

# Evaluación de los cambios de precipitación y temperatura en seis grandes cuencas colombianas durante el siglo XX

## Assessment of precipitation and temperature changes in six large Colombian basins in the 20th century

Nidia C. Reyes G<sup>1</sup>, José David Santos-Gómez<sup>2</sup> y Juan Diego Giraldo-Osorio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniera civil, Pontificia Universidad Javeriana, [nidia.reyes@javeriana.edu.co](mailto:nidia.reyes@javeriana.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, [jose.santos@javeriana.edu.co](mailto:jose.santos@javeriana.edu.co)

<sup>3</sup> Profesor asistente, Pontificia Universidad Javeriana, [j.giraldo@javeriana.edu.co](mailto:j.giraldo@javeriana.edu.co)

<sup>1,2,3</sup> Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. Carrera 7 No. 40-62, Ed. José Gabriel Maldonado, S.J. Bogotá, Colombia.

Fecha de recepción: 17/06/2016 Fecha de aceptación del artículo: 09/12/2016

### Resumen

Se evalúan en este trabajo los cambios en las variables climáticas de precipitación y temperatura en algunas de las principales cuencas en Colombia durante el Siglo XX y la primera década del XXI. El análisis emplea la base de datos de Precipitación y Temperatura del Aire de la Universidad de Delaware (*University of Delaware Air Temperature & Precipitation*, UD-ATP), la cual tiene cobertura temporal entre 1901 y 2010. Se incluye además el cálculo de la significancia del cambio de estas variables en el país, limitado a la cobertura y resolución espacial de la base de datos UD-ATP. Se encontró un aumento significativo de la temperatura durante el siglo XX en la mayoría de las cuencas estudiadas, y una disminución de la precipitación concentrada en las montañas Andinas y la región Pacífica.

### Palabras clave

Cambio climático, Colombia, Datos observados de precipitación y temperatura, Promedios de largo plazo.

### Abstract

The changes on climatic variables precipitation and temperature are evaluated in six main Colombian basins. The changes were evaluated through the University of Delaware Air Temperature &

Precipitation (UD-ATP) database, which has data from 1901 to 2010. The work includes significance tests of estimated change, limited by both UD-ATP database spatial resolution and spatial cover. Most basins which were analyzed showed a significant temperature increase during twentieth century, together with precipitation amount reduction, mainly in the Andes mountains and the Pacific region.

### Keywords

Climate warming, Colombia, Observed data of precipitation and temperature, Long-term averages.

### 1. Introducción

La disponibilidad de agua es importante para la salud humana, las actividades económicas, abastecimiento de energía, el funcionamiento de los ecosistemas y para los procesos geofísicos del planeta [2]. Sin embargo, la cantidad de agua atmosférica es muy sensible a la temperatura, por lo que se espera que cambios del ciclo hidrológico sigan al calentamiento global [7]. De acuerdo con [12], se esperan cambios regionales (aumentos y descensos) en la precipitación y las descargas de las cuencas, y estos cambios son más inciertos que el cambio esperado en la temperatura global.

Diversos estudios tratan sobre las consecuencias del aumento de la temperatura global y el cambio de los

patrones de precipitación en las cuencas alrededor del mundo [7]. En general, la escorrentía es más sensible a cambios en la cantidad de precipitación que a cambios en la temperatura [1, 14]. Uno de los estudios más importantes es el de Milly et al [12], quienes estimaron cambios de la escorrentía a nivel regional (entre -30% y +40%), utilizando un *ensemble* con doce modelos climáticos que demostraron habilidad para simular los patrones regionales de cambio decadal de la variable durante el siglo XX. Concluyen que, si estos cambios en la disponibilidad del recurso se dan, habría consecuencias de escala continental en la economía y en el funcionamiento de los ecosistemas. Milliman et al [11], afirman que, a pesar que la descarga total de los ríos al océano permanece en esencia inalterada, al menos una tercera parte de las cuencas que ellos estudiaron mostraron cambios de los caudales por encima del 30%.

Los cambios no sólo afectarán los escurrimientos, sino también el comportamiento estacional de los caudales, las tasas de sedimentación de las cuencas y la frecuencia de las inundaciones. Stewart et al [21], afirman que durante la segunda mitad del siglo XX se observó el adelantamiento de la fecha de los derretimientos de la nieve durante la primavera en cuencas de Norteamérica, y afirman que las simulaciones de los modelos climáticos son consistentes con estas tendencias. Estos cambios estacionales en el pico de la escorrentía estacional debido al derretimiento de la nieve ya habían sido reportados en el trabajo de Nash et al [14] en varias subcuencas del río Colorado. Por otro lado, el trabajo de Tucker et al [22] afirma que el cambio en los patrones del ciclo hidrológico impactará los procesos de sedimentación de las cuencas (e. g. si aumenta la escorrentía o decrece la cobertura vegetal, aumentarán las fuentes de sedimentos al interior de las mismas). Un ejemplo del aumento de la escorrentía debido a un efecto combinado de cambios de uso del suelo y tendencias de las variables del ciclo hidrológico está en el trabajo de Pfister et al [16], quienes afirman que la profundidad de precipitación y la intensidad de las lluvias han aumentado durante la segunda mitad del siglo XX en las cuencas de los ríos Mosa y Rin (Europa), y estas tendencias se conservan en los modelos de circulación global. Dichos autores encontraron que

el incremento de las lluvias invernales, junto con la mayor urbanización de las cuencas, producirán mayores inundaciones en estas regiones durante el siglo XXI.

En Colombia se ha mostrado evidencia de la relación entre la fase cálida del fenómeno ENSO (*El Niño - Southern Oscillation*) y la reducción de caudales [6, 19]. La fase cálida del ENSO está relacionada con el aumento generalizado de la temperatura y la reducción de la precipitación en la zona andina de Colombia [20]. Para el río Magdalena, el trabajo de Nakaegawa et al [13], encontró que habrían cambios estacionales de los caudales durante el siglo XXI, aunque el caudal medio anual no presentó cambios significativos, reduciendo la variabilidad interanual del ciclo.

El presente estudio estima los cambios observados en la precipitación y temperatura al interior de seis grandes cuencas de Colombia (cuencas de los ríos Atrato, Caquetá, Cauca, Guaviare, Magdalena y Patía), utilizando la base de datos de la Universidad de Delaware (*University of Delaware Air Temperature and Precipitation*, UD-ATP), garantizando una cobertura espacial completa para todas las cuencas con datos a nivel mensual en el periodo 1901-2010. Gracias a la longitud temporal de los datos utilizados, se pudo calcular la precipitación y la temperatura media al interior de las cuencas en estudio en periodos de 30 años (1901-1930, 1941-1970 y 1981-2010). Se observó que todas las cuencas estudiadas presentaron aumentos significativos de la temperatura durante el siglo XX, mientras que los cambios de la precipitación no fueron consistentes entre cuencas durante el periodo de estudio.

La disponibilidad del recurso hídrico depende de condiciones climáticas determinadas en cada región. En este contexto, la evaluación del impacto del cambio climático sobre dos de las principales variables del ciclo hidrológico (precipitación y temperatura) en las cuencas del país, supone un elemento que permitirá idear mecanismos de adaptación y la toma de medidas en el presente para afrontar posibles situaciones desfavorables en el futuro. Debe prestarse especial atención al resultado para el cambio de la temperatura obtenido para las cuencas del Pacífico colombiano, donde se observó

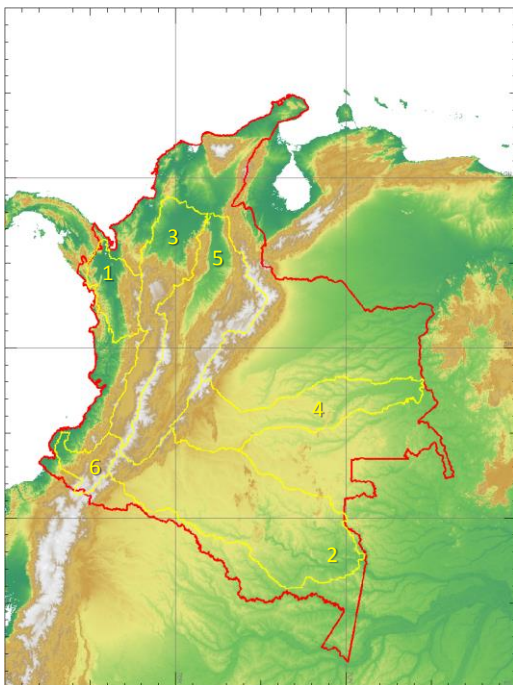
un aumento cercano 0.1 °C/década en la segunda mitad del siglo XX.

## 2. Área de estudio y datos utilizados

### 2.1. Cuencas de estudio

Las cuencas seleccionadas, listadas en la 0, se ubican en diferentes regiones del territorio colombiano. Para la delimitación de todas ellas, se utilizó el Modelo Digital de Terreno (MDT) denominado GMTED2010 [3], con una resolución espacial de 1000 m. El MDT fue importado y procesado con el software GRASS-GIS 6.4.2 [15]. Las cuencas delimitadas se muestran en la Figura 1.

Dentro de la región Andina se delimitaron las cuencas del río Magdalena y del río Cauca; en la región Pacífica, las cuencas de los ríos Patía y Atrato; en la región de la Orinoquía la cuenca del río Guaviare; y en la cuenca de la Amazonía la del Río Caquetá. El área de las cuencas delimitadas y las coordenadas a partir de las cuales fueron trazadas, se muestran en la 0.



**Figura 1.** Delimitación de las cuencas en estudio: (1) Atrato, (2) Cauca, (3) Magdalena, (4) Guaviare, (5) Patía y (6) Caquetá

### 2.2. Información de precipitación y temperatura

La información de la base de datos UD-ATP consiste en mallas interpoladas para todo el planeta de profundidades de precipitación y promedios de temperatura a nivel mensual para el periodo 1900-2010 (versión V3.01), con resolución espacial de 0.5° (aproximadamente 50 km cerca del ecuador), y puntos de grilla centrados a 0.25°. Estos archivos tienen información de estas variables para todas las superficies emergidas del planeta (continentes e islas más importantes), con una dimensión de 720x360x1332 píxeles.

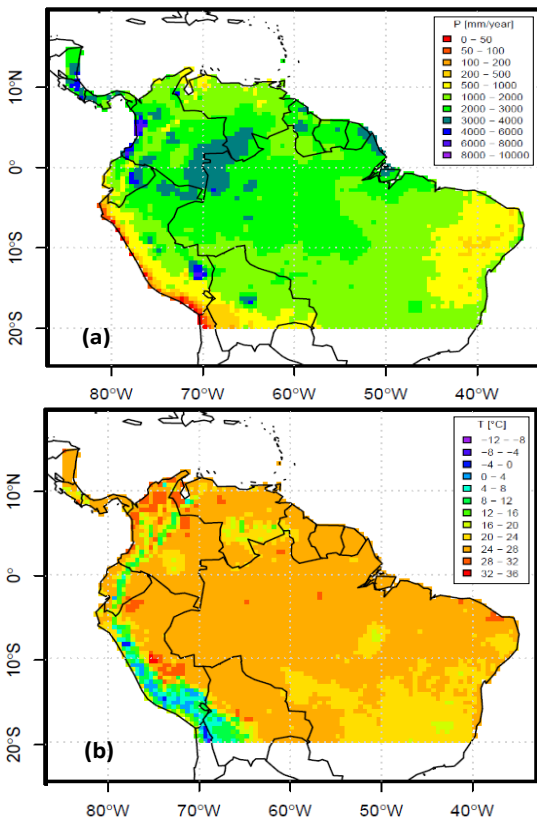
**Tabla. 1** Área y elevación promedio de las cuencas en estudio.

#.	Cuenca	Área [km <sup>2</sup> ]	Elevación promedio [msnm]	Punto de concentración	
				Longitud	Latitud
1	Atrato	35 739	484	76° 54' W	7° 54' N
2	Caquetá	197 852	297	69° 26' W	1° 04' S
3	Cauca	80 907	1 084	74° 37' W	9° 12' N
4	Guaviare	96 376	391	67° 42' W	4° 02' N
5	Magdalena	138 865	1 393	73° 54' W	8° 56' N
6	Patía	22 523	1 468	78° 08' W	2° 30' N

El proceso de interpolación para la construcción de los campos mensuales es explicado en los trabajos de Matsuura et al [8, 9]. En términos generales, el estudio recogió diversas bases de datos de estaciones en tierra que forman parte del proyecto *Global Historical Climatology Network* (GHCN2), así como datos de diversas agencias locales que apoyaron el proyecto, para la interpolación de los campos.

Como se dijo anteriormente, las mallas interpoladas UD-ATP tienen información para todo el planeta con 0.5° de resolución espacial. Con el fin de manipular la información más fácilmente, se recortó la malla al área de estudio utilizando comandos NCO (operadores netCDF [23]). Luego de recortar las mallas, se verificó la adecuada selección de la información empleando un conjunto de librerías de soporte del software R (e. g. la librería *ncdf* facilita la manipulación de los archivos netcdf; Pierce, 2014).

La Figura 2 presenta promedios multianuales anuales de precipitación y temperatura, contruidos con las series temporales de mapas interpolados de la base de datos UD-ATP para el norte de Suramérica. La base de datos UD-ATP ha sido validada con el trabajo de Fontalvo et al [5].



**Figura 2.** Cobertura espacial de la base de datos UD-ATP para el norte de Suramérica: Valores promedio multianuales anuales de (a) precipitación y (b) temperatura.

La utilización de la base de datos UD-ATP se soporta en que la información de las variables climatológicas en regiones como la Amazonía, y particularmente en Colombia, se caracteriza por ser incompleta, fragmentada y desactualizada, lo cual constituye una de las principales limitantes para el avance de las investigaciones en estas regiones. En Colombia, la cantidad y calidad de los registros de las estaciones es insuficiente y, por consiguiente, se encuentran zonas muy amplias con poca cobertura de mediciones en tierra. Entonces, es necesario recurrir a bases de datos, como la UD-ATP, para subsanar esos vacíos.

### 3. Metodología y resultados

#### 3.1. Evaluación del cambio de la precipitación y temperatura para Colombia

Se pretende evaluar la significancia del cambio de la temperatura y la precipitación para Colombia utilizando ventanas temporales (1901-1930, 1941-1970 y 1981-2010) y establecer, si existe, en qué mitad del siglo XX se presentó el mayor cambio de estas variables. Se calcularon entonces los valores promedios multianuales de las variables en cada una de las ventanas temporales, y se evaluó la significancia del cambio.

Para establecer si los cambios son estadísticamente significativos, se realiza una prueba de hipótesis bilateral para las medias de dos muestras independientes. Entre más pequeño sea el llamado *valor - p* de la prueba, más contradictorios serán los datos. Por lo tanto, si el *valor - p* es menor que el nivel de significancia seleccionado  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  (que las medias son iguales). Mediante el área acumulada  $\Phi(z)$ , con  $z$  siendo una variable normal estándar, se determina el *valor - p* a partir de la siguiente fórmula [4].

$$\text{valor} - p = 2(1 - \Phi|z|) \quad (1)$$

Por ejemplo, mostrar la significancia del cambio asociado con un valor de significancia  $\alpha = 0.10$ , implica que *valor - p*  $< 0.05$ , ó *valor - p*  $> 0.95$  (i. e.  $|z| > 1.64$ ). Se seleccionaron entonces diferentes valores de significancia ( $\alpha = 0.002, 0.02, 0.05$  y  $0.10$ ) para mostrar diferentes niveles en el contraste de los datos en los mapas.

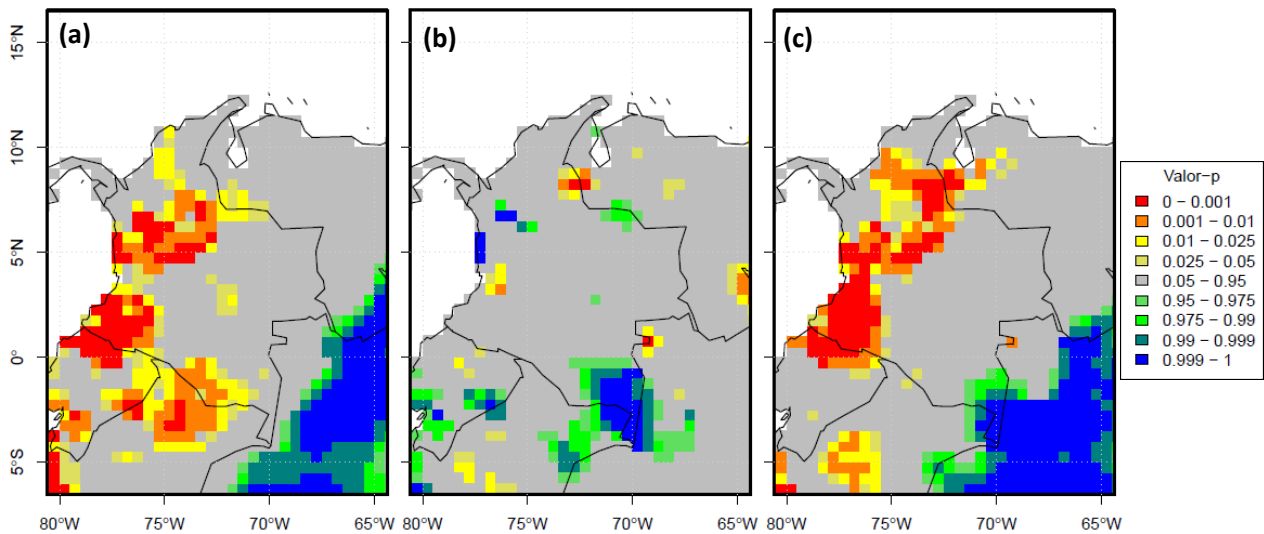
El cálculo anterior fue realizado en cada uno de los pixeles de la UD-ATP en Colombia, obteniéndose los mapas de significancia del cambio mostrados en la Figura 3 para precipitación, y en la Figura 4 para temperatura.

De la Figura 3(a), se observan aumentos significativos de la precipitación en la región de la

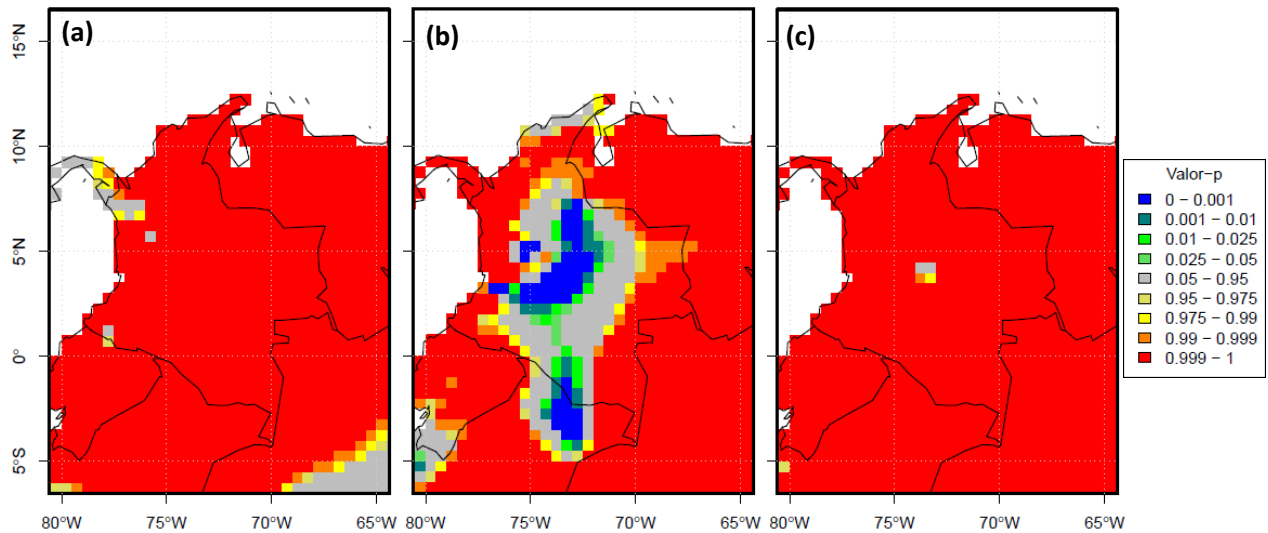
Amazonía (en límites con Brasil), y disminuciones significativas generalizadas en la zona Andina, la región de la Amazonía (en límites con Perú y Ecuador), y algunas zonas de la costa Atlántica. En la segunda mitad del siglo Figura 3(b), no se presentan cambios significativos de la precipitación, excepto el aumento reportado en el departamento del Amazonas y en algunas zonas de la cuenca del río Atrato; hay un descenso significativo de la precipitación en la cuenca del río Catatumbo y en el valle del río Cauca. En la comparación para todo el siglo Figura 3(c), se presentó un descenso significativo de la precipitación en amplias zonas de la región Andina, y en el sur de la región del Pacífico, mientras que aumento de la precipitación sólo se detectó en límites con Brasil, heredándose el patrón del cambio observado en la primera mitad del siglo.

Por otro lado, la evidencia estadística en la Figura 4 permite concluir que el cambio de la variable temperatura ha sido significativo en Colombia durante el siglo XX, con un mayor aumento de la temperatura durante la primera mitad del siglo Figura 4(a). En la segunda mitad del siglo XX Figura 4(b), no se presentaron aumentos significativos de la temperatura en la región Andina, pero si lo fue en los Llanos Orientales en límites con Venezuela y Brasil, en toda la costa Pacífica el país, y en amplias regiones de la costa Atlántica.

Sin embargo, la zona central del país reporta descensos de la temperatura durante este periodo, especialmente significativos sobre el altiplano de la Cordillera Oriental. Nuevamente, el cambio reportado para todo el siglo Figura 4(c), hereda los cambios presentados en las dos mitades del siglo XX; de esta figura se concluye que todo el país ha experimentado un aumento significativo de la temperatura, que seguramente ha impactado el ciclo hidrológico de las cuencas.



**Figura 3.** Mapas del valor-p del cambio en la precipitación para (a) la primera mitad del siglo XX, (b) la segunda mitad del siglo XX, y (c) para todo el periodo analizado. Los colores cálidos (valor-p < 0.05) indican disminución significativa de la precipitación, mientras que los colores fríos (valor-p > 0.95) indican aumento significativo de la variable.



**Figura 4.** Mapas del valor-p del cambio en la temperatura para (a) la primera mitad del siglo XX, (b) la segunda mitad del siglo XX, y (c) para todo el periodo analizado. Los colores cálidos (valor-p > 0.95) indican aumento significativo de la temperatura, mientras que los colores fríos (valor-p < 0.05) indican disminución significativa de la variable.

### 3.2. Evaluación del cambio de la precipitación y temperatura al interior de las cuencas

Delimitadas las cuencas, se calculó el valor promedio de las variables precipitación y temperatura para cada mes en el periodo 1900-2010 (i. e. un valor de precipitación y/o temperatura al interior de la cuenca

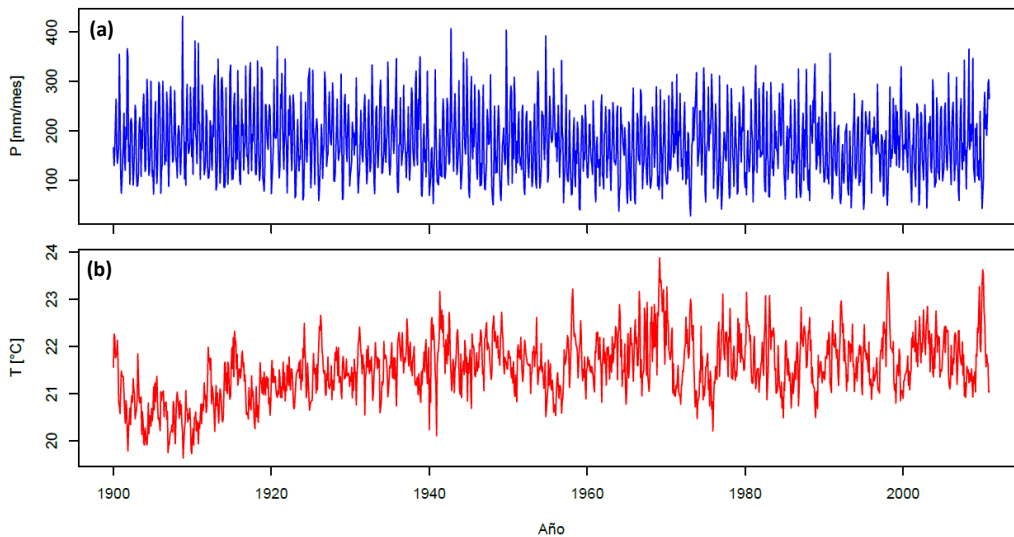
de cada uno de los mapas de la base de datos UD-ATP). Este procedimiento se facilitó al utilizar programación de *script-bash* para automatizar las órdenes de comandos GRASS-GIS. Un ejemplo de las series temporales así obtenidas se presenta en la

Figura 5 para la cuenca del río Magdalena. De igual manera se obtuvieron las series temporales para las

demás cuencas analizadas (las cuales no son presentadas).

Luego de obtener las series temporales de precipitación y temperatura en cada cuenca, se calcularon los cambios de las variables entre las ventanas temporales de 30 años definidas anteriormente. Se construyeron entonces los ciclos anuales de las variables, junto con los intervalos de confianza, calculando el valor promedio multianual mensual, y la desviación estándar alrededor de este valor.

Los ciclos anuales de la precipitación y la temperatura al interior de las cuencas analizadas se presentan en la Figura 6 y Figura 7 respectivamente. En cuanto a la precipitación, se observa que las cuencas del río Atrato, Caquetá y Guaviare no presentan cambios significativos en los valores de precipitación entre las ventanas temporales. Sin embargo, las cuencas del Cauca, Magdalena y, especialmente, la del río Patía, presentan valores de precipitación significativamente más altos en el periodo 1901-1930. Ninguna cuenca presenta cambios de precipitación estadísticamente significativos en la segunda mitad del siglo XX.



**Figura 5.** Series de tiempo de (a) precipitación promedio para cada mes, y (b) temperatura promedio para cada mes, extraídos al interior de la cuenca del río Magdalena, en el periodo 1900-2010

Por otro lado, los cambios en la temperatura si son significativos, incluso entre las tres ventanas temporales analizadas. Para todas las cuencas, la

temperatura del periodo 1901-1930 es más baja que en el resto de periodos analizados. Además, las cuencas del Pacífico (Atrato y Patía) presentan ciclos

en el periodo 1941-1970 con valores sensiblemente menores de temperatura que en el periodo 1981-2010. Esta situación también se presenta en la cuenca el río Caquetá, pero sólo durante los meses del segundo semestre del año. En el resto de cuencas (Cauca, Guaviare y Magdalena), no se presentan cambios significativos de temperatura para la segunda mitad del siglo XX; sin embargo, debe tenerse en cuenta la distribución espacial del cambio que se presenta en la Figura 4(b), donde se observan cambios significativos de ambos signos al interior de las cuencas anteriormente mencionadas.

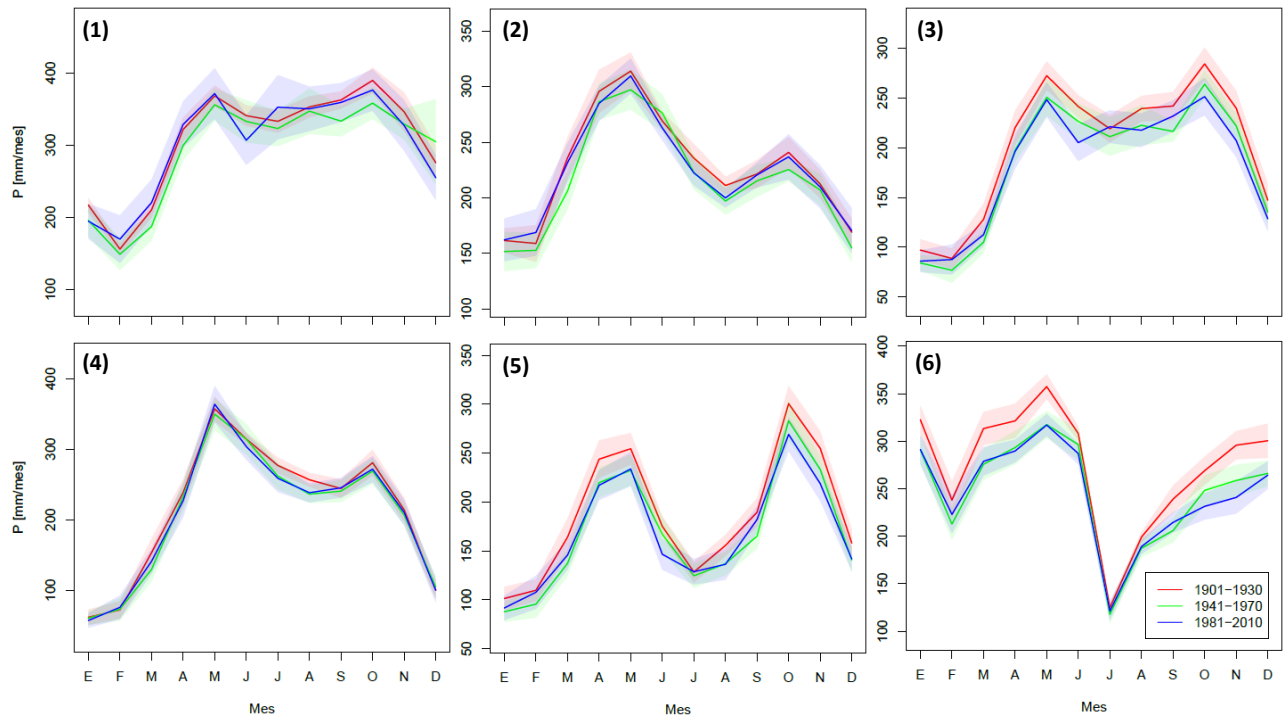
### 3.3. Relación entre los cambios de precipitación y temperatura

Al interior de cada una de las cuencas se calcularon los valores promedios de cambio de las variables, basados en los valores de precipitación promedio multianual presentados en la 0, y temperatura promedio multianual de la Tabla 3, calculados en las ventanas temporales consideradas. En ambas tablas se presenta además el valor de la desviación estándar de la variable para cada periodo analizado.

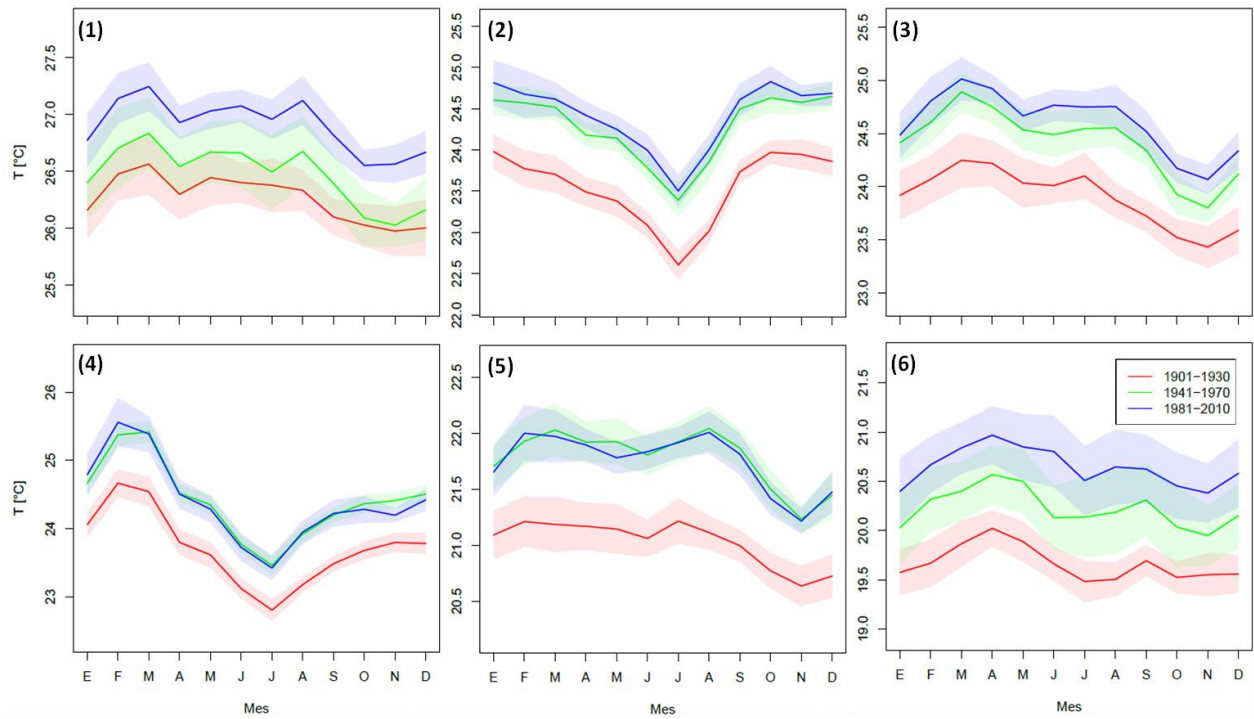
**Tabla 2.** Precipitación promedio multianual anual ( $\bar{P}$ ; cm/mes), junto con la desviación estándar alrededor de este valor ( $s_p$ ; cm/mes), calculadas en las cuencas analizadas y en cada una de las ventanas temporales consideradas.

#	Cuenca	1901-1930		1941-1970		1981-2010	
		$\bar{P}$	$s_p$	$\bar{P}$	$s_p$	$\bar{P}$	$s_p$
1	Atrato	305.0	83.2	295.6	103.9	301.4	112.2
2	Caquetá	226.2	61.3	217.3	63.4	223.7	63.0
3	Cauca	201.4	75.9	186.5	74.2	184.1	73.9
4	Guaviare	213.4	100.3	207.5	101.4	208.7	103.5
5	Magdalena	185.9	72.7	169.3	69.9	169.9	68.4
6	Patía	273.4	73.5	247.9	67.8	246.7	64.1





**Figura 6.** Ciclo anual de la precipitación al interior de las cuencas analizadas: (1) Atrato, (2) Cauca, (3) Caquetá, (4) Guaviare, (5) Magdalena y (6) Patía. La línea continua indica el promedio multianual mensual calculado en las ventanas temporales, junto con el intervalo de confianza del 95% (polígonos sombreados).



**Figura 7.** Igual que la Figura 6, pero para la variable temperatura.

Con respecto a los resultados de la precipitación, se observa un descenso de la variable en la primera mitad del siglo XX en todas las cuencas, el cual es más notable en las cuencas del Cauca, Magdalena y Patía. Sin embargo, estos descensos en los valores de la precipitación no se presentan durante la segunda mitad del siglo XX, pues se observa un aumento de la precipitación en todas las cuencas (excepto las cuencas del Cauca y el Patía, que no cambian significativamente el valor de la precipitación).

Los resultados de la temperatura muestran aumentos significativos de esta variable en todas las cuencas entre 1901-1930 y 1941-1970. Sin embargo, la tasa de estos incrementos disminuye durante la segunda mitad del siglo XX, excepto para las cuencas del Pacífico (Atrato y Patía) que presentan los mayores incrementos en este periodo; no obstante, para todas las cuencas el cambio de temperatura es significativo, excepto para Guaviare y Magdalena.

Finalmente, se presenta en la Figura 8, la relación entre los cambios de precipitación y temperatura en las cuencas analizadas. Durante la primera mitad del siglo Figura 8(a), todas las cuencas presentaron aumentos significativos de la temperatura anual, y descensos significativos de la precipitación anual.

**Tabla 3.** Igual que la 0, pero para la temperatura promedio multianual anual ( $\bar{T}$ ; °C), y la desviación estándar alrededor de este valor ( $s_T$ ; °C).

#	Cuenca	1901-1930		1941-1970		1981-2010	
		$\bar{T}$	$s_T$	$\bar{T}$	$s_T$	$\bar{T}$	$s_T$
1	Atrato	26.3	0.63	26.5	0.82	26.9	0.56
2	Caquetá	23.5	0.63	24.3	0.62	24.4	0.68
3	Cauca	23.9	0.61	24.4	0.57	24.6	0.57
4	Guaviare	23.7	0.67	24.4	0.66	24.4	0.85
5	Magdalena	21.0	0.55	21.8	0.56	21.8	0.56
6	Patía	19.7	0.56	20.2	0.98	20.8	1.03

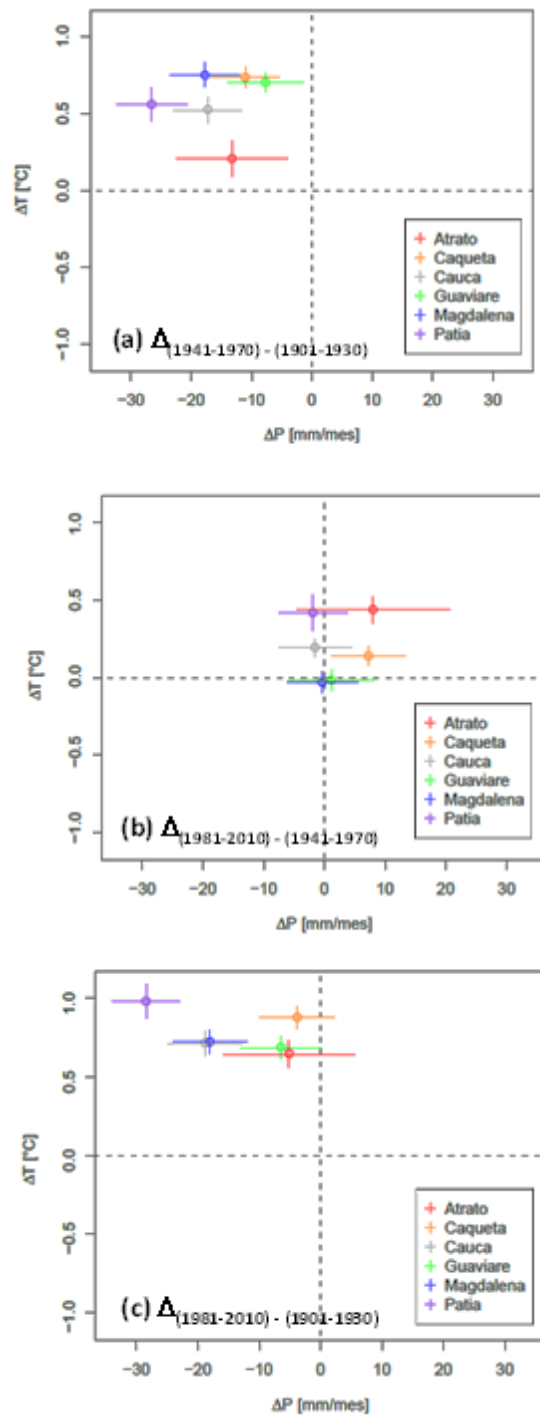
A los resultados de la segunda mitad del siglo Figura 8(b), hay que prestarles especial atención, ya que corresponden con los datos de mejor calidad de la base de datos UD-ATP (es natural pensar que se contaba con mayor cantidad de estaciones y con mejores instrumentos para realizar la interpolación

durante la segunda mitad del siglo). Se observa de esta gráfica que las cuencas del Guaviare y el Magdalena han mantenido sus valores medios de precipitación y temperatura. Aunque ninguna cuenca presenta cambios significativos de la precipitación, según la Figura 8(b), es notable el aumento de esta variable para el Atrato y el Caquetá. Finalmente, debe anotarse que el aumento de la temperatura en las cuencas del Pacífico es el mayor durante este periodo; según estos resultados, estaría del orden de 0.1 °C/década en estas cuencas.

## 2. Conclusiones

El presente estudio ha realizado una evaluación del cambio de la precipitación y la temperatura al interior de varias cuencas importantes de Colombia, utilizando la base de datos UD-ATP. Se observó que los cambios de temperatura (incremento) y precipitación (descenso), fueron especialmente importantes durante la primera mitad del siglo XX. Para la segunda mitad del siglo XX, el patrón de cambio de la precipitación al interior de las cuencas es no significativo, pero si es significativo el aumento de la temperatura para cuatro de las cuencas analizadas (Atrato, Caquetá, Cauca y Patía).

En el caso anterior, debe tenerse en cuenta que los resultados de la interpolación de las variables de la base de datos UD-ATP es más confiable durante la segunda mitad del siglo XX, donde es natural pensar que alrededor del mundo existían más y mejores instrumentos para la medición de las variables hidrológicas y climáticas. Es de especial cuidado, entonces, el aumento de la temperatura en las cuencas del Pacífico, el cual podría estar inducido por su cercanía al Océano Pacífico, y por consiguiente a toda la influencia de la fase cálida del ENSO.



**Figura 8.** Relación entre los cambios de precipitación y temperatura en las cuencas de estudio para (a) la primera mitad del siglo XX, (b) la segunda mitad del siglo y (c) la totalidad del periodo de análisis. El círculo muestra la ubicación del valor de cambio de las variables, junto con el intervalo de confianza del 95% representado por las líneas.

De acuerdo con los mapas de cambio mostrados, se ha presentado un descenso generalizado de la

precipitación en todo el país durante la primera mitad del siglo XX, acompañado de un aumento de la temperatura en el mismo periodo. Sin embargo, la segunda mitad del siglo XX presentó descensos de la temperatura en la región central de Colombia, y aumentos de la misma ubicados en las fronteras del país, que no se vieron acompañados por tendencias generalizadas de la precipitación (excepto por el aumento reportado en el extremo sureste de la región de la Amazonía). En general, se observa que la región Andina, el sur de la región Pacífica y amplias zonas de la costa Atlántica se han visto afectadas por el aumento de la temperatura (usual para todo el país), y disminución de la precipitación durante el siglo XX, mientras que los Llanos Orientales y la mayor parte de la región de la Amazonía no presentan tendencias significativas de la precipitación.

No se observó un cambio en la estructura de los ciclos anuales de las variables al interior de las cuencas (e. g. para la cuenca del Magdalena los picos anuales de precipitación se presentan en mayo y octubre en todos los periodos analizados). Esta situación se repite en los ciclos de temperatura, donde los meses más “fríos” (o más cálidos), son los mismos en todas las ventanas temporales y para todas las cuencas consideradas.

Para trabajos futuros, se espera incluir la variable caudal en los análisis. Al hacerlo, se podrá estimar la variabilidad conjunta de precipitación-temperatura-caudal y se podrá concluir sobre la sensibilidad de la escorrentía a cada una de las variables. Esta relación observada entre las tres variables, permitirá pronosticar el comportamiento de los caudales en las cuencas estudiadas frente a los cambios en la precipitación y la temperatura pronosticados por los modelos climáticos regionales.

## Referencias

1. Chen, Y., Takeuchi, K., Xu, C., Chen, Y., & Xu, Z. (2006). Regional climate change and its effects on river runoff in the Tarim Basin, China. *Hydrological Processes*, 20(10), 2207–2216. doi:10.1002/hyp.6200

2. Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P., & Palmer, R. N. (2004). The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, 62(1-3), 337–363. doi:10.1023/B:CLIM.0000013684.13621.1f
3. Danielson, J. J., & Gesch, D. B. (2011). Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) (Informe científico No. Open-File Report 2011–1073) (p. 26). U.S. Geological Survey. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1073/>
4. Devore, J. L. (2008). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (7a ed.). México D. F.: Cengage Learning Editores.
5. Fontalvo García, J. S., Santos Gómez, J. D., & Giraldo Osorio, J. D. (2014). Validating the University of Delaware's Precipitation and Temperature Database for Northern South America. DYNA, submitted.
6. Gutiérrez, F., & Dracup, J. A. (2001). An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño–Southern Oscillation indicators. *Journal of Hydrology*, 246(1–4), 181–196. doi:10.1016/S0022-1694(01)00373-0
7. Labat, D., Goddérís, Y., Probst, J. L., & Guyot, J. L. (2004). Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources*, 27(6), 631–642. doi:10.1016/j.advwatres.2004.02.020
8. Matsuura, K., & Willmott, C. (2012a, June). Terrestrial air temperature: 1900-2010 gridded monthly time series, version V3.01 [HTML web page]. Retrieved July 15, 2014, from [http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html)
9. Matsuura, K., & Willmott, C. (2012b, June). Terrestrial precipitation: 1900-2010 gridded monthly time series, version V3.01 [HTML web page]. Retrieved July 15, 2014, from [http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/Global2011/README.GlobalTsP2011.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsP2011.html)
10. Miller, J. R., & Russell, G. L. (1992). The impact of global warming on river runoff. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D3), 2757–2764. doi:10.1029/91JD01700
11. Milliman, J. D., Farnsworth, K. L., Jones, P. D., Xu, K. H., & Smith, L. C. (2008). Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global and Planetary Change*, 62(3–4), 187–194. doi:10.1016/j.gloplacha.2008.03.001
12. Milly, P. C. D., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347–350. doi:10.1038/nature04312
13. Nakaegawa, T., & Vergara, W. (2010). First Projection of Climatological Mean River Discharges in the Magdalena River Basin, Colombia, in a Changing Climate during the 21st Century. *Hydrological Research Letters*, 4, 50–54. doi:10.3178/hrl.4.50
14. Nash, L. L., & Gleick, P. H. (1991). Sensitivity of streamflow in the Colorado Basin to climatic changes. *Journal of Hydrology*, 125(3–4), 221–241. doi:10.1016/0022-1694(91)90030-L
15. Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2012). GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 31, 124–130. doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.014
16. Pfister, L., Kwadijk, J., Musy, A., Bronstert, A., & Hoffmann, L. (2004). Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine–Meuse basins. *River Research and Applications*, 20(3), 229–241. doi:10.1002/rra.775

17. Pierce, D. (2014). ncdf: Interface to Unidata netCDF data files (Version 1.6.7). Retrieved from <http://cran.r-project.org/web/packages/ncdf/index.html>
18. Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201–222.
19. Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–2702. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPTT>2.0.CO;2
20. Puertas Orozco, O. L., & Carvajal Escobar, Y. (2011). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 23(23), 104–118.
21. Stewart, I. T., Cayan, D. R., & Dettinger, M. D. (2004). Changes in Snowmelt Runoff Timing in Western North America under a 'Business as Usual' Climate Change Scenario. *Climatic Change*, 62(1-3), 217–232. doi:10.1023/B:CLIM.0000013702.22656.e8
22. Tucker, G. E., & Slingerland, R. (1997). Drainage basin responses to climate change. *Water Resources Research*, 33(8), 2031–2047. doi:10.1029/97WR00409
23. Zender, C. S. (2008). Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (NCO). *Environmental Modelling & Software*, 23(10-11), 1338–1342. doi:10.1016/j.envsoft.2008.03.004