

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA
PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS
OCEANICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA.**

**Informe final de las actividades desarrolladas en el marco del contrato de
prestación de servicios No IDEAM 022 - 2009**

INFORME FINAL

JOSÉ EDGAR MONTEALEGRE BOCANEGRA
Meteorólogo, M.Sc.

**INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM -
Subdirección de Meteorología**

Bogota, D.C., Diciembre 10 de 2009

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO CONCEPTUAL

- 1.1 EL CLIMA, LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y ESCALAS DE SU VARIABILIDAD
- 1.2 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA VARIABILIDAD INTERANUAL DEL CAMPO TÉRMICO SUPERFICIAL DE LOS OCÉANOS PACÍFICO TROPICAL Y ATLÁNTICO NORTE Y SUR
 - 1.2.1 Características estacionales
 - 1.2.2 Variabilidad Interanual del campo térmico superficial en el Pacífico Tropical
 - 1.2.3 Variabilidad Interanual del campo térmico superficial en el Atlántico Norte y Sur
 - 1.2.4 Relación entre las anomalías de la TSM en los océanos Pacífico ecuatorial Central y los sectores norte y sur del océano Atlántico
 - 1.2.5 Comportamiento de la TSM del Océano Atlántico durante las fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) del Pacífico ecuatorial central.
- 1.3 INFLUENCIA DE LOS OCEANOS PACIFICO Y ATLANTICO EN LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN DE COLOMBIA.
 - 1.3.1 Variabilidad Interanual de la precipitación en Colombia
 - 1.3.2 Algunos aspectos de la Variabilidad Interanual del océano Pacífico y su efecto sobre el comportamiento de la precipitación en Colombia.
 - 1.3.3 Algunos aspectos de la Variabilidad Interanual del océano Atlántico y su efecto sobre el comportamiento de la precipitación en Colombia.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

- 2.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES
 - 2.1.1 Consideraciones generales sobre algunas variables explicativas
 - 2.1.2 Definición de la variable explicada o impacto (Precipitación)
- 2.2 MÉTODOS ESTADÍSTICOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS
 - 2.2.1 Análisis Básico aplicado a las variables explicativas y explicadas
 - 2.2.1.1 Análisis Gráfico.
 - 2.2.1.2 Análisis de Correlación Cruzada.

2.2.1.3 Análisis de Autocorrelación.

2.2.2 Análisis de Asociación entre las variables explicativas y explicadas

2.2.2.1 Correlación Cruzada (sincrónica y rezagada).

2.2.2.2 Correlación Espacial.

2.2.2.3 Identificación de Dipolos.

2.2.2.4 Análisis espectral

2.2.3 Análisis de Contingencia

2.2.4 Análisis Compuesto

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.1 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS

3.1.1 Correlación Cruzada (Sincrónica)

3.1.2 Correlación Cruzada (Rezagada)

3.1.3 Análisis de Autocorrelación

3.1.4 Análisis Espectral

3.2 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES EXPLICADAS

3.2.1 Correlación cruzada

3.2.2 Análisis de Autocorrelación

3.2.3 Análisis Espectral

3.3 ASOCIACIÓN ENTRE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS Y EXPLICADAS

3.3.1 Correlación Cruzada (Sincrónica)

3.3.2 Correlación Cruzada (Rezagada) y suavizamiento

3.3.3 Correlación Espacial

3.3.3.1 Dipolo del Atlántico Tropical

3.3.3.2 Dipolo del Atlántico Norte

3.3.3.3 Dipolo del Litoral Caribe

3.3.3.4 Dipolo del Mar Caribe

3.3.3.5 Dipolo del Amazonas

3.3.4 Análisis de Contingencia

3.3.5 Análisis Compuesto

4. DESCRIPCION DEL ESQUEMA DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA PROPUESTO

4.1 DIFERENCIAS ENTRE PRONÓSTICO DE TIEMPO Y PREDICCIÓN CLIMÁTICA

4.2 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

4.3 COMPLEJIDAD DE LA PREDICCIÓN CLIMÁTICA

4.4 ETAPAS DEL ESQUEMA DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA

4.4.1 Regionalización Climática - Determinación de zonas climáticamente

similares

- 4.4.2 Determinación del régimen normal de la variable explicada (Ciclo Anual)
- 4.4.3 Seguimiento de las condiciones atmosféricas en los meses precedentes – factor de Persistencia Climática.
- 4.4.4 Determinación del efecto climático de las fases cálidas y frías de los fenómenos ENSO en Colombia en cada una de las regiones consideradas.
- 4.4.5 Influencia de los procesos océano - atmosféricos de gran escala al momento de elaborar la predicción.
- 4.4.6 Identificación de la posible influencia de ondas intraestacionales
- 4.4.7 Identificación de períodos comportamiento climático análogo
- 4.4.8 Desarrollo de métodos objetivos. Corrida de modelos Físico - Estadísticos
- 4.4.9 Análisis de las salidas de los modelos globales
- 4.4.10 Desarrollo del Análisis de Contingencia - método de los Terciles
- 4.4.11. Estructuración y elaboración de la Predicción Climática
- 4.4.12 Validación de las Predicciones Climáticas

4.5 AUTOMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

5. CONCLUSIONES

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS OCEANICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA.

JOSÉ EDGAR MONTEALEGRE BOCANEGRA
Meteorólogo, M.Sc.

RESUMEN

Se describe el marco conceptual dentro del cual se analizan los procesos físicos que determinan la variabilidad de la estructura térmica superficial de los océanos Pacífico y Atlántico Norte y Sur, procesos que teóricamente podrían estar asociados con la variabilidad de la precipitación en Colombia, en diferentes escalas de tiempo.

Se definen las variables explicativas y explicadas y se describen algunas particularidades de aquellos índices que caracterizan procesos que pueden tener incidencia en la variabilidad de precipitación en Colombia. Se exponen los conceptos en los que se fundamentan las técnicas del Análisis de Contingencia y Análisis Compuesto, las cuales se aplican en forma integrada, a efecto de obtener las tablas de contingencia de tipo climatológico para las variables explicadas. Se analiza la covariabilidad entre las variables analizadas y se seleccionan las de mayor grado de asociación. Con base en los índices seleccionados, se construyen tablas de contingencia de tipo climatológico, estadísticamente significativas, de carácter sincrónico y para rezagos hasta de 3 lapsos, de 17 variables explicadas; se construyen igualmente, la totalidad de tablas (significativas estadísticamente o no) para las ocho principales ciudades del país.

A efecto de mejorar algunos aspectos de la metodología general de predicción usada actualmente por el IDEAM, se propone un nuevo esquema para la elaboración del diagnóstico y la predicción climática para Colombia. Se dan algunas pautas para lograr el fortalecimiento de este proceso, en lo que compete la objetivación y automatización de la metodología, con miras a mejorar los productos ofrecidos a los usuarios.

INTRODUCCIÓN

Se ha optado por la precipitación como la variable fundamental de este estudio porque este parámetro es en definitiva, el elemento climatológico que caracteriza el denominado estado del tiempo atmosférico en nuestro medio y de su disponibilidad depende el desarrollo de un sin número de actividades de trascendencia económica para el país. La variabilidad de la precipitación, incluidas sus fluctuaciones extremas: excesos (inundaciones) y déficits (sequías) afecta de forma directa y muchas veces catastrófica la actividad humana, produciendo impactos no solo en la economía sino también en el ambiente y en la sociedad en general. Una forma de mitigar o reducir tales impactos es a través del conocimiento previo de sus fluctuaciones y tendencias con anticipación de meses.

El análisis de la información histórica, indica que las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en Colombia son causadas, en parte, por la variabilidad climática interanual, asociada con el ciclo El Niño, La Niña - Oscilación del Sur (ENSO), el cual ha sido causa de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones geográficas del planeta. No obstante, dentro de la literatura especializada sobre este tema se ha podido establecer que existen otros procesos que influyen en la variabilidad interanual de la lluvia en el norte de Sudamérica, entre los que se destacan los relacionados con la variabilidad interanual del océano Atlántico.

En este trabajo se estudia la variabilidad climática de la precipitación en puntos estratégicos de la geografía nacional asociada con procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Se identifican y analizan los índices que caracterizan procesos físicos que se desarrollan en el seno del océano y la atmosfera a escala regional, hemisférica y global, a efecto de identificar algún tipo de causalidad con la variabilidad estacional e interanual de la precipitación en Colombia. Identificadas dichas relaciones se propone un esquema de predicción climática con el propósito de contribuir con un método objetivo, el Análisis Compuesto, a mejorar las actuales técnicas de predicción desarrolladas por el IDEAM, aprovechando la información que ofrecen los centros internacionales especializados sobre la evolución y el comportamiento de la estructura térmica de los océanos, con anticipación de meses.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 EL CLIMA, LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y ESCALAS DE SU VARIABILIDAD

El clima es un factor ambiental que comúnmente se define como el estado medio de la atmósfera que representa las condiciones predominantes en un lugar, en una región ó en el planeta entero, durante un período determinado (varios meses, años). El clima de la Tierra depende del equilibrio radiativo que está controlado por factores radiativos forzantes, por factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático (Pabón & Montealegre, 2009).

El clima varía en escalas de tiempo y espacio. A través de los años, desde épocas remotas, se han presentado fluctuaciones del clima en diversas escalas de tiempo. Tales fluctuaciones se originan, generalmente, por modificaciones en la forma de interacción

entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores radiativos forzantes (Pabón, 1997). La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal. La Normal Climatológica o valor normal, se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como Anomalía. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías.

Dentro de las escalas temporales de la variabilidad climática, las siguientes se consideran las de mayor importancia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos:

Estacional - A esta fase corresponde la fluctuación del clima a escala mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En latitudes medias, las secuencias de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común para los habitantes de dichas regiones, en tanto que en latitudes tropicales, lo frecuente es la alternancia de temporadas lluviosas y temporadas secas.

Intraestacional - Existen evidencias que dentro de las estaciones se presentan perturbaciones que determinan las condiciones de tiempo durante decenas de días. La mayoría de las veces estas oscilaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días. Ésta ha sido detectada en la actividad convectiva en el Pacífico Tropical Oriental y en la precipitación de esta región y de la América Tropical. Esta oscilación se asocia con las ondas de Madden-Julian, descubiertas en 1971 en el campo de la presión tropical.

Interanual - A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. Normalmente percibimos que la precipitación de la estación lluviosa en un determinado lugar, no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de lo normal. Ejemplos típicos de la variabilidad climática interanual corresponden a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño - La Niña - Oscilación del Sur, ENSO y la Oscilación Cuasibienal, la cual corresponde a una oscilación de largo plazo en la dirección del viento zonal de la baja y media estratosfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses; en cada lapso se alternan los vientos de componente Este con los del Oeste.

Interdecadal - En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Ésta es una de las razones por las cuales este tipo de variabilidad pasa desapercibida para el común de la gente.

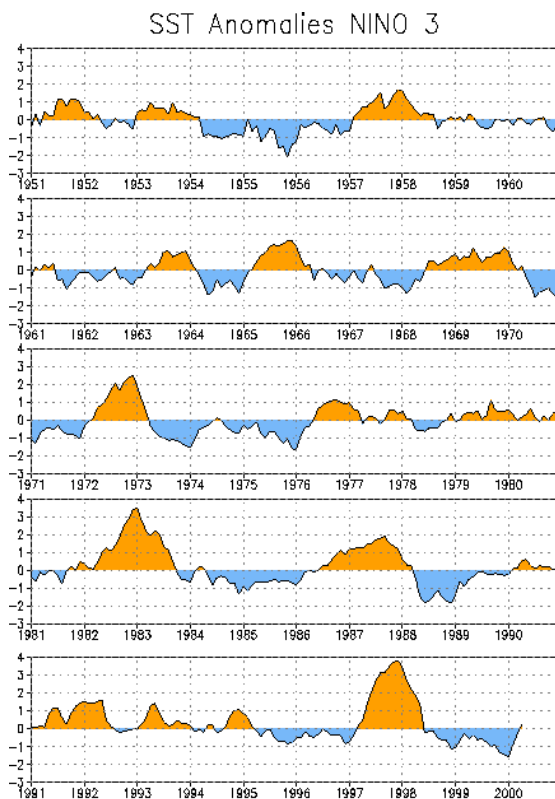
1.2 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA VARIABILIDAD INTERANUAL DEL CAMPO TÉRMICO SUPERFICIAL DE LOS OCÉANOS PACÍFICO TROPICAL Y ATLÁNTICO NORTE Y SUR

A efecto de entender mejor la covariabilidad entre comportamiento de la precipitación en Colombia y la variabilidad de los océanos Pacífico y Atlántico, es importante entender la dinámica de los procesos oceánicos y sus relaciones durante las épocas de calentamiento y enfriamiento de unos y otros.

1.2.1 Características estacionales

El ciclo anual de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical central y oriental, así como en el Atlántico Sur, se caracteriza por una fuerte componente estacional, con valores máximos a finales de marzo y mínimos a finales de septiembre. En el Atlántico Norte ocurre el proceso inverso. En el Pacífico tropical Occidental, el comportamiento es algo más irregular, con valores máximos en mayo y junio (Montealegre, 1999).

1.2.2 Variabilidad Interanual del campo térmico superficial en el Pacífico Tropical



CLIMATE PREDICTION CENTER/NCEP

Figura 1.1 Secuencia temporal de las anomalías de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico central, región Niño 3, durante el periodo 1950–03. Los tonos amarillos representan las épocas cálidas y los azules, las frías. Fuente de datos: NOAA/NCEP/CAC, USA

El análisis de la secuencia temporal de anomalías de la temperatura de la superficie del mar en las diferentes regiones del sector tropical refleja la ocurrencia de períodos cálidos y fríos en ciclos recurrentes que oscilan entre tres y siete años, siendo esta la principal característica de su variabilidad interanual. En la figura 1.1 se aprecia que estos periodos tienen diferente intensidad y duración. Esta variabilidad es la que caracteriza los fenómenos asociados al ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur (ENSO). La alternación de las dos fases, cálida (El Niño) y fría (La Niña) es un rasgo bien identificado del Océano Pacífico en la escala de tiempo interanual. La transición de eventos calidos a eventos fríos se presenta en un tiempo relativamente corto; el sistema cambia de fase de manera rápida, lo cual se puede interpretar como una señal que parece denotar su carácter no lineal.

1.2.3 Variabilidad Interanual del campo térmico superficial en el Atlántico Norte y Sur.

La secuencia temporal de anomalías de la temperatura superficial del mar en el océano Atlántico permite identificar igualmente la ocurrencia de períodos cálidos y fríos, aunque su magnitud es mucho menor que la observada en el Pacífico Tropical central (5N-5S, 150W-90W). A través de estas mismas series pero suavizadas con una media móvil de 6 puntos, se logra detectar que la variabilidad interanual del campo térmico superficial en el Atlántico Norte (5N-20N, 60W-30W) presenta cierta similitud con la del Pacífico Tropical (figura 1.2), en cuanto a la recurrencia de sus fases cálidas y frías, en marcado contraste con el Atlántico Sur (Ecuador-20S, 30W-10E), donde el comportamiento es más irregular y prácticamente muy distante del patrón exhibido por el Pacífico Tropical (figura 1.3).

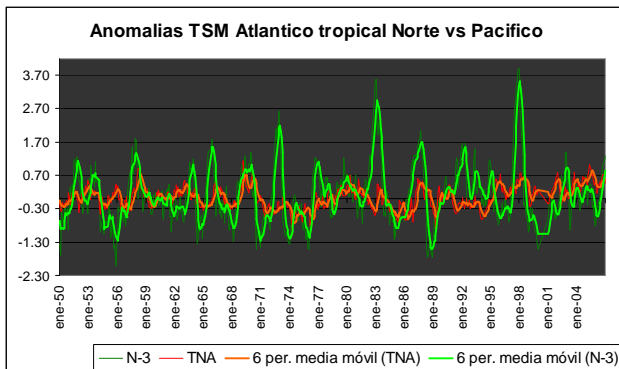
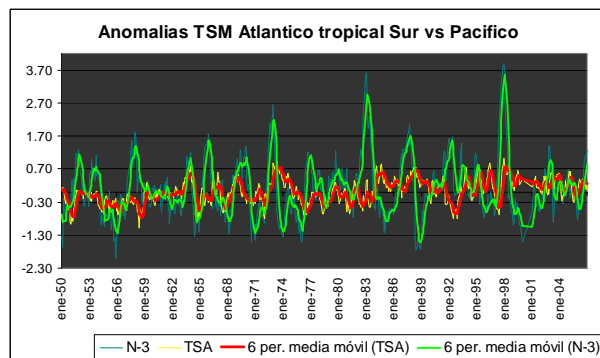


Figura 1.2 Media móvil de 6 puntos de las series temporales de anomalías de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico central, región Niño 3 y en el Atlántico norte, durante el periodo 1950–08. Fuente de datos: NOAA/NCEP/CAC, USA

1.2.4 Relación entre las anomalías de la TSM en el océano Pacífico ecuatorial central y los sectores norte y sur del océano Atlántico

Comparando la secuencia de anomalías de la TSM el océano Pacífico ecuatorial central y las del océano Atlántico Norte (figura 1.2), se aprecia que, salvo el período correspondiente a la década de los años noventa, existe una correlación moderada y de tipo directo entre ambas variables. Las anomalías positivas de la TSM en el océano Pacífico ecuatorial central son de mayor cuantía que las del océano Atlántico Norte y estas últimas ocurren dos y algunas veces hasta cinco meses después de iniciadas en el Pacífico. (Montealegre, 1999). La mayor parte de la década de los noventa se han presentado anomalías positivas en la TSM del océano Pacífico Ecuatorial Central.

Figura 1.3 Media móvil de 6 puntos de las series temporales de anomalías de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico central, región Niño 3 y en el Atlántico sur, durante el periodo 1950–08. Fuente de datos: NOAA/NCEP/CAC, USA



El análisis de las anomalías de TSM del Pacífico ecuatorial central con las del Atlántico sur (figura 1.3), muestra una relación inversa entre las variables en algunos períodos, siendo más nítida durante las épocas en que el océano Pacífico central se enfría. Durante los eventos cálidos de 1965 y de 1982-83, no se observa en el océano Atlántico Sur un comportamiento especial, en relación con los calentamientos en este último. La correlación cruzada entre ambas variables, muestra una relación muy débil comparada con la del Atlántico Norte.

1.2.5 Comportamiento de la TSM del Océano Atlántico durante las fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) del Pacífico Ecuatorial Central

Durante los eventos cálidos del océano Pacífico central, la TSM en el océano Atlántico Norte presenta anomalías positivas del orden de un grado Celsius (1°C), las cuales generalmente no son sincrónicas. Es decir, el océano Atlántico Norte también se calienta cuando lo hace el océano Pacífico Ecuatorial Central, aunque con un retardo que oscila entre dos y cinco meses. En el océano Atlántico Sur, el comportamiento es más irregular. Se observan tanto anomalías positivas (particularmente en los eventos intensos) como negativas y en algunos casos predominan las condiciones normales.

Durante las fases frías del Pacífico central, el océano Atlántico Norte reacciona también en el mismo sentido que el océano Pacífico central, es decir, registra anomalías negativas del orden de 0.8°C , especialmente durante el primer semestre del segundo año del evento. En el océano Atlántico Sur no se observa un patrón definido de comportamiento, en algunos eventos, la TSM permanece con anomalías negativas acompañándose con lo que ocurre en el Pacífico, en otros, predominan las anomalías positivas la mayor parte del tiempo (Montealegre, 1999).

1.3 INFLUENCIA DE LOS OCEANOS PACIFICO Y ATLANTICO EN LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN DE COLOMBIA.

El análisis de la información histórica de la precipitación en Colombia permite identificar variaciones de diferente escala relacionadas con la variabilidad de la estructura térmica superficial de los océanos Pacífico y Atlántico. El océano como controlador del clima y la atmósfera en cuyo seno se suscitan los procesos físicos de la condensación (formación de nubes), parecen ser los responsables más determinantes de la variabilidad interanual de la precipitación. Por ello, se considera que los procesos de interacción entre estos dos medios tienen una influencia, prácticamente directa, en la variabilidad de la precipitación. El grado de influencia de uno u otro océano es diferencial sobre el territorio continental, dependiendo de factores como la distancia al mar. Algunos países se ven más influenciados por el Atlántico y otros por el Pacífico. No obstante, en la escala interanual, el océano Pacífico a través del ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur, ENSO induce una señal que es posible identificar en casi todos los países de la región. Tal vez sea esta, una de las razones por las cuales, la determinación de la influencia del Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia, ha sido hasta ahora, prácticamente inexplorada (Montealegre, 1999).

1.3.1 Variabilidad Interanual de la precipitación en Colombia

Mediante el análisis de las anomalías de la precipitación se pueden detectar, a través de los años, importantes fluctuaciones, por encima o por debajo de lo normal, en el comportamiento de las temporadas secas o lluviosas, en determinadas regiones del país. Examinando por ejemplo, la secuencia histórica de anomalías acumuladas de precipitación registradas en Funza (Cundinamarca) en los meses de abril (mes representativo de la primera temporada lluviosa), se observa una serie de oscilaciones que corresponden a la variabilidad interanual de las mismas (figura 1.4). Se destacan períodos muy secos hacia comienzos de los años cuarenta y un período húmedo registrado en 1984-85. Otro aspecto igualmente importante, es la presencia de una señal

cuasibienal (ocurrencia de anomalías del mismo signo cada dos años, aproximadamente). Mediante técnicas espectrales se ha podido establecer igualmente, ciclos de 2.6, 3.9 y 4.5 años, similares a los de la variabilidad interanual del Pacífico Tropical y particularmente del ciclo ENSO. Realmente, las oscilaciones más destacadas de la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia, están asociadas a dicho ciclo. Por tal razón es conveniente considerar en detalle este grado de influencia.

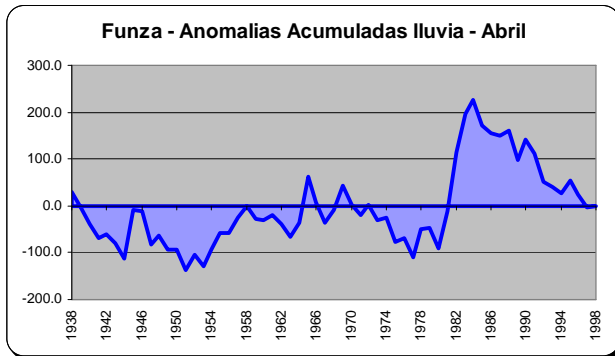


Figura 1.4 Secuencia temporal de anomalías acumuladas de precipitación registradas en el municipio de Funza (Cundinamarca) en los meses de abril, durante el periodo 1938-00.

1.3.2 Algunos aspectos de la Variabilidad Interanual del Océano Pacífico y su efecto climático en Colombia

Tal como fue reportado por Montealegre (1996); Poveda & Mesa (1996b); Pabón & Montealegre (1997), Pabón & Montealegre (1998a): la afectación del régimen de lluvias por la fase cálida del ciclo (El Niño) no sigue un patrón común, ni ha sido el mismo durante su ocurrencia en los 6 últimos eventos documentados. Por el contrario, es diferencial a lo largo y ancho del territorio nacional. En términos generales, se ha podido identificar que cuando se presenta el fenómeno hay una clara tendencia hacia la disminución generalizada de los volúmenes de precipitación de las regiones Andina, Caribe y la parte norte de la región Pacífica. Estas deficiencias son más acusadas en algunas áreas. En marcado contraste con la situación anterior, las lluvias son más abundantes de lo tradicional en el sur de la región Pacífica, en el suroccidente de la Amazonia colombiana y en algunas áreas del piedemonte llanero (Pabón & Montealegre, 1997). Información actualizada sobre este tema específico se puede consultar en la publicación “Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia”, Montealegre (2007).

El análisis de la fase fría del ciclo (La Niña) permite establecer que más de la mitad de los episodios documentados hasta la fecha se han iniciado a partir del segundo trimestre del primer año. Las lluvias durante los dos primeros trimestres son prácticamente normales en las cinco regiones naturales del país. A partir de ese momento y durante los tres trimestres siguientes, el efecto climático reflejado a través de los excedentes de lluvia, se manifiesta claramente en las regiones Andina, Caribe y Pacífica (Pabón & Montealegre, 1998a). Para el segundo semestre del segundo año, el efecto se debilita notablemente y nuevamente el comportamiento de las lluvias es casi normal.

El efecto climático registrado durante los fenómenos “La Niña” no es exactamente contrario al observado durante los fenómenos “El Niño”, aunque si se observa una tendencia inversa en el efecto producido por ambos eventos.

1.3.3 Algunos aspectos de la Variabilidad Interanual del Océano Atlántico y su efecto climático en Colombia

De acuerdo con los trabajos desarrollados por Enfield (1997) y Bertacchi & Repell (1998), el ciclo ENSO no es el único proceso que influye en la variabilidad interanual de las lluvias en el Norte de Sudamérica. El campo térmico del océano Atlántico también repercute en amplias áreas de esta región. El caso mejor documentado corresponde a la región del Ceará, en el Noreste de Brasil, donde se alternan años secos con húmedos en armonía con las anomalías de la temperatura superficial del océano Atlántico, en áreas al Sur y Norte de la línea ecuatorial. Igualmente, se ha encontrado una significativa influencia del océano Atlántico Tropical sobre el clima de Venezuela, particularmente hacia la parte occidental (Castro, 1999; Martelo, 1998). Aún está por determinar el grado de influencia del océano Atlántico en los climas de Colombia, aunque trabajos de diferentes autores sugieren la existencia de esta relación.

Enfield (1997), establece que el comportamiento estacional de la Zona de Confluencia Intertropical – ZCIT, está igualmente muy ligado a la dinámica de la temperatura superficial del mar – TSM en las áreas norte y sur del Atlántico. Los calentamientos del Atlántico Sur mantienen a la ZCIT más al sur de su posición normal, ocasionando excedentes de lluvia en el nordeste del continente Sudamericano, pero sin mayores efectos en otras partes. Los calentamientos en el Atlántico Norte mantienen la ZCIT más al norte de lo normal, causando entonces sequías en la citada región. Así mismo, cuando el Atlántico Norte cálido coincide con el Atlántico Sur frío, el efecto sobre la ZCIT se refuerza y el Nordeste del continente Sudamericano registra sequías más intensas.

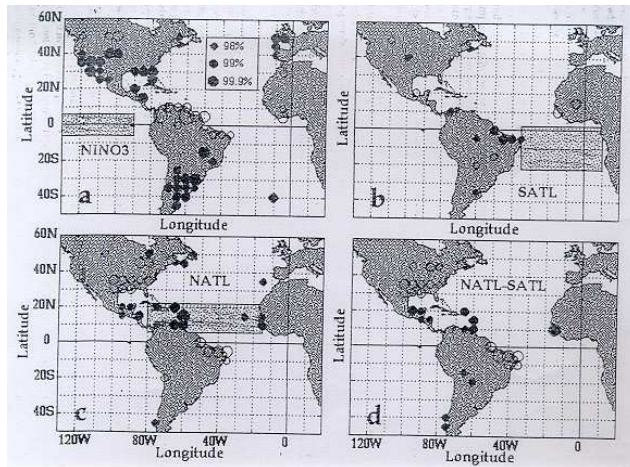


Figura 1.5. Correlaciones (círculos) entre anomalías de precipitación y varios índices de temperatura superficial del mar (áreas rectangulares) en los océanos Pacífico Tropical y Atlántico Norte y Sur. Los círculos sólidos indican valores positivos y los huecos indican valores negativos. El diámetro es proporcional a la magnitud de la correlación. Tomado de Enfield (1997).

De otro lado, según los estudios realizados hasta ahora, los procesos que suceden en el área extratropical del Atlántico Norte no parecen tener una relación tan directa con la variabilidad de la precipitación en el norte del continente Suramericano. Una forma de establecer la dinámica atmosférica de las regiones subtropical y subpolar del océano Atlántico es a través de La Oscilación del Atlántico Norte - NAO (siglas en inglés). La NAO cuantifica la alternación de la masa atmosférica entre dichas regiones y se caracteriza por fluctuaciones en el gradiente de presión atmosférica a nivel del mar. Asociadas con ella, también se observan variaciones en los vientos de componente Oeste de latitudes medias y con el campo térmico del océano, en las citadas regiones. El centro de alta presión subtropical se encuentra localizado en las islas Azores y el de baja presión de característica cuasi-permanente, está sobre Islandia. De conformidad con la descripción presentada por Mesa, Poveda & Carvajal (1997), la fase positiva de la NAO ocurre cuando la alta subtropical está anómalamente fuerte mientras que la baja de

Islandia está muy profunda. Los vientos del oeste del Atlántico están en ese momento anormalmente fuertes. En la fase negativa, ambos centros de presión están anormalmente débiles. La cuasiperiodicidad de 3 a 7 años que exhibe el ENSO no se observa en la NAO.

No existen mayores evidencias sobre la influencia directa de la NAO en el patrón pluviométrico del Norte de Sudamérica. En el análisis de las correlaciones entre la precipitación en Bogotá y la presión superficial del mar del hemisferio norte, durante el período 1899-1975 elaborado por Rogers (1988) y descrito en el trabajo de Mesa, Poveda & Carvajal (1997), se sugiere que la precipitación promedio sobre el Caribe y las Américas Tropicales podría variar en los extremos de la NAO. Esta observación sería el primer indicio de un posible vínculo entre el comportamiento de la lluvia en Colombia y la NAO y de la influencia del océano Atlántico en la variabilidad del clima de Colombia. Resta estudiar la magnitud real de la influencia del océano Atlántico en la variabilidad de la precipitación en Colombia y su proporción en relación con la influencia del océano Pacífico.

2. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Con el propósito de asociar los procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala con la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia se requiere, identificar los índices que caracterizan tales procesos y determinar su grado de asociación. Las variables que intervienen en la explicación de la variabilidad interanual de la precipitación se denominan variables independientes o explicativas y la precipitación es la variable dependiente, explicada o de impacto.

A continuación se presentan los principales aspectos metodológicos inherentes a la identificación y selección de la variable explicativa y explicada, su tratamiento estadístico a través de técnicas exploratorias, el estudio de su variabilidad y la identificación de las relaciones existentes entre las variables identificadas.

2.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Dentro del marco conceptual de este trabajo, se han seleccionado el océano y la atmósfera como los componentes del sistema climático que mayormente inciden en la variabilidad interanual de la precipitación. Igualmente, se ha mencionado como hipótesis, que los procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala, así como la variabilidad interanual de los océanos Pacífico Tropical y Atlántico Norte y Sur tienen una significativa relación con el comportamiento de la precipitación en Colombia. Para poder cuantificar estas relaciones es necesario contar con variables que representen los procesos en cada uno de ellos. Adicionalmente, se examinan algunos índices que sintetizan procesos en latitudes medias y altas que de una manera u otra podrían estar asociados con la variabilidad de la precipitación en Colombia (teleconexiones). En consecuencia, a continuación se definen estas variables examinando cuidadosamente su sensibilidad, a fin de seleccionar las de mayor conveniencia para la consecución de los objetivos de este estudio.

Se analizaron cerca de cincuenta de las variables que presentan los centros mundiales especializados (tabla 2.1), en particular las ofrecidas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de los Estados Unidos. Las variables han sido

clasificadas por este organismo en 7 grandes grupos (figura 2.1), a saber: Teleconexiones (7), Atmosféricas (12), Precipitación (5), ENSO (3), Temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico (9), TSM en el Atlántico (8) y De otra índole (10). A estas se han adicionado algunas otras, producto del análisis de la correlación espacial, que se describe mas adelante.

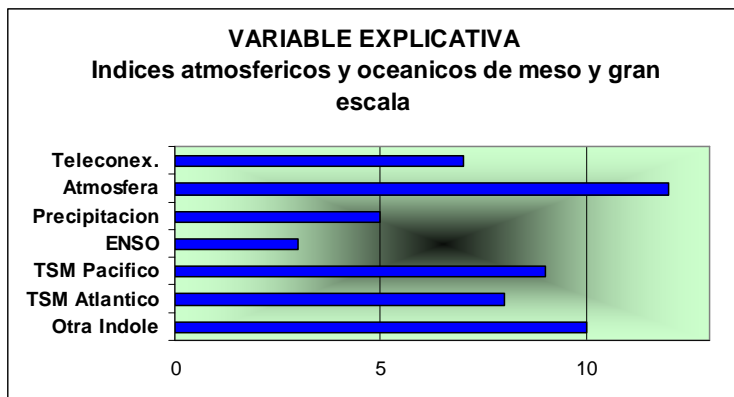
Tabla 2.1 VARIABLE EXPLICATIVA - Índices oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala.
Fuente de datos NOAA/NCEP/CAC, USA.

Sigla	TELECONEXIONES
PNA	Índice del Pacífico de América del Norte
NAO	Oscilación del Atlántico Norte
EPO	Oscilación del Pacífico Oriental
WP	Índice del Pacífico Occidental
PDO	Oscilación decadal del Pacífico. Primera Componente Principal de anomalías mensuales de TSM en el Océano Pacífico del Norte
NP	Patrón del Pacífico Norte. Área ponderada de la presión a nivel del mar sobre la región 30° N - 65° N y 160° E -140° W.
NOI	Índice de Oscilación del Norte: índice de variabilidad del clima con base en la diferencia de las anomalías de SLP en el Pacífico Norte y cerca de Darwin Australia
	ATMOSFERICAS
IOS	Índice de la Oscilación del Sur
MJO	Oscilación de Madden y Julian
OLR	Radiación de onda larga saliente en la región 5° N - 5° S y 160° E -160° W
ZCIT	Zona de confluencia intertropical
QBO	Oscilación Cuasibienal. Promedio del viento zonal al nivel de 30 hPa.
AO	Primer modo del análisis Funciones Ortogonales Empíricas EOF de anomalías medias mensuales de alturas a 1000 hPa o 700 hPa.
AAO	Oscilación Antártica
GIAM	Momento angular integrado y global
VVA165W	Viento Zonal a 200 hPa en el Pacífico Centro Oriental, región 5° N - 5° S y 165° W - 110° W
VVS135E	Viento zonal al Nivel de 850 hPa en el Pacífico Occidental, región 5° N - 5° S y 135° E -180°
VVS175W	Viento zonal al Nivel de 850 hPa en el Pacífico Central, región 5° N - 5° S y 175° W - 140° W
VVS135W	Viento zonal al Nivel de 850 hPa en el Pacífico Oriental, región 5° N - 5° S y 135° W - 120° W
	PRECIPITACIÓN
MON I	Precipitación Indico Central (región central monzón)
SAHEL	Precipitación estandarizada en el Sahel, región 20° N – 8° N y 20° W - 10° E
BRAS	Anomalías de precipitaciones en el noreste de Brasil
MON U	Región SW del Monzón de Sahel. Área de precipitación promedio para Arizona y New México
ENSO	Índice de precipitación de ENSO
	ENSO
MEI	Índice Multivariado ENSO
BEST	Índice bivariado ENOS. Calculado a partir de la combinación de una normalización de las series de tiempo SOI y TSM de Niño3.4
TP	Primera Componente principal del análisis EOF de las TSM del Pacífico Tropical, región 20° N - 20° S y 120° E - 60° W
	TSM - PACIFICO

Niño 3	Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico tropical Central, región 5° N - 5° S y 150° W - 90° W
Niño 4	Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico tropical Occidental, región 5° N - 5° S y 160° E - 150° W
Niño 1+2	Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico tropical Oriental, región 0° - 10° S y 90° W - 80° W
Niño 3-4	Temperatura Superficial del Mar en el Pacífico tropical Centro Occidental, región 5° N - 5° S y 170° W - 120° W
ONI	Índice oceánico El Niño
PWP	Piscina calida del Pacífico, región 60° E - 170° E y 15° S - 15° N
WHWP	Piscina calida del hemisferio Occidental. Anomalía mensual de la superficie del océano, zona más caliente que 28.5 °C en el Atlántico Norte y del Este.
TNI	Índices de la evolución de El Niño
PMM	Modo Pacífico Meridional
	TSM - ATLANTICO
NTA	Índice de TSM del Atlántico Norte, Anomalías de la serie de tiempo de TSM sobre la región 60° W - 20° W, 6° N - 18° N y 20° W - 10° W, 6° N - 10° N
CAR	Índice de la TSM del Caribe
TNA	Índice Anomalía de la media mensual de la TSM en el Atlántico tropical Norte, región 5.5° N - 23.5° N y 57.5° W - 15° W
TSA	Índice Anomalía de la media mensual de la TSM en el Atlántico tropical Sur, región 0° - 20° S y 10° E - 30° W
ATL T	Primera Componente Principal del análisis EOF de la TSM en el tripolo del Atlántico, región 10° N - 70° N y 0° - 80° W
AMO	Oscilación multidecadal del Atlántico. Versión no suavizada
AMM	Modo Atlántico Meridional
ACE	Intensidades acumuladas de ciclones en el Atlántico
	VARIABLES DE OTRA INDOLE
THN	Hemisferio Norte tropical
SOLAR	Flujo solar (10.7cm)
HURR	Total de huracanes en el Atlántico y tormentas tropicales nombradas
GMT	Índice de temperatura media global tierra/océano
DiAT	Dipolo Atlántico tropical, región 5.5° N - 23.5° N, 57.5° W - 15° W y 0° - 20° S, 10° E - 30° W
DiAN	Dipolo Atlántico Norte (tropical y extratropical)
DiLC	Dipolo Litoral Caribe, región 14° N - 72° W y 10° N - 78° W
DIMC	Dipolo Mar Caribe, REGION 14° N - 82° W y 14° N - 66° W
DiAM	Dipolo humedad en el Amazonas a 500hPa, región 2° N - 73° W y 6° S - 68° W
OLR (75° W)	Radiación de onda larga saliente, área centrada en 10.5° N y 75° W

2.1.1 Consideraciones generales sobre algunas variables explicativas

Los índices de meso y gran escala analizados en el contexto de este estudio, corresponden, generalmente, a una expresión numérica que resume la complejidad de una serie de procesos físicos que se desarrollan en el seno de la atmosfera y el océano y



dentro de la capa propia de su interacción. Es posible que algunos de ellos caractericen el mismo proceso, desde ángulos diferentes; por ejemplo, los índices correspondientes a las anomalías de la temperatura

superficial del mar en los diferentes sectores del Pacífico tropical describen la componente oceánica del ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur (ENOS), en tanto que el IOS, la OLR y el flujo de vientos en superficie y altura sobre el Pacífico, hacen otro tanto desde el punto de vista atmosférico. A efecto de evitar la redundancia, el proceso de selección considera cuidadosamente este aspecto. A continuación se describen algunas particularidades de los índices que caracterizan procesos que pueden tener incidencia en la variabilidad de precipitación en Colombia. Tomando en consideración el hecho de que la gran mayoría de estas variables poseen información completa en el período 1948-08, se toma este período como referencia para su estudio y análisis.

Figura 2.1 Variables explicativas (índices atmosféricos y oceánicos de meso y gran escala) ofrecidas por los centros mundiales especializados, particularmente por NOAA/NCEP/CAC, USA., discriminadas por grupos.

ENOS – El Niño – Oscilación del Sur

EL NIÑO - El fenómeno El Niño es una de las fases extremas dentro del ciclo ENOS, que es la causa de la mayor señal de la variabilidad climática interanual, en la zona tropical (Pabón & Montealegre, 2008). El Niño está asociado con la aparición y permanencia por varios meses de aguas superficiales relativamente más cálidas que lo normal desde el Pacífico tropical central hasta las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Este calentamiento de la superficie del Océano Pacífico cubre grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta. La Niña se refiere a las condiciones frías extremas que recurrentemente, pero de manera irregular, se presentan en el sector central y oriental del Pacífico tropical durante por lo menos seis meses.

OSCILACION DEL SUR - La distribución de la temperatura superficial del mar o del continente determina en gran parte la distribución de la presión atmosférica cerca de la superficie. Por lo general, las superficies cálidas corresponden a baja presión atmosférica y las superficies frías, a alta; así, los cambios en los patrones de distribución de la temperatura cerca de la superficie produce alteraciones en el campo de la presión atmosférica. La Oscilación del Sur (OS) es la respuesta atmosférica a los procesos oceánicos del Pacífico tropical relacionados con los fenómenos El Niño y La Niña y es el mecanismo principal a través del cual estas condiciones extremas alteran los patrones de la circulación de la atmósfera y ejercen influencia en el clima mundial (Pabón & Montealegre, 2008). Según las propias palabras de su descubridor, G. Walker “Cuando la presión es alta en el océano Pacífico tiende a ser baja en el océano Índico y viceversa”. La parametrización de este evento descrito como un balancín de presión se ha hecho por medio del Índice de la Oscilación del Sur (IOS).

IOS – Índice de la oscilación del sur

Este índice se utiliza para determinar las fluctuaciones de la masa atmosférica entre los sectores centro-oriental y occidental del pacífico. En este trabajo se utiliza el IOS calculado por el Centro de Análisis Climático (CAC) de la NOAA, (National Oceanic and Atmospheric Administration) el cual es calculado como las diferencias normalizadas entre la presión atmosférica en Tahití (Polinesia Francesa) y Darwin (Australia).

VIENTOS DE LA ALTA Y BAJA TROPOSFERA EN EL PACIFICO TROPICAL

Para establecer la dinámica de la atmosfera en superficie y en capas altas, se utilizan dos variables muy importantes, a saber: las anomalías de viento zonal en niveles bajos (850 hectopascales - hPa) y el flujo zonal de altura a 200 hPa, el cual describe los vientos

troposféricos, cuyas anomalías tienden a oponerse a los de 850 hPa. Los vientos zonales en 850 hPa, corresponden al movimiento del aire que sopla de Este a Oeste, a una altura aproximada de 1500 metros sobre el nivel del mar, en tanto que los vientos en 200 hPa, soplan de Oeste a Este, a una altura aproximadamente de 12 kilómetros. Los valores positivos (negativos) del índice de viento zonal a 200 hPa implican anomalías de la dirección Oeste (Este). Los valores, positivos (negativos) del índice de viento zonal a 850 hPa implican anomalías del Este (Oeste).

NAO - North Atlantic Oscillation

Es una fluctuación de la masa atmosférica a gran escala entre el centro de alta presión subtropical localizado en la Azores (38° Norte) y el centro de baja presión subpolar localizado en Islandia (65° Norte). Este índice varía de un año a otro año, pero también presenta una tendencia a permanecer en una fase en intervalos que duran varios años.

Cuando la NAO está en su fase positiva, es decir, cuando los centros de baja presión sobre Islandia y el Ártico y los de alta presión en las Azores están reforzados, se producen vientos más fuertes que los normales en altas latitudes oeste y, consecuentemente, los veranos son frescos y los inviernos moderados y húmedos en Europa central. Durante la fase negativa se observa el debilitamiento del anticiclón de las Azores y desaparecen los vientos del oeste, dando origen a un desplazamiento de las borrascas atlánticas a latitudes más bajas de las habituales; estas áreas sufren entonces, inviernos fríos y predominan las lluvias en el sur de Europa y el norte de África.

TSM – Temperaturas de la superficie del mar

La temperatura superficial del mar (TSM) es un valioso indicador de la estructura térmica de la capa superior de los océanos. En consecuencia, utilizamos la TSM como variable explicativa de esta dinámica, tomando en consideración también que esta variable está estrechamente relacionada con los procesos convectivos que se generan en la atmósfera que se yace sobre ella. Para la vigilancia de la variabilidad de la TSM en la franja tropical del Pacífico, se han establecido cuatro regiones (ver localización detallada en la tabla 2.1) muy bien definidas a saber: Occidental (región Niño 4), Central (región Niño 3), Centro-occidental: (región Niño 3-4) y Oriental: (región Niño 1+2). En cada una de estas regiones se mide la temperatura de la superficie del mar en grados Celsius y se determinan sus anomalías, evaluadas como la diferencia entre un valor mensual cualquiera y su promedio climatológico o valor normal.

Como El Niño y La Niña son fenómenos de carácter oceánico, la comunidad científica ha desarrollado una gran cantidad de índices para caracterizar estos fenómenos. Probablemente los más utilizados en la actualidad son las anomalías de TSM en las regiones Niño 3 y Niño 3-4.

ONI – Índice oceánico de El Niño

Recientemente la NOAA, desarrollo un índice oceánico denominado ONI por sus siglas en inglés, el cual es calculado como la media móvil de tres puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la Región Niño 3-4. De acuerdo con este índice, en condiciones El Niño, el ONI debe ser mayor ó igual a +0.5 °C y para La Niña debe ser menor ó igual que -0.5 °C. Ahora, para clasificar un período determinado como El Niño ó La Niña, estos umbrales deben ser excedidos por un período de al menos cinco meses consecutivos.

MEI – Índice multivariado de ENSO

Se han desarrollado algunos índices de carácter mixto que involucran tanto variables atmosféricas como oceánicas en su composición. Uno de los más conocidos es el índice MEI (Multivariate ENSO Index). Este índice puede ser entendido como la media ponderada de seis variables sobre el Pacífico tropical, a saber: presión atmosférica a nivel del mar, componente zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) del viento en superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en superficie, y cantidad total de nubosidad. Los valores positivos del MEI representan la fase cálida de ENOS (EL Niño).

MJO – Oscilación de Madden y Julian

Se define como una célula zonal de la circulación que se propaga al Oriente, con vientos zonales de signos opuestos en la baja y alta tropósfera y con un período de 40 a 60 días. La señal en el viento zonal ecuatorial está presente a lo largo del cinturón tropical en la tropósfera superior, mientras que en la baja tropósfera, se confina a los océanos Pacífico occidental e Índico (Madden y Julian, 1972). La rama ascendente de la célula de la circulación está asociada con el fortalecimiento de la convección sobre el océano Índico, posteriormente se intensifica e inicia su propagación hacia el océano Pacífico occidental con una velocidad cercana a los 5 m/s.

QBO – Oscilación Cuasibienal.

Es una oscilación de largo plazo en el viento zonal de la baja y media estratósfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre un poco menos de dos años (20 meses) y hasta casi tres años (35 meses), con una duración media de 28 meses (León & Zea, 1998). Consiste en la alternancia de vientos del Este, dominantes durante una parte del período, con vientos del Oeste en el resto del período. En este análisis se utilizaron los promedios del viento zonal a 30 hPa.

OLR – Radiación de onda larga saliente

El índice de radiación solar de onda larga saliente de la tierra (OLR), es una medida indirecta de la convección, por cuanto sus valores extremos están asociados directamente a convección profunda (mínimos de OLR) o ausencia de ésta (máximos de OLR).

ZCIT – Zona de Confluencia Intertropical

La Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) se reconoce en los mapas del tiempo como una zona de máxima nubosidad y lluvia, ocasionada por la convergencia de los vientos Alisios del Noreste y del Sureste. La ZCIT se mueve latitudinalmente, siguiendo el desplazamiento aparente del sol con respecto a la Tierra, con un retraso aproximado de dos meses. A su paso por las diferentes regiones de la geografía nacional la ZCIT va determinando la ocurrencia de las temporadas lluviosas en Colombia (León & Zea, 1998). La ZCIT alcanza su posición extrema meridional a finales y comienzos de año. Para abril y mayo se registra su paso sobre la parte media del país, alcanzando su posición más septentrional en los meses de agosto y septiembre. En octubre y noviembre se registra nuevamente su paso por el centro del país en su retorno hacia el sur. Sobre la parte continental del país la ZCIT se manifiesta como una serie de conglomerados convectivos no muy bien organizados. Sobre el océano aparece mucho mejor definida.

2.1.2 Definición de la variable explicada o impacto (Precipitación)

Para efectuar la correlación cruzada entre las variables explicativas y explicada, se consideraron tres formas de presentación de la variable explicada, de acuerdo con el tipo de análisis requerido: i) la variable original en milímetros de lluvia, ii) anomalías en valor absoluto, expresadas en milímetros y calculadas como el valor mensual menos el valor promedio para el mes correspondiente y iii) anomalías porcentuales, calculadas mediante la siguiente expresión (Montealegre, 1999):

$$Ip_{ij} = \frac{P_{ij}}{\bar{P}_j} \times 100, \quad \text{donde:}$$

Ip_{ij} - es el índice del parámetro del mes j y el año i ;

P_{ij} - es el valor del parámetro a nivel mensual del mes j y el año i ;

\bar{P}_j - es el promedio multianual (período 1961-2005) del parámetro del mes j .

El índice agrupa los valores porcentuales de lluvia en cinco categorías, como se aprecia en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Índice porcentual de lluvia, definido para cinco categorías de afectación.

Denominación	Descripción de su significado
Muy Deficitario	Precipitación mensual inferior al 40% de lo normal
Deficitario	Precipitación Mensual entre el 40 y el 80% de lo normal
Normal	Precipitación Mensual entre el 80 y el 120% de lo normal
Excesivo	Precipitación Mensual entre el 120 y el 160% de lo normal
Muy Excesivo	Precipitación mensual superior al 160% de lo normal

El índice fue aplicado a las series pluviométricas de las estaciones meteorológicas que fueron seleccionadas (tabla 2.3) tomando como referencia el estudio de regionalización estadística (Casas, 2006), el cual integra el análisis de la variabilidad intranual de la precipitación, la estacionalidad propia de este fenómeno climatológico y la ubicación geográfica de las estaciones que presentan patrones de comportamiento comunes. Se tomaron igualmente en consideración la selección de variables explicadas obtenida por Montealegre (1999), mediante la superposición de mapas temáticos relativos a las principales regiones agro-industriales y energéticas del país, con los cuales se logran establecer las áreas de mayor vulnerabilidad para las cuales se requieren análisis detallados “in situ”.

Tabla 2.3 Datos de identificación de las estaciones pluviométricas seleccionadas. TE corresponde al tipo de estación; LAT y LON son la latitud y la longitud y para ambos casos, las dos primeras cifras corresponden a los grados y las dos siguientes a los minutos. La elevación (ELEV) esta expresada en metros.

TE	ESTACION	DPTO	MUNICIPIO	LAT	LON	ELEV	Serie	AÑOS
SP	Apto. Almirante Padilla	Guajira	Riohacha	11 32 N	75 26 W	4	72 - 08	36
SP	Apto. Rafael Nuñez	Bolivar	Cartagena	10 27 N	75 31 W	2	41 - 08	67
PG	La Floresta	Santander	Floridablanca	7 05 N	73 08 W	925	79 - 08	29
SS	Apto. Arauca	Arauca	Arauca	7 04 N	70 44 W	128	50 - 08	58
SP	Apto. Olaya Herrera	Antioquia	Medellin	6 13 N	75 35 W	1490	40 - 08	68
SP	Apto. Pto. Carreño	Vichada	Pto. Carreño	6 11 N	67 29 W	50	68 - 08	40
SP	Apto. El Caraño	Choco	Quibdo	5 42 N	76 39 W	53	47 - 08	61
SS	Apto. Perales	Tolima	Ibague	4 26 N	75 09 W	928	70 - 08	38
SP	Apto Eldorado Pista 1-2	Bogota	Bogota	4 43 N	74 09 W	2547	72 - 08	36
CP	Universidad del Valle	Valle del Cauca	Cali	3 24 N	76 32 W	970	65-08	36
CO	San Jose del Guaviare	Guaviare	San Jose del Guaviare	2 35 N	72 38 W	165	83 - 08	25
AM	Granja El Mira	Nariño	Tumaco	1 31 N	78 40 W	16	69 - 08	39
SP	Apto. Antonio Nariño	Nariño	Pasto	1 24 N	77 17 W	1796	57 - 08	51
SS	Apto. G. Artunduaga	Caqueta	Florencia	1 36 N	75 32 W	244	69 - 08	39
SP	Pto. Leguizamo	Putumayo	Pto. Leguizamo	0 19 S	74 46 W	147	73 - 08	35
SP	Apto Vasquez Cobo	Amazonas	Leticia	4 09 S	69 57 W	84	68 - 08	40
SP	Apto. Sesquicentenario	San Andres	San Andres	12 35 N	81 43 W	1	58 - 08	50

2.2 MÉTODOS ESTADÍSTICOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS

Dado que las variables explicadas y explicativas son series de tiempo, cuyos datos presentan estructuras definidas de auto correlación, se debe prescindir del uso de métodos descriptivos de estadística clásica, propios de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Sin embargo, dado que este tipo de análisis mejora significativamente el conocimiento intrínseco de las variables, así como el de sus relaciones con otros conjuntos de variables, se hace uso de algunos de estos métodos, con el debido cuidado de interpretar los resultados.

2.2.1 Análisis Básico aplicado a las variables explicativas y explicadas

2.2.1.1 Análisis Gráfico. Esta metodología permite organizar y presentar los aspectos sobresalientes de las variables. Permite igualmente establecer hipótesis sobre las relaciones que se estudian. En el caso de las variables explicativas, de las cuales se conoce muy poco, la representación gráfica ayuda a distinguir en forma inmediata algunas de sus características más importantes (secuencia temporal, forma de la distribución, tendencias, anomalías, etc.).

2.2.1.2 Análisis de Correlación Cruzada. Mediante este tipo de análisis se logra obtener información acerca de la estructura espacial y temporal de las variables. Se aplico esta técnica a cada uno de los grupos de variables por separado (explicativas y explicadas), pudiéndose medir la intensidad de la asociación que existe entre ellas. A través de esta misma técnica, se asocio cada una de las variables explicadas con la totalidad de las variables explicativas de forma sincrónica y rezagada,

2.2.1.3 Análisis de Autocorrelación. Se define como la correlación cruzada de una señal consigo misma. La autocorrelación de una serie temporal derivada de un proceso, es simplemente la correlación de dicho proceso con una versión desplazada en el tiempo de la propia serie temporal. La función de autocorrelación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal.

2.2.2 Análisis de Asociación entre las variables explicativas y explicadas

2.2.2.1 Correlación Cruzada (sincrónica y rezagada). El uso de la correlación cruzada es de gran importancia en la determinación del tiempo de respuesta con el que las variables explicadas (precipitación) reaccionan a las fluctuaciones de las variables explicativas (índices de meso y gran escala). La respuesta puede ser inmediata (sincrónica) o retardada por uno o varios periodos (rezagada). Con miras a establecer el grado de inercia y posibles relaciones de causalidad entre las variables, se aplicó inicialmente la correlación cruzada de tipo sincrónico. Tomando en consideración que los procesos físicos analizados involucran un grado de inercia bien definido, dado los componentes del sistema climático involucrados (océano y atmósfera), se aplicó la correlación cruzada para rezagos de 1 a 3 periodos. La cuantificación de estas relaciones es igualmente importante en el proceso de selección de variables, por cuanto evita la redundancia.

2.2.2.2 Correlación Espacial. Mediante esta técnica se logró establecer espacialmente el grado de asociación (correlación de Pearson) de los regímenes secos y lluviosos de cada una de las variables explicadas localizadas en un punto específico de la geografía y la estructura térmica superficial de los océanos, a escala global. Se estudiaron dos sectores específicos, a saber: océano Pacífico (15° W – 160° W y 40° N - 40° S) y océano Atlántico (15° W – 160° W y 40° N - 40° S). De este último, se analizaron detalladamente las asociaciones existentes en tres sectores bien definidos: Atlántico norte (20° a 50° N), Atlántico tropical norte (Ecuador - 20° N) y Atlántico tropical sur (Ecuador - 20° S).

Así mismo, se amplió el análisis a nivel mensual para estudiar la dinámica de las relaciones de forma continua en el tiempo; para conseguir este objetivo, se organizó una secuencia móvil para cada una de las variables explicadas con la serie de mapas construidos. Se calculó un índice medio anual para cada variable explicada, el cual se estimó como la suma de los índices mensuales de mismo signo multiplicado un factor de persistencia (fracción anual del mismo índice).

2.2.2.3 Identificación de Dipolos. Dado que se establecieron asociaciones bien definidas de núcleos de anomalías de TSM en algunos sectores del océano Atlántico tropical y extratropical con la precipitación de ciertas áreas continentales durante algunos meses en particular, se identificaron algunas áreas oceánicas poseedoras de un contraste térmico bien definido en su capa superficial, comúnmente denominados dipolos. Se exploraron posibles relaciones de causalidad para diferentes sectores del océano Atlántico, lográndose analizar los siguientes casos: a) Atlántico tropical, b) Atlántico Norte, c) Litoral Caribe y d) Mar Caribe.

Haciendo uso de un concepto similar, se construyó un índice de meso escala con base en el contraste de humedad observado en dos puntos de la selva Amazónica al nivel de la media Troposfera (dipolo del Amazonas).

Se ha mencionado igualmente que la radiación solar de onda larga saliente de la tierra (OLR), es una medida indirecta de la convección; en consecuencia se examinaron las series de OLR para la longitud 75° Oeste (huso horario de Colombia) y las latitudes 10.5° , 4.8° y 1° Norte y 4.8° Sur, con miras a establecer si ellas independientemente o contrastadas entre sí, exhiben relaciones de causalidad con el comportamiento de la lluvia. Se optó por usar como variable explicativa la serie correspondiente a la latitud 10.5° Norte, dadas sus mejores correlaciones.

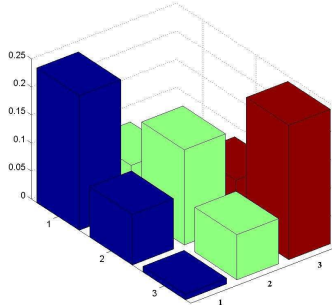
2.2.2.4 Análisis Espectral. Es utilizado para determinar los ciclos y frecuencias predominantes en ambos tipos de variables, de cuya comparación, se definen o

descartan asociaciones entre los procesos físicos que se pretenden relacionar. El análisis espectral es un método derivado de la transformación de Fourier.

2.2.3 Análisis de Contingencia

Exploradas las relaciones de asociación de mayor significación entre las variables explicativas y la variable explicada, se desarrolla el análisis de contingencia, bajo la premisa de que la asociación entre dos variables continuas está determinada por su distribución de probabilidad conjunta. Dado que esta distribución es desconocida, la tabla de contingencia constituye una herramienta de solución para estos casos. Para construir la tabla, cada una de las variables a relacionar se divide en tres categorías. Cada pareja de valores pertenece a una y sólo una de las categorías conjuntas. Luego se calculan las frecuencias empíricas del número de parejas que pertenecen a cada categoría.

Si la asociación entre las dos variables es muy débil, la población dentro de todas categorías es similar (aleatoria), lo cual significa que la variable explicativa no rinde un efecto importante sobre la variable a explicar (Alfaro et al, 2003); es decir, ésta no se aparta de manera significativa de lo esperado por la climatología: (1/3, 1/3, 1/3).



Si la asociación es fuerte, la superficie alcanza valores grandes a lo largo de una de las diagonales y valores bajos en las esquinas que no pertenecen a la diagonal (figura 2.2). En el caso de asociación positiva, los valores altos se dan a lo largo de la diagonal mayor y en el caso de asociación negativa, a lo largo de la diagonal menor.

Figura 2.2 Grafico representativo de una fuerte relación de asociación positiva entre dos variables. Tomado del manual del usuario - Software EXEVER.

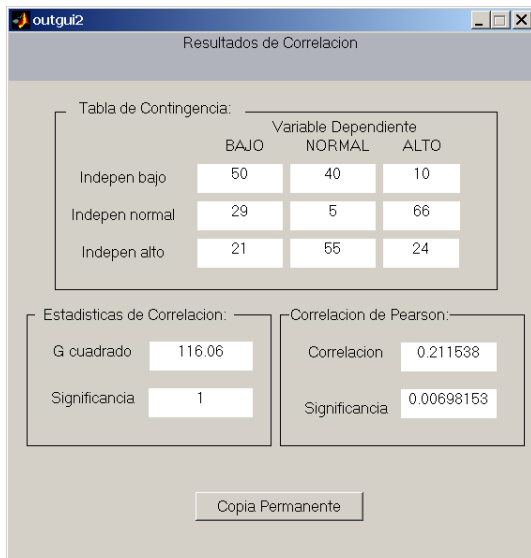
Al dividir las frecuencias empíricas por el número total de parejas se obtienen las probabilidades empíricas. Es decir, $p_{ij} = f_{ij} / n$, es la probabilidad empírica que una pareja de valores pertenezca a la categoría conjunta ij .

La ventaja de dividir cada una de las variables a relacionar en tres categorías (terciles), es que se obtienen 9 categorías conjuntas que permiten cierto grado de resolución y un número manejable de posibilidades. Por otro lado, una manera pragmática de enfocar la selección de 3 x 3 es que frecuentemente se busca una predicción que sea entendida fácilmente por el usuario, usando conceptos tales como: normal, arriba de lo normal y abajo de lo normal.

El objetivo central de esta metodología es establecer de forma objetiva la asociación que podría existir entre un conjunto de observaciones (variable explicativa, por ejemplo, la temperatura superficial del mar en el Pacífico central) y un conjunto de valores cuya proyección futura se desea pronosticar (variable explicada, por ejemplo, la precipitación en Bogotá). Las observaciones se dividen en terciles: valores bajos, valores normales y valores altos. Cada observación tiene que pertenecer a una sola categoría (las categorías son excluyentes) y las tres categorías agotan todas las posibilidades dentro de la "muestra" o conjunto de observaciones (las categorías son exhaustivas).

Para evaluar la bondad de una predicción derivada de una tabla de contingencia, se cuantifica que tan diferente es la tabla dada con respecto a una tabla de contingencia de variables con independencia estadística. La gran mayoría de los estadísticos de significación utilizados en este estudio (G^2 , χ^2 , r^* , etc.) utilizan este criterio con la finalidad de medir el grado de asociación, de una manera objetiva.

La construcción de la gran mayoría de las tablas de contingencia (87.5%) se realizó con el paquete EXEVER, el cual es un software desarrollado a través del proyecto financiado



por la Oficina de programas Globales de la Agencia para la Atmósfera y el Océano de los Estados Unidos de América (OGP-NOAA) y apoyado por el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica y el Laboratorio de Meteorología y Oceanografía para el Atlántico de la NOAA (Proyecto NOAA-UCR) y distribuido gratuitamente a los Servicios Meteorológicos de centro y Suramérica para apoyar la realización de los Foros Regionales de Predicción Climática (conocidos como RCOFs por sus siglas en inglés). En la figura 2.3 se aprecia una muestra de la salida con estos resultados producida por el software EXEVER.

Figura 2.3 Muestra de una tabla de contingencia obtenida a través de EXEVER. Aparecen igualmente los estadísticos utilizados para medir la significación. Tomado del manual del usuario - Software EXEVER.

Análisis trimestral - La experiencia muestra que correlacionar secuencias mensuales no da generalmente resultados satisfactorios porque se mezclan comportamientos estacionales diferentes (por ejemplo, estación seca con la lluviosa, finalización de un periodo de transición con la estación lluviosa o seca, etc.) que tienden a disminuir la magnitud de las correlaciones y a dificultar las interpretaciones. Por ello, se considera más productivo correlacionar valores promedio de varios meses (usualmente tres) de cada año, entre las variables explicativa y explicada.

Así por ejemplo, se puede correlacionar el promedio de TSM del océano Pacífico central (región Niño 3-4) para los meses de junio, julio y agosto (jja) con el índice promedio de la precipitación en Bogotá, para los mismos meses (jja), denominada correlación sincrónica, o de rezago (0). Las correlaciones pueden igualmente efectuarse de forma desfasada, tomando el mismo trimestre (jja) del índice correlacionado con los trimestres siguientes de precipitación: julio, agosto, septiembre (jas), rezago (-1); agosto, septiembre, octubre (aso), rezago (-2); septiembre, octubre, noviembre (son), rezago (-3).

Dado que muchos de los procesos de gran escala inciden en el comportamiento del patrón pluviométrico nacional, entre uno y tres meses después, solo se consideran estos periodos de rezago dentro del análisis. En consecuencia, para cada uno de los tres índices considerados, se calculan las 48 combinaciones posibles, 12 por cada rezago:

Rezago (0): def-def, efm-efm, fma-fma, etc.

Rezago (-1): def-efm, efm-fma, fma-mam, etc.
 Rezago (-2): def-fma, efm-mam, fma-amj, etc.
 Rezago (-3): def-mam, efm-amj, fma-mjj, etc.

Bajo esta premisa, se desarrolla el análisis exploratorio entre las variables explicativas (tres índices seleccionados: TSM Pacífico central Región El Niño 34, Radiación de onda larga saliente - OLR, centrado en la latitud 10.5° Norte y el Dipolo de humedad relativa en la Región Amazónica) y las variables explicadas (17 series de tiempo pluviométricas), que se suponen correlacionadas, positiva o negativamente en el tiempo para rezagos de un lapso (-1), es decir, la variable explicativa corresponde al año anterior de la explicada o sincrónicas (0), ambas variables están referidas al mismo año. El rezago negativo ocurre cuando la variable explicativa antecede a la variable explicada.

Una vez cuantificado el tipo de asociación entre ambas variables, se calculan los datos de probabilidad conjunta que son incluidos en las tablas de contingencia 3x3. Se construyen 810 tablas de Contingencia correspondientes a las parejas de trimestres cuyos valores de asociación superan los niveles de significación al 90% y se estiman los estadísticos representativos de la confiabilidad de las tablas.

Aunque hubo selectividad en la construcción de las tablas para niveles de significación igual o superior al 90%, no todas las tablas construidas resultaron significativas, a la luz de los estadísticos aplicados con este propósito, G^2 , χ^2 y r^* . Se considero entonces bien importante calcular la totalidad de las tablas, es decir, incluir aquellas correspondientes a las parejas de trimestres con asociaciones NO significativas (< 90%), pero únicamente para las principales ciudades del país (8 estaciones seleccionadas). Se calcularon en consecuencia, 508 tablas adicionales para el índice N34, 523 para la OLR y 677 para el Dipolo.

En la tabla 2.4 se presenta una muestra de las matrices construidas con base en las relaciones establecidas entre la precipitación y la TSM de la región Niño 34. En la segunda y tercera columnas de estas tablas aparecen las 12 posibles combinaciones de parejas trimestrales de las variables explicativas y explicadas, correspondientes a cada uno de los rezagos descritos en la primera columna.

Tabla 2.4 Matriz construida con base en las relaciones establecidas entre el índice de la precipitación en Bogota (variable explicada) y la TSM de la región Niño 34 (variable explicativa).

	Indice N 34	Precip. mm	Rezago (-1)	Rezago (0)	Signif. 90%	Signif. al 95%	VBLE. IND. ALTO			VBLE. IND NORMAL			VBLE. IND. BAJO			Estadísticos Tabla			
							BN	N	SN	BN	N	SN	BN	N	SN	G ² /Chi	Signif.	r*	Sign.
R E Z A G O	def	def	0.45	-0.63	0.34	0.4	83	17	0	9	58	33	8	25	67	622637	1	-0.70	0.00
	efm	efm	0.11	-0.55	0.32	0.38	75	25	0	17	58	25	8	17	75	608042	1	-0.70	0.00
	fma	fma	0.09	-0.14	0.27	0.33	50	25	25	33	25	42	17	50	33	3.6	0.54	-0.21	0.01
	mam	mam	0.09	0.05	0.3	0.35	17	50	33	33	25	42	50	25	25	3.6	0.54	0.21	0.98
	amj	amj	-0.24	0	0.29	0.34	25	42	33	25	25	50	50	33	17	3.6	0.54	0.20	0.98
	mjj	mjj	0.13	-0.21	0.29	0.34	33	50	17	42	17	41	25	33	42	3.2	0.47	-0.17	0.04
	jja	jja	0.05	-0.49	0.32	0.38	50	42	8	50	16	34	0	42	58	471826	1	-0.50	0.00
	jas	jas	0.11	-0.54	0.34	0.4	58	34	8	34	24	42	8	42	50	9.4	0.95	-0.46	0.00
	aso	aso	0.06	-0.44	0.3	0.35	50	33	17	42	13	45	8	54	38	8.9	0.94	-0.33	0.00
	son	son	0	-0.34	0.28	0.33	42	25	33	41	34	25	17	41	42	2.8	0.4	-0.17	0.05
	ond	ond	0.24	-0.37	0.28	0.34	25	50	25	58	25	17	17	25	58	7.7	0.89	-0.21	0.01
	nde	nde	0.54	-0.56	0.36	0.43	58	42	0	25	25	50	17	33	50	457232	1	-0.46	0.00
R E	def	efm	0.14	-0.57	0.33	0.39	83	17	0	9	66	25	8	17	75	676151	1	-0.75	0.00
	efm	fma	0.15	-0.17	0.28	0.34	67	25	8	8	42	50	25	33	42	11.9	0.98	-0.38	0.00
	fma	mam	0.06	-0.02	0.29	0.34	25	50	25	33	25	42	42	25	33	2	0.26	0.04	0.66
	mam	amj	0.19	-0.02	0.28	0.33	17	50	33	33	17	50	50	33	17	5.2	0.73	0.25	0.99

En las siguientes cuatro columnas se consignan los datos relativos al valor de las correlaciones para un desfase de un año (-1) y asociación sincrónica (0), junto con sus

correspondientes niveles de significación al 90 y 95%. Las 9 columnas siguientes contienen los datos de probabilidad conjunta dispuestos en las tablas de contingencia 3x3. En las cuatro columnas restantes se han consignado los estadísticos inherentes a la confiabilidad de la tabla. Los detalles relaciones con el color de las celdas y los datos resaltados en negrilla aparecen en las convenciones descritas de cada matriz.

Las tablas de contingencia así construidas son de tipo **climatológico** y constituyen la base de la predicción climática, cuando se asocian con los pronósticos probabilísticos del índice Niño N-34 proporcionados por el CPC para obtener las predicciones al plazo elegido (mensual, trimestral, semestral, etc.).

2.2.4 Análisis Compuesto

El Análisis Compuesto es una metodología científica referenciada inicialmente por Montroy et al., en 1998 y luego adaptado en el CPC por Barnston et al., en 1999. Posteriormente fue modificado por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos y utilizado en forma operativa de 2002 a 2004. Esta importante herramienta de análisis climático facilita la determinación de las relaciones que pueden llegar a existir entre algunos fenómenos de variabilidad climática, tipo El Niño y el efecto que éste puede ejercer sobre el comportamiento de las precipitaciones, por ejemplo. El Análisis Compuesto (AC) es básicamente una técnica de muestreo basada sobre la probabilidad condicional (NOAA, 2002). Una probabilidad condicional es aquella en que dada la ocurrencia de un evento (como un fenómeno El Niño), ocurra otro que pueda estar asociado al primero (alteración de la precipitaciones en algún lugar). El AC usa la frecuencia climatológica entre una variable climática como la precipitación y un evento climático como el Niño, el cual es complementado con pronósticos del evento climático. Los pronósticos son ofrecidos por el Centro de Predicción Climática de la NOAA con base en la TSM de la región Niño 34. El resultado es un pronóstico categórico o probabilístico de la variable climática observada (precipitación), estando por arriba, cerca o por debajo de lo normal dada la ocurrencia de un evento como el Niño.

La aplicación completa de la técnica establece el seguimiento de las siguientes fases:

FASE I: Elaboración de la Tabla de Contingencia Climatológica

1. Disposición de las series de tiempo de las variables climáticas a analizar (variable explicativa y variable explicada) en forma mensual o trimestral, de acuerdo a las necesidades de información pronosticada.
2. Calculo de los terciles de las variables explicativas y explicadas
3. Identificación de cada dato dentro del tercil correspondiente
4. Calculo de las frecuencias de presentación de la variable dentro de cada tercil
5. Construcción de la tabla de contingencia (Distribución histórica del evento).

FASE II: Consideración del ajuste de la tendencia de la variable climática

1. Determinar si las desviaciones de la tendencia esperada son significativas estadísticamente.
2. Utilizar el método de mínimos cuadrados para ajustar la tendencia.

FASE III: Aplicación del Análisis de Riesgos

Mediante este análisis se evalúa si el Análisis Compuesto es estadísticamente significativo. Para ello, se hace uso de la distribución hipergeométrica, la cual es una distribución de probabilidad discreta con tres parámetros discretos N , d y n cuya función de probabilidad es:

$$P(X = x) = \frac{\binom{d}{x} \binom{N-d}{n-x}}{\binom{N}{n}}$$

N = Tamaño de población, n = Tamaño de muestra, d = Cantidad de elementos que cumple característica deseada y x = Cantidad de éxitos.

FASE IV: Elaboración del pronóstico utilizando el AC

Con base en la tabla de contingencia construida en la fase I, la cual nos proporciona la distribución histórica de la asociación entre las variables explicativas y explicada, aplicamos los pronósticos probabilísticos relacionados con las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3-4 del Pacífico tropical, proporcionados por el Centro de Predicción Climática de la NOAA para obtener las predicciones al plazo elegido (mensual, trimestral, semestral, etc.), tal como se muestra en el siguiente figura 2.4.

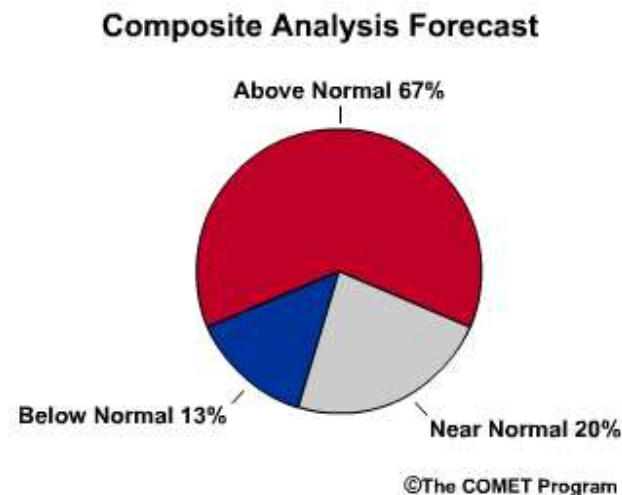


Figura 2.4 Esquema representativo del resultado final de un pronóstico categórico o de probabilidad condicional de una variable climática observada como la precipitación, por ejemplo, en rangos por encima de lo normal, normal y por debajo de lo normal, dada la ocurrencia de un evento como El Niño o La Niña.

El uso de esta técnica con fines de Predicción Climática, tiene infinidad de aplicaciones para los tomadores de decisión a mediano y largo plazo, en sectores como el hidroenergético, agropecuario, industrial, de transporte, turismo, floricultura y en fin, para el

publico en general.

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados que se presentan a continuación, son una síntesis de las características más importantes de las variables consideradas en este análisis. Para facilitar su continua denominación a lo largo del trabajo, se emplean las siglas que les fueron asignadas en la Tabla 2.1

3.1 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS

3.1.1 Correlación Cruzada (Sincrónica)

La correlación cruzada de tipo sincrónico entre las variables explicativas, permite corroborar los planteamientos teóricos sobre el funcionamiento de los procesos de interacción océano-atmósfera. Los datos de la matriz de correlación múltiple de las variables explicativas reflejan muy bien la estrecha relación que existe entre las variables que están asociadas con el Ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur (ENSO). Las anomalías de la TSM en las diferentes regiones El Niño aparecen bien relacionadas con variables que identifican procesos similares en el Pacífico (BEST, TP, PWP, ONI). Lógicamente, también presentan una buena asociación aquellas variables que involucran estos procesos desde perspectivas diferentes a las oceánicas, como IOS, MEI, ENSO, evidenciando la interrelación que existe entre los procesos oceánicos y atmosféricos, en el sector tropical del Pacífico tropical. Presentan igualmente un buen grado de asociación entre sí, las variables que caracterizan procesos oceánicos en el Atlántico, tales como TNA, TSA, ATL T, AMO y AMM. Es importante notar que las asociaciones del Atlántico Norte con las demás variables, son de mayor significación y más numerosas que las del Atlántico Sur. Algunas de las variables consideradas no presentan ningún tipo de relación con el resto de los índices analizados, como se pudo comprobar con WP, QBO, SAHEL, TNI, SOL Y AAO. Algunas otras, como PNA, NAO, AO, tan solo guardan relación con alguna otra de su misma naturaleza. En la tabla 3.1 se aprecia una síntesis de las correlaciones de mayor significación.

Tabla 3.1 Matriz de correlación cruzada (sincrónica) de las variables explicativas (índices de meso y gran escala) de mayor significación. En color rojo se destacan los coeficientes de correlación superiores a 0.7

	BEST	TP	PMM	TNA	ATL T.	AMO	AMM	IOS	MEI	N-3	N-4	N-12	N-34	ONI	NTA	GIAM	ENSO
BEST	1.00	0.90	-0.09	0.19	0.06	0.05	-0.09	-0.91	0.90	0.62	0.80	0.36	0.81	0.92	0.23	0.71	0.85
TP	0.90	1.00	-0.08	0.26	0.12	0.11	-0.08	-0.71	0.95	0.67	0.79	0.43	0.82	0.93	0.31	0.74	0.82
PMM	-0.09	-0.08	1.00	0.82	0.75	0.67	1.00	0.09	-0.10	-0.07	-0.04	-0.02	-0.09	-0.13	0.71	0.13	-0.09
TNA	0.19	0.26	0.82	1.00	0.79	0.73	0.82	-0.13	0.24	0.13	0.23	0.08	0.18	0.21	0.90	0.31	0.09
ATL T.	0.06	0.12	0.75	0.79	1.00	0.87	0.74	-0.06	0.09	0.07	0.04	0.07	0.06	0.06	0.68	0.13	-0.01
AMO	0.05	0.11	0.67	0.73	0.87	1.00	0.66	-0.04	0.08	0.05	0.06	0.03	0.06	0.06	0.62	0.10	-0.02
AMM	-0.09	-0.08	1.00	0.82	0.74	0.66	1.00	0.09	-0.10	-0.07	-0.04	-0.02	-0.09	-0.13	0.71	0.13	-0.09
IOS	-0.91	-0.71	0.09	-0.13	-0.06	-0.04	0.09	1.00	-0.76	-0.48	-0.64	-0.29	-0.63	-0.73	-0.18	-0.57	-0.73
MEI	0.90	0.95	-0.10	0.24	0.09	0.08	-0.10	-0.76	1.00	0.63	0.80	0.39	0.80	0.92	0.32	0.75	0.82
N-3	0.62	0.67	-0.07	0.13	0.07	0.05	-0.07	-0.48	0.63	1.00	0.49	0.82	0.87	0.66	0.15	0.57	0.59
N-4	0.80	0.79	-0.04	0.23	0.04	0.06	-0.04	-0.64	0.80	0.49	1.00	0.12	0.81	0.85	0.29	0.61	0.69
N-12	0.36	0.43	-0.02	0.08	0.07	0.03	-0.02	-0.29	0.39	0.82	0.12	1.00	0.49	0.36	0.10	0.38	0.36
N-34	0.81	0.82	-0.09	0.18	0.06	0.06	-0.09	-0.63	0.80	0.87	0.81	0.49	1.00	0.87	0.20	0.66	0.73
ONI	0.92	0.93	-0.13	0.21	0.06	0.06	-0.13	-0.73	0.92	0.66	0.85	0.36	0.87	1.00	0.26	0.70	0.83
NTA	0.23	0.31	0.71	0.90	0.68	0.62	0.71	-0.18	0.32	0.15	0.29	0.10	0.20	0.26	1.00	0.32	0.12
GIAM	0.71	0.74	0.13	0.31	0.13	0.10	0.13	-0.57	0.75	0.57	0.61	0.38	0.66	0.70	0.32	1.00	0.67
ENSO	0.85	0.82	-0.09	0.09	-0.01	-0.02	-0.09	-0.73	0.82	0.59	0.69	0.36	0.73	0.83	0.12	0.67	1.00

3.1.2 Correlación Cruzada (Rezagada)

Para rezagos de uno a tres periodos, se corrobora la estrecha relación que existe entre el más conocido representante de la componente atmosférica, el IOS y variables como BEST, TP, ONI VS175W y N-34 entre otras, con coeficientes de correlación (r) iguales o superiores a 0.6, lo cual se ajusta al marco conceptual de los procesos físicos inherentes al Ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur. Se observa una relación débil ($r < 0.25$) entre el IOS y la temperatura superficial del mar en el océano Atlántico tropical Norte, con rezagos negativos que oscilan entre tres y seis meses (el IOS antecede a la variable de

referencia), en tanto que con el Atlántico tropical Sur es todavía mucho menor ($r < 0.10$); curiosamente se detectan mayores valores de correlación (0.23), entre estas dos últimas variables, en rezagos positivos de siete y ocho meses, lo cual es producto de la estimación estadística, sin llegar a reflejar algún tipo de causalidad u ofrecer otro tipo de explicación física consistente.

Dado que el IOS presenta un grado de asociación bajo con la temperatura superficial del mar (TSM) en el océano Atlántico tropical Norte y muy bajo con el Atlántico tropical Sur, es razonable que la TSM en el Pacífico tropical presente un comportamiento similar (asociación débil) con la TSM del Atlántico Norte y Sur, en lo que concierne no solo al valor mismo de la correlación sino también a los meses de rezago, negativos en el primer caso y positivos en el segundo. De los anteriores resultados, se puede inferir que los procesos inherentes al océano Atlántico norte y sur, aunque tienen cierta relación con los del Pacífico tropical, son prácticamente independientes unos de otros.

3.1.3 Análisis de autocorrelación

La estructura de auto correlación de las variables explicativas muestra una fuerte relación temporal de dependencia, que oscila entre seis y ocho meses, para las variables oceánicas (campo térmico superficial del Pacífico) y variables de tipo mixto; una muestra de esta característica se puede apreciar en los autocorrelogramas de la figura 3.2 correspondientes a las variables N-34 y MEI.

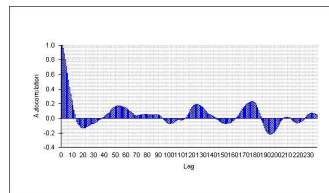
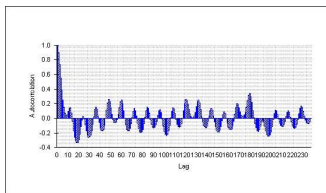
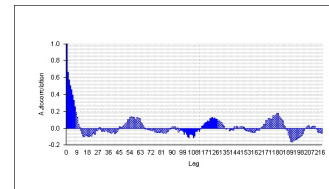
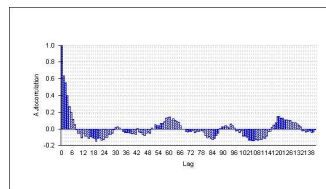


Figura 3.2 Autocorrelogramas de las variables explicativas TSM El Niño región N-34 (izquierda) y el índice multivariado de ENSO, MEI (derecha).

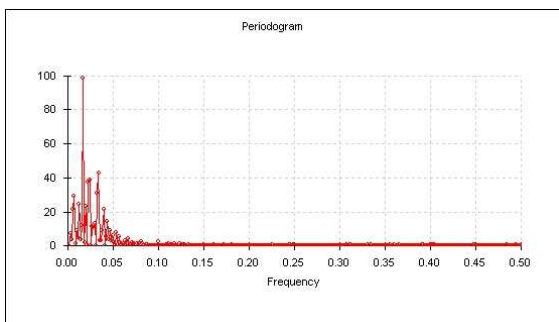
Para variables atmosféricas, como el IOS y los campos de viento a nivel superficial y en capas altas de la atmósfera, entre otras (figura 3.3), esta relación oscila entre tres y seis meses. Ello, sugiere que las variables explicativas se ajustan a estructuras de tipo autorregresivo, cuyo orden depende de su estructura temporal individual.

Figura 3.2 Autocorrelogramas de las de las variables explicativas VVA165W, viento en capas altas de la atmósfera sobre el Pacífico oriental (izquierda) y el índice de la oscilación sur, IOS (derecha).



3.1.4 Análisis Espectral

Este análisis permite identificar tres grupos de variables con ciclos muy bien definidos, saber: un primer grupo presenta una señal muy significativa en el rango cercano a los 60 meses, el cual es propio de los fenómenos enmarcados en el ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur, ENOS; dentro de estas variables se encuentran



lógicamente las TSM a lo largo del océano Pacífico Tropical, los índices asociados directamente con ENSO, como BEST, MEI, ONI, TP, y las variables que corresponden a la componente atmosférica del ciclo, como el IOS y los vientos de la alta y baja troposfera sobre el Pacífico Centro-oriental, entre otras (figura 3.3).

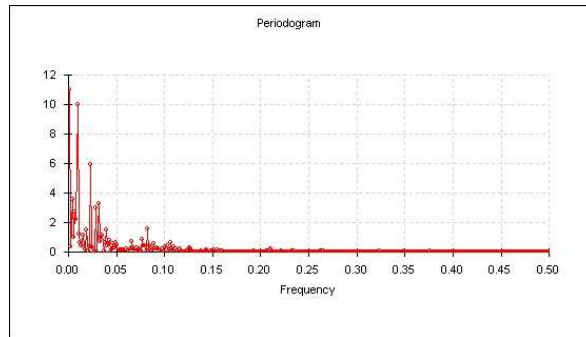
Figura 3.3 Periodograma de la variable explicativa BEST (índice bivariado del ENOS)

Un segundo grupo presenta los mayores valores de energía espectral en el diapasón de muy baja frecuencia, con periodos centrados en los 700 meses; la mayoría de las variables indicadoras de los procesos físicos que se suceden en el océano Atlántico presentan esta última característica (figura 3.4).

Un tercer grupo se caracteriza por una marcada tendencia estacional, como ocurre con los índices asociados al Monzón, la frecuencia de ocurrencia de huracanes, la ZCIT y la oscilación del Atlántico Norte, entre los más representativos.

Figura 3.4 Periodograma de la variable explicativa anomalía media mensual de TSM en el Atlántico tropical norte, TNA.

Los periodogramas de las TSM en el Atlántico Norte exhiben un ciclo secundario bien definido en el periodo entre 100 y 115 meses; en marcado contraste con los del Atlántico Sur donde se observan señales claras en 60 y 145 meses.



La diferencia existente entre los periodogramas de la TSM en el Pacífico y el Atlántico, justifica en parte, el grado de independencia que existe en los procesos físicos que se suceden en cada uno de ellos. Si bien hay pequeñas coincidencias o aproximaciones en algunos períodos que podrían estar asociados, no es posible identificar una relación clara entre la variabilidad de los mismos. Mediante los periodogramas es posible establecer que la señal inducida por El Niño, La Niña – Oscilación del Sur es la más destacada dentro de la variabilidad interanual de los océanos y alcanza a ser representada en forma clara cuando se analiza globalmente la banda tropical.

3.2 RESULTADO DEL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES EXPLICADAS

3.2.1 Correlación cruzada

El análisis de correlación cruzada entre las variables explicadas proporciona algún tipo de información sobre la estructura espacial de las mismas, sus analogías respecto a los patrones de circulación regional y local, y algunas otras características comunes. En su matriz de correlación sincrónica se destacan, como es lógico, buenas asociaciones (índices entre 0.5 y 0.7) entre las series pluviométricas de las estaciones con características orográficas semejantes, como es el caso de Bogota, Pasto, Medellín, e Ibagué, entre otras. Buenas asociaciones también se detectan con respecto a parámetros como la elevación, la localización a barlovento o sotavento de los accidentes orográficos,

los períodos comunes de observación, etc. Un resumen de estas relaciones pueden observarse en los datos contenidos en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Matriz de correlación cruzada (sincrónica) de las variables explicadas de mayor significación (Precipitación). En color rojo se destacan los coeficientes de correlación superiores a 0.5

	CO	BO	RH	AU	MD	PC	UI	PS	FL	PL	LT	SA	CL	CG	BG	IB	SJ
CO	1	0.04	-0.14	0.00	0.08	0.01	-0.04	0.12	0.32	0.25	0.20	-0.22	0.18	-0.23	0.10	0.17	0.16
BO	0.04	1	0.39	0.19	0.64	-0.02	0.16	0.50	0.16	0.08	0.11	0.20	0.57	0.35	0.40	0.61	0.11
RH	-0.14	0.39	1	0.23	0.50	0.10	0.13	0.09	0.06	0.02	-0.21	0.46	0.18	0.55	0.25	0.33	0.14
AU	0.00	0.19	0.23	1	0.37	0.71	0.42	-0.19	0.54	0.51	-0.41	0.30	-0.11	0.46	0.27	0.14	0.68
MD	0.08	0.64	0.50	0.37	1	0.15	0.23	0.38	0.19	0.16	-0.14	0.27	0.38	0.50	0.40	0.57	0.28
PC	0.01	-0.02	0.10	0.71	0.15	1	0.41	-0.28	0.53	0.49	-0.48	0.25	-0.28	0.33	0.19	-0.07	0.67
UI	-0.04	0.16	0.13	0.42	0.23	0.41	1	0.00	0.28	0.19	-0.31	0.19	0.04	0.25	0.21	0.11	0.38
PS	0.12	0.50	0.09	-0.19	0.38	-0.28	0.00	1	-0.08	-0.13	0.30	0.00	0.65	0.10	0.17	0.55	-0.16
FL	0.32	0.16	0.06	0.54	0.19	0.53	0.28	-0.08	1	0.62	-0.19	0.11	0.08	0.14	0.29	0.25	0.67
PL	0.25	0.08	0.02	0.51	0.16	0.49	0.19	-0.13	0.62	1	-0.12	0.03	0.06	0.09	0.18	0.10	0.58
LT	0.20	0.11	-0.21	-0.41	-0.14	-0.48	-0.31	0.30	-0.19	-0.12	1	-0.29	0.29	-0.33	-0.05	0.14	-0.32
SA	-0.22	0.20	0.46	0.30	0.27	0.25	0.19	0.00	0.11	0.03	-0.29	1	-0.01	0.60	0.16	0.14	0.21
CL	0.18	0.57	0.18	-0.11	0.38	-0.28	0.04	0.65	0.08	0.06	0.29	-0.01	1	0.15	0.24	0.60	-0.04
CG	-0.23	0.35	0.55	0.46	0.50	0.33	0.25	0.10	0.14	0.09	-0.33	0.60	0.15	1	0.29	0.26	0.25
BG	0.10	0.40	0.25	0.27	0.40	0.19	0.21	0.17	0.29	0.18	-0.05	0.16	0.24	0.29	1	0.32	0.20
IB	0.17	0.61	0.33	0.14	0.57	-0.07	0.11	0.55	0.25	0.10	0.14	0.14	0.60	0.26	0.32	1	0.13
SJ	0.16	0.11	0.14	0.68	0.28	0.67	0.38	-0.16	0.67	0.58	-0.32	0.21	-0.04	0.25	0.20	0.13	1

3.2.2 Análisis de autocorrelación

En general, las funciones de auto correlación de las variables explicadas muestran una estructura netamente sinusoidal (figura 3.5). Aunque las series son muy cortas para asociarlas a procesos ergódicos (procesos en los cuales por más de que se agreguen datos, no aumenta la información acerca del problema), su estructura de auto correlación se asemeja a ellos (Montealegre, 1999). Los autocorrelogramas analizados evidencian la estacionalidad de las series y la alternancia de períodos secos y lluviosos, ya sean de comportamientos bi o monomodal.

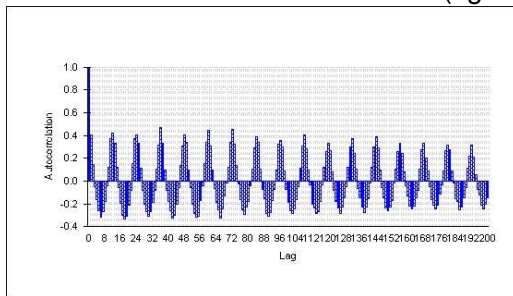
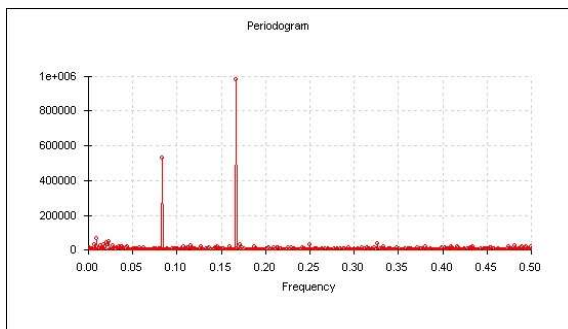


Figura 3.5 Autocorrelograma de la variable explicada Arauca

Esta metodología no es recomendada para la determinación de asociaciones de tipo interanual, ya que estas, son enmascaradas por efecto de la fuerte estructura estacional, presente en la mayoría de las series de precipitación.

3.2.3 Análisis Espectral



Con este tipo de análisis se hace aún más evidente la estacionalidad de las series de lluvia. En los periodogramas correspondientes se observa que los mayores valores de energía espectral se

presentan en la franja de alta frecuencia. La señal es muy fuerte en seis o doce meses, en armonía con su comportamiento bi o monomodal, respectivamente (figura 3.6). La señal secundaria aparece bien definida en los regímenes bimodales, particularmente.

Figura 3.6 Periodograma de la serie pluviométrica de Medellín, cuyo régimen bimodal aparece muy bien definido.

Para examinar la variabilidad interanual de las variables explicadas se analizan los periodogramas de las correspondientes series de anomalías, las cuales tienen la ventaja de tener filtradas las componentes estacionales. En términos generales, se identifican valores de energía espectral en la franja de baja frecuencia, es decir, de altos períodos. Se destacan ciclos de 30, 45 y 60 meses, propios de la variabilidad interanual y coincidente con períodos de igual magnitud de muchas de las variables explicativas, particularmente las relacionadas con el Ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur, ENSO.

3.3 ASOCIACIÓN ENTRE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS Y EXPLICADAS

3.3.1 Correlación Cruzada (Sincrónica)

Como fue mencionado anteriormente, la correlación cruzada es de gran importancia en la determinación del tiempo de respuesta (inercia) con el que las variables explicadas reaccionan a las fluctuaciones de las variables explicativas (índices de meso y gran escala) así como a las variaciones climáticas de los océanos en los procesos de gran escala. Se utilizaron inicialmente los datos originales de la variable explicada (milímetros de lluvia) para correlacionarlos sincrónicamente con cada una de las variables explicativas y también para rezagos de hasta tres periodos. Posteriormente se hicieron pruebas utilizando las series de anomalías (absolutas y porcentuales), encontrando mejores correlaciones solo en muy pocos casos. En la tabla 3.3 se aprecia un resumen de las correlaciones de tipo sincrónico más significativas entre las variables explicadas y explicativas

Tabla 3.3 Matriz de correlación cruzada (sincrónica) entre las variables explicadas y explicativas de mayor significación. En color rojo se destacan los coeficientes de correlación superiores a 0.3 y en azul las superiores a 0.5

	NP	IOS	OLR	ZCIT	GIAM	135E	MONI	MON U	MEI	BEST	TP	N-3	N-4	N-12	N-34	ONI	DILC	DI MC	DI AM	HURR
San Andres	0.16	0.07	0.05	0.49	-0.05	0.05	0.24	0.10	-0.05	-0.05	-0.05	-0.41	0.09	-0.59	-0.15	-0.04	0.14	0.21	-0.42	0.30
Cartagena	0.31	0.10	0.09	0.51	-0.05	0.08	0.28	0.12	-0.06	-0.08	-0.08	-0.37	0.11	-0.59	-0.11	-0.07	0.16	-0.15	-0.47	0.45
Riohacha	0.21	0.10	0.04	0.43	0.02	0.03	0.04	0.00	-0.02	-0.05	-0.01	-0.26	0.08	-0.43	-0.08	-0.03	0.11	-0.15	-0.33	0.37
Medellin	0.37	0.25	0.41	0.41	-0.23	0.30	0.00	-0.06	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27	-0.28	-0.22	-0.31	-0.32	0.14	-0.14	-0.37	0.04
B/manga	0.24	0.03	0.04	0.32	-0.02	0.04	0.13	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.06	0.04	-0.04	0.07	-0.03	0.17	-0.13	-0.20	0.05
Ibague	0.06	0.18	0.24	0.21	-0.12	0.19	-0.27	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.20	-0.22	-0.18	-0.21	-0.21	0.05	-0.03	-0.04	0.03
Bogota	0.21	0.27	0.21	0.32	-0.23	0.26	0.03	-0.21	-0.30	-0.29	-0.25	-0.27	-0.26	-0.16	-0.31	-0.31	0.13	-0.17	-0.14	0.06
Cali	0.00	0.18	0.26	0.02	-0.14	0.15	-0.40	-0.31	-0.21	-0.24	-0.20	-0.21	-0.22	-0.12	-0.23	-0.24	0.02	0.00	0.17	0.03
Pasto	0.05	0.16	0.25	0.00	-0.09	0.15	0.43	0.31	-0.21	-0.20	-0.20	-0.16	-0.21	-0.12	-0.21	-0.21	0.10	-0.07	0.26	0.08
Quibdo	0.28	0.24	0.27	0.44	-0.23	0.20	0.36	0.19	-0.21	-0.25	-0.24	-0.24	-0.25	-0.19	-0.28	-0.28	0.01	-0.07	-0.45	-0.01
Tumaco	0.00	-0.04	0.03	-0.19	0.03	0.09	-0.18	-0.22	0.09	0.02	0.06	0.42	-0.03	0.42	0.25	0.03	-0.18	0.11	0.05	-0.32
Arauca	0.57	-0.03	-0.02	0.68	0.02	-0.03	0.53	0.21	0.07	0.05	0.04	0.01	0.26	-0.35	0.22	0.04	-0.04	-0.01	-0.70	0.24
P. Carreño	0.60	0.01	0.00	0.62	-0.01	0.00	0.66	0.26	0.08	0.02	0.02	-0.03	0.22	-0.38	0.18	0.01	0.04	-0.06	-0.75	0.28
Florencia	0.57	-0.05	-0.03	0.52	0.00	-0.02	0.36	0.02	0.11	0.05	0.05	0.25	0.18	-0.05	0.32	0.04	-0.10	0.04	-0.50	0.03
S. Jose del G.	0.62	0.00	-0.03	0.65	-0.10	-0.08	0.38	0.09	0.10	0.06	0.05	0.15	0.23	-0.24	0.29	0.05	0.03	-0.15	-0.59	0.14
P. Leguizamo	0.46	-0.06	-0.04	0.46	-0.01	-0.04	0.27	-0.07	0.12	0.05	0.06	0.25	0.16	-0.04	0.30	0.04	-0.11	0.10	-0.46	-0.01
Leticia	-0.31	-0.04	-0.07	-0.46	0.05	-0.01	-0.50	-0.26	0.02	-0.01	0.02	0.21	-0.11	0.40	0.02	0.01	-0.13	0.21	0.46	-0.35

Considerando las variables explicativas incluidas dentro del grupo de Teleconexiones, se observa que únicamente la variable NP (Patrón del Pacífico Norte) presenta un buen grado de asociación con la mayoría de las series de precipitación seleccionadas; en particular, las correlaciones son mejores ($r > 0.55$) con las lluvias de la Orinoquía y Amazonía. En general, los índices del grupo Atmosfera inherentes al ciclo ENOS, aparecen moderadamente asociados (r , entre 0.25 y 0.40) con las precipitaciones de la región Andina y el norte de la región Pacífica, mientras que de los índices del grupo Precipitación, el correspondiente al Monzón de la India presenta, en general, buenas correlaciones con la mayoría de las series de precipitación, siendo los de la Orinoquia los de mayor cuantía (alrededor de 0.6).

Las anomalías de precipitación en estaciones de la región Andina aparecen mejor asociadas que las de otras regiones, con los índices del Grupo ENSO, aunque sus coeficientes de correlación solo oscilan entre 0.2 y 0.3. Los índices del grupo Océano Pacífico, particularmente los relacionados con las alteraciones de la TSM del sector tropical, arrojan en términos generales, asociaciones moderadas (entre 0.2 y 0.4) con la mayoría de las series de precipitación estudiadas, en marcado contraste con las de los índices del grupo Océano Atlántico, que son prácticamente nulas, corroborando de esta manera, que los procesos físicos que allí ocurren tienen una frecuencia diferente y una muy baja causalidad sobre la variabilidad de la precipitación en el territorio nacional. Finalmente, se aprecia una moderada relación entre el índice relativo a la frecuencia de huracanes y las lluvias de la región Caribe, Orinoquia, Pacífico sur y trapecio Amazónico, principalmente.

3.3.2 Correlación Cruzada (Rezagada) y suavizamiento

El análisis de Correlación Rezagada para periodos de uno a tres meses mostró que la variable explicada en estaciones de la región Caribe, en norte de la región Pacífica y el trapecio Amazónico está bien asociada, en rezagos de 30 y 60 días, con los índices característicos de ENSO, lluvias Monzónica, frecuencia de huracanes y el Dipolo de humedad en la Amazonía. En la Orinoquia, los rezagos de uno, dos y hasta tres meses están igualmente bien relacionados con los índices de ENSO. En la región Andina hay una mayor variabilidad; los coeficientes de correlación rezagada de 1 y 2 meses, presentan moderados valores de asociación con las variables explicativas del ciclo ENOS, lluvias Monzónica y la frecuencia de huracanes.

La aplicación de métodos de suavizamiento a la variable explicada, a efecto de filtrar oscilaciones de tipo estacional (medias móviles de 3 puntos) e interanual (11 puntos), mostró que en general, las series de precipitación de las estaciones de región Andina suavizadas con medias móviles de 11 puntos, aumentaron significativamente sus coeficientes de correlación al asociarse a los índices oceánicos y atmosféricos propios del Ciclo ENOS. En contraste, las series de precipitación filtradas con medias móviles de tres puntos no presentaron el mismo comportamiento; en términos generales, se asociaron mejor con los índices inherentes a las lluvias Monzónica y a los procesos del Pacífico tropical.

Los índices de meso y gran escala del océano Atlántico son los que presentan los coeficientes de correlación mas pequeños, en forma sincrónica y rezagada, así como suavizados por medias móviles de 3 y 11 puntos, relacionados con las anomalías de precipitación en la gran mayoría de las estaciones seleccionadas. Esto corrobora

nuevamente, que los procesos físicos que ocurren en este océano explican muy poco la variabilidad de la precipitación en Colombia, en las escalas estacional e interanual.

3.3.3 Correlación Espacial

El campo térmico superficial del océano Pacífico presenta una marcada influencia, de carácter inverso ($r > -0.45$), sobre el comportamiento estacional de las precipitaciones de la región Andina, durante la temporada seca (figura 3.6); la influencia del Atlántico y el mar Caribe para esta misma época, es más débil y menos generalizada. Durante la temporada húmeda, es notoria la correlación de tipo directo que se observa entre la variabilidad de TSM en el Atlántico y el patrón pluviométrico de la Amazonía y la Orinoquia.

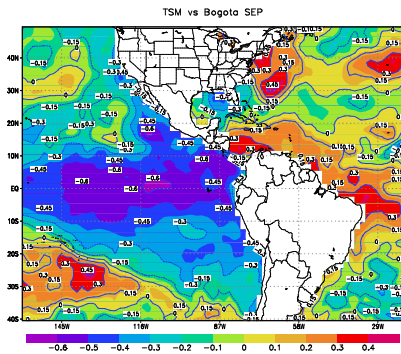


Figura 3.7 *Isolíneas de correlación (inversa en el Pacífico, directa en el Atlántico) entre las TSM del mar y las anomalías de precipitación en Bogotá, para los meses de septiembre.*

Mediante este análisis fue posible establecer igualmente, que la precipitación mensual en el sector norte de la región Pacífica y en las regiones Caribe y Andina esta predominantemente correlacionada, de forma inversa, con la estructura térmica superficial de extensas áreas del océano Pacífico Tropical, durante la mayor parte del año, tal como se puede

observar en el mapa de la figura 3.7 y en los datos de la tabla 3.4

En marcado contraste con la situación anterior, existe una gran variabilidad en las relaciones establecidas entre la TSM del océano Atlántico en cada uno de los tres sectores estudiados y el comportamiento mensual de lluvia sobre el territorio nacional, siendo frecuente la alternancia de correlaciones directas e inversas a lo largo del año.

Tabla 3.4 *Matriz de correlación mensual entre las secuencias temporales de precipitación y las TSM del Pacífico tropical. Los índices positivos y negativos de las dos últimas columnas, se estiman como la suma de los índices mensuales del mismo signo, multiplicada por una fracción del factor de persistencia.*

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Indice	
													Neg.	Pos.
San Andres	-0.25	-0.40	-0.30	-0.20	-0.10	-0.10	-0.30	-0.30	-0.15	-0.15	-0.10	-0.40	-2.75	0.00
Riohacha	-0.30	0.40	-0.30	-0.15	0.30	0.20	-0.40	-0.40	0.30	0.10	-0.10	-0.40	-1.20	0.54
C/gena	-0.10	-0.30	-0.10	0.25	0.20	-0.25	-0.45	-0.45	-0.10	-0.15	0.00	-0.45	-1.76	0.08
Medellin	-0.30	-0.40	-0.40	-0.10	-0.25	-0.40	-0.40	-0.40	-0.40	0.00	-0.10	-0.35	-3.21	0.00
Bogota	-0.30	-0.40	-0.15	0.20	0.10	-0.45	-0.30	-0.45	-0.45	-0.20	-0.20	-0.45	-2.79	0.05
B/manga	0.15	0.10	0.10	-0.30	-0.10	-0.30	0.40	0.10	-0.10	-0.40	-0.15	0.15	-0.68	0.50
Cali	-0.45	-0.30	-0.10	0.30	0.15	-0.30	-0.30	-0.45	-0.15	-0.25	0.15	-0.45	-2.06	0.15
Ibague	-0.20	-0.45	-0.10	0.15	0.15	-0.45	-0.30	-0.40	-0.40	-0.35	-0.30	-0.20	-2.63	0.05
Pasto	0.40	-0.15	0.20	0.10	0.15	0.20	0.20	-0.10	-0.30	0.15	-0.10	0.10	-0.22	1.00
Arauca	0.20	-0.15	0.45	0.15	0.45	0.10	0.15	-0.15	0.15	0.20	0.10	-0.10	-0.10	1.46
P. Carreño	-0.20	0.40	0.15	0.20	0.25	-0.10	0.15	-0.10	-0.30	-0.40	0.00	-0.30	-0.70	0.48
Quibdo	-0.40	-0.30	0.15	-0.10	0.00	-0.20	-0.30	-0.40	-0.30	-0.40	-0.30	-0.45	-2.63	0.01
Tumaco	0.15	0.20	0.30	-0.15	-0.35	-0.10	0.45	0.45	-0.15	0.50	0.50	0.10	-0.25	1.77
Florencia	0.30	0.15	0.20	-0.10	-0.20	0.30	0.45	0.35	0.15	0.10	0.10	-0.10	-0.10	1.58
P. L/zamo	0.40	0.10	0.10	0.15	0.10	-0.10	-0.10	0.15	-0.10	-0.40	0.15	0.20	-0.18	0.90
S.J. del G	-0.30	0.20	0.30	0.15	-0.15	0.20	0.40	0.50	0.30	-0.40	-0.10	-0.20	-0.48	1.20
Leticia	0.30	-0.10	0.10	0.45	-0.10	-0.10	-0.35	-0.40	-0.10	-0.30	0.30	0.30	-0.85	0.60

Indice = (Suma del indice de mismo signo) * (factor de persistencia = # meses del mismo indice / 12)

Asociaciones bien definidas y de carácter inverso se registran entre la precipitación mensual de la Amazonía y las anomalías de la TSM en el océano Atlántico Tropical Norte; este mismo sector presenta buenas relaciones con las precipitaciones mensuales de las regiones Caribe y Andina, aunque en estos casos, predominan las de tipo directo, es decir, el calentamiento del océano corresponde a un aumento de las lluvias y viceversa.

En el sector correspondiente al Atlántico Norte extratropical no se observa un patrón definido de asociación entre las variables estudiadas, a pesar de que durante algunos meses en particular, las correlaciones son claras, pero de signos alternos. Esta condición es característica en el litoral Caribe, la Amazonía y el norte y centro de la región Andina.

La variabilidad de la TSM del océano Atlántico tropical Sur prácticamente no incide en el comportamiento de la precipitación sobre el territorio nacional, como se puede comprobar examinando los bajos índices de correlación establecidos en las diferentes regiones, que aparecen en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Matriz de correlación mensual entre las series temporales de precipitación y las TSM del Atlántico tropical Sur. Los índices positivos y negativos de las dos últimas columnas, se estiman como la suma de los índices mensuales del mismo signo, multiplicada por una fracción del factor de persistencia.

ATLANTICO TROPICAL SUR (0° a 20° S)

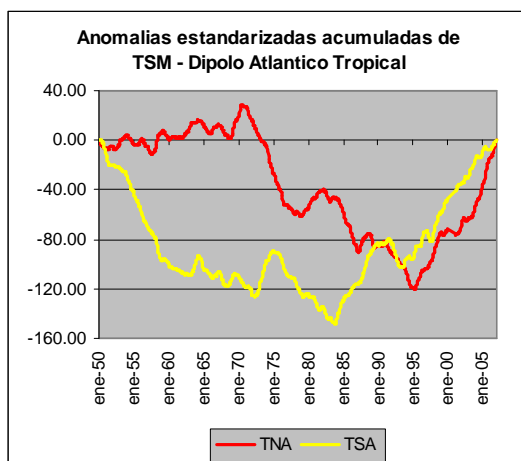
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Indice	
													Neg.	Pos.
San Andres	0.00	0.00	0.10	-0.20	0.20	-0.20	0.30	0.25	0.30	0.30	-0.10	0.00	-0.13	0.73
Riohacha	0.10	0.15	0.30	-0.10	-0.10	-0.10	0.10	0.15	-0.40	-0.10	0.15	0.10	-0.33	0.61
C/gena	-0.10	-0.10	0.20	-0.10	0.15	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.00	-0.10	-0.13	0.28
Medellin	0.40	0.20	0.00	-0.40	0.10	0.40	0.35	0.30	0.30	0.20	0.30	0.15	-0.03	2.25
Bogota	-0.15	0.00	-0.10	-0.20	0.00	0.10	0.30	0.20	0.30	0.10	0.10	0.00	-0.11	0.55
B/manga	0.30	0.30	0.25	-0.15	-0.30	0.30	0.30	0.35	-0.40	0.30	0.35	-0.15	-0.33	1.63
Cali	-0.10	-0.10	0.00	-0.10	-0.30	0.20	0.30	0.10	0.40	-0.20	0.40	-0.30	-0.55	0.58
Ibague	0.30	-0.30	-0.15	0.15	-0.30	0.20	0.30	0.30	0.30	0.00	0.30	-0.20	-0.32	1.08
Pasto	0.25	0.20	0.20	0.30	0.00	-0.30	0.10	0.10	-0.10	-0.20	-0.30	-0.30	-0.50	0.58
Arauca	-0.15	0.30	-0.30	0.15	0.15	0.15	0.30	0.00	0.40	0.10	0.30	0.10	-0.08	1.46
P. Carreño	0.20	0.10	0.10	-0.30	-0.15	-0.10	0.10	-0.30	-0.15	0.10	0.40	-0.15	-0.58	0.50
Quibdo	-0.15	-0.15	0.15	0.30	-0.20	-0.10	0.20	-0.20	-0.15	0.15	0.20	-0.10	-0.61	0.42
Tumaco	0.40	0.15	0.10	-0.10	0.30	0.10	0.30	0.30	-0.10	0.15	0.15	0.30	-0.03	1.88
Florencia	0.20	0.10	0.20	0.20	0.20	0.35	0.20	0.15	-0.10	0.15	0.20	-0.10	-0.03	1.63
P. L/zamo	0.15	-0.30	0.15	-0.15	-0.10	-0.10	-0.30	-0.30	0.20	-0.30	0.15	-0.30	-1.23	0.22
S.J. del G	-0.50	0.45	-0.10	-0.15	-0.30	0.15	0.40	-0.10	0.30	-0.20	0.50	-0.15	-0.88	0.75
Leticia	0.15	-0.10	-0.15	0.30	0.10	-0.15	0.15	0.30	0.30	0.15	0.10	0.15	-0.10	1.28

La estructura térmica superficial del Mar Caribe solo insinúa algún tipo de asociación con el comportamiento de las lluvias en el país; la más notoria corresponde a la observada de forma directa con las precipitaciones de mitad de año en la región Caribe y el norte de región Andina.

Sin embargo, el hecho de que se observen asociaciones bien definidas de núcleos de anomalías de TSM en algunos sectores del océano Atlántico tropical y extratropical con la precipitación de ciertas áreas continentales, durante algunos meses en particular, fue una de las razones para desarrollar el análisis y la identificación de áreas oceánicas poseedoras de un contraste térmico bien definido en su capa superficial, comúnmente denominados dipolos.

3.3.3.1 Dipolo del Atlántico Tropical

Este dipolo está definido por el contraste de TSM en el océano Atlántico tropical (Enfield et al, 1999) entre el sector localizado en 5.5° N a 23.5° N y 57.5° W a 15° W y el sector comprendido entre el Ecuador y 20° S y 10° E a 30° W. Es importante recordar que la



variabilidad de la TSM en el sector tropical del océano Pacífico es muy superior a la de su similar en el océano Atlántico, como se planteó anteriormente en el punto 1.2.3. Comparando sus fluctuaciones extremas, se puede comprobar que las anomalías positivas registradas en el sector central del Pacífico tropical durante sus periodos de calentamiento, son superiores al doble de las registradas en el dipolo del Atlántico tropical; en tanto que las anomalías negativas propias de los periodos fríos, son mayores en un 40%.

Figura 3.8 Anomalías estandarizadas acumuladas de TSM - Dipolo Atlántico Tropical, sectores definidos por Enfield et al, 1999.

Analizando la serie de anomalías acumuladas se puede observar que el dipolo esta muy bien definido desde comienzos de la década de los 50 (fecha desde la cual se dispone de información) hasta mediados de los 90, cuando las series analizadas se armonizan e inician un proceso de crecimiento sostenido hasta la fecha (figura 3.8).

El 46% de los meses del periodo 1950-2006 las aguas superficiales del océano Atlántico tropical están en contraste térmico (dipolo); de este porcentaje, el 22% corresponde al sector Norte negativo (dipolo negativo) y el 24% al sector Norte positivo (dipolo positivo). Durante el 54% del tiempo restante, las aguas del Atlántico tropical están sincrónicamente frías o calidas: el 28% de los casos, ambos sectores (Norte y Sur) presentan sincrónicamente anomalías negativas (condición fría) y en el 26% se registran anomalías de sentido contrario (condición cálida). Del total del meses con dipolo (317), el 48% ocurre con el sector Norte negativo y sector Sur positivo, el porcentaje restante corresponde al caso contrario.

En presencia de cualquiera de las 4 situaciones características: Dipolo positivo, Dipolo negativo, condición fría y condición calida, las precipitaciones mensuales registradas en la amazonía colombiana y el norte de la región Pacífica se presentan dentro de rangos normales, en forma predominante. En el resto del país, las lluvias son preferentemente deficitarias durante la ocurrencia de cualquiera de las 4 situaciones típicas analizadas, lo cual refleja en consecuencia, la falta de causalidad entre la variabilidad de la estructura térmica superficial del Dipolo, en el Atlántico tropical y el comportamiento de la precipitación dentro del territorio continental de Colombia. Una mejor explicación para la condición deficitaria de las lluvias, podría buscarse en escalas de variabilidad climática interdecadal. Previamente se había establecido que la relación entre cada una de las variables componentes del dipolo (TNA y TSA) y las precipitaciones es muy débil en el primer caso y prácticamente nula en el segundo, para la mayoría de las estaciones analizadas.

3.3.3.2 Dipolo del Atlántico Norte

El contraste térmico entre las superficies del mar del sector Norte tropical (relativamente calido) y el sector Norte extratropical (de carácter frío), es mucho mas débil que el observado entre los sectores norte y sur del Atlántico tropical. En efecto, solo el 17% de los meses del periodo 1950-2000 las aguas superficiales de ambos sectores se encuentran en condición de dipolo; en el porcentaje restante, ambos sectores están sincrónicamente fríos (43%) o calidos (40%). Nuevamente los coeficientes de correlación entre las anomalías mensuales de precipitación y las anomalías de la estructura térmica superficial del dipolo, indican que no existe ninguna relación entre ambas variables, es decir este dipolo, no explica la variabilidad de las lluvias en Colombia.

3.3.3.3 Dipolo del Litoral Caribe

Otro sector oceánico en el que se observan correlaciones significativas entre las anomalías de la TSM y el comportamiento de las precipitaciones durante algunos meses en particular, son las aguas del mar Caribe. Se analizaron dos sectores en particular: el primero que denominamos dipolo del litoral Caribe, representa el contraste térmico entre las aguas relativamente frías frente a la Guajira (14° N – 72° W) y un núcleo de aguas

relativamente calidas frente al golfo de Urabá (10° N – 78° W), estos puntos de contraste fueron seleccionados consultando los campos de TSM en el Caribe Colombiano, definidos por Malikov, en 2008. El índice construido a partir de la diferencia de las anomalías entre ambos sectores no presenta un patrón definido de comportamiento, el grado de asociación con las lluvias de la región Caribe es muy débil (denotando regularmente déficits de agua) y hacia el interior del país, únicamente en condiciones de dipolo positivo (sector norte calido) se presentan con mayor frecuencia excedentes de lluvia en puntos aislados de la región Andina y el piedemonte Amazónico.

En general, las lluvias son igualmente deficitarias durante la ocurrencia de cualquiera de las 4 situaciones típicas de dipolo, situación que pone de manifiesto nuevamente la falta de causalidad entre las variables analizadas.

3.3.3.4 Dipolo del Mar Caribe

El segundo sector analizado corresponde a dos puntos en aguas abiertas del mar Caribe, sobre la misma latitud. El primero esta localizado en 14° N – 82° W y el segundo se encuentra en 14° N – 66° W. Aunque el análisis de correlación espacial muestra en algunos meses situaciones de contraste térmico entre los dos sectores, el índice construido a partir de la diferencia de sus anomalías no refleja claramente esta situación. Los periodos de contraste se reducen a un 35% del total de meses analizados durante periodo 1961-2006. Sus mejores asociaciones, igual como sucede en el litoral, son de carácter débil tanto con las series de precipitación de la región Caribe (donde predominan los déficits de agua), como con puntos aislados de las regiones Andina, Caribe y Pacifica (caracterizados por excedentes).

Durante la ocurrencia de cualquiera de las 4 situaciones típicas de dipolo pueden darse condiciones de normalidad, déficits o excedentes de agua, lo cual indica que no existe una relación clara entre el comportamiento de las precipitaciones y la variabilidad de la TSM en el mar Caribe.

3.3.3.5 Dipolo de humedad relativa en la media troposfera de la Región Amazónica

Oribe (1998) describe las alteraciones observadas en la celda de Hadley asociadas con fluctuaciones importantes de la precipitación en el nordeste de Brasil, derivadas de las anomalías que se presentan en las temperaturas de la superficie del mar en los sectores norte y sur del océano Atlántico tropical. Con miras a explorar algún tipo de relación entre las alteraciones de dicha celda y el comportamiento de la precipitación en la zona continental del país, se analiza el flujo de aire proveniente desde la selva amazónica brasileña.

A tal efecto, se construyo un índice producto de las diferencias de la humedad relativa en dos puntos de la misma, el primero localizado en Colombia, a la altura de 2° N, 73° W y otro en Brasil, ubicado en 6° S y 68° W (figura 3.9). A través de este índice se analizo el comportamiento de la humedad relativa en los niveles de 300, 500, 700 y 850 hPa. Para cada punto, se logro establecer que entre mayor es el espesor de la capa, menor es la correlación entre ellas. Analizando las series diferencia entre los dos puntos de referencia para las diferentes capas, se detecto que la de mayor variabilidad corresponde al nivel de 500 hPa.

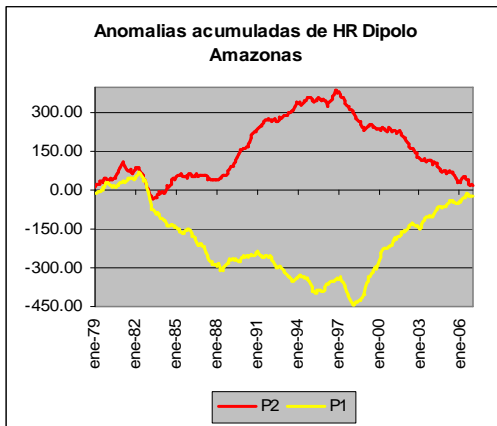


Figura 3.9 Anomalías acumuladas de humedad relativa al nivel de la media troposfera sobre 2° N, 73° W (Colombia) y 6° S y 68° W (Brasil) – Dipolo del Amazonas.

El ciclo anual de humedad relativa en el punto 2 (Brasil) a la altura de 500 hPa, muestra valores máximos (66%) en febrero y mínimos (26%) en agosto, en tanto que en el punto 1 (Colombia), la variabilidad es mas reducida, registrando máximos (59%) en mayo y mínimos (44%) en septiembre. El índice construido presenta una correlación muy débil con las anomalías de TSM en el Pacífico central, sin embargo, se

observan déficits de humedad en ambos puntos durante las épocas de El Niño.

El comportamiento mensual de la precipitación en la Orinoquía y la Amazonía esta muy bien asociado con la variabilidad de este índice (coeficientes de correlación entre 0.50 y 0.75). De igual forma, las lluvias de la región Caribe y norte de la región Andina presentan un buen grado de asociación, aunque de menor magnitud (r entre 0.35 y 0.45).

En épocas en que el dipolo es de carácter positivo (menor humedad en Colombia), el comportamiento de las precipitaciones es predominantemente deficitario en las regiones Caribe, Andina, Pacifica sur y la Orinoquia; en la Amazonía, el comportamiento es con mayor frecuencia de normalidad. Para las épocas en que el dipolo es negativo (mayor humedad en Colombia), el comportamiento de las precipitaciones es predominantemente normal en la región Amazónica colombiana; se presenta deficitaria en algunos sectores de la región Andina en cerca del 45% de los casos observados; en el resto del país no hay una condición definida.

3.3.3.6 Radiación de onda larga saliente (OLR), centrado en la latitud 10.5° y la longitud 75° W

Se había mencionado anteriormente que el índice de radiación solar de onda larga saliente de la tierra (OLR), es una medida indirecta de la convección, por cuanto sus valores extremos están asociados directamente a convección profunda (mínimos de OLR) o ausencia de ésta (máximos de OLR). Bajo esta consideración, se examinaron las series de OLR para la longitud 75° Oeste (huso horario de Colombia) y las latitudes 10.5° 4.8° y 1° Norte y 4.8° Sur, con miras a determinar si las diferencias entre ellas o si cada una por separado, se asociaba con las anomalías de precipitación a lo largo del territorio nacional.

Tabla 3.6 Matriz de correlación del índice OLR localizado en 10.5°, 4.8°, 1° Norte y 4.8° Sur con las anomalías de precipitación de las variables explicadas seleccionadas.

	CO	BO	RH	AU	MD	PC	UI	PS	FL	PL	LT	SP	CL	CG	BG	IB	SJ
10.5 N C. Anom	-0.07	-0.37	-0.18	-0.22	-0.32	-0.18	-0.22	-0.20	-0.19	-0.16	-0.03	-0.25	-0.28	-0.20	-0.11	-0.35	-0.27
4.8 N C. Anom	-0.10	-0.41	-0.15	-0.20	-0.38	-0.05	-0.29	-0.28	-0.03	-0.07	-0.22	-0.09	-0.26	-0.12	-0.14	-0.41	-0.09
1.0 N C. Anom	-0.05	-0.40	-0.15	-0.15	-0.32	-0.04	-0.28	-0.22	0.04	0.02	-0.20	-0.06	-0.23	-0.07	-0.08	-0.38	-0.04
4.8 S C. Anom	-0.03	-0.32	-0.12	-0.12	-0.24	-0.01	-0.28	-0.15	0.04	0.03	-0.16	-0.04	-0.21	-0.03	-0.05	-0.27	-0.03

Las series diferencia entre las distintas latitudes consideradas, no reflejan ningún tipo de asociación con las series de anomalías de precipitación. Individualmente, las cuatro series

presentan correlaciones de alguna significación (mayores de 0.35) con las anomalías registradas en las estaciones de la región Andina, como se puede apreciar en los datos de la tabla 3.6. Se determinó usar como variable explicativa la serie correspondiente a la latitud 10.5° Norte, por cuanto ofrece mejores valores de correlación que las restantes.

3.3.4 Índices seleccionados

Una vez analizadas las estadísticas descriptivas de las variables explicativas, sus relaciones de asociación, los ciclos y frecuencias comunes y algunos otros aspectos clasificatorios, se seleccionaron inicialmente 28 índices. De estos, se cuantificó, de forma subjetiva, la complejidad del proceso físico involucrado, el grado de asociación con las precipitaciones y su variabilidad; producto de este ejercicio se escogieron los siguientes índices como base para el desarrollo del análisis de Contingencia y el análisis Compuesto:

1. TSM del Pacífico tropical centro occidental, (El Niño - región N-34): es un indicador directo de la señal inherente al ciclo ENSO;
2. La radiación de onda larga saliente (OLR), centrada en la latitud 10.5° Norte y la longitud 75° W: indicadora de los procesos convectivos en el país, refleja de manera indirecta la señal ENSO
3. El Dipolo de humedad relativa en la media troposfera de la región Amazónica: puede ser considerada como una variable de teleconexión de ENSO.

3.3.5 Análisis de Contingencia

El análisis cuantitativo y categórico de las variables explicativas (índices) y explicadas (precipitación), se logra mediante la construcción de una tabla de contingencia para evaluar el grado de asociación entre las parejas de los dos conjuntos de datos (dispuestos en trimestres) y de esta manera establecer su relación condicional de probabilidad.

Una vez desarrollado el proceso inicial, se logró comprobar que en algunos casos, no obstante que las parejas trimestrales presentan asociaciones con niveles de significación inferiores al 90%, sus tablas de contingencia resultan confiables. Por esta razón, se calculó la totalidad de las tablas de contingencia, significativas y no significativas, de ocho de las más estratégicas ciudades del país; a las nueve restantes solo se les calcularon las tablas correspondientes a las asociaciones significativas.

El análisis de ambas situaciones se expone a continuación, para cada uno de los índices considerados:

a) Para el caso del índice Niño 34, del total de estaciones analizadas, solo el 40% de las parejas trimestrales presentan asociaciones que superan el nivel de significación 0.90 y de estas, tan solo 45% de las tablas de contingencia construidas son significativas estadísticamente, es decir, registran niveles de confianza superiores al 90%. Ahora, tomando solamente las 8 estaciones seleccionadas y examinando el caso de las parejas trimestrales que presentan asociaciones inferiores al nivel de significación de 0.90, las cuales solo representan una tercera parte del total, se observa que una mínima parte de ellas (13%) ofrece tablas de contingencia confiables.

b) En el caso del índice relativo al dipolo de humedad en la Región Amazónica, solo el 21% de las parejas trimestrales del total de estaciones, presentan asociaciones que superan el nivel de significación de 0.90 y de estas, solo una cuarta parte, presentan tablas de contingencia confiables. Cuando se analiza el total de parejas trimestrales (77%) que presentan asociaciones inferiores al nivel de significación de 0.90 considerando las 8 estaciones mencionadas anteriormente, encontramos también que solo un 13% de ellas, entregan tablas de contingencia con niveles de confianza superiores 0.90.

c) Al analizar el índice OLR para el total de estaciones, encontramos que el 38% de las parejas trimestrales presentan asociaciones que superan el nivel de significación de 0.90 y de estas, cerca de la mitad presentan tablas de contingencia estadísticamente confiables. Examinando el caso de las 8 estaciones seleccionadas, el 41% de las parejas trimestrales presentan asociaciones inferiores al nivel de significación de 0.90, y de ellas, solamente una quinta parte de sus tablas de contingencia son confiables.

De las 1391 tablas de contingencia de tipo climatológico construidas, 436 son significativas estadísticamente. En la tabla 3.7 Se presenta en forma discriminada por rezagos y para cada uno de los índices estudiados, el numero total de tablas de contingencia significativas construidas, cuando ocurren simultáneamente las siguientes condiciones: $G^2 > 90\%$ y $r^* > \text{abs. } (0.25)$. Se obtuvo una mayor cantidad de tablas de contingencia confiables con el índice OLR que con los dos índices restantes.

Tabla 3.7 Tablas de contingencia significativas, discriminadas por rezagos y para cada uno de los índices seleccionados.

	Total tablas significativas para cada rezago ($G^2 > 90\%$; $r^* > \text{Abs } (0.25)$)															Total
	N34					OLR					DiAM					
	0	-1	-2	-3	Tot	0	-1	-2	-3	Tot	0	-1	-2	-3	Tot	
Medellin	9	8	7	6	30	8	7	6	4	25	5	4	8	6	23	78
Bogota	6	7	7	7	27	9	10	6	4	29	4	2	2	2	10	66
Ibague	4	9	7	6	26	5	6	5	7	23	0	1	0	2	3	52
San Andres	3	3	3	4	13	7	8	8	6	29	2	2	2	2	8	50
Cali	5	6	4	2	17	7	7	7	4	25	4	2	2	0	8	50
Quibdo	7	6	7	5	25	4	4	4	3	15	3	2	1	1	7	47
Cartagena	2	5	4	3	14	5	6	5	3	19	3	4	3	4	14	47
Pasto	5	5	6	5	21	6	8	5	6	25	0	0	0	0	0	46
Total					173					190					73	436
Posibles					384					384					384	1152
%					45%					49%					19%	38%

En la figura 3.8 se presentan para las ocho ciudades consideradas, las tablas de contingencia significativas, construidas para cada una de las variables explicativas consideradas (N 34, IOS, DiAM). Para Medellín y Bogota se obtuvo un mayor número de tablas de contingencia estadísticamente confiables. En términos generales, resultaron significativas solo el 38% del total de tablas construidas.

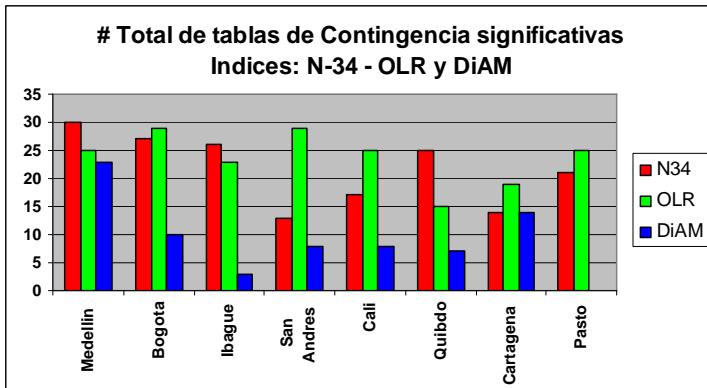
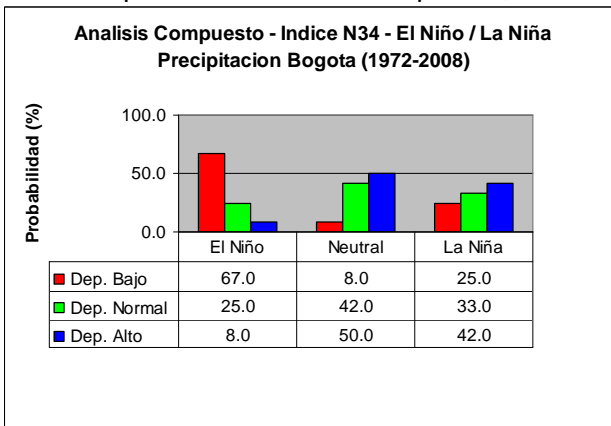


Figura 3.8 Tablas de contingencia significativas, construidas para cada una de las variables explicativas consideradas (N 34, IOS, DiAM).

3.3.6 Análisis Compuesto

Se construyeron en formatos propios del Análisis Compuesto 1391 tablas de Contingencia de tipo CLIMATOLOGICO (figura 3.9) con la información de probabilidad condicional entre las parejas de trimestres con valores de asociación a cualquier nivel de significación, generada inicialmente por paquete EXEVER.

En consideración a que los resultados obtenidos en algunas tablas se contradicen con los procesos físicos observados, particularmente en aquellos casos en los que la lluvia de uno o varios meses de un determinado trimestre (nde, def, etc.) pertenecen al año posterior del de la variable explicativa, se procedió a reconstruirlas mediante el formato ofrecido por el Análisis Compuesto, encontrando en muchos casos, una mejor representación de la Climatología.



Gracias a este procedimiento que podría denominarse “manual”, fue igualmente posible entender que la citada contradicción ocurre también durante las temporadas secas, cuando el número de años con meses en los que no se registran precipitaciones es tan alto, que no hay diferencia entre los límites del primer y segundo tercil, es decir, cuando estos se traslapan.

Figura 3.9 Imagen modelo de las tablas resultantes del formato utilizado por la técnica del Análisis Compuesto.

4. DESCRIPCION DEL ESQUEMA DE PREDICCION CLIMATICA PROPUESTO

El esquema de predicción climática propuesto es un consolidado de las actividades que son indispensables para establecer las características de la variabilidad climática en lapsos que van de semanas a meses. La unión de sus resultados individuales es lo que constituye su fortaleza.

4.1 DIFERENCIAS ENTRE PRONOSTICO DE TIEMPO Y PREDICCION CLIMATICA

Dadas las diferencias entre Tiempo y Clima, resulta muy importante diferenciar igualmente, los conceptos relacionados con Pronóstico de Tiempo y Predicción Climática. El primero se refiere específicamente a la determinación del comportamiento y evolución de los procesos que gobiernan la atmósfera en las horas subsiguientes (12, 24, 48 y 72 horas, generalmente), en tanto que la Predicción Climática esta orientada a establecer las fluctuaciones del tiempo atmosférico alrededor de sus valores medios, producto de observaciones de largos períodos de tiempo, generalmente no inferiores a 30 años, conocidos como Normales Climatológicas. Las predicciones climáticas se elaboran para lapsos que van de semanas a meses

4.2 BREVE RESEÑA HISTORICA

Debido fundamentalmente a la falta de un soporte científico suficiente y a la reducida extensión de las series de datos disponibles, la Predicción Climática en nuestro país hasta comienzos de la década de los 90, se había limitado únicamente a considerar el comportamiento normal del clima como una tendencia de tipo estacional y era presentada con visos de “predicción climática”.

Los problemas ocasionados especialmente a los recursos hidroenergéticos del país por las fluctuaciones extremas del clima, asociadas a la presencia de El Niño en 1991-1992, determinaron la inclusión de la componente climatológica en prácticamente todos los procesos de planeación y toma de decisiones, de los sectores productivos del país. La variable climatológica fue desde entonces incluida en los pronósticos de caudal y en los modelos agrícolas.

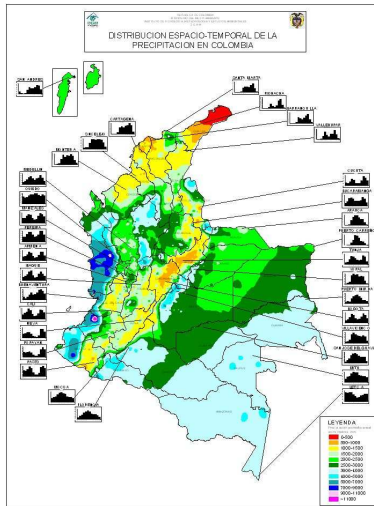
4.3 COMPLEJIDAD DE LA PREDICCION CLIMATICA

El estado actual de conocimiento acerca de los procesos físicos que gobiernan la atmósfera tropical, así como los métodos y técnicas existentes para el análisis sinóptico de los datos, no permiten aun previsiones confiables más allá de 72 horas en zonas tropicales. En la medida en que se amplían los periodos de validez del pronóstico se aumenta igualmente el grado de incertidumbre de las previsiones. Por ello, es importante destacar que para los diferentes tipos de plazos, existen diferentes grados de dificultad y más aun, diferentes metodologías

La complejidad del proceso de predicción climática, radica por una parte, en la determinación de posibles relaciones de causalidad entre la variabilidad del sistema océano – atmósfera en las escalas estacional, intraestacional e interanual y la variabilidad de los elementos climáticos (precipitación, temperatura, humedad, etc.) en las mismas escalas de tiempo y, por otra, en la estimación de su comportamiento y evolución, tanto espacial como temporal, en el largo plazo.

El problema básico radica en poder determinar la fluctuación de los volúmenes de lluvia que mensualmente se deberían registrar en las diferentes regiones del país de conformidad con su distribución normal. No obstante, dado que la distribución temporal no es la misma para todos los puntos del territorio nacional sino que esta condicionada principalmente a la dinámica de la Zona de Confluencia Intertropical, el problema se magnifica al tener que considerar una variedad amplia de regímenes de precipitación con

distribuciones de frecuencia mono y bimodales, tal como se pueden apreciar en el mapa de la figura 4.1



Una de las mayores dificultades del proceso de predicción climática, sigue siendo la falta de conocimientos detallados sobre el funcionamiento físico de la interacción entre el océano y la atmósfera tanto en la cuenca del Pacífico como en la del Atlántico (particularmente sobre el mar Caribe). La irregularidad y atipicidad de procesos como El Niño, La Niña – Oscilación del Sur - ENOS, ponen de manifiesto las grandes limitaciones que existen en la comprensión y simulación de esa dinámica en los modelos de predicción climática. Lógicamente, no se puede modelar bien lo que no se conoce bien.

Figura 4.1 Distribución espacio-temporal de la precipitación en Colombia, condición promedio. Fuente: Subdirección de Meteorología, IDEAM.

Adicionalmente, la alta variabilidad de la precipitación es otra gran limitante en la determinación de su comportamiento y distribución tanto espacial como temporal, dentro de la variabilidad interanual. En Colombia, sitios distantes entre si menos de diez kilómetros en línea recta y en terreno plano presentan marcadas diferencias, tanto en los volúmenes registrados como en su distribución temporal.

Aunque no hacen parte del proceso mismo de predicción climática, es importante ampliar el conocimiento, seguimiento y análisis de los principales sistemas pluviogénéticos del país (Baja semipermanente de Panamá, Flujo del Amazonas, Ondas del Este, etc.), que son propios de la escala sinóptica y de variabilidad diaria a semanal, pero que inciden de una u otra forma, en la estructuración de la predicción climática.

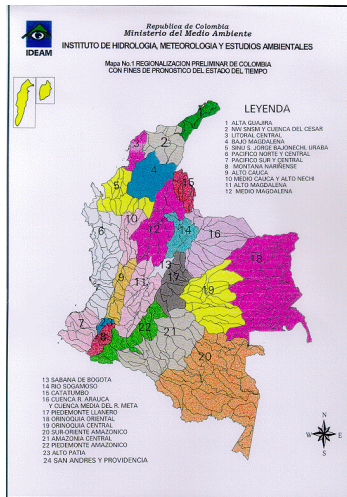
4.4 ETAPAS DEL ESQUEMA DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA

El clima sobre el territorio colombiano está mayormente controlado por procesos estacionales, variabilidad interanual y oscilaciones intraestacionales (Montealegre et al, 2000). La conjugación de estos tres elementos básicos explica en un alto porcentaje, la variabilidad total de los elementos climáticos considerados. A continuación se describen las etapas consideradas básicas dentro del esquema general de Predicción Climática propuesto.

1. Regionalización Climática.
2. Determinación del régimen normal de la variable explicada (Ciclo Anual).
3. Seguimiento de las condiciones atmosféricas en los meses precedentes – Factor de persistencia climática.
4. Determinación del efecto de la variabilidad climática de los océanos Pacífico y Atlántico en cada subregión considerada.
5. Influencia de los procesos océano - atmosféricos de gran escala al momento de elaborar la predicción.
6. Identificación de la posible Influencia de Ondas Intraestacionales.
7. Identificación de períodos con comportamiento climático análogo.
8. Desarrollo de métodos objetivos. Modelos Físico – Estadísticos.

9. Análisis de las salidas de los modelos climáticos globales y regionales.
10. Desarrollo del Análisis de Contingencia - Método de los Terciles.
11. Estructuración y elaboración de la Predicción Climática.
12. Validación de las Predicciones Climáticas.

4.4.1 Regionalización Climática - Determinación de zonas climáticamente similares



Para definir regiones climáticas homogéneas, el IDEAM utilizó como criterio fundamental el concepto de la cuenca hidrográfica o una agrupación de éstas, que fueran afectadas por sistemas atmosféricos de tipo sinóptico común. Las Regiones aparecen en el mapa de la figura 4.2 y están numeradas de 1 a 22. En la mayoría de los casos, sus nombres se relacionan con la cuenca o cuencas hidrográficas que conforman cada Región (Hurtado G, 2000). Aunque existen alrededor de 600 estaciones de tipo climatológico, es recomendable incorporar dentro esquema propuesto solo una ó dos estaciones como representativas de cada subregión, de conformidad con la longitud de los registros, la calidad de los datos y la disponibilidad de los mismos en tiempo real.

Figura 4.2 Regionalización climática definida por G. Hurtado, utilizando como criterio base el de cuenca hidrográfica.

Es importante considerar igualmente en esta etapa de regionalización, las metodologías sugeridas por Casas (2006) y Montealegre (1999), las cuales fueron descritas brevemente en el 2.1.2.

4.4.2 Determinación del régimen normal de la variable explicada (Ciclo Anual)

Para determinar el comportamiento normal La Organización Meteorológica Mundial recomienda el período 1961–90. Los promedios mensuales de estos 30 años definen el ciclo anual, de gran importancia en la predicción climática, al considerar esta distribución temporal como una primera aproximación de su tendencia. Con fines de regionalización, el ciclo anual es también un buen factor de selección.

4.4.3 Seguimiento de las condiciones atmosféricas en los meses precedentes – Factor de Persistencia Climática.

Este aspecto es realmente muy importante para establecer la proyección del comportamiento climático a futuro. El sistema climático tiene una inercia que es útil conocer y aprovechar, particularmente cuando se presentan períodos muy definidos de escasez o abundancia de lluvia. En este sentido, las estaciones seleccionadas como representativas de cada región, deberían de ser de tipo automático con registros en tiempo real ó en su defecto, convencionales que proporcionen al menos el total mensual de lluvia en los primeros días del mes siguiente al del análisis. Para determinar el factor de persistencia es importante disponer de la información de los últimos 24 meses, con lo cual se asegura el conocimiento de la variabilidad acumulada durante este lapso.

4.4.4 Determinación del efecto climático de las fases cálidas y frías de los fenómenos ENSO en Colombia en cada una de las regiones consideradas.

El análisis desarrollado por IDEAM en el 2007 sobre el efecto climático del ciclo ENOS en el patrón pluviométrico nacional y las conclusiones obtenidas en el presente estudio sobre la variabilidad interanual del Pacífico tropical y el Atlántico Norte y Sur, asociadas a la variabilidad de la precipitación en Colombia, en la misma escala de tiempo, contribuyen a mejorar la confiabilidad de la predicción climática, al incorporar un mayor conocimiento del grado de sensibilidad de las diferentes subregiones climáticas del país a las señales de la variabilidad climática en la gran escala.

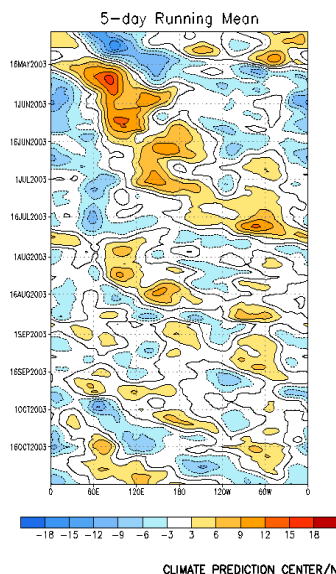
4.4.5 Influencia de los procesos océano - atmosféricos de gran escala al momento de elaborar la predicción.

El océano, como controlador del clima y la atmósfera, en cuyo seno se suscitan los procesos físicos de la condensación (formación de nubes), son los responsables más determinantes de la variabilidad interanual de la precipitación. Por ello, se considera que los procesos de interacción entre estos dos medios tienen una influencia directa en la variabilidad de la precipitación.

La información utilizada en el análisis corresponde en su gran mayoría, a los productos elaborados por los centros mundiales especializados. Estos productos y los índices meteorológicos y oceanográficos de gran escala permiten un análisis detallado de los procesos dinámicos y termodinámicos a lo largo del sector tropical de la cuenca de los océanos Pacífico y Atlántico Norte y Sur. La mayoría de los índices son ofrecidos por la NOAA, en su boletín de diagnóstico climático.

4.4.6 Identificación de la posible influencia de ondas intraestacionales

Las ondas intraestacionales se han podido identificar con mayor claridad en el campo de la radiación de onda larga saliente (OLR), el campo de viento, y con mayor resolución en el campo y en las anomalías de la velocidad potencial del viento en altura (200 hPa). El viento está definido por dos componentes, a saber: la componente rotacional, vista a través de la función corriente y la componente divergente, expresada a través de la velocidad potencial. Los valores negativos de velocidad potencial (zonas azules en los diagramas Hoffmoller, figura 4.3) están asociados con convergencia en capas altas, lo cual favorece los procesos subsidentes a lo largo de la vertical, es decir, menos lluvia en superficie y viceversa.



La determinación retrospectiva de las relaciones entre la dinámica de estas ondas y el comportamiento del patrón pluviométrico en Colombia es decisiva en el entendimiento y proyección de su efecto en el corto plazo de la predicción. Se ha podido establecer, preliminarmente, que estas ondas son más significativas durante las fases normales o ligeramente frías del ciclo el Niño, La Niña – Oscilación del Sur.

Figura 4.3 Media móvil (pentadas) de la velocidad potencial del viento en altura (200 hPa.)

4.4.7 Identificación de períodos comportamiento climático análogo

La identificación de períodos de comportamiento pluviométrico similar al de años anteriores, depende en buena medida, de la longitud de las series consideradas y del período análogo identificado para las condiciones océano - atmosféricas gran escala. Las proyecciones elaboradas mediante esta técnica conllevan un doble reto: elegir el análogo de gran escala de manera correcta y disponer de información climatológica nacional para el período análogo seleccionado. Como referencia, podríamos mencionar que la duración de la fase fría iniciada a mediados de 1998 y en proceso de extinción a comienzos de 2001, podría cotejarse con períodos de alteración similares ocurridos de 1915 a 1917; de 1933 a 1938 y de 1942 a 1950. De identificarse algunas similitudes, el paso siguiente es el análisis del efecto sobre las lluvias durante dichos períodos, (figura 4.4)

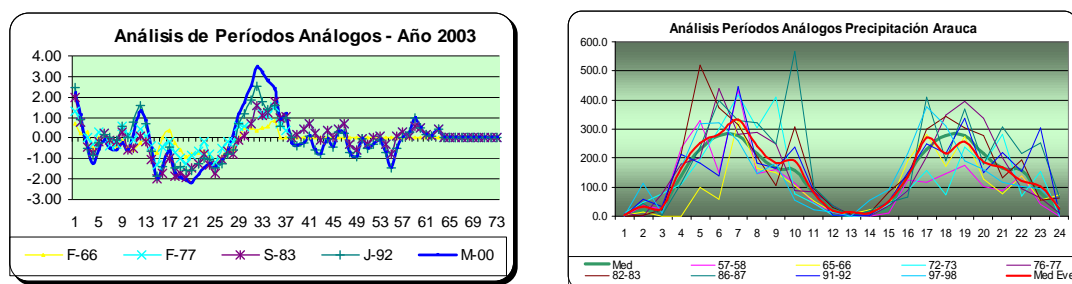


Figura 4.4 A la izquierda, se observa la identificación de períodos Análogos de tipo Neutral en la estructura térmica superficial del Pacífico Central. A la derecha, se observa la identificación de períodos Análogos para fases cálidas (El Niño) en Arauca.

4.4.8 Desarrollo de métodos objetivos. Corrida de modelos Físico - Estadísticos

El modelamiento de la influencia de los océanos Pacífico y Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación es una de las partes estructurales del presente esquema. Buena parte de los análisis desarrollados en este estudio son de gran importancia en la fase de modelamiento.

La base para la construcción de los Modelos Físico - Estadísticos, son los denominados Modelos de función de transferencia. Estos modelos permiten transferir relaciones de causalidad entre las variables explicativas y la variable explicada. Todo aquello que falte por explicar, es incorporado al modelo mediante la adición de una variable que garantiza la no-correlación de los residuos. Esta última, puede ser, a su vez, igualmente modelada.

Un factor importante en la formulación de este tipo de modelos es el conocimiento previo de la estructura de autocorrelación, tanto de las variables explicativas como de la variable explicada. Se requiere en consecuencia, la construcción previa de sus correspondientes modelos ARIMA.

El modelo de la función de transferencia es solamente una parte del modelo físico-estadístico de predicción climática (formulado inicialmente con precipitación). Este está

conformado por el conocimiento que aporta la parte correspondiente a la autorregresión de la variable explicada (incluido el efecto debido a los valores atípicos), la causalidad proveniente de las variables explicativas, el efecto debido a la temporalidad de las variables no incluidas en el modelo y su parte aleatoria o perturbación (ruido blanco), la información proporcionada por el conocimiento mismo de los procesos que se quieren modelar, la cual es incluida mediante las variables de intervención y finalmente, la información proveniente de los valores atípicos propios del modelo físico-estadístico formulado.

Existen otras alternativas metodológicas que permiten modelar la variabilidad temporal de la precipitación.

- Modelos de Regresión Dinámica
- Modelos ARIMA
- Modelo de Correlación Espacial
- Modelo de Correlación Canónica

4.4.9 Análisis de las salidas de los modelos globales

El equipo técnico responsable debe consultar semanalmente los boletines de las agencias especializadas, así como los productos gráficos de seguimiento y las predicciones desarrolladas por los modelos numéricos para diferentes plazos. En tabla 4.1 se aprecian las principales características de los modelos numéricos ofrecidos actualmente por los centros especializados del mundo. El grado de destreza de cada uno de ellos, se debe valorar a través de los resultados arrojados para diferentes períodos de variabilidad climática.

Tabla 4.1 Cuadro resumen de los principales modelos dinámicos y estadísticos de predicción desarrollados por los centros internacionales especializados.

PRONOSTICOS GLOBALES PARA CONDICIONES ENSO Y OTRAS TSM			
TOMADO DE DPTO COMMERCE-NOAA- HWS-NCEP-CPC-EXPERIMENTAL LONG-LEAD FORECAST BULLETIN			
	TIPO DE MODELO		INSTITUCION - AUTOR
	COMPREHENSIVE COUPLED MODEL	NCEP	National Center Enviromental Prediction
	SIMPLE COUPLED	LDEO	
	LINEAR INVERSE MODELING	LIM	
	HYBRID COUPLED MODEL	HCM	Scripps -Max Planck Institutions
D	NASA/NSIPP model	NASA	NASA/NSIPP
I	COUPLED FORCAST SIMPLE	NCEP	NCEP
N	JAPAN Meteorological Agency Model	JAPAN	JAPAN Meteorological Agency Model
A	SIMPLE COUPLED	LDEO-2	Lamont-Doherty Earth Observatory - LDEO
M	POAMA Australian Model	POAMA	POAMA Australian Model
I	ECMWF Model	ECMWF	ECMRWF - AOPP - Hadley center
C	SNU (Korea) Model	KOREA	SNU (Korea)
O	ZHANG ICM Model	ZHANG	ZHANG ICM
S	ECHAM/MOM	ECHAM	
	ANOMALY COUPLED PREDICTION SYSTEM	COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
	LOW ORDER COUPLED	BMRC	Bureau Met. Reserch Center (Australia)
	OCEAN EMPIRICAL ATMOSPHERE COUPLED	OXFORD	Reading, Oxford y UK Met Office
	COUPLED GCM	GCM	Center Ocean Land Atmosphere Studies

4.4.1.10 Desarrollo del Análisis de Contingencia - método de los Terciles

Esta etapa del análisis constituye el núcleo central de este estudio y es un factor determinante en la proyección de la variabilidad climática en la escala interanual, preferentemente.

4.4.11. Estructuración y elaboración de la Predicción Climática

Desarrollado el análisis integral de los 10 puntos anteriores, se elabora el diagnóstico y se preparan las predicciones climáticas a corto (1 mes), mediano (de 1 a 3 meses) y largo plazo (de 3 a 6 meses), inicialmente sobre el carácter de las precipitaciones (deficitaria, normal ó excesiva), es decir cualitativamente. Posteriormente, al implementar completamente el análisis objetivo (uso de modelos físico - Estadísticos), se pueden elaborar predicciones sobre rangos de probabilidad y para rangos ó intervalos de anomalías, ya sea en términos porcentuales, de desviaciones estándar, ó en milímetros, si es el caso. Por ejemplo: "...existe una probabilidad, entre el 60% y el 65% de que las lluvias en el bajo Magdalena se presenten excesivas, con volúmenes que podrían superar los valores promedios, entre un 20% y un 40%...".

Igualmente, debería incluirse en la predicción la ocurrencia de fenómenos adversos, tales como ondas de calor, heladas, ondas de creciente, etc. La mayor parte del análisis debe ser descrito con el apoyo de material gráfico y mapas ilustrativos.

La síntesis de todo el proceso se condensa en el documento que se distribuye a las otras áreas temáticas del IDEAM, como referente para sus propias proyecciones. Revisada la predicción, se incluye en el Boletín Mensual sobre las Condiciones Ambientales en Colombia, predominantes durante el período de tiempo analizado. El boletín incluye un resumen ejecutivo, una descripción de las condiciones hidroclimáticas y ambientales a escala global y nacional y las proyecciones de las condiciones ambientales para los diferentes plazos ya mencionados.

En el transcurso de cada mes, se preparan informes especiales de avance de acuerdo con las características de los eventos o las necesidades de información de los diferentes sectores sociales del país.

		Pronóstico	
		Si	No
E v e n t o	S	Decisión Correcta Costos por preparación	Ninguna Acción Pérdidas por carencia de información
	N	Falsa Alarma Costos de preparación	Decisión Correcta Ningún Costo ni Pérdidas

Un aspecto de trascendental importancia para tener siempre presente, es el alto grado de responsabilidad que tiene el IDEAM, como autoridad Meteorológica nacional, al emitir las predicciones, dada la sensibilidad social y económica que tiene la información suministrada. Un aviso de posible ocurrencia de El Niño, sube inmediatamente los precios de la energía en la bolsa de valores, se restringen ó acondicionan los créditos agrícolas, se acelera el almacenamiento de granos, leche y otros productos sensibles a la reducción de la oferta hídrica nacional. En consecuencia, debe tenerse siempre presente, los tipos de error que pueden cometerse (figura 4.5).

Figura 4.5 Matriz ilustrativa del tipo de error en los que se incurre por efecto de una correcta o incorrecta decisión.

4.4.12 Validación de las Predicciones Climáticas

Las predicciones deben valorarse inicialmente sobre el carácter de las lluvias registradas. Una forma común de presentar los resultados de la evaluación, es través de las tablas de Contingencia (Berri & Flamenco, 1999). La habilidad de la metodología se establece a través del porcentaje de ocurrencia de pronósticos correctos, es decir, los elementos de la diagonal principal de la tabla de contingencia. En la tabla de la figura 4.6 se observan los criterios de error máximo (celdas rojas) y acierto completo (celdas verdes).

Tabla de Contingencia para Validación de la Predicción Climática		PRONOSTICADO		
		Deficit	Normal	Exceso
OBSERVADO	Deficit			
	Normal			
	Exceso			

Figura 4.6 Tabla sugerida para la validación de las predicciones, utilizando los criterios de error máximo (celdas rojas) y acierto completo (celdas verdes).

4.5 AUTOMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Una vez desarrollados e implementados los aplicativos en la base de datos central del IDEAM, será posible disponer de la salida de los modelos en tiempo real, durante los primeros días de cada mes, garantizando con ello, la componente objetiva del procedimiento. El ajuste de las predicciones a los resultados de los modelos globales, será complementado con el aporte de nuevos conocimientos, producto de las actividades de investigación básica, sobre el efecto climático de la variabilidad interanual de gran escala en el clima nacional y la identificación de los períodos análogos de las fases cálidas y frías, con lo cual se logrará un mejor entendimiento de los procesos físicos que gobiernan la atmósfera y el océano en el Pacífico tropical.

5. CONCLUSIONES

La siguiente, es la síntesis de las conclusiones de mayor trascendencia obtenidas del análisis de la influencia de los procesos de interacción océano – atmósfera del Pacífico Tropical y el océano Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia.

1. Mediante técnicas estadísticas de tipo exploratorio y multivariado, se corroboran los planteamientos teóricos sobre el funcionamiento de los procesos de interacción océano-atmósfera, en los océanos Pacífico tropical y Atlántico Norte y Sur.
2. El análisis espectral permite comprobar el grado de independencia que existe en los procesos físicos que se suceden en los océanos Pacífico y Atlántico. Si bien hay pequeñas coincidencias o aproximaciones en algunos períodos que podrían estar asociados, no es posible identificar una relación clara entre la variabilidad de los mismos.
3. Se logra establecer que la señal inducida por El Niño, La Niña – Oscilación del Sur es la más destacada dentro de la variabilidad interanual de los océanos y alcanza a ser representada en forma clara cuando se analiza globalmente la banda tropical.

En la fase de asociación entre las variables explicativas y la variable explicada, fue posible identificar los siguientes aspectos de importancia:

1. Queda claro la no-linealidad en las relaciones existentes entre las variables explicativas y la variable explicada (precipitación).
2. El comportamiento del patrón pluviométrico de Colombia está muy influenciado por la variabilidad interanual de los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera del océano Pacífico Tropical, en menor grado por los del océano Atlántico Norte y en forma casi imperceptible por los del océano Atlántico Sur.
3. En el sector correspondiente al Atlántico Norte extratropical no se observa un patrón definido de asociación entre las variables estudiadas, a pesar de que durante algunos meses en particular, se percibe cierto grado de asociación, pero de signos alternos. En términos generales, se puede concluir que mediante el análisis de las anomalías mensuales de la precipitación registrada en las

estaciones seleccionadas no se pudo establecer ninguna influencia de la NAO sobre la variabilidad de las mismas.

4. La estructura térmica superficial del Mar Caribe solo insinúa algún tipo de asociación con el comportamiento de las lluvias en el país; la más notoria corresponde a la observada de forma directa con las precipitaciones de mitad de año en la región Caribe y el norte de región Andina.
5. En general, se logro establecer que no existe una relación definida entre las anomalías mensuales de precipitación y las anomalías de la estructura térmica superficial de los dipolos analizados, es decir, estos no explican la variabilidad de las lluvias en Colombia.
6. El comportamiento mensual de la precipitación en la Orinoquía y la Amazonía aparece muy bien asociado con la variabilidad del dipolo de humedad relativa en la media troposfera de la Región Amazónica. De igual forma, las lluvias de la región Caribe y norte de la región Andina presentan un buen grado de asociación con este índice, aunque de menor magnitud.

En los aspectos relacionados con la selección de variables explicativas con miras a la construcción de las tablas de contingencia de tipo climatológico, se destacan los siguientes puntos de importancia:

1. Analizadas las estadísticas descriptivas de las variables explicativas, sus relaciones de asociación, los ciclos y frecuencias comunes, la complejidad del proceso físico involucrado, el grado de asociación con las precipitaciones, su variabilidad y algunos otros aspectos clasificatorios, se determinaron tres índices básicos para el desarrollo del análisis de Contingencia y el análisis Compuesto: TSM del Pacífico tropical centro occidental, (El Niño - región N-34), la radiación de onda larga saliente (OLR), centrada en 10.5° Norte y 75° W y el dipolo de humedad relativa en la troposfera media de la región Amazónica.
2. Se construyeron cerca de 1400 tablas de contingencia de tipo climatológico. Esta nueva herramienta fortalece el proceso de predicción climática por cuanto favorece la creación de escenarios de impacto sobre la precipitación durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática extrema. Actualmente se está haciendo uso de los primeros resultados obtenidos en el mes de septiembre de 2009.

Finalmente, con relación al esquema de Predicción Climática propuesto para Colombia, es importante destacar que ha sido estructurado como un consolidado de las actividades que son indispensables para establecer las características de la variabilidad climática en lapsos que van de semanas a meses. La unión de sus resultados individuales es lo que constituye su fortaleza.

RECONOCIMIENTOS

Tal como se ha expresado en otras oportunidades, con la creación del IIDEAM, la Meteorología como servicio, fue orientada hacia un nuevo enfoque dentro del contexto

Ambiental, con el fin de acercarla al cumplimiento de su función social y proyectarla como un elemento básico en las actividades de planeación y prevención, a todo nivel. Gracias a esta nueva política se fortalecieron las actividades de investigación básica, que muy incipientemente venía desarrollando el HIMAT.

El autor expresa su reconocimiento a los directivos del IDEAM, por su interés en el mejoramiento del programa de Predicción Climática, con lo cual se amplían los conocimientos relativos a las particularidades de los procesos atmosféricos, del tiempo y del clima, cuyo oportuno pronóstico permite optimizar los procesos de producción nacional de bienes y servicios y facilitar la reducción del impacto económico y social de los fenómenos Meteorológicos de carácter adverso, como los relacionados con el ciclo ENOS. El autor agradece igualmente, a la Meteoróloga Gloria Esperanza León Aristizabal por sus continuas y valiosas sugerencias para el mejoramiento de los procesos desarrollados y de los resultados obtenidos en este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALFARO et al, (2003): Uso de una tabla de contingencia para aplicaciones climáticas. Proyecto apoyado por NOAA-OGP/USAID-OFDA, MM5-UCR-CRRH, TC3NET-UNESCO. San José, Costa Rica.

BARNSTON, A.G., LEETMAA A., KOUSKY V.E., LIVEZEY R.E, O'LENIC E.A, VAN DEN DOOL H., WAGNER A.J, and UNGER D.A, 1999: NCEP Forecasts of the El Niño of 1997–98 and Its U.S. Impacts. Bull. Amer. Met. Soc., 80, 1829–1852.

BERRI Guillermo & FLAMENCO Eduardo. Seasonal volume forecast of the Diamante River, Argentina, based on El Niño observations and prediction. Water Resources Research, vol. 35, No 12, pp 3803-3810, 1999.

BERTACCHI, Cintia & REPELL, Carlos (1998): The relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. *Journal of Climate*, Vol. 11: 551-562. American Meteorological Society. Colorado, Estados Unidos.

CASAS Ana María, (2006): Regionalización del territorio colombiano de acuerdo a la precipitación. Ed. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.

CASTRO, Aparicio (1999): Posible influencia de El Niño 97-98 sobre la Geografía del oriente y sur de Venezuela (Trabajo), 25 pp. Universidad de Oriente. Venezuela.

ENFIELD, David (1997): Relationships of Inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophysical Research Letters*: 1-4. American Geophysical Union. Estados Unidos.

HURTADO Gonzalo, (2000): La Precipitación en Colombia. Nota Técnica - IDEAM-METEO/006/00 - Investigación Aplicada, Bogotá, 2000

LEON Gloria, & Zea Jorge, (1998): Circulación general y variabilidad climática en los trópicos. Nota Técnica IDEAM-METEO/0002-98. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogota, Colombia.

MADDEN Roland & JULIAN Paul, (1972): Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109-1123.

MALIKOV, I., 2008: Estudio climático y oceánico de las áreas marinas de Colombia. Nota Técnica IDEAM - METEO 080/2008

MARTELO, María (1998): Estudio sobre la posible influencia del fenómeno “El Niño – Oscilación del Sur” (ENOS) sobre el clima de los llanos en Venezuela (Trabajo). 12 pp. MARNR, Venezuela.

MESA, Oscar, POVEDA Germán & CARVAJAL Fernando (1997): Introducción al Clima de Colombia. 390 pp. Ed. Imprenta de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

MONTROY, D.L., M. B. Richman, and P. J. Lamb, (1998): Observed Nonlinearities of Monthly Teleconnections between Tropical Pacific Sea Surface Temperature Anomalies and Central and Eastern North American Precipitation, *J. Climate*, 11, 1812–1835.

MONTEALEGRE, Edgar (1996): Análisis del comportamiento de la precipitación en Colombia durante los períodos de ocurrencia de los fenómenos ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y anti-El Niño. IV Congreso Colombiano de Meteorología: 157-169, Sociedad Colombiana de Meteorología. Bogotá, Colombia.

MONTEALEGRE Edgar (1999): La influencia de los procesos de interacción océano-atmósfera del Pacífico tropical y el Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia. Tesis de Grado Magíster en Meteorología. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Diciembre, 1999.

MONTEALEGRE Edgar, 2007: Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia. Informe final, Contrato No 063 IDEAM – Diciembre 2007.

NOAA, Creating a Local Climate Product Using Composite Analysis - Print Version of Webcast

ORIBE Rocha J., (1998): Impacto de ENSO y el Dipolo del Atlántico en el Nordeste de Brasil. Bull. Inst. fr. Eludes Andenes, 1998, 27 (3), 839-844.

PABÓN, Daniel (1997): Variabilidad Climática. Organización Meteorológica Mundial. Técnicas Agrometeorológicas en la Agricultura Operativa de América Latina: 99-103. Ed. OMM, Ginebra, Suiza.

PABÓN, Daniel & MONTEALEGRE, Edgar (1997): Probabilidad de afectación de la precipitación en Colombia por el fenómeno El Niño, 1997. Nota Técnica IDEAM/METEO/002-97: 1-39. Ed. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.

PABÓN, Daniel & MONTEALEGRE, Edgar (1998a): Probabilidad de Afectación de la Precipitación en Colombia por el fenómeno La Niña. Nota Técnica IDEAM-METEO/ 008-98: 1-16. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia.

PABON Daniel & MONTEALEGRE Edgar, (2008): El Ciclo El Niño, La Nina – Oscilación del Sur. En lista de espera en la imprenta de la Universidad Nacional de Colombia, febrero de 2009. Bogota, Colombia.

POVEDA Germán & MESA Oscar (1996b): Caudales medios mensuales de ríos colombianos durante El Niño y La Niña. IV Congreso Colombiano de Meteorología: 291-298. Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá, Colombia.