

Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia)

Trends into rainfall time series of two andes basins of Valle del Cauca (Colombia)

Faisury Cardona-Guerrero¹, Álvaro J. Ávila-Díaz²,
Yesid Carvajal-Escobar³, Henry Jiménez-Escobar⁴

Recibido: 03 de julio de 2013,
Aceptado: 02 de diciembre de 2013

Como citar / How to cite

F. Cardona-Guerrero, A. J. Ávila-Díaz, Y. Carvajal-Escobar y H. Jiménez-Escobar, "Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia)", *Tecno Lógicas*, vol. 17, no. 32, pp. 85-95, 2014.

-
- 1 Ing. Agrícola, Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA, Universidad del Valle, Cali-Colombia, faisury.cardona@correounivalle.edu.co
 - 2 Ing. Agrícola, Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA, Universidad del Valle, Cali-Colombia, alvaro.avila@correounivalle.edu.co
 - 3 Ph.D. en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR, Director del Grupo IREHISA. Universidad del Valle, Cali-Colombia, yesid.carvajal@correounivalle.edu.co
 - 4 M.Sc. en Ing. Agrícola, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR, Universidad del Valle, Cali-Colombia, henry.jimenez@correounivalle.edu.co



Resumen

Con el objetivo de detectar cambios o tendencias en la precipitación diaria registrada en las cuencas hidrográficas de los ríos Dagua y Cali, ubicadas al Sur-Occidente colombiano en el Valle del Cauca, se calcularon nueve índices de extremos climáticos utilizando el programa RCLimDex. Para esto, se analizaron las tendencias de precipitación en 18 estaciones pluviométricas localizadas en la zona de estudio, con series históricas diarias que oscilaron entre los 21 y 56 años. Los datos fueron sometidos previamente a pruebas de homogeneidad para garantizar consistencia en la información. Los resultados indican cambios en la precipitación, dominados por tendencias crecientes para casi todos los índices; sin embargo la mayoría de las tendencias no presentan alta significancia estadística. Así mismo, se obtuvo un incremento significativo de la precipitación total anual promedio de 15,2 mm (cuenca río Dagua) y 9,1 mm (cuenca río Cali), en las estaciones ubicadas por debajo de los 1500 msnm; de otro lado, en las estaciones ubicadas a mayor altura, se presentan disminuciones. Hay una distribución espacial homogénea para la mayoría de los índices y se observan patrones similares localizados en áreas delimitadas de la zona de estudio, que posiblemente afectarán la producción de escorrentía en las cuencas en los próximos años.

Palabras clave

Cuenca del río Cali, cuenca del río Dagua, índices climáticos, RCLimDex, tendencias de precipitación.

Abstract

With the goal of detecting changes or trends in registered data of daily rainfall in the basins of rivers Dagua and Cali, located in the south-west of Colombia, in the Valle del Cauca, nine climate extremes indices were calculated using the RCLimDex software. For this, precipitation trends were analyzed in 18 rain gauges located in the study area with historical series ranging between 21 and 56 years. Homogeneity tests were made to data to ensure consistency in the information. The results show changes in rainfall, dominated by the increasing trends for almost all indices; however most of the trends do not show high statistical significance. Also, a significant increase in the average annual total rainfall of 15.2 mm (Dagua river basin) and 9.1 mm (Cali river basin) in the stations located below 1500 msnm was obtained. Moreover, in the stations located at higher elevations, decreases were observed. There is a homogeneous spatial distribution for the most of the indices and similar patterns were found located in defined areas of the study zone, which may affect the runoff production in watersheds in the coming years.

Keywords

Cali river basin, climate indices, Dagua river basin, precipitation trends, RclimDex.

1. INTRODUCCIÓN

La Variabilidad Climática (VC) y el Cambio Climático (CC) están generando frecuentes anomalías de precipitación [1] que impactan de manera negativa en ecosistemas y sectores socioeconómicos del país, con pérdidas de vidas humanas, de bienes, migraciones masivas, degradación ambiental, escasez de alimentos, energía, agua y otras necesidades básicas [2]. De acuerdo con Vázquez [3], se debe tener en cuenta que a mayor conocimiento de las variaciones locales del clima, mayor es también el potencial de construir e implementar capacidades adaptativas a la VC y el CC.

Autores como Vincent [1] y Haddad [4] en sus investigaciones concluyen que los eventos de origen hidrometeorológico aumentarán en magnitud y frecuencia, impactando principalmente a los países en desarrollo y causando cambios profundos en el ambiente, que terminan provocando consecuencias que perjudican al ser humano y su entorno. Los cambios en las precipitaciones diarias extremas se han identificado en muchos estudios llevados a cabo a nivel local, regional o escala mundial [5].

El CC se ha convertido en uno de los temas más analizados de la comunidad académica, principalmente a causa de los numerosos eventos extremos que azotan el planeta. Para tener una mejor visión del CC y VC, es necesario estudiar los cambios en la precipitación a escala diaria y realizar observaciones a las series de datos históricos [6], [7]. En el marco de los estudios de los fenómenos climáticos es necesario consolidar una serie de datos climáticos diarios históricos, lo suficientemente consistentes y homogéneos, para realizar una caracterización real y confiable, además de calcular la tendencia que presentan las variables climáticas (temperatura, precipitación, etc.), ante dichos fenómenos.

En este estudio, una vez que se obtuvieron estos datos diarios históricos, se proce-

dió a calcular índices de extremos climáticos en dos cuencas hidrográficas del Valle del Cauca, con el objetivo de analizar las tendencias de precipitación, mediante el programa RClimDex 2.12.2. Este programa fue desarrollado por el Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá, es de libre acceso y trabaja con información diaria tanto de precipitación como de temperaturas mínimas y máximas; se debe contar con un registro amplio de información, tomando series de datos históricos con un porcentaje bajo de datos faltantes.

Aunque el programa puede ejecutarse con algunos años o datos faltantes; requiere, información más completa para contar con una alta significancia estadística en sus resultados. El programa calcula 27 índices de extremos climáticos relacionados con la precipitación (11 índices) y la temperatura (16 índices), recomendados por el equipo de expertos de CCI/CLIVAR para Climate Change Detection Monitoring and Indices [8]. Este conjunto de índices permite que su cálculo sea realizado de la misma manera internacionalmente, a fin de integrar los índices de diferentes regiones donde los estudios del clima a nivel local son de gran importancia, aunque implica un mayor nivel de detalle [3]; además estos permitirán analizar tendencias en los datos climáticos históricos a nivel local, con el fin de comprender el posible impacto del cambio climático en regiones específicas.

Las cuencas hidrográficas en estudio fueron, por un lado, la cuenca del río Dagua (ver Fig. 1), que es estratégica en la inserción económica de Colombia, mueve alrededor del 60% del comercio del país; sin embargo presenta un deterioro progresivo que afecta la economía, la sociedad y los recursos naturales [9], con alta producción de sedimentos debido a los deslizamientos y alta erosión que se presentan. Por otro lado, la cuenca del río Cali (ver Fig. 1) que hace parte del Parque Natural Farallones de Cali, tercero más importante de los Andes americanos por su alta biodiversi-

dad y especies endémicas. Su río principal aporta más del 20% del recurso hídrico para el sistema de abastecimiento de agua potable en el municipio de Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca. La metodología aplicada en este estudio ha sido utilizada por diferentes autores en [5], [10]-[14], , y permite, mediante el uso de los índices de extremos climáticos, aplicar las definiciones y realizar un análisis comparativo de VC de manera estandarizada, con el objetivo de que la información generada pueda ser utilizada como insumo a proyectos de adaptación y mitigación ante los efectos negativos de los fenómenos hidrometeorológicos en cuencas torrenciales andinas.

oscila entre los 800 mm - 1600 mm anuales; en general las precipitaciones son mayores en la zona baja en comparación, con la zona alta, presentando comportamiento monomodal y bimodal, respectivamente. En la cuenca del río Cali (Fig. 1B) la precipitación presenta un comportamiento bimodal, con una precipitación anual que oscila entre 1300 mm en la parte oriental, cerca de la ciudad de Cali, y unos 2700 mm en los nacimientos a una altura cercana a los 3600 msnm. En general la precipitación de ambas zonas es de tipo orográfica y la influencia de los vientos húmedos provenientes del Océano Pacífico, hace que en las zonas estudiadas la lluvia media anual este por encima de los 2000 mm.

En la Tabla 1 se muestran las principales características fisiográficas de la zona de estudio tales como área, posición, orientación, forma, pendiente media del cauce y de las cuencas.

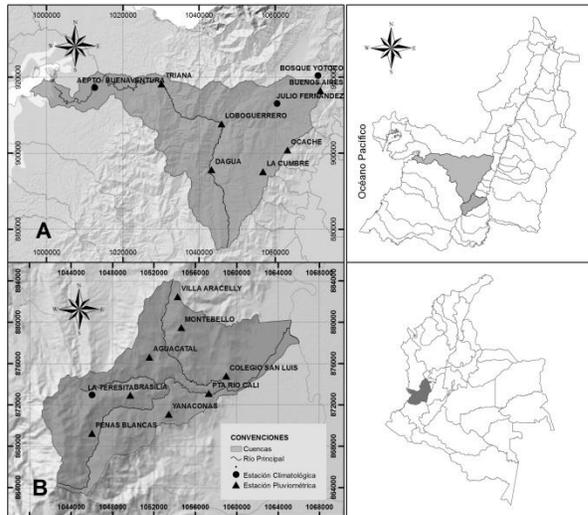


Fig. 1. Localización de la zona de estudio: Cuenca del río Dagua y Cuenca del río Cali. Fuente: Autores

1.1 Descripción de la zona de estudio

Las cuencas hidrográficas de los ríos Dagua y Cali (Fig. 1) se encuentran ubicadas al Occidente del departamento del Valle del Cauca, en el Pacífico centro Colombiano, en la vertiente Occidental y Oriental de la Cordillera Occidental, respectivamente. En la Fig. 1A, se observa la cuenca del río Dagua, la cual presenta una precipitación total anual entre 2000 mm - 8000 mm en la zona baja (Oeste), mientras que en la zona alta (Este) la precipitación

Tabla 1. Caracterización Fisiográfica del área de estudio. Fuente: Autores

Parámetro	Cuenca	
	Dagua	Cali
Área (ha)	142299	22549
Longitud del cauce (km)	127,30	40,08
Perímetro (km)	256,26	98,32
Nacimiento-altura (m)	2000	3652
Desembocadura-altura (m)	0	948
Pendiente media de la cuenca (%)	0,36	0,40
Pendiente del cauce principal (%)	1,57	0,06
Elevación media (msnm)	1950	1712
Factor de forma	0,23	0,19
Densidad de drenaje (km/km ²)	2,48	2,36
Coefficiente de Compacidad (Kc)	1,92	1,46
Tiempo de concentración (Tc=h)	3,30	1,83
Precipitación media anual (mm)	2307	2042
Desembocadura	Vertiente Océano Pacífico	Río Cauca

La evaluación de los anteriores parámetros morfométricos (ver Tabla 1) indican que son cuencas torrenciales. Permitiendo establecer por medio del factor de forma que son áreas alargadas, hecho que influye

de manera directa en la eficiencia de la red de drenaje al momento de evacuar las aguas lluvias de excesos, disminuyendo en magnitud la formación de una creciente en el cauce principal y en los ríos que la drenan, al mismo instante, en que aumenta el Tc de los volúmenes de agua que llegan a ella, mejorando en gran medida la eficiencia en la red de drenaje. Lo anterior genera grandes volúmenes de escurrimiento, al igual que mayores velocidades de desplazamiento; al ser alta la densidad de drenaje, una gota de lluvia deberá recorrer una longitud de ladera pequeña, realizando la mayor parte del recorrido a lo largo de los cauces, donde la velocidad de escorrentía es mayor [15]; por lo tanto, los hidrogramas de ambas cuencas tienen un tiempo de concentración corto lo que concuerda con estudios realizados en [16], [17].

2. METODOLOGÍA

Se realizó una selección de estaciones pluviográficas y pluviométricas de acuerdo a criterios de ubicación, tiempo de registro y vigencia de funcionamiento, con estaciones que se encontraban dentro y cercanas a las cuencas. Finalmente se seleccionaron 18 estaciones en total para la zona de estudio; su ubicación se puede observar en la Fig. 1. Para la investigación se realizó la recopilación de información, a partir de las estaciones representativas de la zona de estudio, de acuerdo a los criterios mencionados anteriormente. La información fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, la Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca - CVC y el Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFÉ. Debido a los requerimientos del programa se utilizaron series de datos históricos de precipitación diaria, en un periodo que oscila entre 21 y 56 años, dependiendo del registro histórico de cada estación, hasta el año 2010. Se decidió trabajar con las series históricas completas

de cada estación, es decir, el registro histórico con el que se trabajó es diferente para cada una de ellas.

En la Tabla 2 se encuentra la lista de estaciones seleccionadas para cada una de las cuencas hidrográficas, además sus características de ubicación.

Tabla 2. Información de las estaciones. Fuente: Autores

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	*Periodo
Cuenca hidrográfica del río Dagua				
Providencia	3°38'	76°42'	1975	1975-2010
Bosques de Yotoco	3°53'	76°26'	1700	1982-2010
La Cumbre	3°28'	76°33'	1601	1999-2010
Buenos Aires	3°51'	76°27'	1566	1971-2010
Ocache	3°42'	76°37'	1541	1989-2010
Julio Fernández	3°49'	76°32'	1385	1955-2010
Dagua	3°40'	76°41'	898	1986-2010
Loboguerrero	3°45'	76°40'	702	1972-2010
Triana	3°51'	76°48'	199	1987-2010
Aeropuerto Buenaventura	3°51'	76°58'	32	1963-2010
Cuenca hidrográfica del río Cali				
Peñas Blancas	3°25'	76°40'	2158	1973-2010
Villa Aracelly	3°31'	76°37'	2040	1986-2010
La Teresita	3°27'	76°40'	1950	1974-2010
San Pablo	3°31'	76°37'	1871	1970-2010
Brasilia	3°26'	76°39'	1864	1965-2010
Yanaconas	3°26'	76°36'	1730	1990-2010
Aguacatal	3°29'	76°37'	1649	1970-2010
Montebello	3°29'	76°33'	1260	1969-2010
Planta Río Cali	3°26'	77°03'	1070	1952-2010
Colegio San Luis	3°28'	76°33'	1053	1954-2010

*Periodo seleccionado para el estudio

2.1 Control de calidad y prueba de homogeneidad de la información de precipitación

De acuerdo a indicaciones hechas por autores en [3], [13], [18], la información diaria se inspeccionó visualmente, donde se identificaron datos atípicos como valores de precipitación negativos. Se realizó un control de calidad, como paso previo al cálculo de los índices, por medio del programa RClimDex, el cual es otra función de dicho programa; esto con el fin de identificar series inconsistentes o con saltos abruptos en las series, donde se identificaron y verificaron valores máximos. De igual manera se realizó una prueba de homogeneidad para detectar puntos de cambio en las

series analizadas, éstos cambios pueden ser debidos a modificaciones en la forma de recolectar los datos, cambios de sensores en las estaciones, reubicación de la estación, etc. que en algunos casos pueden ser atribuibles a variaciones o cambios climáticos [19].

2.2 Cálculo de tendencias de precipitación

Con el objetivo de identificar tendencias en las series históricas de precipitación en la zona de estudio, se calcularon 9 índices de extremos climáticos asociados a la precipitación, por medio del programa RClimDex para la zona de estudio. Los índices se calcularon de manera puntual, es decir, para cada una de las estaciones ubicadas en las cuencas hidrográficas. En la Tabla 3 se pueden identificar los índices calculados con su respectiva definición.

Tabla 3. Definición de los 9 índices de asociados al comportamiento de precipitación. Fuente: [8]

Índice	Definición	Unidad
R20	Número de días en un año con precipitación ≥ 20 mm	Día
R50	Número de días en un año con precipitación ≥ 50 mm	Día
CWD	Mayor número de días consecutivos en un año con lluvias ≥ 1 mm	Día
CDD	Mayor número de días consecutivos en un año con lluvias ≤ 1 mm	Día
Rx1day	Cantidad máxima de lluvia en 1 día	mm
Rx5day	Cantidad máxima de lluvia en 5 días consecutivos en un año	mm
PRCPTOT	Lluvia total anual	mm
R95p	Cantidad total precipitación mayor al percentil 95 en un año	mm
R99p	Cantidad total de precipitación mayor al percentil 99 en un año	mm

Al obtener la tendencia de cada uno de los índices seleccionados, se pretende adquirir conocimiento sobre el comportamiento de la precipitación a lo largo de un periodo histórico de tiempo, que a su vez sigue una tendencia, la cual posiblemente se prolongará a futuro. Calcular y analizar estas tendencias es relevante para conocer las causas y posibles consecuencias de la variabilidad climática, además de identificar patrones geográficos de aumento y decremento de la precipitación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se seleccionaron 20 estaciones para las dos cuencas, sin embargo debido a los resultados obtenidos en la prueba de homogeneidad se decidió descartar dos estaciones, las cuales fueron Providencia y San Pablo, pues presentaron cambios abruptos a lo largo de la serie de datos, esto se pudo identificar en control de calidad y la prueba de homogeneidad realizados previamente.

En la Tabla 4 se muestra la tendencia de cada uno de los índices calculados, para las 18 estaciones seleccionadas finalmente, dichas tendencias pueden ser positivas o negativas, lo que indica el incremento o disminución anual, respectivamente, que presentan cada uno de los índices. Las tendencias cuentan con significancia estadística, se decidió que serían más representativos los índices con significancia hasta el 90%, debido a que muestran el estado de la información histórica de las estaciones; estos se encuentran resaltados en cursiva en la Tabla 4.

Al no detectar una tendencia con significancia estadística alta, no indica que dicha tendencia no sea válida o que no haya probabilidad de que algún cambio se presentó en la variable, solo que la información o las series de datos no fueron lo suficientemente robustas para identificar los cambios de forma estadísticamente significativa [20], por lo tanto estos resultados no fueron descartados, y se analizaron de igual manera.

Las Fig. 2 y Fig. 3 muestran la distribución espacial de las tendencias de los índices R20, R50, CWD y CDD, los cuales son calculados por el RClimDex a partir de un umbral fijo, definido por el programa. El número de días con precipitaciones ≥ 20 mm (R20) en la cuenca del río Dagua, en la mayoría de las estaciones (67%, de las estaciones ubicadas en la cuenca), tienden a disminuir en 0,1 día/año y 0,3 día/año, es decir, de 1 y 3 años por década.

Tabla 4. Tendencias de los índices de extremos climáticos. Fuente: Autores

Estaciones	R20	R50	CWD	CDD	Rx1d	Rx5d	PRCPTOT	R95p	R99p
Bosques de Yotoco	-0,09	-0,06	0,04	0,14	0,46	-0,22	-4,58	-3,50	-1,72
La Cumbre	-0,12	-0,14	0,22	-0,98	-1,44	-0,74	-7,70	-16,53	-9,76
Buenos Aires	-0,05	0,05	0,13	-0,09	-0,34	-0,29	4,16	-3,03	-0,44
Ocache	-0,32	0,02	0,05	0,08	-0,66	-1,16	-6,79	-12,58	-4,13
Julio Fernández	0,11	0,03	0,06	0,01	0,16	0,28	3,80	2,63	0,75
Dagua	0,08	0,05	0,04	0,22	0,23	-0,44	5,50	4,01	-0,21
Loboguerrero	0,14	0,08	0,03	0,07	0,85	0,61	4,52	1,53	2,36
Triana	-0,27	0,10	0,01	0,09	-1,32	-4,37	26,59	12,31	7,56
Aeropuerto B/ventura	-0,08	0,24	0,18	-0,09	0,97	1,77	27,22	27,48	12,56
Peñas Blancas	0,30	0,09	0,05	-0,09	0,05	0,99	12,24	11,28	3,51
La Teresita	-0,50	0,07	-0,06	-0,27	0,17	-0,69	-16,00	1,84	2,40
Brasilia	0,04	0,05	0,02	-0,05	0,22	0,20	-0,47	2,72	2,08
Yanaconas	0,60	0,04	0,29	-0,94	-0,94	-0,60	27,75	-2,81	-3,13
Planta Río Cali	0,21	0,05	0,04	0,01	0,57	0,57	10,20	5,91	2,77
Colegio San Luis	0,14	0,06	0,06	0,07	0,40	0,10	7,93	3,40	1,68
Villa Aracelly	0,09	0,05	0,38	0,05	0,33	0,70	6,94	-0,68	-0,08
Montebello	-0,05	0,01	0,05	0,04	0,27	0,35	0,44	0,68	1,31
Aguacatal	-0,07	0,05	-0,07	0,10	0,25	-0,68	-2,00	1,82	0,68

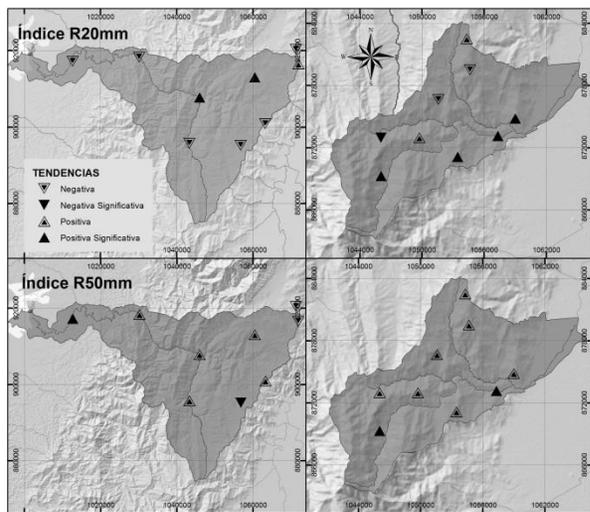


Fig. 2. Distribución espacial de los índices R20mm y R50mm. Fuente: Autores

Estas tendencias se presentaron hacia el Sur y el Oeste de la cuenca, sin embargo se pueden observar tendencias positivas significativas en el Centro y Nor-Este de la cuenca con incrementos de 0,1 día/año. Mientras que en la cuenca del río Cali predominaron las tendencias al incremento (67% de las estaciones ubicadas en la cuenca), y se pueden observar tendencias significativas localizadas hacia el Este de la cuenca con un incremento promedio de 0,3 día/año. Los días con precipitaciones ≥ 50 mm (R50) tienden a incrementarse en las

dos cuencas, donde el 67% y 100% de las estaciones presentaron tendencias positivas en las cuencas del río Dagua y Cali, respectivamente. En la cuenca del río Cali las tendencias a días con lluvias mayores a 50 mm incrementan en promedio 0,1 día/año.

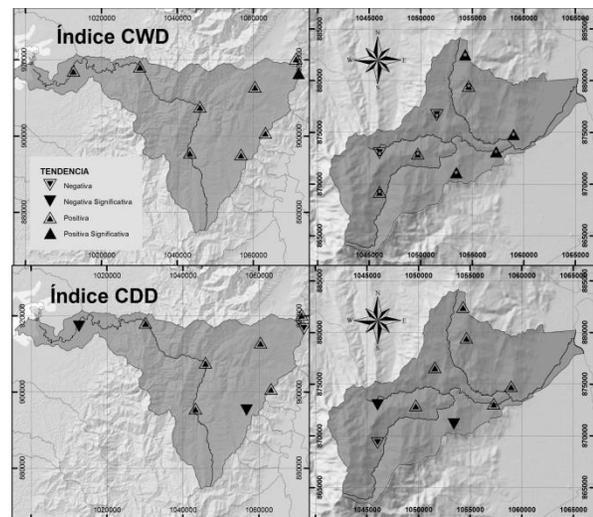


Fig. 3. Distribución espacial de los índices CDD y CWD. Fuente: Autores

En cuanto al índice CWD (ver Fig. 3) que hace referencia a la cantidad de días acumulados con lluvia ≥ 1 mm, para las dos cuencas hidrográficas se puede observar mayor presencia de tendencias posi-

vas o al incremento anual, con valores que oscilan entre de 0,1 días - 0,4 días, hacia el Centro de la cuenca del río Dagua y tendencias significativas al Oeste de la cuenca del río Cali, lo cual indica que existe tendencia a un periodo prolongado de lluvia, que posiblemente genere eventos hidrometeorológicos extremos. Los días secos consecutivos o con lluvia ≤ 1 mm (CDD), presentaron concentración de tendencias al incremento en el norte de la cuenca del río Cali en estaciones ubicadas a 1050 msnm y 1650 msnm y Centro de la cuenca del río Dagua en estaciones en la zona alta; no obstante se presentaron decrementos significativos en algunas zonas como al Oeste de la cuenca Dagua donde se encuentra el área más lluviosa de esta cuenca y al Sur de la cuenca Cali.

En la Fig. 4 se puede observar la distribución espacial de las tendencias de los índices Rx1day, Rx5day y PRCPTOT, dichos índices son calculados sin establecer un umbral, pues el RClimDex toma en cuenta los valores registrados de precipitación y su intensidad. La cantidad máxima de precipitación en 24 (Rx1day) en la cuenca del río Dagua presentó tendencias significativas en el 44% de las estaciones, y se observan tendencias positivas en el Centro y Oeste de la cuenca, mientras que hacia el Este, cerca de la parte aguas, las tendencias fueron negativas. En la cuenca del río Cali, en general, las precipitaciones máximas diarias presentaron tendencias en las series históricas, a incrementarse anualmente entre 0,1 mm - 0,6 mm.

En las dos cuencas se presentan tendencias similares en la mayoría de las estaciones para la lluvia máxima en 24 horas (Rx1day) y la lluvia acumulada en 5 días consecutivos. Se detectaron cambios estadísticamente significativos sobre la precipitación total anual (PRCPTOT) en el 33% del total de las estaciones y se pudo determinar que existe un incremento promedio equivalente a 15,2 mm/año y 14,5 mm/año para las cuencas Dagua y Cali, respectivamente, en estaciones ubicadas

por debajo de los 1500 msnm hacia el Nor-Oeste de la cuenca Dagua y al Nor-Este de la cuenca Cali.

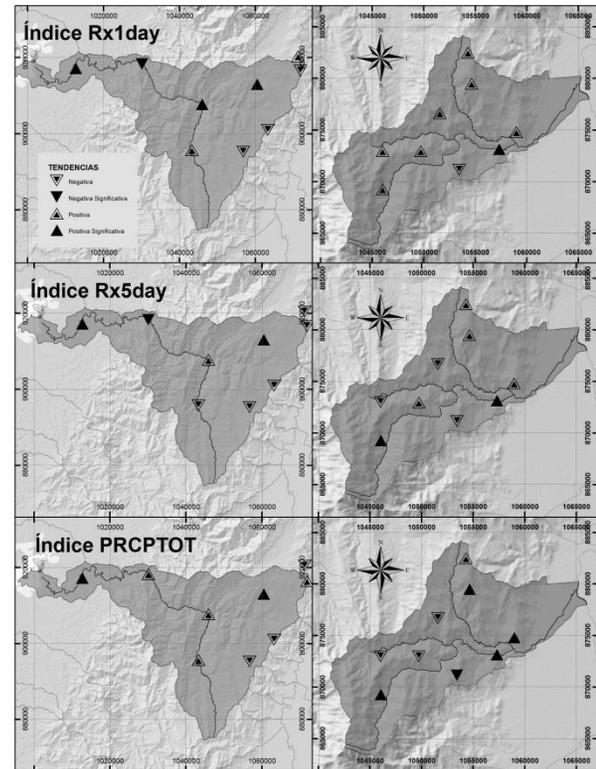


Fig. 4. Distribución espacial de los índices Rx1day, Rx5day y PRCPTOT. Fuente: Autores

Las tendencias al incremento de la precipitación anual en estaciones cercanas al Océano Pacífico, coinciden con los obtenidos en [12]. También se pueden observar tendencias a la disminución en las estaciones ubicadas al Este de la cuenca del río Dagua y Oeste de la cuenca Cali, cerca de su parte aguas, pues en estas zonas los vientos provenientes del Océano Pacífico empiezan a descender siendo más cálidos y ocasionando la disminución de las precipitaciones.

En la Fig. 5 se puede observar la distribución espacial de las tendencias de los índices R95p y R99p, los cuales se calculan a partir de umbrales basados en los percentiles 95 y 99, respectivamente. Estos, evidencian la tendencia a las precipitaciones máximas anuales, debidas a eventos extremos.

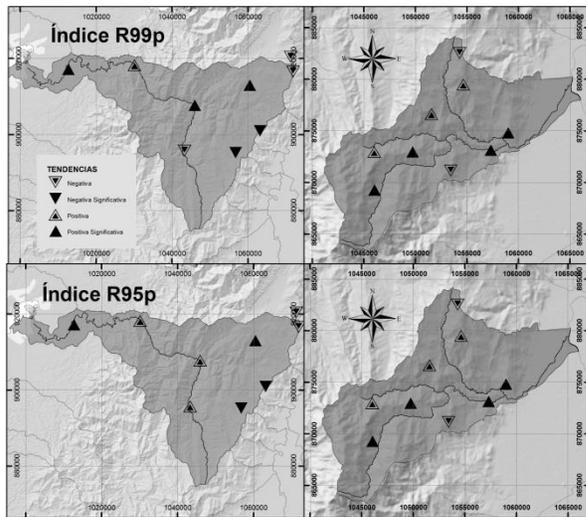


Fig. 5. Distribución espacial de los índices R95p y R99p

Las precipitaciones máximas anuales tienden a incrementarse en las estaciones ubicadas en la zona baja (Oeste) de la cuenca del río Dagua cerca de su desembocadura en el Océano Pacífico, en esta zona se presentan precipitaciones bastante altas hasta 8000 mm/año y las precipitaciones diarias llegan a los 300 mm. Sin embargo, existen estaciones al Oriente de esta cuenca donde las precipitaciones extremas tienden a disminuir, ahí las estaciones se encuentran a mayor altura. En general en la cuenca del río Cali estas precipitaciones máximas tiende a incrementarse tanto en la zona baja como en la zona alta. Este resultado concuerda con los registrados en el informe del IPCC [21], donde se sugiere un posible incremento de las precipitaciones de mayor intensidad a nivel mundial.

La precipitación en las cuencas estudiadas está influenciada por el Océano Pacífico produciendo lluvias de tipo convectivas y a la presencia de la barrera orográfica que se constituye en tres ramales de la cordillera de los Andes, que induce a la formación de climas locales y regionales de alta complejidad, dificultando la predicción a distintas escalas de tiempo. Estas condiciones explican los altos valores de precipitación en la zona baja de la cuenca del río Dagua (Oeste), favoreciendo la tendencia al incremento de la precipitación total anual

y las lluvias máximas, en estaciones que se encuentran a menor altura (Oeste), mientras que en las estaciones que se encuentran al Este de la cuenca, las precipitaciones tienden a disminuir en la mayoría de los índices. A diferencia de la Cuenca Cali que se localiza más hacia la parte del valle geográfico del departamento, lo que posiblemente conduce en un aumento de la tendencia de la lluvia anual en el Nor-Este y disminución en la estaciones del Nor-Oeste de la cuenca.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las tendencias calculadas para las cuencas de los ríos Dagua y Cali, a diferencia de la mayoría de los estudios consultados, presentan una distribución espacial homogénea para la mayoría de los índices, mostrando patrones similares en algunas áreas de las cuencas, es decir, cambios o tendencias localizadas, donde se presentan tendencias al incremento de los días acumulados con lluvia ≥ 1 mm en la cuenca del río Dagua, pues este incremento indica la prolongación de las temporadas lluviosas en las series históricas, que presentan un valor de tendencia baja pero que anualmente se incrementa.

Las precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del río Cali, en general, presentan incremento en toda la zona. Se pudo establecer, que indiferente a los cambios que presenta la precipitación total anual, en la mayoría de las estaciones existe tendencia a precipitaciones de alta intensidad, resultado que con concuerdan con los obtenidos en [7], [22], [23].

Los resultados obtenidos en la presente investigación son un aporte para promover acciones idóneas para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - GIRH, ya que el conjunto de índices analizados indican los cambios que han ocurrido en la precipitación a lo largo de la historia, lo que permite tener una idea de cómo esto afectará en futuro los diferentes sectores principal-

mente el agrícola. Redescubriendo que el estudio de tendencias climáticas por medio de herramientas sistemáticas proporciona eficiencia y confiabilidad para entender la variabilidad climática y los fenómenos similares bajo perspectivas locales y/o regionales. Además se recomienda involucrar estudios relacionados con erosión, uso y tipo de suelos, que permitan ser aprovechados por gestores de riesgo, instituciones, individuos, etc., donde se genere un proceso de participación y concientización ante los futuros riesgos que se pueden generar.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Grupo IREHISA de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, por el apoyo a esta investigación, al IDEAM, CENICAFE y CVC por el suministro de la información. A COLCIENCIAS por su apoyo mediante el programa de Jóvenes investigadores e innovadores 2012, bajo los proyectos de investigación: "Evaluación de las variaciones en la disponibilidad del agua en escenarios futuros por efecto de la variabilidad climática en la cuenca del río Dagua Valle del Cauca" y "Propuesta metodológica de alerta temprana en cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca ante eventos extremos asociados a la fase fría del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (La Niña)".

6. REFERENCIAS

- [1] K. Vincent, "Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 17, no. 1, pp. 12-24, Feb. 2007.
- [2] Y. Carvajal and C. Ordoñez, "Problemas ambientales en Colombia: Cambio climático," in *Desarrollo sostenible*, Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2010.
- [3] J. L. Vazquez, "Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México," 2010. [Online]. Available: http://www.ine.gov.mx/descargas/cclimatico/Guia_Indices_CC-2010.pdf. [Accessed: 12-Nov-2012].
- [4] B. M. Haddad, "Ranking the adaptive capacity of nations to climate change when socio-political goals are explicit," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 15, no. 2, pp. 165-176, Jul. 2005.
- [5] A.-E. Croitoru, B.-C. Chitoroiu, V. Ivanova Todorova, and V. Torică, "Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast," *Glob. Planet. Change*, vol. 102, pp. 10-19, Mar. 2013.
- [6] M. Bocculari and S. Malmusi, "Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy," *Atmos. Res.*, vol. 122, pp. 16-31, Mar. 2013.
- [7] O. Puertas, Y. Carvajal, and M. Quintero, "Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia," *Dyna*, vol. 78, pp. 112-120, 2011.
- [8] X. Zhang and F. Yang, "RClimDex (1.0) - Manual del Usuario." Climate Research Branch, Environment Canada, Ontario, p. 22, 2004.
- [9] Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos, "Estrategias de competitividad y sostenibilidad de sistemas productivos agrícolas en la microcuenca La Centella Dagua-Valle del Cauca," Santiago de Cali, 2008.
- [10] C. Costa, J. Barbosa, T. Ramana, and H. Alencar, "Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará," *Rev. Bras. Meteorol.*, vol. 24, pp. 39-47, 2009.
- [11] E. Rojas, B. Arce, A. Peña, F. Boshell, and M. Ayarza, "Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)," *Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 11, pp. 173-182, 2010.
- [12] R. Mayorga and G. Hurtado, "Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística," Santiago de Cali, 2010.
- [13] L. Zongxing, Y. He, P. Wang, W. H. Theakstone, W. An, X. Wang, A. Lu, W. Zhang, and W. Cao, "Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961-2008," *Glob. Planet. Change*, vol. 80-81, pp. 255-272, Jan. 2012.
- [14] M. D. L. M. Skansi, M. Brunet, J. Sigró, E. Aguilar, J. A. Arevalo Groening, O. J. Bentancur, Y. R. Castellón Geier, R. L. Correa Amaya, H. Jácome, A. Malheiros Ramos, C. Oria Rojas, A. M. Pasten, S. Sallons Mitro, C. Villaroel Jiménez, R. Martínez, L. V Alexander, and P. D. Jones, "Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America," *Glob. Planet. Change*, vol. 100, pp. 295-307, Jan. 2013.
- [15] A. Reyes, F. Barroso, and Y. Carvajal, *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Santiago de Cali: Universidad del Valle, 2010.
- [16] M. Castro, "Caracterización del régimen de caudal ambiental en la cuenca baja de río Dagua," Tesis de Maestría, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2008.
- [17] A. Ávila, "Simulación hidrológica utilizando HEC-HMS como herramienta para estimar caudales máximos en la cuenca hidrográfica del río Cali," Trabajo de grado, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2012.
- [18] E. Aguilar, I. Auer, M. Brunet, T. C. Peterson, and J. Wieringa, "Guidelines on climate metadata and homogenization." World Meteorological Organization, p. 53, 2003.
- [19] M. Bonifacio, "Homogeneidad y Análisis de Tendencia del Nivel de Condensación por Ascenso (NCA), en Dos Estaciones de Radiosondeo-Viento," Universidad Veracruzana, 2011.

- [20] A. M. G. Klein, F. W. Zwiers, and X. Zhang, "Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation." World Meteorological Organization, Geneva, p. 55, 2009.
- [21] IPCC, "Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático." Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza, p. 104, 2007.
- [22] H. O. Benavides, "Evidencias del cambio climático en Colombia - análisis de tendencias de precipitación y temperatura para diferentes pisos térmicos." Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, p. 8, 2010.
- [23] H. Benavides, R. Mayorga, and G. Hurtado, "Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RCLIMDEX." Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007.