

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**VARIABILIDAD INTERDIARIA DE LA PRECIPITACIÓN EN MEDELLÍN
(COLOMBIA) ASOCIADA CON LAS ONDAS TROPICALES DEL ESTE Y
SU COMPORTAMIENTO DURANTE LAS FASES DEL ENSO**

Hernán Darío Salas Parra¹

*¹Estudiante de Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,
Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.*

hdsalas@unal.edu.co

Alejandra María Carmona Duque²

²M.Sc, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

amcarmo@unal.edu.co

Germán Poveda Jaramillo³

³Profesor Titular, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

gpoveda@unal.edu.co

RESUMEN:

El sistema ENSO y las Ondas Tropicales del Este se encuentran entre los factores que ayudan a explicar las anomalías hidrológicas en Colombia. En el presente trabajo se implementan la Transformada en Onditas y la Transformada de Hilbert-Huang al estudio de series de lluvia diaria en los Andes Tropicales de Colombia con el fin de estudiar la influencia de las Ondas Tropicales del Este en la precipitación para diferentes fases del ENSO. Se analizan los dos años más fuertes de cada fase del sistema ENSO (El Niño y La Niña) basados en los índices ONI y MEI, y la información disponible de precipitación. Los resultados muestran que todas las estaciones presentan frecuencias predominantes con periodos asociados a 3-7 días y porcentajes de potencia superiores al 65% que se pueden asociar con las características de las Ondas Tropicales del Este. Dichas frecuencias disminuyen para los años El Niño. Los espectros de potencias en Onditas y de Hilbert-Huang exhiben mayor variabilidad para los meses Junio-Noviembre de los años La Niña y Normal que para los años El Niño, lo que contribuye a explicar la reducción drástica de la precipitación en Colombia en la fase cálida del ENSO.

ABSTRACT:

The ENSO system and the Tropical Easterly Waves are among the factors that explain hydrological anomalies in Colombia. The Wavelet Transform and the Hilbert-Huang Transform are implemented to study series of daily rainfall in the tropical Andes of Colombia to determine the influence of the Tropical Easterly Waves on precipitation for different phases of ENSO. The two strongest years of each phase (El Niño and La Niña) are analyzed based on the ONI and MEI indices and available precipitation data. Results show that all stations have predominant frequencies associated with periods 3-7 days and power percentages of over 65% that can be associated with the characteristics of the Tropical Easterly Waves. These frequencies decrease for El Niño years. Power spectra of the wavelet and Hilbert-Huang transforms exhibit greater variability for the months of June to November for La Niña and Normal years than for El Niño years, which helps to explain the drastic reduction in rainfall in Colombia in the warm phase of ENSO.

PALABRAS CLAVES: Ondas Tropicales del Este (OTE), El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), Transformada de Hilbert-Huang (THH).

1. INTRODUCCIÓN

Las ondas tropicales del este (OTE) fueron observadas por primera vez en los vientos alisios del este en el mar Caribe (Riehl, 1945; Riehl & Malkus, 1958), son una característica sobresaliente de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y suelen servir como precursoras de los huracanes en el Atlántico Norte y en el Mar Caribe (Serra et al., 2010). Sin embargo, la mayoría de estas ondas no evolucionan en depresiones tropicales, tormentas o huracanes (Arnault & Roux, 2011). En lo que respecta a su origen, se sabe que una gran proporción de OTE del Atlántico se forman en el continente Africano, pero su génesis en el Caribe y el este del Pacífico en particular no han sido establecidas en detalle. A pesar de su importancia, se conoce muy poco sobre aspectos detallados de su ciclo de vida, incluyendo génesis, crecimiento, desarrollos estructurales a lo largo de su recorrido y decadencia (Thorncroft, C. & Hodges, K., 2000; Serra et al., 2010; Arnault & Roux, 2011).

Webster & Toma (2009) realizan un estudio sobre las oscilaciones de la ZCIT y la génesis de las OTE en la zona tropical del este del Océano Pacífico debido a que en esta región existe un buen desarrollo medio de la ZCIT. Además, ha existido una discusión científica de si las OTE se desarrollan in situ o si se propagan hacia el occidente desde el Océano Atlántico. Las conclusiones del diagnóstico realizado por Webster & Toma (2009) son compatibles con los estudios de diagnóstico de Serra et al. (2007) en los cuales se establece que mientras algunas ondas del este en el Pacífico se originan en el Atlántico, la mayoría de estas ondas parecen formarse y fortalecerse en el Pacífico. Entre las principales características de las OTE se destacan longitudes de onda entre 3000-4000 km, velocidad de propagación entre 8-10 m/s y periodo en el rango de 4-5 días en la ZCIT, según lo descubierto por Chang (1970). Sobre las ondas de este en el Pacífico, se reporta que tienen longitud de onda entre 4200-5900 km, velocidad de fase entre 11.3-11.6 ms⁻¹ y máximas anomalías de viento meridional a unos 600 hPa (Serra et al., 2007).

En su camino hacia el Océano Pacífico las OTE pasan por la geografía Colombiana y constituyen una fuente importante de variabilidad climática y de precipitaciones, en particular en la zona de la costa del Caribe, el valle del río Magdalena y el oriente del país (Martínez, 1993). En las fases del ENSO, las OTE presentan variabilidad en su cantidad e intensidad. Durante el niño, el Atlántico tropical y el mar Caribe presentan menor cantidad de tormentas tropicales y huracanes lo que indica reducción en la cantidad e intensidad de las OTE (Gray & Sheaffer, 1992). Con respecto a la variabilidad de las OTE durante las fases del ENSO en Colombia se ha podido establecer que existen pocas diferencias entre el espectro de potencias en Onditas para el año La Niña y el año Normal. Por el contrario, los resultados para el Niño revelan una reducción drástica de las bandas de alta frecuencia, lo que ayuda a explicar los mecanismos físicos por los cuales la precipitación se reduce drásticamente en Colombia durante los eventos de El Niño (Poveda, 2004).

Para el estudio de las OTE y su variabilidad durante las fases del ENSO, en el presente trabajo se realizará un análisis de series de precipitación diaria utilizando la transformada en Onditas y principalmente la Transformada de Hilbert-Huang (Huang et al., 1998; Huang y Wu, 2008). La THH permite estimar el espectro de señales no lineales y no estacionarias, razón por la cual es una herramienta útil para el estudio de fenómenos hidro-climatológicos, además de considerarse que supera en muchos aspectos otras técnicas similares como la Transformada Rápida de Fourier y la Transformada en Onditas (Carmona, 2010).

El trabajo está estructurado de la siguiente manera; la información utilizada y la zona de estudio se describen en la sección 2. En la sección 3 se considera el marco teórico conformado por conceptos de la transformada en Onditas (sección 3.1), la Transformada de Hilbert-Huang (sección 3.2), el Análisis Espectral de Hilbert (sección 3.2.1) y la Descomposición en Modos Empíricos (sección 3.2.2), en la sección 4 se desarrolla el análisis de resultados. Las conclusiones están consignadas en la sección 5.

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

La información utilizada para este trabajo consiste en 24 estaciones pluviográficas con resolución temporal diaria, pertenecientes a Empresas Públicas de Medellín, 16 de estas estaciones están distribuidas sobre el Valle de Aburrá y 8 sobre la zona occidental del altiplano de San Nicolás. La **Figura 1** muestra la ubicación de la zona de estudio tanto a nivel regional como local. De igual manera, la **Tabla 1** muestra la información de las estaciones utilizadas para este estudio.

a) Valle de Aburrá: Está ubicado en la región occidental de Colombia, sobre la cordillera central. Tiene una extensión aproximada de 1326 km² y sus límites se encuentran dentro del departamento de Antioquia. En coordenadas geográficas este valle se encuentra entre las latitudes 6°0'0"N - 6°35'0"N y las longitudes 75°10'0"W - 75°40'0"W. Su topografía es irregular con pendientes variables y cuenta con altitudes que oscilan entre los 1.500 y los 2.500 m.s.n.m.

b) Altiplano de San Nicolás: También conocido como El altiplano de oriente, se encuentra ubicado en la cordillera central de Colombia al este del valle de Aburrá. Consta de un área aproximada de 1830km². La zona de estudio perteneciente a este Altiplano se encuentra entre las latitudes 6°0'0"N - 6°20'0"N y las longitudes 75°15'0"W-75°35'0"W. Sus altitudes que varían entre los 1.900 y los 2.600 m.s.n.m.

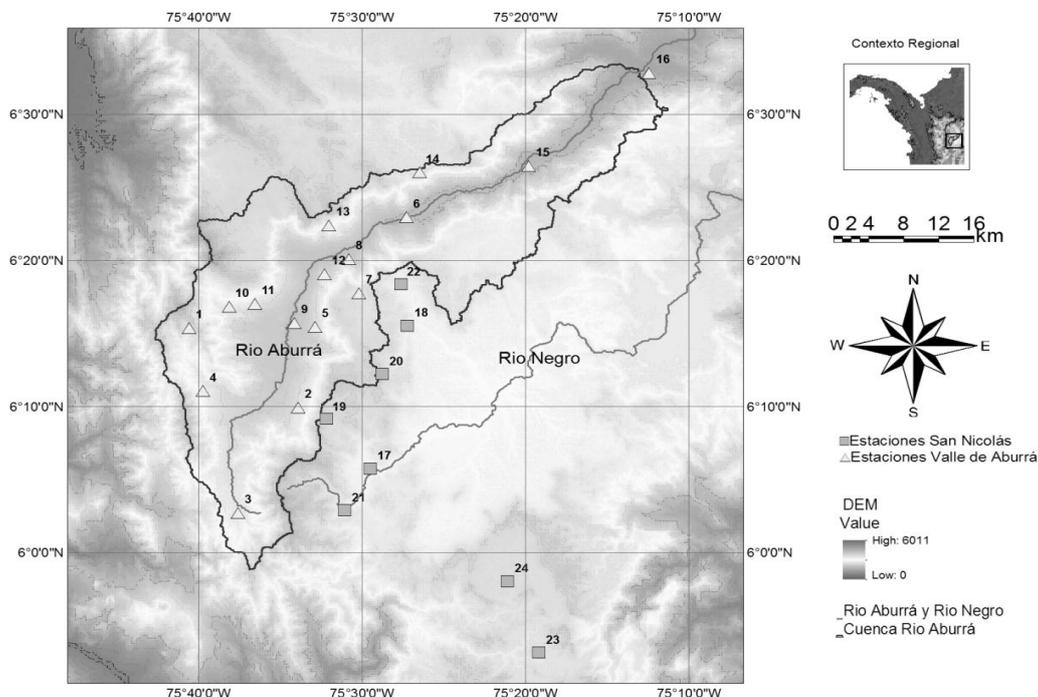


Figura 1. Zona de Estudio y ubicación de estaciones de precipitación.

3. MARCO TEÓRICO

Los procesos geofísicos han sido estudiados basados en información de series de tiempo relacionadas con variables como precipitación, temperatura, caudal, velocidad del viento, evapotranspiración, entre otras. Esta información, ya sea proveniente de mediciones en campo o de procesos de simulación numérica puede presentar características que hacen que las herramientas con las cuales se estudian dichas variables sean limitadas. Algunos de estos rasgos inherentes a la información pueden ser; (i) Longitud de registros demasiado corta, (ii) Los datos son no estacionarios o su distribución de probabilidades varía con el tiempo, (iii) Los datos representan procesos no-lineales (Huang y Wu, 2008).

Tabla 1. Información de estaciones de precipitación.

Zona	Número de Estación	Nombre	Coordenadas		Altitud (m)
			Longitud (O)	Latitud (N)	
Valle de Aburrá	1	El Astillero	75.68	6.26	2420
	2	Ayurá	75.57	6.17	1750
	3	Caldas	75.63	6.05	1930
	4	San Antonio de Prado	75.67	6.19	2000
	5	Planta Villa Hermosa	75.55	6.26	1690
	6	Girardota	75.45	6.38	1350
	7	Chorrillos	75.50	6.30	2370
	8	El Convento	75.52	6.33	1580
	9	Miguel de Aguinaga	75.57	6.26	1549
	10	San Cristóbal	75.63	6.28	1890
	11	Cucaracho	75.61	6.28	1830
	12	Manantiales	75.54	6.32	2043
	13	Niquía	75.53	6.38	2150
	14	Alto de San Andrés	75.44	6.44	2240
	15	Barbosa	75.33	6.45	1290
	16	Gabino	75.20	6.55	1080
San Nicolás	17	La Fe	75.49	6.10	2150
	18	La Severa	75.46	6.26	2170
	19	Las Palmas	75.54	6.16	2495
	20	Vasconia	75.48	6.21	2510
	21	El Retiro	75.52	6.05	2190
	22	La Mosca	75.47	6.31	2155
	23	Mesopotamia	75.32	5.89	2410
	24	La Unión	75.35	5.98	2500

El estudio de series de tiempo puede realizarse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. El primer caso, la señal o el proceso es función del tiempo $f(t)$, en el segundo caso el proceso es definido por su amplitud F en función de la frecuencia ω , $F(\omega)$. Tradicionalmente para el último caso se utilizan dos metodologías: La transformada de Fourier y La transformada en Onditas (Hoyos, 1999; Carmona, 2010). A continuación, en los numerales 3.1. y 3.2 se detallan las propiedades de la Transformada en Onditas y la Transformada Hilbert-Huang, respectivamente.

3.1. TRANSFORMADA EN ONDITAS

La transformada en Ondita es una herramienta matemática que permite descomponer una serie de tiempo en el dominio tiempo-frecuencia, y por tanto es posible determinar los modos dominantes de variabilidad y como varían tales modos con el tiempo (Torrence & Compo, 1998). La Transformada en Onditas, utiliza una “onda pequeña” o pulso, en el cual la energía está concentrada en un intervalo de tiempo, permitiendo desarrollar una herramienta de análisis de fenómenos transitorios y no estacionarios simultáneamente en el tiempo y la frecuencia (Hoyos, 1999). Esta transformada se define como:

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

Donde λ es el parámetro de escala (dilatación), t es el parámetro de localización (traslación) y $\psi(t)$ es la ondita madre. Una constante de normalización $(1/\sqrt{\lambda})$ es escogida de tal manera que $\int |\psi_{\lambda,t}(u)|^2 du = \int |\psi(t)|^2 dt$, para todas las escalas. La transformada discreta en onditas se define

como la convolución de X_n con una versión trasladada y escalada de la ondita madre $\psi_0(\eta)$, donde η es un parámetro adimensional del tiempo.

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \left(\frac{(n' - n)\Delta t}{s} \right), \quad [2]$$

Ψ hace referencia al conjugado complejo, s es el parámetro de escala y n el parámetro de localización. Así, la energía se define como el cuadrado de la magnitud de la transformada en onditas:

$$E(\lambda, t) = |W(\lambda, t)|^2 \quad [3]$$

La transformada en onditas localiza temporal y frecuencialmente la señal, pues su espectro de potencias es un mapa de curvas de nivel (dos dimensiones) representadas en un marco definido por un eje temporal y uno frecuencial (Daubechies, 1992; Torrence y Compo, 1998; Carmona, 2010). La transformada en Onditas tiene restricciones, entre ellas que existe una pérdida generada por la extensión limitada de la ondita madre, pues las onditas no son intrínsecas a la señal (Huang et al., 1998).

3.2. TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG

Esta técnica fue desarrollada específicamente para el análisis de señales con características de no-linealidad y no-estacionariedad. En general, el procedimiento consiste en descomponer la serie de datos en Funciones de Modos Intrínsecos (FMI) mediante un proceso de filtrado denominado Descomposición en Modos Empíricos (DME), de esta manera se calculan modos base a partir de los datos y luego se aplica la Transformada de Hilbert para obtener la información Tiempo-Frecuencia-Energía conocida como espectro de Hilbert (Huang et al., 1998). La THH ha sido implementada en múltiples aplicaciones debido a que permite identificar frecuencias coexistentes en un mismo fenómeno además de revelar la no estacionariedad y no linealidad de los mismos (Huang et al., 1998). Estas características han llevado al avance en el entendimiento de muchos procesos. Entre las aplicaciones de la THH se encuentran estudios relacionados con: (i) fenómenos sísmicos (Huang et al., 2001), (ii) oscilaciones inerciales elípticas de la capa límite atmosférica (Lundquist, 2003), (iii) impactos locales y regionales del fenómeno ENSO (El-Askary et al., 2004), (iv) variabilidad de la precipitación (Baines, 2005; Molla et al., 2005), (v) impacto del calentamiento global en la Oscilación del Atlántico Norte (Hu y Wu, 2004), entre otras. En el caso particular de fenómenos geofísicos en zonas tropicales se conoce muy poco sobre la implementación de la THH. De los trabajos realizados, Osorio (2005) utiliza esta herramienta para el estudio de series hidrológicas y Carmona (2010) la emplea para la identificación de modos principales de variabilidad hidro-climática en Colombia y la Cuenca Amazónica.

3.2.1. ANÁLISIS ESPECTRAL DE HILBERT

Encontrar la frecuencia instantánea y la amplitud instantánea es la manera de estudiar un proceso estocástico no-estacionario. Para este fin, el análisis espectral de Hilbert se introduce como parte fundamental de la THH (Huang y Wu, 2008), pues su objetivo es establecer la frecuencia en cualquier instante de tiempo y no de manera general o global (Huang et al., 1998). Sea $x(t)$ una función de clase L^p tal que $x(t) \in L^p = x(t)$ y $\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^p dt < \infty$, la transformada de Hilbert $y(t)$ es un caso especial de convolución de la función $x(t)$ y una función $g(t)=1/t$, definida como se muestra en la ecuación (4) en donde P es valor principal de Cauchy de la integral singular.

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad [4]$$

Las funciones $x(t)$ y $y(t)$ forman un par conjugado complejo, por tanto es posible definir un $z(t)$ tal que,

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad a(t) = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad [5] [6] [7]$$

Las variables a y Θ , representan la amplitud instantánea y la función de fase instantánea, respectivamente, así para un tiempo dado la frecuencia instantánea se puede definir como:

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad [8]$$

Debido a que tanto la amplitud como la frecuencia son funciones del tiempo es posible definir una función $H(w, t)$. Se puede definir el espectro marginal como:

$$h(w, t) = \int_0^T H(w, t) dt \quad [9]$$

El intervalo en el cual están definidos los datos es $(0, T)$. El espectro marginal representa la amplitud acumulada (energía) sobre toda la extensión de los datos en un sentido probabilístico y ofrece una medida de la contribución de cada valor de frecuencia a la amplitud total, por lo tanto es una forma alternativa de representar el espectro a la del análisis tradicional de Fourier (Carmona, 2010).

3.2.2. DESCOMPOSICIÓN EN MODOS EMPÍRICOS (DME)

A continuación se resume el procedimiento de Descomposición en Modos Empíricos descrito por Rao y Hsu (2008).

- a) Se identifican los extremos máximos y mínimos de la señal.
- b) Se conectan todos los valores máximos con un spline cúbico y se construyen la envolvente superior e_{\max} . Se realiza un procedimiento análogo para los valores mínimos e_{\min} .
- c) Se haya la media entre e_{\max} y e_{\min} , $m(t) = (e_{\max}(t) - e_{\min}(t))/2$.
- d) Se calcula $d(t) = x(t) - m(t)$.
- e) Se considera $d(t)$ como la nueva señal $x(t)$. Se sigue el procedimiento anterior hasta que $d(t)$ sea una señal con media cero.
- f) Cuando la señal $d(t)$ tiene media cero, se designa como la primera FMI.
- g) La FMI hayada en el literal f se extrae de la señal original y el residuo se convierte en una nueva señal $x(t)$. Se repite el proceso para obtener la siguiente FMI.
- h) Se continúa el proceso para obtener las siguientes FMI. El proceso se detiene cuando el residuo es una función monótona que tiene solo un máximo o solo un mínimo y ya no es posible extrae más funciones a partir de estas.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se seleccionaron los dos años El Niño y los dos años La Niña más fuertes basados en los índices ONI y MEI. Posteriormente se verificaron las bases de datos de registros de lluvia a escala diaria, con el fin de establecer que las estaciones tuvieran información de estos periodos sin datos faltantes. Se estimaron los espectros de potencias en Onditas y los espectros de Hilbert-Huang en las 24 estaciones pluviométricas para los años El Niño/La Niña seleccionados; La Niña (73/74 y 88/89), El Niño (82/83 y 97/98) y Normal (84/85).

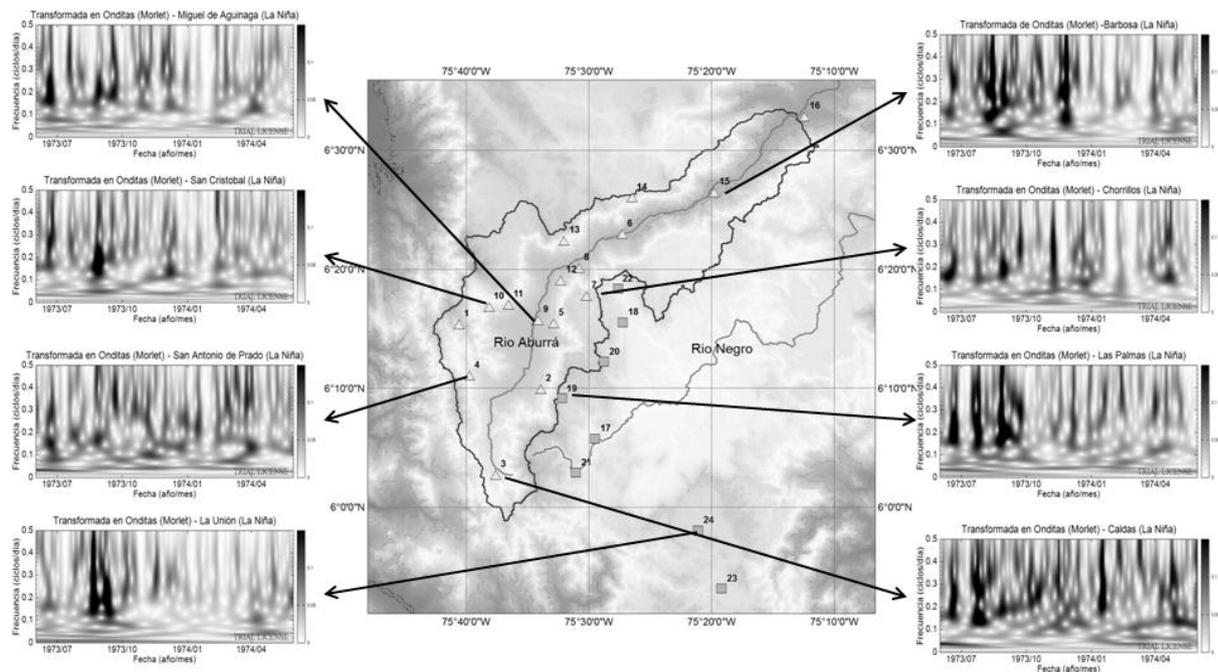


Figura 2. Espectro de potencias en onditas para diferentes estaciones de la zona de estudio para el año La Niña 73/74.

En las **Figuras 2 y 4** se pueden apreciar las diferencias en los espectros de potencias. En general, las estaciones en general muestran mayor variabilidad en el espectro para el año La Niña 73/74 entre los meses Junio-Noviembre, lo que coincide con el periodo de mayor actividad de las Ondas Tropicales del Este. Por otra parte, las **Figuras 5 y 6** del espectro de Hilbert son comparables con los resultados obtenidos en el espectro en onditas para los años La Niña (73/74), El Niño (97/98) y Normal (84/85). Nótese que el espectro de Hilbert muestra focos de alta potencia finamente localizados en la señal, siendo este un resultado de la descomposición de la señal en funciones que provienen de las características intrínsecas a ella. Para los segundos años mas fuertes seleccionados se encontraron resultados comparables con los encontrados para los años más fuertes.

La **Tabla 2.** Muestra los períodos predominantes obtenidos a partir del proceso de descomposición en modos empíricos y de la Transformada de Hilbert-Huang. Se detectaron dos frecuencias predominantes las cuales suman un porcentaje de potencia mayor al 65%. La frecuencia principal tiene un porcentaje de potencia superior al 40%, la segunda frecuencia predominante tiene un porcentaje de potencia mayor al 20%. Estos resultados fueron encontrados para todos los años en las diferentes fases del ENSO analizadas.

Tabla 2. Periodos hallados en las FMI para los eventos El Niño/La Niña más fuertes y secundarias.

Periodos Predominantes Promedio (días)					
	La Niña (73/74)	Normal (84/85)	El Niño (97/98)	La Niña (88/89)	El Niño (82/83)
1	3.33	3.29	3.78	3.31	3.66
2	6.95	6.94	7.73	6.93	7.35
3	22.69	13.12	15.06	13.06	14.15
4	25.81	27.68	36.86	25.19	27.94
5	51.7	48.45	52.55	77.19	122.81
6	99.25	123.72	109.64	108.1	131.49
7	183.75	179.71	185.03	173.56	166.1

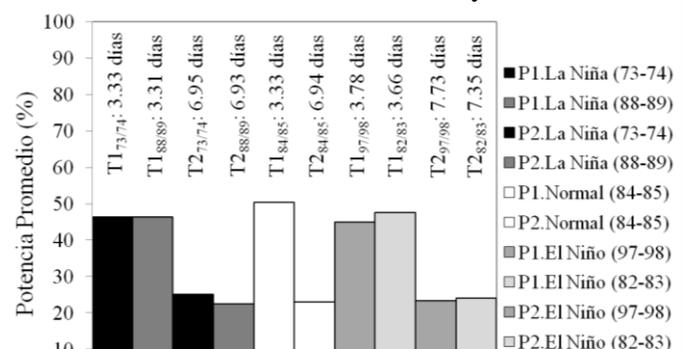


Figura 3. Potencia promedio de las frecuencias principales y periodos asociados.

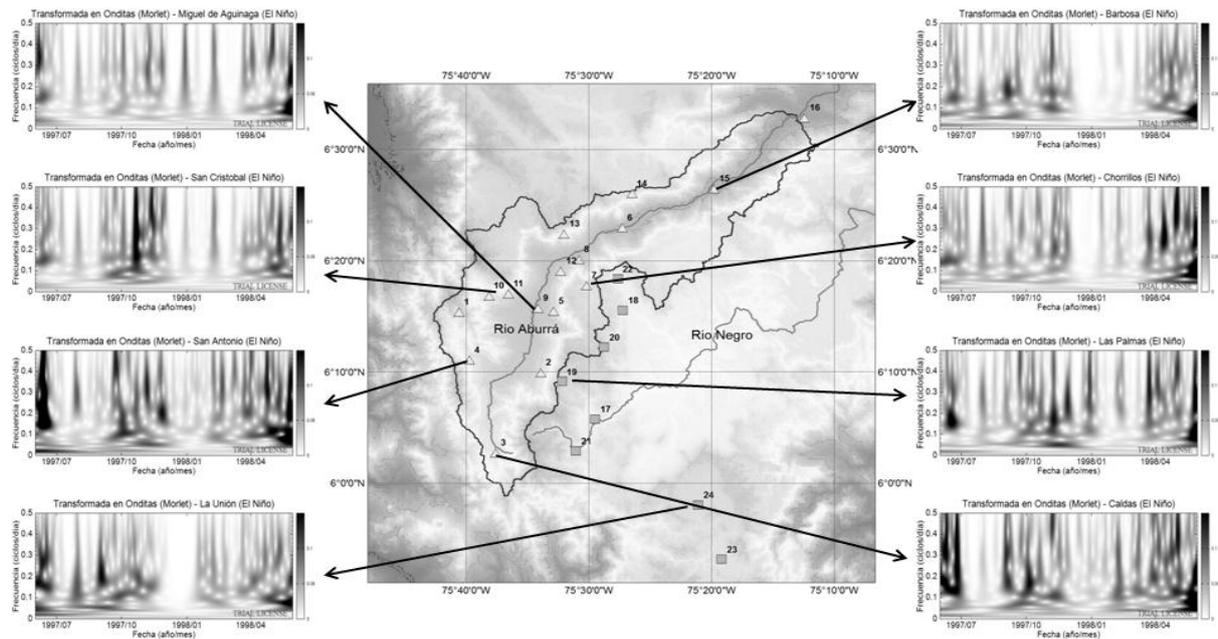


Figura 4. Espectro de potencias en onditas para diferentes estaciones de la zona de estudio para el año El Niño 97/98.

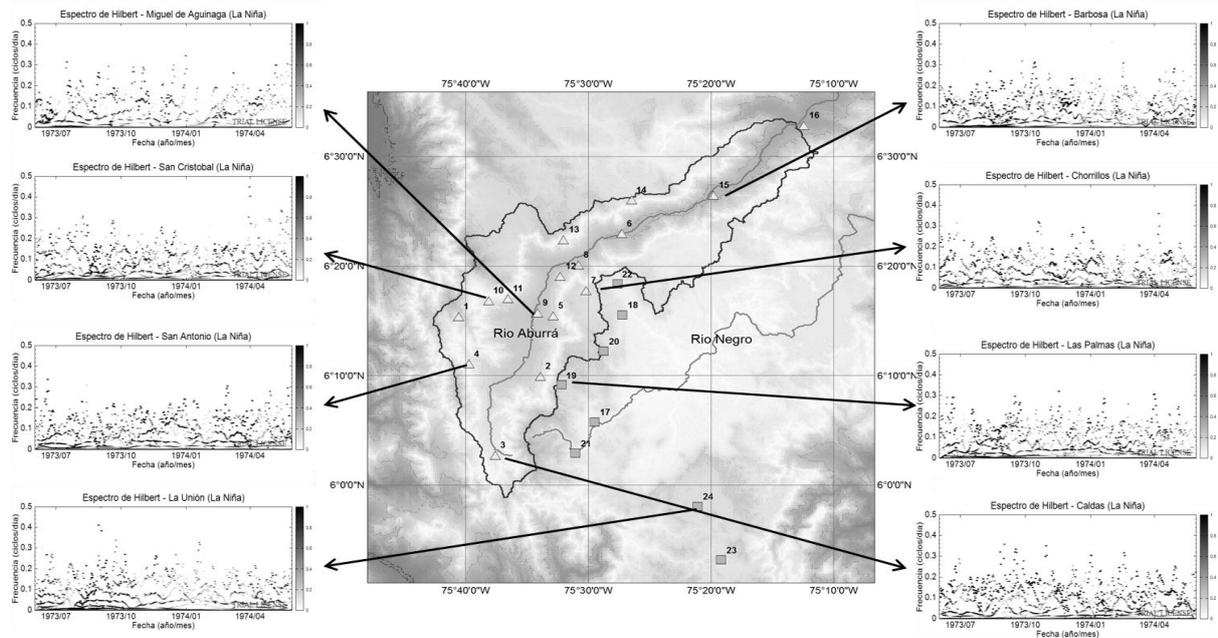


Figura 5. Espectro de Hilbert para diferentes estaciones de la zona de estudio durante el año La Niña 73/74.

Como se mencionó anteriormente las frecuencias 1 y 2 (periodos 1 y 2) son las que tienen un mayor porcentaje de potencia, contribuyendo en mayor medida a la explicación de la variabilidad de la señal. Sin embargo, se detectaron otras frecuencias de las cuales no se conoce una interpretación física clara por lo cual se necesita más investigación al respecto para determinar porque dichas frecuencias se presentan con un porcentaje significativo en la señal.

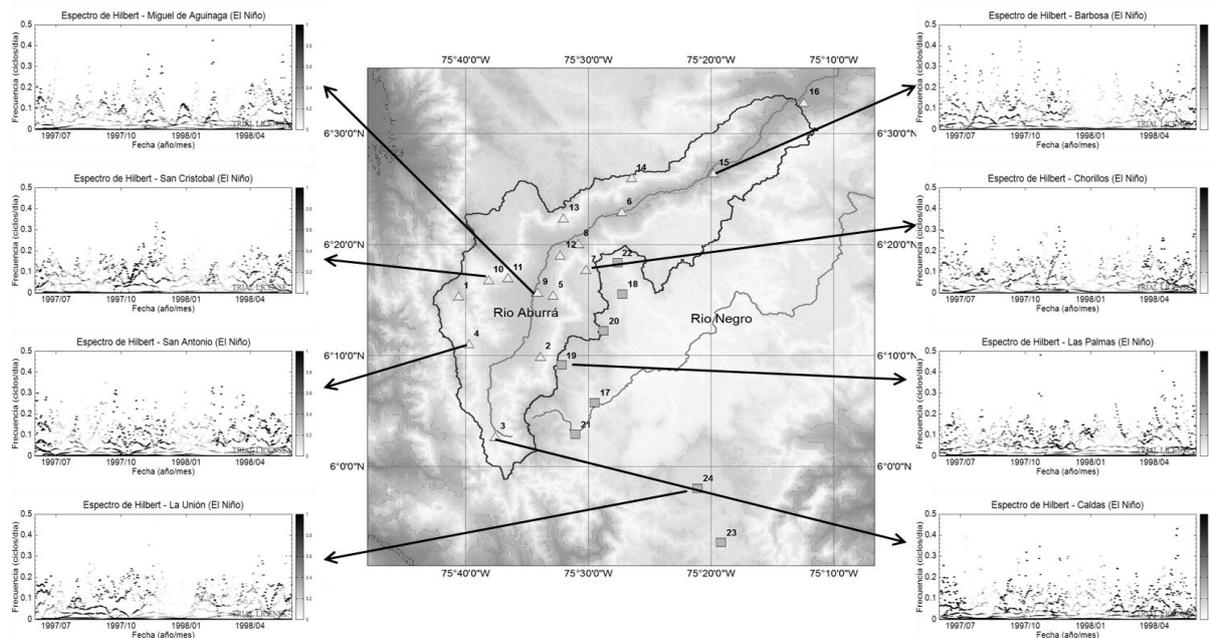


Figura 6. Espectro de Hilbert para diferentes estaciones de la zona de estudio para el año El Niño 97/98.

5. CONCLUSIONES

Las metodologías implementadas: Descomposición en Modos Empíricos, Transformada en Onditas y Transformada de Hilbert-Huang, permiten confirmar que en las series de precipitación diaria los principales modos de oscilación se pueden asociar con Ondas Tropicales del Este (periodo entre 3-7 días) y a la migración latitudinal de la Zona de convergencia intertropical (periodos de aproximadamente de 6 meses). Sin embargo, las frecuencias predominantes de mayor porcentaje de potencia halladas en las series de precipitación de resolución diaria pueden asociarse con las Ondas Tropicales del Este. La variabilidad del espectro en los meses de Junio-Noviembre durante los años La Niña y Normal son comparables, sin embargo, para los años El Niño se aprecia una disminución notoria en la potencia mostrada en el espectro para frecuencias asociadas a periodos entre 3 y 10 días. Los periodos asociados a las frecuencias predominantes que se pueden vincular a las OTE aumentan durante los años El Niño, esto coincide con los estudios de Poveda et al., (1997) en los cuales se habla de la reducción del número de Ondas del Este durante las fases extremas del ENSO. Los resultados obtenidos permiten establecer que los periodos son similares en condiciones Normal y La Niña pero aumentan durante El Niño. Esto ayuda a explicar porque la precipitación se reduce drásticamente durante la fase cálida del sistema ENSO.

El método de Descomposición en Modos Empíricos permite encontrar distintos modos de oscilación principales de frecuencias que no son fácilmente atribuibles a mecanismos físicos. Las razones que llevan a encontrar frecuencias predominantes similares en todas las estaciones merecen ser explicadas físicamente.

REFERENCIAS

- Arnault, J. & F. Roux** (2011) Characteristics of African easterly waves associated with tropical cyclogenesis in the Cape Verde Islands region in July–August–September of 2004–2008. *Atmospheric Research* 100 (2011) 61-82.
- Baines, P.G.** (2005) Long-term variations in winter rainfall of southwest Australia and the African monsoon. *Aust. Meteorol. Mag.*, 54, 91-102.
- Carmona, A. M.** (2010) Identificación de modos principales de variabilidad hidroclimática en Colombia y

la Cuenca Amazónica mediante la Transformada de Hilbert-Huang. *Tesis de Maestría en Ingeniería - Recursos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia.*

Chang, C. (1970) Westward propagating cloud patterns in the tropical Pacific as seen from time-composite satellite photographs, *Jour. Atmos. Sci.* 27:133-138.

Daubechies, I. (1992) Ten lectures on wavelet. *Series in applied mathematics*. Vol 61. 357p.

El-Askary, H., S. Sarkar, L. Chiu, M. Kafatos & T. El-Ghazawi (2004) Rain gauge derived precipitation variability over Virginia and its relation with El Niño Southern Oscillation, *Adv. Space Res.*, 33, 338-342.

Gray, W. M. & J.D. Sheaffer (1992) El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity. En: Glantz, M. y co-autores (eds.), *Teleconnections linking worldwide climate anomalies Cambridge University Press*, Cambridge, 257-284.

Hoyos, C.D. (1999) Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas de señales hidrológicas y sísmicas. *Trabajo dirigido de grado, Ingeniería civil. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

Hu, Z. Z. & Z. Wu (2004) The intensification and shift of the annual North Atlantic Oscillation in a global warming scenario simulation, *Tellus, Ser. A*, 56, 112-124.

Huang N.E., Wu Z. (2008). A Review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev. Geophys.* 46. RG2006. doi:10.1029/2007/RG000228.

Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long (1999) A new view of nonlinear water waves-The Hilbert spectrum, *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 31:417-457. doi:10.1146/annurev.fluid.31.1.417.

Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, y H. H. Liu (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 454, 903-993.

Huang, N.E., C. C. Chern, K. Huang, L.W. Salvino, S. R. Long, y K. L. Fan (2001) A new spectral representation of earthquake data: Hilbert spectral analysis of station TCU129, Chi-Chi, Taiwan, 21 September 1999, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91: 1310-1338, doi:10.1785/0120000735.

Lundquist, J. K. (2003) Intermittent and elliptical inertial oscillations in the atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.* 60, 2664-2673, doi: 10.1175/15200469(2003)060<2661:IAEIOI>2.0.CO;2.

Martinez, M.T. (1993) Principales sistemas sinópticos en Colombia y su influencia en el comportamiento del tiempo, *Atmósfera*, 16:1-10.

Mesa, O.J. Poveda, G. Carvajal, L.F. (1997) Introducción al clima de Colombia. *Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas.* PARH.

Molla, M. K. I., M. S. Rahman, A. Sumi & P. Banik (2006). Empirical mode decomposition analysis of climate changes with special reference to rainfall data, *Discrete Dyn. Nat. Soc.*, 2006, 45348, doi:10.1155/DDNS/2006/45348.

Osorio, J.D. (2005) Descomposición en modos empíricos y el espectro de Hilbert-Huang para el análisis de series de tiempo no lineales y no estacionarias. *Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

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

Rao, A. R. & Hsu, E.C (2008) Hilbert-Huang Transform analysis of hydrological and environmental time series. *Water Science and Technology Library*, vol. 60. springer.

Riehl, H. & J.S. Malkus (1958) On the heat balance in the equatorial trough zone. *Geophysica*, 6: 505-538.

Riehl, H. (1945) Waves in the easterlies and the polar front in the tropics, Dept, Meteor. *Univ. Chicago, Misc. Report*, No. 17.

Serra, Y. L. Kaladis, G.N. & Cronin, M.F (2008) Horizontal and Vertical structure of easterly waves in the Pacific ITCZ. *Journal Atmos Sci.* 65: 1266-1284. doi:10.1175/2007JAS2341.1

Serra, Y. L. Kaladis, G.N. & Hodges, K.I. (2010) Tracking and Mean Structure of Easterly Waves over the Intra-Americas Sea. *American Meteorological Society*. Vol. 23. 4823-4839.

Thorncroft, C. & Hodges, K. (2000) African Easterly waves variability and its relationship to Atlantic tropical cyclone activity. *Journal of climate*. Vol. 14. 1166-1179.

Toma, E. V. & Webster, P.J. (2009) Oscillations of the intertropical convergence zone and the genesis of easterly waves. Part I & II. diagnostics and theory. *Clim Dyn.* DOI 10.1007/s00382-009-0584-x

Torrence, C. & G. P. Compo (1998) A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Amer. Met. Soc.* 79 (1):61-78.