

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO EN COLOMBIA

Germán W. Guarín Giraldo, Germán Poveda*

RESUMEN

Guarín Giraldo G.W, Poveda G. Materiales poliméricos en nanomedicina: transporte y liberación controlada de fármacos. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **37** (142): 89-113, 2013. ISSN: 0370-3908.

Se estudia la variabilidad espacio-temporal del almacenamiento de agua en el suelo y la precipitación en el territorio Colombiano en el periodo agosto de 2002 - febrero de 2008, y su relación respecto al evento El Niño/Oscilación del Sur (ENSO). Para las estimaciones se usaron series de tiempo del espesor de agua equivalente (EWH) obtenido de la misión GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), así como de almacenamiento de agua en el suelo obtenido del Reanálisis Climático del NCEP/NCAR, y datos de precipitación de la misión TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). El territorio Colombiano se dividió en 5 grandes regiones climáticas: Caribe, Pacífica, Andina, Orinoquia y Amazonía. Se observó una respuesta inversa de la anomalía del EWH con las variaciones del ONI, uno de los índices que caracterizan el sistema ENSO. Los coeficientes de correlación entre el modelo de humedad y EWH fueron mayores a 0.6 para todas las regiones al evaluar las series simultáneamente, mientras que con la precipitación los mayores valores se encontraron con uno y dos meses de rezago.

Palabras Claves: GRACE, TRMM, Reanálisis NCEP/NCAR, Modelo Humedad de Suelo, Colombia, El Niño/Oscilación del Sur (ENSO).

ABSTRACT

The conjoint space-time dynamics of monthly soil water content and precipitation is studied, and their association with El Niño/Southern Oscillation (ENSO) is quantified for Colombia during the period spanning from August 2002 to February 2008. For estimation purposes, soil and groundwater data consists of equivalent water thickness (EWH) obtained from the *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), as well as soil moisture depth from the NCEP/NCAR Climate Reanalysis Project, and rainfall data from the *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Analyses are performed for the five major hydro-climatic and ecological regions of Colombia, namely Caribbean, Pacific, Andean, Orinoco and Amazonia. Results evidence an inverse

* gwguarin@unal.edu.co, gpoveda@unal.edu.co / Departamento de Geociencias y Medio Ambiente Universidad Nacional de Colombia, Medellín – COLOMBIA

relationship between EWH and the Oceanic Niño Index (ONI), one of the indices used to characterizing the ENSO system. Simultaneous correlation coefficients between EWH from the GRACE Mission and soil moisture data from the NCEP/NCAR Reanalysis are greater than 0.6 for all the Colombian regions, whereas 1 and 2 months- lagged correlation coefficients between precipitation and EWH and soil moisture evidence the delayed temporal response of groundwater and soil moisture with respect to rainfall in Colombia.

Key words: GRACE, TRMM, NCEP/NCAR Reanalysis, Soil Moisture, Colombia, El Niño/ Southern Oscillation (ENSO).

1. Introducción

El intercambio de agua entre el océano, la atmósfera y la corteza terrestre constituye el ciclo hidrológico. Se estima que aproximadamente el 95.7% del volumen total de agua en la tierra está almacenada en los océanos, mientras que el agua atmosférica representa cerca del 0.001%, el agua polar alrededor del 1.7% y el agua continental cerca del 2.7% (**Chow et al., 1994**), donde el volumen de cada depósito es correlativo con la escala de tiempo en la cual controla el clima en la tierra (**Poveda, 2004**). La superficie continental cubre el 30% de la superficie de la tierra y juega un papel fundamental en los balances de agua, energía y carbono del planeta, condicionando el clima y su variabilidad natural (**Peixoto and Oort, 1992; Hillel et al., 1998**) que actúa sobre la dinámica de la humedad del suelo como un forzador externo a través de complejos mecanismos no lineales retroalimentando sus fluctuaciones (**D'Orico et al., 2000; Poveda & Mesa, 1997**).

Entender la dinámica temporal y espacial de la humedad de suelo es crucial para el estudio de diferentes procesos hidrológicos: la partición de la precipitación en escorrentía, infiltración, percolación y evapotranspiración (**Ridolfi et al., 2003; D'Orico et al., 2000**), el intercambio de masa y energía entre el suelo y la atmósfera, las complejas relaciones entre la humedad del suelo y la vegetación (**Ridolfi et al., 2003; Poveda et al., 2002; Puma et al., 2005**), los procesos bioquímicos y ecológicos (**Poveda et al., 2002**), la partición entre los flujos de calor latente y calor sensible en la superficie de la tierra (**D'Orico et al., 2000**), el entendimiento y modelación de los procesos climáticos en distintas escalas de espacio y tiempo (**Hillel et al., 1998; Committee on Earth Gravity from Space et al., 1997**), la predicción del clima de largo plazo, la valoración del estado de las tierras agrícolas, los suministros de aguas subterráneas (**Committee on Earth Gravity from Space et al., 1997**) y la modelación ecohidrológica (**Puma et al., 2005**).

Los cambios en la humedad del suelo reflejan en mucho el comportamiento de la precipitación (**Poveda et al., 2002; Laio et al., 2002; Rueda, 2008**). A escala continental la

precipitación es dependiente de la humedad del suelo, jugando un papel importante en esta dinámica la retroalimentación regional, denominada precipitación reciclada (**Rodriguez-Iturbe et al., 1999**). La variabilidad de la lluvia tropical y la humedad del suelo a escalas anual e interanual son alta y rápidamente interdependientes (**Poveda & Mesa, 1997; Poveda et al., 2001; Poveda et al., 2006b**).

En la actualidad la información recolectada mediante sensores remotos y particularmente los acoplados a satélites o aviones permiten un mejor análisis de los procesos que ocurren en las diferentes capas de la tierra, permiten monitorear grandes superficies, de manera objetiva en un paso de tiempo periódico facilitando los análisis de variabilidad espacio – temporal (**Chuvieco, 2008**).

En este trabajo se analizaron las variaciones del contenido de humedad en el suelo sobre el territorio Colombiano, dividido en 5 grandes regiones climáticas: Caribe, Andina, Pacífica, Amazónica y Orinoquía (**Snow, 1976; Mesa et al., 1997**). Se usaron datos de los satélites GRACE y la misión TRMM, que representan campos de la variación del Espesor Equivalente de Agua (EWH) y la precipitación respectivamente, así mismo se usó la información de un modelo de humedad del suelo del NCEP/NCAR (**Kalnay et al., 1996**). Se determinó el rezago y el grado de asociación entre la precipitación, el EWH y la Humedad del Suelo durante años normales y El Niño ocurridas durante el periodo analizado.

2. Hidroclimatología de Colombia y sus regiones

En Colombia, el ciclo anual de la precipitación es principalmente regido por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (**Mesa et al., 1997; Poveda et al., 2001; Poveda, 2004**), la variabilidad espacial es introducida por la presencia de los Andes, las cuencas del río Amazonas y Orinoco, y por los límites con los océanos Atlántico y Pacífico y la interacción suelo-atmósfera (**Snow, 1976; Poveda, 2004; Poveda y Salazar, 2004; Poveda et al., 2000; 2001; 2007; Mesa et al., 1997**). A escala interanual, el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el principal modulador de la

hidrología Colombiana. Durante la ocurrencia del evento El Niño, se presentan anomalías negativas en la precipitación, en la humedad del suelo, en la actividad vegetal y en los caudales de los ríos. (Poveda & Mesa, 1993; Mesa *et al.*, 1997; Poveda, 2004; Poveda *et al.*, 2000; 2001; 2006a; 2010), la anomalía de la humedad del suelo es particularmente crítica en el trimestre DEF (Poveda *et al.*, 2001; 2010); mientras que durante La Niña las anomalías de la lluvia son positivas; para La Niña 1998-2000, Poveda *et al.*, (2001); (2002), encontraron que en la zona cafetera Colombiana, la humedad del suelo no refleja el ciclo bimodal anual normal y el suelo permanece cerca del estado de saturación.

2.1 Región Andina

El ciclo anual de la precipitación en la región Andina se caracteriza por dos estaciones secas y dos húmedas y es muy similar en toda la región, se presenta una disminución en las lluvias desde mediados de diciembre hasta mediados de marzo, donde inicia un periodo húmedo hasta principios de junio. El veranillo de junio a agosto separa las dos temporadas lluviosas, siendo la segunda, de septiembre a mediados de diciembre la más intensa (Snow, 1976; Mesa *et al.*, 1997; Poveda, 2004, Poveda *et al.*, 2002). Para Jaramillo (2005); Mesa *et al.* (1997), existen ciertas variaciones de la distribución de lluvias en la región, al norte en el departamento del Cesar el periodo seco de diciembre a marzo es más pronunciado y luego sigue el periodo lluvioso con una leve disminución en junio. En el centro del país el comportamiento general, y al sur se presenta una estación marcadamente seca de mediados de junio a mediados de septiembre y una estación lluviosa de octubre a junio. Existe una retroalimentación positiva entre los Andes y la cuenca Amazónica ya que los vientos alisios del sureste transportan gran cantidad de humedad que contribuye a la precipitación sobre el piedemonte Andino y este a su vez nutre los caudales de los ríos de la Amazonía (Poveda, 2004; Poveda *et al.*, 2006b).

Durante las fases extremas del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) Poveda *et al.*, (2002), usando un modelo estocástico para representar la evolución de la función de distribución de probabilidades de la humedad del suelo en la región Andina, encuentran que durante El Niño la probabilidad que el suelo presente saturación es mucho más baja que durante los años normales; estos resultados son consistentes con las mediciones de humedad de suelo en la región cafetera Colombiana (Poveda *et al.*, 2000; 2001; 2002). Jaramillo (2005), indica que durante El Niño en la zona cafetera se presenta una reducción del 20% en la precipitación anual, con anomalías altamente sensibles a la localización geográfica sobre las cordilleras.

2.2 Región Amazónica

Snow (1976) reportado por Mesa *et al.* (1997) indica que la región Amazónica es de topografía plana, con elevaciones menores a 300 msnm y la vegetación corresponde a selva tropical húmeda. Esta región drena al río Amazonas. La precipitación es alta durante todo el año, por encima de 200 mm/mes en los meses más secos. El promedio de precipitación anual es de 3500 mm; Mesa *et al.* (1997), indican que la región presenta “*dos máximos correspondientes con el paso de la ZCIT y la distribución de la radiación solar en el año*”. Para Snow (1976) la zona presenta un pico húmedo fuerte hacia los meses de marzo, abril, mayo y junio. Esto concuerda con lo reportado por Jaramillo y Chaves (2000); Jaramillo (2005); Poveda *et al.* (2006a), quienes indican que la región presenta un régimen unimodal, con una estación húmeda entre diciembre y abril y una estación seca entre Junio y Octubre. Poveda *et al.* (2006a) indican que el clima de la Amazonía es fuertemente afectado por la presencia de los Andes como barrera física y por la interacción suelo-atmósfera. Sobre el Amazonas, la precipitación exhibe un régimen unimodal en el ciclo anual.

Respecto al ENSO, Poveda & Mesa (1997), mediante el cálculo del coeficiente de correlación entre diferentes variables climáticas, caudales de ríos y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), que cuantifica la dinámica del fenómeno ENSO, encontraron que la influencia del SOI sobre los caudales mensuales se hace más débil y más retardada a medida que las estaciones quedan ubicadas más al oriente de Colombia. El mismo resultado se demuestra para las lluvias mensuales en Poveda *et al.* (2001; 2010)

2.3 Región Oriental

Esta región presenta un régimen unimodal de lluvias durante el año, la temporada lluviosa ocurre de abril a noviembre, con un máximo en el mes de junio (Snow, 1976; Jaramillo y Chaves, 2000; Jaramillo, 2005; Mesa *et al.*, 1997). “*El clima es básicamente continental y sugiere la existencia de un monzón, con la selva jugando el papel del mar*” (Mesa *et al.*, 1997). Presenta un relieve plano con alturas menores a los 250 msnm; La vegetación consiste predominantemente de pastos con árboles cerca de las corrientes hídricas y selva pluvial al sur; La precipitación anual media para la zona es de 2800 mm (Mesa *et al.*, 1997).

2.4 Región Pacífica

La región Pacífica está limitada y conformada por la Cordillera Occidental, los valles del Atrato y San Juan, la serranía del Baudó y la llanura costera. La vegetación es selva tropical súper – húmeda y en algunas zonas predomina

la vegetación de pantano (Mesa *et al.*, 1997; Rangel y Lowy, 1993). La costa Pacífica Colombiana es una de las regiones más lluviosas del planeta (Eslava, 1994; Jaramillo y Chaves, 2000; Jaramillo, 2005; Poveda y Mesa, 2000; Mesa *et al.*, 1997), con valores entre 8.000 y 12.000 mm de precipitación promedia anual. La precipitación muestra valores muy altos para todos los meses, por encima de 350 mm/mes. El número de días con lluvia al año está por encima de 200, inclusive cerca de la costa puede estar por encima de 300 días.

2.5 Región Caribe

Se caracteriza por tierras bajas y planas. La vegetación en su gran mayoría corresponde a sabana tropical, existen Ciénagas hacia Santa Marta con vegetación deltaica (mangle) en la Ciénaga Grande de Santa Marta y desierto en la Guajira. La precipitación media es del orden de 1500 mm por año, distribuida principalmente en los meses de mayo a octubre, con dos máximos separados en mayo junio y septiembre – octubre, la zona de mayor precipitación ocurre en la cara occidental de la Sierra Nevada mientras que el extremo seco ocurre en la alta Guajira con precipitaciones anuales menores a 300 mm (Mesa *et al.*, 1997). Dentro del ciclo anual el periodo seco de mayor intensidad ocurre entre Diciembre y Marzo (Jaramillo y Chaves, 2000; Mesa *et al.*, 1997).

3. Datos y metodología

3.1 Misión GRACE

Una manera de estimar los cambios en el almacenamiento continental de agua se logra mediante la cuantificación del campo gravitacional. Como la gravedad depende directamente de la masa, las variaciones en la masa de los depósitos de agua tienen un impacto directo sobre la gravedad (Wahr 1996; Committee on Earth Gravity from Space *et al.*, 1997; Hofmann *et al.*, 2006; Xion *et al.*, 2001.)

Las medidas espaciales de las anomalías temporales de la gravedad permiten cuantificar las variaciones en el almacenamiento de los componentes continentales del ciclo hidrológico. La gravimetría satelital no puede, por si misma, discriminar entre los cambios en el agua superficial, en el suelo o en el agua subterránea. El método suministra cambios de la columna total de agua, integrada desde la superficie de la tierra hasta el agua subterránea. Dependiendo de la región, esa señal puede ser dominada por alguno de los tres depósitos (Committee on Earth Gravity from Space *et al.*, 1997).

La misión satelital GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), realiza desde marzo de 2002, mediciones de los cambios espaciales y temporales del campo gravitacional

terrestre (Tapley *et al.*, 2004a), con resolución espacial de cerca de 400 a 500 km (longitud de onda media) y resolución temporal de un mes o menos (Seitz *et al.*, 2008). El GRACE está conformado por dos satélites idénticos con orbitas casi circulares aproximadamente a 500 km de altitud y 89.5° de inclinación respecto al Ecuador, separados entre sí 220 km en la misma orbita; están interconectados por un sistema de microondas altamente preciso para determinar la separación entre los dos satélites, que es función del campo gravitacional que los afecta (Tapley *et al.*, 2004b; Thomas, 1999). Los cambios observados en el campo gravitacional son comúnmente expresados en variaciones de altura equivalente de agua (EWH, por sus iniciales en inglés) (Chambers, 2007). EWH es una representación idealizada de las variaciones del almacenamiento de agua; es decir, es la medida del espesor de un estrato de agua que es necesario adicionar o remover de la superficie de la tierra si la fluctuación total del campo gravitacional es debido a un cambio en el almacenamiento de agua (Seitz *et al.*, 2008).

Los datos de la misión GRACE han sido de utilidad en diversas áreas que incluyen almacenamiento continental de agua (Tapley *et al.*, 2004a; Ramillien *et al.*, 2007; Schmidt *et al.*, 2006) almacenamiento de agua subterránea (Rodell and Famiglietti, 2002; Huang, 2007), el campo gravitacional (Hinderer *et al.*, 2005), el nivel del océano (Chambers, 2006a; Chambers, 2006b), balance de hielo polar (Chen *et al.*, 2008; Sasgen *et al.*, 2007; Llubes *et al.*, 2007), y balances hidrológicos en grandes cuencas (Han *et al.*, 2010; Ramillien *et al.*, 2007; Seitz *et al.*, 2008; Xavier *et al.*, 2010), entre otras aplicaciones.

El presente trabajo usó información del Release 04 de la misión GRACE de los dos centros de procesamiento: el CRS (Center for Space Research) y GFZ (GeoForschungsZentrum), así como del centro de validación JPL (Jet Propulsion Laboratory) de la NASA. Las series dadas por los tres centros son archivos de texto representando grillas de 1° X 1°, a escala mensual. Los datos están disponibles con suavizamiento Gaussiano de 300 y 500 km, y sin suavizamiento (0 km). Para el presente estudio usamos los datos con suavizamiento Gaussiano de 300 km del periodo comprendido entre Agosto de 2002 y Agosto de 2007, aunque no existen datos para junio de 2003 y enero de 2004. La información está disponible en <http://grace.jpl.nasa.gov>.

Los datos procedentes de los dos centros de procesamiento y el centro de validación se correlacionaron entre sí para verificar la validez de los datos, ya que la franja ecuatorial, lugar donde se encuentra la zona de estudio, corresponde con la zona de menor cubrimiento espacial de los satélites y por tanto donde los errores en la estimación de EWH son mayores (Llubes *et al.*, 2007). Finalmente, al verificar la

consistencia de las series procesadas por los tres centros, se decidió trabajar con la serie del CRS (Center for Space Research), ya que los registros poseen una mayor longitud y menor número de datos faltantes.

La serie del Espesor Equivalente de Agua (EWH) se representa como una anomalía respecto a la media calculada en el periodo enero de 2006 – diciembre de 2007.

3.2 Misión TRMM

La Misión de Medición de la Lluvia Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Misión, TRMM*) es una conjunción de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA), diseñada para monitorear y estudiar la dinámica espacial y temporal de la precipitación tropical y subtropical del planeta (NASA, 2007).

Los datos usados de la Misión TRMM correspondieron a una grilla con resolución espacial de de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, a la que corresponden series de tiempo de precipitación a escala mensual para el periodo comprendido entre enero de 2002 y diciembre de 2006.

3.3 Estimaciones de la Humedad del Suelo

Los registros de humedad en el suelo han sido tomados del Reanálisis Climático del NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996), los cuales son calculados usando un modelo hidrológico de un solo estrato. El modelo usa como datos de entrada la precipitación y la temperatura y calcula la humedad del suelo, la evaporación, las pérdidas subterráneas y la escorrentía. Los parámetros del modelo son constantes espacialmente, usa un suelo con una capacidad de almacenamiento de lámina de agua de 760 mm. Tal como lo muestran (Huang *et al.*, 1996; Fan & van den Dool, 2004) el modelo parte de un balance de agua en un volumen de control consistente en un estrato de suelo de 2 m de espesor, cuyo límite superior es la atmósfera y cuyo límite inferior es el acuífero subyacente, y donde el agua que se pierde por percolación recarga el acuífero. Así el balance de agua es representado mediante,

$$\frac{dW}{dt} = P(t) - R(t) - G(t) \quad (1)$$

en donde $W(t)$ representa el contenido de humedad en el suelo en el tiempo t , $P(t)$ es la precipitación promedia sobre una cierta área, A , $E(t)$ representa la evapotranspiración real promedia sobre esa misma área, $R(t)$ es el flujo neto de escorrentía que diverge del área A , y $G(T)$ representa las pérdidas netas por percolación desde tal área.

La escorrentía se compone de escorrentía superficial y escorrentía subsuperficial, y es calculada en función de la máxima capacidad de almacenamiento del suelo y de la lámina de agua presente en un momento dado.

La evapotranspiración es función de la evaporación potencial y de la proporción entre la máxima lámina de agua y la lámina real. La evaporación potencial se calcula usando el método de Thornwaite a partir de datos de temperatura de aire.

La serie de tiempo usada se encuentra disponible en <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.cpcsoil.html>. La resolución espacial de los datos es de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, con una resolución temporal mensual para el periodo comprendido entre Agosto de 2002 y agosto de 2008.

Con el fin de realizar los análisis comparativos entre el modelo y la misión GRACE, para cada píxel se calculó el promedio de la lámina almacenada (expresada en cm) para el periodo comprendido entre enero de 2003 y diciembre de 2006, luego se calculó la anomalía respecto a esta media para cada mes y píxel de la serie de datos. La nueva serie de anomalías creada, permite una mejor comparación y análisis con los datos de la misión GRACE.

3.4 Métodos

El presente trabajo tuvo por objeto analizar los datos de EWH de la misión GRACE (versión 0004), en conjunción con los del modelo de humedad del Reanálisis NCEP/NCAR y del satélite TRMM para el periodo comprendido entre agosto de 2002 y agosto de 2007, en la región incluida entre -4.5° Latitud Sur, 66.5° Longitud Oeste y 12.5° Latitud Norte, 79.5° Longitud Oeste. Con dicha información se determinó la variabilidad espacial y temporal del EWH, la humedad de suelo y la precipitación, en años normales y durante la ocurrencia de El Niño.

Con el propósito de efectuar los análisis propuestos, el territorio de Colombia se dividió en 5 zonas climáticas, siguiendo la clasificación dada por Snow (1976): Caribe, Andina, Pacífica, Amazónica y Oriental. La Figura 1 muestra las zonificación empleada. Se calculó el ciclo anual de EWH, la humedad del suelo y la precipitación para cada región. Se analizó el comportamiento del ciclo anual promedio, y el presentado durante las fases de El Niño/Oscilación Sur (ENSO) con el fin de observar la influencia de dicho fenómeno en los ciclos de precipitación y humedad de suelo para cada una de las regiones estudiadas.

Para la región Amazónica, adicionalmente se analizaron las series de tiempo de EWH de la misión GRACE y

precipitación de la misión TRMM correspondiente al año 2005 con el fin de verificar la magnitud de la conocida sequía ocurrida en la Amazonía durante ese año.

Se estimaron los coeficientes de correlación con rezagos entre 0 y 3 meses entre las series de la misión GRACE y del Reanálisis NCEP/NCAR. Así mismo, se calculó el coeficiente de correlación entre los datos de precipitación de la misión TRMM, con los datos de EWH de la misión GRACE y de humedad del suelo del Reanálisis NCEP/NCAR con el propósito de estimar el tiempo de respuesta de la humedad de suelo a la precipitación.

Se analizó el grado de asociación entre la serie de tiempo del ONI (Índice Oceánico de El Niño), el MEI (Índice Multivariado del ENSO) y el EWH, los datos del Reanálisis y la Precipitación del satélite TRMM. El periodo de análisis incluye la ocurrencia del evento El Niño en tres ocasiones: Abril 2002 - Abril 2003, Junio 2004 a Marzo 2005, y Julio 2006 a Febrero 2007. Los datos de los índices ONI y MEI se obtuvieron de la NOAA y están disponibles en <http://www.cdc.noaa.gov/data/climateindices/list/>

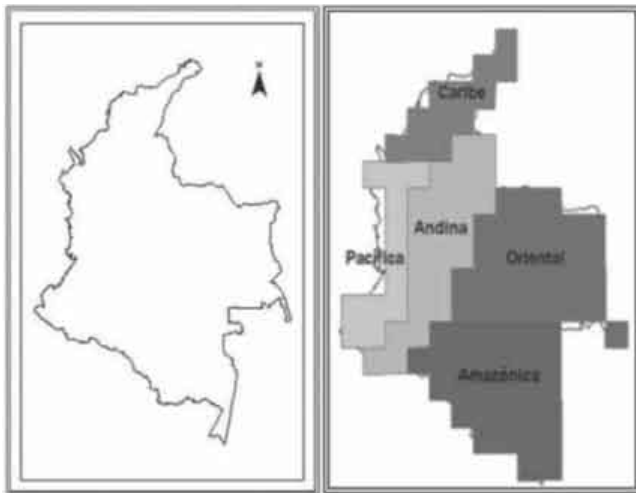


Figura 1. Definición de las cinco regiones de Colombia usadas en este trabajo.

4. Análisis de resultados

4.1 Información de Espesor Equivalente de Agua (EWH)

En la Tabla 1 se presentan los estimativos del coeficiente de correlación lineal entre los registros mensuales de EWH de los diferentes centros de medición. Los altos valores del coeficiente de correlación muestran la consistencia en los procedimientos y resultados de las series procesadas. Es importante resaltar el hecho que el valor del coeficiente

aumenta a medida que la región analizada se encuentra más alejada del océano; obsérvese que los coeficientes de correlación son mayores para las regiones Andina, Amazónica y Oriental, mientras que las regiones Caribe y Pacífica muestran los menores coeficientes: esta situación puede estar explicada por la cobertura de las grillas en las zonas de transición entre las dos superficies (océano – tierra), los algoritmos empleados por cada centro, el hecho que las señales provenientes del océano son mucho más pequeñas que las provenientes de la tierra, que la zona de estudio se encuentra en las zona de mayor error de medición o que son regiones con mayor variabilidad en las masas de humedad (Tapley *et al.* 2005; Wahr *et al.* 2006)

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre las series mensuales de registros de EWH de los centros de medición Center for Space Research (CRS), GeoForschungsZentrum (GFZ), y Jet Propulsión Laboratory (JPL).

| Región | Coeficiente de correlación | | |
|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
| | CRS - GFZ | CRS - JPL | GFZ - JPL |
| Andina | 0.86 | 0.94 | 0.75 |
| Amazónica | 0.87 | 0.95 | 0.91 |
| Oriental | 0.96 | 0.99 | 0.96 |
| Pacífica | 0.81 | 0.68 | 0.84 |
| Caribe | 0.74 | 0.72 | 0.95 |

4.2 Región Andina

El ciclo anual de la precipitación (Figura 2) representada por el TRMM es el típico de la región Andina (Snow, 1976; Mesa *et al.*, 1997), se observan claramente los picos y valles característicos del ciclo anual. En la misma figura se representan los ciclos anuales de las anomalías de EWH y la humedad de suelo para la región; obsérvese que existe relación entre los comportamientos de las distintas series, se identifica un desfase temporal en picos y valles de aproximadamente 1 a 2 meses entre los ciclos del EWH y humedad del suelo respecto al de la precipitación con atenuación en sus extremos (menor variabilidad), seguramente por los mecanismos que permiten regular el almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo. Se advierte que los valores de la humedad del suelo extraídos del modelo de Reanálisis NCEP/NCAR tienen una menor amplitud que los valores estimados por la misión GRACE; esto puede explicarse porque la misión GRACE mide además de la variación en la humedad de suelo, las variaciones del agua superficial y subterránea (Schmidt *et al.*, 2006), por lo tanto, se interpreta que además de la humedad del suelo, durante las épocas secas existe disminución del volumen

almacenado en los acuíferos, biomasa y en las fuentes de agua superficial, esta situación es severa en el primer trimestre del año, particularmente en los meses de febrero y marzo donde se tienen las mayores anomalías negativas en el valor del EWH; estos resultados están en la misma dirección de lo expresado por **Poveda, (2002); Mesa et al. (1997); Poveda et al., (2006a)**. En épocas de lluvias existe

un aumento en el volumen almacenado en los tres reservorios (agua subterránea, humedad de suelo y agua superficial), se percibe que en el tercer y cuarto trimestre del año calendario las anomalías de la precipitación ocurridas en el verano de mediados de año causan una menor variación en las anomalías del EWH y la humedad del suelo.

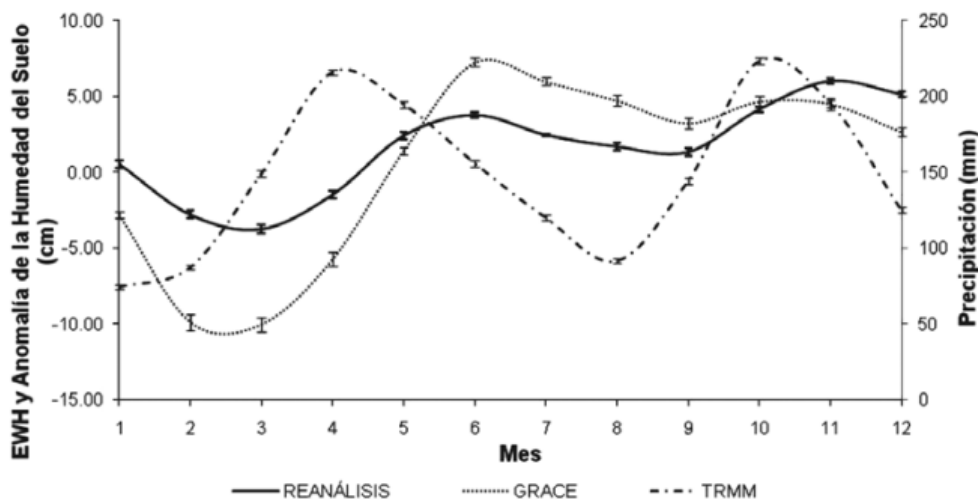


Figura 2. Ciclo anual de los valores promedio de precipitación, (TRMM), EWH (GRACE), y humedad del suelo (Reanálisis) para la región Andina. Las barras denotan el error estándar de estimación de la media.

En la figura 3 se grafican las series mensuales de las anomalías del EWH y el ONI. El ONI (Oceanic Niño Index) es un índice oceánico de la ocurrencia del ENSO, 5 valores consecutivos mayores a 0.5 indican la presencia de El Niño, 5 valores consecutivos menores a -0.5 indican la ocurrencia de La Niña. Según este índice se presentaron 3 eventos EL Niño en el periodo de estudio. Se observa un comportamiento inverso entre los valores de EWH y los valores del ONI, una anomalía negativa en el ONI implica una anomalía positiva en el EWH y viceversa, estos resultados confirman lo reportado por **Mesa et al. (1997); Poveda et al., (2001); Poveda et al., (2006a)**, quienes indican que durante El Niño se presentan anomalías negativas en la precipitación y menores niveles de los ríos para la región Andina. Se observa un rezago de aproximadamente 4 meses entre las dos series (véase sección 5.2), una anomalía positiva del ONI implica una reducción en la precipitación que posteriormente afectará el EWH y la humedad del suelo, este resultado puede ser de utilidad en el estudio de la dinámica de los ecosistemas a grandes escalas espaciales, en estimaciones de productividad

primaria en bosques y cultivos, flujos de calor latente, estimaciones de captura de CO₂, entre otros.

En la Figura 4 se presentan simultáneamente las series de precipitación (TRMM) humedad del suelo y de EWH. En promedio en la región caen alrededor de 1776 mm de lluvia anual, magnitud similar al valor promedio reportado por **Snow, (1976)**. Se observa que la precipitación antecede con un comportamiento similar, en uno o dos meses el de ambas series: humedad de suelo y EWH. Esta percepción se confirma en la sección 5.1 en la cual se realiza un análisis de asociación lineal entre las series y soporta los resultados obtenidos por **Poveda et al., (2001); (2010)**, aunque el tiempo de respuesta de EWH y humedad de suelo obtenido ante la precipitación precedente es mayor en el presente trabajo (1 – 2 meses contra 10 días), seguramente por las diferencias en las escalas espaciales y temporales y en las profundidades de los estratos considerados en cada estudio que claramente condicionan las magnitudes de los cambios de humedad considerados.

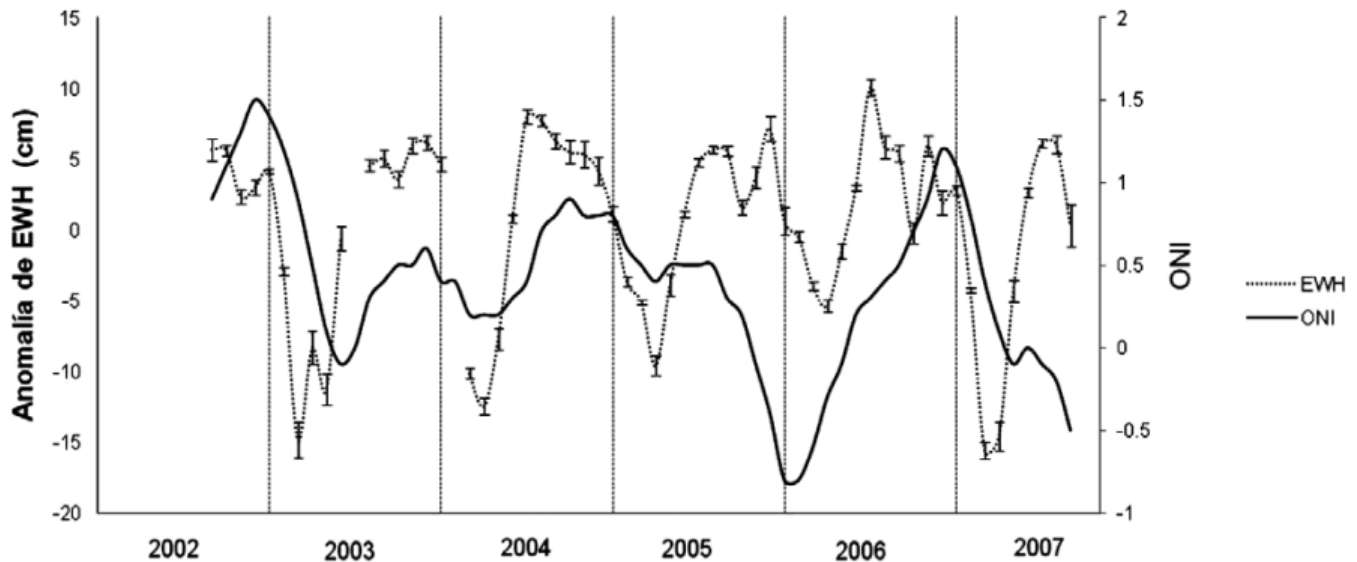


Figura 3. Evolución temporal de los registros del ONI y el Espesor Equivalente de Agua (EWH) para la región Andina.

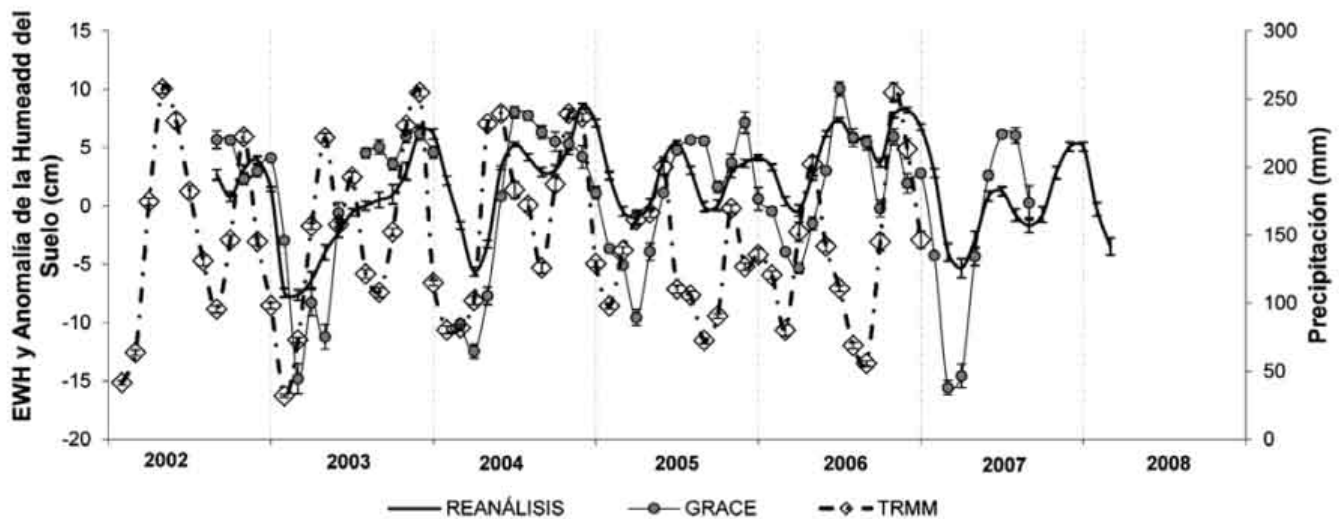


Figura 4. Evolución de las series mensuales de precipitación promedio (TRMM) y de las anomalías estandarizadas de las series de humedad de suelo (Reanálisis NCEP/NCAR) y EWH (GRACE), para la región Andina.

La precipitación (TRMM) y el EWH de los años El Niño ocurridos en el periodo de análisis, se graficaron respecto a los ciclos anuales. Las mayores anomalías positivas del ONI (>0.5) se registraron en El Niño 2002–2003 durante 10 meses consecutivos, mientras que las menores se registraron

para El Niño 2004–2005 por un periodo de 8 meses. Existe una disminución en los valores mensuales de ambas láminas de agua, en particular durante los meses de noviembre (año 0) a febrero (año +1) de El Niño-2002-03 y los meses de junio a agosto (año 0) de El Niño 2006-07; no se perciben

disminuciones marcadas en la precipitación durante El Niño 2004-05. La disminución en EWH ocurre de manera similar a la precipitación pero con aproximadamente dos meses de rezago, por lo tanto, para esta variable los efectos son más notorios en los meses de febrero y marzo (año+1) de los eventos El Niño de 2002 y 2006; Este comportamiento ilustra lo reportado por **Poveda**, (1998); (2004); (2010), donde se observa que El Niño tiene sus propias particularidades e impactos diferentes; y que El Niño en la región ocasiona anomalías negativas de la precipitación, caudales y humedad del suelo (**Mesa et al.** 1997; **Poveda et al.** 2001; 2006a). La disminución del EWH corresponde a una disminución de la precipitación, que a la vez afecta la evapotranspiración real, el reciclaje del agua y finalmente la disminución del agua almacenada en el suelo y subsuelo (**Poveda et al.** 2001; 2006a).

En la región se encontraron anomalías máximas de EWH en un rango de 36.6 cm, con un máximo positivo de 13.7 cm/mes y una anomalía negativa mínima de -22.9 cm/mes. Si consideramos que el volumen de agua que ingresa a la región drena por los mismos ríos fuera de ella en el intervalo de tiempo considerado, se estima que en promedio cada año existe un movimiento del agua en el suelo (acuífero, agua superficial, humedad del suelo, agua en la biomasa), de alrededor de 44.8 cm de EWH, que para la extensión de la región (1° = 111.12 km) equivale a un volumen de agua de 127.23 km³/anuales. Es importante resaltar que en el presente estudio las variaciones se estiman mes a mes y por lo tanto las variaciones de masa que ocurren a escala inferior al mes no son consideradas.

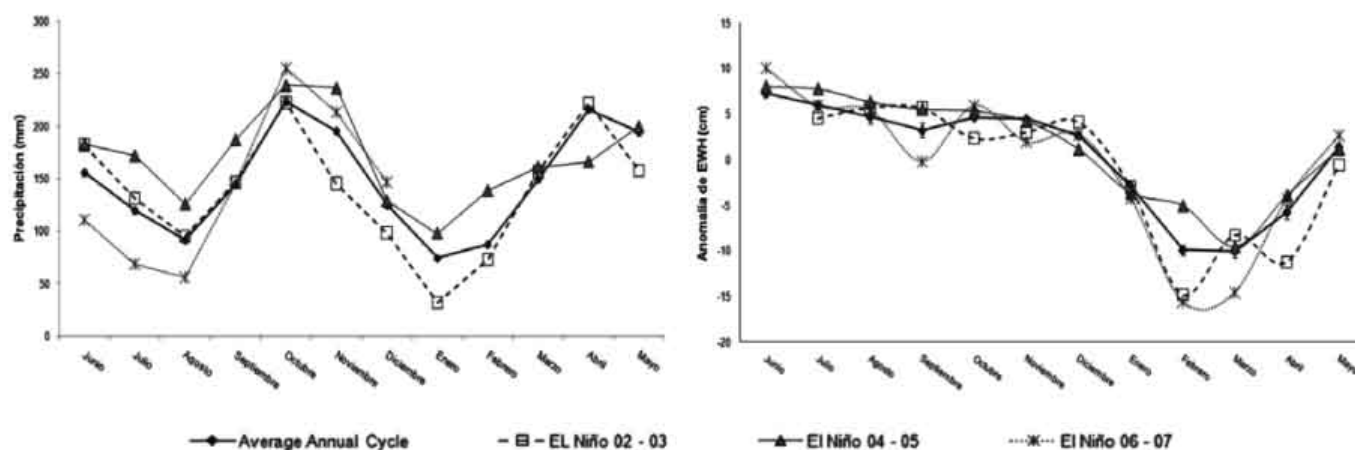


Figura 5. Ciclo anual de la precipitación (izquierda) y EWH (derecha) según las misiones TRMM y GRACE respectivamente, para la región Andina y su comportamiento durante eventos históricos de El Niño. Nótese que el ciclo anual hidrológico está definido de Junio (año 0) a Mayo (año +1).

4.3 Región Amazónica

Las series de EWH y de humedad de suelo que se presentan en la Figura 6 muestran claramente un régimen unimodal con un periodo húmedo acentuado en los meses de junio y julio y una disminución desde agosto a febrero, comportamiento que corresponde a lo reportado por **Snow** (1976); **Jaramillo y Chaves** (2000); **Jaramillo** (2005) y **Poveda et al.** (2006a). La precipitación promedio anual se estima en 3250 mm/año similar a lo reportado por **Snow**, (1976), con un ciclo bimodal tal como lo indican **Mesa et al.** (1997) y **Marengo**,

(2004) para la norte de la Amazonia, aunque no reportan un segundo periodo húmedo del año (Octubre – Noviembre) con un pico tan marcado. Esta situación refleja una discrepancia en el comportamiento y correspondencia de las series ya que no se percibe el pico de finales de año de la precipitación en las series de EWH y humedad de suelo. La diferencia entre los ciclos puede ser explicada por la capacidad de regulación del suelo o por la corta longitud de la series de tiempo; sin embargo es extraño que un pico de precipitación de la magnitud estimada no sea reflejado en el EWH y en la humedad del suelo.

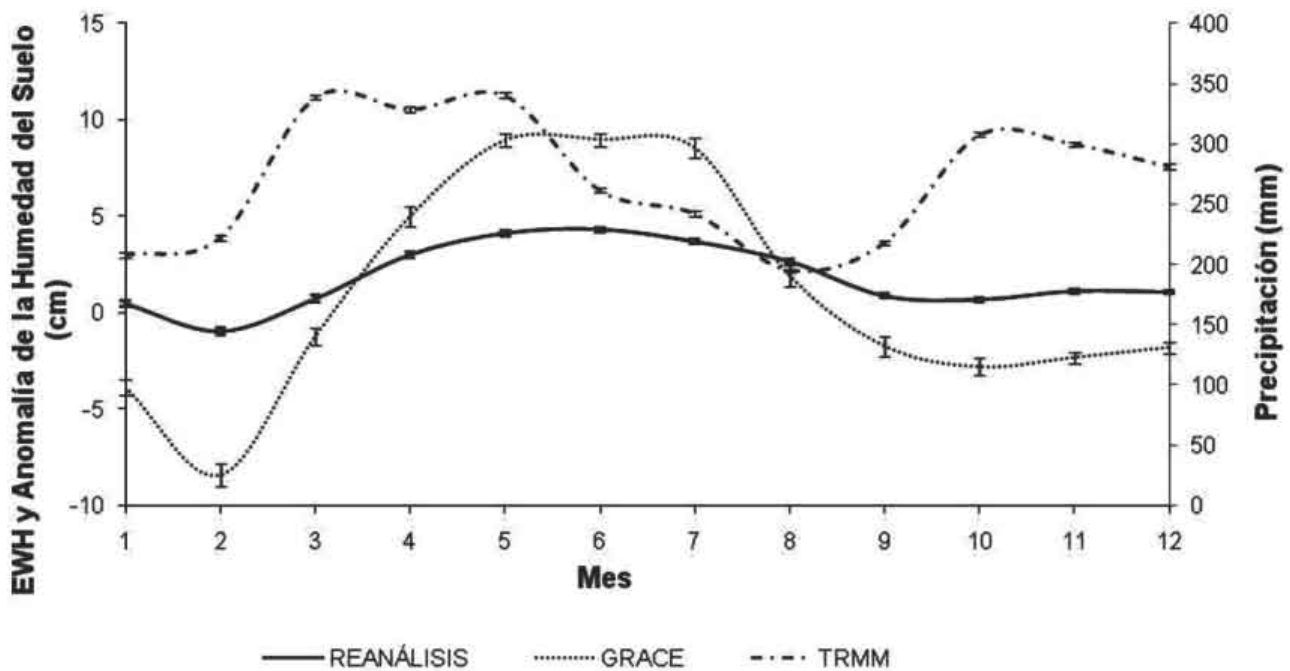


Figura 6. Ciclo anual de precipitación, EWH y humedad de suelo para la región Amazónica. Las barras denotan el error estándar de estimación de la media.

En la Figura 7 se observa el comportamiento del EWH respecto al Índice Oceánico del ENSO (ONI). Se percibe un comportamiento inverso entre las dos series: anomalías negativas del ONI implican con cierto rezago anomalías positivas del EWH y viceversa; se estima que el rezago es del orden de 2 a 3 meses (ver sección 5.2) un poco menor

al hallado para la región Andina. Este comportamiento refleja lo hallado por **Marengo, (2004)** y **Schöngart y Junk, (2007)**, quienes encontraron afectación de los parámetros hidrometeorológicos con la ocurrencia del ENSO principalmente sobre el norte de la Cuenca Amazónica.

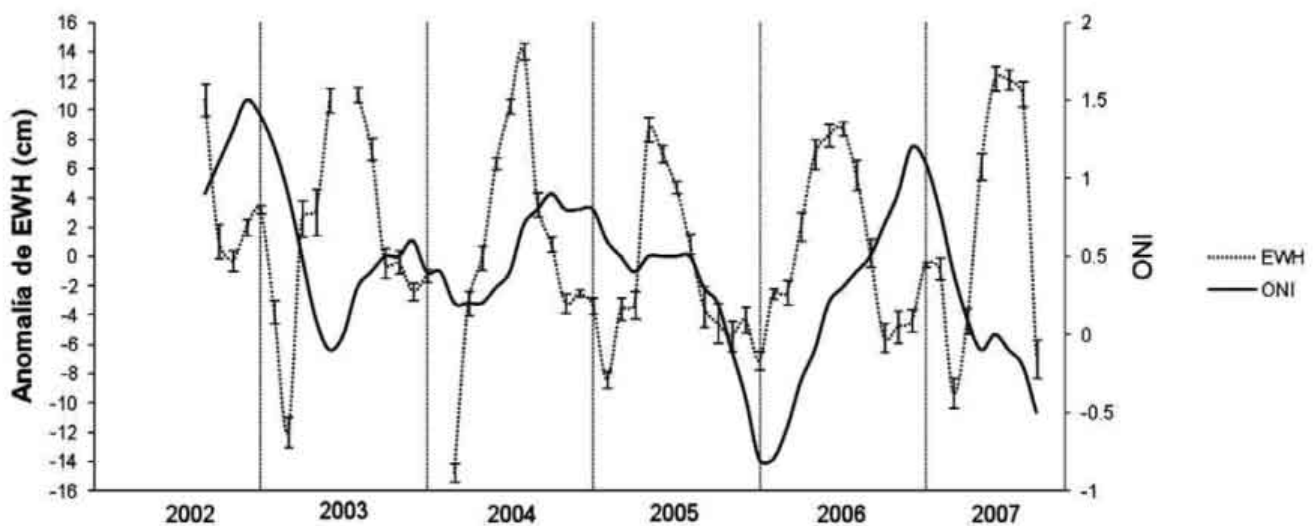


Figura 7. Evolución temporal de los registros del ONI y el Espesor Equivalente de Agua (EWH) para la región Amazónica.

En la Figura 8 se muestran la evolución de las series de tiempo de precipitación (TRMM), EWH (GRACE) y humedad de suelo. Se encontró que el EWH responde a las variaciones de precipitación con aproximadamente 2 meses de rezago (sección 5.1). Comportamiento similar reporta **Xavier, et al.** (2010) para la cuenca del río Amazonas con 3 meses de rezago entre la lluvia y los caudales pico. Las variaciones en el EWH y humedad de suelo para esta zona son mayores que en la región Andina, se hallaron anomalías de EWH en un rango de 47.13 cm, con un máximo positivo de 22.53 cm/mes y una anomalía negativa mínima de -24.6 cm/mes. Bajo las mismas condiciones planteadas para la región Andina, se estima que el intercambio del agua con el suelo para la región amazónica es de 175.33 km³/año.

Similar comportamiento a la región Andina presentan las series de tiempo para la Amazonia Colombiana, sin embargo, es claro que la amplitud de la serie de EWH respecto a la

humedad del suelo para anomalías positivas es mucho mayor para la región Amazónica, posiblemente explicadas por la topografía y la distancia al océano, ya que esta región drena hacia el Océano Atlántico luego de atravesar el norte de Brasil, favoreciendo una acumulación relativamente grande de agua antes de ser evacuada por gradiente hidráulico y topográfico, causando una mayor afectación de la serie de EWH respecto al de humedad de suelo que alcanza su límite superior: la saturación. Al comparar la anomalía negativa del EWH y la humedad de suelo con la Región Andina, se nota que a pesar de la diferencia de vegetación entre las dos regiones, y que probablemente la Amazonía presente una mayor evapotranspiración real y por lo tanto de esperarse una menor humedad de suelo en el periodo seco, presenta menores anomalías que la región Andina. Esto podría explicarse por la diferencia en los volúmenes de lluvia provenientes de las retroalimentaciones locales y la escala temporal de la información utilizada.

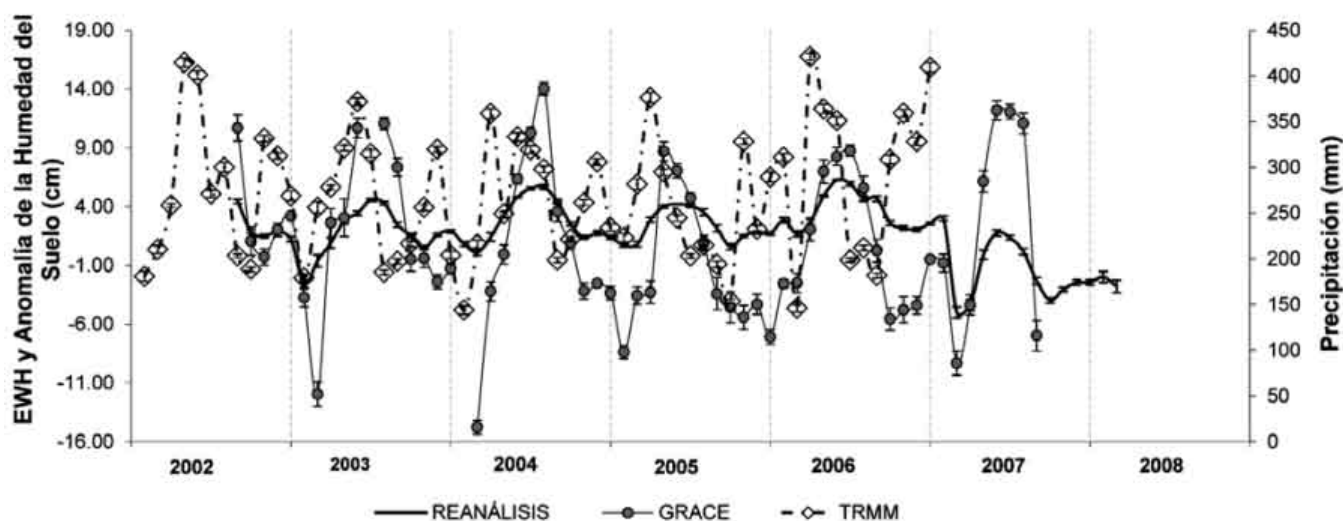


Figura 8. Evolución de las series mensuales de precipitación promedio (TRMM) y de las anomalías estandarizadas de las series de humedad de suelo (Reanálisis NCEP/NCAR) y EWH (GRACE), para la región Amazónica.

La ocurrencia de El Niño afecta las láminas de precipitación y de humedad de suelo para la región Amazónica; se nota un efecto mayor en el EWH durante los eventos El Niño de los años 2004 y 2006. Contrario a lo observado en las regiones Andina, Oriental y Caribe, la aparición de El Niño en el año 2002 no representó anomalías severas en la humedad del suelo para la región Amazónica. Un comportamiento similar se presentó en la región Pacífica. En la misma figura se

observa con claridad la disminución de los valores de EWH para el año 2005, que representan la sequía extrema ocurrida en la región Amazónica en ese año. Aunque se aprecia una clara disminución en los valores de EWH para el año 2005 y para los eventos El Niño 2004 y 2006; no es tan clara la disminución en los valores de precipitación suministrados por la Misión TRMM.

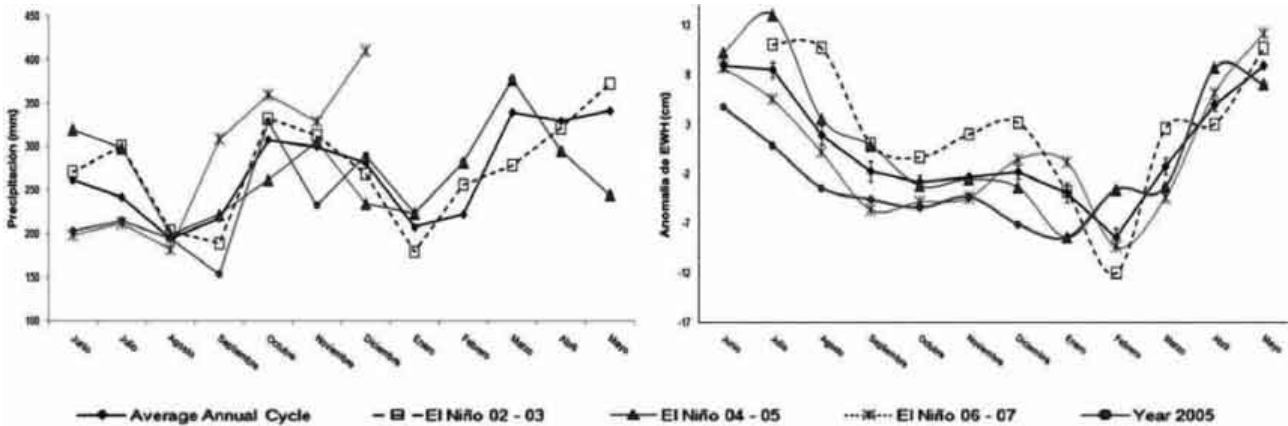


Figura 9. Ciclo anual de la precipitación (izquierda) y de EWH (derecha) según las misiones TRMM y GRACE respectivamente, para la región Amazónica y su comportamiento durante eventos históricos de El Niño.

4.4 Región Oriental

El ciclo anual del EWH, de la humedad de suelo y de la precipitación es unimodal, similar al de la región Amazónica, pero el pico, para todas las series, ocurre aproximadamente con dos meses de rezago respecto a esa región. El ciclo anual del EWH corresponde con el ciclo anual del flujo del Río Orinoco (Edmond *et al.*, 1996), con caudales máximos en los meses de julio a septiembre. Las variaciones en EWH y humedad del suelo son mayores en la región Oriental que en la región Amazónica; posiblemente por el menor volumen de precipitación anual y un periodo seco más acentuado (Jaramillo y Chaves, 2000; Mesa *et al.* 1997). Para el periodo analizado se encontró una precipitación media de 2575 mm/año, menor en aproximadamente 250 mm anuales a lo reportado por Mesa *et al.* (1997).

Las Figuras 10 y 12 muestran gran similitud en periodo y amplitud de las series de EWH y humedad del suelo, aunque

los picos y valles del EWH en general son mayores a los de humedad de suelo y en promedio las anomalías positivas y negativas de EWH son mayores en 4.7 cm/mes. Las mayores discrepancias de las dos series se presentan en el rango de anomalías positivas, seguramente por el aumento en los caudales de los ríos, en el nivel de los acuíferos y las inundaciones de llanuras y terrazas aluviales, mientras que la humedad del suelo alcanza su nivel máximo en el estado de saturación. En el primer trimestre de los años 2006 y 2007 las anomalías negativas de humedad del suelo tienen una alta proporción en las anomalías negativas de EWH, puede interpretarse que para estos periodos las anomalías de EWH fueron representadas por una disminución de la humedad del suelo, sin embargo es poco probable que una disminución de la humedad del suelo tan marcada no esté acompañada de disminución en los caudales de los ríos y niveles en los acuíferos; esta comportamiento merece un estudio más profundo.

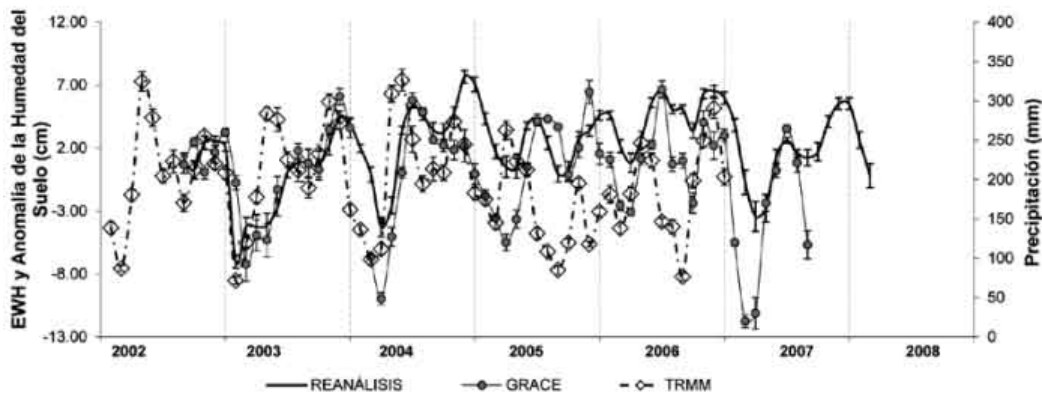


Figura 10. Ciclo anual de precipitación, (TRMM), EWH (GRACE), y humedad de suelo (Reanálisis) para la región Oriental. Las barras denotan el error estándar de estimación de la media.

De manera similar a lo que sucede en las regiones Andina y Amazónica, en la región oriental se registra un comportamiento inverso entre las series del EWH y ONI con cierto rezago. Para esta región según lo encontrado por **Mesa et al.**

(1997) y **Poveda et al.** (2010) el efecto del ENSO es menor y con mayor rezago que para las zonas Pacífica, Caribe y Andina.

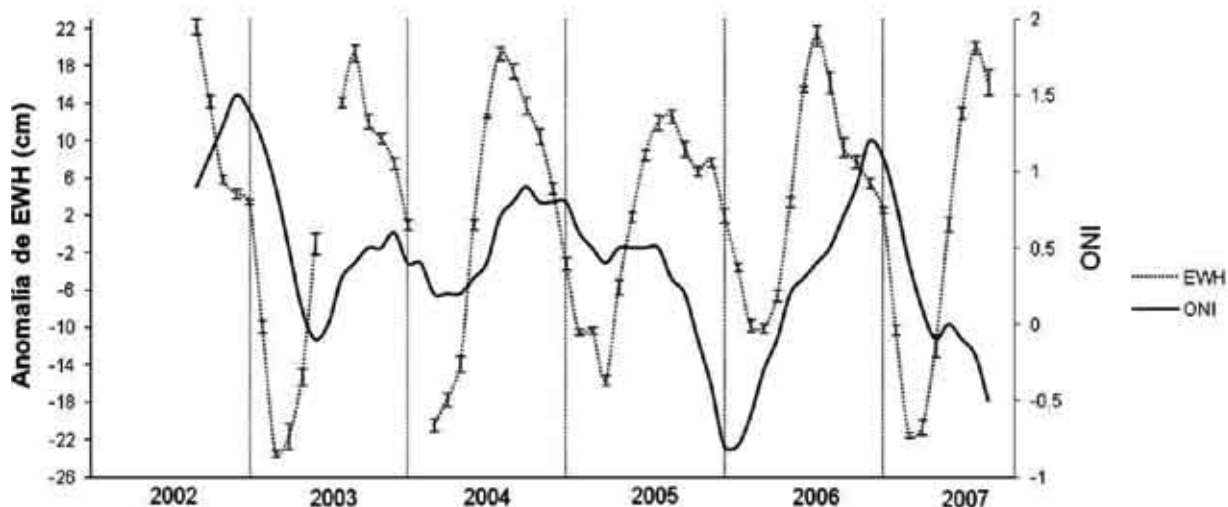


Figura 11. Evolución temporal de los registros del ONI y el Espesor Equivalente de Agua (EWH) para la región Oriental.

En la Figura 12 se observa que la precipitación antecede en uno o dos meses a la humedad del suelo. Las variaciones en EWH son grandes y pueden ser explicadas en razón al tipo de vegetación, la topografía, el ciclo anual de precipitación, principalmente la gran diferencias en los volúmenes de lluvia a través del año y que la región Oriental drena hacia el océano Atlántico luego de atravesar Venezuela a través de la cuenca del Río Orinoco, por lo que puede existir una acumulación relativamente grande de agua antes de ser evacuada

por gradiente hidráulico y topográfico. Las variaciones en el EWH y humedad de suelo para esta zona son mayores que para las regiones Andina y Amazónica, se hallaron anomalías de EWH en un rango de 64.6 cm, con un máximo positivo de 30.35 cm/mes y una anomalía negativa mínima de -34.21 cm/mes. Bajo las mismas condiciones planteadas para la región Andina, se estima que el intercambio del agua con el suelo para la región oriental es de 265.7 km³/año.

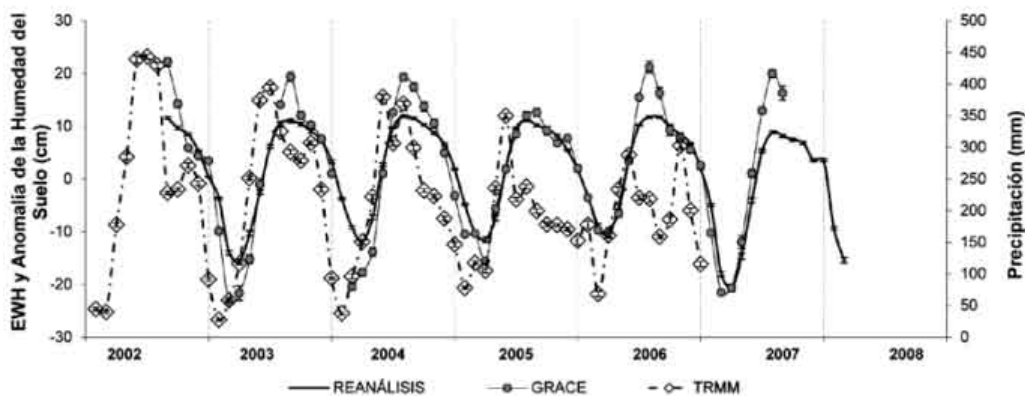


Figura 12. Evolución de las series mensuales de precipitación promedio (TRMM) y de las anomalías estandarizadas de las series de humedad de suelo (Reanálisis NCEP/NCAR) y EWH (GRACE), para la región Oriental.

La región Oriental, en forma similar a las regiones Andina y Caribe, muestra una disminución en los valores de EWH durante El Niño de los años 2002 y 2006, particularmente en los meses de febrero, marzo y abril; para la precipitación esta disminución ocurrió en el periodo comprendido entre diciembre y marzo. Estos resultados son similares a los

hallados por **Poveda et al. (2010)** para caudales máximos medios diarios en las estaciones Aguaverde, Los Esteros y Puerto Inírida. Durante El Niño del año 2004 no es perceptible una disminución sostenida del EWH y precipitación respecto al ciclo anual promedio.

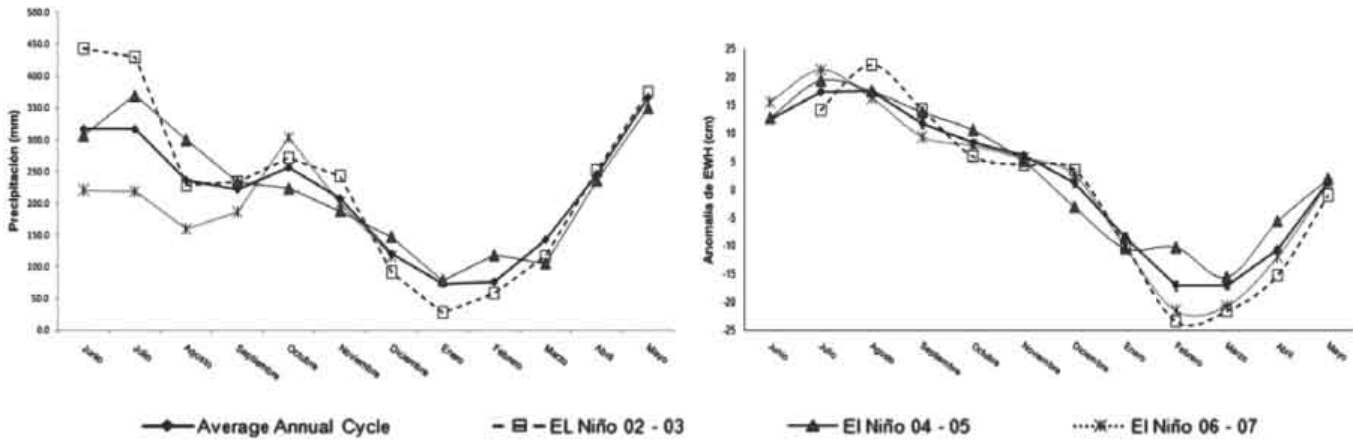


Figura 13. Ciclo anual de la precipitación (izquierda) y de EWH (derecha) según las misiones TRMM y GRACE respectivamente, para la región Oriental y su comportamiento durante eventos históricos de El Niño.

4.5 Región Pacífica

Para la región Pacífica el ciclo anual de EWH y humedad de suelo tiene características bimodales y reflejan el comportamiento de la precipitación con un rezago aproximado de dos

meses. El ciclo anual de la precipitación presenta un periodo seco muy pronunciado en el primer trimestre y luego uno de menores proporciones hacia la mitad del segundo semestre, similar al comportamiento descrito por **Jaramillo y Chaves (2000)** y **Mesa et al., (1997)**.

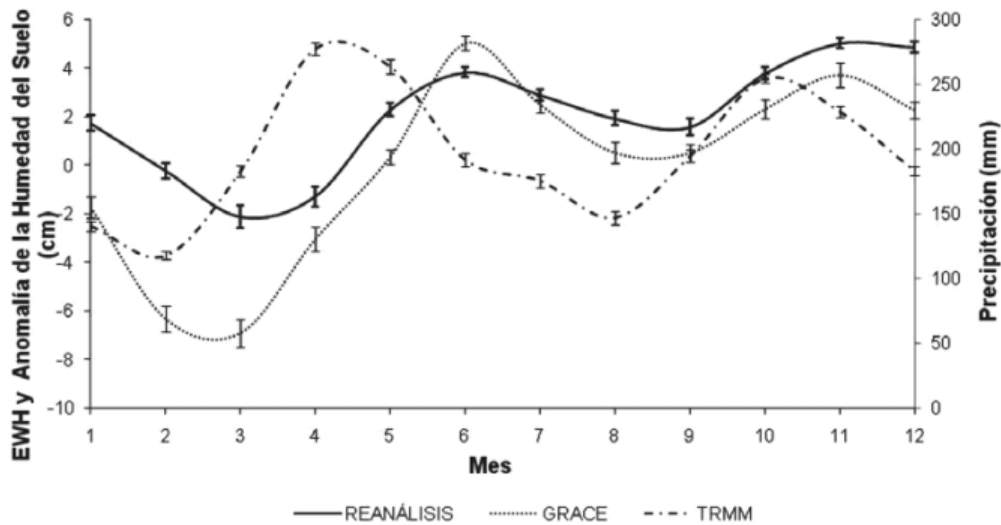


Figura 14. Ciclo anual de precipitación, EWH y humedad de suelo para la región Pacífico. Las barras denotan el error estándar de estimación de la media.

Las variaciones de EWH y humedad de suelo de la región Pacífica son menores que en las otras regiones; se hallaron anomalías de EWH en un rango de 27.78 cm, con un máximo positivo de 11.14 cm/mes y una anomalía negativa mínima de -16.6 cm/mes. Bajo las mismas condiciones planteadas para la región Andina, se estima que el intercambio del agua con el suelo para la región Pacífica es de 43.81 km³/año. Esta menor variación puede ser explicada por la poca variabilidad de la lluvia, con niveles muy elevados durante todo el año (Snow, 1976). Las pérdidas por evapotranspiración son rápidamente repuestas por las lluvias (escalas menores a un mes) y por ello el suelo permanece en condiciones de alta humedad muy cercanas a la saturación, existe una corta distancia de drenaje (comparando entre zonas) hacia el océano Pacífico y porque existe un gradiente topográfico mucho mayor que permite una evacuación rápida del agua hacia el océano. Así mismo, debe considerarse el hecho que la zona limita con el océano y como se observó anteriormente esta zona es la que presenta menor coeficiente de correlación entre las soluciones dadas por los tres centros de procesamiento de la misión GRACE.

Las series de tiempo del ONI y EWH muestran una relación inversa con un rezago de aproximadamente 4 meses; anomalías negativas del ONI representan anomalías positivas del

EWH y viceversa. Es claro que el ENSO afecta la magnitud de las anomalías del EWH en la región, ocasiona anomalías negativas en la precipitación, la humedad del suelo, la actividad vegetal y los caudales de los ríos (Poveda *et al.* (2001; 2002; 2005; 2006; 2010; Mesa *et al.* 1997. Además según lo expresado por Poveda & Mesa (1997) y Poveda *et al.* (2001), la respuesta a las anomalías del SOI son más rápidas y fuertes para la región Pacífica en el territorio Colombiano. Se detectó que durante El Niño 2006 – 2007 se presentó una anomalía negativa acentuada del EWH, particularmente en el primer trimestre del año

En esta zona, así como en la zona Andina, la disminución de la lluvia durante el Niño puede estar asociado al debilitamiento del Chorro del “CHOCO” (Poveda, 1998; Poveda & Mesa, 2000; Poveda *et al.*, 2006), y por lo tanto al transporte de humedad desde el océano Pacífico. Poveda (1998), usando datos del Reanálisis NCEP/NCAR encontró que la intensidad del chorro del CHOCO coincide con la intensidad del gradiente de temperatura entre la superficie de una porción de tierra sobre Colombia y la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2. Poveda y Mesa (1999), encontraron que durante la ocurrencia de El Niño existe debilitamiento del Chorro del CHOCO.

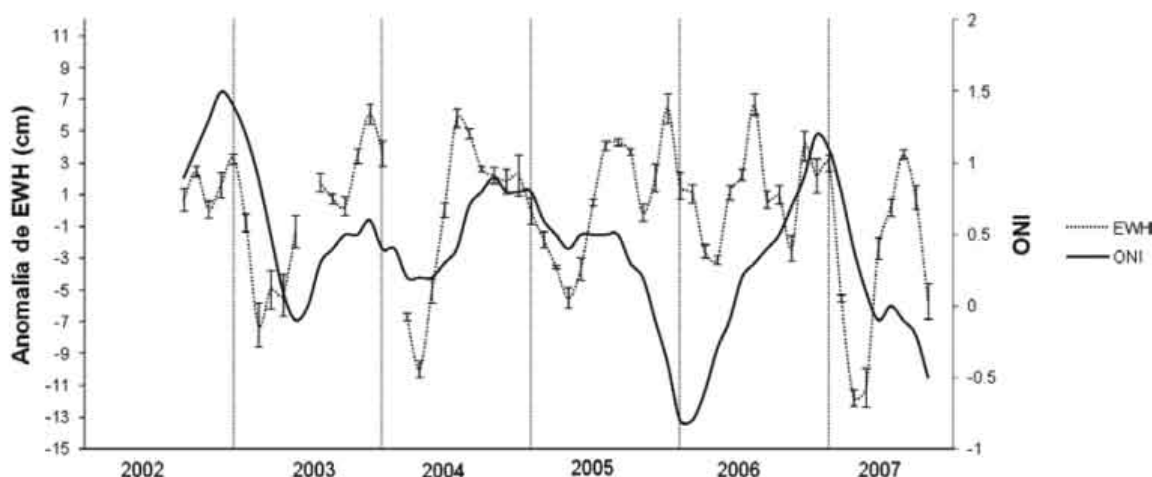


Figura 15. Evolución temporal de los registros del ONI y el Espesor Equivalente de Agua (EWH) para la región Pacífica.

Para las regiones Pacífica y Caribe se encontraron comportamientos “anómalos” entre la serie de humedad del suelo y el EWH, ya que se registran valores de EWH menores a los valores de humedad de suelo (figura 16). Se considera que el comportamiento es anómalo debido a que el EWH, además de la humedad del suelo representa el agua superficial (ríos, lagos, biomasa) y el acuífero subyacente, por

lo tanto siempre debe registrar anomalías positivas mayores y anomalías negativas menores que los de humedad del suelo. Estas anomalías pueden ser explicadas por errores en la medición del EWH por su cercanía al océano o a deficiencias en el modelo de humedad de suelo para estas regiones que podrían mejorar con una calibración particular de la capacidad de almacenamiento del suelo para estas regiones.

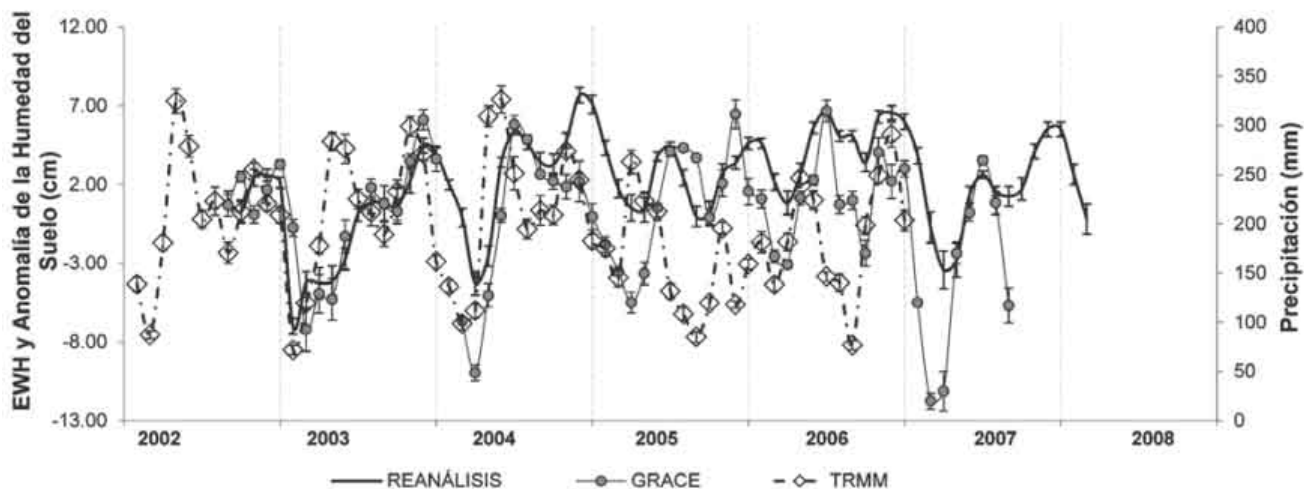


Figura 16. Evolución de las series mensuales de precipitación promedio (TRMM) y de las anomalías estandarizadas de las series de humedad de suelo (Reanálisis NCEP/NCAR) y EWH (GRACE), para la región Pacífica.

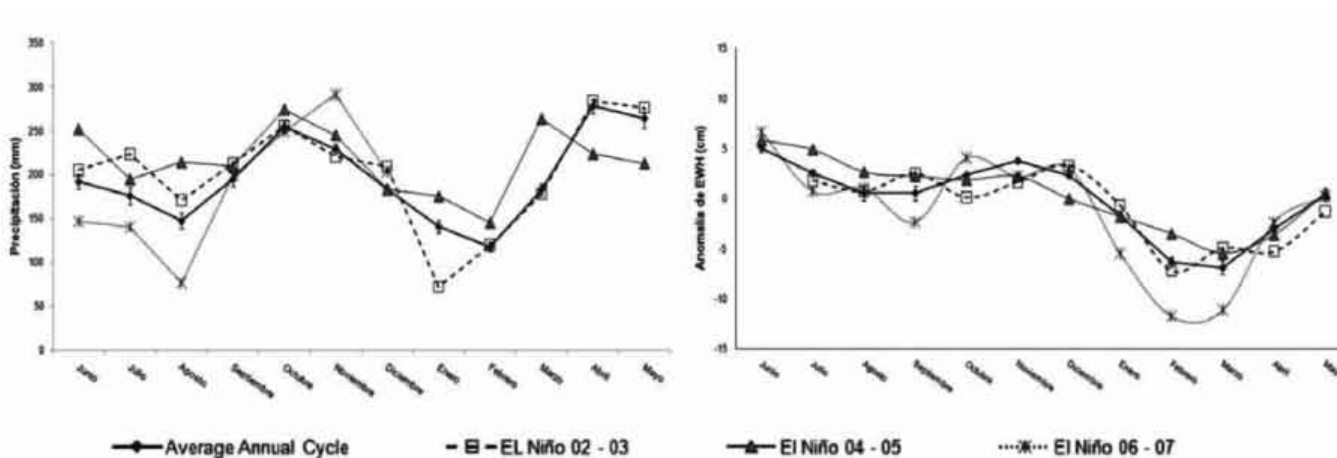


Figura 17. Ciclo anual de la precipitación (izquierda) y de EWH (derecha) según las misiones TRMM y GRACE respectivamente, para la región Pacífica y su comportamiento durante eventos históricos de El Niño.

4.6 Región Caribe

En las Figuras 18 y 20 se observa que las series de tiempo de EWH, humedad de suelo y precipitación muestran la bimodalidad que reporta Snow (1976) para el ciclo anual de precipitación y Mesa et al. (1997) y Poveda et al. (2010) para los caudales en los ríos. En el primer trimestre del año se presentan las mayores anomalías negativas de EWH, la humedad de suelo y la precipitación; el periodo con

anomalía positiva mayor corresponde al último trimestre del año, situación consistente con lo reportado por Jaramillo y Chaves (2000); Mesa et al. (1997) y Poveda et al. (2010). Como sucede en las demás regiones estudiadas, se presenta una respuesta rezagada del EWH y la humedad del suelo ante las variaciones de la precipitación. La precipitación anual promedio de la región es de 1184 mm/año magnitud similar a lo reportado por Snow (1976) y Mesa et al. (1997).

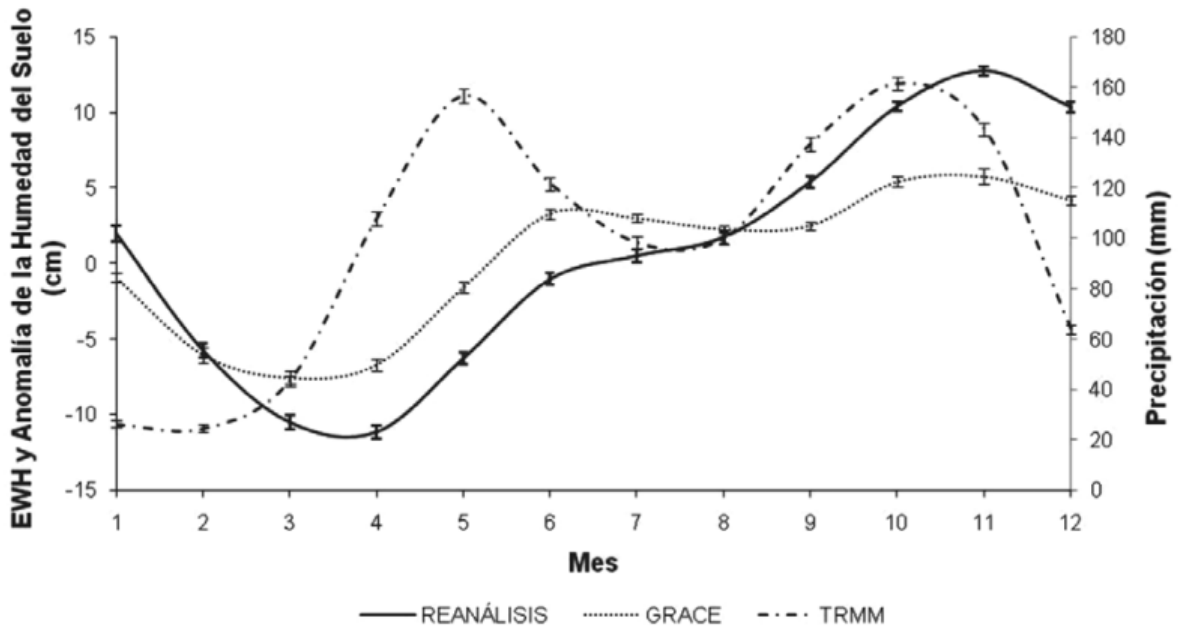


Figura 18. Ciclo anual de precipitación, (TRMM), EWH (GRACE) y humedad de suelo (Reanálisis) para la región Caribe. Las barras denotan el error estándar de estimación de la media.

El comportamiento inverso entre las series de EWH y ONI es similar al de las otras regiones e indica que el ENSO afecta la hidroclimatología de la región. Mesa et al., (1997) y Poveda et al. (2010) estudiaron los efectos de las fases del ENSO en los caudales de los ríos de la región, encontrando que durante El Niño existe un disminución de los caudales

mientras que durante La Niña se presentan anomalías positivas en sus caudales; comportamiento que se aprecia en la evolución de EWH en las figuras 19 y 21, con anomalías negativas durante la ocurrencia del Niño; las mayores anomalías negativas se presentaron durante los Niños 2002 – 03 y 2006 – 07.

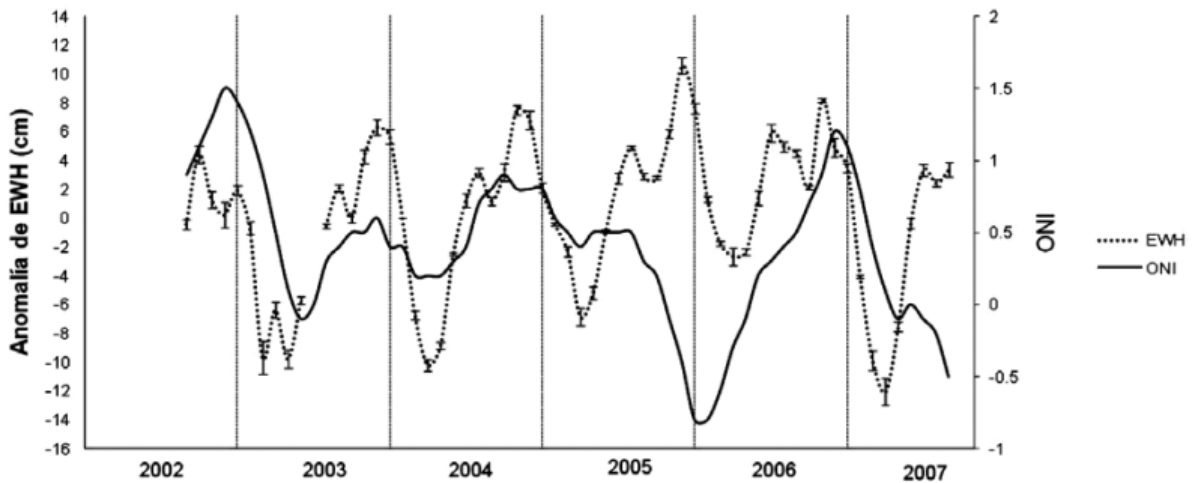


Figura 19. Evolución temporal de los registros del ONI y el Espesor Equivalente de Agua (EWH) para la región Caribe.

Las variaciones de EWH y humedad de suelo de la región Caribe son menores que en las regiones Oriental, Amazónica y Andina y levemente mayores a las encontradas para la región Pacífica; se hallaron anomalías de EWH en un rango de 28.76 cm, con un máximo positivo de 12.31 cm/mes y

una anomalía negativa mínima de -16.45 cm/mes. Bajo las mismas condiciones planteadas para la región Andina, se estima que el intercambio del agua con el suelo para la región Caribe es de 50.53 km³/año.

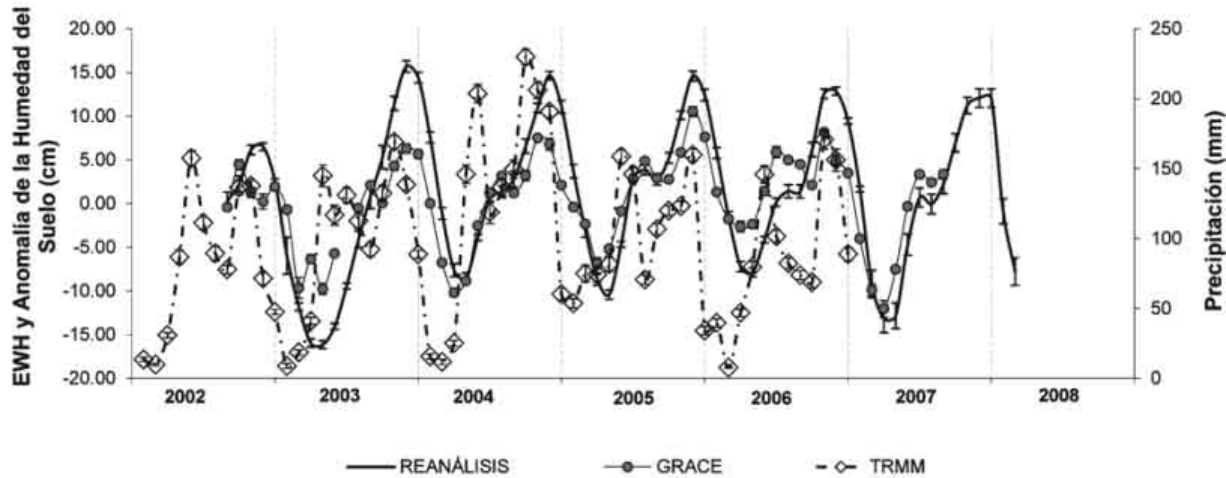


Figura 20. Evolución de las series mensuales de precipitación promedio (TRMM) y de las anomalías estandarizadas de las series de humedad de suelo (Reanálisis NCEP/NCAR) y EWH (GRACE), para la región Caribe.

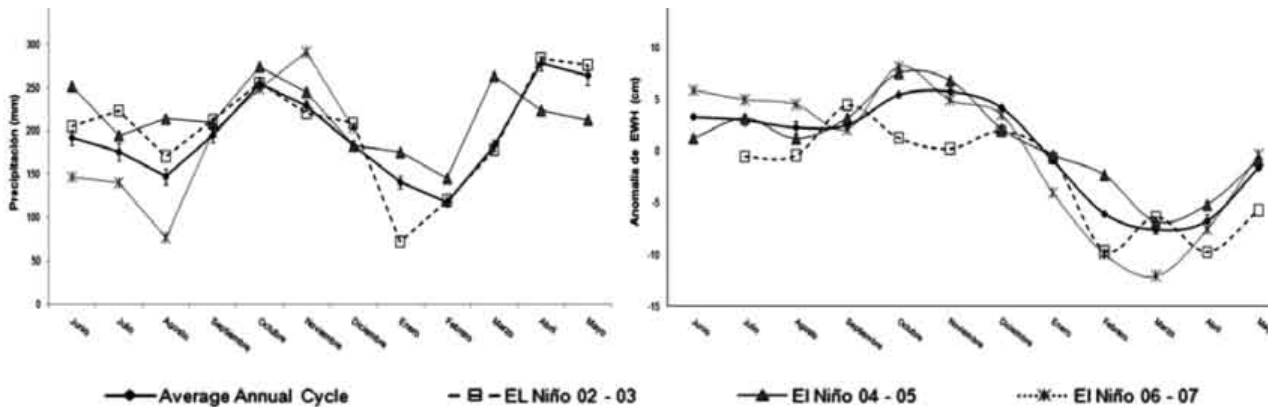


Figura 21. Ciclo anual de la precipitación (izquierda) y de EWH (derecha) según las misiones TRMM y GRACE respectivamente, para la región Caribe y su comportamiento durante eventos históricos de El Niño.

A partir de la serie del CRS con suavizamiento Gaussiano de 300 km, se graficó la evolución espacio-temporal del EWH en el territorio Colombiano. Los datos de EWH corresponden al promedio multianual de las anomalías para cada mes. Se observa claramente que los primeros meses del año presentan anomalías negativas en el EWH en la mayor parte del territorio Colombiano; entre enero y abril estas anomalías son más extremas en la región oriental, mientras que para el mes de marzo la región Amazónica ya presenta

anomalías positivas. En el periodo entre mayo y julio se registran anomalías positivas del EWH en todo el país, seguramente como resultado del periodo lluvioso ocurrido entre marzo y mayo por el paso de la ZCIT y que una vez más evidencia el rezago entre las series de precipitación y EWH en el territorio Colombiano, las anomalías positivas se mantienen durante el segundo semestre para la mayor parte del territorio exceptuando la región Amazónica que solo tiene anomalías positivas entre marzo y agosto.

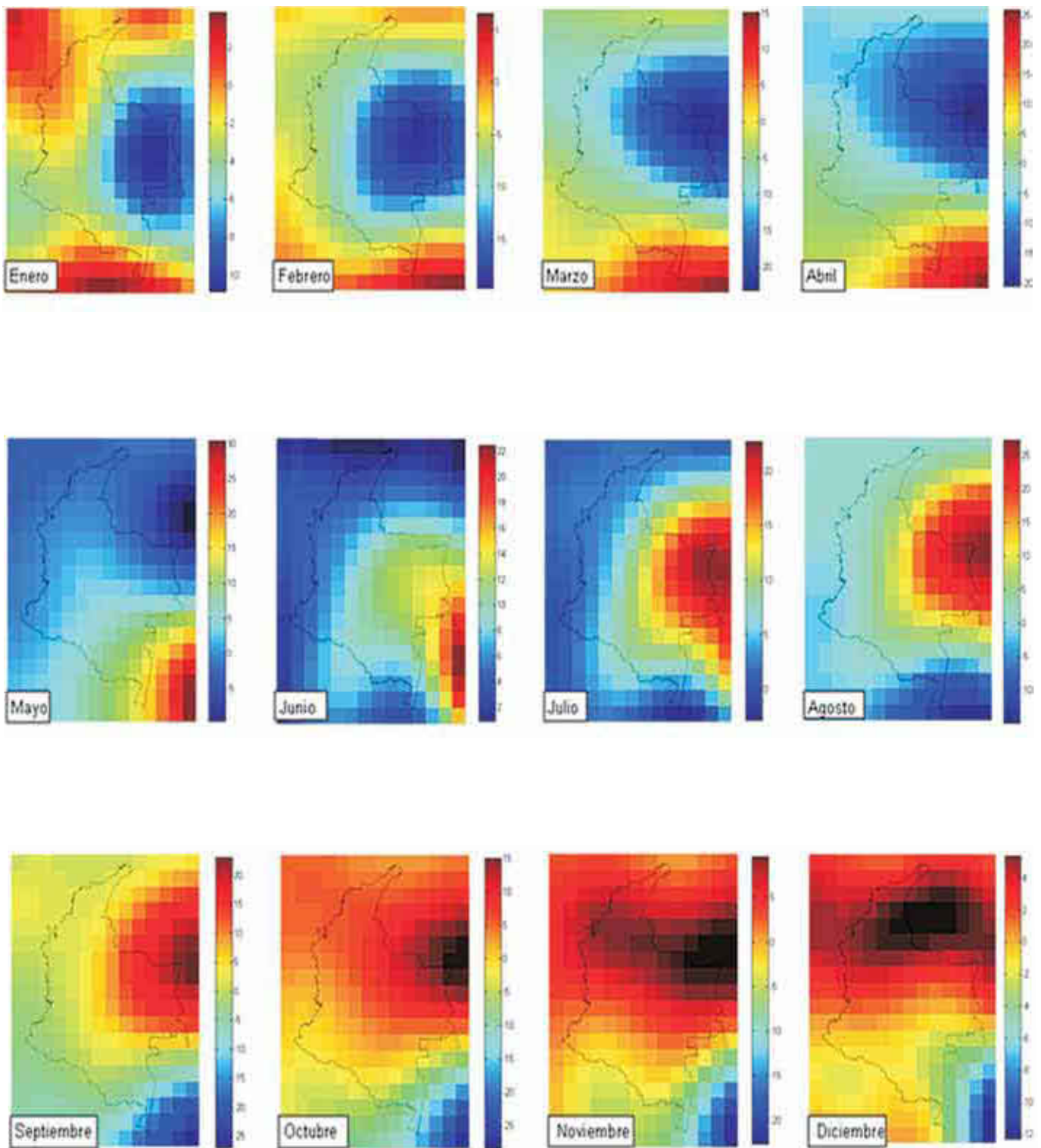


Figura 22. Promedio multianual mensual de la anomalía del EWH (cm) para Colombia.

5. Análisis de correlación

5.1 Correlación entre Precipitación, EWH y Modelo de Humedad del Reanálisis.

Se estimaron los valores del coeficiente de correlación lineal entre las diversas series de tiempo rezagando las series de humedad de suelo y EWH hasta por 3 meses. Como se evidenció en el análisis de los ciclos y series de tiempo por

regiones, los coeficientes mostrados en la figura 23, confirman que la precipitación en cada zona antecede la humedad del suelo y EWH en aproximadamente 2 meses. También se observa que los datos del modelo y la misión GRACE presentan una alta correlación simultánea y que el valor del coeficiente de correlación disminuye paulatinamente a medida que se incrementa el rezago. El correlograma entre las series muestra que el modelo simula adecuadamente la persistencia hidrológica.

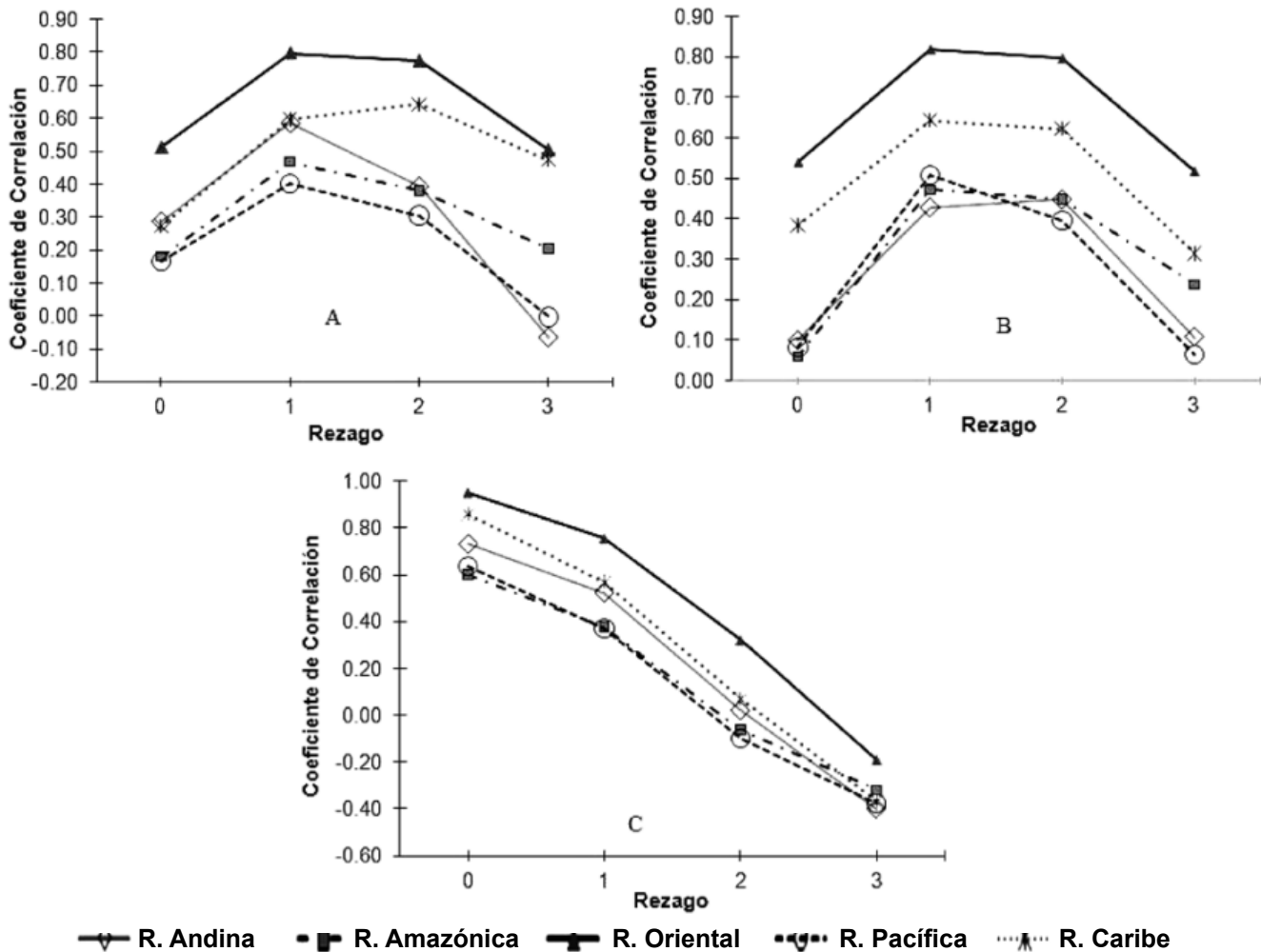


Figura 23. Coeficientes de correlación entre las diversas series para cada una de las regiones. A) TRMM – Reanálisis. B) TRMM – GRACE. C) Reanálisis – GRACE.

5.2 Correlación con índices Macroclimáticos

Se calculó el coeficiente de correlación lineal entre las series estandarizadas de precipitación, humedad de suelo y EWH y los índices MEI y ONI. Se rezagó cada una de las series frente a los índices macroclimáticos, hasta alcanzar 5 rezagos. La figura 24 muestra el comportamiento de las series frente al ONI. En la Figura 24 (A) se observa un muy bajo coeficiente de correlación entre la precipitación y el ONI para todas las regiones exceptuando la región Oriental, en el cual se evidencia un coeficiente negativo con un mínimo -0.29, con un rezago de tres meses. El signo del coeficiente indica una relación inversa entre los valores del ONI y la precipitación. Exceptuando la región Caribe, un comportamiento general se observa en el coeficiente de correlación para las demás regiones, en las cuales se obtiene un valor

mínimo (más negativo) en el tercer mes de rezago. La figura 24 (B) muestra la evolución del coeficiente de correlación entre el ONI y la serie de EWH. Las regiones Andina, Oriental y Pacífica, muestran valores del coeficiente de correlación de hasta -0.56, presentando el mínimo valor para un rezago de 4 meses, un mes después de que se presentó el mínimo valor para la precipitación, comportamiento que confirma un efecto regulador del suelo en las respuestas hidrológicas y la persistencia hidrológica del sistema. La región Caribe muestra una respuesta más tardía en precipitación y EWH y humedad de suelo frente al ONI, en la cual se presentan los mínimos valores del coeficiente de correlación en el cuarto y quinto mes de rezago respectivamente. La región Amazónica, en cambio, muestra una respuesta más rápida presentando el mínimo valor del coeficiente de correlación en el segundo mes para las dos series.

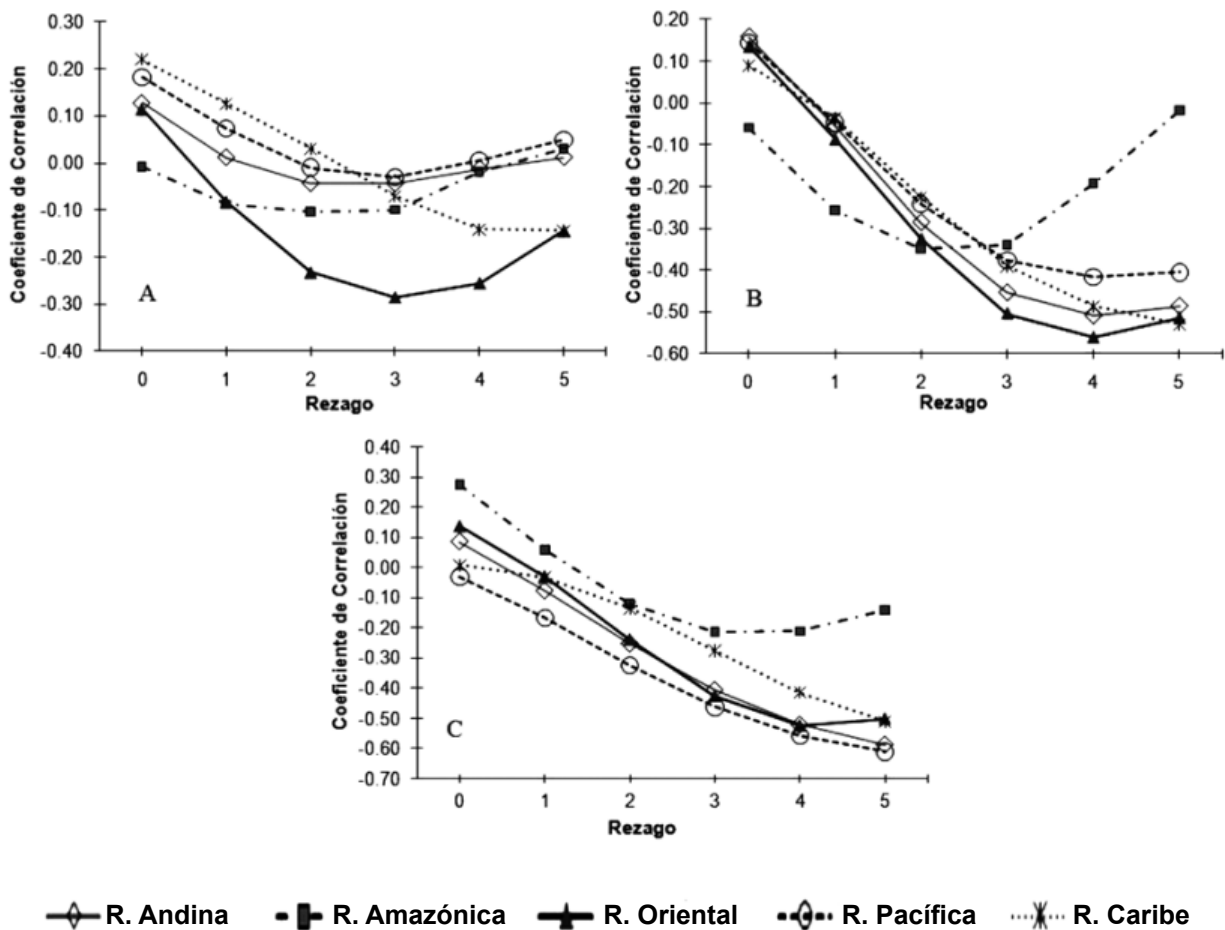


Figura 24. Coeficiente de correlación lineal con el ONI (Índice Oceánico del Niño).
 A) ONI – TRMM. B) ONI – GRACE. C) ONI – Reanálisis.

La Figura 25 muestra el comportamiento del coeficiente de correlación rezagado entre las series de precipitación, EWH y humedad de suelo frente al MEI. En la Figura 25 (A) se observa un comportamiento similar al presentado con el ONI, además de un bajo coeficiente de correlación entre la precipitación y el MEI, aunque con valores más negativos para todas las regiones exceptuando la región Amazónica. Se presentan los valores mínimos en el coeficiente de correlación para el primer y segundo mes de rezago. La Figura 25 (B) en la cual se aprecia la evolución del coeficiente de correlación

lineal entre el MEI y la serie de EWH muestra que los valores mínimos se presentan con tres y cuatro meses de rezago luego de que se presenta la señal en el índice del ENSO. Se advierte un comportamiento similar al presentado con el ONI, en el cual los valores mínimos del coeficiente de correlación lineal se presentan entre uno y dos meses después que se presenta el máximo valor de correlación para la serie de precipitación. En la Figura 25 (C) se observa un comportamiento similar del coeficiente de correlación entre la serie de humedad de suelo y el MEI al presentado por el EWH.

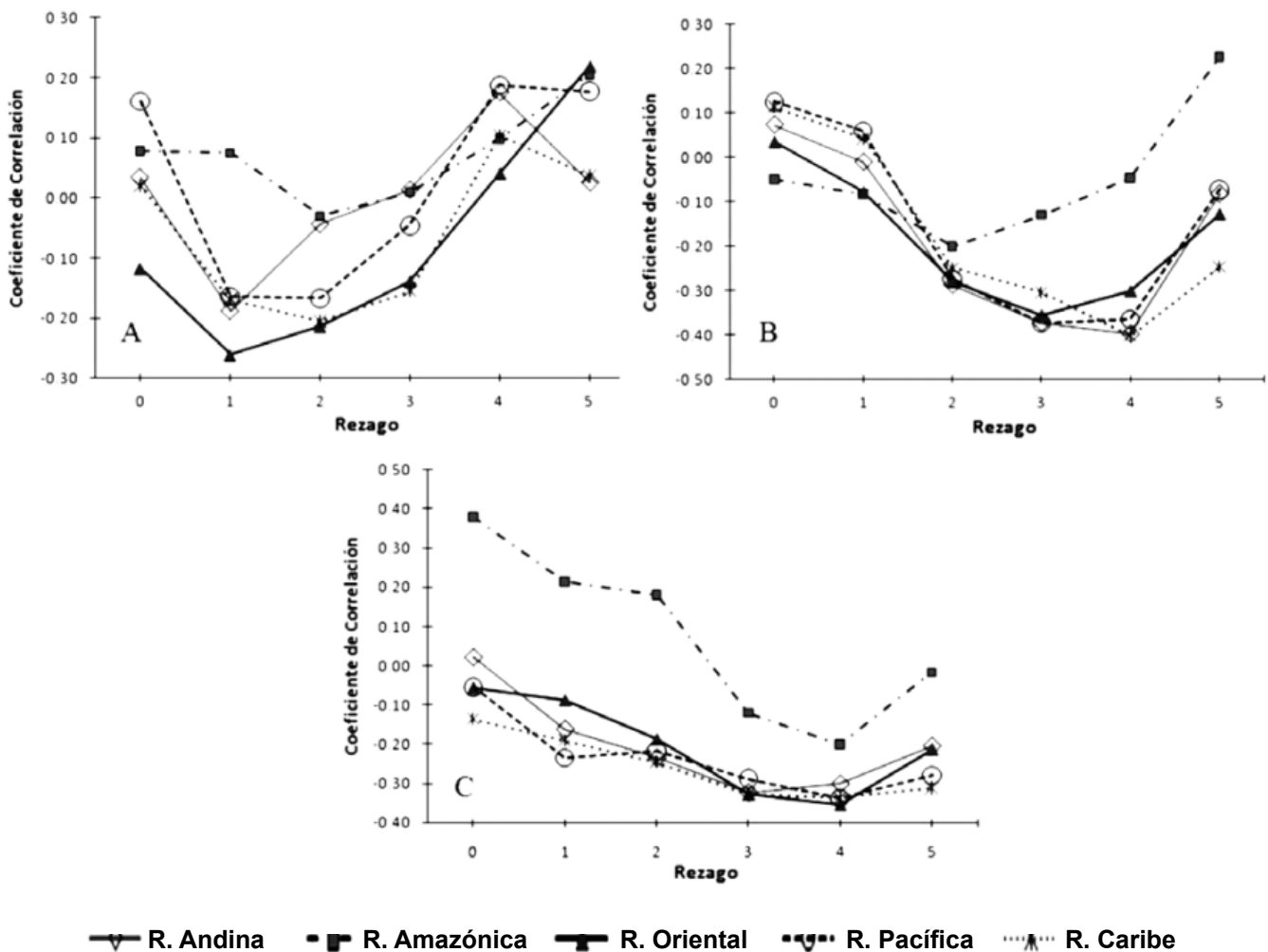


Figura 25. Coeficiente de correlación lineal con el MEI (Índice Multivariado del ENSO).
 A) MEI – TRMM. B) MEI – GRACE. C) MEI – Reanálisis.

6. Conclusiones:

Se analizaron las series de tiempo de EWH, reportadas por los tres centros de procesamiento de datos de la misión GRACE para el territorio Colombiano; se encontró buena correlación entre las series indicando la validez de los datos. Las correlaciones son mejores cuando la región analizada se encuentra más alejada de la costa, esto puede indicar alguna interferencia del océano en las soluciones de EWH.

El ciclo anual de EWH y la humedad del suelo para cada una de las regiones analizadas corresponde con el ciclo anual de la precipitación con rezago entre uno y dos meses.

Se detecta el efecto del sistema ENSO, en este caso la fase cálida (El Niño) en una disminución del EWH para cada una de las regiones analizadas y corresponde con rezago de uno o dos meses a las anomalías negativas en precipitación que ocurren en las diferentes regiones durante su aparición.

Los resultados hallados en el presente trabajo contribuyen al conocimiento de la dinámica hidrológica del agua en el suelo y subsuelo de las 5 grandes regiones climáticas en que se dividió el territorio Colombiano.

El modelo de humedad de suelo representa con buena aproximación el ciclo anual de la humedad de suelo en las diversas regiones del territorio Colombiano. El coeficiente de correlación entre el modelo y EWH para las series simultáneas es siempre mayor a 0.6, indicando que el modelo representa con buena exactitud el comportamiento de la humedad del suelo para las diversas regiones de Colombia. El correlograma entre el modelo y el EWH indica que el modelo es capaz de reproducir el fenómeno de persistencia hidrológica en el suelo.

7. Referencias

- Chambers, D. P.** 2007. Converting release – 04 gravity coefficients into maps of equivalent water thickness. Center for Space Research. University of Texas at Austin, 1 – 10. Disponible en ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/tellus/monthly_mass_grids/chambers-destripe-RL04-200711/doc/GRACE-dpc200711_RL04.pdf
- _____. 2006a. Steric sea level from a combination of Jason-1 altimetry and GRACE. Center for Space Research. University of Texas at Austin, 1 – 17. Disponible en ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/tellus/steric/doc/REASON_SSL.pdf
- _____. 2006b. Evaluation of new GRACE time – variable gravity data over the ocean. Center for Space Research. University of Texas at Austin, Accepted for publication in Geophysical Research Letter, 1 – 5. Disponible en: <http://gracetellus.jpl.nasa.gov/chambers-destripe-GRL2006.pdf>
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Blankenship, D., & Young, D.** 2008. Antarctic regional ice loss rates from GRACE. *Earth and Planetary Science Letters*, 266: 140 – 148. doi:10.1016/j.epsl.2007.10.057
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L.** 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santa Fé de Bogotá D.C.
- Chuvieco, E. (Ed.)**. 2008. *Earth Observation of Global Change*. doi: 10.1007/978-1-4020-6358-9
- Committee on Earth Gravity from Space, U. S. Geodynamics Committee, Board on Earth Sciences and Resources, Commission on Geosciences, Environment and Resources & National Research Council.** 1997. *Satellite Gravity and the Geosphere: Contributions to the Study of the Solid Earth and its Fluid Envelopes*. National Academic Press. Washington.
- D’Odorico, P., Ridolfi, L., Porporato, A., & Rodríguez-Iturbe, I.** 2000. Preferential states of seasonal soil moisture: The impact of climate fluctuations. *Water Resources Research*, 36 (8): 2209 – 2219.
- Edmond, J.M., Palmer, M.R., Measures, C.I., Brown, E.T., & Huh, Y.** 1996. Fluvial geochemistry of the eastern slope of the northeastern Andes and its foredeep in the drainage of the Orinoco in Colombia and Venezuela. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(16), 2949 – 2976.
- Eslava J. A.,** 1994. *Climatología del Pacífico colombiano*. Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas. Colección Eratóstenes, No. 1, Santa Fe de Bogotá D.C.
- Fan, Y., & van den Dool, H.,** 2004. Climate Prediction Center Global monthly soil moisture data set at 0.5 degree resolution for 1948 to present. *J. of Geophysical Research*, 109: D10102, doi: 10.1029/2003JD004345.
- Han, S. C., Yeo, I. Y., Alsdorf, D., Bates, P., Boy, J. P., Kim, H., Oki, T. & Rodell, M.** 2010. Movement of Amazon surface water from time-variable satellite gravity measurements and implications for water cycle parameters in land surface models, *Geochem. Geophys. Geosyst*, 11: Q09007 doi: 10.1029/2010GC003214.
- Hillel, D.** 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego.
- Hofmann, B., & Moritz, W. H.** 2006. *Physical Geodesy*. Springer Wien-NewYork. Vad Vöslau, Austria.
- Huang, J., Van den Dool, H., & Georgakakos, K. P.** 1996. Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States (1931-93) and Application to Long-Range Temperature Forecasts. *Journal of Climate*, 9 (6): 1350-1362.
- Huang, J., & Halpenny, J.** 2007. Estimating variation of groundwater storage within the Great Lakes Water Basin from GRACE, soil moisture and lake levels. Joint International GSTM and DFG SPP Symposium, GFZ Postdam, Germany.
- Jaramillo, A.,** 2005. *Clima andino y café en Colombia*. CENICAFE. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná.
- Jaramillo, A., & Chaves, B.** 2000. Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Revista del Centro Nacional de Investigaciones de Café*, 51 (2): 102 – 113.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. & Joseph, D.** 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437 – 471.
- Laio, F., Porporato, A., & Rodríguez-Iturbe, I.** 2002. On the seasonal dynamics of mean soil moisture. *Journal of Geophysics Research*, 107 (D15): ACL 8-1 – ACL 8-9.
- Llubes, M., Lemoine, J. M., & Remy, F.** 2007. Antarctica seasonal mass variation detected by GRACE. *Earth and Planetary Science Letters*, 260: 127 – 136.
- Marengo, J. a.** 2004. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. *Climate Dynamics*, 24(1), 11–22. doi: 10.1007/s00382-004-0461-6

- Mesa, O. J., Poveda, G., & Carvajal L. F. 1997. Introducción al Clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Space Flight Center (2007). Tropical Rainfall Measurement Mission TRMM, Senior Review Proposal. Disponible en http://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/publications.html.
- Poveda, G. 1998. Retroalimentación dinámica entre el ENSO y la hidrología Colombiana, Disertación de Ph. D. Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- _____. 2002. El chorro del CHOCÓ y su influencia sobre la hidroclimatología de la costa Pacífica Colombiana, En Correa, I. D., & Restrepo, J. D. (Ed) Geología y Oceanografía del Delta del río San Juan, Litoral Pacífico Colombiano (pp. 167 – 187). Fondo Editorial Universidad EAFIT. Medellín.
- _____. 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 28 (197): 201 – 222.
- _____, Ramírez, J. M., & Jaramillo, A. 2002. Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos, 9: 47 – 56.
- _____, Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. 2001. Seasonality in ENSO – related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia, Water Resources Research, 37(8): 2169 – 2178.
- _____, & Mesa O. J. 1993. Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Revista Atmósfera, 20: 26 – 39.
- _____, & Mesa, O. J. 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large scale oceanic atmospheric phenomena, J. Climate, 10 (10): 2690 – 2702.
- _____, & Mesa, O. J. 1999. La corriente superficial del oeste [“del CHOCO”] y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 23(89): 517 – 528.
- _____, & Mesa, O.J. 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. Geophysical Research Letters, 27 (11): 1675 – 1678.
- _____, & Salazar, L. F. 2004. Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 93(3), 391–401. doi:10.1016/j.rse.2004.08.001
- _____, Jaramillo, A., & Mantilla, R. 2000. Amplificación de las anomalías de la humedad del suelo y del índice “NDVI” por El Niño en Colombia. En: Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, 10 p.
- _____, Waylen, P., & Pulwarty, R. 2006. Annual and inter-annual variability of present climate in northern South America and Southern Mesoamerica. Paleogeography geography, Paleoclimatology and Palaeoecology, 234: 3 – 27.
- _____, Vélez, J., Mesa, O., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R., Mejía, J., Hoyos, C., Ramírez, J., Ceballos, L., Zuluaga, M., Arias, P., Botero, B., Montoya, M., Giraldo, J., & Quevedo, D. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia, Journal of Hydrologic Engineering, 12 (1): 4 – 12.
- _____, Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. a. 2010. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth’s most important biodiversity hotspots. Climate Dynamics, 36(11-12), 2233–2249. doi:10.1007/s00382-010-0931
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. 1992. Physics of Climate. American Institute of Physics. New York.
- Puma, M. J., Michael, C. A., Rodríguez-Iturbe, I., & Guswa, A. J. 2005. Functional relationship to describe temporal statistics of soil moisture averaged over different depths. Advances in Water Resources, 28: 553 – 566. doi:10.1016/j.advwatres.2004.08.015
- Ramillien, G., Bouhours, S., Lombard, A., Cazenave, A., Flechtner F., & Schmidt, R. 2007. Land water storage contribution to sea level from GRACE geoid data over 2003 – 2006, Global and Planetary Change, 60: 381 – 392.
- Rangel, Ch., J.O., P. & Lowy, C. 1993. Tipos de vegetación y rasgos fitogeográficos en la región pacífica de Colombia. Tomo I. p. 182 – 98. En: P. Leyva (ed.). Colombia Pacífico. Fondo FEN. Bogotá, DC.
- Ridolfi, L., D’Odorico, P., Porporato A., & Rodríguez – Iturbe, I. 2003. Stochastic soil moisture dynamics along a hillslope. Journal of Hydrology, 272: 264 – 275.
- Rodríguez-Iturbe, I., Porporato, A., Rindolfi, L., Isham V., & Cox, D.R. 1999. Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate, soil and vegetation. Proceedings Royal Society of London, Series A, 4155: 3789 – 3805.
- Rueda, O. 2008. Modelamiento de la humedad del suelo en la región cafetera de Colombia bajo diferentes coberturas vegetales. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Tesis: Magister en Ingeniería. Medellín.
- Sasgen, I., Martinec, Z., & Fleming, K. 2007. Regional ice – mass changes and glacial – isostatic adjustment in Antarctica from GRACE. Earth and Planetary Science Letters, 264: 391 – 401.
- Schöngart, J., & Junk, W. J. 2007. Forecasting the flood-pulse in Central Amazonia by ENSO-indices. Journal of Hydrology, 335(1-2), 124–132. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.11.005
- Seitz, F., Schmidt, M., & Shum, C. K. 2008. Signal of extreme weather conditions in central Europe in GRACE 4-D hydrological mass variations. Earth and Planetary Science Letters, 268: 165 – 170.
- Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, Ch., Gartner, A., Doll, P., Ramillien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H., & Wunsch, J. 2006. GRACE observations of changes in continental water storage. Global and Planetary Change, 50(1-2): 112 – 126. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.11.018

- Snow, J. W.** 1976. The climate of northern South America. En Schwerdtfeger, W. (Ed.), *Climates of Central and South America*. (pp. 295 – 403). Amsterdam, The Netherlands.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M.** 2004a. GRACE Measurements of mass variability in the earth system. *Science*, 305 (5683): 503 – 505.
- _____, **Bettadpur, S., Watkins M. M., and Reigber, C. H.** 2004b. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results, American Geophysical Union, 6p. Disponible en: www.csr.utexas.edu/grace/publications/papers/2004GL019920.pdf
- Thomas, J. B.** 1999. An analysis of gravity-field estimation based on intersatellite dual – 1 – way biased ranging, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. 195 p. Disponible en <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA410563>
- Wahr, J.** 1996. *Geodesy and Gravity, Class Notes*. Department of Physics University of Colorado, Samizdat Press. Boulder, USA.
- Xavier, L., Becker, M., Cazenave, A., Longuevergne L., Llovel, W., & Rotunno Filho, O.C.**, 2010. Interannual variability in water storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data. *Remote Sensing of Environmental*, 114 (8): 1629 – 1637. doi: 10.1016/j.rse.2010.02.005.
- Xion, L. & Gotze, H. J.** 2001. Tutorial Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysichs*, 66 (6): 1660 – 1668.

Recibido: 28 de abril de 2011

Aceptado para publicación: 28 de febrero de 2013