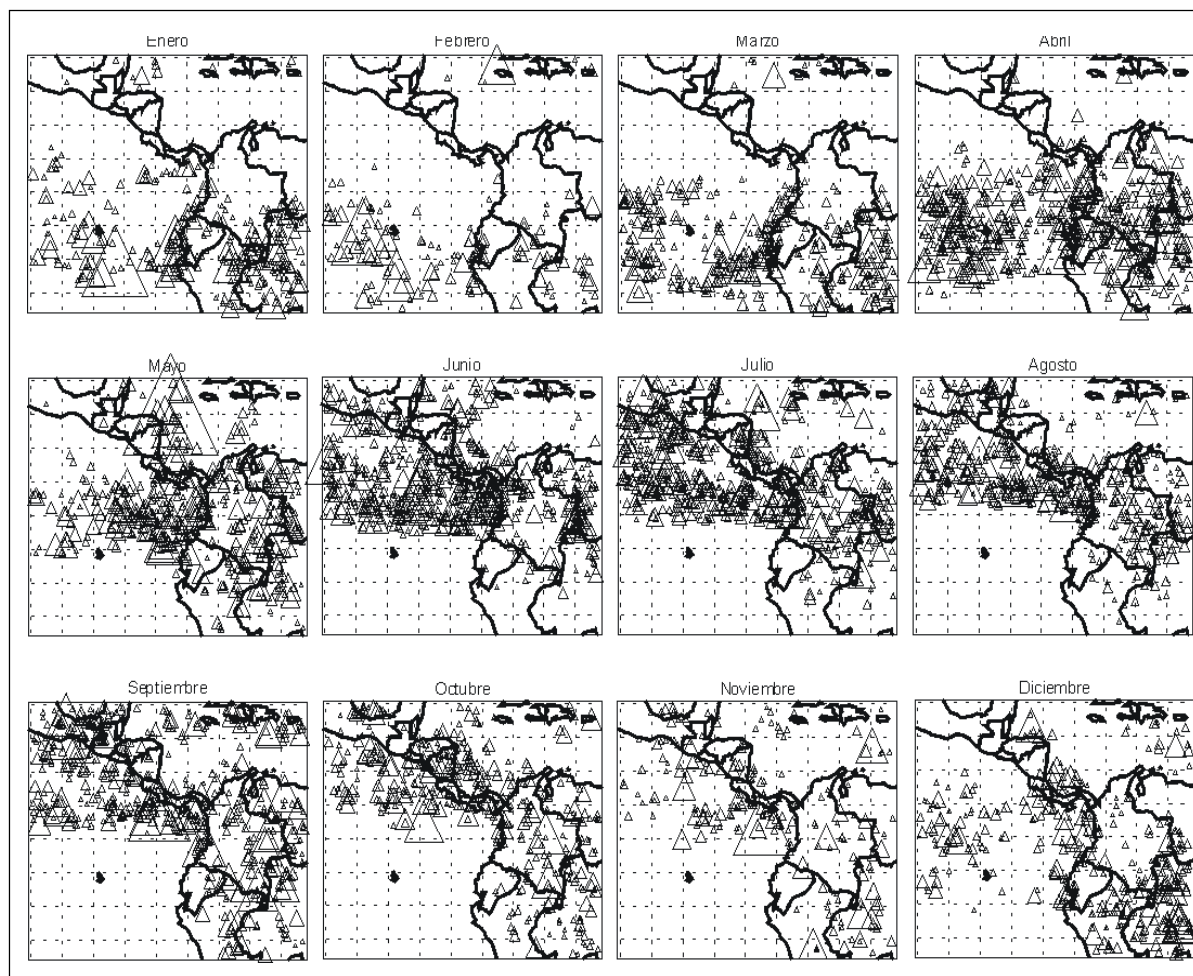


Figura 11. Ciclo anual de la distribución espacial de los eventos mostrados en la Figura 3 para 1998. Fuente de los datos: PR (2A25) y TMI (1B11) de TRMM. El tamaño del triángulo es correlativo con la intensidad del SCM (Mejía, 2001).

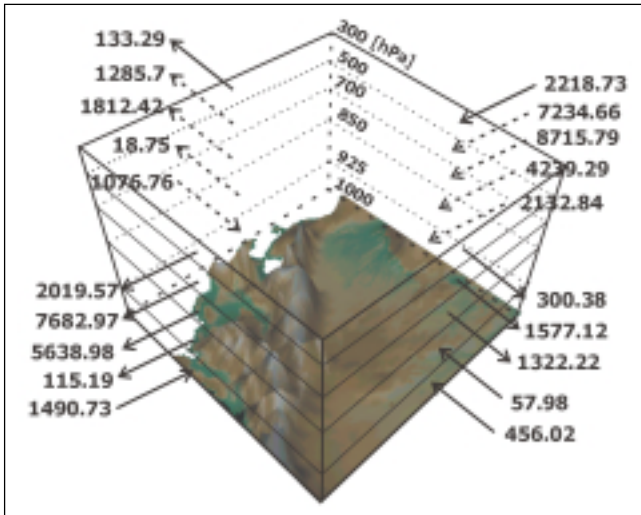


Figura 12. Valores medios de los flujos de humedad sobre la columna atmosférica de Colombia, usando la información del Reanálisis NCEP/NCAR, durante el período 1958-1998 (Cuartas & Poveda, 2002).

ondas tropicales del este (Martínez, 1993; Poveda *et al.*, 2002), los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico oriental norte (tesis de huracanes, Poveda *et al.*, 2002), y en las épocas del hemisferio de invierno se presentan frentes fríos que pueden alcanzar la geografía de Colombia. Los fenómenos de la interacción suelo-atmósfera a través del control de la evaporación por la humedad de suelo, y la precipitación reciclada también juegan un papel importante en la modulación de la hidro-climatología de Colombia. En aras de la brevedad sólo se hará referencia a los dos primeros fenómenos.

5.1 Oscilaciones de 30-60 días

La variabilidad de baja frecuencia en los trópicos está dominada por variaciones interanuales asociadas con el ENSO y con variaciones intra-anales asociadas con la oscilación de Madden-Julían (Madden & Julián, 1971, 1972), también llamada oscilación intra-anual. Esta última exhibe variabilidad en la escala de tiempo intra-estacional, con períodos de 30-60 días, dominante en

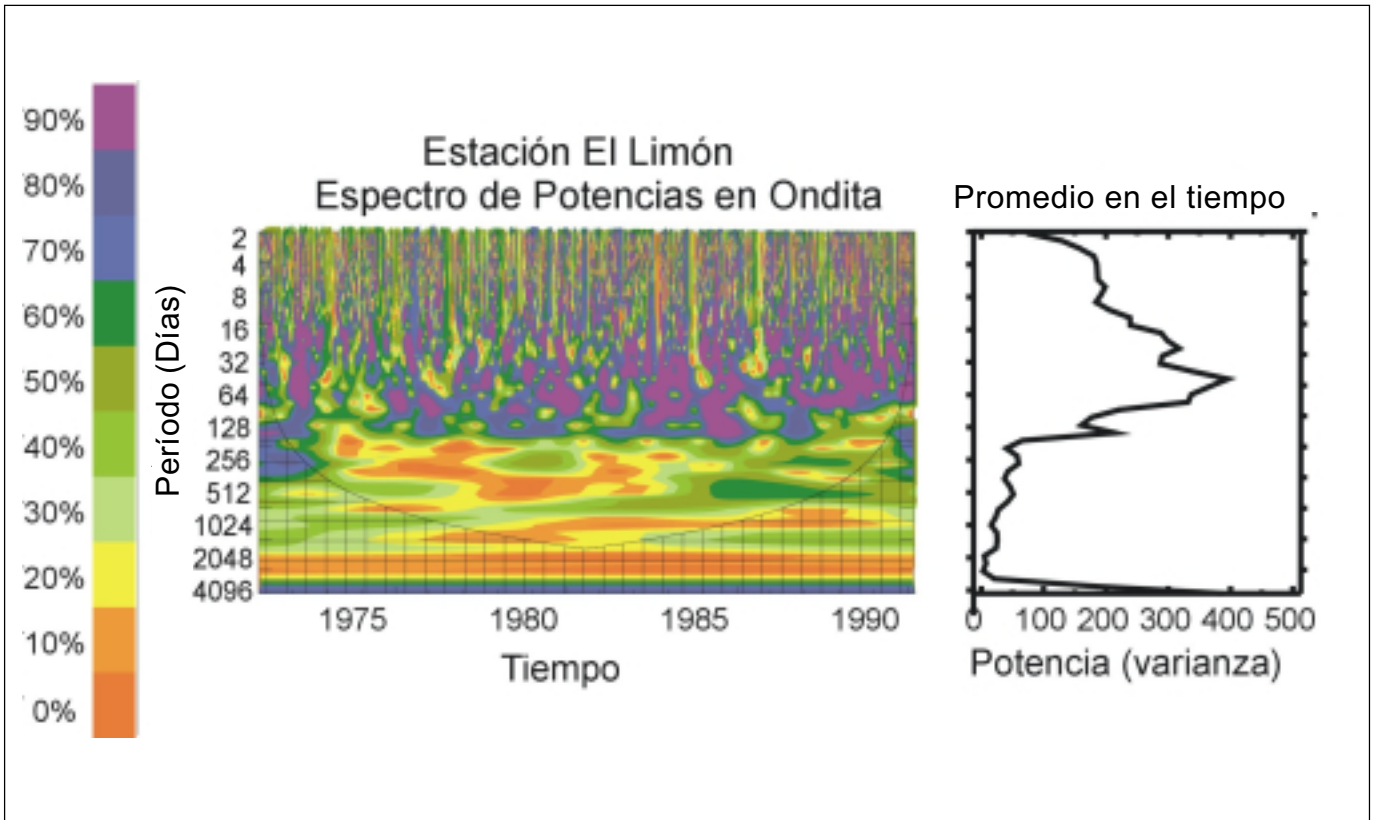


Figura 13. Espectro de potencias localizado, estimado mediante onditas para la serie de precipitación diaria en la estación El Limón (03°40'N, 75°35', altura 990 m), en el período enero 1971- diciembre 1995. La barra de colores indica el porcentaje de la varianza explicada. El cono de influencia achurado en la parte inferior define la región no significativa del espectro.

los trópicos y asociada con una celda de circulación orientada en sentido zonal y con propagación hacia el este. Las anomalías en forma de ondas pueden ser trazadas desde el Océano Índico al Océano Pacífico central y vía Hawai hasta América Central y el norte de América Latina (**Lau & Chan**, 1988). La oscilación de 30-60 días parecería estar relacionada al comienzo y al decaimiento del ENSO, al excitar las inestabilidades del sistema acoplado océano-atmósfera (**Zebiak**, 1989; **Weickmann**, 1991). Sobre Sur América tropical, el modo de oscilación principal de las fluctuaciones climáticas en la banda espectral intra-anual, está en la oscilación de 30-60 días, que se reflejan en el patrón de anomalías de OLR a los 250 mb para el período de 12 años 1979-1990 (**Mo & Kousky**, 1993).

Para ilustrar el efecto de la actividad de las ondas de 30-60 días, la Figura 13 muestra el espectro de potencias en onditas, para la serie de precipitación diaria de la estación El Limón (03°40'N, 75°35'O, altura 990 m; ver **Agudelo, Arias & Salazar**, 2001). La transformada en ondita (**Torrence & Compo**, 1998) permite descomponer una serie de tiempo en el dominio tiempo-frecuencia, y por tanto es posible determinar los modos dominantes de variabilidad, y cómo varían tales modos con el tiempo. La función de tal transformada se define mediante

$$W(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \psi_{\lambda, t}(u) du, \text{ para } \lambda > 0, \quad (1)$$

donde λ es el parámetro de escala (dilatación), t es el parámetro de localización (traslación) y $\Psi(t)$ es la ondita madre. Una constante de normalización, $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, es escogida de tal manera que $\int |\psi_{\lambda, t}(u)|^2 du = \int |\psi(t)|^2 dt$, para todas las escalas. En este trabajo se usa la ondita madre de Morlet, definida mediante $\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$. La transformada en onditas, $W_n(s)$, de una secuencia discreta x_n se define como la convolución de x_n con una versión escalada y trasladada de $R_0(0)$. Debido a que la función en ondita $R(0)$ es en general una función compleja, la transformada en ondita $W_n(s)$ también es compleja. Entonces la transformada puede ser dividida en una parte real, $U\{W_n(s)\}$, y una parte imaginaria $T\{W_n(s)\}$, con amplitud, $*W_n(s)*$, y fase, $\tan^{-1}[T\{W_n(s)\}/U\{W_n(s)\}]$. Finalmente, es posible definir el espectro de potencias en onditas como $*W_n(s)*^2$. La Figura 13 permite observar las épocas durante las cuales la banda entre 30-60 días es dominante (color violeta) durante el período de registro. En los trabajos de **Agudelo, Arias & Salazar** (2001), **Vieira & Moreno** (2001) y **Álvarez & Toro** (2001), se ha encontrado que la fase de la oscilación de Madden-Julian afecta fuerte-

mente el ciclo diario de la precipitación en Colombia. Durante la fase oeste se incrementan las precipitaciones en Colombia, en comparación de las cantidades de lluvia que ocurren durante la fase este (ver también **Poveda et al.**, 2002).

5.2 Ondas Tropicales del Este

Es bien conocida la existencia de perturbaciones de verano y otoño (junio-noviembre), sobre el Atlántico tropical norte (**Piersig**, 1936). Se trata de ondas atmosféricas con circulación ciclónica, las cuales se desplazan desde el occidente de África hacia el Atlántico, con un período entre 4-8 días y una longitud de onda de 2000 km. Tales ondas fueron observadas por primera vez en los vientos alisios del este en el mar Caribe en 15°N y 20°N (**Riehl**, 1945; **Riehl & Malkus**, 1958). La existencia de perturbaciones ondulatorias con longitudes de onda entre 3.000 y 4.000 km, velocidad de propagación entre 8-10 m/s y período en el rango de 4-5 días en la ZCIT, fue descubierta por **Chang** (1970) a través de análisis de fotografías diarias de satélite. Las principales características de estas ondas se presentan en **Wallace** (1971), y se relacionan en **Poveda** (1996), y en **Mesa, Poveda & Carvajal** (1997). Las ondas tropicales del este constituyen la génesis de los huracanes sobre el Atlántico Norte y el mar Caribe. El número de tormentas tropicales y huracanes en el Atlántico tropical y el mar Caribe se reduce durante El Niño (**Gray & Sheaffer**, 1992), lo cual indica también una reducción en la cantidad e intensidad de ondas del este. Estas ondas evidentemente pasan por la geografía de Colombia en su camino hacia el Océano Pacífico, y constituyen una fuente importante de variabilidad climática y de precipitaciones, en particular en la zona de la costa del Caribe, el valle de río Magdalena y el oriente del país (**Martínez**, 1993). Para ilustrar el efecto de la actividad de las ondas del este y su variabilidad durante las dos fases del ENSO, la Figura 14 muestra los espectros de potencias en onditas, de la serie de precipitación diaria en la estación Manuel María Mallarino (04°13'N, 76°19'O, altura 1380 m), durante tres años contrastantes del fenómeno ENSO: La Niña (1988), normal (1984) y El Niño (1992). El espectro se muestra para el período junio-noviembre, que coincide con la actividad de las ondas del este. Se observa que la banda de frecuencias entre 4-8 días es muy fuerte a través de todo el registro, excepto tal vez en el período comprendido entre fines de agosto y comienzos de septiembre. Los resultados indican pocas diferencias entre el año La Niña y el año Normal, aunque las bandas de alta frecuencia aparecen más fuertes durante septiembre y octubre durante La Niña. Por el contrario, los resultados para el año El Niño revelan una reducción drástica

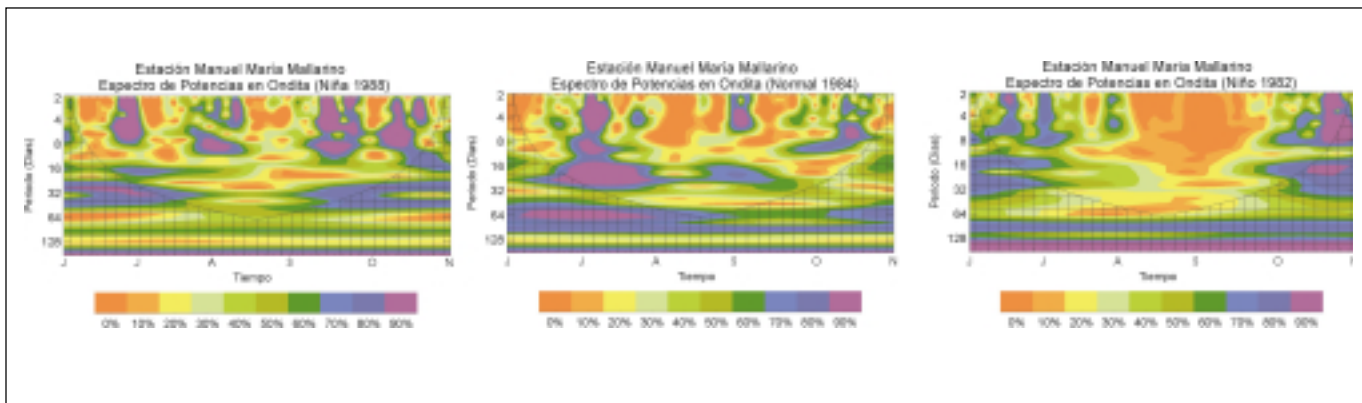


Figura 14. Espectros de potencia localizados, usando la transformada en ondda, para la serie de registros de precipitación diaria en la estación Manuel María Mallarino (ver localización en el texto), durante tres años de diferente fase del fenómeno ENSO. En el eje de las abscisas se muestra el período junio-noviembre en los años de La Niña (1988, izquierda), Normal (1984, centro), y El Niño (1982, derecha). La barra de colores indica la varianza explicada (Agudelo, Arias & Salazar, 2001).

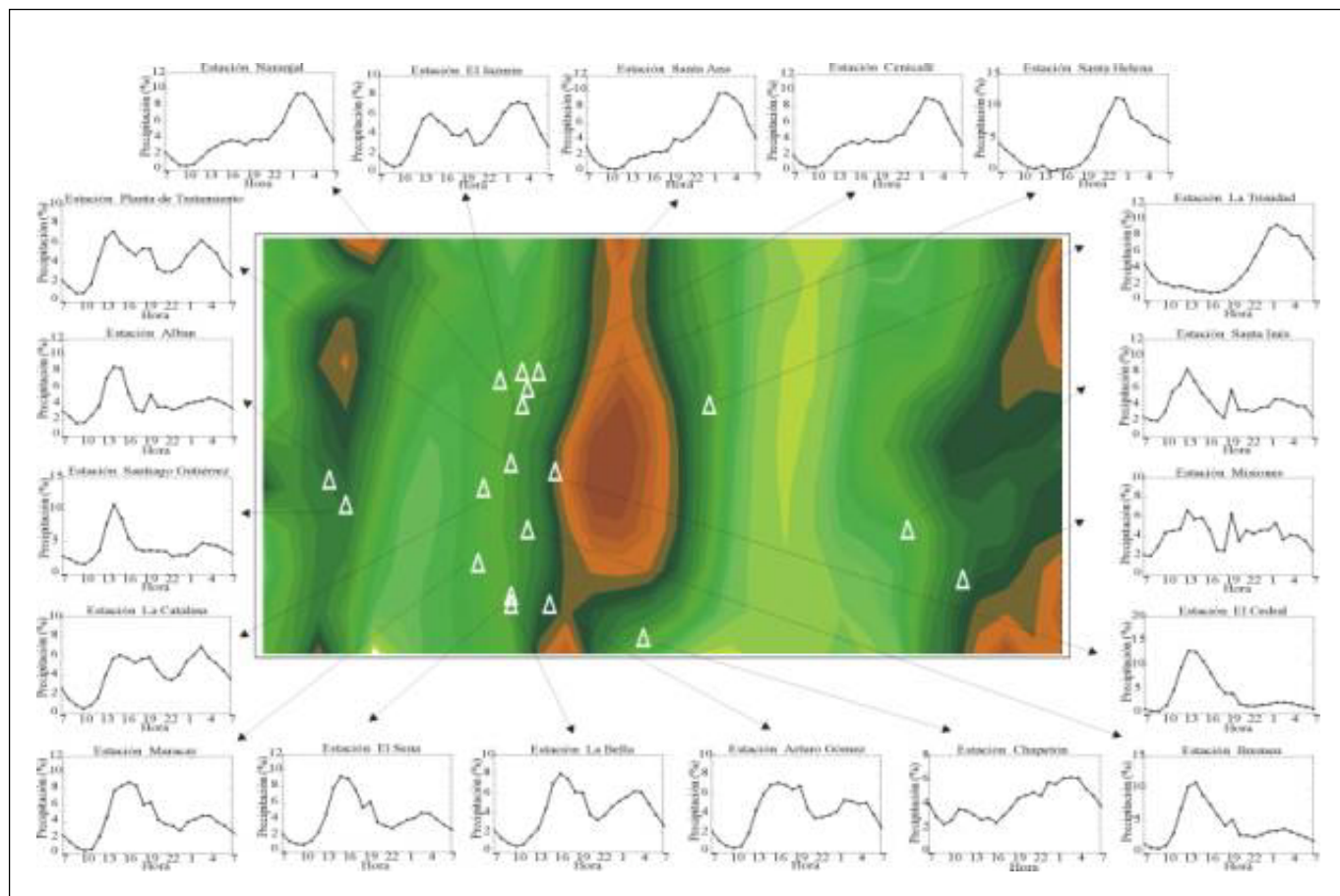


Figura 15. Distribución del ciclo diario (24 horas desde las 7:00 a.m.) de precipitación promedio de largo plazo, en estaciones localizadas sobre el centro de los Andes tropicales de Colombia. Los colores del mapa corresponden a la topografía de la cordillera central dominando el centro de la gráfica, con los valles de los ríos Magdalena y Cauca a derecha e izquierda, respectivamente. La región está comprendida entre las latitudes 4E27°N y 5E01°N y las longitudes 74E y 76E20°O.

de las bandas de alta frecuencia durante julio-septiembre, lo cual contribuye a explicar los mecanismos físicos por los cuales la precipitación se reduce drásticamente en Colombia durante los eventos de El Niño.

6. Escala Diurna

La amplitud del ciclo diurno de temperaturas es la característica más dominante de la variabilidad climática en el trópico, porque excede en mucho el rango de temperaturas medias del ciclo anual (**Hastenrath**, 1991, p. 6). El ciclo diurno de temperaturas, resultante del ciclo de insolación superficial es un factor fundamental en la formación, desarrollo e intensidad de la convección profunda, mecanismo muy importante en la génesis de la lluvia tropical. El ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes tropicales de Colombia ha sido comenzado a estudiar en los trabajos de **Agudelo et al.**, (2001), **Vieira & Moreno** (2001), **Álvarez & Toro** (2001), y **Poveda et al.**, (2002a, 2002b). La Figura 15 despliega los diagramas del ciclo diurno (24 horas desde las 7:00 a.m.) promedio de largo plazo de la precipitación, en sitios localizados sobre los Andes de Colombia. Los diagramas muestran el porcentaje de lluvia que cae a determinada hora del día. De la Figura 15 se desprenden varias conclusiones: (1) el ciclo diurno de las lluvias en Colombia es altamente variable en el espacio; (2) las estaciones exhiben picos unimodales o bi-modales (semi-diurnos), con una influencia muy fuerte de factores locales (**Poveda et al.**, 2003b), y por tanto la búsqueda de patrones regionales coherentes es un reto para la investigación futura. (3) El período comprendido entre las 8:00 a.m. y las 11:00 a.m., es el de menor probabilidad de lluvia en todos los Andes de Colombia. (4) Las estaciones localizadas sobre la vertiente oriental de la cordillera central presentan ciclo diurno uni-modal con precipitaciones de madrugada. (5) El comportamiento del ciclo diurno es variable durante los distintos meses del año, de manera que la uni-modalidad en una estación de registro, durante ciertas épocas del año puede convertirse en bi-modalidad durante otras épocas. Los mecanismos físicos que explican tal comportamiento variable del ciclo diurno tienen que ver con el ciclo diurno de insolación, con procesos de la interacción suelo-atmósfera, con la dinámica diurna de los Sistemas Convectivos de Meso-Escala, y con la circulación de vientos locales y de escala sinóptica, dentro y sobre los valles y vertientes Andinas. Este es un tema de central importancia en el entendimiento de la hidroclimatología de Colombia, sobre el cual merece profundizarse la investigación.

7. Conclusiones

El clima varía de forma natural en todas las escalas temporales, y el cambio ambiental global por acción antropogénica está aumentando la complejidad del sistema climático. Ello confunde y oscurece la capacidad de predicción climática en todas las escalas de espacio y tiempo, pero el entendimiento y predicción de tal variabilidad es un reto central para las ciencias terrestres. Este trabajo ha recorrido algunos aspectos de la variabilidad de la hidro-climatología de Colombia, en un rango de escalas temporales que abarcan desde la escala inter-decadal, dominada por tendencias de largo plazo en las principales variables hidrológicas y climáticas, hasta el ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes tropicales. Los fenómenos más importantes que influyen el clima del país a escalas de tiempo interanual se refieren al ENSO y sus dos fases: El Niño y La Niña, pero otros como la Oscilación del Atlántico Norte, y la Oscilación Decadal del Pacífico ejercen un efecto no despreciable, que merece ser entendido en sus interacciones no lineales con el ENSO. El ciclo anual está dominado por la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical, por la dinámica del transporte de humedad por los vientos alisios superficiales del este (**Eslava et al.**, 2002, Revista Academia de Ciencias), así como la circulación de vientos de media y alta atmósfera (**Cuartas & Poveda**, 2002). Estos interactúan con la dinámica de transporte de humedad por los vientos del Chorro del Chocó, y éste a su vez con el ciclo diurno inherente a los Sistemas convectivos de meso-escala, tanto oceánicos como sobre tierra (**Mejía & Poveda**, 2002). La escala intra-anual está fuertemente influenciada por las oscilaciones intra-estacionales de 30-60 días, por las ondas tropicales del este, por los huracanes, y los frentes fríos de altas latitudes.

El clima y el tiempo atmosférico tropicales no sólo responden a fenómenos macro-climáticos, a fenómenos de meso-escala o de escala sinóptica. Esta es una visión muy parcial y limitada que se debe superar, dadas las reducidas escalas espaciales y la importancia de la escala vertical en los mecanismos de convección profunda que dominan la lluvia tropical. Un tema central hacia el futuro es el entendimiento a fondo del papel que juega la interacción suelo-atmósfera en el clima de Colombia, y el papel de control climático que juega la humedad de suelo, y la evapotranspiración para alimentar la precipitación tropical. La precipitación reciclada está entre el 30% y 40% sobre Colombia (**Cuartas & Poveda**, 2002), pero este resultado debe ser entendido en el marco de las distintas escalas espaciales. Este tema es fundamental para entender los balances de agua, energía y Carbono sobre el bosque tropical lluvioso de la Amazonia y del Darién-

Chocó, así como del bosque tropical Andino. Además, estos factores son centrales para poder entender la altísima variabilidad identificada en el ciclo diurno de la precipitación sobre los Andes de Colombia. Es necesario insistir en la necesidad que el IDEAM establezca un programa de medición de la atmósfera Colombiana, que sea acorde con la complejidad de la circulación atmosférica sobre la geografía de Colombia, en particular sobre las regiones Andina, Amazónica y Pacífica.

Agradecimientos

A la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por el alto honor de designarme como Miembro Correspondiente. Esta síntesis es resultado de investigaciones realizadas durante la última década, y ha sido posible gracias a la colaboración y enseñanzas de muchos colegas y estudiantes. Entre ellos, debo reconocer los valiosos aportes de Óscar José Mesa, Jaime Ignacio Vélez, Jesús Eslava, Álvaro Jaramillo, Edgar Montealegre, Stefan Hastenrath, Cécile Penland, Henry Díaz, Peter Waylen, Vijay Gupta, Brian Mapes, Bruce Milne, Andrés Ochoa, Carlos Ariel Pérez (q.e.p.d.), Luz Adriana Cuartas, John Freddy Mejía, Carlos David Hoyos, Marta María Gil, Natalia Quiceno, Ricardo Mantilla, Claudia Rave, Hernán Moreno, Sara Cristina Vieira, Paola Andrea Arias, Luis Fernando Salazar, Paula Andrea Agudelo, Vladimir Toro, Manuel Zuluaga, y Ángela María Rendón.

Bibliografía

- Agudelo P. A., P. A. Arias, & L. F. Salazar**, 2001. Caracterización del ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia, Región Centro, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Álvarez J. F. & V. G. Toro**, 2001. Caracterización del ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia, Región Norte, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Arnett, A. B. & C. R. Steadman**, 1970. Low-level wind flow over eastern Panama and northwestern Colombia, ESSA Technical Memorandum ERLTM-ARL 26, U. S. Department of Commerce, Air Resources Lab., Silver Spring, Maryland, 73 pp.
- Barry, R. G. & A. M. Carleton**, 2001. Synoptic and Dynamic Climatology, Routledge, Londres, 620 pp.
- Battisti, D. S., & B. Sarachick**, 1995. Understanding and predicting ENSO, *Rev. Geoph.* (33): 1367-1376.
- Carvajal, L. F., J. E. Salazar, O. J. Mesa, & G. Poveda**, 1998. Predicción hidrológica en Colombia mediante análisis espectral singular y máxima entropía, *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIII (1): 7-16.
- Carvajal, Y., H. Jiménez, & H. Materon**, 1998. Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca, Colombia. *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, 27 (3): 743-756.
- Ceballos, A., & G. Poveda**, 2003. Análisis de frecuencia de caudales máximos y mínimos anuales asociados con las fases del ENSO. En preparación. 2003.
- Chan, J. C. L., & J. Xu**, 2000. Physical mechanisms responsible for the transition from a warm to a cold state of the El Niño-Southern Oscillation, *J. Climate*, 13 (12): 2056-71.
- Chang, C.**, 1970. Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time-composite satellite photographs, *Jour. Atmos. Sci.*, 27: 133-138.
- Cuartas, L. A.**, 2001. Balance atmosférico de humedad para Colombia. Tesis M. Sc. no publicada. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- _____ & **G. Poveda**, 2002. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el Reanálisis NCEP/NCAR. *Meteorología Colombiana*, 5: 49-57.
- Díaz, H. F., & V. Markgraf (eds.)**, 2000. El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale Variability and Global and Regional Impacts, Cambridge University Press, 183-204.
- Eltahir, E. A. B., & R. L. Bras**, 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120: 861-880.
- Federov, A. V. & G. S. Philander**, 2000. Is El Niño changing? *Science*, 288 (5473): 1997-2002.
- Foufoula-Georgiou, E., & P. Kumar**, 1994. Wavelets in Geophysics, Academic Press, 372 p.
- Gil, M. M., & N. Quiceno**, 1997. La influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Glantz, M.**, 2000. Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society, Cambridge University Press.
- _____ & **co-autores (eds.)**, 1991. Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies, Cambridge Univ. Press, 257-284.
- Gray, W. M. y J. D. Sheaffer**, 1991. El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity. En: Glantz, M. y co-autores (eds.), Teleconnections linking worldwide climate anomalies Cambridge University Press, Cambridge, 257-284.
- Hastenrath, S.**, 1991. Climate Dynamics of the Tropics, Kluwer, Dordrecht, 488 pp.
- Hoyos, C.**, 1999. Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas. Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2000. Third Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kalnay, E., M. Kanatmisu., R. Kistler & co-autores**, 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 77: 437-470.

- Lau, K. M., & P. H. Chan**, 1988. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between 40-50 day oscillation and ENSO?, *J. Atmos. Sci.*, 506-521.
- López, M. E.**, 1966. Cloud seeding trials in the rainy belt of western Colombia. *Water Resour. Res.*, 2: 811-823.
- & W. E. Howell**, 1967. Cloud seeding at Medellín, Colombia, during the 1961-64 dry seasons, *J. Appl. Met.*, 4:54-60.
- Lovelock, J.**, 2000. *Gaia. The practical science of planetary medicine.* Oxford University Press, New York, 192 pp.
- Madden, R. A., & P. R. Julián**, 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 28: 702-708.
- . 1972. Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *J. Atmos. Sci.*, 29: 1109-1123.
- Mapes, B.E., T. T. Warner, M. Xu, & Negri, A.** 2003. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context, *Mon. Wea. Rev.*, 131: 799-812.
- Martínez, M. T.**, 1993. Principales sistemas sinópticos en Colombia y su influencia en el comportamiento del tiempo, *Atmósfera*, 16: 1-10.
- Mejía, J. F., & G. Poveda**, 2003a. Diagnóstico de la precipitación sobre Colombia y el Pacífico oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte I: Clasificación de sistemas convectivos de mesoescala. En preparación.
- . 2003b. Diagnóstico de la precipitación sobre Colombia y el Pacífico oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte III: Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala. En preparación.
- Mesa, O. J., G. Poveda, & L. F. Carvajal**, 1997a. Introducción al Clima de Colombia, Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 390 pp.
- Mesa, O. J., G. Poveda, & L. F. Carvajal**, 1994a. Predicción hidrológica usando redes neuronales, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 3: 385-396.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & J. E. Salazar**, 1994b. Efecto del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en la hidrología Colombiana, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile 3: 373-384.
- Mesa, O. J., G. Poveda, L. F. Carvajal & J. E. Salazar**, 1997b. Reservoir reliability design under interannual climatic and hydrologic variability. En: *Managing Water: Coping with scarcity and abundance*, Amer. Soc. Civil Eng., San Francisco, USA, 470-476.
- Mo, K. C., & V. E. Kousky**, 1993. Further analysis of the relationship between circulation anomaly patterns and tropical convection. *Jour. Geoph. Res.*, 98, D3: 5103-5113.
- Montealegre, J. E.**, 1996. Análisis del comportamiento de la precipitación en Colombia durante los períodos de ocurrencia de los fenómenos ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y el anti-Niño, Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá, 157-169.
- & **J. D. Pabón**, 1992. Características climáticas relevantes durante la ocurrencia de fenómenos ENOS en el nor-occidente suramericano, HIMAT, Bogotá.
- & ———, 2002. Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia, *Meteorología Colombiana* 5: 59-65.
- Morton F.**, 1978. Estimating evapotranspiration from potential evaporation: Practicality of an iconoclastic approach. *J. Hydrol.*, 38: 1-32.
- . 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrol.*, 66: 1-76.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B da Fonseca, & J. Kent**, 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, 403: 853-858.
- Neelin, J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.-F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, & S. E. Zebiak**. 1998. ENSO theory, *J. Geoph. Res.*, 103 (7): 14261-90.
- Neelin, J. D., F.-F. Jin, & H.-H. Syu**, 2000. Variations in ENSO phase locking, *J. Climate*, 13 (14): 2570-90.
- Nieuwolt, S.**, 1977. *Tropical Climatology*, John Wiley, New York, 207 p.
- Ochoa, A., & G. Poveda**, 2003. Diagnostics of the spatial distribution of climate change signals in Colombia's hydrometeorology, En preparación.
- Oster, R.**, 1979. Las precipitaciones en Colombia, *Colombia Geográfica*, 4 (2): 144.
- Pérez, C. A., G. Poveda, O. J. Mesa, L. F. Carvajal, & A. Ochoa**, 1998. Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual, *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, 27 (3): 537-546.
- Philander, S. G. H., D. Gu, D. Halpern, G. Lambert, N.-C. Lau, T. Li, & R. C. Pacanowski**, 1996. Why the ITCZ is mostly north of the equator? *J. Climate*, 9 (12): 2958-2972.
- Piersig, W.**, 1936. Schwankungen von luftdruck und luftbewegung sowie ein beitrage zum wettergeschehen im passatgebiet des ostlichen nordatlantischen ozeans, *Archiv der Deutschen Seewarte*, 54 (6): 41.
- Poveda, G.**, 1994a. Funciones Ortogonales Empíricas en el análisis de la relación entre los caudales medios en Colombia y las temperaturas de los océanos Pacífico y Atlántico, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 4: 131-144.
- . 1994b. Cuantificación del efecto de El Niño y La Niña sobre los caudales en Colombia, Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, 107-117.
- . 1996. Modulación de la hidroclimatología de Colombia por el ENSO y otros fenómenos de gran escala, Trabajo de promoción a Profesor Asociado, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

- _____.1997. ¿Atractores extraños (Caos) en la hidro-climatología de Colombia? *Rev. Acad. Col. Cienc.*, **21** (81): 431-444.
- _____.1998. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno ENSO y la hidrología de Colombia. Tesis Ph. D., Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- _____.2002. El chorro del Chocó y su influencia sobre la hidroclimatología de la costa Pacífica y el occidente de Colombia, En: Correa, I. D., & J. D. Restrepo (eds.), *Geología y Oceanografía del delta del Río San Juan*, Fondo Editorial Universidad Eafit, Medellín, 169-187.
- _____ & **A. Jaramillo**, 2000. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, *Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle*, IGBP, (8): 3-6.
- _____ & **J. F. Mejía**, 2003a. Diagnóstico de la Precipitación sobre Colombia y el Pacífico Oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte II: Análisis del ciclo diario. En preparación.
- _____ & **J. F. Mejía**, Diagnóstico de la Precipitación sobre Colombia y el Pacífico Oriental durante 1998 mediante datos satelitales de la Misión TRMM. Parte IV: Patrones de escalamiento espacial. En preparación.
- _____ & **O. J. Mesa**, 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), *Atmósfera*, **17**, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.
- _____.1995. 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, 227-236.
- _____.1996a. Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia, *Ingeniería Hidráulica en México*, **XI**, 21-37.
- _____.1996b. La oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la hidroclimatología de Colombia. *Memorias XVII Seminario Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Guayaquil, Ecuador, **2**: 343-354.
- _____.1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic atmospheric phenomena, *J. Climate*, **10**: 2690-2702.
- _____.1999. La corriente de chorro superficial del oeste ("del CHOCÓ") y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **23** (89): 517-528.
- _____.2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet, *Geophysical Research Letters*, **27** (11): 1675-1678. June 1.
- _____ & **C. Penland**, 1994. Predicción de caudales medios en Colombia usando modelación Lineal Inversa, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, **4**: 119-129.
- _____ & **W. Rojas**, 1996. Impacto del fenómeno El Niño sobre la intensificación de la malaria en Colombia. *Memorias XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá, 647-654.
- _____.1997. Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, **21** (81): 421-429.
- _____, **R. A. Smith**, & **O. J. Mesa**, 1995. La hidrología de Colombia frente a fenómenos de escala global: ENSO, calentamiento global y deforestación. *Memorias XVI Congreso Colombiano de Ingeniería Especializada*, ACIEM, Medellín.
- _____, **M. M. Gil**, & **N. Quiceno**, 1998. El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO, *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, **27** (3): 721-731, 1998.
- _____, **O. J. Mesa** y **P. Waylen**, 2003a. Non-linear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. En: Diaz, H, & B. Morehouse (eds.), *Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 351-371.
- _____, **J. M. Ramírez**, & **A. Jaramillo**, 2001. Modelación estocástica de la variabilidad anual e interanual de la humedad del suelo en Colombia bajo diferente cobertura vegetal. *Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina.
- _____, **C. C. Rave**, & **R. I. Mantilla**, 2001. Tendencias en la distribución de probabilidades de lluvias y caudales en Antioquia, *Meteorología Colombiana*, **3**: 53-60.
- _____, **O. J. Mesa**, **L. F. Carvajal**, & **J. E. Salazar**, 1994. Lluvias en Colombia: Correlación con el clima del Océano Pacífico y análisis de funciones ortogonales empíricas, *Memorias del XVI Congreso Latino-Americano de Hidráulica e Hidrología*, IAHR, Santiago de Chile, **4**: 93-105.
- _____, **A. Jaramillo**, **M. M. Gil**, **N. Quiceno**, & **R. Mantilla**. 2001a. Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia, *Water Resources Research*, **37** (8): 2169-2178.
- _____, **N. E. Graham**, **P. R. Epstein**, **W. Rojas**, **M. L. Quiñónez**, **I. D. Vélez**, & **W. J. M. Martens**, 2000. Climate and ENSO variability associated with vector-borne diseases in Colombia. En: Diaz, H.F., y V. Markgraf (eds.), *El Niño and the Southern Oscillation, Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Cambridge University Press, 183-204.
- _____, **O. J. Mesa**, **P. A. Agudelo**, **J. F. Álvarez**, **P. Arias**, **H. Moreno**, **L. F. Salazar**, **V. Toro**, & **S. Vieira**, 2002a. Influencia del ENSO, oscilación de Madden-Julian, ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diario de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia, *Meteorología Colombiana*, **5**: 3-12.
- _____, **O. J. Mesa**, **V. Toro**, **P. A. Agudelo**, **J. F. Álvarez**, **P. Arias**, **H. Moreno**, **L. F. Salazar**, **V. Toro**, & **S. Vieira**, 2002b. Diagnostico del ciclo anual y efectos del ENSO sobre la intensidad máxima de lluvias de duración entre 1 y 24 horas en los Andes de Colombia, *Meteorología Colombiana*, **5**: 67-74.

- _____, **O. J. Mesa, H. Moreno, S. Vieira, P. A. Agudelo, P. A. Arias, L. F. Salazar, V. Toro & J. F. Álvarez**, 2003b. Diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia. En evaluación.
- _____, **O. J. Mesa, L. F. Carvajal, C. D. Hoyos, J. F. Mejía, A. Cuartas, & A. Pulgarín**, 2002c. Predicción de caudales medios mensuales en ríos Colombianos usando métodos no lineales. *Meteorología Colombiana*, 6: 101-110.
- _____, **H. A. Moreno, S. C. Vieira, P. A. Agudelo, P. A. Arias, L. F. Salazar, O. J. Mesa, F. Álvarez, V. Toro, A. Jaramillo, & O. Guzmán**, 2001c. Caracterización del ciclo diario de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia. Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires, Argentina, 7-11 de mayo de 2001.
- _____, **W. Rojas, I. D. Vélez, M. Quiñones, R. I. Mantilla, D. Ruiz, J. Zuluaga, & G. Rúa**, 2001b. Coupling between annual and ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. *Environ. Health Persp.*, 109: 489-493.
- _____, **J. I. Vélez, O. J. Mesa, C. D. Hoyos, J. F. Mejía, O. J. Barco, & P. L. Correa**, 2002d. Influencia de fenómenos macro climáticos sobre el ciclo anual de la hidrología Colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6: 121-130.
- Riehl, H.**, 1945. Waves in the easterlies and the polar front in the tropics, Dept. Meteor. Univ. Chicago, Misc. Report, No. 17.
- Riehl, H., & J. S. Malkus**, 1958. On the heat balance in the equatorial trough zone, *Geophysica*, 6: 505-538.
- Rosenzweig, C.** (ed.), 2001. Impact of El Niño and Climate Variability on Agriculture. American Society of Agronomy Special Publication #63.
- Smith, R. A., G. Poveda, O. J. Mesa, & C. A. Pérez**, 1996. Análisis de Homogeneidad de series de aportes hidrológicos al sector eléctrico Colombiano, Memorias XII Congreso Colombiano de Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bogotá.
- Snow, J. W.**, 1976. The climate of northern South America, En: Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of Central and South America*, Elsevier, Amsterdam, 295-403.
- Torrence, C., & G. P. Compo**, 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 79 (1): 61-78.
- Trenberth, K. E.**, 1996. El Niño-Southern Oscillation. En: T. W. Giambelluca & A. Henderson-Sellers (eds.), *Climate Change: Developing Southern Hemisphere Perspectives*, Wiley, New York, pp. 145-173.
- Velasco, I., & M. Frisch**, 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas, *Jour. Geoph. Res.*, 92, D8, 9591-9613.
- Vélez, J. I., G. Poveda, & O. J. Mesa**, 2000. Balances Hidrológicos de Colombia, Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos, No. 16, 150 pp.
- Vélez, J. I., G. Poveda, O. J. Mesa, C. D. Hoyos, L. F. Salazar, & J. F. Mejía**, 2002a. Modelo de interacción suelo-atmósfera para la estimación de caudales medios mensuales en Colombia, *Meteorología Colombiana*, 6: 81-89.
- Vélez, J. I., O. J. Mesa, G. Poveda, A. F. Borja, J. M. Ramírez, O. O. Hernández, J. A. Urzola, & P. A. Arias**, 2002b. HidroSIG Java: Una herramienta para la visualización de datos hidroclimatológicos, *Meteorología Colombiana*, 6: 65-71.
- Vieira S. C., & H. A. Moreno**, 2001. Caracterización del ciclo diario de precipitación en los Andes tropicales de Colombia. Región Sur, Trabajo Dirigido de Grado, Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Waylen, P. R., & C. N. Caviedes**, 1986. El Niño and annual floods on the northern Peruvian littoral, *J. Hydrol.*, 89: 141-156.
- _____, & **G. Poveda**, 2002. El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South America hydro-climatology, *Hydrol. Proc.*, 16: 1247-1260.
- Webster, P. J., & J. Fasullo**, 2000. Atmospheric and surface variations during westerly windbursts in the tropical western Pacific, *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 126: 899-924.
- Weickmann, K.**, 1991. El Niño/Southern Oscillation and Madden-Julian (30-60 day) oscillations during 1981-1982, *Jour. Geoph. Res.*, 96: 3187-3195.
- White, W. B., & D. R. Cayan**, 2000. A global El Niño-Southern Oscillation wave in surface temperature and pressure and its interdecadal modulation from 1900 to 1997, *J. Geoph. Res.*, 105 (C5): 11223-11242.
- Zebiak, S.E.**, 1989. On the 30 60 day oscillation and the prediction of El Niño, *J. Climate*, 2: 1381-1387.
- Zuluaga, M. D., J. E. Posada, & G. Poveda**, 2001. Relación entre las fases de la oscilación cuasibienal (QBO), la precipitación mensual y la radiación de onda larga emergente en Colombia. Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires, Argentina.