

## Análisis de eventos climáticos extremos asociados a excesos de lluvia y heladas meteorológicas en el Altiplano Cundiboyacense de Colombia

Douglas A. Gómez-Latorre<sup>1</sup>, Gustavo A. Araujo-Carrillo<sup>1</sup>, Fabio Ernesto Martínez M.<sup>1</sup>, Andrea Onelia Rodríguez Roa<sup>1</sup>, Jhon Mauricio Estupiñan C.<sup>1</sup>, Leidy Yibeth Deantonio F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Tibibatá, Mosquera, Colombia.

Autor para correspondencia: Douglas A. Gómez-Latorre, dagomez@agrosavia.co

(Recibido: 09-08-2021. Publicado: 17-09-2021.)

### Resumen

Los excesos de lluvia y las heladas meteorológicas son fenómenos adversos en la agricultura, que ocasionan daños irreparables en la fisiología de las plantas, reduciendo la productividad de biomasa de éstas. Con el objetivo de establecer aquellas áreas de mayor amenaza ante tales fenómenos, se realizó el análisis para un periodo de 30 años, empleando 37 series climáticas diarias de precipitación y 23 de temperatura mínima, localizadas a lo largo del Altiplano Cundiboyacense, en la región Andina central de Colombia. Para los excesos de lluvia, se utilizó la curva de distribución de Gumbel que modela las series de lluvias máximas agregadas a diez días por cada mes, con el objetivo de calcular el valor probable en periodos de retorno a 2, 5, 10, 20 y 50 años. Para las heladas se analizaron series climáticas de temperatura mínima diaria, calculando la frecuencia relativa de registros menores 0 °C, valor indicativo de helada meteorológica. Como resultado se obtuvo que los valores máximos de lluvias extremas se esperan en el margen suroccidental y en el norte. Por otro lado, la mayor probabilidad de ocurrencia de heladas se espera en centro-occidente y nororiente, con valores hasta 0,71.

**Palabras clave:** excesos de lluvia, helada meteorológica, análisis de frecuencias, curva de distribución de Gumbel, Altiplano Cundiboyacense.

### Abstract

Excess rainfall and meteorological frosts are adverse phenomena in agriculture, which cause irreparable damage to the physiology of plants, reducing the biomass productivity of plants. In order to establish those areas of greatest threat to such phenomena, the analysis was carried out for a period of 30 years, using 37 daily climatic series of precipitation and 23 of minimum temperature, located along the Cundiboyacense high plateau, in the central Andean region of Colombia. For excess rainfall, we used the Gumbel distribution curve that models the series of maximum rains added to ten days for each month, with the aim of calculating the probable value in return periods to 2, 5, 10, 20 and 50 years. For frosts, climatic series of minimum daily temperature were analyzed, calculating the relative frequency of records less than 0 °C,

*an indicative value of meteorological frost. As a result, maximum values of extreme rainfall are expected in the south-western margin and in the north. On the other hand, the highest probability of occurrence of frost is expected in the center-west and northeast, with values up to 0.71.*

**Keywords:** *excess rain, meteorological frost, frequency analysis, Gumbel distribution curve, Cundiboyacense high plateau.*

## 1. Introducción

Las amenazas de origen climático representan uno de los factores más limitantes en actividades económicas estratégicas como el comercio, la industria, la minería o la agricultura (IPCC, 2012), ésta última la más sensible dado que variables climáticas como la precipitación, la humedad relativa o la temperatura (máxima y mínima), cuando presentan valores extremos u anómalos, generan episodios como inundaciones, sequías, heladas, golpes de calor en animales; alterando el entorno biofísico y con efectos negativos en los cultivos, que según sea la intensidad, inciden en el desarrollo fenológico de las plantas, mayor susceptibilidad a plagas y enfermedades y alteración de épocas de cosecha (Chavarro et al., 2008; Ycaza & Manobanda, 2009). Tales episodios, denominados como eventos climáticos extremos, son evidencias del cambio climático, y se refieren a la ocurrencia de un valor de una variable meteorológica por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de un conjunto de valores observados de la variable (Fischer et al., 2002; IPCC, 2012). La ocurrencia de un evento climático extremo se encuentra dado por la temporada climática, siendo más frecuentes los excesos de lluvia en temporadas húmedas (Martínez et al., 2017), y las heladas durante temporadas secas, éstas últimas entendidas como la ocurrencia de una temperatura igual o menor a 0 °C a una altura reglamentaria de caseta meteorológica (Snyder & Melo-Abreu, 2010; Gómez-Latorre, 2014).

A nivel ecuatorial, las temporadas húmedas/secas se rigen por patrones climáticos. Éstos a nivel temporal, pueden alterarse de manera recurrente con las fases extremas de la variabilidad climática (fluctuaciones de una condición normal predominante observados durante periodos de tiempo relativamente cortos), o se pueden modificar en largos periodos debido a los cambios climáticos (modificación en el largo plazo de las condiciones predominantes) (Mesa S. et al., 1997; Pabón, 2011; J. D. Pabón & Montealegre, 2017; J. D. Pabón et al., 2020.) Uno de los ciclos de variabilidad climática con mayor impacto a nivel global es el ENOS (El Niño/La Niña Oscilación del Sur), que se refiere a las variaciones de la temperatura superficial del mar, lluvia convectiva, presión del aire en la superficie y circulación atmosférica a través de la cuenca del Pacífico ecuatorial (Trenberth, 1997; CPC-NOAA, 2012; OMM, 2014), afectando directamente los patrones de temperatura y precipitación, incluyendo eventos extremos tales como sequías, inundaciones y ciclones tropicales en muchos lugares del mundo (Zebiak et al., 2015).

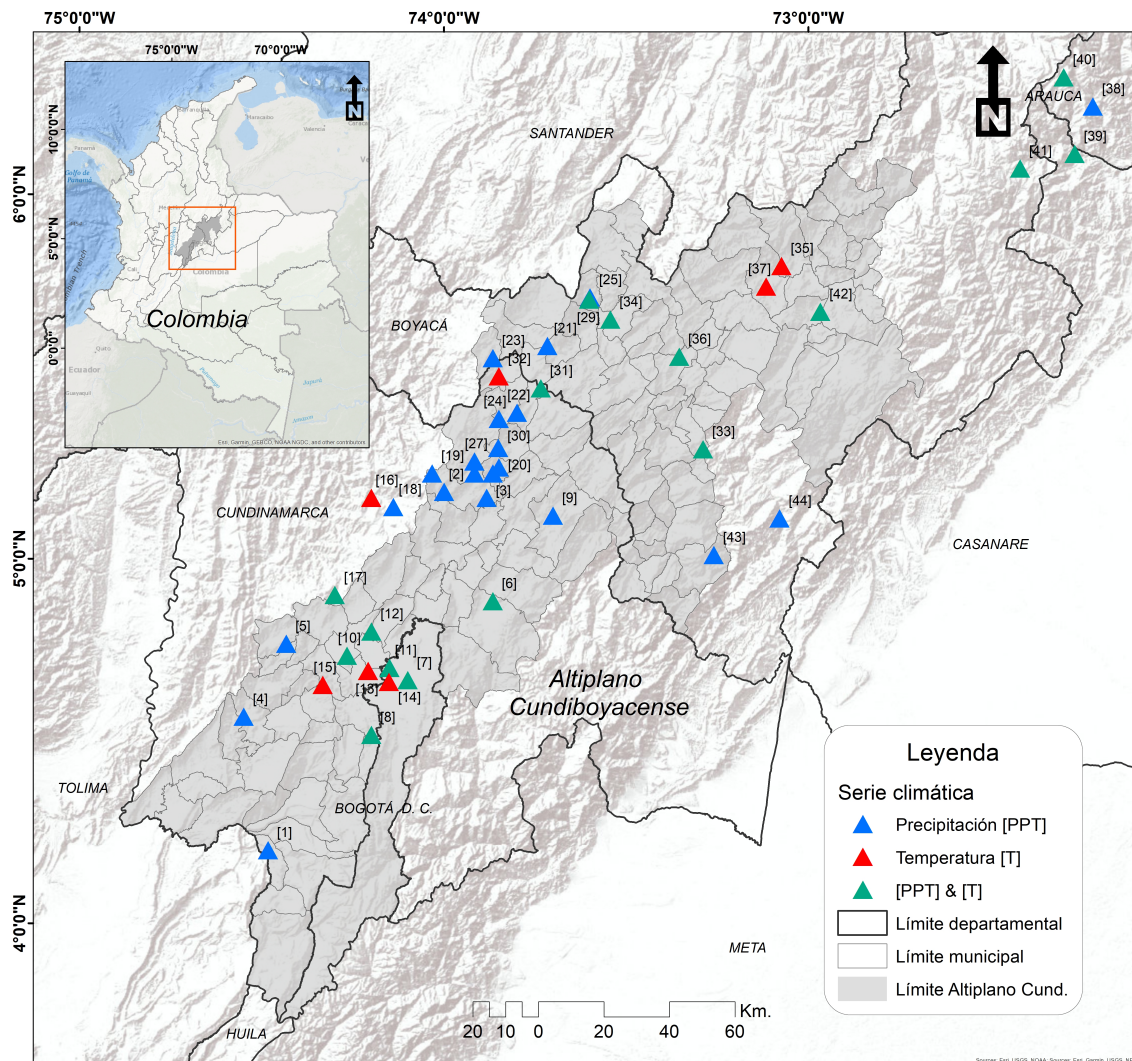
La región Andina colombiana, caracterizada por paisajes montañosos y que concentra la mayoría de las actividades socioeconómicas del país, es una de las más susceptibles al impacto del ENOS junto con las regiones Caribe y Pacífica (Mesa S. et al., 1997; Montealegre, 2009; J. D. Pabón & Montealegre, 2017). A lo largo de la fase fría o La Niña, se presenta un incremento de las precipitaciones las cuales son muy intensas, y una disminución de la temperatura media, contrario a lo que sucede durante la fase cálida o El Niño, cuya temperatura media del aire se incrementa, creando condiciones propicias para el desarrollo de heladas (Gómez-Latorre, 2014); así mismo, disminuye el volumen de lluvias, por ende, disminuye los caudales medios de los ríos y baja humedad en los suelos (Poveda, 2004).

Un ejemplo de dicha situación se vivió en Colombia entre 2009 y 2012 por influencia de un evento El Niño entre el tercer trimestre de 2009 y el primer trimestre de 2010, pasando rápidamente a un periodo continuo de abundantes lluvias entre el tercer trimestre de 2010 hasta el último trimestre de 2011 (León, 2011; Vargas et al., 2018); dejando como saldo 124.346 personas afectadas en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, que equivalen al 3,9 % del área total nacional (Cepal, 2012). Por tanto, este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de dos eventos climáticos extremos que tienen alto impacto en el país: las precipitaciones extremas y las heladas, específicamente, en el Altiplano Cundiboyacense, que se extiende a lo largo de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, con una actividad económica importante en la agricultura y la ganadería. Las precipitaciones extremas se analizaron a través de la distribución doble exponencial o distribución de la función de Gumbel (Gumbel, 1958), utilizados en trabajos de amplia cobertura regional y nacional (Garrido Abenza, 1992; Gutiérrez Lozano et al., 2011; Marques Pinheiro, 2016). En el caso de heladas meteorológicas, se realizó el cálculo de la frecuencia relativa en un periodo de 30 años, obteniendo la probabilidad empírica de ocurrencia del evento.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

El Altiplano Cundiboyacense, que cubre aproximadamente 1.966.800 ha. y 136 municipios entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, se ubica sobre la región Andina central de Colombia, entre los 4°02'02" y 6°05'58" Norte y los 72°41'05" y 74°32'58" Oeste (Figura 1). El rango altitudinal de ésta área abarca desde 460 hasta 4.240 m.s.n.m., existiendo una amplia gama de unidades biogeográficas como las zonas de páramo, los enclaves xerofíticos y las formaciones forestales (Rivera et al., 2004). Asimismo, es una zona de importante actividad agrícola con cultivos de clima frío como hortalizas (zanahoria, lechuga o cebolla), papa, maíz y pasturas para ganadería (Agronet, 2021).



**Figura 1:** Área de estudio con la delimitación del Altiplano Cundiboyacense y localización de las estaciones meteorológicas utilizadas (PPT: estación con serie climática de precipitación; T: estación serie climática de temperatura mínima; PPT-T: estación con serie climática de PPT y T).

## 2.2. Información utilizada y control de calidad

Se utilizaron series climáticas a escala diaria, provenientes de 44 estaciones meteorológicas, proporcionadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), instituciones del orden regional y nacional respectivamente. Los análisis emplearon 37 series climáticas de precipitación (PPT) y 23 de temperatura mínima (T), para un periodo de 30 años entre 1981 y 2010 (Tabla 1).

Tabla 1: Localización de las estaciones meteorológicas.

[N°]	Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Municipio	Dep.	Variable
[1]	Pandi	4,200	-74,483	950	Pandi	Cund.	PPT
[2]	El Salitre	5,183	-74,000	3.140	Tausa	Cund.	PPT
[3]	El Encanto	5,167	-73,883	3.150	Tausa	Cund.	PPT
[4]	Las Mercedes	4,567	-74,550	810	Anapoima	Cund.	PPT
[5]	La Florida	4,767	-74,433	1.915	Anolaima	Cund.	PPT
[6]	Guasca	4,883	-73,867	2750	Guasca	Cund.	PPT-T
[7]	Jardín Botánico	4,667	-74,100	2.552	Bogotá	Cund.	PPT-T
[8]	Granja San Jorge	4,517	-74,200	2.900	Soacha	Cund.	PPT-T
[9]	Silos	5,118	-73,701	2.709	Chocontá	Cund.	PPT
[10]	Base Aérea Madrid	4,733	-74,267	2.550	Madrid	Cund.	PPT-T
[11]	Aeropuerto El Dorado	4,700	-74,150	2.547	Bogotá	Cund.	PPT-T
[12]	Granja Providencia	4,800	-74,200	2.560	Tenjo	Cund.	PPT-T
[13]	Tibaitatá	4,691	-74,209	2.543	Mosquera	Cund.	T
[14]	Hacienda Las Vegas	4,662	-74,151	2.543	Bogotá	Cund.	T
[15]	Acapulco	4,654	-74,333	2.650	Bojacá	Cund.	T
[16]	Esc. Voc. Pacho	5,167	-74,200	1.940	Pacho	Cund.	T
[17]	Sabaneta	4,900	-74,300	2.475	San Francisco	Cund.	PPT-T
[18]	La Cabrera	5,142	-74,139	2.000	Pacho	Cund.	PPT
[19]	Los Pinos	5,233	-74,033	3.477	Tausa	Cund.	PPT
[20]	El Pino	5,250	-73,850	2.575	Sutatausa	Cund.	PPT
[21]	Los Arrayanes	5,583	-73,717	2.575	Tinjacá	Cund.	PPT
[22]	Monserate	5,400	-73,800	2.865	Fúquene	Cund.	PPT
[23]	Caldas	5,550	-73,867	2.655	Caldas	Boy.	PPT
[24]	Tres Esquinas	5,383	-73,850	3.130	Susa	Cund.	PPT
[25]	Santa Sofia	5,717	-73,600	2.370	Sutamarchán	Boy.	PPT
[26]	El Pedregal	5,233	-73,867	2.900	Sutatausa	Cund.	PPT
[27]	Hato2	5,267	-73,917	2.974	Carupa	Cund.	PPT
[28]	Hato7	5,233	-73,917	3.271	Carupa	Cund.	PPT
[29]	Ins. Agro Sta. Sofia	5,711	-73,602	2.300	Santa Sofia	Boy.	PPT-T
[30]	La Boyera	5,304	-73,852	2.610	Ubaté	Cund.	PPT
[31]	Isla de Santuario	5,467	-73,735	2.580	Fúquene	Cund.	PPT-T
[32]	Simijaca	5,500	-73,850	2.622	Simijaca	Cund.	T
[33]	Villa Carmen	5,300	-73,290	2.600	Samacá	Boy.	PPT-T
[34]	Villa de Leyva	5,656	-73,544	2.215	Villa de Leyva	Boy.	PPT-T
[35]	Surbatá Bonza	5,802	-73,074	2.470	Duitama	Boy.	T
[36]	UPTC	5,554	-73,355	2.690	Tunja	Boy.	PPT-T
[37]	Tunguavita	5,746	-73,116	2.485	Paipa	Boy.	T
[38]	Sierra Nevada Cocuy	6,240	-72,220	3.716	Guicán	Boy.	PPT
[39]	Chita	6,110	-72,270	2.888	Chita	Boy.	PPT-T
[40]	Chiscas	6,320	-72,300	2.350	Chiscas	Boy.	PPT-T
[41]	Sativanorte	6,070	-72,420	2.594	Sativanorte	Boy.	PPT-T
[42]	Apto Lleras	5,677	-72,968	2.500	Sogamoso	Boy.	PPT-T
[43]	Sutatenza	5,010	-73,260	1.930	Sutatenza	Boy.	PPT
[44]	El Vivero	5,110	-73,080	1.640	Miraflores	Boy.	PPT

Dep. = Departamento, Cund. = Cundinamarca, Boy. = Boyacá

En el control de calidad de las series climáticas se realizaron los siguientes procesos: coherencia estadística y física del dato (Guijarro, 2018), test de homogeneidad (Alexandersson, 1986), llenado de datos faltantes o ausentes (Paulhus & Kohler, 1952; Guijarro, 2014, 2018) implementado en el paquete Climatol de R-Stat, y validación de los procesos de calidad a través del Test de McCuen (McCuen, 2016), seleccionando sólo aquellas con un máximo de 20 % de datos faltantes para PPT y 30 % para T.

### 2.3. Análisis de excesos de lluvia

El primer paso consistió en la agrupación de la precipitación diaria en periodos decadales (10 días) para cada serie de PPT, obteniendo 36 valores por año. A continuación, se seleccionó la década con el máximo valor por año, ya que permite la identificación de patrones de lluvias agregadas que determinan los procesos de saturación de los suelos (Martínez et al., 2016, 2017; Araujo-Carrillo et al., 2019, 2021). Con lo anterior se generaron mapas de distribución espacial de los periodos de retorno a 2, 5, 10, 20 y 50 años de lluvias decadales a nivel anual. De forma análoga, se realizó el análisis mes a mes, de manera que, al examinar la distribución anual de la precipitación, se escogiera el mes más húmedo o con mayor volumen de lluvias. Como resultado se generaron mapas de distribución espacial de los mismos cinco periodos de retorno a nivel anual, pero ahora solo para el mes con mayor volumen de lluvias. Los valores de lluvias decadales por periodo de retorno fueron interpolados a través del método IDW (Inverse Distance Weighted, por sus siglas en inglés), que asigna valores a puntos no conocidos a través de puntos dispersos con valores conocidos (Shepard, 1968).

#### 2.3.1. Función de distribución de Gumbel

La función de distribución de Gumbel se utiliza para analizar frecuencias de valores extremos de los valores máximos o mínimos de lluvias y/o temperaturas, por ello la función requiere una serie de datos históricos continuos, subsanado a través del proceso de control de calidad. La función de probabilidad de Gumbel se define de la siguiente manera (Gumbel, 1958; Ojo, 2001):

$$F(X) = e^{-e^{-y}} \quad (1)$$

Donde:

$$y = \beta(X - U) \quad (2)$$

Siendo  $\beta$  y  $U$  parámetros de la función, los cuales son calculados así:

$$\beta = \frac{1}{0,779696 * \sigma} \quad (3)$$

$$U = \bar{x} - 0,450047 * \sigma \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  y  $\bar{x}$  son la desviación estándar y la media de la serie de datos, respectivamente.

Para comprobar la significancia estadística de los datos se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, usualmente aplicada en éste tipo de análisis (Gutiérrez Lozano et al., 2011).

## 2.4. Análisis de heladas meteorológicas

El análisis correspondió al cálculo de la probabilidad de ocurrencia de heladas, a partir de la determinación de distribución frecuencial empírica por década (10 días), encontrando en cada lapso el valor cuantitativo de ocurrencia (Gómez-Latorre, 2014). Los datos se organizaron en series decadales multianuales y en cada serie se contabilizaron los registros con valores por debajo de 0 °C, descartando las series sin valores por debajo del umbral.

## 2.5. Definición de probabilidad empírica o frecuencial

Para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de las heladas se utilizó la definición empírica o a posteriori que se basa en una fase de experimentación y de recopilación de datos. Para la estimación de la probabilidad  $P$  se efectúa un experimento  $n$  veces donde el evento ( $H$ ) ocurre  $r$  veces, a partir de lo cual se estima la frecuencia relativa del evento:

$$P(H) = f_r(H) = f(H) = \frac{r}{n} \quad (5)$$

## 3. Resultados

### 3.1. Análisis de excesos de lluvia

Los valores máximos de precipitación mes por mes para los periodos de retorno a 2, 5, 10, 20 y 50 años se presentan en la Tabla 2. Asimismo, se muestran los mapas de distribución espacial de las lluvias decadales, a nivel anual (Figura 2) y para el mes de octubre (Figura 3), climatológicamente uno de los meses más lluviosos en el Altiplano Cundiboyacense, junto con marzo, abril, mayo, octubre y noviembre (Ideam, 2015), para los periodos de retorno ya mencionados.

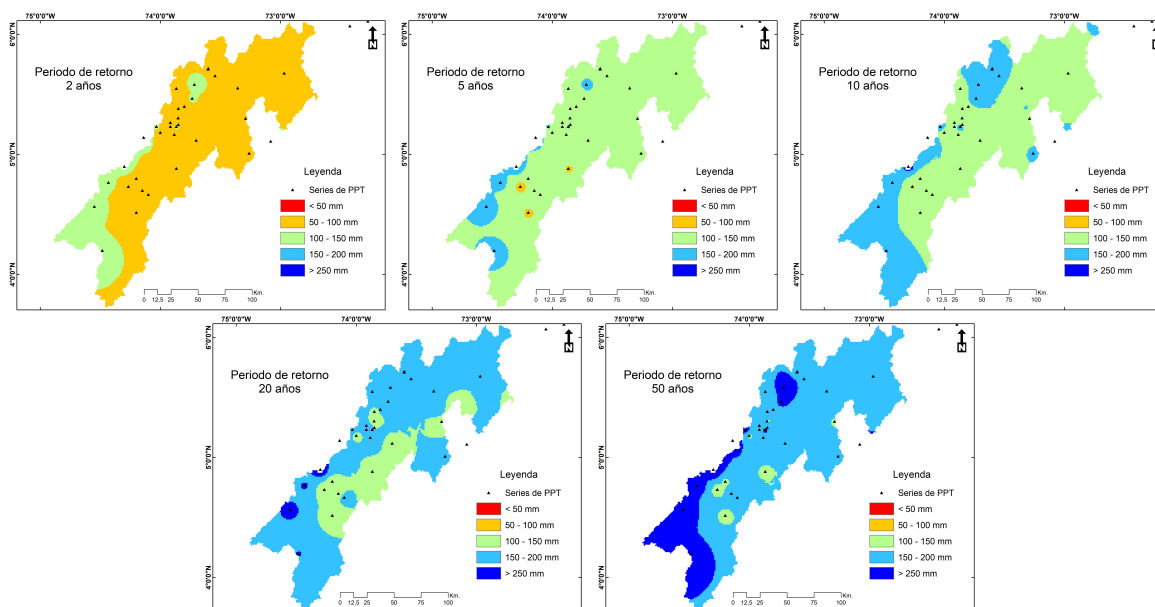
**Tabla 2:** Valores máximos de lluvia por década, relacionada con periodos de retorno a 2, 5, 10, 20 y 50 años por mes.

		Periodo de retorno (años)														
mm.		2	5	10	20	50	2	5	10	20	50	2	5	10	20	50
Mes		Enero					Febrero					Marzo				
Max.		74,1	115,6	143,1	169,5	203,7	66,1	96,6	117,4	137,3	164,3	87,5	129,5	157,4	184,1	218,6
Mes		Abril					Mayo					Junio				
Max.		83,1	125,2	154,2	182,1	218,2	95,8	120,6	161,2	200,0	250,3	105,5	130,3	146,7	162,5	182,8
Mes		Julio					Agosto					Septiembre				
Max.		106,4	134,1	152,4	170	192,7	93,4	120,6	138,6	155,9	180,9	69,9	93,9	109,8	125,0	147,6
Mes		Octubre					Noviembre					Diciembre				
Max.		97,4	133,2	159,7	188,6	226,1	102,0	146,3	175,7	203,9	240,3	74,1	115,6	143,1	169,5	203,7

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov–Smirnov indicó que los resultados obtenidos de las 37 series climáticas de PPT, tuvieron un ajuste satisfactorio de los valores al 95 % de confianza sobre la curva de distribución de Gumbel, siendo por tanto significativos.

### 3.1.1. Distribución espacial de los periodos de retorno de lluvias decadales en el Altiplano Cundiboyacense a nivel anual

El análisis espacial por cada periodo de retorno (Figura 2), mostró que a 2 años predominaron valores entre 50-100 mm, con excepción de la franja centro y sur occidental del área de estudio, y el área de influencia de las estaciones [21] Los Arrayanes (Tinjacá, Cund.) y [22] Monserrate (Fúquene, Cund.). De igual forma, a 5 años se identificó que el área de influencia de las estaciones [10] Base Aérea Madrid (Madrid, Cund.), [8] Granja San Jorge (Soacha, Cund.) y [6] Guasca (Guasca, Cund.), presentaron valores entre 50 y 150 mm, mientras el costado sur y suroccidental, variaron entre 150-200 mm. A 10 años, los valores entre 150-200 mm abarcaron el noroccidente, en las estaciones [21] Los Arrayanes (Tinjacá, Cund.), [25] Santa Sofía (Sutamarchán, Boy.), [29] Ins. Agro Sta. Sofia (Santa Sofía, Boy.) y [31] Isla de Santuario (Fúquene, Cund.), y la franja suroccidental del Altiplano Cundiboyacense. Para 20 y 50 años, predominaron los valores entre 150-200 mm en la mayoría de la zona, con excepción de la franja central con valores entre 100-150 mm para 20 años de retorno, y la franja sur occidental con valores por encima de 250 mm, para 50 años de retorno.



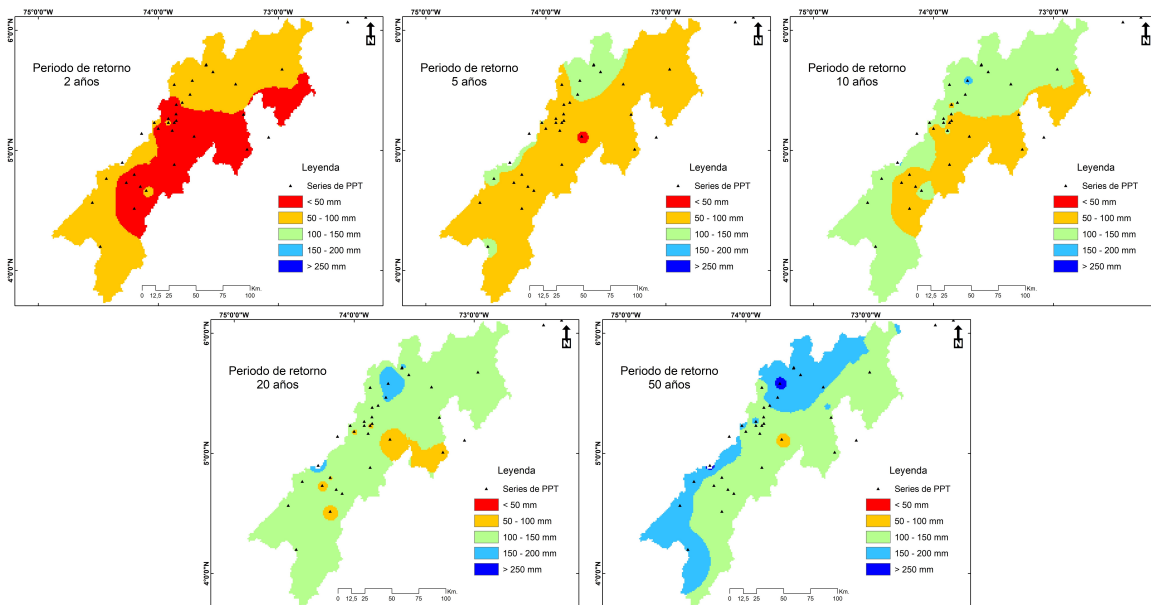
**Figura 2:** Distribución espacial de lluvias decadales para periodos de retorno a 2, 5, 10, 20 y 50 años en el Altiplano Cundiboyacense a nivel anual.

### 3.1.2. Distribución espacial de los periodos de retorno de lluvias decadales para el mes con máximo volumen de lluvias (octubre) en el Altiplano Cundiboyacense

Para octubre (Figura 3), mes con el mayor volumen de lluvias, la distribución espacial para un periodo de retorno a 2 años mostró que el centro, oriente y nororiente del Altiplano Cundiboyacense predominaron valores entre 0-50 mm, con excepción del área de influencia de las estaciones [17] Jardín Botánico (Bogotá, Cund.) y [28] Hato 7 (Carupa, Cund.). El intervalo 50-100 mm prevaleció en el área restante. A 5 años los valores de retorno se ubicaron entre 50-100 mm en gran parte del área analizada; sin embargo, las estaciones [9] Silos (Chocontá, Cund.) y [1] Pandi (Pandi, Cund.) presentaron valores entre 0-50 mm y 100-150 mm respectivamente, siendo coincidente con la franja occidental y noroccidental. En el periodo de retorno a 10 años, la estaciones



[17] Sabaneta (San Francisco, Cund.) y [21] Los Arrayanes (Tinjacá, Cund.) presentaron valores entre 150-200 mm, contrastando con el resto de la franja occidental y la estación [17] Jardín Botánico (Bogotá, Cund.), que se mantuvo en el intervalo 100-150 mm, y la franja oriental en 50-100 mm. Para 20 y 50 años, las franjas suroccidental y noroccidental presentaron valores máximos probables por 150 mm, mientras la zona centro y norte de la región se ubicaron en el intervalo de 50 a 150 mm.



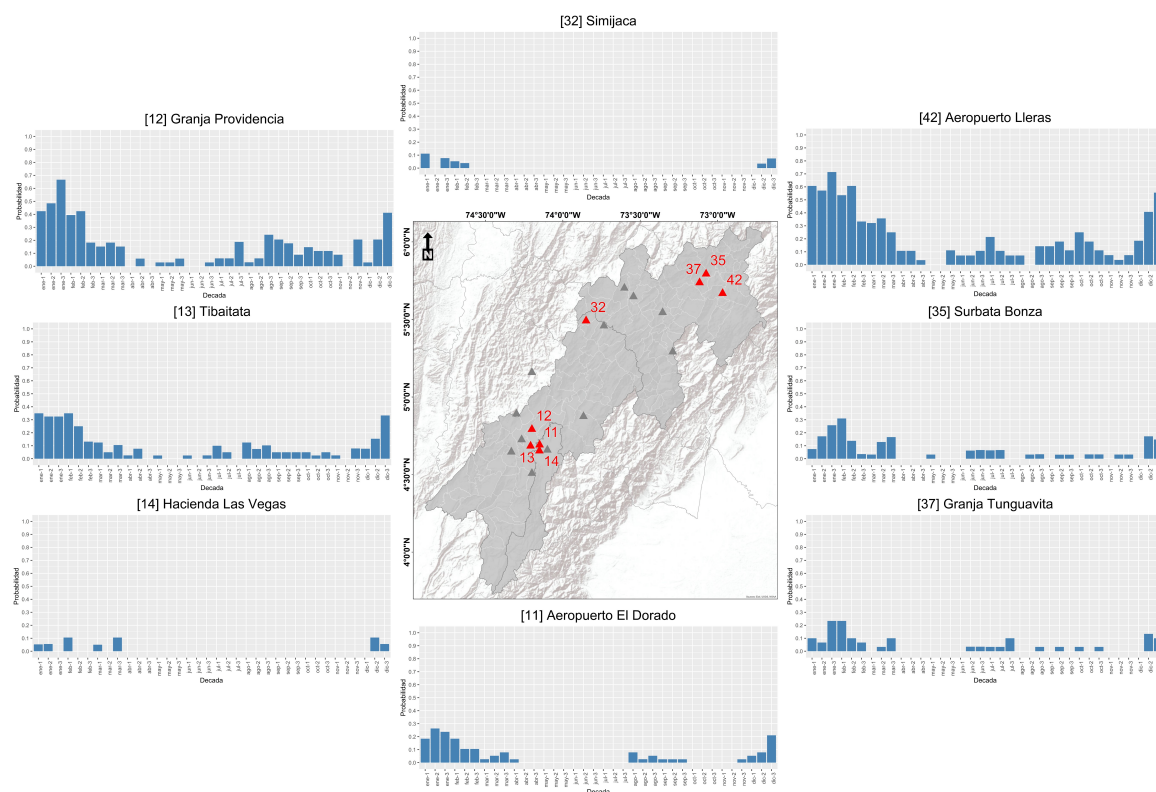
**Figura 3:** Distribución espacial de los periodos de retorno de lluvias decadales a 2, 5, 10, 20 y 50 años para el mes más húmedo (octubre) en el Altiplano Cundiboyacense.

Al comparar la distribución de los periodos de retorno de octubre con los obtenidos a nivel anual, estos últimos suelen ser mayores, ya que se incluyen los máximos probables que pueden ocurrir en cualquier momento del año. Asimismo, los valores de retorno más altos se obtuvieron en la franja occidental del área de estudio, zona donde se concentra un mayor número de días con lluvias, debido principalmente al ascenso de humedad desde el valle del río Magdalena, ubicado entre la cordillera central y oriental (Eslava R., 1993; Mesa S. et al., 1997; J. Pabón et al., 2001; Ideam, 2015). De acuerdo con Ideam (2015), climatológicamente el Altiplano Cundiboyacense presenta un régimen bimodal con dos trimestres húmedos o de abundantes precipitaciones y dos trimestres secos o de escasas precipitaciones. Los trimestres húmedos abarcan los meses de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre. Las mayores precipitaciones se registran de finales de abril a principios de mayo y de finales de octubre a principios de noviembre; en general estos periodos son críticos por saturación de los suelos, lo que provoca encharcamientos e inundaciones en las áreas que son geomorfológicamente más susceptibles a los excesos de agua. Cuando se presenta un evento como La Niña, los volúmenes de lluvia tienden a aumentar y se incrementa la probabilidad de inundaciones (Gomez-Latorre, 2014).

### 3.2. Análisis de heladas meteorológicas

En la Figura 4 se observan los resultados obtenidos del análisis de heladas meteorológicas; los puntos de color rojo señalan los lugares que mostraron la ocurrencia de helada meteorológica, mientras en color gris aquellos que no mostraron valor alguno. Por tanto, se identificó que 8 de

23 series climáticas analizadas presentaron valores de frecuencia empírica o, en otras palabras, existe la probabilidad que se presente algún evento de helada meteorológica en cualquiera de los 36 periodos decadales que componen el año, tal como se observa en los diagramas de barras.



**Figura 4:** Probabilidad de ocurrencia de heladas meteorológicas para el Altiplano Cundiboyacense.

En el área de estudio se identificó que, entre la segunda década de diciembre y la segunda década del mes de febrero, presentaron mayores valores de probabilidad que los observados entre la última década de mayo y la segunda década de septiembre, señalando las temporadas de heladas meteorológicas propiamente dichas. Según Gómez-Latorre (2014) el tipo de helada más común en el Altiplano Cundiboyacense es la de radiación, frecuentes en los meses secos, de mínima nubosidad y alta insolación (Snyder & Melo-Abreu, 2010) De igual manera, los resultados mostraron que la distribución espacial de las heladas es diferencial a lo largo del Altiplano Cundiboyacense. En el norte se observó que la estación [42] Aeropuerto Lleras (Sogamoso, Boy.), presentó los máximos valores de probabilidad, en particular la tercera década de enero con 0,7, esto quiere decir que la helada puede ocurrir en 7 de cada 10 días. Asimismo, presentó valores por encima de 0,5 en la primera y segunda década de enero y febrero, y última década de diciembre. Cabe destacar que, en los meses de marzo y octubre, los valores de probabilidad oscilaron entre 0,1 y 0,3, por lo que a pesar de ser un periodo lluvioso el área de influencia es susceptible a ocurrencia de heladas.

Por otro lado, las estaciones [35] Surbatá Bonza (Duitama, Boy.) y [37] Granja Tinguavita (Paipa, Boy.), mostraron como resultado una ocurrencia de heladas entre diciembre y febrero, y junio a agosto (épocas secas), con valores de probabilidad cercanos a 0,3, mucho más bajos en comparación con la estación [42] Aeropuerto Lleras (Sogamoso, Boy.), cercana a éstas. Hacia el centro del área de estudio, en el área de influencia de la estación [32] Simijaca (Simijaca, Cund.),

la serie climática mostró una baja frecuencia de heladas, con valores no mayores a 0,1 entre diciembre y febrero. Esta región se encuentra influenciada por el complejo lagunar de Fúquene, lo que incide en el comportamiento de la temperatura, ya que “el agua tiene la mayor capacidad calorífica de todas las sustancias en el mundo, por lo que su temperatura muestra tendencia a ser constante, evitando así fuertes fluctuaciones” (Gómez-Latorre, 2014, p. 52).

En el área centro sur, en la sabana de Bogotá, se observó que los eventos de helada tienen mayor ocurrencia en temporadas secas, tal como sucede en las demás áreas. Los resultados mostraron valores de probabilidad entre 0,1 y 0,7 entre diciembre a febrero y junio a agosto. En las estaciones [13] Tibaitatá (Mosquera, Cund.) y [12] Granja Providencia (Tenjo, Cund.) se presentaron los valores más altos, ésta última con valores de 0,41, 0,48 y 0,69 para enero y 0,41, 0,39 y 0,19 para febrero, mientras en diciembre se observaron frecuencias relativamente menores que enero y febrero, con 0,02, 0,2 y 0,4. Asimismo, las estaciones [14] Hacienda Las Vegas (Bogotá, Cund.) y [11] Aeropuerto El Dorado (Bogotá, Cund.), mostraron frecuencias menores que 0,2 (más bajas que las otras estaciones de la región), por lo que los periodos con bajas o nulas precipitaciones, vientos en calma sobre todo nocturnos, baja nubosidad y alta insolación, favorecen el desencadenamiento de eventos de heladas, ya que se encuentran condiciones para la inversión de la temperatura cerca de la superficie del suelo (Kotikot et al., 2019).

#### 4. Conclusiones

Los análisis permitieron generar una base de referencia para la comprensión de los eventos de excesos de lluvia acumulados a 10 días y heladas meteorológicas para el Altiplano Cundiboyacense, ya que estos tipos de eventos causaron múltiples problemas a los agricultores de la zona de estudio entre 2009 y 2012, cuando se presentó un periodo de sequía seguido por un periodo prolongado de inundaciones y anegamientos. El análisis de series climáticas históricas de precipitación a escala decadal permitió determinar con detalle los periodos de frecuencia, intensidad y duración de excesos de lluvias agregadas a 10 días, mostrando que los valores de retorno más altos de precipitaciones se localizaron en la zona suroccidental del Altiplano Cundiboyacense, así como en la región que comprende el complejo lagunar de Fúquene. El resultado del análisis de heladas meteorológicas mostró que los mayores valores de frecuencia relativa se presentaron en áreas de influencia de las estaciones [42] Aeropuerto Lleras y [12] Granja Providencia. Asimismo, los periodos más sensibles a la ocurrencia de heladas fueron entre diciembre y febrero, y en menor medida entre junio y agosto, dado que estos meses presentan condiciones favorables como: pocas precipitaciones, escasa nubosidad, alta radiación solar y ausencia de vientos, condiciones óptimas para la inversión de la temperatura cercana a la superficie del suelo.

#### Agradecimientos

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y al Fondo Adaptación quienes, a través del convenio No. 002 de 2013, asignaron los recursos financieros para la ejecución del proyecto “Reducción del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático” – MAPA (Modelos de Adaptación y Prevención Agroclimática), en el cual se diseñó la metodología y se obtuvieron los resultados presentados en este trabajo.

## Referencias bibliográficas

Agronet (2021): Anuario Estadístico del sector Agropecuario – EVA. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>

Alexandersson H (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6):661-675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>

Araujo-Carrillo GA, Martínez-Maldonado FE, Deantonio-Florido LY, Gómez-Latorre DA (2019): Agroclimatic zoning: a planning strategy for agricultural and livestock systems in the Alta Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(3). <https://doi.org/10.17584/RCC H.2019V13I3.9648>

Araujo-Carrillo GA, Varón-Ramírez VM, Gómez-Latorre DA, Estupiñan-Casallas JM, Rodríguez-Roa AO, Deantonio-Florido LY, Martínez-Maldonado FE (2021): Mapping a hydrophysical soil property through a comparative analysis of local and global scale approximations. *Scientia Agrícola*, 78(2). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0126>

Cepal (2012): Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010 - 2011. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37958/1/OlainvernalColombiaBIDCEPAL\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37958/1/OlainvernalColombiaBIDCEPAL_es.pdf)

Chavarro M, García A, García J, Pabón JD, Prieto A, Ulloa A (2008): Preparandose para el futuro. Amenazas, riesgos, vulnerabilidad y adaptación frente al cambio climático N° 3. <https://www.unodc.org/documents/colombia/2013/Agosto/DA2013/MATERIAL-DIFUSION-No.3-ADAPTACION.pdf>

CPC-NOAA (2012): Climate Prediction Center - ENSO FAQ. National Weather Service - Climate Prediction Center. [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#NINO)

Eslava R, JA (1993): Climatología y diversidad climática de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 18(71), 507-539. [https://www.acefyn.com/revista/Volumen\\_18/71/508-538.pdf](https://www.acefyn.com/revista/Volumen_18/71/508-538.pdf)

Fischer G, Shah M, Velthuisen H (2002): Climate Change and Agricultural Vulnerability. En International Institute for Applied Systems Analysis. <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/6670/1/XO-02-001.pdf>

Garrido Abenza R (1992): Limitaciones de la distribución de Gumbel en la valoración del riesgo de lluvias fuertes: caso de un observatorio del litoral Mediterráneo. Congreso Iberoamericano sobre Técnicas Aplicadas a la Gestión de Emergencias para la Reducción de Desastres Naturales, 217-226. <http://cidbimena.desastres.hn/pdf/spa/doc4992/doc4992-contenido.pdf>

Gómez-Latorre DA (2014): Caracterización, pronóstico y alternativas de manejo de las heladas en el sistema de producción lechero del valle de Ubaté y Chiquinquirá (Colombia) [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/30038>

Guijarro J (2014): Quality Control and Homogenization of Climatological Series. En S. Eslamian (Ed.), Handbook of Engineering Hydrology. Fundamentals and Applications (pp. 501-513). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15625-25>

Guijarro J (2018): Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1. [http://www.climatol.eu/homog\\_climatol-en.pdf](http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf)

Gumbel EJ (1958): Statics of Extremes. Columbia University Press.

Gutiérrez Lozano J, Vargas Tristán V, Romero Rodríguez M, Placido de la Cruz JM, Aguirre Bortoni MJ, Silva Espinoza HT (2011): Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 76, 20-33. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n76/n76a3.pdf>

Ideam (2015): Atlas Climatológico de Colombia - Interactivo - año 2015. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IPCC (2012): Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). [https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC\\_SREX\\_ES\\_web.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf)

Kotikot SM, Flores A, Griffin RE, Nyaga J, Case JL, Mugo R, Sedah A, Adams E, Limaye A, Irwin DE (2020): Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84:101971. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.101971>

León G (2011): Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia. [http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010\\_GloriaLeon.pdf](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf)

Marques Pinheiro G (2016): Variabilidade temporo-espacial da pluviosidade na bacia do Alto Iguaçu [Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.]. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44481>

Martínez FE, Castillo VL, Rojas BE, Gómez-Latorre DA, Aguilera GE (2017): Identificación de áreas de riesgo agroclimático para el sistema de ganadería de leche en el Valle de Ubaté y Chiquinquirá y Alto Chicamocha. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1):170-183. <https://doi.org/10.17584/rech.2017v11i1.6159>

Martinez MFE, Deantonio FLY, Araujo CGA, Rojas EO, Gómez-Latorre DA, Alzate DF, Ortiz LA, Aguilera GE, Boshell-Villamarín JF (2016): Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 34(3):374. <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n3.59672>

McCuen RH (2016): Hydrologic Analysis and Design (4th Editio). Pearson.

Mesa SOJ, Poveda JG, Carvajal SLF (1997): Introducción al clima de Colombia (1.a ed.). Imprenta Universidad Nacional de Colombia.

Montealegre JE (2009): Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>

Ojo MO (2001): Some relationships between the generalized Gumbel and other distributions. *Kragujevac J. Math*, 23, 101-106. [https://imi.pmf.kg.ac.rs/kjm/pub/1261727599604\\_kjom2312.pdf](https://imi.pmf.kg.ac.rs/kjm/pub/1261727599604_kjom2312.pdf)

OMM (2014): El Niño/ Oscilación del Sur. OMM–No 1145. Organización Meteorológica Mundial (OMM). [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=7889](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7889)

Pabón JD (2011): El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. CAR. <http://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/33708>

Pabón JD, Arias PA, Carril AF, Espinoza JC, Borrel LF, Goubanova K, Lavado-Casimiro W, Masiokas M, Solman S, Villalba R (2020): Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8(61), 29. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>

Pabón JD, Montealegre JE (2017): Los Fenómenos de El Niño y de La Niña su efecto climático e impactos socioeconómicos. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Pabón J, Eslava J, Gómez R (2001): Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia, *Meteorol. Colomb.*, 4:47-59. [http://gfmun.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista\\_meteorologia\\_colombiana/numero04/04\\_05.pdf](http://gfmun.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero04/04_05.pdf)

Paulhus JLH, Kohler MA (1952): Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, 80(8):129-133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2)

Poveda G (2004): La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(107):201-222. [https://www.accefyn.com/revista/Vol\\_28/107/201-222.pdf](https://www.accefyn.com/revista/Vol_28/107/201-222.pdf)

Rivera D, Gómez F, Goodhew P, (2004): Altiplanos de Colombia, 1st ed. Banco de Occidente Credencial, Cali.

Shepard D (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-space data. En R. B. S. Blue, A.M. Rosenberg (eds.). *Proceedings of the 1968 ACM National Conference* (pp. 517-

524). New York: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>

Snyder RL, Melo-Abreu JP (2010): Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía - Volumen 1. Serie sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales FAO 10. <http://www.fao.org/docrep/012/y7223s/y7223s00.htm>

Trenberth KE (1997): The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12):2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2)

Vargas G, Hernández Y, Pabón JD (2018): La Niña Event 2010–2011: Hydroclimatic Effects and Socioeconomic Impacts in Colombia. In: Mal S., Singh R., Huggel C. (eds) *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction. Sustainable Development Goals Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_15)

Ycaza P, Manobanda N (2009): Implementación de Mapas de Riesgo Agroclimáticos. En Guía Técnica para la Implementación de un Sistema Regional de Información Aplicada a la Gestión de Riesgo Agrícola en los Países Andinos (pp. 50-62). Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño –CIIFEN. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19777>

Zebiak SE, Orlove B, Muñoz ÁG, Vaughan C, Hansen J, Troy T, Thomson MC, Lustig A, Garvin S (2015): Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationships. *Climate Change*, 6(1):17-34. <https://doi.org/10.1002/wcc.294>