



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática**

**Jenny Paola Marín Salazar**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil  
Manizales, Colombia

2017



# **Dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática**

**Jenny Paola Marín Salazar**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director:

Ph.D., Jorge Julián Vélez Upegui

Codirectora:

M.Sc., Olga Lucía Ocampo López

Línea de Investigación:

Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Grupo de Investigación:

Grupo de trabajo académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2017



*A mi padre, quien me vio emprender este camino y ahora es mi ángel guardián, hoy me siento orgullosa de ser tu reflejo vivo; y a mi madre, mi ejemplo de fortaleza y amor incondicional. Gracias por forjar en mí los pilares que me permitieron ser lo que soy.*



## **Agradecimientos**

El autor expresa sus agradecimientos a las instituciones que menciona a continuación por sus valiosos aportes en la elaboración de este trabajo final de maestría:

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) por el suministro de la información de variables hidroclimáticas.

Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), Proyecto Cuencas Climáticamente Resilientes y Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), por el apoyo económico, suministro de software, asesorías y acompañamiento continuo en el desarrollo del trabajo final.

Proyecto “VACEA-Vulnerability and Adaptation to Climate Extremes in the Americas” ejecutado a través del Instituto de Estudios Ambientales, de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Agradecimientos al grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Ingeniero Jorge Julián Vélez Upegui e Ingeniera Olga Lucia Ocampo López, director y codirectora, por las asesorías en metodologías y temas de investigación, e Ingeniero David Felipe Rincón por apoyo en la elaboración de rutinas de programación.

Agradezco al Ingeniero Richard Muñoz Franco por su apoyo en el procesamiento de información. Su colaboración fue fundamental para la culminación de este trabajo final.



## Resumen

Los fenómenos extremos producto del cambio y la variabilidad climática, plantean grandes retos en cuencas con marcado gradiente altitudinal, condición que las hace especialmente vulnerables; su análisis es fundamental para establecer estrategias de adaptación, gestión del riesgo y avanzar hacia cuencas climáticamente resilientes. Este trabajo de grado de maestría tiene por objetivo determinar la dinámica de los eventos hidroclicmáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná, considerando la variabilidad espacio-temporal. Incluye la caracterización física y climática de la cuenca y aplicación de metodologías para estimar el comportamiento de los extremos de precipitación y caudal en el período histórico 1981–2012. En el primero de los casos, se estableció el análisis de índices climáticos asociados con eventos extremos; mediante el Software RClimdex se estimaron tendencias de los índices, considerando un nivel de confianza del 90%. Por otra parte, se realizó el análisis de curvas de distribución de probabilidad de valor extremo, ciclo diurno y SPI. Respecto al caudal, se analizaron curvas de distribución de probabilidad, análisis trimestral y curvas de duración de caudales. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar la influencia de los factores locales como la altitud y del ENSO en la intensidad de los eventos hidroclicmáticos extremos, sobre todo en la cuenca media y baja. Es necesario incluir los resultados de esta investigación en los planes de adaptación y gestión del riesgo por su aporte en la evaluación de tendencias y comportamiento de los eventos extremos de precipitación y caudal a nivel local.

**Palabras clave:** eventos extremos, índices climáticos, precipitación, caudal, ENSO, funciones de distribución de probabilidad, cuenca del río Chinchiná.

# Dynamics of extreme hydroclimatic events in the Chinchiná river basin due to climatic variability

## Abstract

The extreme phenomena resulting from change and climatic variability, present great challenges in basins with marked altitudinal gradient, a condition that makes them especially vulnerable; its analysis is fundamental to establish strategies of adaptation, risk management and advance towards climatically resilient basins. This master's degree work aims to determine the dynamics of extreme hydroclimatic events in the Chinchiná river basin, considering spatio-temporal variability. It includes the physical and climatic characterization of the basin and application of methodologies to estimate the behavior of precipitation extremes and river flow in the historical period 1981-2012. In the first case, the analysis of climatic indexes associated with extreme events was established; using the RCLimindex Software, index trends were estimated, considering a 90% confidence level. On the other hand, the analysis of extreme value probability distribution curves, diurnal cycle and SPI was performed. Regarding the river flow, probability distribution curves, quarterly analysis and flow duration curves were analyzed. The results obtained allowed to show the influence of local factors such as altitude and ENSO in the intensity of extreme hydroclimatic events, especially in the middle and low basin. It's necessary to include the results of this research in the adaptation and risk management plans for their contribution in the evaluation of trends and behavior of the extreme events of precipitation and flow at the local level.

**Keywords:** extreme events, climatic indexes, precipitation, river flow, ENSO, probability distribution functions, Chinchiná river basin.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Estado del arte</b> .....	<b>4</b>
1.1 Variabilidad climática .....	4
1.1.1 Modos de variabilidad climática .....	5
1.1.2 Variabilidad climática en Colombia .....	7
1.1.3 El Niño Oscilación del Sur – ENSO .....	8
1.1.4 Índices climáticos del ENSO .....	10
1.2 Eventos extremos .....	12
<b>2. Antecedentes</b> .....	<b>16</b>
2.1 Antecedentes nacionales .....	16
2.2 Antecedentes internacionales .....	18
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>29</b>
3.1 Objetivo general .....	29
3.2 Objetivos específicos .....	29
<b>4. Metodología</b> .....	<b>30</b>
4.1 Descripción del área de estudio .....	30
4.1.1 Características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca del río Chinchiná. ....	31
4.1.2 Climatología de la cuenca del río Chinchiná .....	33
4.2 Descripción metodológica .....	36
4.2.1 Información histórica de series hidroclimáticas .....	36
4.2.2 Correlaciones entre variables hidroclimáticas y el Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO .....	40
4.2.3 Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo .....	41
4.2.4 Índices climáticos y evaluación de tendencias .....	43
4.2.5 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) .....	45
4.2.6 Ciclo diurno de la precipitación .....	47

---

4.2.7	Curvas de duración de caudales.....	48
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>49</b>
5.1	Análisis estadístico de variables hidroclimáticas.....	49
5.1.1	Análisis exploratorio numérico y gráfico de la precipitación .....	49
5.1.2	Análisis de homogeneidad de la precipitación.....	55
5.1.3	Análisis exploratorio numérico y gráfico del caudal .....	59
5.1.4	Análisis de homogeneidad del caudal .....	64
5.2	Análisis trimestral: Correlaciones de la precipitación con el Índice Oceánico de El Niño – ONI.....	66
5.3	Evaluación de eventos extremos de precipitación .....	69
5.3.1	Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo.....	69
5.3.2	Tendencias en la precipitación mediante el análisis de índices climáticos.....	76
5.3.3	Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	88
5.3.4	Análisis del ciclo diurno de la precipitación.....	93
5.4	Análisis trimestral: Caudales medios Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI) .....	97
5.5	Evaluación de eventos extremos de caudal .....	99
5.5.1	Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo.....	99
5.5.2	Curvas de duración de caudales.....	104
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>108</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1: Localización de las regiones El Niño sobre el pacífico ecuatorial. ....	10
Figura 1-2: Variación histórica del ONI. ....	11
Figura 1-3: Eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná. ....	15
Figura 4-1: Localización de la cuenca del río Chinchiná. ....	30
Figura 4-2: Climatología de la precipitación para la cuenca del río Chinchiná. ....	35
Figura 4-3: Climatología de la temperatura máxima para la cuenca del río Chinchiná. ...	35
Figura 4-4: Climatología de la temperatura mínima para la cuenca del río Chinchiná. ....	36
Figura 4-5: Localización de las estaciones de precipitación en la cuenca del río Chinchiná. ....	39
Figura 4-6: Localización de las estaciones de caudal en la cuenca del río Chinchiná. ....	39
Figura 4-7: Localización de las estaciones de precipitación para análisis de ciclo diurno. ....	47
Figura 5-1: Análisis exploratorio gráfico: Histogramas de frecuencias para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná. ....	52
Figura 5-2: Análisis exploratorio gráfico: Gráficos de cajas para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná. ....	54
Figura 5-3: Análisis exploratorio gráfico: Curvas de masa simple para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná. ....	54
Figura 5-4: Análisis exploratorio gráfico: Histogramas de frecuencias para los caudales en la cuenca del río Chinchiná. ....	61
Figura 5-5: Análisis exploratorio gráfico: Gráficos de cajas para los caudales en la cuenca del río Chinchiná. ....	63
Figura 5-6: Análisis exploratorio gráfico: Curvas de masa simple para los caudales en la cuenca del río Chinchiná. ....	64
Figura 5-7: Análisis trimestral gráfico del comportamiento de la precipitación en la cuenca del río Chinchiná y su correlación con el ONI. ....	67
Figura 5-8: Correlación de Pearson: Precipitación Trimestral en la cuenca del río Chinchiná Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI). ....	69
Figura 5-9: Curvas de distribución de probabilidad obtenidas con la función Generalized Extreme Value GEV para la cuenca del río Chinchiná. ....	70
Figura 5-10: Interpolación de lluvias máximas según la función de distribución GEV para la cuenca del río Chinchiná. ....	72
Figura 5-11: Lluvias máximas para diferentes períodos de retorno según la función de distribución de probabilidad GEV y su relación con la altitud. ....	73

Figura 5-12: Curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica según la función GEV para la estación Cenicafé.....	74
Figura 5-13: Comparación del comportamiento de las lluvias máximas según condición hidrológica para diferentes períodos de retorno en la estación Cenicafé .....	74
Figura 5-14: Comparación de las lluvias máximas para el período de retorno de 5 años para la estación Cenicafé. ....	76
Figura 5-15: Tendencia de los días secos consecutivos para la cuenca del río Chinchiná. ....	77
Figura 5-16: Tendencia de los días lluviosos consecutivos para la cuenca del río Chinchiná. ....	78
Figura 5-17: Tendencia de la precipitación anual total en los días lluviosos para la cuenca del río Chinchiná. ....	79
Figura 5-18: Tendencia del número de días con precipitación intensa para la cuenca del río Chinchiná. ....	80
Figura 5-19: Tendencia del número de días con precipitación muy intensa para la cuenca del río Chinchiná. ....	81
Figura 5-20: Tendencia del número de días con precipitación extremadamente intensa para la cuenca del río Chinchiná. ....	82
Figura 5-21: Tendencia de los días muy lluviosos para la cuenca del río Chinchiná. ....	83
Figura 5-22: Tendencia de los días extremadamente lluviosos para la cuenca del río Chinchiná. ....	84
Figura 5-23: Tendencia de la cantidad máxima de precipitación en un día para la cuenca del río Chinchiná. ....	85
Figura 5-24: Tendencia de la cantidad máxima de precipitación en 5 días para la cuenca del río Chinchiná. ....	86
Figura 5-25: Tendencia del índice simple de intensidad diaria para la cuenca del río Chinchiná. ....	87
Figura 5-26: SPI de 6 meses, Períodos húmedos fuertes. ....	89
Figura 5-27: SPI de 6 meses, Períodos secos fuertes. ....	90
Figura 5-28: SPI de 12 meses, Períodos húmedos fuertes. ....	91
Figura 5-29: SPI de 12 meses, Períodos secos fuertes. ....	92
Figura 5-30: Resultados del ciclo diurno de la precipitación para la cuenca del río Chinchiná. ....	94
Figura 5-31: Resultados del ciclo diurno de la precipitación para la estación Cenicafé. ..	96
Figura 5-32: Análisis por condición hidrológica del ciclo diurno de la precipitación en la estación Cenicafé. ....	96
Figura 5-33: Análisis trimestral de los caudales medios y su relación con el Índice Oceánico de El Niño (ONI). ....	97
Figura 5-34: Correlación de Spearman: Caudales medios trimestrales en la cuenca del río Chinchiná Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI). ....	98
Figura 5-35: Curvas de distribución de probabilidad obtenidas con la función Two Components Extreme Value (TCEV) para los caudales máximos en la cuenca del río Chinchiná. ....	100

---

Figura 5-36: Curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica según la función TCEV para la estación El Retiro. ....	101
Figura 5-37: Comparación del comportamiento de los caudales máximos según condición hidrológica para diferentes períodos de retorno en la estación El Retiro.....	102
Figura 5-38: Curvas de distribución de probabilidad por períodos tridecadales según la función TCEV para la estación El Retiro. ....	103
Figura 5-39: Comparación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno en la estación El Retiro. ....	103
Figura 5-40: Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación El Retiro.....	104
Figura 5-41: Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación Irra. ....	105
Figura 5-42: Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación La Paila. ....	106



# Lista de tablas

Pág.

Tabla 4-1: Parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná y principales subcuencas. ....	32
Tabla 4-2: Georreferenciación de las estaciones de precipitación seleccionadas.....	38
Tabla 4-3: Georreferenciación de las estaciones de caudal seleccionadas. ....	38
Tabla 4-4: Índices de precipitación proporcionados por RClimdex. ....	44
Tabla 4-5: Valores del índice estandarizado de precipitación. ....	46
Tabla 5-1: Resultados del análisis exploratorio numérico de la precipitación. ....	50
Tabla 5-2: Resultados de la aplicación del Test de Mann Kendall a los datos de lluvia. ...	56
Tabla 5-3: Resultados de la aplicación del Método de Sen a los datos de lluvia. ....	57
Tabla 5-4: Resultados de la aplicación de la prueba de signo a los datos de lluvia. ....	58
Tabla 5-5: Resultados de la aplicación de la prueba de Pettitt a los datos de lluvia. ....	59
Tabla 5-6: Resultados del análisis exploratorio numérico del caudal.....	60
Tabla 5-7: Resultados de la aplicación del Test de Mann Kendall a los datos de caudal. 65	
Tabla 5-8: Resultados de la aplicación de la prueba de signo a los datos de caudal. ....	65
Tabla 5-9: Resultados de la aplicación de la prueba de Pettitt a los datos de caudal. ....	66
Tabla 5-10: Coeficientes de correlación: Precipitación trimestral Vs. ONI.....	68
Tabla 5-11: Lluvias máximas para diferentes períodos de retorno (Tr) según la función de distribución de probabilidad GEV. ....	71
Tabla 5-12: Análisis de lluvias máximas por condición hidrológica para la estación Cenicafé. ....	74
Tabla 5-13: Análisis de lluvias máximas por períodos tridecadales para la estación Cenicafé. ....	75
Tabla 5-14: Análisis de lluvias máximas horarias por condición hidrológica para la estación Cenicafé. ....	95
Tabla 5-15: Coeficientes de correlación: Caudales medios trimestrales Vs. ONI.....	98
Tabla 5-16: Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Tr) según la función de distribución de probabilidad "TCEV".....	100
Tabla 5-17: Análisis de caudales máximos por condición hidrológica para la estación El Retiro.....	102
Tabla 5-18: Análisis de caudales máximos por períodos tridecadales para la estación El Retiro. ....	103
Tabla 5-19: Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación El Retiro. ....	105

Tabla 5-20: Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación Irra. ....	106
Tabla 5-21: Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación La Paila. ....	107

# Introducción

La evaluación de la dinámica de los extremos hidroclimáticos ha tomado particular interés a nivel mundial, pues supone un desafío para la comunidad científica investigar cómo es su evolución espacio-temporal y así poder obtener conclusiones cuantitativas y cualitativas que permitan su comprensión y la toma de las medidas necesarias para enfrentar su incidencia en el medio ambiente y los diferentes sectores socioeconómicos. Diversos estudios sugieren que su comportamiento está fuertemente influenciado por patrones meteorológicos y modos de variabilidad climática, que aumentan su frecuencia de ocurrencia e intensidad.

Es por esto que el análisis de tendencias de extremos climáticos es indispensable para generar conciencia del aumento de la probabilidad de estos eventos, como precipitaciones intensas y prolongadas a nivel global. Adicionalmente, sirven como base para estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos. No obstante, hace falta mayor resolución temporal de los datos que garantice una más alta calidad y análisis a largo plazo de estos eventos extremos, particularmente en América Latina, donde las señales de cambio son claras, pero hace falta mayor profundidad en su estudio.

Para Latinoamérica, la influencia de la variabilidad climática natural en las tendencias de estos extremos climáticos es evidente. La ola invernal causada por La Niña 2010-2011, generó una gran cantidad de desastres naturales en todo el territorio colombiano, asociados a inundaciones, crecientes súbitas y deslizamientos de tierra con consecuentes pérdidas tanto materiales como humanas, ocasionando un estado de emergencia sin precedentes. Por otro lado, El Niño 2015-2016 se ubicó dentro de los más fuertes desde la década de los 50's, agravando las sequías especialmente en los países en desarrollo.

En este sentido, los impactos generados históricamente por el ENSO hacen que este se convierta en el principal modo de variabilidad interanual en países como Colombia, y el más dominante para el siglo XXI, intensificando la variabilidad de las precipitaciones a nivel mundial. Es por esto que todos los estudios provenientes de información climática y meteorológica deben relacionar este fenómeno y evaluar el nivel de incertidumbre que pueden generar sus resultados.

Es allí donde la evaluación de la dinámica de los eventos extremos se convierte en una herramienta útil para la gestión del riesgo y su integración en los planes de adaptación y resiliencia frente al cambio y la variabilidad climática; proporcionan además criterios de comparación entre regiones o cuencas y contribuyen a la planificación y a la definición de estrategias para mitigar sus consecuencias; así mismo, es de importancia analizar la incidencia de los patrones locales como la altitud, sobre todo en zonas con marcado gradiente altitudinal, donde en cortas distancias se pueden evidenciar grandes cambios.

La comprensión de la dinámica de los eventos extremos de precipitación en cuencas andinas es particularmente relevante para Colombia, por la importancia de estas cuencas para el desarrollo regional y la alta densidad de población asentada en cabeceras urbanas. A nivel nacional, se ha avanzado con los planes de gestión del riesgo, el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático y los planes de gestión integral de cuencas, que han permitido definir líneas de trabajo, en las cuales las evaluaciones de las amenazas naturales son fundamentales.

La cuenca del río Chinchiná, Colombia, es una de las cuencas piloto a nivel nacional para el establecimiento de medidas de adaptación, mitigación y gobernanza de los recursos naturales mediante la instauración de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. En esta, se vienen desarrollando diferentes iniciativas con cooperación internacional para avanzar en la construcción de cuencas climáticamente resilientes.

Este trabajo final de maestría es producto de una investigación que tiene por objetivo evaluar la dinámica de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río Chinchiná, mediante el análisis de tendencias, ciclo diurno, curvas de distribución de probabilidad de valor extremo, curvas de duración de caudales y establecimiento de relaciones con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO. Se enmarca dentro del proyecto “*Cuencas climáticamente resilientes*” ejecutado por el Centro Internacional para la

---

Investigación del Fenómeno de El Niño – CIIFEN, designado como el Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional – USAID que en convenio con la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, buscan aliados interinstitucionales para fortalecer el conocimiento base e integrarlo a la toma de decisiones y definición de estrategias para la adaptación y resiliencia frente al cambio y a la variabilidad climática, donde el análisis de eventos extremos juega un papel fundamental por la actual incidencia que tiene en el comportamiento del clima a nivel regional.

# 1. Estado del arte

A continuación, se presenta una breve recopilación de la terminología más representativa para la finalidad de este trabajo final. De manera particular se enfatizó en la variabilidad climática y eventos hidroclimáticos extremos.

## 1.1 Variabilidad climática

El clima de una región está determinado por su ubicación, geografía y factores atmosféricos como la precipitación, la temperatura, el viento, la radiación solar y la humedad relativa; adicionalmente, la influencia de factores locales como la elevación sobre el nivel del mar favorecen el desarrollo de microclimas (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014; IDEAM, 2005; Jaramillo, 2005).

El análisis de los valores promedio de las variables climáticas permite definir y comparar el clima, pero es necesario tener registros continuos de por lo menos 30 años para que los resultados sean considerados representativos y engloben la totalidad de los fenómenos climáticos que puedan interferir en el comportamiento del clima de cualquier región (IDEAM, 2005), experimentando tendencias, saltos bruscos, aumentos, disminuciones y alteraciones en su dinámica natural (IDEAM, 2010); para cuantificar este cambio se recurre al cálculo de anomalías definidas como la diferencia del valor promedio de la variable y el dato registrado en un tiempo determinado (IDEAM, 2010).

Las fluctuaciones del clima en diferentes escalas temporales con oscilaciones por encima o por debajo de la normal climatológica son conocidas como variabilidad climática (IDEAM, 2005; Montealegre, 2005; OMM, 2013; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). En este sentido la variabilidad natural es parte inherente del clima, adicionalmente es impulsada a experimentar más modificaciones por efectos naturales y antropogénicos (OMM, 2013).

### 1.1.1 Modos de variabilidad climática

Dentro de las principales fluctuaciones temporales del clima, las que se destacan por su influencia en el desarrollo de procesos atmosféricos son (Montealegre & Pabón, 2002; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014):

- **Estacional:** Definida como la variación del clima a escala mensual que en latitudes medias está dada por la presencia de las estaciones del año, en las cuales las condiciones climáticas son fijas, a diferencia de las latitudes tropicales donde incluso en escalas temporales reducidas las condiciones atmosféricas son cambiantes. A continuación, se describen algunos de los fenómenos de variabilidad más importantes a escala estacional:

**Zona de convergencia intertropical:** Es la banda de presión que rodea la tierra cerca del Ecuador; allí convergen los vientos alisios provenientes de los hemisferios norte y sur (IDEAM, 2005; Vélez et al., 2015), su movimiento es latitudinal (Mitchell & Wallace, 1992) y a su paso por las distintas regiones genera temporadas de mayor nubosidad y precipitaciones intensas; en Colombia es la responsable del comportamiento bimodal de la precipitación, con dos períodos marcados de lluvia en los meses de marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre; los meses restantes corresponden a estaciones relativamente secas (Eslava, 1993; Pabón y Rivera, 1993; León et al., 2000; Mejía et al., 2000; Jaramillo, 2005; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014; Vélez et al., 2015).

**Sistemas convectivos de Meso-escala:** Influyen en la dinámica de la precipitación en Colombia y tienen relación directa con la zona de convergencia intertropical (Poveda, 2004; Vélez et al., 2015).

**La corriente de chorro del Chocó:** Es la corriente responsable del transporte de la humedad proveniente del Océano Pacífico en el interior de Colombia; los vientos superficiales del Océano Pacífico, que son más fríos y densos, interactúan con los vientos alisios del este sobre la cordillera de los Andes colombianos, que por su complejidad orográfica produce inestabilidad atmosférica, ascenso de aire frío y condensación que se

traduce en altas precipitaciones. Tiene relación directa con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO (Poveda & Mesa, 1999).

**Los sistemas sinópticos de la Amazonía:** Ocurren entre mayo y noviembre, particularmente a mitad de año, por el movimiento de los frentes fríos del Polo sur que atraviesan el trópico, originando líneas de inestabilidad en la Amazonía colombiana; adicionalmente, en esta zona también afecta la baja amazónica que es un sistema de baja presión que contribuye a intensificar las lluvias en el sur del país, producto del desplazamiento de la ZCIT hacia el sur (Pabón et al., 1998; Vélez et al., 2015).

- **Intraestacional:** es el tipo de oscilación que determina las condiciones del tiempo atmosférico durante semanas (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). Entre las más destacadas se encuentran:

**Oscilaciones de 30 – 60 días:** Asociadas con la oscilación de Madden – Julian (Madden & Julian, 1971) y el comienzo y fin del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur. Influye notablemente en las precipitaciones en Colombia (Poveda et al., 2002; Vélez et al., 2015).

**Ondas tropicales del este del caribe:** Perturbaciones de tipo ondulatorio de verano y otoño, se presentan entre junio y noviembre en el Atlántico tropical norte; su intensificación da lugar a tormentas tropicales y ciclones en el Atlántico norte y mar Caribe (Poveda, 2004; IDEAM, 2005; Vélez et al., 2015) son frecuentes en la temporada de lluvia del oriente y norte de Colombia y el valle del río Magdalena (IDEAM, 2005).

**Las vaguadas de latitudes medias del hemisferio norte:** Tipo especial de onda del este que se produce durante el invierno del hemisferio norte, en diciembre y marzo. La vaguada es un eje de baja presión que provoca intensificación de nubosidad y lluvias (Pabón et al., 1998; IDEAM, 2005; Vélez et al., 2015).

**La vaguada tropical de la alta troposfera- TUTT:** Es de alta importancia para la formación de ciclones tropicales en el caribe; normalmente se presenta entre junio y noviembre (IDEAM, 2005; Vélez et al., 2015).

**Ciclones tropicales:** Sistemas giratorios que se originan sobre aguas tropicales o subtropicales en centros de baja presión y generan fuertes vientos y tormentas de alta intensidad (NOAA, 2013).

- **Interanual:** Son las alteraciones que se presentan en las variables climáticas en el transcurso de un año. Se destaca el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur, por ser el más conocido de los modos globales de variabilidad interanual y el principal para Colombia (Poveda, 2004; IPCC, 2008).
- **Interdecadal:** fluctuaciones del clima en el transcurso de periodos de 10 años (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014), entre ellas se destacan la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) por su notoria influencia sobre el clima colombiano (Poveda; 2004; Vélez et al., 2015).

**La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)** es un modelo de variabilidad basado en el calentamiento superficial del Pacífico a 20°N (Mantua & Hare, 2002); durante la fase cálida el Pacífico occidental se enfría, mientras que el oriental se calienta; la fase fría produce el efecto inverso. Las anomalías de la PDO en Sur América son similares al ENSO, pero equivalen a la mitad de su amplitud (Garreaud et al., 2008; Vélez et al., 2015).

**La Oscilación del Atlántico Norte (NAO)** está relacionada con cambios en la velocidad y dirección del viento sobre el océano y las trayectorias de las tormentas de invierno que afectan la distribución de la precipitación y la temperatura en el hemisferio norte (Hurrell & Van Loon, 1997; Bojariu & Gimeno 2003; Hurrell et al., 2003; Jones et al., 2003; Vélez et al., 2015).

### 1.1.2 Variabilidad climática en Colombia

Colombia es un país tropical localizado en la franja ecuatorial, cuyo clima está influenciado por la dinámica de los océanos Atlántico y Pacífico, la presencia de la cuenca del río Amazonas y de los tres ramales de la Cordillera de los Andes, que generan fuertes interacciones océano – suelo – atmósfera, creando numerosos climas y microclimas que van desde los más cálidos en zonas costeras y riveras de ríos como el Magdalena y Cauca hasta los pisos térmicos más fríos del páramo y nieves perpetuas ubicados en los picos de

las montañas de las cordilleras (IDEAM, 2005; Jaramillo, 2005); su localización sobre una región tropical es de particular interés pues alberga mayor biodiversidad que cualquier otra zona de la tierra (Herzog et al., 2013).

Los Andes colombianos se caracterizan por tener un clima húmedo y marcadas variaciones en la temperatura del día, influenciada por los gradientes altitudinales y la humedad del aire, al igual que la precipitación, que cuenta con una amplia variabilidad espacio-temporal (Eslava, 1993; Pabón et al., 2001). Los principales factores que favorecen el clima en la región andina son la presencia del bosque amazónico, el paso de la zona de convergencia intertropical, los vientos alisios, la corriente de chorro del Chocó y el sistema permanente de alta presión del Pacífico sur y el Atlántico norte (Poveda, 2004; Jaramillo, 2005; Martínez et al., 2013; Vélez et al., 2015); adicionalmente, los factores locales como la altitud tienen fuerte influencia en el clima de la región.

En Colombia, las alteraciones en el ciclo normal del clima, producto de fenómenos naturales o intervenciones humanas, generan eventos extremos como precipitaciones excesivas o sequías prolongadas, con alta incidencia en los recursos hídricos y diferentes sectores socioeconómicos del país. Se considera que la ocurrencia de estos fenómenos tiene relación directa con el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (IPCC, 2007; CEPAL, 2009; Vélez et al., 2015).

### **1.1.3 El Niño Oscilación del Sur – ENSO**

A finales del siglo XIX, pescadores de las costas peruanas identificaron que era recurrente que a finales de diciembre la temperatura del mar se volviera más cálida; por su llegada en época de navidad a esta corriente marítima la denominaron corriente de “El Niño” (SENAMHI, 2014).

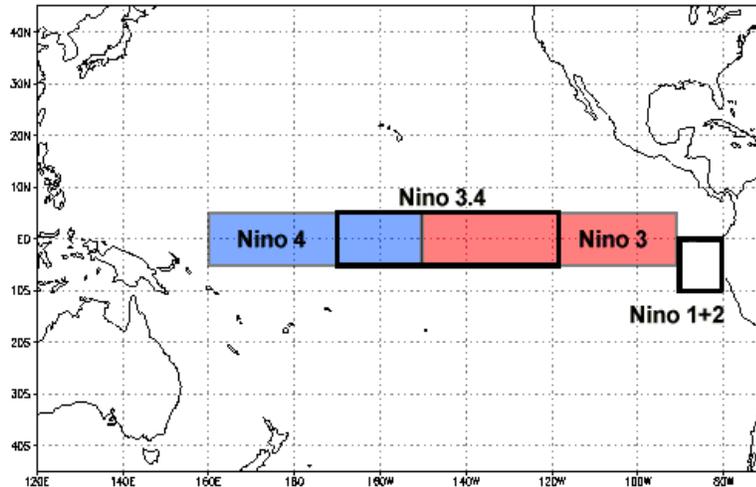
El fenómeno conocido como El Niño Oscilación del Sur – ENSO es el principal modo de variabilidad climática a escala interanual en la franja tropical del océano Pacífico. Durante su ocurrencia se pueden identificar dos componentes oceánicas, que se caracterizan por la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña). Estas alteraciones están influenciadas por el debilitamiento de los vientos alisios que modifican la circulación de las corrientes de aguas superficiales del océano pacífico (IDEAM, 2007).

Los vientos que corren por la superficie del océano pacífico se conocen como vientos alisios, los cuales soplan de este a oeste, alejando de Sudamérica las aguas de la superficie oceánica en dirección hacia Indonesia y Australia. Por su parte, en lo alto de la atmósfera el viento se mueve en dirección opuesta dando como resultado un sistema de circulación de aire. Dado que el océano Pacífico absorbe una cantidad enorme de calor solar, la temperatura oceánica aumenta y las aguas templadas son desplazadas por los vientos alisios hacia el oeste, generando acumulación de aguas cálidas sobre la costa de Indonesia y el norte de Australia, lugar donde el aire cálido y húmedo se eleva formando nubes de lluvia (BBC Mundo, 2011; NOAA, 2015).

Los episodios de El Niño suceden a intervalos entre dos y siete años (Dore, 2005), cuando los vientos alisios del trópico se debilitan o invierten su dirección habitual; en ese momento se desplazan las aguas superficiales hacia el Océano Pacífico oriental y hacia la costa ecuatorial occidental de Suramérica; con esta corriente se desplazan las lluvias que pueden causar inundaciones en unas regiones y sequías en otras (OMM, 2005; 2012). En Colombia, la fase cálida está asociada con incrementos en la temperatura media y reducciones en la humedad del suelo, la precipitación y la descarga de los ríos (IDEAM 1998).

El fenómeno opuesto, La Niña, hace que los vientos alisios soplen con una fuerza mucho más grande, con lo cual una masa de agua mayor es desplazada en dirección oeste, ocasionando una gran acumulación de agua caliente en las costas de Indonesia y norte de Australia, generando precipitaciones más abundantes y frecuentes. En contraste con este comportamiento, Perú y Ecuador experimentan un clima mucho más seco (BBC Mundo, 2011; NOAA, 2015). En Colombia la fase fría se relaciona con incrementos significativos en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, niveles y caudales de los ríos y un aumento en la humedad del suelo.

Con el objetivo de tener una mayor comprensión del desarrollo del fenómeno ENSO sobre la región del océano Pacífico, se han definido cuatro regiones: Niño 4, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 1+2. La Figura 1-1 muestra la localización de las regiones El Niño.



**Figura 1-1:** Localización de las regiones El Niño sobre el pacífico ecuatorial.  
Fuente: (NOAA, 2015).

**Región Occidental:** (Región Niño 4): Entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 160° este y 150° oeste.

**Región Central:** (Región Niño 3): Entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 90° y 150° oeste.

Las regiones Niño 4 y Niño 3 se caracterizan por presentar las mayores anomalías de la temperatura superficial del mar (INOCAR, 2011).

**Región Centro-occidental:** (Región Niño 3-4): Entre las latitudes 5° norte y 5° sur y las longitudes 120° y 170° oeste. Buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el Índice de Oscilación del Sur – IOS (INOCAR, 2011).

**Región Oriental:** (Región Niño 1+2): Entre las latitudes 0° y 10° sur y las longitudes 90° y 80° oeste. Incluye las costas de Perú y Ecuador.

### 1.1.4 Índices climáticos del ENSO

Numerosos índices son empleados actualmente para caracterizar los fenómenos del ciclo ENSO. A continuación, se describen brevemente algunas de sus características más importantes.

- **Índice de Oscilación del Sur (IOS)**

Es un índice estandarizado basado en las diferencias de presión en el nivel del mar entre Tahití (Polinesia francesa) y Darwin (Australia). La fase negativa del IOS representa una presión atmosférica inferior a la normal en Tahití y superior a la

normal en Darwin. La existencia de valores negativos y positivos del IOS coincide con aguas normalmente cálidas y frías en el pacífico tropical oriental respectivamente, típicos del fenómeno de El Niño – La Niña (NOAA, 2015).

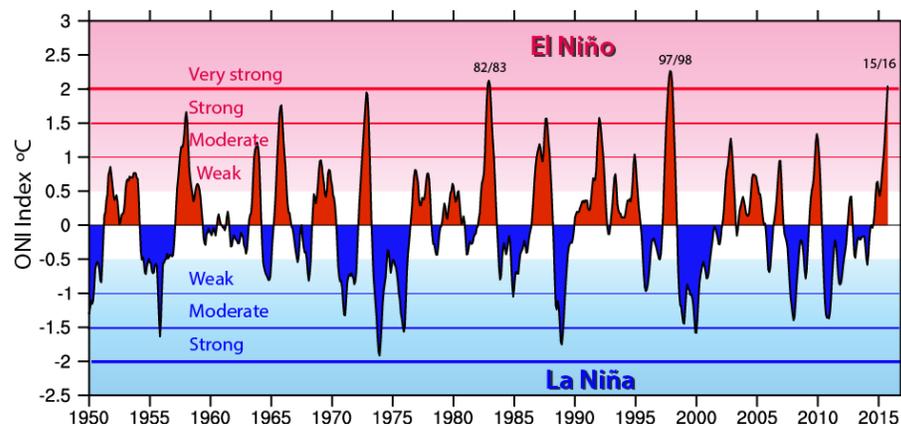
### ▪ Índice atmosférico multivariado del ENSO (MEI)

Este índice emplea como componentes principales las seis variables: temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire, presión atmosférica al nivel del mar, nubosidad, componente zonal del viento y componente meridional del viento (IDEAM, 2014). Por tanto, se caracteriza por ser un índice mixto que involucra variables atmosféricas y oceánicas. Valores positivos de MEI hacen referencia a la fase cálida del ENSO (IDEAM, 2009).

### ▪ Índice Oceánico El Niño (ONI)

Es la media móvil de 3 puntos de la serie mensual de anomalías de la temperatura superficial del océano Pacífico en la región Niño 3.4 para el período de referencia 1971 – 2000. Para que las condiciones El Niño existan, el ONI debe ser mayor o igual a  $+0.5$  °C y para La Niña menor o igual que  $-0.5$  °C. Adicionalmente, para categorizar dichos eventos, los umbrales mencionados deben permanecer o ser excedidos al menos por 5 meses consecutivos (IDEAM, 2009).

La Figura 1-2 muestra el comportamiento histórico del Índice Oceánico de El Niño; se representan episodios cálidos y fríos de diferentes intensidades para el período 1950 – 2015.



**Figura 1-2:** Variación histórica del ONI.

Fuente: (UCAR, 2017)

## 1.2 Eventos extremos

Durante los últimos cincuenta años las condiciones meteorológicas extremas han sido la causa de nueve de cada diez desastres naturales en el mundo (OMM, 2009; 2011). La primera década del siglo XXI se caracterizó por los drásticos fenómenos de precipitación extrema, que generaron inundaciones, desbordamientos de ríos y deslizamientos de tierra (OMM, 2013). La ocurrencia de estos eventos hidroclimáticos extremos está influenciada por patrones meteorológicos a pequeña y gran escala, modos de variabilidad como el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur y retroalimentaciones tierra – atmósfera que aceleran la frecuencia con la que se producen (IPCC, 2013).

El Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, 2012) define el evento extremo como todo aquel fenómeno meteorológico “raro” en términos de su distribución estadística de referencia; presenta una baja frecuencia de ocurrencia en función del tiempo, esto quiere decir que, entre evento y evento existen lapsos muy grandes. Sin embargo, hay evidencia de que en la actualidad están impactando con mayor frecuencia (IPCC, 2007) los ecosistemas, el equilibrio medioambiental, los diferentes sectores socioeconómicos y las poblaciones (Fallas & Valverde, 2007), en especial aquellas con menores recursos y capacidad de adaptación y resiliencia limitada (PNUD, 2000; OMM, 2011).

A medida que los centros poblados crecen con insuficiencia de medidas de planificación y gestión del riesgo, permitiendo asentamientos en zonas de alta vulnerabilidad, se convierten en focos susceptibles ante la ocurrencia de fenómenos hidroclimáticos extremos. Cifras del PNUD (2004) indican que el 85% de la población más expuesta vive en países cuyo desarrollo humano es medio o bajo. Adicionalmente, hacen referencia a que las pérdidas crecieron 1.8 veces entre las décadas del 60 y 70, 1.8 veces entre el 79 y el 80 y finalmente en los 90’s se triplicaron con respecto a los 80’s; el número de personas afectadas ha ido aumentando en los últimos treinta años. Es por esto que el aumento de fenómenos hidroclimáticos extremos sumado a la presencia de poblaciones expuestas, con ausencia de sistemas de alerta temprana y monitoreo permanente podría generar eventos catastróficos más grandes (Fallas & Valverde, 2007).

En las zonas tropicales, dada su ubicación geográfica y características climáticas, la frecuencia de las precipitaciones intensas ha incrementado (Roy & Rouault, 2013) con

variaciones sustanciales en los patrones espacio–temporales, causando inundaciones y deslizamientos de tierra (IPCC, 2007).

Según el IPCC (2014), desde el siglo pasado han sido evidentes los cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, algunos asociados con factores antropogénicos como, por ejemplo, el aumento de las temperaturas cálidas, disminución de las temperaturas frías, la elevación de los niveles de mares y ríos y el incremento de precipitaciones intensas en todo el mundo. Además, indicaron que existe un nivel de confianza medio que explica que es posible que haya más regiones en las que ha aumentado el número de eventos de precipitaciones intensas que en las que se ha disminuido, lo cual conlleva a un aumento de caudales extremos, generando mayores riesgos de inundación a escala regional.

En Colombia, gran parte de los cambios que experimenta la precipitación en diferentes escalas espacio–temporales, se atribuyen al fenómeno de El Niño y La Niña (Velásquez & Rosales, 2002; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). Durante El Niño, disminuye la temperatura en horas de la madrugada, la temperatura atmosférica es mayor en las horas del día en las regiones Pacífica y Andina, es apreciable un déficit de precipitaciones en las regiones Andina, Caribe y norte del Pacífico y disminuyen los caudales de los ríos del centro, occidente y norte de Colombia (Poveda, 2004; Poveda et al., 2011). La pérdida de humedad también es evidente en el suelo, facilitando la propagación de incendios forestales (IDEAM, 2009; Velásquez & Rosales, 2002; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). Adicionalmente, el sector hidroeléctrico se ve afectado por la disminución de los niveles de embalses y represas; en la salud, aumentan las enfermedades tropicales causadas por los incrementos en la temperatura, facilitando la propagación de vectores contagiosos de enfermedades como el dengue (Banco de la República, 2007).

En Colombia, durante El Niño se producen fuertes afectaciones en los recursos hídricos; por ejemplo, en los ríos Cauca y Magdalena se registran disminuciones del caudal medio del 30% y el 55% respectivamente (Carvajal et al., 1998, IDEAM, 2010; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).

Durante la fase fría del fenómeno de El Niño (La Niña), se presentan excesos de lluvia sobre todo en la región Andina y Caribe, disminución de la temperatura ambiente y la radiación solar, así mismo, aumentan los niveles de los ríos y hay mayor probabilidad de

inundaciones y deslizamientos de tierra (Velásquez & Rosales, 2002; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).

Históricamente en Colombia, durante los años 1971, 1973, 1974, 1988, 1998, 2010 y 2011 las lluvias intensas se propagaron en más del 50% del territorio, ocasionando incrementos en los caudales de los ríos de más del 70% (FOREC et al., 2000; IDEAM, 2010).

La Niña 2010-2011, generó afectaciones en gran parte del territorio colombiano, causando pérdidas de aproximadamente 7.8 billones de dólares relacionadas con la destrucción de infraestructura, cultivos, ganadería y pago de subsidios por el gobierno nacional (Hoyos et al., 2007).

A nivel local, El Niño 2010 – 2011 generó una fuerte ola invernal, creando un estado de emergencia en la capital de Caldas por la afectación sufrida a causa de la avalancha del río Chinchiná, que se llevó a su paso las tuberías que conducían el agua a la ciudad de Manizales; durante 17 días la población estuvo sin suministro de agua potable, dejando en evidencia la inexistencia de un plan de contingencia para enfrentar posibles desastres naturales. Luego de esto, la situación se repitió 1 mes después a causa de las constantes lluvias y deslizamientos en la cuenca.

Sin embargo, aunque este ha sido uno de los eventos extremos que ha afectado severamente el territorio, numerosos desastres naturales han sido repetitivos en la cuenca, entre los que sobresalen los deslizamientos de tierra, desprendimientos de capa vegetal, inundaciones por colmatación de redes de alcantarillado, avalanchas y avenidas torrenciales. La Figura 1-3 muestra algunos de los eventos extremos ocurridos en los últimos años en la cuenca.

El análisis de eventos hidroclimáticos extremos se convierte en una herramienta para la comprensión del clima local y su evolución en el tiempo y el espacio (OMM, 2011); es particularmente importante para la gestión integral de los recursos hídricos, el estudio de la variabilidad climática, evaluación de amenazas y población vulnerable, impactos en diferentes sectores socioeconómicos, y, además es un insumo base para la modelación hidrológica de cuencas. Es por esta razón que comprender su dinámica, no sólo en términos de intensidad o duración, como es habitual, es indispensable para el análisis hidrológico (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).



**Figura 1-3:** Eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

## **2. Antecedentes**

A continuación, se presenta una descripción general de los estudios realizados tanto a nivel internacional, analizando las investigaciones realizadas en los diferentes continentes para tener una visión más global de lo que está ocurriendo en cuanto a tendencias de precipitación se trata, como en el ámbito nacional para examinar cómo en Colombia se está enfrentando la problemática actual de incremento en magnitud y frecuencia de ocurrencia de los fenómenos hidroclimáticos extremos, que afectan mayormente países en vías de desarrollo con capacidad de adaptación, mitigación y resiliencia limitada.

### **2.1 Antecedentes nacionales**

Benavides, Mayorga & Hurtado (2007) generaron índices climáticos en algunas ciudades de Colombia, con base en el análisis de las series históricas de lluvia diaria desde la década de los treinta utilizando el software RClimdex. El índice relacionado con la precipitación total anual, mostró que en gran parte del país hay tendencias positivas con un nivel de confianza del 95% de los datos, mientras que el suroccidente presentó tendencia a la disminución, al igual que en zonas de la Cordillera oriental y en la Isla de San Andrés. En Colombia hay una tendencia al aumento de las precipitaciones de alta intensidad, excepto en Bucaramanga, Pasto y Cúcuta. Por otro lado, en el departamento del Chocó se observó una tendencia al aumento de los periodos húmedos y disminución de los periodos secos. Lo anterior también ocurrió en la mayoría de las estaciones evaluadas, excepto en San Andrés, Cúcuta, Bucaramanga y Cali donde aumentaron los periodos secos.

Pabón (2012), realizó una reevaluación de las tendencias de largo plazo observadas durante la segunda mitad del siglo XX en los eventos extremos de lluvia para todo el territorio colombiano; a partir de los datos diarios de las series climatológicas y aplicando técnicas para el modelamiento del clima, se generaron escenarios para observar las posibles variaciones en el siglo XXI, el cual registraría reducciones hasta del 30 % en la

parte interandina y caribe, y aumentos un poco más del 30% de los acumulados anuales en la región pacífica, piedemontes orientales de la Cordillera Oriental y en parte del sur de Bolívar y Sucre. Los índices climáticos permitieron establecer tendencias a largo plazo, concluyendo que el comportamiento de las lluvias en el país es muy variado, producto de la diversidad climática de su territorio.

A partir de 1423 estaciones localizadas en todo el territorio colombiano, Armenta & Ruiz (2012), ensamblaron modelos de cambio climático para analizar el posible comportamiento de la lluvia en el periodo 2011 – 2040, evaluando índices climáticos obtenidos con el software RClimdex. El estudio reflejó que las precipitaciones tienden a disminuir en el centro y suroccidente del país con un nivel de confianza de un 80% para los datos registrados; este valor, correspondiente a un  $p\text{-value} < 0.02$ , es bajo en comparación con otros estudios a nivel nacional y evidencia que existe la probabilidad de que las lluvias estimadas a futuro no representen la realidad de los eventos analizados.

En el departamento de Santander fueron analizadas quince estaciones meteorológicas para el registro histórico 1975-2010, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de los eventos extremos de lluvia mediante el análisis de índices climáticos, recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Indices” (ETCCDMI) (Zhang & Yang, 2004). Los resultados obtenidos por Pinilla & Pinzón (2012) mostraron una relación de proporcionalidad directa entre los índices de precipitación evaluados y la elevación sobre el nivel del mar de cada estación, revelando tendencias negativas en términos de intensidad (precipitación total anual) y frecuencia (número de días al año cuando la precipitación es mayor a 20 mm y 40 mm). Por otro lado, los índices de precipitación máxima anual en un día y precipitación total anual mayor al percentil 99, presentaron tendencias al incremento con un nivel de confianza superior al 95% de los datos.

Caso contrario ocurre en el departamento del Valle del Cauca en donde se encontraron relaciones inversamente proporcionales entre los índices evaluados y la altitud de las estaciones; sin embargo, aunque los resultados indicaron cambios en la precipitación, en su mayoría, con tendencias al incremento, el análisis realizado con una significancia estadística del 10%, mostró que no existe una tendencia y que la información suministrada no fue suficientemente robusta (Cardona et al., 2013). En este estudio, orientado a detectar cambios o tendencias en la precipitación en el Valle del Cauca se calcularon los índices

de lluvia contenidos en el software RClimdex y el análisis de tendencias se realizó para la totalidad del registro de información de las 18 series seleccionadas, sin definir un período común en particular.

En el departamento del Tolima, CORTOLIMA, Universidad Nacional de Colombia y el Centro de Estudios para la Prevención de Desastres - CEPREVÉ (2015), realizaron un estudio en la cuenca del río Saldaña, expuesta a los cambios en los patrones de los fenómenos extremos ya sea a causa de la variabilidad o del cambio climático, por medio del cual se prevé una reducción del orden del 30-50% en la cantidad de la precipitación anual, aumentando la probabilidad de periodos de estiaje y sequía. Para el caso de los eventos de lluvia máxima, se realizó un conteo de los eventos de lluvia anuales por encima de umbrales establecidos (25, 50 y de 75 mm/24h) para analizar la frecuencia en la que han estado ocurriendo. Los resultados evidencian que, durante los episodios cálidos del Fenómeno de El Niño, el número de lluvias extremas se ubica por debajo de la media, mientras que durante los episodios fríos (La Niña), los eventos de lluvia aumentan.

## **2.2 Antecedentes internacionales**

A nivel mundial, son muchos los estudios que se han concentrado en el análisis de tendencias de extremos climáticos de precipitación y que se han convertido en un insumo base para el análisis del cambio climático y sus impactos para los diversos sectores socioeconómicos y medioambientales. Por ejemplo, Alexander et. al (2006), en su artículo “Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation” presentaron un panorama mundial de las tendencias de los índices extremos de temperatura y precipitación utilizando los resultados de varios talleres realizados en regiones escasas de información y datos de estaciones de alta calidad suministrados por numerosos científicos de todo el mundo. Los cambios de precipitación mostraron un aumento generalizado, significativo a un nivel del 5% y tendencias hacia condiciones más húmedas a lo largo del siglo XX. El análisis de precipitaciones máximas de 1 día, precipitaciones máximas de 5 días, días muy húmedos y días extremadamente húmedos, mostraron aumentos estadísticamente significativos. El mayor cambio evidenciado en los índices relacionados con la lluvia fue el obtenido para la precipitación anual total, la cual registró un incremento significativo en gran parte de las estaciones analizadas a nivel global.

Donat et al. (2013) presentaron el análisis de índices de precipitación usando la base de datos terrestres de extremos climáticos HadEX2. Los índices fueron calculados mediante el uso del software RClimdex a partir de 11.000 estaciones meteorológicas de precipitación en todo el mundo. Las tendencias se presentaron en mapas utilizando datos de cada índice para el periodo 1901-2010 y 1951-2010, cuando la cobertura espacial es más completa. Los índices de precipitación mostraron cambios hacia condiciones de lluvias más intensas en la mitad oriental de Norteamérica, Europa del Este, Asia y América del Sur. Se observaron áreas con tendencias hacia precipitaciones menos frecuentes e intensas alrededor del Mediterráneo, sudeste asiático y parte de Norteamérica. El número de días de precipitación intensa y los días muy húmedos mostraron tendencias al alza durante los últimos 60 años. Los índices que sugieren condiciones más húmedas cubren áreas mayores que aquellas con tendencias de sequía, donde finalmente no se pudo encontrar una señal clara a nivel mundial. En Norteamérica, Europa y Asia el aumento de las precipitaciones extremas es visible a través de todas las estaciones, pero tiende a ser más significativo durante el invierno y el otoño. Para las regiones tropicales, dado que la cobertura espacial es limitada, no les fue posible establecer conclusiones detalladas.

Frich et al. (2002) evaluaron indicadores de eventos climáticos extremos que podrían aplicarse a una gran variedad de climas a nivel mundial. Emplearon series temporales con más de 40 años de registro y produjeron mapas globales con el objetivo de mostrar los cambios significativos durante el período 1946-1999. El estudio reveló que una proporción significativa del mundo evidenció cambios significativos a un nivel de confianza del 95% en los extremos climáticos durante la segunda mitad del siglo XX; sin embargo, concluyeron que África y América del Sur todavía no cuentan con suficientes datos para ser representadas espacialmente. Con relación a las precipitaciones intensas, el sur de África, sureste de Australia, oeste de Rusia, parte de Europa y el este de Estados Unidos mostraron un aumento significativo; por otro lado, Asia oriental y Siberia presentaron una disminución de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación intensa. El número de días con precipitación igual o superior a 10 mm mostró tendencias crecientes sobre Rusia, Estados Unidos, parte de Europa, Sudáfrica y Australia. El número máximo de días secos consecutivos indicó una reducción general, a excepción de algunas zonas sudafricanas, Canadá y Asia Oriental. El indicador de eventos de inundación (RX5day) concluyó aumento general en grandes áreas del globo.

Groisman et al. (2005) en su artículo "Trends in Intense Precipitation in the Climate Record" realizaron un análisis de tendencias a nivel global, utilizando un nivel de confianza del 95% de los datos que permitió concluir que en las latitudes medias se observaron aumentos generalizados en las frecuencias de las precipitaciones intensas en los últimos 50 y 100 años, lo cual proporcionó una base para analizar el impacto de estos cambios sobre el medio ambiente; sin embargo, también hay una probabilidad creciente de incremento en la frecuencia en regiones no tropicales como Estados Unidos.

En el continente asiático, son numerosos los estudios que demuestran el comportamiento de las tendencias de la lluvia en sus diferentes regiones; Sohrabi, Marofi & Ababaei (2009), realizaron una evaluación de las tendencias del clima en dos estaciones de Irán, país en desarrollo que carece de la información suficiente sobre extremos climáticos. El software RClimdex permitió el cálculo de índices relacionados con temperatura y eventos de lluvia para el periodo 1966 a 2006. Los resultados obtenidos para la precipitación total anual, precipitación máxima en un día y en cinco días consecutivos, mostraron tendencias crecientes, mientras que otros índices relacionados igualmente con la intensidad de lluvia evidenciaron disminución; sin embargo, pese a las tendencias positivas referentes a las precipitaciones, la temperatura mostró mayor significancia estadística (10%), lo cual afectaría severamente su producción agrícola, pues las tasas de evaporación serían cada vez más altas y por tanto la aridez de la región aumentaría.

Para ampliar la comprensión de los extremos climáticos en la región Asia-Pacífico, científicos de diez países (Australia, China, Japón, Malasia, Mongolia, Nueva Zelandia, Pakistán, República de Corea, Tailandia y Vietnam), examinaron las tendencias de los fenómenos extremos a largo plazo relacionados con temperatura y precipitación cuyas amenazas exigen acciones integradas de las comunidades a nivel mundial. La evaluación de diez índices de lluvia permitió identificar gran variabilidad a escala regional con tendencias estadísticamente significativas en tan solo un 15% de las estaciones meteorológicas evaluadas (Asia-Pacific Network for Global Change Research (APN), 2007).

Con el fin de calcular índices climáticos para 109 estaciones en Turquía durante el período 1960 – 2010, Sensoy et al. (2013) utilizaron el software RClimdex para examinar tendencias en la temperatura y precipitación, mostrando con un nivel de confianza del 95% que la precipitación total anual está aumentando en la región septentrional del país y

disminuyendo en la Anatolia Sudoriental, Mediterránea y Egeo. El número de días con precipitación intensa y la precipitación máxima en un día también ha presentado tendencias al incremento. En general, con relación a la lluvia se percibieron patrones mixtos en comparación con los mostrados por la temperatura.

Los fenómenos meteorológicos extremos se han intensificado en magnitud y frecuencia, generando alteraciones en el equilibrio ambiental. En Omán, Gunawardhana & Al-Rawas (2014) analizaron registros diarios de precipitación y temperatura en Muscat, capital de Omán, y delimitaron un grupo de índices climáticos relacionados con lluvias extremas durante el período 1977-2011. El estudio mostró una tendencia hacia condiciones más húmedas en la precipitación total anual con una tasa de 6 mm/década. La contribución de los días muy húmedos a los totales anuales de precipitación aumenta constantemente con un nivel de confianza del 75%. El estudio reveló que la mayoría de los índices tienen un aumento significativo, excepto los días secos consecutivos (CDD) y los días húmedos consecutivos (CWD). Esto se debe a que Omán es una región árida donde en promedio llueve sólo alrededor de 7 días por año. La investigación concluyó que, según el criterio de máxima verosimilitud, la función de distribución de probabilidad Generalized Extreme Value (GEV) con tres parámetros: ubicación ( $\mu$ ), escala ( $\sigma$ ) y forma ( $\xi$ ) es la que mejor se ajusta a los extremos de lluvia en la región.

Satyanarayana et al. (2010) estudiaron las precipitaciones diarias a largo plazo para 16 estaciones en la India con un período de registro superior a 35 años. Emplearon el software RHtestsV3 para detectar discontinuidades o cambios significativos en los datos y posteriormente calcularon los 27 índices climáticos recomendados por el grupo de expertos de CCI/CLIVAR para "Climate Change Detection Monitoring and Indices" (ETCCDMI). La tendencia de precipitación total anual (PRCPTOT) se redujo en la estación Jorhat; Parbhani y Raipur siguieron tendencia creciente y Akola tendencia decreciente en precipitación máxima de 1 día (RX1day) con un nivel de significancia del 5%. Solamente Raipur mostró tendencia creciente en días extremadamente lluviosos (R99p).

El estudio realizado en la Península de Indochina por Yazid & Humphries (2015) permitió identificar tendencias en los índices extremos de precipitación para el periodo histórico 1960 a 2007 mediante el uso del software RClindex, donde la pendiente representó la magnitud de los cambios cada año, como día/año para los índices de frecuencia y mm/año para los índices de intensidad. Las tendencias lineales fueron estimadas utilizando un

ajuste de mínimos cuadrados y se utilizó un nivel de significación  $\alpha$  del 5% definido mediante la prueba de Mann-Kendall. Los resultados revelaron contrastes en las tendencias de precipitaciones extremas en la península de Indochina oriental y occidental; en el este sobresalen tendencias positivas en el número de días de lluvias fuertes, días de precipitación muy intensa, días de lluvia extremadamente fuertes, días húmedos consecutivos y precipitaciones anuales totales, en algunos casos con significancia estadística. Al oeste, prevalecen tendencias negativas en días húmedos consecutivos.

La creciente necesidad de analizar los eventos meteorológicos extremos a nivel mundial ha generado que numerosos estudios se hayan centrado en la explicación espacio-temporal de los cambios en los procesos de lluvia. Wang, Chen, Shi, & Van Gelder (2008) investigaron los cambios en las precipitaciones extremas en la cuenca del río Dongjiang en el sur de China, con varios métodos no paramétricos, incluyendo un método (prueba de Mann-Kendall con un nivel de significancia del 5%) para detectar tendencias y tres métodos (Kolmogorov-Smirnov test, Levene's Prueba y cuantil) para detectar cambios en la distribución de probabilidad. Los resultados mostraron pocos cambios en las precipitaciones anuales extremas, pero a escala mensual se evidenciaron algunas variaciones significativas que sugieren que la estacionalidad de la lluvia no debe pasar desapercibida.

Kamiguchi, Arakawa & Kitoh (2011) implementaron un conjunto de datos de índices históricos de precipitación extrema en Japón, llamado APHRO\_JP\_EX que contiene más de 40 índices anuales derivados de la precipitación diaria. Analizaron las tendencias y las variaciones anuales de estos índices para cuantificar los efectos del calentamiento global sobre las precipitaciones extremas en Japón, lo cual les permitió concluir que el número de días húmedos ha disminuido especialmente en el noroeste del territorio japonés, donde se perdieron alrededor de 20 días húmedos al año durante el siglo pasado. La precipitación media anual disminuyó ligeramente en la mayoría de las regiones, mientras que las precipitaciones intensas fueron mayores en la parte occidental. Los índices de periodos húmedos disminuyeron en cercanías al Mar de Japón y los índices de periodos secos aumentaron en el Océano Pacífico. En conclusión, los autores señalaron que la precipitación en Japón se ha vuelto más extrema desde comienzos del siglo XX.

Por otro lado, en Europa, Esteban, Prohom & Aguilar (2012) mostraron resultados de índices climáticos obtenidos en tres series climáticas situadas en Andorra entre los 1140

m.s.n.m. y los 1645 m.s.n.m. durante el periodo 1935-2008 correspondiente al registro histórico total de la serie, así como para el sub-periodo 1950-2008. En cuanto a los índices de precipitación, no se detectaron tendencias significativas para el periodo 1935-2008, mientras que para el sub-periodo 1950-2008 varios de ellos presentan valores decrecientes con un nivel de confianza del 95% según el test de Mann-Kendall.

En el continente africano, los esfuerzos de varios expertos en temas climáticos han permitido obtener conclusiones demostrativas con relación a las tendencias de la precipitación en la región; en el estudio realizado por Gbode, Akinsanola & Ajayi (2015) con el objetivo de determinar los cambios en el clima extremo en Kano, Nigeria, se evaluaron nueve índices climáticos para el período 1960-2007 utilizando el software RClimdex. Se presentó un leve incremento en la precipitación total anual y disminución en el número máximo de días húmedos consecutivos; por otro lado, los días extremadamente húmedos tuvieron un aumento significativo, considerando un nivel de confianza del 95% de los datos.

Abdussalam (2015) investigó las tendencias en los índices de precipitación entre 1971 y 2010, para seis estaciones meteorológicas sinópticas en el noroeste de Nigeria. La homogeneidad de los datos se evaluó utilizando el software RHtest y se empleó un nivel de confianza del 95% para garantizar resultados estadísticamente significativos. Las tendencias en los índices relacionados con el número de días con precipitación, la intensidad media y los eventos máximos diarios de precipitación, fueron débiles en general y no mostraron coherencia espacial. Las lluvias fuertes aumentaron en todas las estaciones analizadas, excepto en Kaduna y Katsina. Esto incluyó tanto las precipitaciones muy intensas (percentil 95) y extremadamente intensas (percentil 99), así como la cantidad máxima de precipitación de uno y cinco días registrada en un año. Sin embargo, la ausencia de significancia estadística fue notoria en los resultados.

Pese a la escasez de información sobre las tendencias del clima y los extremos climáticos en algunos países subdesarrollados, por ejemplo, Kenya, profesionales en el tema han hecho valiosos aportes sobre los impactos de los fenómenos climáticos extremos en los sistemas de producción agrícola de las tierras áridas y semiáridas (ASAL). Marigi, Njogu & Githungo (2016) examinaron tendencias en 15 índices climáticos en el sureste de Kenia para el periodo 1961 a 2009 y concluyeron la existencia de tendencias decrecientes en precipitaciones anuales, intensidad de lluvias y días húmedos consecutivos, mientras que

los días secos consecutivos han ido incrementando, con una significancia estadística del 5%.

Benaïchata, Mederbal & Chouieb (2015) calcularon índices climáticos a partir de datos diarios de la red de servicios meteorológicos de Argelia con al menos 20 años registrados, que permitieron observar una tendencia positiva en los índices de precipitación sobre el noroeste de la región. Adicionalmente, se evidenció que la precipitación total anual (PRCPTOT) y los días húmedos consecutivos (CWD) están aumentando en las regiones lluviosas, principalmente en el noreste.

En el continente americano han sido recurrentes los estudios que se han desarrollado en sus diferentes países para contribuir con la detección de tendencias mediante el análisis de índices climáticos relacionados con la precipitación. Aguilar et al. (2005) plasmaron en su artículo “Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003” los resultados de un taller regional sobre cambio climático realizado en Guatemala en noviembre del año 2004. Un grupo de expertos internacionales en clima proporcionaron series climáticas para analizar sus respectivas regiones y evaluaron como los cambios en los extremos climáticos afectaron gran parte de América Latina durante el período 1961-2003, mediante el cálculo de índices y sus respectivas tendencias a largo plazo que revelaron un calentamiento general en la región. Los índices de precipitación indicaron que, aunque no se observaron incrementos significativos en la cantidad total, se intensificaron los eventos de lluvia y se amplió la contribución de los días húmedos y muy húmedos. El índice simple de intensidad diaria SDII indicó que, en los días en que llueve, las cantidades de precipitación están aumentando a una tasa de 0.3 mm/década. Por otro lado, el estudio concluyó que no hay cambios significativos en toda la región en el número de días secos consecutivos, CDD; sin embargo, existe un patrón de disminución para las estaciones ubicadas en la porción central del istmo (distribuidas principalmente en su lado Pacífico) y en las estaciones ubicadas en Colombia. Los índices de precipitación mostraron una mayor correlación con las temperaturas de la superficie del mar Atlántico tropical.

Haylock et al. (2005) presentaron en su artículo “Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature”, los resultados de un taller realizado en Brasil en agosto de 2004 donde 28 científicos de América del Sur a partir de observaciones diarias de lluvias determinaron los cambios en precipitaciones

totales y extremas. Calcularon doce índices anuales de lluvia para el período 1960-2000, y a partir de estos datos generaron mapas de las tendencias mostrando grandes regiones de cambio coherente y resultados estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95% en algunos índices. Las tendencias revelaron condiciones más húmedas en Ecuador, norte del Perú, sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y norte y centro de Argentina. Se observó una disminución significativa en varios índices en el sur de Perú y sur de Chile. También analizaron la correlación entre los índices y la temperatura superficial del mar (SST) que reveló que el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENSO) y el índice de Oscilación del Sur (SOI) han contribuido a las tendencias observadas en los índices de precipitación.

Peterson et al. (2008) evaluaron los cambios en los extremos de América del Norte a partir de 1950, concluyendo que todos los índices relacionados con precipitación intensa han presentado aumentos significativos durante las últimas 5 décadas.

Keggenhoff, Elizbarashvili, Amiri-Farahani & King (2014) estudiaron las tendencias en 24 series de precipitación sobre la región de Georgia en Estados Unidos, para el período 1971-2010. La homogeneidad de los datos se comprobó mediante la implementación del software RHtestV3 y la significancia estadística se estimó utilizando el test de Mann-Kendall. El estudio consideró que una tendencia era estadísticamente significativa si era menor o igual a un nivel del 5%. Las tendencias en los índices relacionados con la precipitación máxima de 1 día y 5 días, el número de días con precipitaciones muy intensas, los días muy húmedos y extremadamente húmedos, así como el índice simple de intensidad diaria, mostraron un aumento en Georgia con baja coherencia espacial. Igualmente, las precipitaciones muy intensas y extremadamente intensas aumentaron entre 1971 y 2010. Sin embargo, para los índices de lluvia, ninguno mostró resultados significantes.

Dos Santos, Neal, Rao & da Silva (2011) analizaron las tendencias en extremos anuales de precipitación y temperatura para el estado de Utah en EE.UU. El período evaluado fue 1930 - 2006 para 28 estaciones meteorológicas; los resultados mostraron una gran variación espacio-temporal para los índices de lluvia con pocas tendencias estadísticamente significativas en dos niveles (5% y 10%). Otro estudio realizado por Costa Dos Santos, proporcionó información sobre tendencias en una reserva ecológica de Brasil mostrando que las precipitaciones intensas están disminuyendo, pero en general la lluvia

presenta una alta variabilidad y menor sensibilidad al cambio en comparación con la temperatura (Costa Dos Santos, 2014).

Burgos & González (2012) evaluaron las tendencias de los indicadores climáticos extremos derivados de observaciones diarias de precipitación para nueve estaciones meteorológicas de Cuba durante el período 1971-2009, encontrando variabilidad en los indicadores derivados de las precipitaciones que no mostraron una tendencia clara en general; en su estudio sobresale que las mayores precipitaciones superiores al umbral de 100mm de lluvia, tienden a crecer con un intervalo de confianza del 95% en el occidente del país.

Velasco et al. (2015) enfocaron su trabajo en la investigación de tendencias de temperatura y lluvia y su impacto en la agricultura particularmente en la región maicera de Serdán, en México para el año 2014. El estudio de las tendencias lineales y no lineales mostró que para los productores de la zona es importante entender el comportamiento del clima bajo condiciones adversas de variabilidad natural, por tanto, se convierten en una herramienta generadora de información para optimizar el rendimiento y sostenibilidad de los cultivos. Dada la baja calidad de la información suministrada para el análisis, se apoyaron en estaciones meteorológicas vecinas aplicando el software RClimdex, para el periodo 1970-2012. Los seis índices climáticos seleccionados permitieron identificar grandes impactos asociados a la variabilidad natural del clima y el cambio climático.

Serrano Vincenti et al. (2012) investigaron el impacto que ha generado el cambio y la variabilidad climática sobre el Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Uno de sus objetivos consistió en el análisis del comportamiento de la temperatura y la precipitación mediante el cálculo de índices climáticos recomendados por el ECTCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) a partir de estaciones con 30 o más años de datos. Se evidenciaron incrementos en las tendencias y anomalías como consecuencia del cambio climático y la variabilidad natural.

Oria, C. (2009) hizo una evaluación de las tendencias de los extremos de precipitación en la Cuenca del río Mantaro durante el periodo 1965-2009, empleando información diaria con un nivel de confianza del 99% de los datos. Los indicadores de lluvia mostraron una disminución en gran parte de la cuenca con algunas tendencias significativas. La precipitación acumulada en un año presentó una disminución a una tasa promedio de 3.9 mm/día/año, con mayor significancia en las estaciones de Marcapomacocha y Acobamba, donde la reducción alcanzó hasta 7 mm/día/año. En las zonas central y sur de la cuenca,

predominó una relación inversa entre los índices de días secos consecutivos (CDD) y días húmedos consecutivos (CWD), con un aumento de 5 días sin lluvia en 45 años y una disminución en 4 días en los días húmedos consecutivos en el mismo tiempo. Del mismo modo la relación entre los índices CDD y SDII (Índice Simple de Intensidad Diaria) para la cuenca es inversa, lo cual permitió concluir que, aunque el número de días sin lluvia está aumentando, existe una disminución en la intensidad de las precipitaciones. Por otro lado, el número de días muy lluviosos (R95p) y días extremadamente lluviosos (R99p) presentaron tendencias decrecientes y evidenciaron una relación directa con el índice de precipitación acumulada anual (PRCPTOT).

Con relación a los análisis estadísticos para los eventos hidroclimáticos extremos, Katz & Brown (1992) indicaron que la teoría estadística de los extremos demuestra que su frecuencia es relativamente más dependiente de cualquier cambio en la variabilidad (parámetro de escala) que en la media (parámetro de localización) del clima, lo cual adicionalmente se hace significativamente mayor cuanto más extremo sea el evento que se está analizando. Es por esto que se hace necesario definir modelos para el cambio climático en términos estadísticos, que incluyan parámetros de variabilidad climática y no sólo se limiten a dar resultados en términos de valores medios sin tener en cuenta las fluctuaciones climáticas que hacen parte de su comportamiento natural y que actualmente actúan como catalizadores del cambio, aumentando su intensidad y frecuencia de ocurrencia a nivel mundial.

Actualmente, el cambio en la dinámica de la precipitación evoluciona de una forma desproporcionada, con eventos más intensos que se evidencian alrededor de todo el mundo (Groisman et al., 2005). Un ajuste de una función de distribución de probabilidad a un conjunto de datos de lluvia, bajo la estimación de diferentes parámetros, permitirá que finalmente se obtengan varios modelos que reproduzcan coherentemente su comportamiento (Abaurrea, 2007) y de esta manera se obtengan estimaciones de lluvias futuras para su aplicación en diferentes campos de estudio. Este tipo de ajuste se utiliza comúnmente en series de máximos anuales, donde no se hace necesario la separación por eventos independientes, lo cual puede llegar a complicar el análisis (Chow, 1964; Acevedo, 2009). En hidrología existen numerosas funciones de distribución de probabilidad; se destacan la Normal, Log-Normal, Gumbel, entre otras, las cuales no se deducen teóricamente a partir de los procesos físicos, sino que sus parámetros se ajustan a partir de los datos disponibles y se verifica que los resultados se ajusten

satisfactoriamente (Acevedo, 2009). Muchos estudios demuestran que las funciones de distribución de valor extremo más usadas (Tipo I, II y III), convergen en un solo modelo denominado distribución Generalizada de Valor Extremo (GEV) con parámetros de localización ( $\mu$ ), escala ( $\sigma$ ), y forma ( $\xi$ ) (Ang & Tang, 1984; Abaurrea, 2007; Acevedo, 2009). Las tormentas de lluvia son comúnmente modeladas utilizando la distribución de valor extremo tipo I (Chow, 1953; Chow, 1993; Ocampo, 2012); sin embargo, aunque generalmente la función de distribución Gumbel demuestra ser adecuada para representar las lluvias (Marín, Ocampo & Vélez, 2014), puede llegar a subestimar los cuantiles para grandes períodos de retorno (Acevedo, 2009), por lo que se recomienda el uso de la función GEV bajo el método estadístico de ajuste de máxima verosimilitud, que consiste en realizar la estimación de los parámetros de tal forma que la probabilidad de obtener los resultados observados sea máxima (Chow, 1964; Acevedo, 2009). El ajuste de las funciones de distribución de probabilidad a datos históricos de precipitación permite obtener valores de lluvias máximas para diferentes períodos de retorno, definidos como la inversa de la probabilidad de ocurrencia de los mismos o el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido al menos una vez (Chow, 1993; Campos, 1998; González, Juárez & Loza, 2008) y obtener posteriormente un modelo espacial a partir de la interpolación de la información bajo un mismo período de análisis (Ávila & Martín, 2013).

## **3. Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

- Determinar la dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná considerando la variabilidad espacio-temporal.

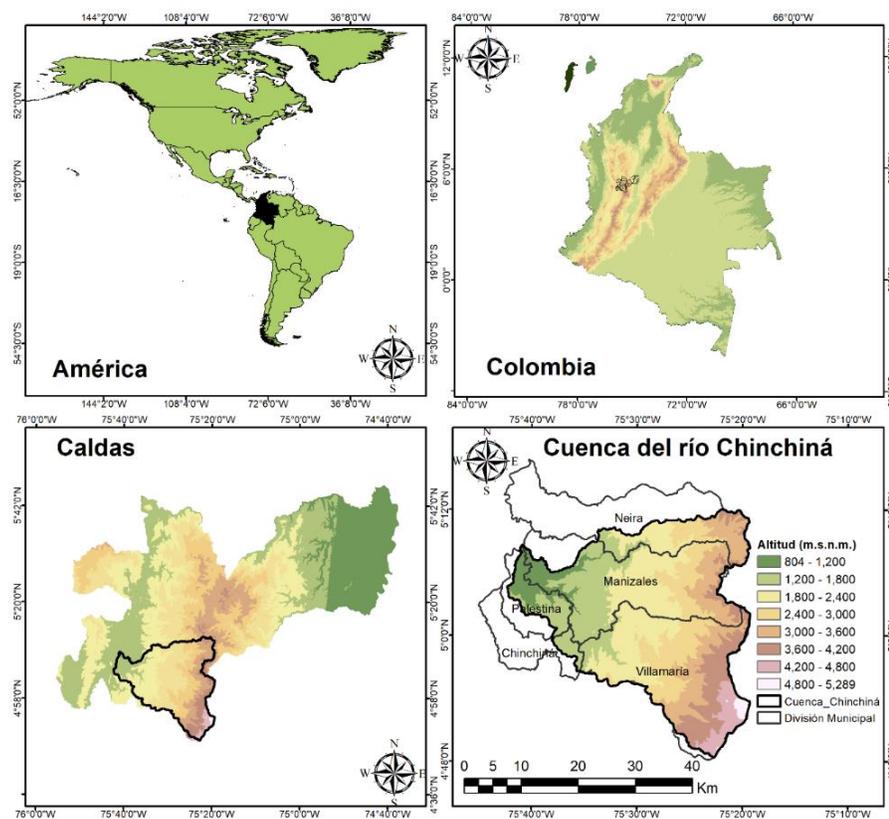
### **3.2 Objetivos específicos**

- Determinar la dinámica de los eventos extremos de precipitación en la cuenca del río Chinchiná considerando la variabilidad espacio-temporal.
- Establecer la dinámica de los eventos extremos de caudal en la cuenca y principales subcuencas del río Chinchiná.
- Determinar la influencia del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur-ENSO- en la ocurrencia de eventos hidroclimáticos extremos.

## 4. Metodología

### 4.1 Descripción del área de estudio

El estudio comprende la cuenca del río Chinchiná localizada en el departamento de Caldas en las inmediaciones de la cordillera de los andes colombianos. Cuenta con una extensión de 1052 Km<sup>2</sup> y está conformada por los municipios de Manizales, Neira, Palestina Chinchiná y Villamaría que en su totalidad albergan una población de 560.000 habitantes (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014) correspondiente a un 57% de la población total del departamento (DANE, 2015). La Figura 4-1 presenta la localización de la cuenca del río Chinchiná.



**Figura 4-1:** Localización de la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

La región de estudio pertenece a la zona hidrográfica Magdalena-Cauca y se constituye como el principal afluente del río Cauca por su margen lateral derecha (CORPOCALDAS, 2013). La topografía de la cuenca es compleja dado su marcado gradiente altitudinal con variaciones que van desde los 5289 m.s.n.m., región de ecosistemas estratégicos como los glaciares de los Nevados El Ruiz y Santa Isabel, hasta los 804 m.s.n.m. en la desembocadura del río Chinchiná (Ocampo & Vélez, 2014).

#### **4.1.1 Características fisiográficas y geomorfológicas de la cuenca del río Chinchiná**

La localización de la cuenca del río Chinchiná en las inmediaciones de la cordillera de los andes favorece la presencia de altas pendientes y lecho rocoso; por lo tanto, presenta riesgo de deslizamientos (CORPOCALDAS, 2005; Ocampo, 2012). Su río principal, el Chinchiná, fluye en dirección este-oeste, mientras que la mayoría de sus afluentes menores corren en dirección norte-sur producto de los controles ejercidos por las fallas geológicas presentes en la zona (CORPOCALDAS, 2013).

Con relación a las características de la red hídrica, el río Chinchiná presenta una densidad de drenaje de  $0.61 \text{ km/km}^2$ , mientras que, para sus dos afluentes principales, río Guacaica y río Rioclaro, se obtuvieron valores de  $0.56$  y  $0.67 \text{ km/km}^2$  respectivamente; estos valores indican que la cuenca tiene un drenaje pobre o poco eficiente (Monsalve, 2004; Ocampo, 2012). Por otro lado, la densidad de corriente del río Chinchiná es de  $0.31$ , del río Guacaica de  $0.3$  y del río Rioclaro de  $0.31$  (CORPOCALDAS, 2013); este parámetro da información sobre las condiciones climáticas y litológicas de la región, que para el caso de la cuenca objeto de estudio presenta valores menores a los  $5 \text{ km/km}^2$ ; pueden ser indicativos de un régimen de precipitaciones escaso, o alta resistencia del material litológico, es decir no se producen erosiones relevantes (Breña & Jacobo, 2006).

Los parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná y principales subcuencas (río Guacaica y río Rioclaro) se presentan en la Tabla 4-1.

La medición de algunos de los parámetros más importantes de la cuenca tiene como objetivo obtener una clasificación geomorfológica de la misma y evaluar su respuesta ante una precipitación. El análisis del Coeficiente de Compacidad (ver Tabla 4-1) permitió dar un acercamiento al comportamiento de la cuenca ante un evento de lluvia; la cuenca del

río Chinchiná tiene un valor de 1.61 y sus subcuencas Guacaica y río Rioclaro de 1.8 y 1.65 respectivamente. Estos valores sugieren una forma de la cuenca oval-oblonga a rectangular-oblonga que puede intensificar la fuerza de las avenidas (Campos, 1992; Viramontes et al., 2007) y dar respuesta intermedia a una lluvia uniforme en toda la unidad hidrográfica.

**Tabla 4-1:** Parámetros fisiográficos y morfométricos de la cuenca del río Chinchiná y principales subcuencas.

Parámetro	Unidades	Cuenca río Chinchiná	Subcuenca	
			Río Guacaica	Río Rioclaro
Área	Km <sup>2</sup>	1052.25	337.81	244.58
Perímetro	Km	184.35	117.57	91.26
Longitud cuenca	Km	49.72	38.64	29.31
Longitud cauce	Km	77.58	52.67	36.87
Índice de forma	-----	0.42	0.23	0.28
Coefficiente de compacidad	-----	1.61	1.8	1.65
Coefficiente de asimetría	-----	1.01	1.24	1.63
Índice de alargamiento	-----	1.03	2.61	1.86
Relación de elongación	-----	0.73	0.54	0.6
Pendiente media	%	36.18	37.38	40.28
Altitud mínima	m.s.n.m.	804	872	1390
Altitud máxima	m.s.n.m.	5289	3882	5289
Altitud media	m.s.n.m.	2482	2398	3282

Fuente: Adaptado (COORPOCALDAS, 2013).

La pendiente media de la cuenca (36.18%) permitió evidenciar, según la caracterización de relieve de Heras, que es un terreno fuerte accidentado- escarpado (Saavedra, 2001; Viramontes et al., 2007). La relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma área y longitud máxima de la cuenca (Breña & Jacobo, 2006); para la cuenca del río Chinchiná y sus subcuencas, los valores sugieren un relieve pronunciado (Summerfield, 1991).

Por último, el tiempo de concentración, definido como el tiempo que tarda una gota en ir desde el punto hidrológicamente más lejano de la cuenca hasta su salida, es de 30 horas en promedio para la cuenca (Ocampo, 2012).

Las características geológicas de la cuenca del río Chinchiná sugieren constitución de las vertientes de las montañas por rocas de origen ígneo y metamórfico, cubiertos por un manto de gran extensión de material piroclástico y depósitos de cenizas volcánicas y lapilli

(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004; Duque et al., 2009; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). La zona cuenta con un gran número de unidades geológicas de diferentes características, producto de su localización en zona de cordillera e histórica volcánica. Entre ellas se destacan el complejo Cajamarca (formación más antigua), Complejo Quebradagrande, Unidad de Flujos Vulcanoclásticos (conocidos comúnmente como Formación Manizales y Formación Casabianca), Depósitos de Caída Piroclástica y Depósitos recientes (INGEOMINAS, 1993; Alcaldía de Manizales, 2003; Duque, 2013; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).

Respecto a la textura de los suelos, estudios recientes sugieren existencia de una gran variabilidad, producto de la diversidad de materiales de origen y localización en zonas de alta pendiente, donde en distancias cortas los cambios pueden ser notorios (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014). Los suelos de la cuenca del río Chinchiná son jóvenes, con cubierta piroclástica y presencia de depósitos de origen fluvial a lo largo de su red de drenaje. La formación superficial predominante corresponde a suelos residuales derivados de cenizas volcánicas (Alcaldía de Manizales, 2003).

Los usos y cobertura del suelo en la cuenca son predominantemente agrícolas; sin embargo, producto de la presencia de todos los pisos térmicos, el tipo de relieve y geología, sus usos pueden ser destinados a diferentes actividades. Sobresalen los cultivos de café, particularmente en la cuenca media y baja (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014)

#### **4.1.2 Climatología de la cuenca del río Chinchiná**

La cuenca del río Chinchiná presenta un clima bimodal, producto del movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la región andina colombiana, presentando incremento en las precipitaciones durante los meses marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre (Poveda et al., 2014). La precipitación en la cuenca es alta, entre 2000 y 2200 mm/año, menor que el promedio a nivel nacional (3000 mm/año), pero mayor que la media mundial (900 mm/año) y suramericana (1600 mm/año) (Ocampo, 2012). Otros fenómenos macroclimáticos que influyen en el comportamiento del clima en la región son la circulación atmosférica del pacífico, la corriente del chorro del Chocó, los aportes de humedad procedentes del Amazonas, los vientos Alisios que ingresan por el Atlántico y la presencia de los tres ramales de la cordillera de los Andes (Jaramillo, 2005; CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015;

Ocampo & Vélez, 2014). Sin embargo, el principal modo de variabilidad climática interanual que afecta la cuenca es el Fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur- ENSO en sus dos fases: El Niño (Episodios cálidos) y La Niña (episodios fríos) (Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).

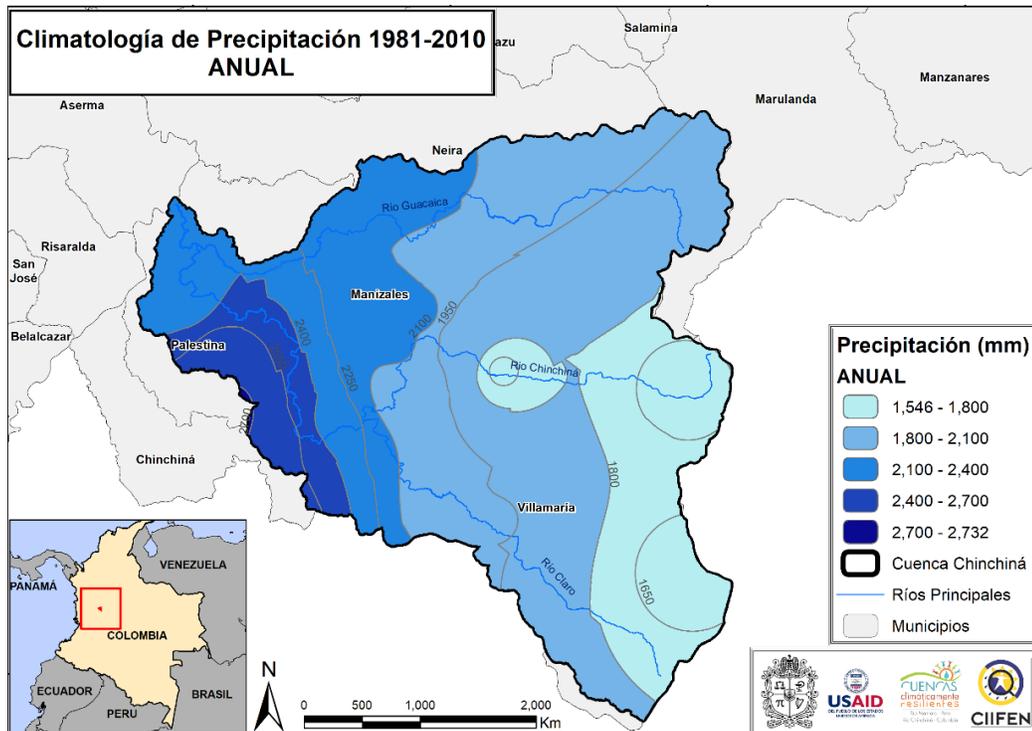
La Figura 4-2 muestra la climatología de la precipitación en la cuenca del río Chinchiná tomando como base el período histórico comprendido entre 1981-2010. Se observó relación inversa con la altitud, pues a mayor elevación sobre el nivel del mar, los acumulados anuales de lluvia fueron menores que los registrados para la zona más baja. Para las 3 décadas evaluadas la precipitación varió entre 1546 mm/año y 2732 mm/año.

Al igual que la precipitación, la temperatura también presenta un comportamiento bimodal con mayores valores en los meses diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto. La cuenca cuenta con la presencia de todos los pisos térmicos debido a su marcado gradiente altitudinal con variaciones desde los 5289 m.s.n.m. en la región del parque Nacional Natural Los Nevados, hasta los 804 m.s.n.m. a la salida de la cuenca.

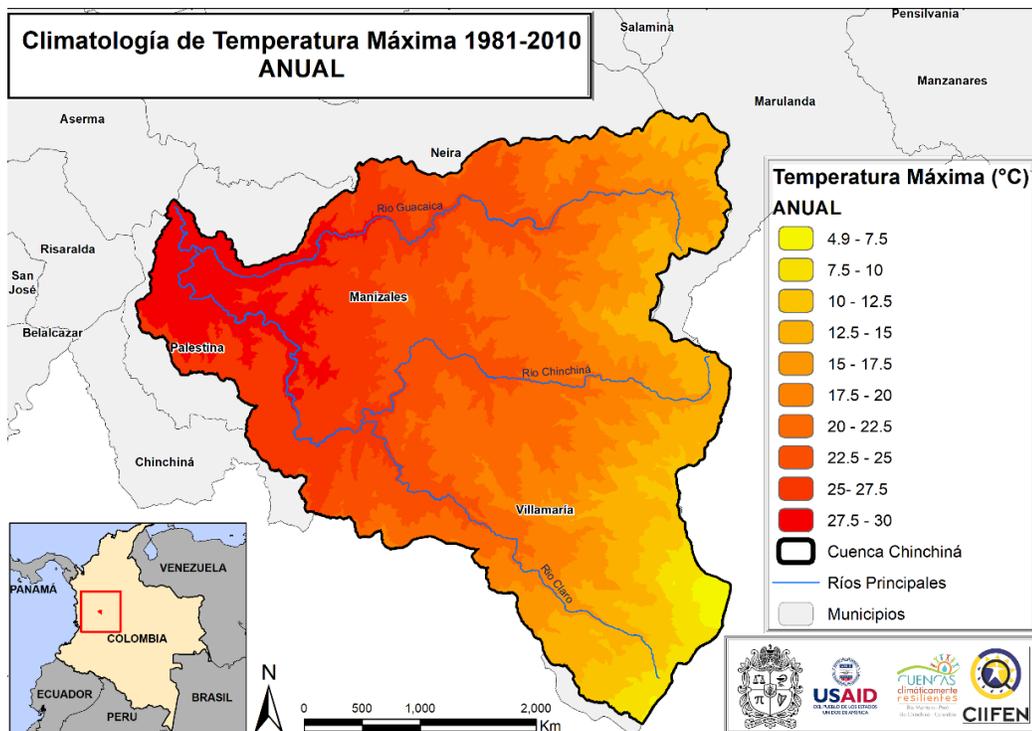
La Figura 4-3 presenta el comportamiento espacial de la temperatura máxima en la cuenca del río Chinchiná. Los resultados permitieron concluir que la relación de proporcionalidad de la temperatura máxima y la altitud es inversa, pues en la cuenca alta se tienen zonas que para el período 1981-2010 alcanzaron únicamente 4.9°C, mientras que, en la cuenca baja, particularmente en la región cercana a la desembocadura del río Chinchiná, se obtuvieron valores de hasta 30°C.

La temperatura mínima también presentó un comportamiento inversamente proporcional con la elevación sobre el nivel del mar. La Figura 4-4 permitió concluir que el rango de variación de la temperatura mínima en la cuenca para el período 1981-2010 estuvo entre -6.2 °C en la región de ecosistemas de páramo, hasta los 19.8 °C en la zona baja, especialmente en el municipio de Palestina.

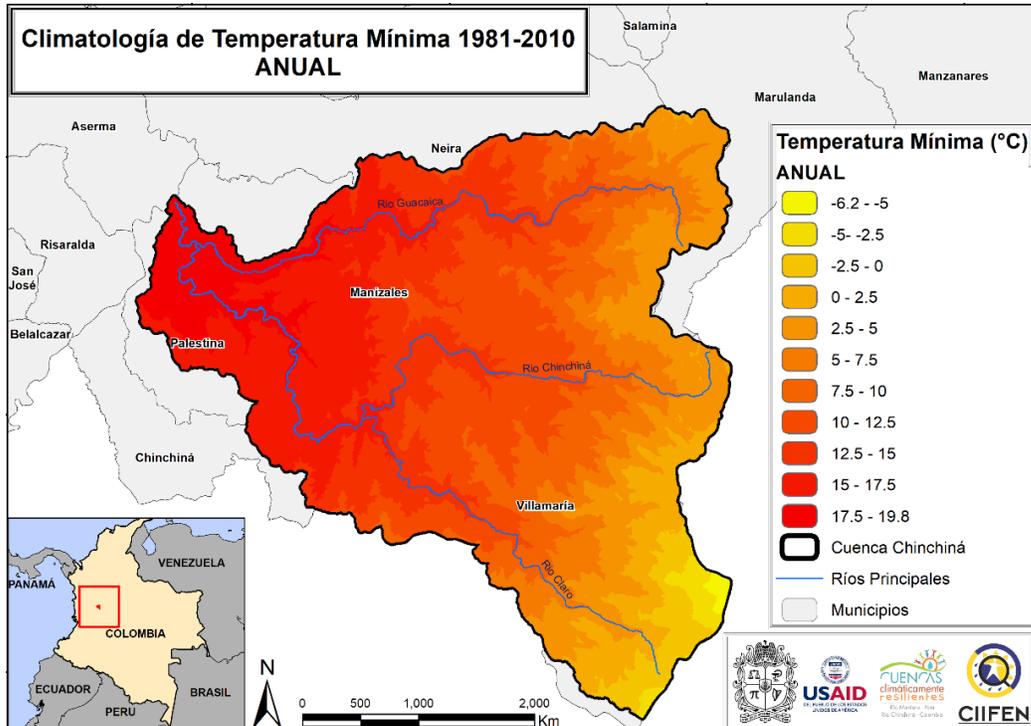
Con relación a la humedad, la cuenca presenta dos períodos de exceso en los meses de marzo a junio y septiembre a diciembre. Los meses restantes corresponden a los períodos con menor humedad (CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015). Según el mapa de humedad relativa media anual (IDEAM, 2005), esta variable fluctúa entre 85-90% en la parte alta de la cuenca y entre 75-85% en la parte media-baja (Ocampo, 2012).



**Figura 4-2:** Climatología de la precipitación para la cuenca del río Chinchiná. Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN a partir de (CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015).



**Figura 4-3:** Climatología de la temperatura máxima para la cuenca del río Chinchiná. Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN a partir de (CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015).



**Figura 4-4:** Climatología de la temperatura mínima para la cuenca del río Chinchiná. Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN a partir de (CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015).

## 4.2 Descripción metodológica

A continuación, se presenta la descripción de la metodología seguida para el logro de los objetivos propuestos en la investigación, que incluyó análisis de información temporal histórica, análisis trimestral y establecimiento de correlaciones con fenómenos macroclimáticos, curvas de distribución de valor extremo, índices climáticos, análisis de tendencias, ciclo diurno y curvas de duración de caudales; todo esto, destinado a determinar finalmente cómo es la dinámica espacio-temporal de los eventos extremos en la cuenca del río Chinchiná.

### 4.2.1 Información histórica de series hidrolimáticas

Para el estudio se tuvieron en cuenta registros diarios históricos de las variables hidrolimáticas de las estaciones ubicadas en la cuenca; se tomaron las series temporales de 23 estaciones de precipitación y 6 de aforo. La información fue suministrada por diferentes entidades encargadas del monitoreo medioambiental, como el Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFÉ, La Central Hidroeléctrica de Caldas - CHEC y el

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Es importante resaltar que la información aquí contenida corresponde a la empleada para el desarrollo del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná (CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2015); en el caso de los datos de CENICAFÉ, se completaron con la digitalización de anuarios meteorológicos físicos que reposan en la Universidad Autónoma de Manizales. El período histórico seleccionado fue el comprendido entre los años 1981-2012 tanto para el análisis de precipitación como para el caudal; representa un período homogéneo que engloba la cantidad mínima de datos requerida para obtener buenos resultados de tendencias y variaciones en los datos hidroclimáticos suministrados. Adicionalmente, se verificó que el porcentaje de datos faltantes para cada una de las estaciones evaluadas fuera inferior al 10%; sin embargo, dada la escasa información climática conseguida para la región de ecosistemas de páramo, la estación Las Brisas requirió ser empleada pese a que tiene un porcentaje de datos faltantes del 18%; su localización en el Parque Nacional Natural Los Nevados y un registro histórico superior a 30 años hace que sea indispensable su utilización en el estudio para obtener al menos algunas conclusiones del comportamiento de los eventos extremos de precipitación en la zona alta de la cuenca, donde nace el río Chinchiná.

La Tabla 4-2 muestra la georreferenciación de las estaciones de precipitación seleccionadas para el estudio. La información se presenta en orden altitudinal de mayor a menor. Adicionalmente, la Figura 4-5 permite visualizar espacialmente la ubicación de las estaciones pluviométricas y climatológicas principales en la cuenca del río Chinchiná. Se evidencia concentración de la mayoría de las estaciones en la zona media y baja, por tanto se sugiere una mayor implementación de redes de monitoreo en la cuenca alta, donde se cuentan con registros históricos recientes que impidieron su utilización en el presente estudio.

La georreferenciación de las 6 estaciones de caudal seleccionadas para el estudio se presenta en la Tabla 4-3. Se tuvieron en cuenta 3 estaciones de tipo limnigráficas y 3 tipo LM- Aforo o limnimétricas. Del tipo de estación seleccionado dependerán en gran medida los resultados obtenidos, pues en el caso de las limnimétricas, la toma de lecturas manual puede afectar significativamente el resto de la muestra y en ocasiones dar lugar a

resultados que no son tan confiables como ocurre con las estaciones automatizadas (limnigráficas).

**Tabla 4-2:** Georreferenciación de las estaciones de precipitación seleccionadas.

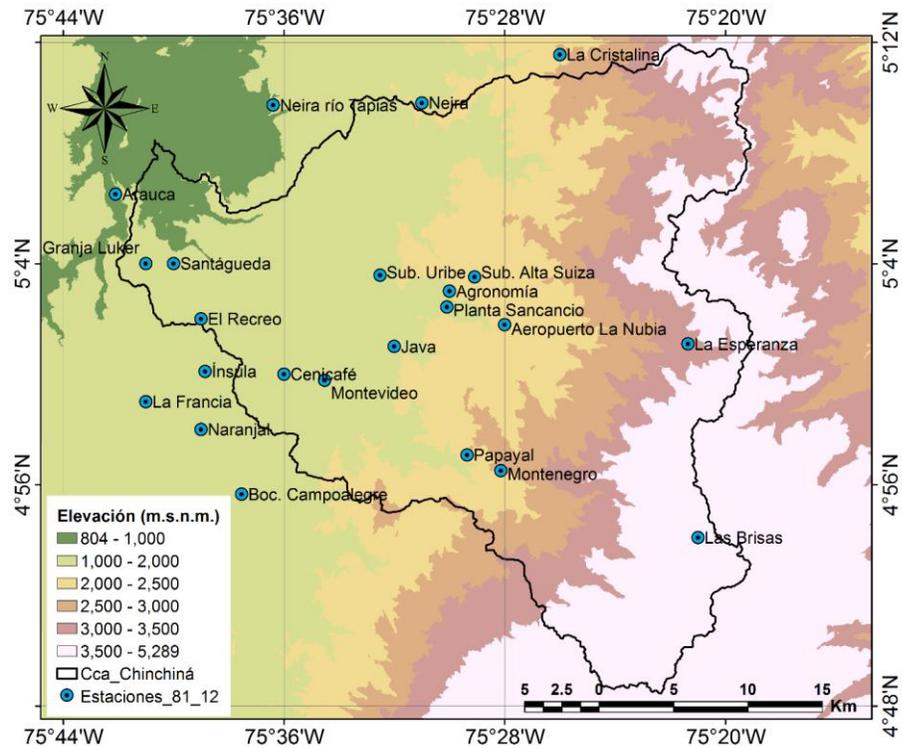
Estación	Entidad	Municipio	Tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Las Brisas	IDEAM	Villamaría	Principal	4150	4.901	-75.350
La Esperanza	IDEAM	Manizales	Pluviométrica	3280	5.018	-75.356
Montenegro	CHEC	Villamaría	Pluviométrica	2292	4.942	-75.469
La Cristalina	IDEAM	Neira	Pluviométrica	2290	5.193	-75.433
Papayal	IDEAM	Villamaría	Pluviométrica	2220	4.951	-75.489
Agronomía	CENICAFE	Manizales	Principal	2088	5.050	-75.500
Aeropuerto La Nubia	IDEAM	Manizales	Principal	2058	5.030	-75.467
Subestación Alta Suiza	CHEC	Manizales	Pluviométrica	2055	5.059	-75.485
Subestación Uribe	CHEC	Manizales	Pluviométrica	1905	5.060	-75.542
Neira río Tapias	CHEC	Neira	Pluviométrica	1902	5.162	-75.607
Neira	IDEAM	Neira	Pluviométrica	1860	5.164	-75.517
Planta Sancancio	CHEC	Manizales	Pluviométrica	1850	5.040	-75.502
Java	CENICAFE	Manizales	Pluviométrica	1778	5.017	-75.533
Bocatoma Campoalegre	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1470	4.928	-75.625
El Recreo	CENICAFE	Palestina	Pluviométrica	1430	5.033	-75.650
Naranjal	CENICAFE	Chinchiná	Principal	1381	4.967	-75.650
Montevideo	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1370	4.996	-75.576
La Francia	CENICAFE	Chinchiná	Pluviométrica	1335	4.983	-75.683
Cenicafé	CENICAFE	Chinchiná	Principal	1310	5.000	-75.600
Ínsula	CHEC	Chinchiná	Pluviométrica	1225	5.002	-75.648
Granja Luker	CENICAFE	Palestina	Principal	1031	5.067	-75.683
Santágueda	CENICAFE	Palestina	Principal	1026	5.067	-75.667
Arauca	IDEAM	Palestina	Pluviométrica	890	5.109	-75.702

Fuente: Elaboración propia.

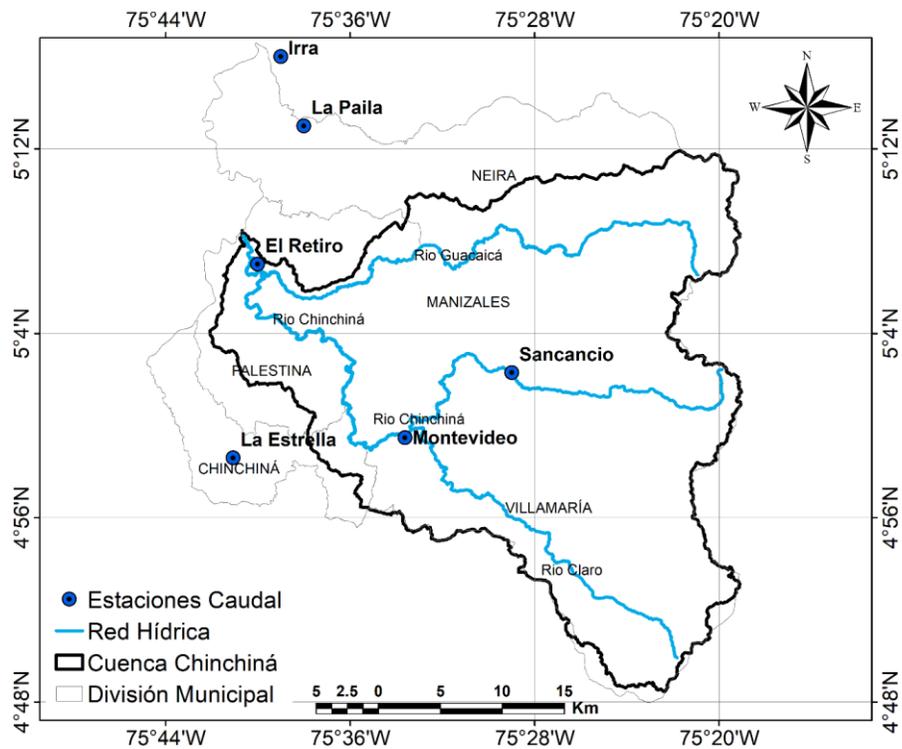
**Tabla 4-3:** Georreferenciación de las estaciones de caudal seleccionadas.

Estación	Entidad	Municipio	Tipo	Latitud	Longitud
El Retiro	IDEAM	Palestina	Limnigráfica	5.117	-75.667
Irra	IDEAM	Neira	Limnigráfica	5.267	-75.650
La Estrella	CHEC	Chinchiná	LM-Aforo	4.976	-75.685
La Paila	IDEAM	Neira	Limnigráfica	5.217	-75.633
Montevideo	CHEC	Chinchiná	LM-Aforo	4.991	-75.560
Sancancio	CHEC	Manizales	LM-Aforo	5.038	-75.483

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4-5:** Localización de las estaciones de precipitación en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4-6:** Localización de las estaciones de caudal en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-6 muestra la localización espacial de las estaciones de caudal en la cuenca del río Chinchiná. Irra, La Paila, y La Estrella se encuentran por fuera de la delimitación de la cuenca, sin embargo, su análisis permitió obtener mejores conclusiones de los resultados de eventos extremos de caudal.

#### **4.2.2 Correlaciones entre variables hidroclimáticas y el Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO**

Para establecer las correlaciones de la precipitación y el caudal con la ocurrencia de episodios cálidos y fríos del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur, se empleó el software SPSS IBM Statistics. Se ingresaron los acumulados trimestrales para el caso de la lluvia y el promedio mensual para el análisis de caudales; el índice se tomó de la página de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

Para el estudio de las correlaciones de la precipitación y el caudal con el ONI, se emplearon los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman por su amplio uso en el estudio del grado de relación lineal existente entre variables cuantitativas (Puertas & Carvajal, 2008; Ávila, Carvajal & Gutiérrez, 2014) como precipitación y caudal. Los coeficientes varían entre -1 y 1; cuando la correlación toma dichos valores, se denomina momento de correlación completa negativa o positiva y describen una perfecta línea recta con variación en la pendiente según sea el caso. Una correlación cercana a cero indica que las variables no se relacionan linealmente o son independientes (Restrepo & Gonzáles, 2007).

El coeficiente de correlación de Pearson es ampliamente usado cuando dos variables aleatorias cuantitativas poseen una distribución normal bivariada conjunta (Restrepo & Gonzáles, 2007). Tiene una desventaja, pues no permite decidir si la correlación observada es estadísticamente significativa y/o si una correlación es más alta que otra (Press et al., 1992; Arango et al., 2013). El coeficiente de correlación de Spearman es recomendable utilizarlo cuando los datos tienen valores extremos o siguen una distribución no normal (Martínez et al., 2009; Naranjo, 2016).

Adicionalmente, el análisis de correlaciones es de gran importancia para la determinación del tiempo de respuesta con el que las variables climáticas reaccionan a las fluctuaciones del Índice Oceánico El Niño. La respuesta puede ser inmediata (sincrónica) o retardada por uno o varios periodos (rezagada) (IDEAM, 2009). Para el estudio se emplearon

correlaciones sincrónicas y con rezago de 1, 2 y 3 meses tanto para la precipitación como para el caudal.

### 4.2.3 Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo

A partir de los registros históricos de precipitación y caudal, se estableció la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste a los máximos anuales mediante el software libre AFINS 2.0, desarrollado por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), que forma parte del área de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia. Funciona bajo una máquina virtual denominada IDL Virtual Machine, la cual es una herramienta distribuida en forma gratuita y sin necesidad de una licencia.

Se evaluaron diferentes distribuciones de probabilidad de valor extremo que se presentan a continuación, obtenidas del manual técnico de instalación del software AFINS, versión 2.0:

- **GUMBEL**

$$F(x) = \exp(-\lambda \exp(-\theta x)) \quad (4-1)$$

$$f(x) = \lambda \theta \exp(-\theta x) \exp(-\lambda \exp(-\theta x)) \quad (4-2)$$

$\theta$  es el parámetro de escala.

$\lambda$  es el parámetro de forma.

- **TCEV**

$$F(x) = \exp[-\lambda_1 \exp(\theta_1 x) - \lambda_2 \exp(-\theta_2 x)] \quad (4-3)$$

$$f(x) = F(x)[\theta_1 \lambda_1 \exp(\theta_1 x) - \theta_2 \lambda_2 \exp(-\theta_2 x)] \quad (4-4)$$

$\theta_1$  y  $\lambda_1$  son los parámetros de escala y forma de las crecidas “ordinarias”.

$\theta_2$  y  $\lambda_2$  son los parámetros de escala y forma de las crecidas “extraordinarias”.

- **GEV**

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad (4-5)$$

$$f(x) = F(x) \left[ \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} \right] \quad (4-6)$$

$\alpha$  es el parámetro de escala.

$\beta$  es el parámetro de forma.

$x_0$  es el parámetro de localización.

$$\text{Si } \beta > 0 \text{ entonces } x < (x_0 - \frac{\alpha}{\beta}) \quad (4-7)$$

$$\text{Si } \beta < 0 \text{ entonces } x > (x_0 + \frac{\alpha}{\beta}) \quad (4-8)$$

## • LOG GUMBEL

$$F(x) = \exp\left(-\frac{\theta}{x}\right)^\lambda \quad (4-9)$$

$$f(x) = \frac{\lambda}{\theta} \left(\frac{\theta}{x}\right)^{\lambda+1} F(x) \quad (4-10)$$

## • LOG NORMAL

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_y}{\sigma_y}\right) \quad (4-11)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (4-12)$$

$\Phi$  es la función de distribución acumulada normal estándar.

La curva de distribución de probabilidad permitió el análisis de lluvias máximas para los diferentes períodos de retorno. Para su selección se consideraron tres criterios que se describen a continuación (Marín, Ocampo & Vélez, 2014):

1. **Máxima verosimilitud:** parámetro que permite determinar el mejor ajuste brindado entre las distribuciones de probabilidad evaluadas. Si  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son los valores observados de una muestra aleatoria de tamaño  $n$ , la función de verosimilitud o probabilidad conjunta de la muestra es:

$$L(Y) = f(x_1, Y) * f(x_2, Y) * \dots * f(x_n, Y) \quad (4-13)$$

2. **Análisis gráfico:** se prefieren las funciones de distribución que gráficamente representen mejor el comportamiento de los valores extremos de lluvia, sobre todo en períodos de retorno elevados.
3. **Parsimonia:** es un principio metodológico filosófico, según el cual, “En igualdad de condiciones, la explicación más sencilla suele ser la correcta”. De esta manera, cuando dos teorías, en los mismos escenarios tienen las mismas consecuencias, la teoría considerada más simple tiene la mayor probabilidad de ser la correcta que la más compleja. Por ende, se prefieren modelos más simples representados por distribuciones de probabilidad con menos parámetros.

El análisis fue realizado para el registro histórico y por condición hidrológica considerando los años neutrales y aquellos donde se presentaron episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur, los cuales se categorizaron con base en el índice Oceánico el Niño reportado por la NOAA (Ocampo, Vélez, & Marín, 2014). Adicionalmente, se evaluaron las curvas de distribución de probabilidad por subconjuntos de datos de 30 años para identificar las variaciones que han tenido los valores extremos a lo largo del tiempo en diferentes períodos.

#### 4.2.4 Índices climáticos y evaluación de tendencias

Se empleó el software estadístico Rclimdex el cual está diseñado para proporcionar una interfase amigable para el cálculo de 27 índices climáticos de precipitación y temperatura recomendados por el Equipo de Expertos de CC1/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Indices” (ETCCDMI) en los cuales el usuario puede definir los umbrales requeridos según la zona de análisis o el objetivo particular de cada investigación (Zhang & Yang 2004). Su función principal consiste en dar resultados de índices de extremos climáticos que pueden ser insumo base para estudios de monitoreo medioambiental y detección de cambio y variabilidad climática a nivel mundial (Zhang & Yang 2004).

La Tabla 4-4 muestra los índices de precipitación proporcionados por el software Rclimdex que fueron empleados para el desarrollo de la presente investigación.

**Tabla 4-4:** Índices de precipitación proporcionados por RClimdex.

ID	Nombre del índice	Definición	Unidad
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
	(Cantidad Máxima de precipitación en un día)		
Rx5day	Max 5-day precipitation amount	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
	(Cantidad Máxima de precipitación en 5 días)		
SDII	Simple daily intensity index	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por $PRCP \geq 1.0\text{mm}$ ) en un año	mm/día
	(Índice simple de intensidad diaria)		
R10	Number of heavy precipitation days (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que $PRCP \geq 10\text{mm}$	días
R20	Number of very heavy precipitation days	Número de días en un año en que $PRCP \geq 20\text{mm}$	días
	(Número de días con precipitación muy intensa)		
Rnn	Number of days above nn mm	Número de días en un año en que $PRCP \geq nn\text{ mm}$ , nn es un parámetro definido por el usuario	días
	(Número de días sobre nn mm)		
CDD	Consecutive dry days	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{mm}$	días
	(Días secos consecutivos)		
CWD	Consecutive wet days	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{mm}$	días
	(Días lluviosos consecutivos)		
R95p	Very wet days	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	mm
	(Días muy lluviosos)		
R99p	Extremely wet days	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm
	(Días extremadamente lluviosos)		
PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation	Precipitación anual total en los días húmedos ( $RR \geq 1\text{mm}$ )	mm
	(Precipitación total anual en los días lluviosos)		

Fuente: Adaptado (Zhang &amp; Yang, 2004).

RClimdex está desarrollado bajo el lenguaje de programación R; los datos se ingresan en formato texto y deben estar ordenados en columnas en la siguiente secuencia: Año, Mes, Día, Precipitación (PRCP), Temperatura máxima (TMAX) y Temperatura Mínima (TMIN). El software admite datos faltantes, pero deben estar codificados como -99.9 e ingresarlos en orden cronológico (Zhang & Yang, 2004). El programa requiere el ingreso del período para el cual se desea hacer el cálculo de los índices; es importante recalcar que el valor inicial siempre debe empezar el año siguiente y finalizar un año antes; esto para garantizar una ventana temporal completa y por consiguiente el análisis del registro en su totalidad. Adicionalmente, es posible ingresar las coordenadas de la estación a evaluar para verificar el hemisferio en el cual se está trabajando (Zhang & Yang, 2004).

Inicialmente, el software hace un control previo de calidad de los datos ingresados y reemplaza todos los valores no razonables como precipitaciones negativas, temperatura máxima menor que la temperatura mínima e identifica valores atípicos. RClimdex crea directorios adicionales en donde se guardan archivos que contienen resultados gráficos e información numérica a partir de la cual se realizaron los ajustes por regresión lineal de mínimos cuadrados y con ponderamientos locales para el análisis de tendencias (Zhang & Yang, 2004). Se consideró un nivel de confianza del 90% de los datos, que corresponde a un p-value menor o igual a 0.1.

Para una mejor visualización de los resultados se emplearon Sistemas de Información Geográfica (ArcGis).

#### **4.2.5 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)**

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es un potente índice sencillo de calcular, pues el único parámetro que requiere para su procesamiento es la precipitación, lo cual lo hace muy efectivo para analizar tanto períodos de sequía, como de exceso de humedad producto de la ocurrencia de episodios de precipitación abundante. Al ser un índice normalizado, tiene coherencia espacial y por tanto permite hacer comparaciones entre regiones diferentes con climas distintos (OMM, 2012).

Para el cálculo de los máximos períodos húmedos y secos que se registraron durante la ventana temporal comprendida entre 1981-2012 seleccionada para el estudio, se calculó el índice estandarizado con la última versión del programa SPI (spi\_sl\_6.exe) que consiste

en el ingreso de un archivo de texto a un ejecutable .exe (consola) con una línea de encabezado y posteriormente los datos se listan en columnas en la secuencia Año, Mes, Precipitación multiplicada por 100. Los valores faltantes se deben codificar como -9900.

Se realizó el cálculo del SPI para un total de lluvia de 6 meses (mediano plazo) y 12 meses (largo plazo) en la cuenca del río Chinchiná con el objetivo de identificar los períodos donde se presentaron los valores más extremos del índice a través de la historia. Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor.

McKee et al., (1993) definieron las distintas intensidades de la sequía según los valores de SPI. La Tabla 4-5 consolida los rangos de variación establecidos para el SPI y su significado correspondiente.

**Tabla 4-5:** Valores del índice estandarizado de precipitación.

<b>Valores de SPI</b>	<b>Definición</b>
2,0 y más	extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	muy húmedo
1,0 a 1,49	moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	moderadamente seco
-1,5 a -1,99	severamente seco
-2 y menos	extremadamente seco

Fuente: Adaptado (OMM, 2012).

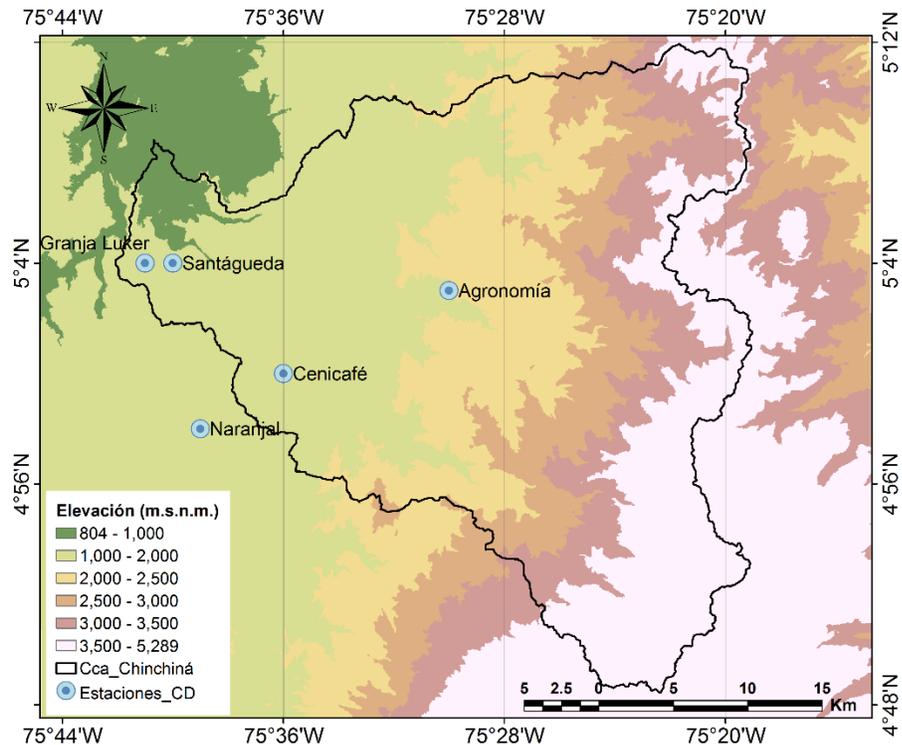
Los episodios de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1,0 o inferior. El episodio finaliza cuando el SPI alcanza valores positivos (McKee et al., 1993; OMM, 2012).

Los resultados obtenidos se graficaron en mapas para comunicar mejor la extensión espacial de los resultados mediante el método de la ponderación de la distancia inversa, que es una de las técnicas empleadas con mayor frecuencia por su ventaja para representar variaciones locales de modo que se favorezcan los datos más próximos al punto que se está procesando (OMM, 2012).

### 4.2.6 Ciclo diario de la precipitación

El análisis del ciclo diario de la precipitación tiene efectos importantes para lograr el entendimiento del clima tropical, sobre el cual aún no se han obtenido conclusiones definitivas de aspectos fundamentales por la alta complejidad del sistema (Poveda et al., 2002).

Para el estudio del ciclo diario de la precipitación se tuvieron en cuenta los registros horarios históricos para el período 1981-2012 de 5 estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná. La Figura 4-7 muestra la distribución espacial de las estaciones con información de lluvia horaria para la cuenca.



**Figura 4-7:** Localización de las estaciones de precipitación para análisis de ciclo diario. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el cálculo de máximos multianuales mensuales hora a hora mediante el uso de rutinas en Matlab y tablas dinámicas. Con el objetivo de obtener una mejor visualización de los resultados, se elaboraron gráficos de áreas para identificar las variaciones temporales de la lluvia en las diferentes horas del día a lo largo de un año. El análisis también se aplicó para las tres combinaciones entre las series: ciclo diario de valores máximos de precipitación durante El Niño, ciclo diario de valores máximos de precipitación

durante La Niña y ciclo diurno de valores máximos de lluvia bajo condiciones neutrales (Poveda et al., 2002) para compararlo con la totalidad del registro histórico, cuando no se hacen separaciones por condición hidrológica.

#### 4.2.7 Curvas de duración de caudales

Se elaboraron curvas de duración de caudales utilizando la metodología tradicional propuesta por U.S. Geological Survey (USGS) en las 6 estaciones de aforo seleccionadas para el estudio. Es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y el porcentaje de tiempo en que ese caudal es igualado o excedido (IDEAM, 2015).

La metodología seguida consistió en asignar a los caudales observados ordenados de mayor a menor un número consecutivo, iniciando en 1 para el caudal mayor ( $q_1$ ) y en  $n$  para el caudal más bajo ( $q_n$ ). Sea  $N$  el número de datos e  $i$  el valor asignado al caudal ordenado, la expresión contenida en la ecuación 4-14 permite obtener la probabilidad de excedencia de los caudales:

$$\textit{Probabilidad de excedencia} = 100 * \frac{i}{N+1} \quad (4-14)$$

Finalmente, cada uno de los datos de caudal ordenados es graficado en pareja con su correspondiente valor de probabilidad de excedencia, obteniendo la curva de duración de caudales CDC (Salazar, 2016).

Se realizaron las curvas de duración de caudales por condición hidrológica (El Niño, La Niña y Neutral) para establecer la influencia del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur en el régimen de caudales en la cuenca del río Chinchiná.

## **5. Resultados**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el cumplimiento de los objetivos planteados y lograr determinar cómo es la dinámica de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río Chinchiná considerando la variabilidad espacio-temporal.

Los análisis estuvieron centrados en la evaluación de los episodios extremos de precipitación y caudal en la cuenca y en determinar cómo el Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur puede influenciar la ocurrencia de estos eventos aumentando la vulnerabilidad de la zona.

### **5.1 Análisis estadístico de variables hidrológicas**

El análisis estadístico de la precipitación y el caudal permitió, mediante el uso de herramientas estadísticas, analizar las características de las series temporales para mejorar el entendimiento de los procesos que en ella se involucran y establecer relaciones con fenómenos climatológicos. Adicionalmente, este análisis fue clave para obtener resultados del comportamiento temporal de los datos, evidenciar cambios y tendencias, correlacionarlos con otras fuentes de información, identificar valores extremos, rangos y variación en los datos iniciales.

#### **5.1.1 Análisis exploratorio numérico y gráfico de la precipitación**

El análisis exploratorio se realizó con el fin de examinar los datos iniciales y permitir conseguir un entendimiento básico de la información de la cual se dispone. Ofreció metodologías sencillas para organizar, detectar fallos, identificar valores atípicos, concentraciones de valores, variación de los datos entre otros.

**Tabla 5-1:** Resultados del análisis exploratorio numérico de la precipitación.

<b>Estadístico</b>	<b>Las Brisas</b>	<b>La Esperanza</b>	<b>La Cristalina</b>	<b>Agronomía</b>	<b>Neira rio Tapias</b>	<b>Cenicafé</b>	<b>Santágueda</b>	
<i>Media</i>	123.17	128.44	165.85	161.39	187.30	218.49	190.79	
<i>Error estándar de la media</i>	3.77	3.61	5.45	4.66	5.87	4.98	4.56	
<i>Mediana</i>	111.30	118.50	145.50	149.80	175.00	214.70	181.80	
<i>Moda</i>	72*	89	122	82*	64*	204*	90*	
<i>Desviación estándar</i>	65.59	69.98	105.75	89.43	114.19	97.58	89.23	
<i>Varianza</i>	4301.43	4896.82	11183.60	7996.92	13040.25	9521.42	7961.22	
<i>Asimetría</i>	0.74	0.72	0.92	0.71	0.84	0.47	0.35	
<i>Error estándar de asimetría</i>	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	
<i>Curtosis</i>	0.30	0.30	0.81	0.40	0.86	0.33	-0.38	
<i>Error estándar de curtosis</i>	0.28	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
<i>Rango</i>	330	380	568	468	599	586	427	
<i>Mínimo</i>	7	2	5	5	0	5	7	
<i>Máximo</i>	337	382	573	473	599	591	434	
<i>Percentiles</i>	10	44.42	44.00	44.00	54.40	51.00	99.00	81.50
	20	63.70	67.40	74.70	81.80	84.80	133.40	114.56
	25	72.80	79.00	85.00	94.45	99.75	144.70	122.90
	30	82.70	89.00	96.73	107.70	118.14	161.35	132.24
	40	96.50	102.80	120.04	131.30	144.00	191.10	156.70
	50	111.30	118.50	145.50	149.80	175.00	214.70	181.80
	60	130.82	134.20	176.60	174.50	197.00	237.00	211.56
	70	151.98	158.90	208.97	203.20	236.00	261.85	239.48
	75	167.50	171.00	230.65	213.80	261.00	277.95	253.00
	80	175.76	187.66	248.20	234.40	280.00	292.40	267.10
	90	214.26	222.90	307.60	280.90	333.00	343.85	309.82
	95	253.84	264.50	362.15	336.40	394.15	397.75	350.94
	99,5	331.56	334.21	565.04	464.66	599.00	541.25	421.75
100	336.60	382.00	573.00	472.90	599.00	591.20	433.80	

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-1 resume los resultados obtenidos del análisis exploratorio numérico para algunas estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná. Las estaciones se ordenaron de mayor a menor altitud, comenzando por Las Brisas que se encuentra a 4150 m.s.n.m. en la zona del Parque Nacional Natural Los Nevados, y finalizando en Santágueda, ubicada en el municipio de Palestina a 1026 m.s.n.m. En estas dos estaciones se observó que la media presentó unos valores de 123.17 mm/mes y 190.79 mm/mes respectivamente, lo cual permitió identificar que los eventos de lluvia son

inversamente proporcionales a la altitud, es decir, a mayor altitud el valor medio de precipitación mensual es menor, mientras que, a menor elevación con relación al nivel del mar, la precipitación aumenta.

Para estas dos estaciones, la diferencia entre la media y la mediana fue significativa, lo cual indicó que es probable que la serie esté afectada por outliers que perturban el comportamiento simétrico de los datos. Con relación a la moda, las estaciones Las Brisas y Santágueda evidenciaron la existencia de varias modas, por tanto, se seleccionó el valor más pequeño, correspondiente a 72 mm/mes y 90 mm/mes respectivamente.

En el análisis de variabilidad, los valores de la desviación estándar para las estaciones evaluadas mostraron que existe poca concentración de los datos respecto a la media y su rango de variación es muy amplio. Para las Brisas los datos variaron en el rango de  $123.17 \pm 65.59$  mm/mes, mientras que en Santágueda el rango fue  $190.79 \pm 89.23$  mm/mes.

El coeficiente de asimetría o sesgo permite identificar la disparidad de los datos con respecto a la media. De esta manera, un valor igual a cero hace referencia a una distribución simétrica; esto quiere decir que existe la misma concentración de los valores a la derecha y a la izquierda de la media. Por otro lado, un valor mayor a cero indica una distribución asimétrica positiva, la cual evidencia la existencia de una mayor concentración de valores a la derecha de la media que a su izquierda. Por último, un valor menor a cero exhibe una distribución asimétrica negativa, que muestra la mayor concentración de valores a la izquierda de la media que a su derecha (Botero, 2015). Todas las estaciones evaluadas presentaron valores de asimetría mayores a 0; esto indicó que existe una mayor concentración de los datos al lado derecho de la media, es decir, una mayor propensión de los datos a valores extremos máximos. El mayor valor de este coeficiente fue evidente en La Cristalina, con un resultado de 0.92.

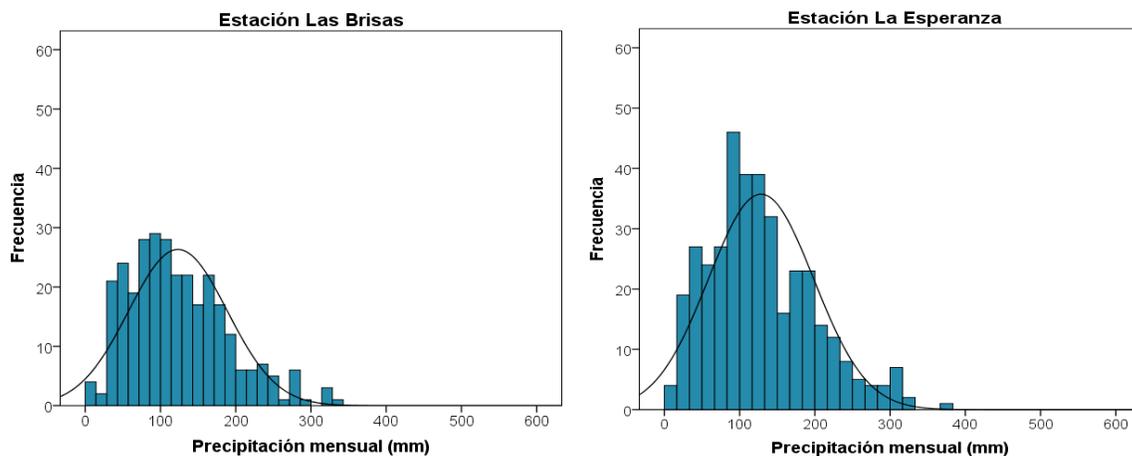
Por otra parte, el coeficiente de curtosis o apuntamiento mide el grado de agudeza o achatamiento de una distribución con relación a la normal, es decir, cuán puntiaguda es. Determina el grado de concentración que presentan los valores extremos en la región central de la distribución. De esta manera, una curtosis mayor a cero representa una distribución leptocúrtica, es decir, aunque presenta pocos valores extremos es sensible a ellos; por otro lado, una curtosis menor a cero indica una distribución achatada influenciada por la existencia de muchos valores extremos en el recorrido de la serie (Botero, 2015). Los resultados obtenidos para las estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná

mostraron que Las Brisas, La Esperanza, La Cristalina, Agronomía, Neira río Tapias y Cenicafé presentaron una distribución de tipo leptocúrtica, sensible a la ocurrencia de valores extremos de lluvia, mientras que en Santágueda la curtosis fue de -0.38, que indica que su distribución es achatada, con presencia de datos extremos en todo el período histórico evaluado.

Con relación a las medidas de dispersión, se calcularon los valores de los percentiles de cada una de las series históricas de información. Por ejemplo, tomando los resultados del percentil 75, se observó que en la estación Cenicafé el 75% de los datos fueron inferiores o iguales a 292.40 mm/mes. Los percentiles son claves a la hora de analizar valores extremos máximos y mínimos en las series temporales de datos.

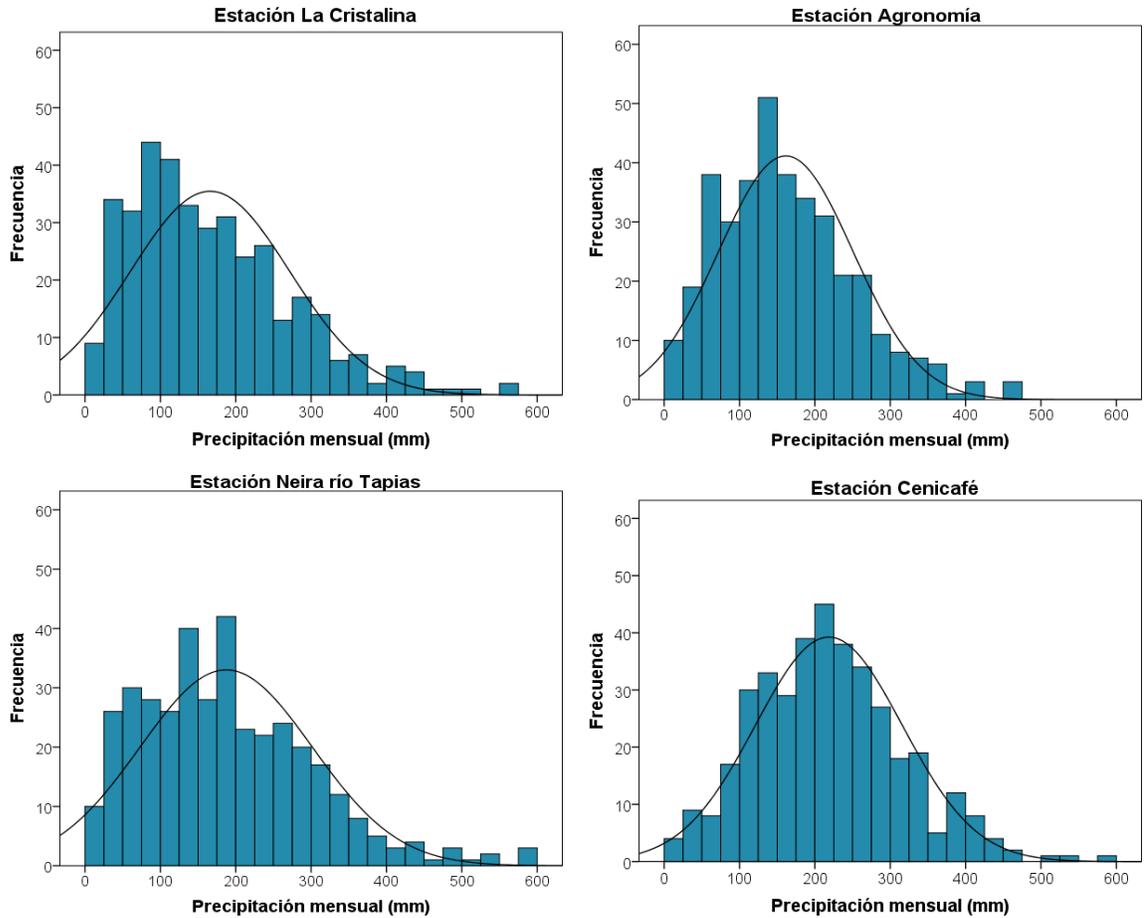
Por último, se realizó una exploración gráfica, la cual tiene por objetivo identificar visualmente el comportamiento de los datos; para esto, es indispensable la elaboración de diferentes tipos de gráficos que permitan obtener conclusiones y sacar la información más relevante sobre la variación de la información temporal.

La Figura 5-1 resume los resultados en algunas estaciones seleccionadas para el estudio. En cada una de ellas se pudo observar un comportamiento simétrico de la precipitación, característico de una distribución normal, con mayores incrementos en la lluvia acumulada trimestral conforme disminuyó la altitud de la estación analizada.



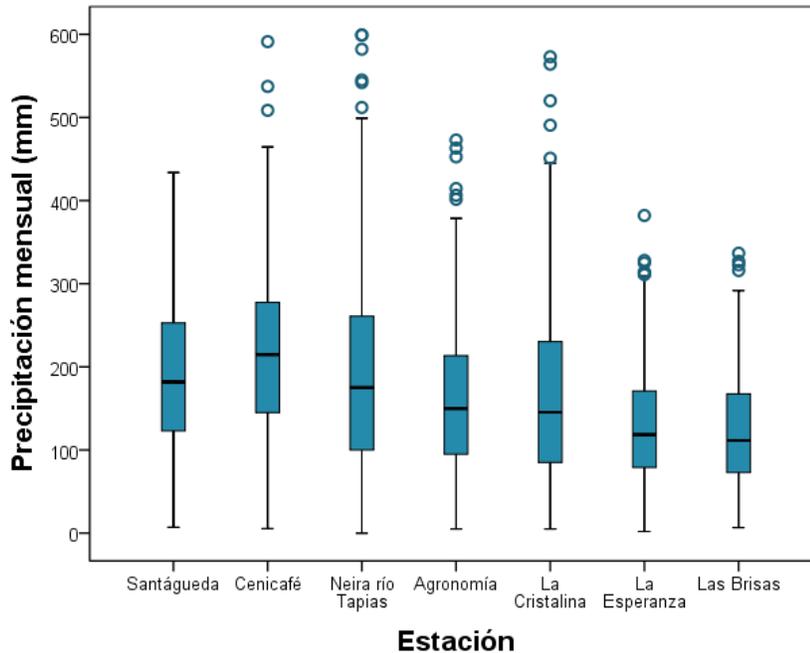
**Figura 5-1:** Análisis exploratorio gráfico: Histogramas de frecuencias para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia.



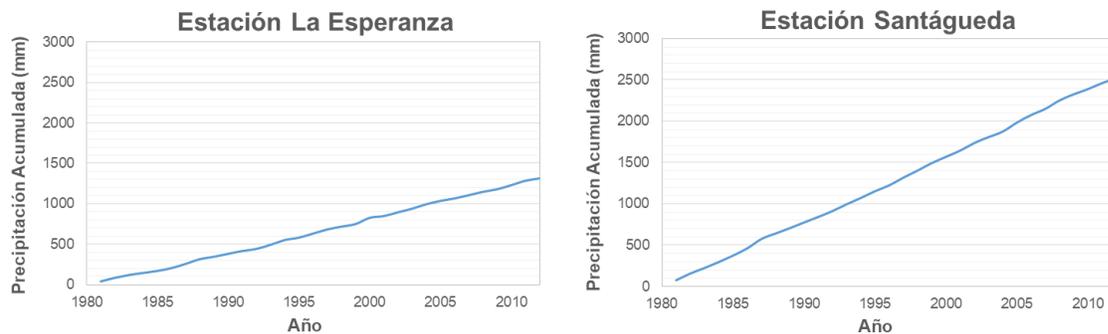
**Figura 5-1:** (Continuación)

Adicionalmente se realizaron gráficos de cajas o Boxplots que suministran información sobre los valores mínimos y máximos, los cuantiles Q1, Q2 y Q3, existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución, es decir, sirve para visualizar la dispersión mediante el uso del rango intercuartil (IQR), valores máximos y la mediana (Botero, 2015). La Figura 5-2 permitió identificar visualmente que pueden no existir diferencias estadísticamente significativas entre los datos de precipitación de las estaciones mencionadas. Se resalta la presencia reiterada de valores extremos en la mayoría de las estaciones analizadas con mayor intensificación en la década comprendida entre 2001 y 2010. Con relación a la altitud de las estaciones, se pudo concluir que, a mayor elevación, los extremos pierden intensidad y son menos frecuentes que en las estaciones localizadas en puntos de menor elevación sobre el nivel del mar.



**Figura 5-2:** Análisis exploratorio gráfico: Gráficos de cajas para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

Por último, se realizaron las curvas de masa simple que se caracterizan por proporcionar información útil para identificar variaciones en la precipitación, que son notorias cuando se presentan cambios de pendiente en la curva. La Figura 5-3 permite evidenciar los resultados obtenidos para las lluvias máximas anuales; se observó que la mayoría de las estaciones exhiben un comportamiento constante representado por la existencia de una “única pendiente” que indica finalmente la inexistencia de fuertes variaciones en el tiempo.



**Figura 5-3:** Análisis exploratorio gráfico: Curvas de masa simple para la precipitación en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.2 Análisis de homogeneidad de la precipitación

El análisis de homogeneidad se realizó para las series mensuales de precipitación. Se aplicaron diferentes metodologías para verificar si la serie conservó sus propiedades estadísticas con el tiempo. El objetivo general del análisis consistió en determinar si existen tendencias en la media o la varianza de la serie de datos (Hipel & McLeod, 1994; Dekking et al., 2005).

En primer lugar, se estableció si la serie presentaba cambios en la media a lo largo del tiempo. Para ello se empleó el método de Mann-Kendall cuya hipótesis nula es que no existe tendencia ( $H_0$ =No hay tendencia); para su análisis se asumió un nivel de significancia  $\alpha= 0.05$  (Hipel & McLeod, 1994).

Los resultados obtenidos de la aplicación del Test de Mann-Kendall con el software R, mostraron los valores resultantes para los estadísticos Z y U, necesarios para la aceptación o rechazo de la hipótesis nula. Z hace referencia a la distribución normal estándar inversa de los datos y U al cuantil  $1-\alpha/2$  de dicha distribución; para el rechazo de la hipótesis nula es necesario que  $|Z| > U$ .

Teniendo en cuenta que en Colombia se presenta anualmente un comportamiento estacional del clima definido por 4 períodos marcados: Diciembre, Enero, Febrero (DEF), Marzo, Abril, Mayo (MAM), Junio, Julio, Agosto (JJA) y Octubre, Noviembre, Diciembre (OND), se empleó el método de Mann-Kendall estacional, cuyo propósito principal es eliminar la estacionalidad de los datos y verificar la existencia de tendencias en la serie (Hipel & McLeod, 1994).

La Tabla 5-2 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del Test de Mann Kendall y su variante estacional para detectar posibles cambios en la precipitación en cualquier punto de la muestra. Se observó que las estaciones localizadas en la cuenca alta aceptaron la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5%, es decir, no presentaron cambios en la media, mientras que la mayoría de las estaciones ubicadas en la zona media y baja rechazaron la hipótesis y permitieron identificar que a lo largo del tiempo se han presentado cambios significativos en la media de la precipitación en la cuenca.

**Tabla 5-2:** Resultados de la aplicación del Test de Mann Kendall a los datos de lluvia.

Estación	Test de Mann-Kendall			Test de Mann-Kendall estacional		
	Estadístico Z	Estadístico U	Ho: No hay tendencia	Estadístico Z	Estadístico U	Ho: No hay tendencia
Las Brisas	0.899	1.960	Acepta Ho	0.558	1.960	Acepta Ho
La Esperanza	0.641	1.960	Acepta Ho	0.536	1.960	Acepta Ho
Montenegro	0.316	1.960	Acepta Ho	0.515	1.960	Acepta Ho
La Cristalina	0.361	1.960	Acepta Ho	-0.116	1.960	Acepta Ho
Papayal	2.149	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.030	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Agronomía	2.258	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.075	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Aerop. La Nubia	2.990	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.732	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Sub. Alta Suiza	2.289	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	3.086	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Sub. Uribe	0.789	1.960	Acepta Ho	0.903	1.960	Acepta Ho
Neira río Tapias	2.979	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	3.090	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Neira	2.801	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.960	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Planta Sancancio	0.671	1.960	Acepta Ho	0.881	1.960	Acepta Ho
Java	3.328	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.741	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Boc. Campoalegre	1.444	1.960	Acepta Ho	1.486	1.960	Acepta Ho
El Recreo	1.268	1.960	Acepta Ho	0.761	1.960	Acepta Ho
Naranjal	3.236	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	3.286	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Montevideo	1.646	1.960	Acepta Ho	1.547	1.960	Acepta Ho
La Francia	0.779	1.960	Acepta Ho	0.718	1.960	Acepta Ho
Cenicafé	2.494	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.888	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Ínsula	2.370	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	2.797	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Granja Luker	3.318	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	3.099	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Santágueda	3.343	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	3.444	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Arauca	-2.050	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	-2.772	1.960	<b>Rechaza Ho</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Para la cuantificación de las tendencias existentes en las estaciones que rechazaron la hipótesis nula inicial, se empleó el método Sen que asume que la tendencia es de tipo lineal. El valor de la tendencia se calculó como la mediana de las pendientes en pares de puntos (Botero, 2015).

Los resultados consignados en la Tabla 5-3 permitieron evidenciar la magnitud de las tendencias existentes en las estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná. Se observó que en la aplicación del método Sen estacional, las pendientes fueron mayores en comparación a los resultados sin variante de estacionalidad, donde los valores resultantes son similares entre sí; en ambos casos se tuvieron incrementos significativos, sobre todo en las estaciones Neira río Tapias y Neira, localizadas en la región norte de la cuenca, y Naranjal e Ínsula ubicadas al occidente.

**Tabla 5-3:** Resultados de la aplicación del Método de Sen a los datos de lluvia.

Estación	Cuantificación de tendencias	
	Método de Sen	Método de Sen estacional
Papayal	0.098	1.093
Agronomía	0.100	0.947
Aerop. La Nubia	0.097	1.058
Sub. Alta Suiza	0.100	1.385
Neira río Tapias	0.157	2.000
Neira	0.145	1.774
Java	0.144	1.423
Naranjal	0.155	1.847
Cenicafé	0.115	1.376
Ínsula	0.147	2.050
Granja Luker	0.138	1.467
Santágueda	0.144	1.512
Arauca	-0.091	-1.256

Fuente: Elaboración propia.

Para la detección de punto de cambio en la media de la precipitación se empleó la prueba de signo, la cual es una manera rápida y sencilla de establecer si existe alguna variación. A partir de las series de datos se obtuvieron dos subconjuntos de igual tamaño y se partió de la hipótesis nula  $H_0$ : Las medias de ambos subconjuntos son iguales (Botero, 2015).

Los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de signo con el software R, mostraron los valores resultantes para los estadísticos  $U_c$  y  $U$ , necesarios para la aceptación o rechazo de la hipótesis nula.  $U_c$  se refiere al estadístico de signo, es decir, el que permite tomar la decisión y  $U$  al cuantil  $1-\alpha/2$  de la distribución normal estándar; para el rechazo de la hipótesis nula es necesario que  $|U_c| > U$  (Botero, 2015).

La Tabla 5-4 resume los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de signo para detección de puntos de cambio en las series de precipitación. Las estaciones Papayal, Neira río Tapias, Java, Naranjal, Ínsula, Granja Luker y Santágueda rechazaron la hipótesis nula; esto permitió concluir que las medias de los 2 subconjuntos de datos seleccionados para cada estación tienen valores medios diferentes y por tanto existe un punto de cambio en la media a lo largo del registro histórico evaluado (1981-2012).

**Tabla 5-4:** Resultados de la aplicación de la prueba de signo a los datos de lluvia.

Estación	Prueba de Signo		
	Estadístico $U_c$	Estadístico $U$	Ho: Las medias de ambos subconjuntos son iguales
Las Brisas	0.366	1.960	Acepta Ho
La Esperanza	0.292	1.960	Acepta Ho
Montenegro	0.407	1.960	Acepta Ho
La Cristalina	-0.583	1.960	Acepta Ho
Papayal	2.633	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Agronomía	1.288	1.960	Acepta Ho
Aerop. La Nubia	1.281	1.960	Acepta Ho
Sub. Alta Suiza	1.320	1.960	Acepta Ho
Sub. Uribe	1.596	1.960	Acepta Ho
Neira río Tapias	2.691	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Neira	0.729	1.960	Acepta Ho
Planta Sancancio	0.326	1.960	Acepta Ho
Java	2.267	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Boc. Campoalegre	-0.110	1.960	Acepta Ho
El Recreo	1.960	1.960	Acepta Ho
Naranjal	2.021	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Montevideo	0.364	1.960	Acepta Ho
La Francia	0.367	1.960	Acepta Ho
Cenicafé	1.732	1.960	Acepta Ho
Ínsula	2.081	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Granja Luker	2.742	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Santágueda	2.638	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Arauca	-1.155	1.960	Acepta Ho

Fuente: Elaboración propia.

Por último, para la detección de cambios en la media y en la varianza se empleó el método de Pettitt, prueba no paramétrica de significancia estadística para puntos de cambio (Botero, 2015). La aceptación o rechazo de la hipótesis nula (Ho: No hay cambio en la media) radica en que la obtención del p-value ( $p_k > K$ ), el cual debe ser mayor que el nivel de significancia establecido (0.05) para que se acepte la hipótesis, es decir, se decida si es significativo o no (Pettitt, 1979).

La Tabla 5-5 presenta los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de Pettitt a las 23 estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná seleccionadas para el estudio. Los resultados permitieron concluir que gran parte de las estaciones ubicadas en la cuenca media y baja del río Chinchiná rechazaron la hipótesis nula inicial que asume que no

existen cambios en los valores medios de las series de lluvia empleadas. Al igual que en los resultados obtenidos con el Test de Mann Kendall, las estaciones Las Brisas, La Esperanza y Montenegro situadas en la zona alta de la cuenca, aceptaron la hipótesis nula, y por tanto se asume que sus datos históricos no presentan cambios en la media.

**Tabla 5-5:** Resultados de la aplicación de la prueba de Pettitt a los datos de lluvia.

Estación	Prueba de Pettitt		
	P_value (pk)	Nivel de significancia (K)	Ho: No hay cambio en la media
Las Brisas	0.428	0.050	Acepta Ho
La Esperanza	0.259	0.050	Acepta Ho
Montenegro	0.369	0.050	Acepta Ho
La Cristalina	0.370	0.050	Acepta Ho
Papayal	0.004	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Agronomía	0.018	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Aerop. La Nubia	0.004	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Sub. Alta Suiza	0.037	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Sub. Uribe	0.081	0.050	Acepta Ho
Neira río Tapias	0.007	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Neira	0.003	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Planta Sancancio	0.208	0.050	Acepta Ho
Java	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Boc. Campoalegre	0.013	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
El Recreo	0.015	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Naranjal	0.001	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Montevideo	0.049	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
La Francia	0.382	0.050	Acepta Ho
Cenicafé	0.017	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Ínsula	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Granja Luker	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Santágueda	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Arauca	0.043	0.050	<b>Rechaza Ho</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1.3 Análisis exploratorio numérico y gráfico del caudal

La Tabla 5-6 resume los resultados obtenidos del análisis exploratorio numérico para las 6 estaciones limnigráficas y limnimétricas localizadas en la cuenca del río Chinchiná. Con relación a las medidas de tendencia central, se evidenció una leve diferencia entre la media y la mediana de cada estación, lo cual indicó la existencia de valores atípicos que modificaron el comportamiento simétrico de los registros históricos de caudal. Por otro

lado, las estaciones La Estrella, Montevideo, Sancancio y La Paila presentaron varias modas, pero sólo se mostró el menor valor en cada uno de los casos.

Respecto al análisis de variabilidad, los valores de la desviación estándar para las estaciones evaluadas manifestaron que existe poca concentración de los datos respecto a la media y su rango de variación es muy amplio. Por ejemplo, en la estación Montevideo, los datos de caudal medio mensual variaron en el rango de  $16.31 \pm 6.45 \text{ m}^3/\text{seg}$ , mientras que en El Retiro el rango de variación fue  $27.99 \pm 18.57 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

**Tabla 5-6:** Resultados del análisis exploratorio numérico del caudal.

Estadístico		Estrella	Montevideo	Sancancio	El Retiro	Irra	La Paila
Media		1.09	16.31	6.71	27.99	685.93	5.56
Error estándar de la media		0.06	0.34	0.19	0.97	17.74	0.20
Mediana		0.80	15.30	5.97	22.76	635.55	4.58
Moda		0.26*	6.71*	0.64*	18.71	667.65	0.90*
Desviación estándar		1.11	6.45	3.59	18.57	346.32	3.68
Varianza		1.24	41.56	12.91	344.66	119937.12	13.57
Asimetría		4.05	1.43	1.20	1.74	0.97	2.01
Error estándar de asimetría		0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Curtosis		33.72	3.90	1.76	4.70	0.93	5.71
Error estándar de curtosis		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26
Rango		12.79	45.93	20.08	134.29	1868.23	25.18
Mínimo		0.01	6.71	0.64	4.05	187.74	0.90
Máximo		12.80	52.64	20.72	138.34	2055.97	26.07
Suma		402.53	6001.57	2509.83	10270.59	261340.05	1924.79
Percentiles	5	0.07	8.16	2.36	7.59	258.63	1.82
	10	0.15	9.19	2.85	9.90	302.17	2.23
	20	0.26	10.90	3.77	13.48	364.44	2.73
	25	0.39	11.39	4.14	15.10	402.65	3.01
	30	0.49	12.19	4.46	16.28	448.74	3.32
	40	0.64	13.73	5.22	19.12	539.49	3.91
	50	0.80	15.30	5.97	22.76	635.55	4.58
	60	1.02	16.93	6.88	27.58	704.21	5.67
	70	1.29	18.61	8.02	32.92	830.64	6.43
	75	1.47	19.56	8.41	35.73	906.60	6.98
	80	1.65	21.00	9.23	40.31	973.77	7.39
	90	2.42	24.74	11.40	53.07	1163.85	9.81
	95	3.04	27.71	14.38	65.28	1356.76	13.21
	99,5	6.96	45.63	20.47	109.86	1971.72	24.37
100	12.80	52.64	20.72	138.34	2055.97	26.07	

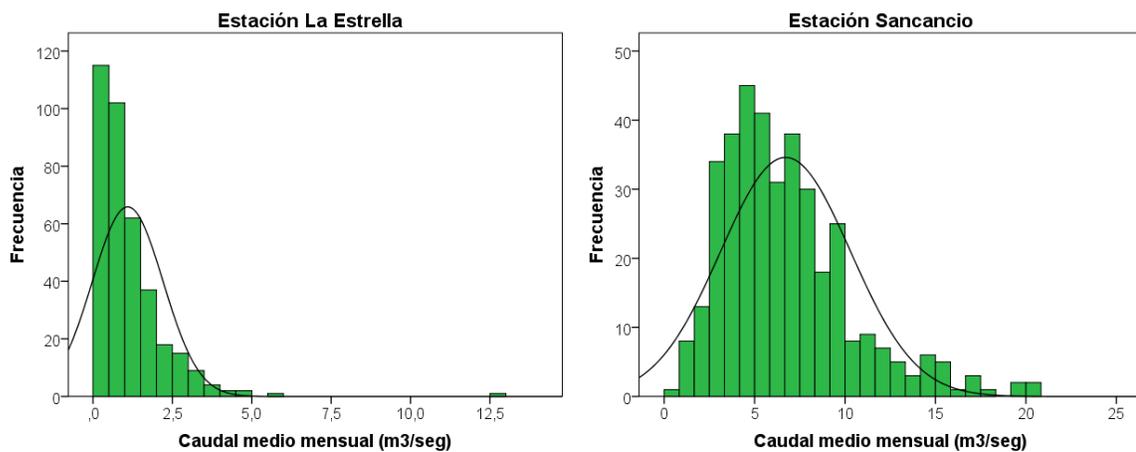
Fuente: Elaboración propia.

Con relación a los coeficientes de forma, todas las estaciones evaluadas presentaron valores de asimetría mayores a 0, esto indicó que existe una mayor concentración de los datos al lado derecho de la media, es decir, una mayor predisposición de los datos a valores extremos máximos. El mayor valor de este coeficiente fue evidente en La Estrella, con un resultado de 4.05. Por otro lado, la curtosis también mostró resultados superiores a 0, que indicaron que, aunque los valores extremos suelen ser pocos, la influencia que tienen en el comportamiento de la serie es muy alta, haciendo sensible su distribución.

Los valores medios de caudal mensual para las estaciones evaluadas demostraron que los puntos evaluados transportan un volumen por unidad de área muy diferente en cada caso, y por tanto realizar un análisis con las mismas escalas numéricas puede dar lugar a resultados poco representativos.

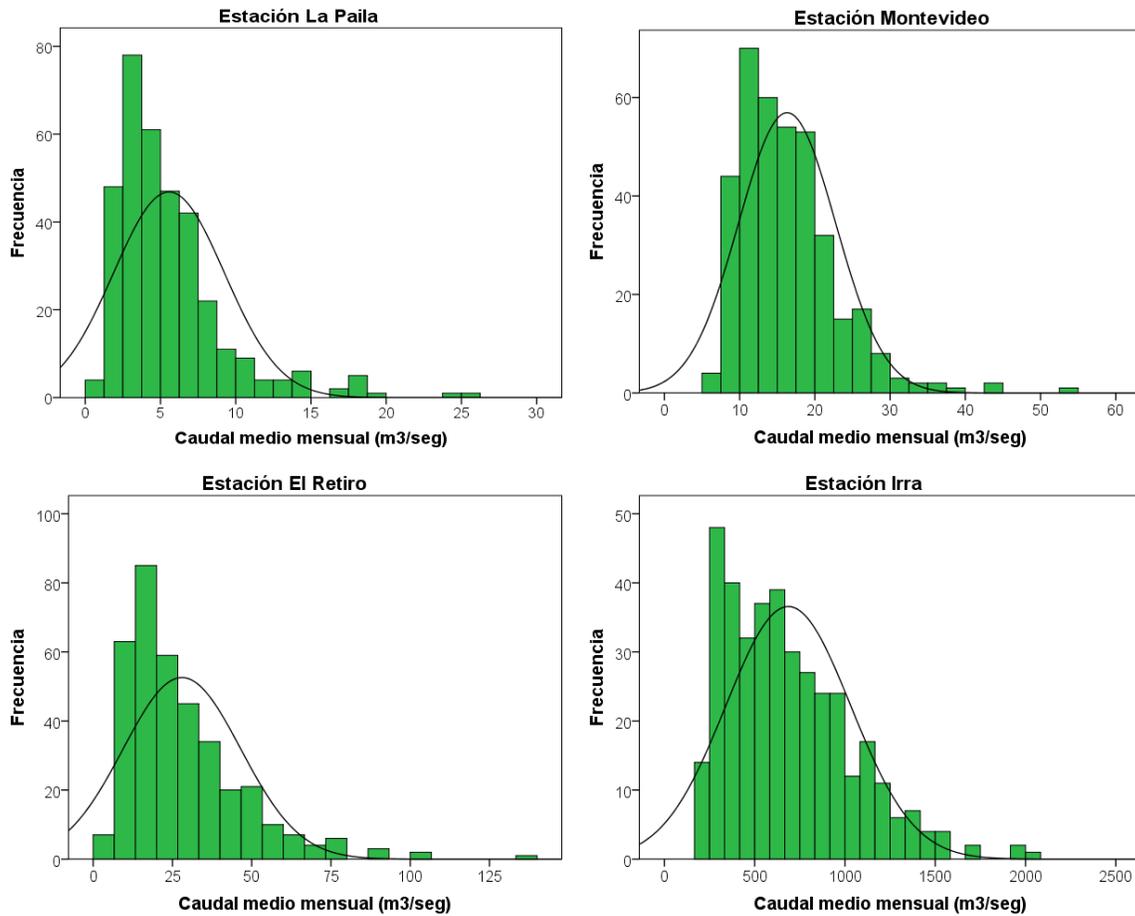
Por último, se realizó una exploración gráfica, con el objetivo de identificar visualmente el comportamiento de los datos. Para esto, fue indispensable la realización de diferentes tipos de gráficos que permitieran obtener conclusiones y sacar la información más relevante sobre la variación de la información temporal.

La Figura 5-4 resume los resultados obtenidos para las 6 estaciones de caudal seleccionadas para el estudio. En cada una de ellas se pudo observar un comportamiento sesgado de los datos de caudal, con tendencia a la concentración de valores en el lado izquierdo del gráfico, indicando que existe una mayor frecuencia de ocurrencia de caudales por debajo del valor promedio.



**Figura 5-4:** Análisis exploratorio gráfico: Histogramas de frecuencias para los caudales en la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia.

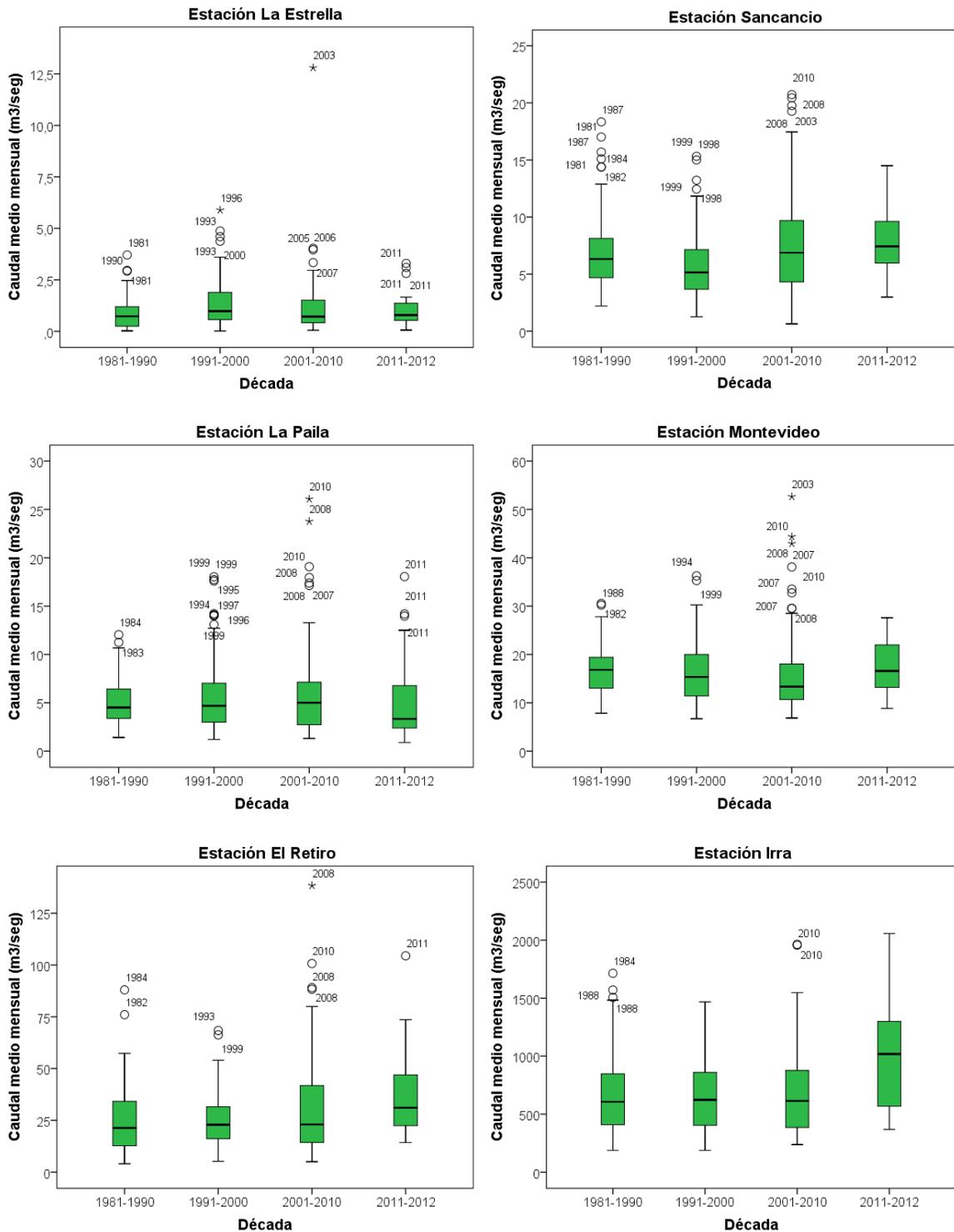


**Figura 6-4:** (Continuación)

La Figura 5-5 muestra los resultados de los gráficos de cajas para las estaciones de caudal en la cuenca del río Chinchiná. El análisis se realizó de manera que se pudieran verificar las variaciones que se han presentado en el caudal a través de las décadas comprendidas en el registro histórico seleccionado para el estudio. Se pudo identificar que los valores de caudal han sido fuertemente afectados por valores extremos a lo largo del tiempo, pues los “bigotes” de las cajas presentaron una mayor longitud en el lado superior, correspondiente a valores medios de caudal más altos, que en el lado inferior.

Se destacó la década del 2001-2010 por la existencia de numerosos valores atípicos en todas las estaciones, resaltando los años 2007, 2008, y 2010 donde la ocurrencia del Fenómeno de La Niña golpeó severamente el territorio colombiano e influyó notoriamente en la dinámica de los caudales en las fuentes hídricas del país.

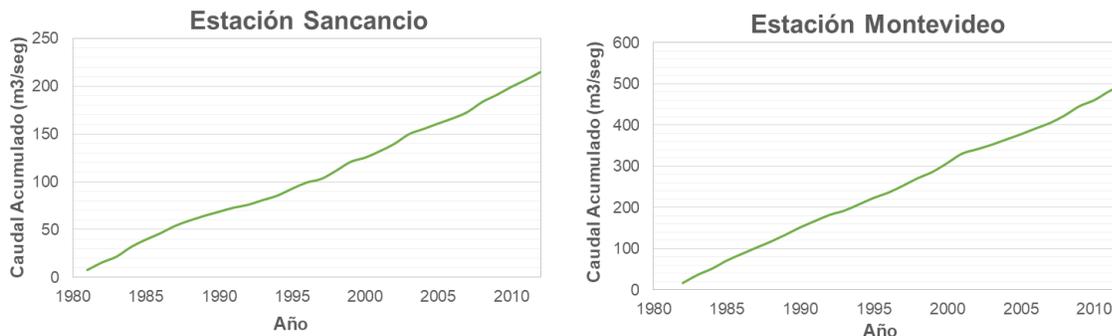
Adicionalmente, es importante recalcar que los diagramas de cajas permitieron visualizar la tendencia al incremento en los valores medios de caudal en las últimas décadas, sobre todo en las estaciones Sancancio, Montevideo, El Retiro e Irra.



**Figura 5-5:** Análisis exploratorio gráfico: Gráficos de cajas para los caudales en la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se realizaron las curvas de masa simple para las estaciones de caudal seleccionadas para el estudio. La Figura 5-6 permite evidenciar los resultados obtenidos para los caudales medios anuales; se pudo observar que la mayoría de las estaciones exhiben un comportamiento menos constante en comparación al obtenido con los resultados para la lluvia; sin embargo, en estaciones como Sancancio y Montevideo se pudo apreciar una “única pendiente” que representa la inexistencia de fuertes variaciones temporales.



**Figura 5-6:** Análisis exploratorio gráfico: Curvas de masa simple para los caudales en la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.1.4 Análisis de homogeneidad del caudal

El análisis de homogeneidad se realizó para las series mensuales de caudal promedio. Se aplicaron diferentes metodologías para verificar si las series conservaron sus propiedades estadísticas con el tiempo o si por el contrario existen tendencias en la media de la serie histórica de información (Hipel & McLeod, 1994; Dekking et al., 2005). Para ello se empleó el método de Mann-Kendall cuya hipótesis nula es que no existe tendencia ( $H_0 = \text{No hay tendencia}$ ); para su análisis se asumió un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  (Hipel & McLeod, 1994) y se siguió la misma metodología descrita para el análisis de homogeneidad de la precipitación. Adicionalmente, se empleó la variante estacional con el propósito de eliminar la estacionalidad de los datos y verificar la existencia de tendencias en la información (Hipel & McLeod, 1994).

La Tabla 5-7 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del Test de Mann Kendall y su variante estacional. Se observó que las estaciones La Estrella, Montevideo, Sancancio y La Paila aceptaron la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5% tanto en el test de Mann Kendall, como en Mann Kendall estacional, por lo tanto, la información histórica

no presenta tendencia, mientras que El Retiro, localizada en zona de desembocadura del río Chinchiná, e Irra sobre el río Cauca, rechazaron la hipótesis nula y por tanto permitieron evidenciar que a lo largo del tiempo se han presentado cambios significativos en la media de sus caudales.

**Tabla 5-7:** Resultados de la aplicación del Test de Mann Kendall a los datos de caudal.

Estación	Test de Mann-Kendall			Test de Mann-Kendall estacional		
	Estadístico Z	Estadístico U	Ho: No hay tendencia	Estadístico Z	Estadístico U	Ho: No hay tendencia
La Estrella	1.704	1.960	Acepta Ho	1.759	1.960	Acepta Ho
Montevideo	-0.838	1.960	Acepta Ho	-0.364	1.960	Acepta Ho
Sancancio	1.332	1.960	Acepta Ho	1.436	1.960	Acepta Ho
Retiro	4.193	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	4.353	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Irra	2.999	1.960	<b>Rechaza Ho</b>	4.043	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Paila	0.367	1.960	Acepta Ho	-0.169	1.960	Acepta Ho

Fuente: Elaboración propia.

Para la detección de punto de cambio en la media de la precipitación se empleó la prueba de signo. A partir de las series de datos de caudal se obtuvieron dos subconjuntos de igual tamaño y se partió de la hipótesis nula Ho: Las medias de ambos subconjuntos son iguales (Botero, 2015).

La Tabla 5-8 resume los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de signo para detección de puntos de cambio en las series de caudales medios mensuales. Las estaciones El Retiro e Irra rechazaron la hipótesis nula; esto permitió concluir que las medias de los 2 subconjuntos de datos seleccionados para cada estación tuvieron valores medios diferentes y por tanto existe un punto de cambio en la media a lo largo del registro histórico evaluado (1981-2012).

**Tabla 5-8:** Resultados de la aplicación de la prueba de signo a los datos de caudal.

Estación	Prueba de Signo		
	Estadístico $U_c$	Estadístico U	Ho: Las medias de ambos subconjuntos son iguales
Estrella	-0.590	1.960	Se acepta
Montevideo	-0.442	1.960	Se acepta
Sancancio	1.389	1.960	Se acepta
Retiro	2.694	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Irra	2.862	1.960	<b>Rechaza Ho</b>
Paila	0.228	1.960	Se acepta

Fuente: Elaboración propia.

Por último, siguiendo la misma metodología descrita para el análisis de la precipitación, se empleó el método de Pettitt para la detección de cambios en la media y en la varianza (Pettitt, 1979; Botero, 2015).

**Tabla 5-9:** Resultados de la aplicación de la prueba de Pettitt a los datos de caudal.

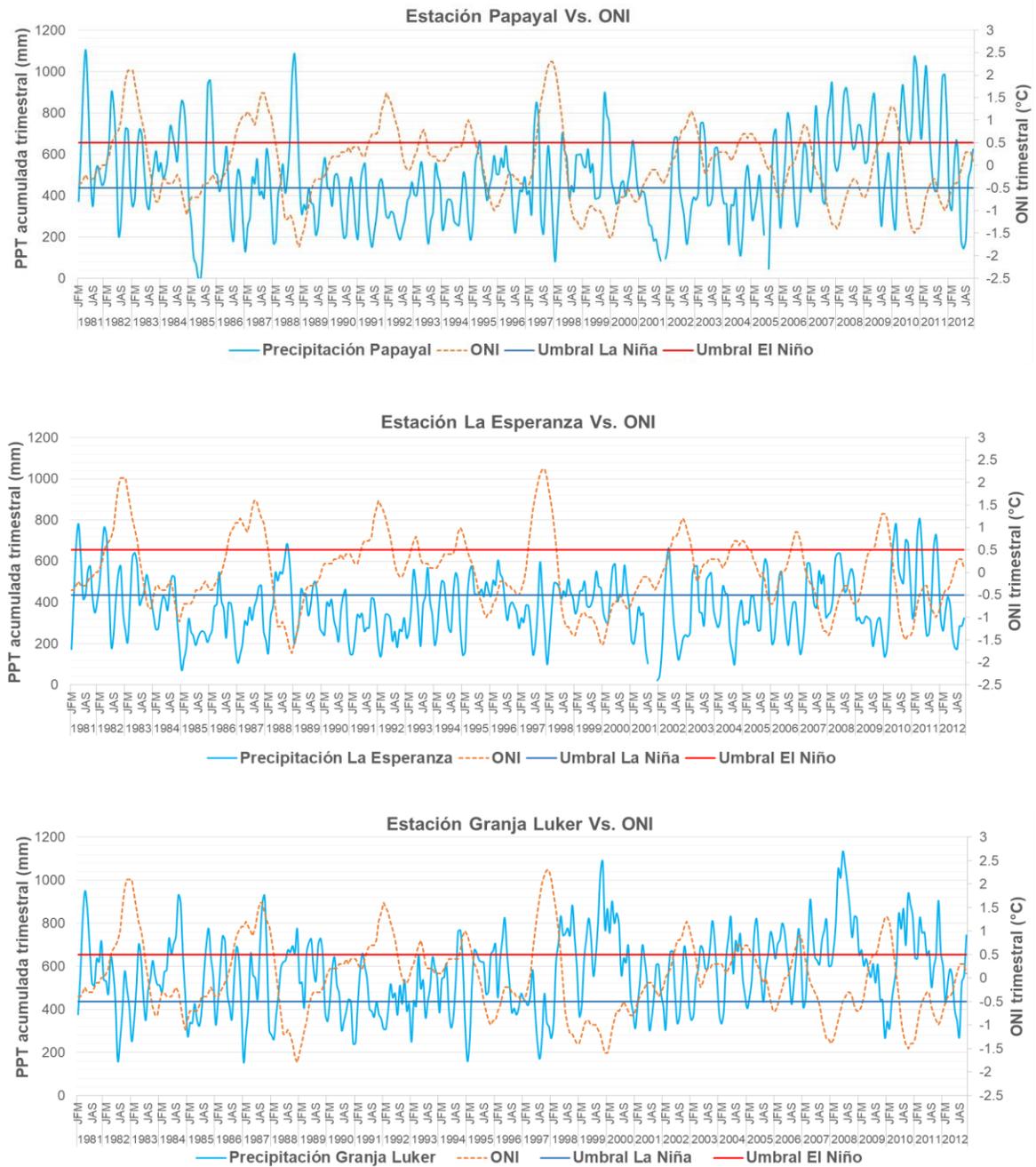
Estación	Prueba de Pettitt		
	P_value (Pk)	Nivel de significancia (K)	Ho: No hay cambio en la media
Estrella	0.003	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Montevideo	0.043	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Sancancio	0.002	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Retiro	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Irra	0.000	0.050	<b>Rechaza Ho</b>
Paila	0.073	0.050	Acepta Ho

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-9 consolida los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de Pettitt a las 6 estaciones de caudal localizadas en la cuenca del río Chinchiná seleccionadas para el estudio. Los resultados permitieron concluir que gran parte de las estaciones evaluadas rechazaron la hipótesis nula inicial, que asume que no existen cambios en los valores medios de las series de caudal utilizadas. La única estación que aceptó la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5% fue La Paila, por lo tanto, se asume que sus registros históricos no presentaron cambios en la media.

## 5.2 Análisis trimestral: Correlaciones de la precipitación con el Índice Oceánico de El Niño – ONI

Los resultados del análisis trimestral del comportamiento de la lluvia en la cuenca del río Chinchiná y el establecimiento de correlaciones con la ocurrencia de los episodios cálidos y fríos del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO, se presentan en la Figura 5-7. Visualmente se aprecian relaciones de inversa proporcionalidad, pues cuando el índice supera el umbral de  $0.5^{\circ}\text{C}$  (El Niño), la precipitación se reduce, mientras que cuando el índice disminuye su valor por debajo del umbral de  $-0.5^{\circ}\text{C}$  (La Niña), los episodios de lluvia se hacen más extremos. Se realizó el análisis de correlaciones numéricas mediante el cálculo de coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, para validar los resultados gráficos.



**Figura 5-7:** Análisis trimestral gráfico del comportamiento de la precipitación en la cuenca del río Chinchiná y su correlación con el ONI.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-10 muestra los resultados numéricos obtenidos al aplicar los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para verificar la relación existente entre la precipitación trimestral y el Índice Oceánico de El Niño en la cuenca del río Chinchiná. Se pudo evidenciar que cuando la variable se rezaga un mes, la correlación de Pearson mostró

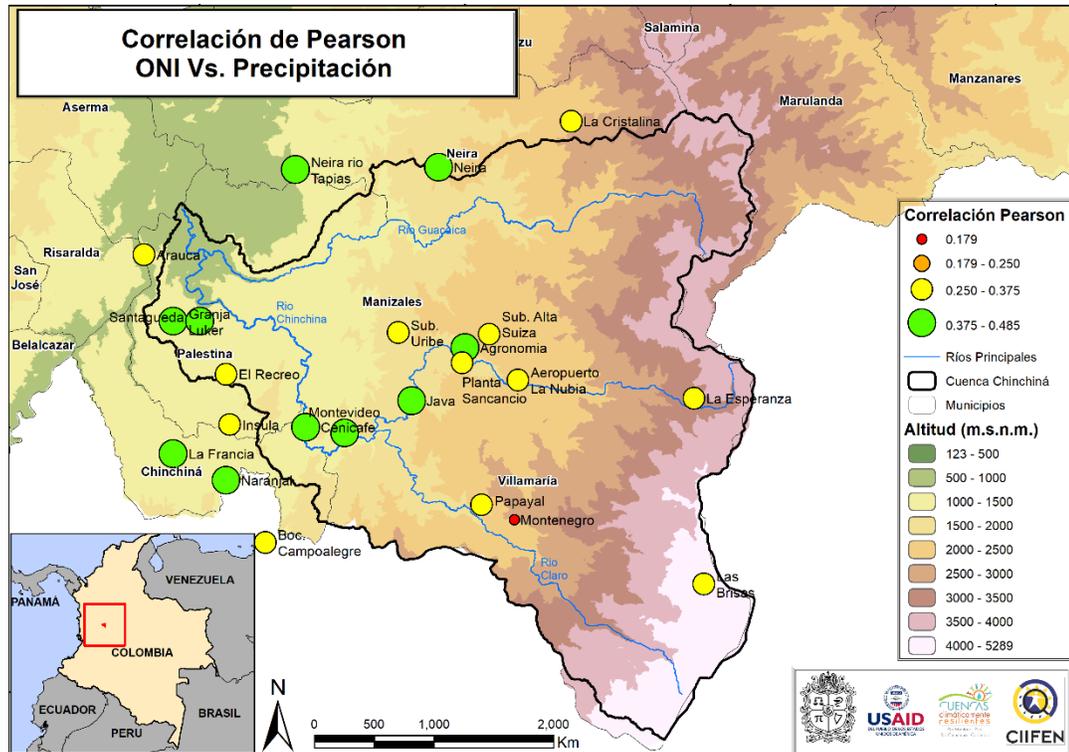
mejores resultados en 7 de las 23 estaciones evaluadas. Es importante recalcar que, para la prueba realizada sin rezagar los datos, el modelo de Pearson también mostró mejor ajuste, pero sólo en 6 puntos localizados en el área de influencia de la cuenca. Aunque la diferencia es poca se decidió que, para la variable desplazada un mes, la variación del coeficiente de Pearson era notoria únicamente en el segundo decimal respecto al análisis sin desplazamiento. Los valores resaltados hacen referencia a los puntos donde la evaluación de los coeficientes mostró el mayor valor, teniendo en cuenta que el signo negativo es sólo indicativo de la existencia de una relación inversa entre la precipitación trimestral y el ONI.

**Tabla 5-10:** Coeficientes de correlación: Precipitación trimestral Vs. ONI

Estación	Correlaciones sin rezago		Correlaciones para 1 mes de rezago		Correlaciones para 2 meses de rezago		Correlaciones para 3 meses de rezago	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
Las Brisas	-0.283	-0.314	-0.302	<b>-0.325</b>	-0.307	-0.316	-0.302	-0.300
La Esperanza	-0.283	-0.310	-0.305	-0.334	-0.318	<b>-0.348</b>	-0.317	-0.347
Montenegro	-0.182	<b>-0.278</b>	-0.179	-0.266	-0.184	-0.253	-0.189	-0.237
La Cristalina	<b>-0.322</b>	-0.310	-0.321	-0.303	-0.308	-0.286	-0.283	-0.262
Papayal	-0.313	-0.326	-0.319	<b>-0.330</b>	-0.311	-0.323	-0.288	-0.307
Agronomía	<b>-0.418</b>	-0.414	-0.416	-0.410	-0.400	-0.389	-0.367	-0.352
Aerop. La Nubia	-0.347	-0.335	-0.372	-0.355	<b>-0.376</b>	-0.358	-0.361	-0.345
Sub. Alta Suiza	-0.339	<b>-0.348</b>	-0.334	-0.337	-0.319	-0.315	-0.292	-0.280
Sub. Uribe	<b>-0.371</b>	-0.348	-0.359	-0.340	-0.331	-0.319	-0.294	-0.291
Neira río Tapias	-0.446	-0.434	<b>-0.447</b>	-0.429	-0.433	-0.412	-0.405	-0.384
Neira	-0.484	-0.471	<b>-0.485</b>	-0.466	-0.462	-0.440	-0.418	-0.396
Planta Sancancio	<b>-0.331</b>	-0.322	-0.324	-0.315	-0.311	-0.300	-0.292	-0.276
Java	-0.416	-0.397	<b>-0.430</b>	-0.407	-0.421	-0.394	-0.391	-0.360
Boc. Campoalegre	-0.333	<b>-0.362</b>	-0.322	-0.356	-0.310	-0.341	-0.299	-0.326
El Recreo	-0.351	<b>-0.399</b>	-0.355	-0.398	-0.356	-0.391	-0.349	-0.376
Naranjal	-0.446	-0.433	<b>-0.447</b>	-0.431	-0.431	-0.413	-0.402	-0.387
Montevideo	<b>-0.425</b>	-0.423	-0.420	-0.410	-0.394	-0.376	-0.349	-0.328
La Francia	<b>-0.395</b>	-0.364	-0.377	-0.341	-0.348	-0.312	-0.315	-0.291
Cenicafé	-0.456	-0.456	-0.470	<b>-0.472</b>	-0.465	-0.467	-0.442	-0.443
ínsula	-0.293	-0.284	<b>-0.307</b>	-0.301	-0.307	-0.299	-0.292	-0.287
Granja Luker	-0.448	-0.437	<b>-0.458</b>	-0.441	-0.453	-0.433	-0.434	-0.415
Santágueda	-0.423	-0.395	<b>-0.432</b>	-0.398	-0.428	-0.389	-0.409	-0.373
Arauca	-0.239	-0.272	-0.261	-0.290	-0.268	<b>-0.294</b>	-0.261	-0.287

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-8 muestra los resultados del cálculo de la correlación de Pearson entre la precipitación trimestral y el índice oceánico de El Niño en la cuenca del río Chinchiná para un mes de rezago de la lluvia. Se evidenció la existencia de una relación con la localización de las estaciones; gran parte de las correlaciones más altas están localizadas en la zona Centro y Noroeste, particularmente en la cuenca media y baja con altitudes que inferiores a los 2000 m.s.n.m.



**Figura 5-8:** Correlación de Pearson: Precipitación Trimestral en la cuenca del río Chinchiná Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI).  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 Evaluación de eventos extremos de precipitación

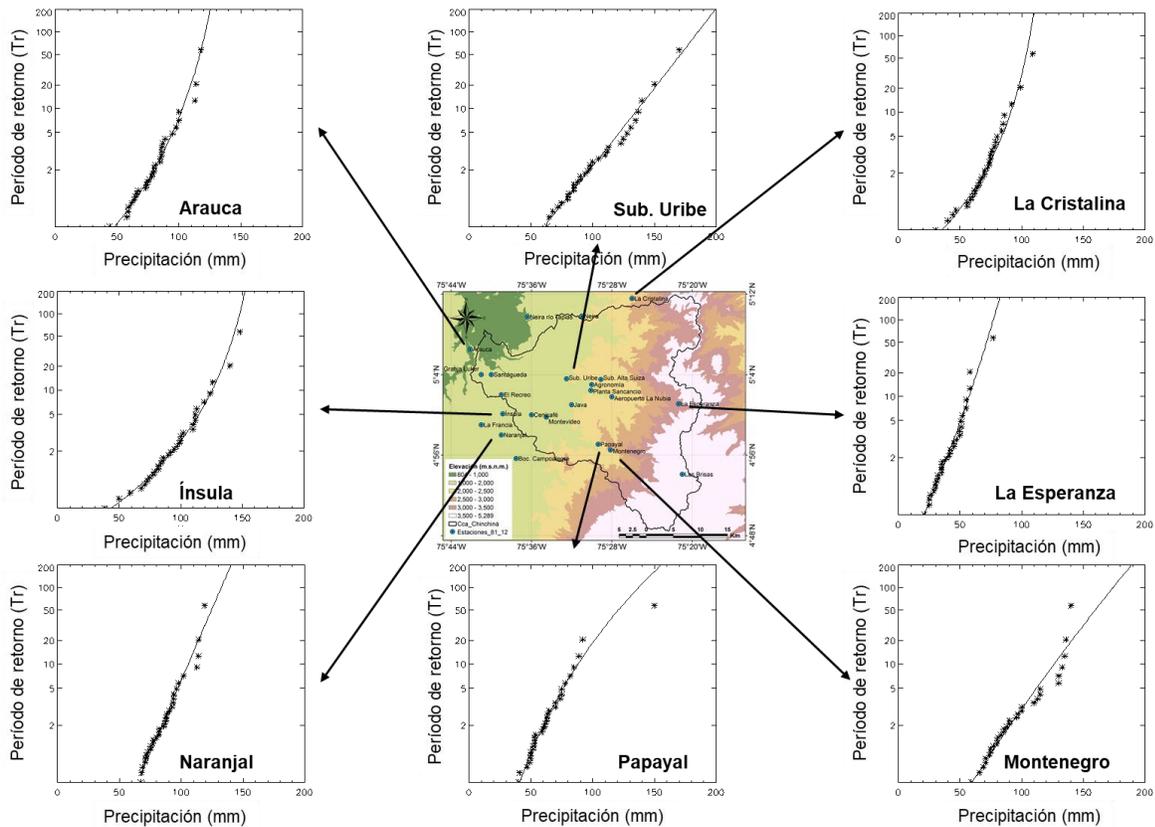
El análisis de los eventos extremos de precipitación se realizó teniendo en cuenta la función de distribución de probabilidad que mejor se ajustó a los máximos diarios de lluvia, la evaluación de índices climáticos que fueron claves a la hora de determinar tendencias o patrones en el comportamiento de la precipitación en la cuenca y la forma como el ciclo diario representó temporalmente las variaciones sustanciales que se observan a lo largo de las horas del día.

#### 5.3.1 Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo

Tomando como base el período histórico 1981-2012, los resultados obtenidos para el ajuste de curvas de distribución de probabilidad en la cuenca del río Chinchiná empleando el software AFINS 2.0, permitieron identificar que la función de distribución Generalized Extreme Value (GEV) mostró los mejores resultados teniendo en cuenta el criterio de máxima verosimilitud o probabilidad conjunta y el análisis gráfico. La Figura 5-9 muestra los resultados obtenidos para ocho (8) de las veintitrés (23) estaciones empleadas para el

estudio. Se observó gráficamente que la función de distribución GEV otorgó resultados coherentes y representó de una buena manera el comportamiento de las lluvias máximas para los diferentes períodos de retorno establecidos. Es importante recalcar la importancia de que la función seleccionada incorpore lo mejor posible las lluvias extremas para períodos de retorno elevados.

La Tabla 5-11 resume los resultados de las tormentas para diferentes períodos de retorno según la función de distribución GEV.



**Figura 5-9:** Curvas de distribución de probabilidad obtenidas con la función Generalized Extreme Value GEV para la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de obtener una representación espacial de las precipitaciones máximas para los diferentes períodos de retorno evaluados según la función de distribución de probabilidad GEV, se utilizó el método de interpolación del Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW). Es importante recalcar que, aunque la función Generalized Extreme Value fue la que mejor se ajustó a las lluvias extremas en la cuenca del río Chinchiná, en

la estación Agronomía, el mejor ajuste se obtuvo con la función LogGumbel, mientras que en Las Brisas y Subestación Alta Suiza la función Two Components Extreme Value (TCEV) fue la más adecuada. Por tal motivo, es necesario que, aunque los mapas de lluvias extremas se hayan evaluado de forma general mediante la función GEV, en caso de requerir puntos particulares cercanos a las 3 estaciones que presentan resultados diferentes a la cuenca, se tengan en cuenta sus funciones de probabilidad particulares.

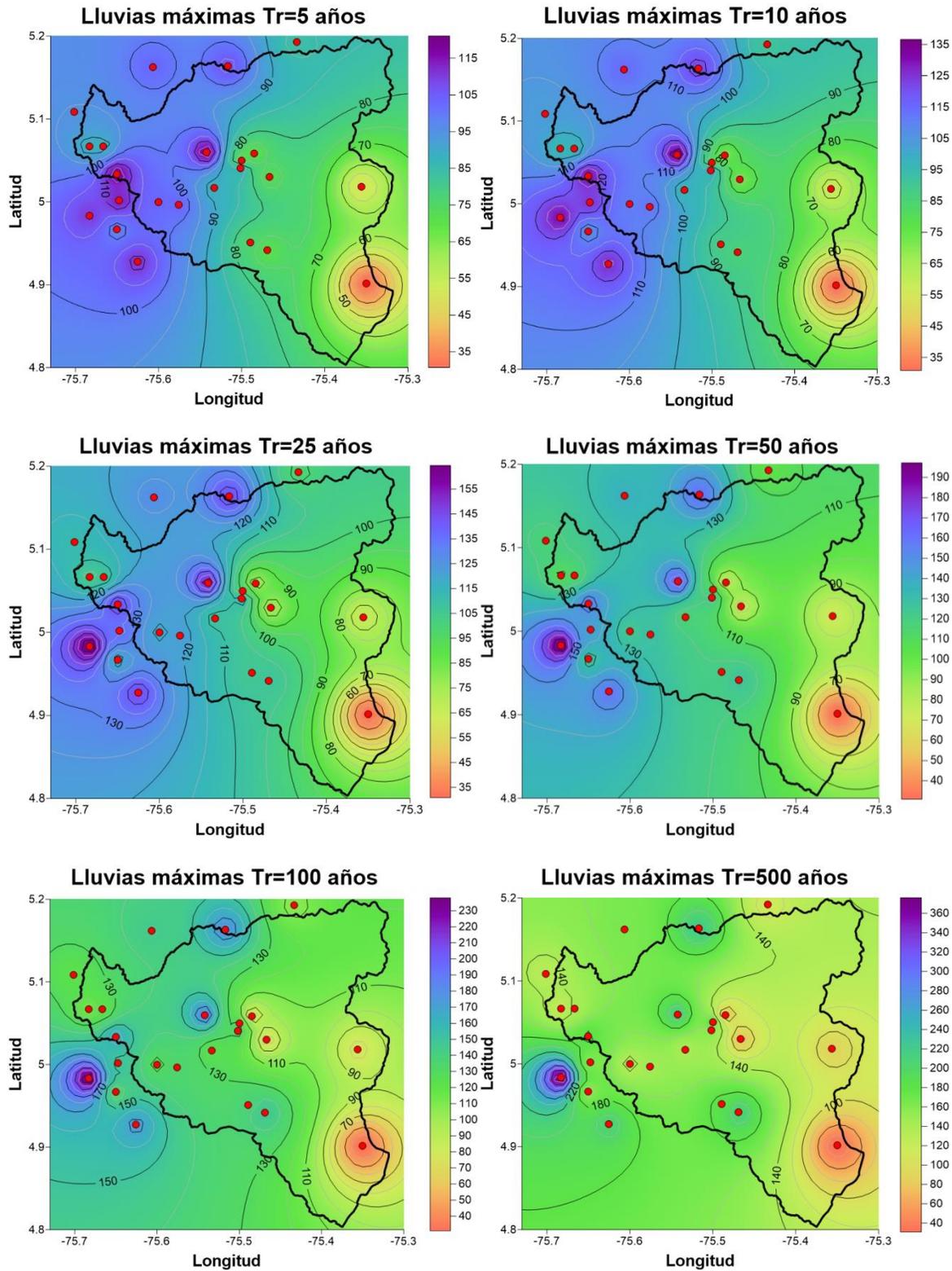
La Figura 5-10 resume los resultados de lluvias máximas obtenidos con el método de interpolación IDW para los períodos de retorno (Tr) de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Se observó mayor intensificación en la zona noroccidental de la cuenca particularmente en los municipios de Chinchiná y Palestina.

**Tabla 5-11:** Lluvias máximas para diferentes períodos de retorno (Tr) según la función de distribución de probabilidad GEV.

Estación	Elevación (m.s.n.m.)	Resultados para la función de distribución de probabilidad "GEV". Lluvias máximas (mm).					
		Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
Las Brisas*	4150	30.6	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8
La Esperanza	3280	50.4	57.3	65.6	71.4	77.0	89.0
Montenegro	2292	70.8	85.5	107.6	127.0	149.3	215.0
La Cristalina	2290	84.0	91.4	98.8	103.1	106.7	112.7
Papayal	2220	76.2	88.3	105.9	120.7	137.2	182.9
Agronomía*	2088	71.4	71.6	71.6	71.6	71.6	71.6
Aerop. La Nubia	2058	68.4	80.4	98.3	114.1	132.3	185.8
Sub. Alta Suiza*	2055	69.8	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
Sub. Uribe	1905	121.5	137.1	156.7	171.0	185.2	217.7
Neira río Tapias	1902	103.2	114.3	127.4	136.6	145.2	163.7
Neira	1860	106.4	122.6	144.1	160.8	178.1	220.8
Planta Sancancio	1850	91.0	102.6	116.2	125.7	134.5	153.1
Java	1778	88.1	96.9	107.7	115.5	123.0	139.7
Boc. Campoalegre	1470	111.9	126.4	145.2	159.6	174.2	209.3
El Recreo	1430	119.8	133.0	147.8	157.5	166.3	183.3
Naranjal	1381	97.3	105.7	116.5	124.5	132.5	151.0
Montevideo	1370	103.3	112.6	122.6	129.0	134.5	144.7
La Francia	1335	110.6	131.7	167.1	201.4	244.3	390.2
Cenicafé	1310	103.4	110.8	118.2	122.5	126.0	131.7
Ínsula	1225	114.9	125.6	136.4	142.7	147.8	156.5
Granja Luker	1031	87.8	94.7	102.3	107.2	111.5	119.8
Santágueda	1026	87.8	95.7	106.1	113.9	121.9	141.3
Arauca	890	95.0	103.1	111.7	117.0	121.5	129.8

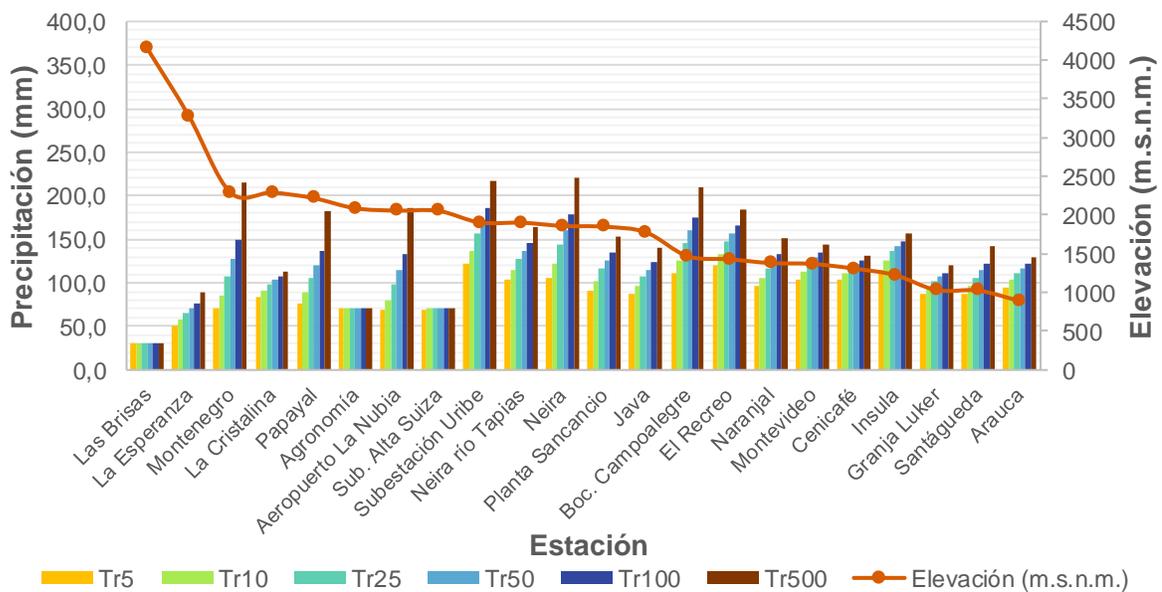
Fuente: Elaboración propia.

\*Estas estaciones, aunque mostraron mejor ajuste con otras funciones de distribución de probabilidad, se emplearon en la interpolación únicamente con fines de obtener una representación espacial aproximada.



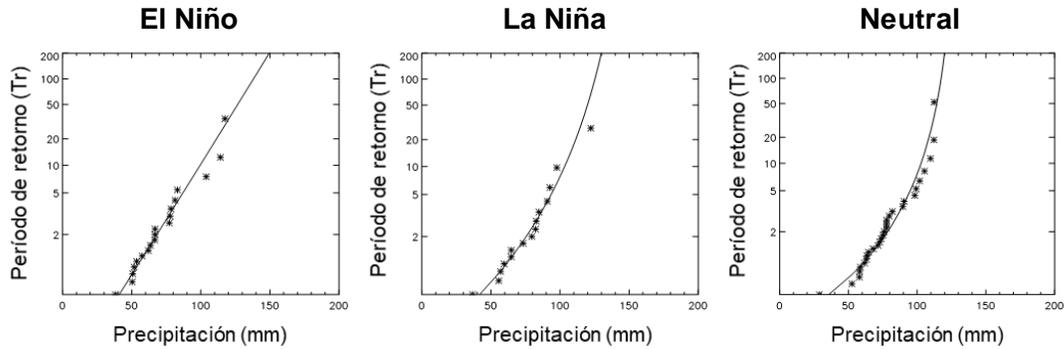
**Figura 5-10:** Interpolación de lluvias máximas (mm/día) según la función de distribución GEV para la cuenca del río Chinchiná.  
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la influencia de patrones locales como la altitud sobre la intensidad de las lluvias extremas, la Figura 5-11 describe el comportamiento de la precipitación en los diferentes períodos de retorno; se evidenció la relación existente con la elevación sobre el nivel del mar de las estaciones analizadas. Se pudo concluir que es notoria una intensificación de los eventos extremos a partir de los 1225 m.s.n.m. en donde se encuentra la estación Ínsula, hasta los 1905 m.s.n.m. donde se localiza la estación Subestación Uribe; esta región se considera el óptimo pluviométrico de la cuenca del río Chinchiná.



**Figura 5-11:** Lluvias máximas para diferentes períodos de retorno según la función de distribución de probabilidad GEV y su relación con la altitud.  
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para la estación Cenicafé, por ser una de las series que posee registros históricos sin faltantes, se realizó un análisis de curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica: El Niño, La Niña y Neutral para el período 1981-2012. Se separaron las series según la anomalía de la temperatura superficial del mar presentada por el Índice Oceánico de El Niño – ONI. Los resultados gráficos contenidos en la Figura 5-12 permitieron identificar que la función de probabilidad Generalized Extreme Value ofreció una buena representación del comportamiento de las lluvias máximas durante las fases del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO en la estación Cenicafé localizada en el municipio de Chinchiná – Caldas, según el Centro Nacional de Investigaciones de Café.



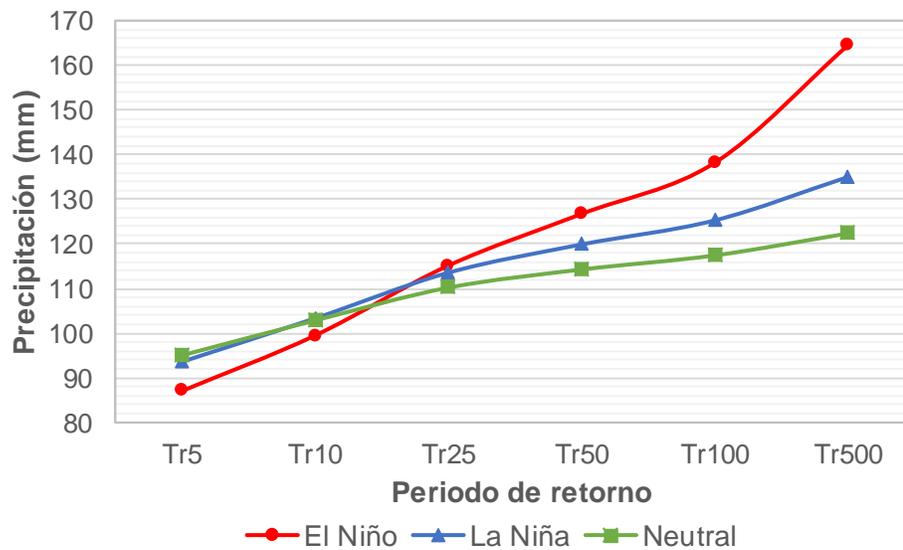
**Figura 5-12:** Curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica según la función GEV para la estación Cenicafé.  
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-12 muestra los resultados consolidados del análisis de lluvias máximas por condición hidrológica para la estación Cenicafé.

**Tabla 5-12:** Análisis de lluvias máximas por condición hidrológica para la estación Cenicafé.

Condición hidrológica	Lluvias máximas (mm) para la estación Cenicafé según la función de distribución de probabilidad "GEV"					
	Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
El Niño	87.0	99.5	115.1	126.7	138.2	164.5
La Niña	93.6	103.3	113.5	119.9	125.3	135.0
Neutral	95.0	102.8	110.2	114.3	117.4	122.3

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-13:** Comparación del comportamiento de las lluvias máximas según condición hidrológica para diferentes períodos de retorno en la estación Cenicafé  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-13 representa gráficamente el comportamiento de las lluvias máximas en el tiempo. Se observó que, para períodos de retorno elevados, los extremos de lluvia tienden a ser de mayor intensidad durante la fase cálida del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (El Niño) que, durante La Niña, mientras que para bajos períodos de retorno, durante La Niña y bajo condiciones neutrales, los extremos de lluvia son mayores.

Esto permitió concluir que, durante los episodios cálidos y fríos del fenómeno ENSO no se obtuvieron relaciones directas que afectaran los valores extremos y tuvieran un comportamiento característico de cada fenómeno: mayores precipitaciones durante La Niña y menores durante El Niño, sino que pueden existir otros fenómenos macroclimáticos que influyen en la dinámica de los extremos de la lluvia en la cuenca.

Por último, con el fin de identificar variaciones en la función de distribución de probabilidad a través de períodos de 3 décadas, se utilizó el registro histórico completo disponible para la estación Cenicafé (1942-2015), el cual permitió establecer 6 períodos tridecadales para el análisis: 1942-1970, 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2015. La Tabla 5-13 consolida los resultados obtenidos del análisis.

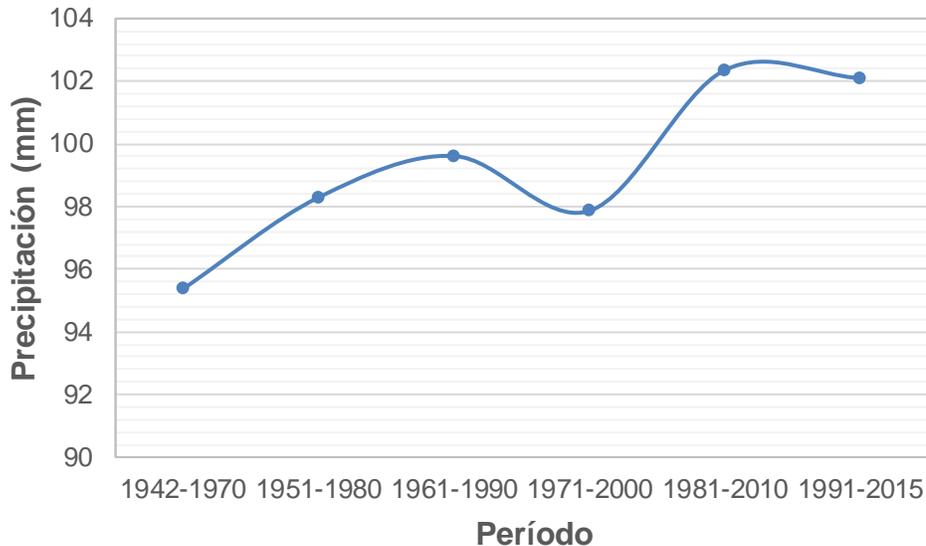
Se pudo concluir que, durante la década 1942-1970 la función de distribución que mejor representó los eventos extremos de precipitación fue la Gumbel, mientras que, en las décadas restantes, la Generalized Extreme Value fue la más adecuada.

**Tabla 5-13:** Análisis de lluvias máximas por períodos tridecadales para la estación Cenicafé.

Período	Función de distribución de probabilidad de valor extremo	Lluvias máximas (mm) para diferentes períodos de retorno (Tr)					
		Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
1942-1970	Gumbel	95.3734	107.005	121.702	132.605	143.427	168.437
1951-1980	GEV	98.2905	114.086	138.057	159.278	183.767	256.613
1961-1990	GEV	99.6132	118.111	148.061	176.265	210.582	322.362
1971-2000	GEV	97.8613	107.192	117.742	124.764	131.122	143.769
1981-2010	GEV	102.352	110.206	118.26	123.128	127.193	134.294
1991-2015	GEV	102.096	110.026	118.562	123.974	128.679	137.442

Fuente: Elaboración propia.

Tomando el período de retorno de 5 años, la Figura 5-14 evidencia intensificación de los eventos extremos de precipitación en la estación Cenicafé cuando se analizan separadamente períodos de 30 años de registros continuos de la estación.



**Figura 5-14:** Comparación de las lluvias máximas para el período de retorno de 5 años para la estación Cenicafé.  
Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 Tendencias en la precipitación mediante el análisis de índices climáticos

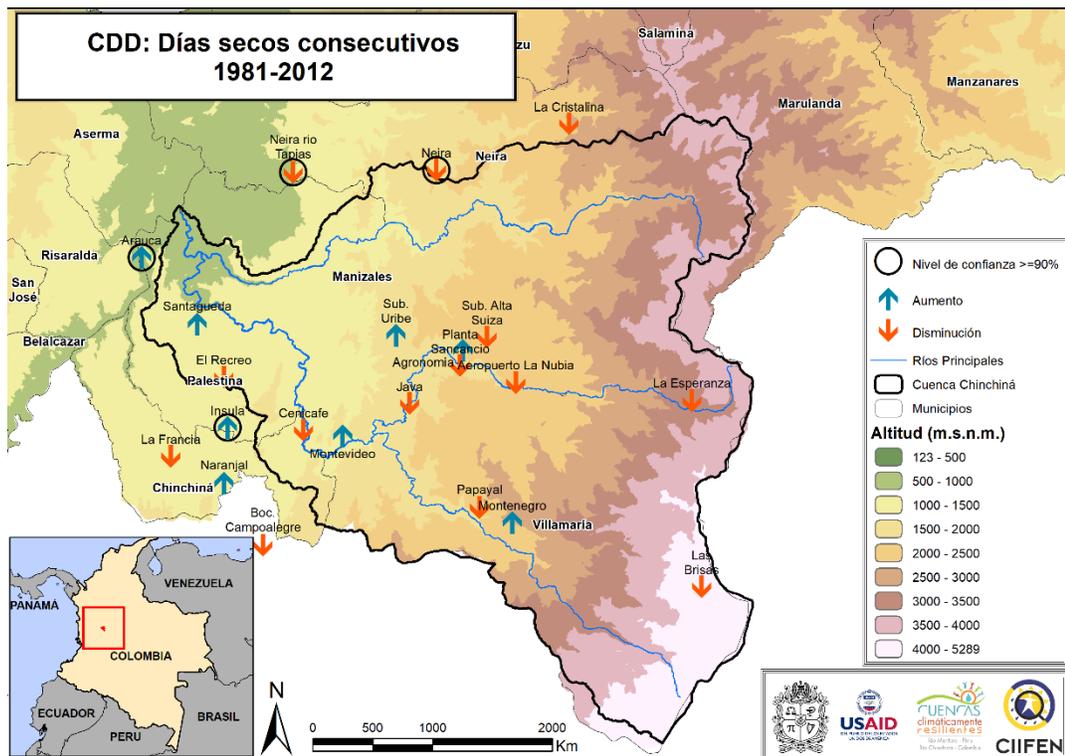
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los 11 índices de extremos climáticos relacionados con precipitación calculados con el software Rclimdex (ver Tabla 4-4). Se analizaron tendencias, positivas y negativas, a partir de la significancia estadística obtenida en cada caso y fueron esquematizadas con el fin de lograr una mayor comprensión de la distribución espacial del comportamiento de los índices en la cuenca del río Chinchiná.

#### ▪ Días Secos Consecutivos (CDD)

Los resultados obtenidos para el índice relacionado con los días secos consecutivos (CDD) permitieron identificar que, de las veintitrés (23) estaciones analizadas, ocho (8) mostraron tendencias positivas, de las cuales sólo Arauca e Ínsula localizadas en la zona noroccidental de la cuenca presentaron significancia estadística con un nivel de confianza del 90% de los datos. En cuanto a las tendencias negativas, catorce (14) estaciones distribuidas en la cuenca presentaron este comportamiento, sin embargo, sólo Neira río Tapias y Neira arrojaron resultados estadísticamente significativos (Figura 5-15). La estación Granja Luker, localizada en el municipio de Palestina, no presentó variación alguna para el registro histórico evaluado.

Pese a que la distribución de las tendencias de los días secos consecutivos mostró mayor cantidad de valores decrecientes en la cuenca del río Chinchiná, la magnitud de los resultados fue mucho mayor en las estaciones con tendencias positivas. En general, para la cuenca, el índice CDD presentó una tendencia creciente con un incremento promedio de 0.007 días/año correspondiente a 0.2 días en el período 1981-2012.

Los días secos consecutivos tuvieron un aumento significativo con un nivel de confianza del 90% de los datos en la estación Arauca localizada en la cuenca baja, con un valor medio de 1.138 días/año correspondiente a treinta y cinco (35) días en el período histórico analizado. Este valor fue el más extremo del índice CDD registrado para la cuenca.



**Figura 5-15:** Tendencia de los días secos consecutivos para la cuenca del río Chinchiná.

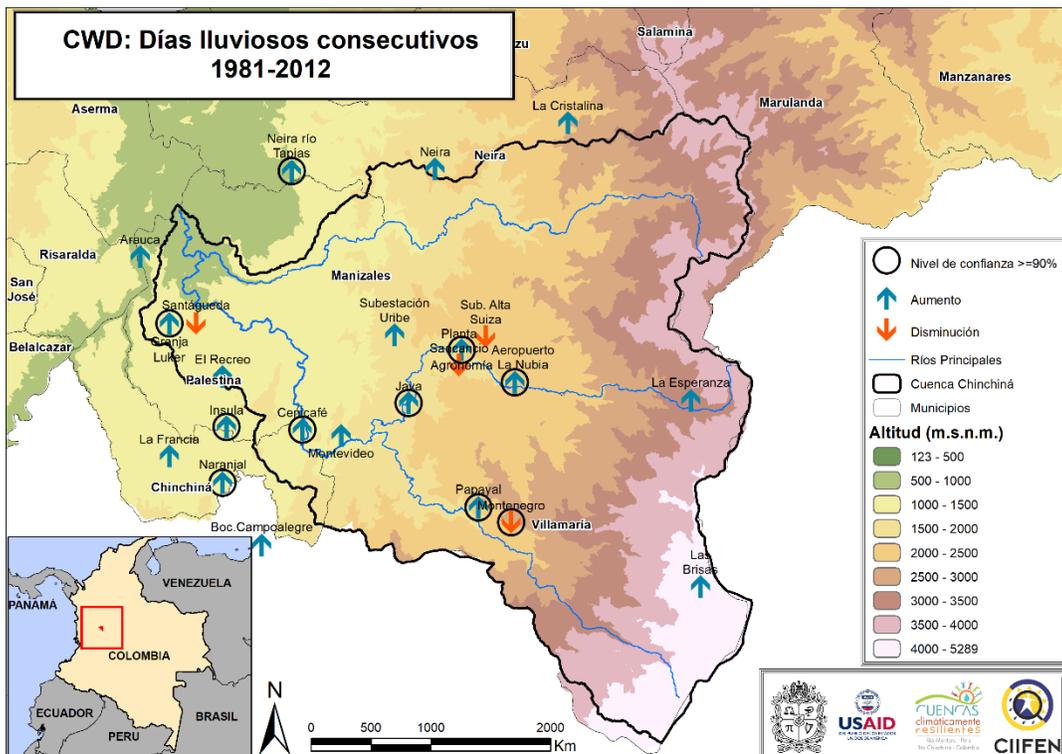
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

## ▪ Días Húmedos Consecutivos (CWD)

En la cuenca del río Chinchiná, el número de días húmedos consecutivos (CWD) ha ido en aumento. Diecinueve (19) estaciones analizadas mostraron tendencia al incremento, sin embargo, considerando un nivel de confianza del 90%, nueve (9) estaciones localizadas en su mayoría en la cuenca media presentaron resultados estadísticamente significativos. Adicionalmente, las estaciones Santágueda, Subestación Alta Suiza, Agronomía y Montenegro mostraron tendencias decrecientes (Figura 5-16).

En general se evidenció que, en la cuenca, el número de días húmedos consecutivos ha aumentado aproximadamente 0.14 días/año, que para el período evaluado (1981-2012) corresponde a 4.3 días.

El valor más extremo del índice CWD se obtuvo en la estación Papayal localizada en el municipio de Villamaría, la cual mostró un aumento de 0.466 días/año correspondiente a 14.4 días para el registro histórico analizado.



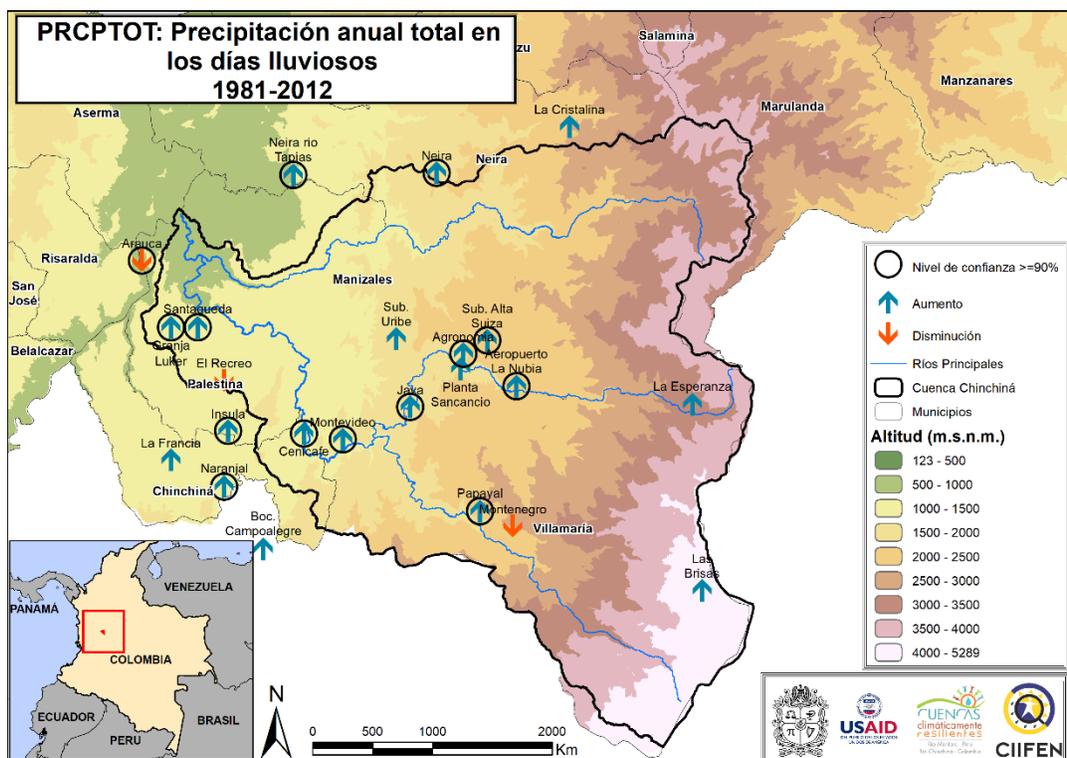
**Figura 5-16:** Tendencia de los días lluviosos consecutivos para la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

▪ **Precipitación total anual en los días lluviosos (PRCPTOT)**

Los resultados obtenidos para la precipitación anual total (PRCPTOT) muestran tendencias en su mayoría crecientes en la cuenca del río Chinchiná, con significancia estadística en 12 de las estaciones evaluadas considerando un nivel de confianza del 90% de los datos (Figura 5-17).

Las estaciones Arauca, El Recreo y Montenegro presentaron tendencias decrecientes, pero sólo se obtuvo significancia estadística en Arauca, localizada en el municipio de Palestina.



**Figura 5-17:** Tendencia de la precipitación anual total en los días lluviosos para la cuenca del río Chinchiná.

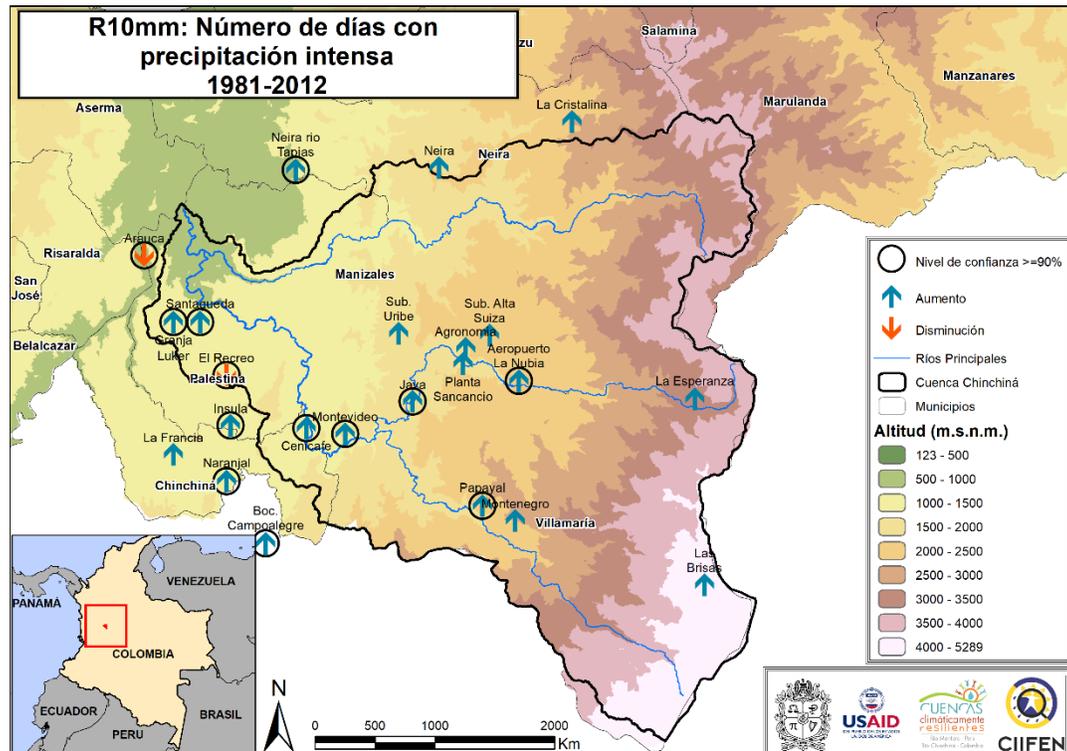
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

En general, para la cuenca, la precipitación anual total ha ido aumentando en promedio 14.37 mm/año, lo que permite concluir que durante el periodo comprendido entre 1981 y 2012, ha habido un incremento significativo de 445.32 mm.

La tendencia del índice PRCPTOT más extrema se obtuvo en la estación Ínsula, localizada en el municipio de Chinchiná con un aumento anual promedio de 38.82 mm correspondientes a 1234.36 mm para el período histórico 1981-2012.

#### ▪ Número de días con precipitación intensa (R10mm)

El índice relacionado con el número de días con precipitación intensa (R10mm) mostró tendencias crecientes en toda la cuenca del río Chinchiná, a excepción de las estaciones Arauca y El Recreo localizadas en el municipio de palestina, las cuales tuvieron significancia estadística considerando un nivel de confianza del 90%. El dominio de tendencias crecientes para este índice es evidente en toda la región, y en su mayoría los resultados son estadísticamente significativos, tal y como se observa en la Figura 5-18.



**Figura 5-18:** Tendencia del número de días con precipitación intensa para la cuenca del río Chinchiná.

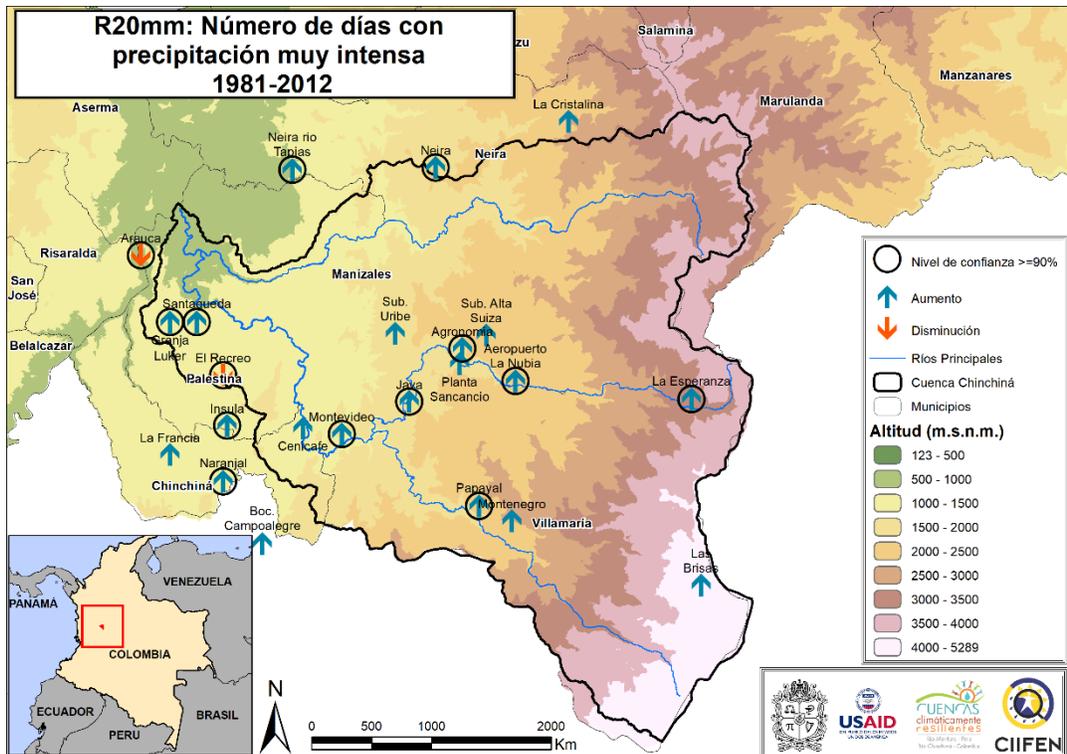
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

En promedio, la cuenca ha tenido un aumento de 0.5 días con precipitación intensa, correspondientes a 14 días durante el período histórico evaluado.

Los valores más extremos se presentaron en la estación Ínsula, donde anualmente ha habido un incremento promedio de 1.8 días con precipitación mayor o igual a 10 mm, correspondientes a 18 días/década.

▪ **Número de días con precipitación muy intensa (R20mm)**

Con relación a los días con precipitación muy intensa, el comportamiento es similar al índice R10mm, donde se evidenciaron tendencias decrecientes en las estaciones Arauca y El Recreo a un nivel de confianza del 90%, y en las estaciones restantes ubicadas en toda la región hidrográfica, las tendencias fueron positivas, con resultados estadísticamente significativos en la mayoría de los casos (Figura 5-19).



**Figura 5-19:** Tendencia del número de días con precipitación muy intensa para la cuenca del río Chinchiná.

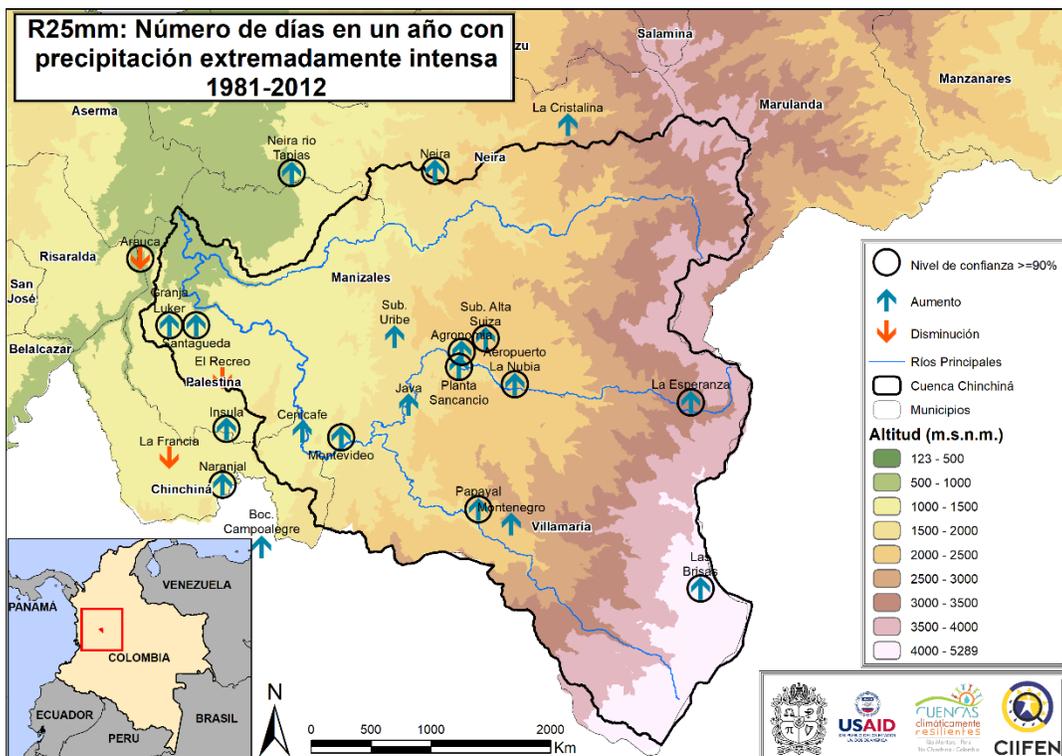
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

En promedio, la cuenca del río Chinchiná ha tenido un incremento anual de 0.3 días con precipitación igual o superior a 20 mm, que se traducen en un aumento para el período 1981-2012 de 8.34 días.

Respecto al aumento más severo, los resultados exhiben mayor vulnerabilidad en la estación Ínsula, donde el índice R20 mm ha crecido a razón de 0.85 días por año, correspondientes a 8.5 días/década.

### ▪ Número de días con precipitación extremadamente intensa (R25mm)

En la cuenca del río Chinchiná, el índice que se refiere al número de días con lluvias extremadamente intensas (R25mm) mostró patrones crecientes en su mayoría, con significancia estadística en gran parte de los resultados obtenidos. Nuevamente, en las estaciones Arauca y El Recreo se evidenciaron contrastes en las tendencias al igual que en la estación La Francia, donde existe comportamiento negativo del índice R25mm (Figura 5-20).



**Figura 5-20:** Tendencia del número de días con precipitación extremadamente intensa para la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

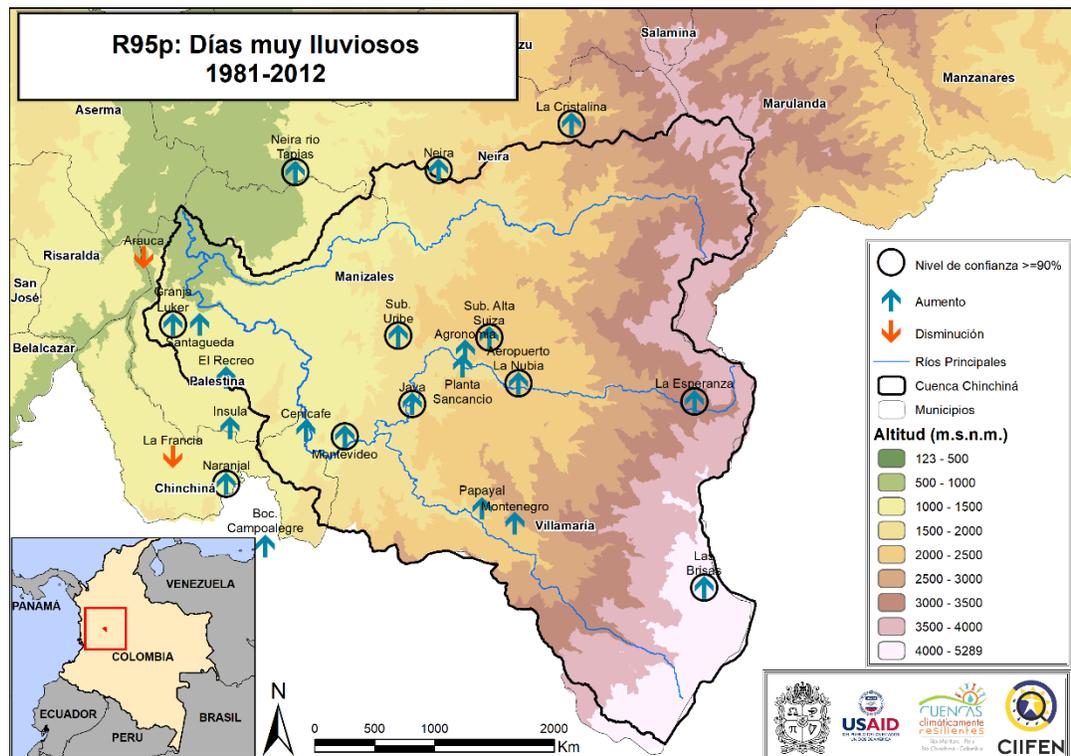
En general, para la cuenca se manifestaron tendencias positivas con un aumento promedio de 0.2 días/año, correspondientes a 6.5 días para el registro histórico

1981-2012. El caso más extremo se presentó en la estación Ínsula, donde se evidenció un incremento de 0.64 días/año, que se traducen en 6.4 días/década.

Los índices relacionados con la frecuencia de las lluvias intensas R10mm, R20mm y R25mm demostraron que la estación Ínsula localizada en el municipio de Chinchiná al occidente de la cuenca, se convierte en un punto de especial cuidado por el incremento en magnitud y frecuencia de las precipitaciones, que para los últimos 30 años ha sido particularmente importante.

▪ **Días muy lluviosos (R95p)**

El análisis del índice R95p, relacionado con los días muy lluviosos, permitió identificar tendencias en su mayoría crecientes en veintiuna (21) de las veintitrés (23) estaciones localizadas en la cuenca tomadas como base para el estudio. Doce (12) de ellas mostraron significancia estadística con un intervalo de confianza del 90% de los datos, lo cual permitió evidenciar que la intensidad de la precipitación en la cuenca ha ido aumentando significativamente (Figura 5-21).



**Figura 5-21:** Tendencia de los días muy lluviosos para la cuenca del río Chinchiná.

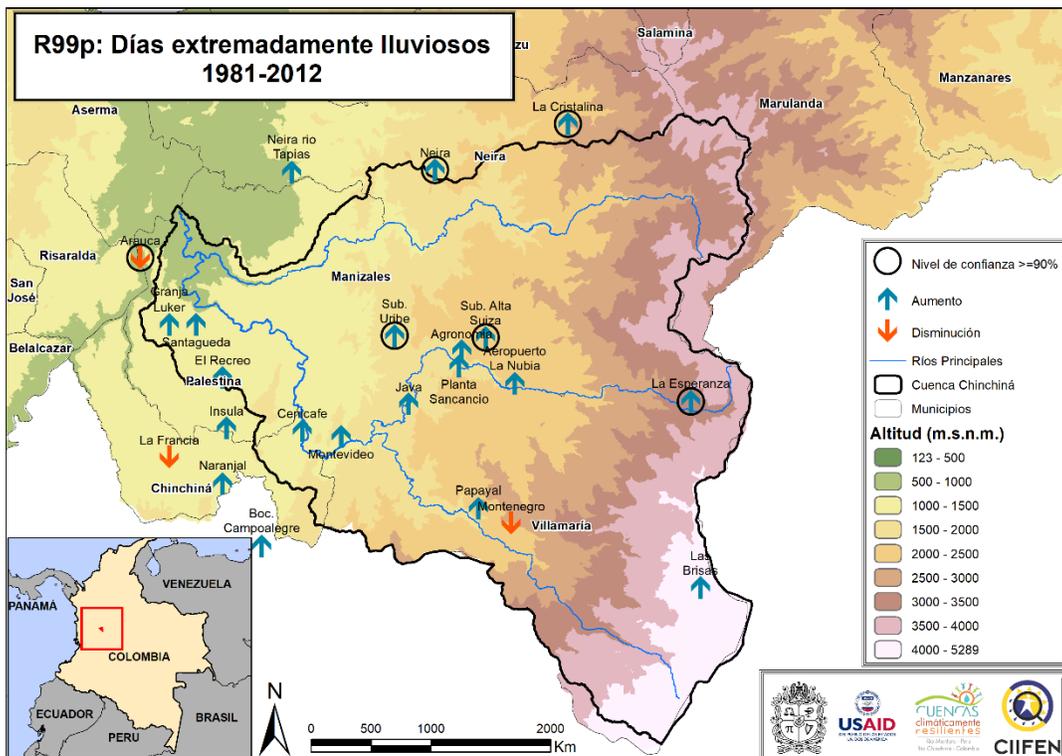
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

Las estaciones Arauca y La Francia ubicadas en la zona occidental presentaron tendencias negativas con ausencia de significancia estadística.

En promedio, la cuenca del río Chinchiná ha tenido un aumento de 6.54 mm/año correspondiente a 202.75 mm para el período 1981-2012 en lo que se refiere al índice R95p. Así mismo, la estación Neira localizada al norte de la cuenca presentó el máximo incremento de días muy lluviosos con un valor de 17.75 mm/año, es decir, 177 mm/década.

### ▪ Días extremadamente lluviosos (R99p)

Con relación a los días extremadamente lluviosos, los resultados del índice R99p obtenidos con el software RClimdex permitieron evidenciar que en la mayoría de las estaciones evaluadas, las tendencias son positivas con significancia estadística considerando un nivel de confianza del 90% en las estaciones Subestación Uribe, Subestación Alta Suiza y La esperanza localizadas en la cuenca media, y las estaciones Neira y La Cristalina Ubicadas en la cuenca baja (Figura 5-22).



**Figura 5-22:** Tendencia de los días extremadamente lluviosos para la cuenca del río Chinchiná.

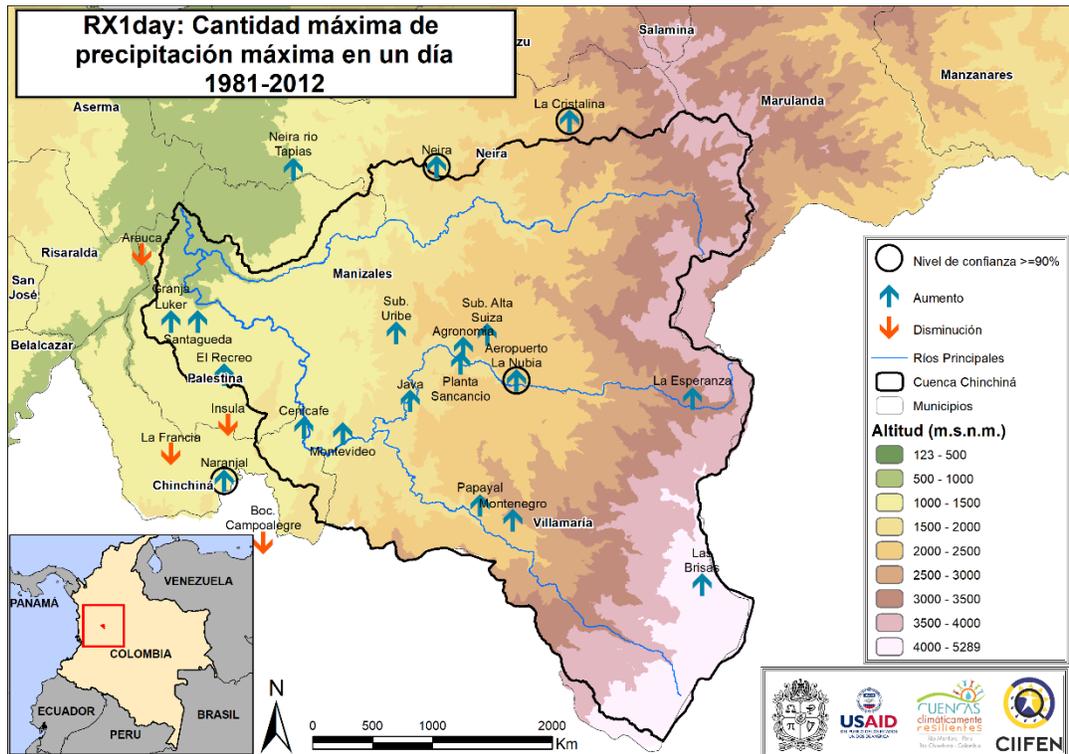
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

Por otro lado, las estaciones Arauca, La Francia y Montenegro mostraron tendencias negativas, de las cuales sólo la primera de ellas obtuvo resultados estadísticamente significativos.

En promedio, la cuenca del río Chinchiná presentó un incremento de los días extremadamente húmedos de 1.91 mm/año, es decir, 59.1 mm para el período histórico evaluado. La estación Subestación Uribe mostró el mayor incremento del índice R99p con un valor de 6.3 mm/año correspondiente a 63 mm/década.

▪ **Cantidad máxima de precipitación en un día (RX1day)**

Los resultados de la evaluación de tendencias del índice relacionado con la cantidad máxima de precipitación en un día se esquematizan en la Figura 5-23.



**Figura 5-23:** Tendencia de la cantidad máxima de precipitación en un día para la cuenca del río Chinchiná.

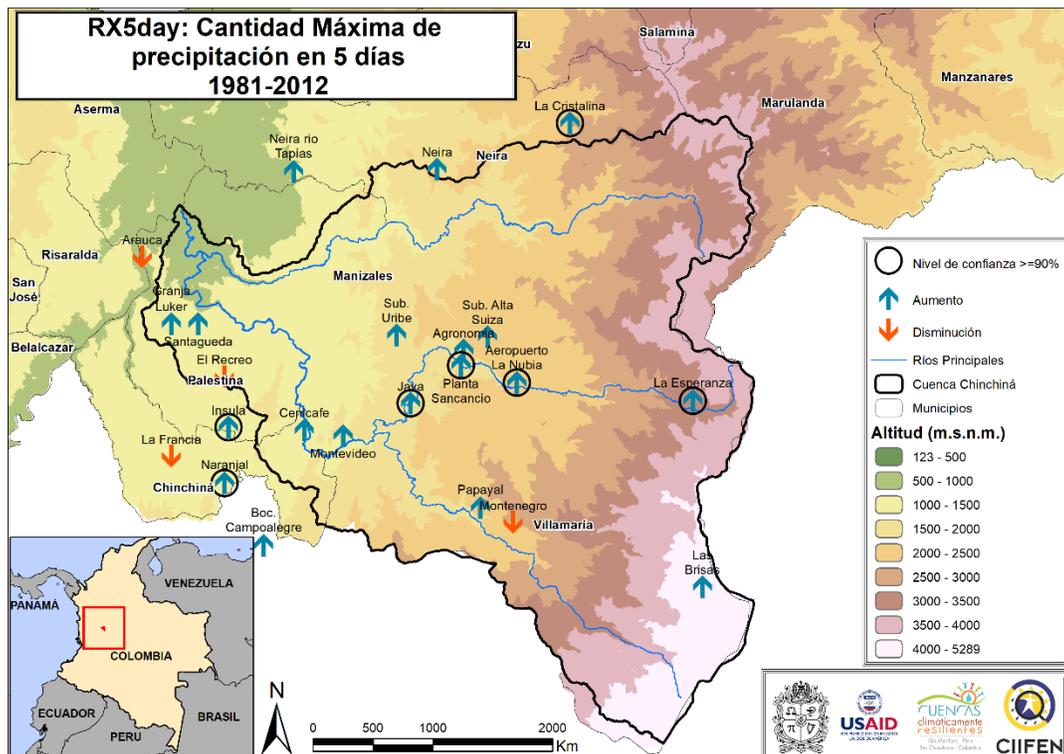
Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

La mayoría de las estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná revelaron tendencias positivas, de las cuales solo Neira, La Cristalina, Aeropuerto La Nubia y Naranjal tuvieron significancia estadística considerando un nivel de confianza del 90% de los datos. Las estaciones Arauca, Ínsula, La Francia y Bocatoma

Campoalegre localizadas en la margen occidental de la cuenca, presentaron tendencias negativas con ausencia de resultados estadísticamente significativos. En general, para la cuenca se tuvo un incremento promedio de 0.3 mm/año en el índice relacionado con la cantidad máxima de precipitación en un día, correspondientes a 8.8 mm para el registro histórico evaluado (1981-2012). Adicionalmente es importante recalcar que el mayor incremento fue evidente en la estación Neira, con un aumento aproximado de 13 mm/década.

### ▪ Cantidad máxima de precipitación en 5 días (RX5day)

Los resultados obtenidos para la cantidad máxima de precipitación en 5 días en la cuenca del río Chinchiná se presentan en la Figura 5-24.



**Figura 5-24:** Tendencia de la cantidad máxima de precipitación en 5 días para la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

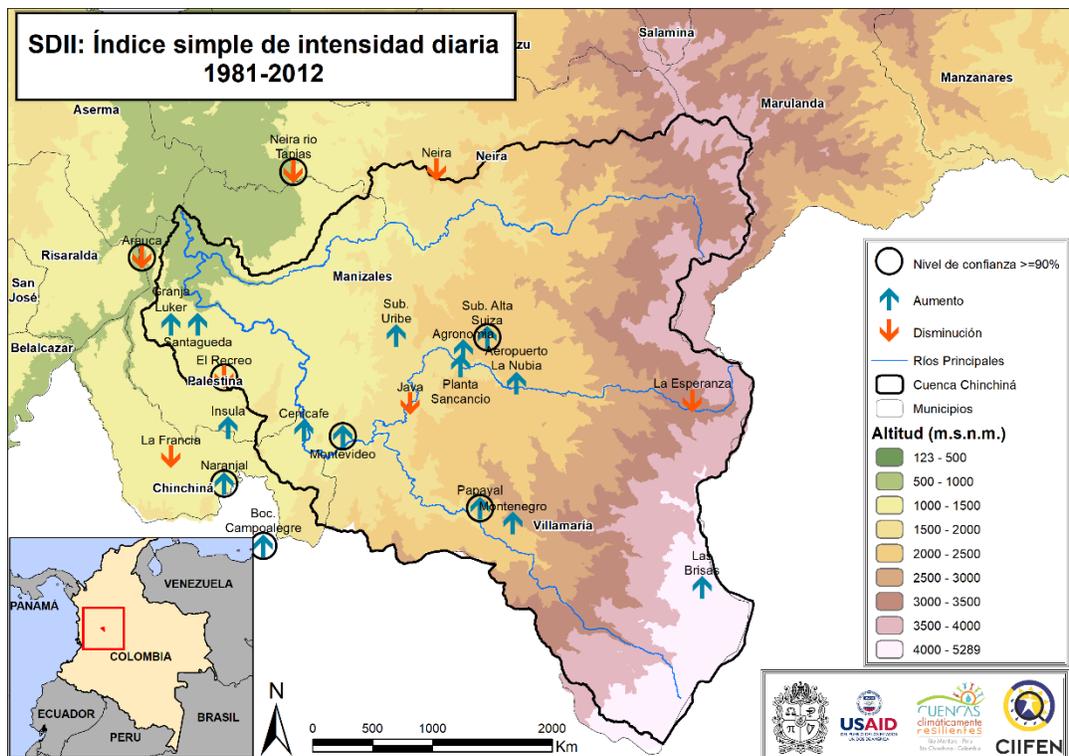
En diecinueve (19) de las veintitrés (23) estaciones empleadas para el desarrollo del estudio se evidenciaron tendencias crecientes, con significancia estadística a un nivel del 90% de los datos en La Cristalina, Ínsula, Naranjal, Java, Planta Sancancio, Aeropuerto La Nubia y La Esperanza. Las cuatro estaciones restantes

mostraron patrones negativos con ausencia de resultados estadísticamente significativos.

En general, en la cuenca del río Chinchiná, el máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos ha tenido un incremento promedio de 0.83 mm, correspondientes a 26 mm en el período histórico comprendido entre los años 1981 y 2012. La tendencia más extrema se observó en la estación Ínsula con un incremento de 2.1 mm/año, correspondientes a 21 mm/década.

▪ **Índice Simple de Intensidad Diaria (SDII)**

El índice simple de intensidad diaria (SDII) manifestó tendencias positivas en quince (15) de las veintitrés (23) estaciones evaluadas y significancia estadística en 5 de ellas considerando un intervalo de confianza del 90% (Figura 5-25).



**Figura 5-25:** Tendencia del índice simple de intensidad diaria para la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de CIIFEN.

Por otro lado, 7 estaciones evidenciaron tendencias decrecientes, con significancia estadística únicamente en 3 de ellas (Arauca, Neira río Tapias y El Recreo).

Para la cuenca del río Chinchiná se obtuvo un valor promedio de SDII de 0.01 mm/día\*año, correspondientes a 0.35 mm/día\*año para el registro histórico evaluado. La estación Bocatoma Campoalegre mostró la mayor tendencia al aumento del índice simple de intensidad diaria con un nivel de significancia del 90% de los datos, y valor promedio de 0.118 mm/día\*año que para el período 1981-2012 corresponde a un acumulado de 3.658 mm/día año.

En conclusión, los resultados obtenidos con RClimdex evidenciaron que, en las cuencas de alta montaña, existe gran variabilidad espacio-temporal en la precipitación que se refleja también en los índices climáticos de eventos extremos. Las tendencias, positivas y negativas, evidencian intensificación de estos eventos en algunas estaciones y reducción en otras, aspectos que coinciden con los estudios previos realizados a nivel nacional.

Los resultados de los índices climáticos de eventos extremos asociados con máximos de precipitación sugieren una mayor intensificación en las estaciones localizadas en la cuenca media y baja; sin embargo, este comportamiento puede ser ocasionado por una mayor concentración de las estaciones en estas zonas con registros históricos más antiguos y de mejor calidad.

En general, la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de precipitación, analizados mediante el cálculo de índices climáticos, ha mostrado un aumento en la mayoría de las estaciones de la cuenca con significancia estadística considerando un nivel de confianza del 90%.

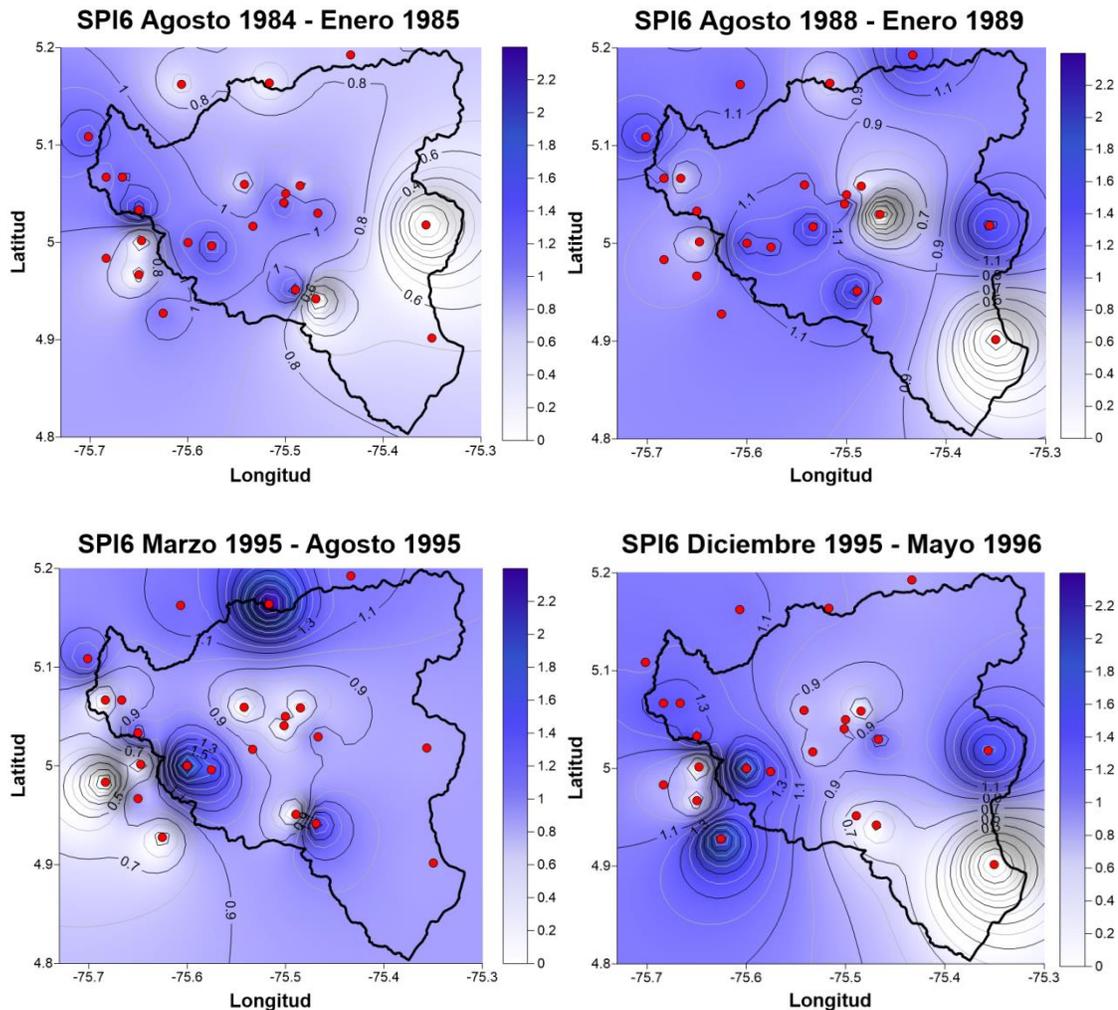
### **5.3.3 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)**

El cálculo del índice estandarizado de precipitación (SPI) para la cuenca del río Chinchiná se realizó teniendo en cuenta los períodos de 1, 3, 6, 12 meses. Sin embargo, sólo se analizaron los resultados para el SPI6 y SPI12, puesto que los períodos de 1 y 3 meses suelen representar una escala muy fina para definir con certeza períodos de humedad excesiva o sequía. Adicionalmente, dado el comportamiento bimodal de la lluvia en la región, el SPI de 3 meses puede hacer referencia a esta dinámica que es característica, y no a un período extremo fuera de lo normal.

A continuación, se describen los resultados obtenidos para el SPI de 6 y 12 meses, teniendo en cuenta los períodos extremos tanto de lluvia como de déficit de precipitación o sequía.

▪ **SPI 6 (Períodos Lluviosos)**

La Figura 5-26 muestra los resultados obtenidos del análisis del SPI de 6 meses para 4 períodos históricos lluviosos en la cuenca del río Chinchiná. Se destaca el SPI6 de marzo de 1995 a agosto de 1995, donde se obtuvo un valor promedio para la cuenca de 1.0 con una desviación estándar de  $\pm 0.22$ , característico de condiciones moderadamente húmedas. El rango de variación estuvo comprendido entre 0.43 y 2.37 en las estaciones Papayal y Neira respectivamente.

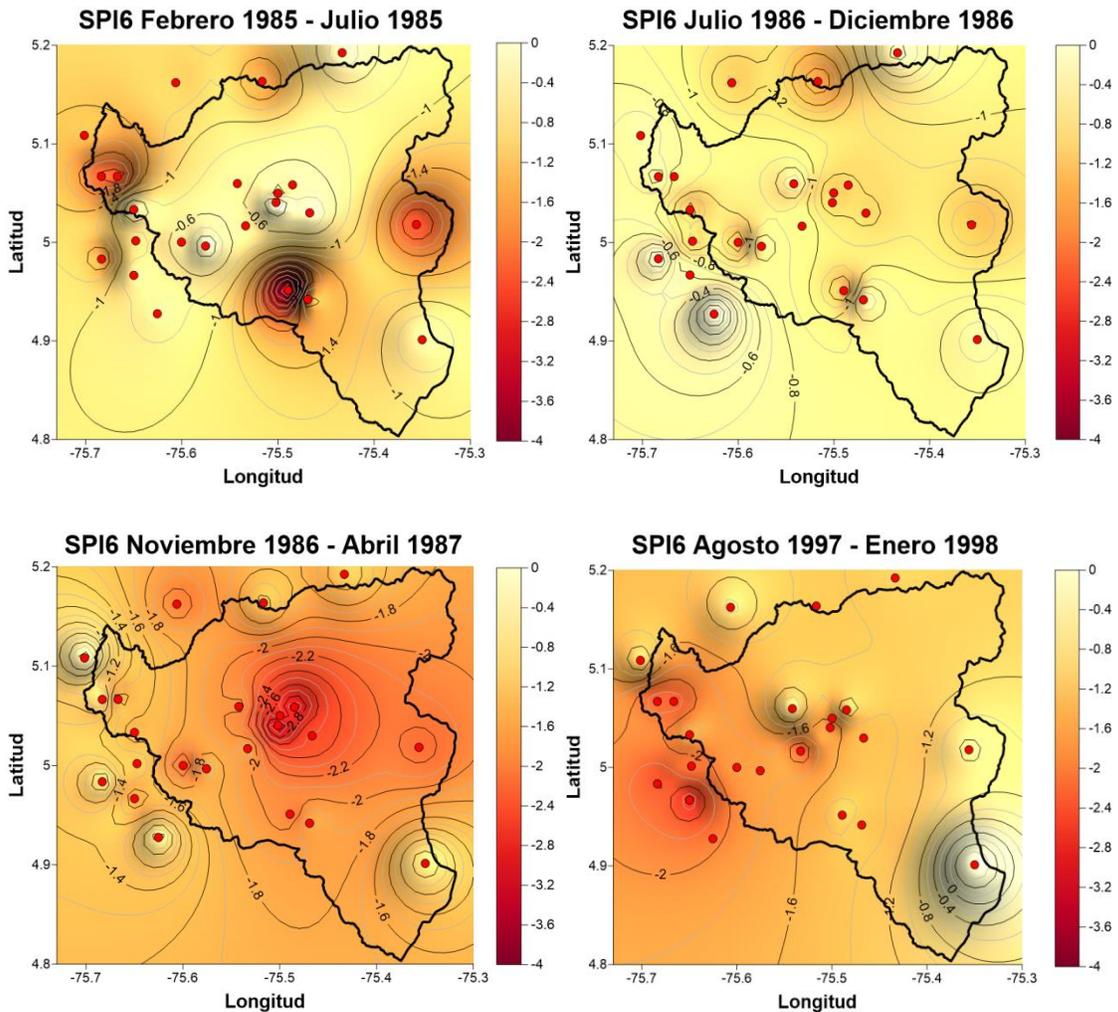


**Figura 5-26:** SPI de 6 meses, Períodos húmedos fuertes.

Fuente: Elaboración propia.

### ▪ SPI 6 (Períodos Secos)

Con relación a los períodos secos históricos, la Figura 5-27 presenta los resultados obtenidos durante 1981-2012. En la cuenca del río Chinchiná, sobresale el SPI6 de noviembre de 1986 a abril de 1987, con un valor promedio del índice de  $-1.90 \pm 0.35$ , categorizado como severamente seco. El valor más extremo de SPI6 para dicho período se obtuvo en la estación Planta Sancancio (-3.22), mientras que el menor impacto fue evidente en Arauca (-0.32).

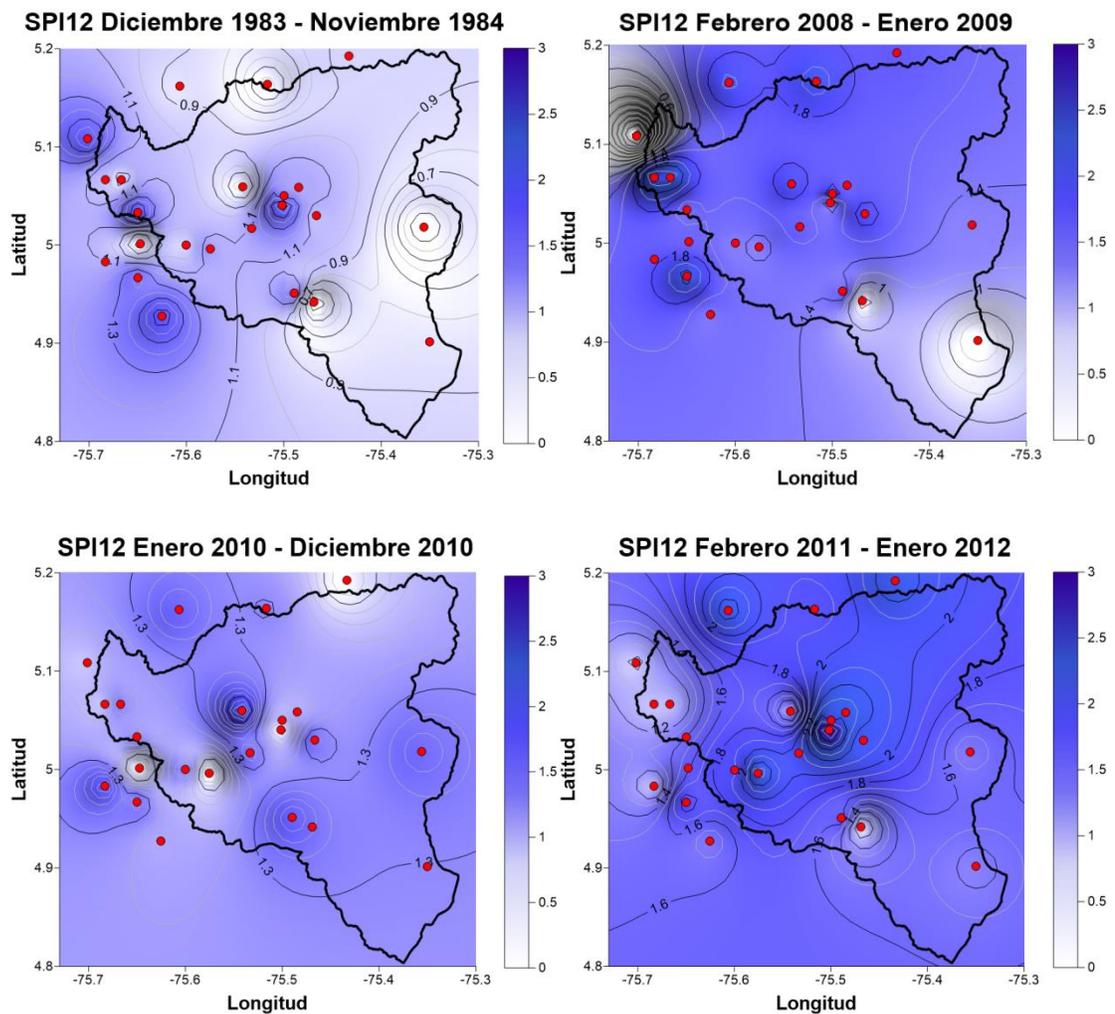


**Figura 5-27:** SPI de 6 meses, Períodos secos fuertes.

Fuente: Elaboración propia.

▪ **SPI 12 (Períodos Lluviosos)**

La Figura 5-28 muestra los resultados obtenidos del análisis del SPI de 12 meses para períodos históricos lluviosos en la cuenca del río Chinchiná. Se enfatiza el SPI12 de enero de 2011 a enero de 2012, donde se obtuvo un valor promedio para la cuenca de 1.8 con una desviación estándar de  $\pm 0.31$ , característico de condiciones muy húmedas. El máximo valor correspondiente a 2.98, se obtuvo en la estación Planta Sancancio localizada en el municipio de Manizales, mientras que los mínimos se situaron en la zona baja de la cuenca en territorio de Palestina.

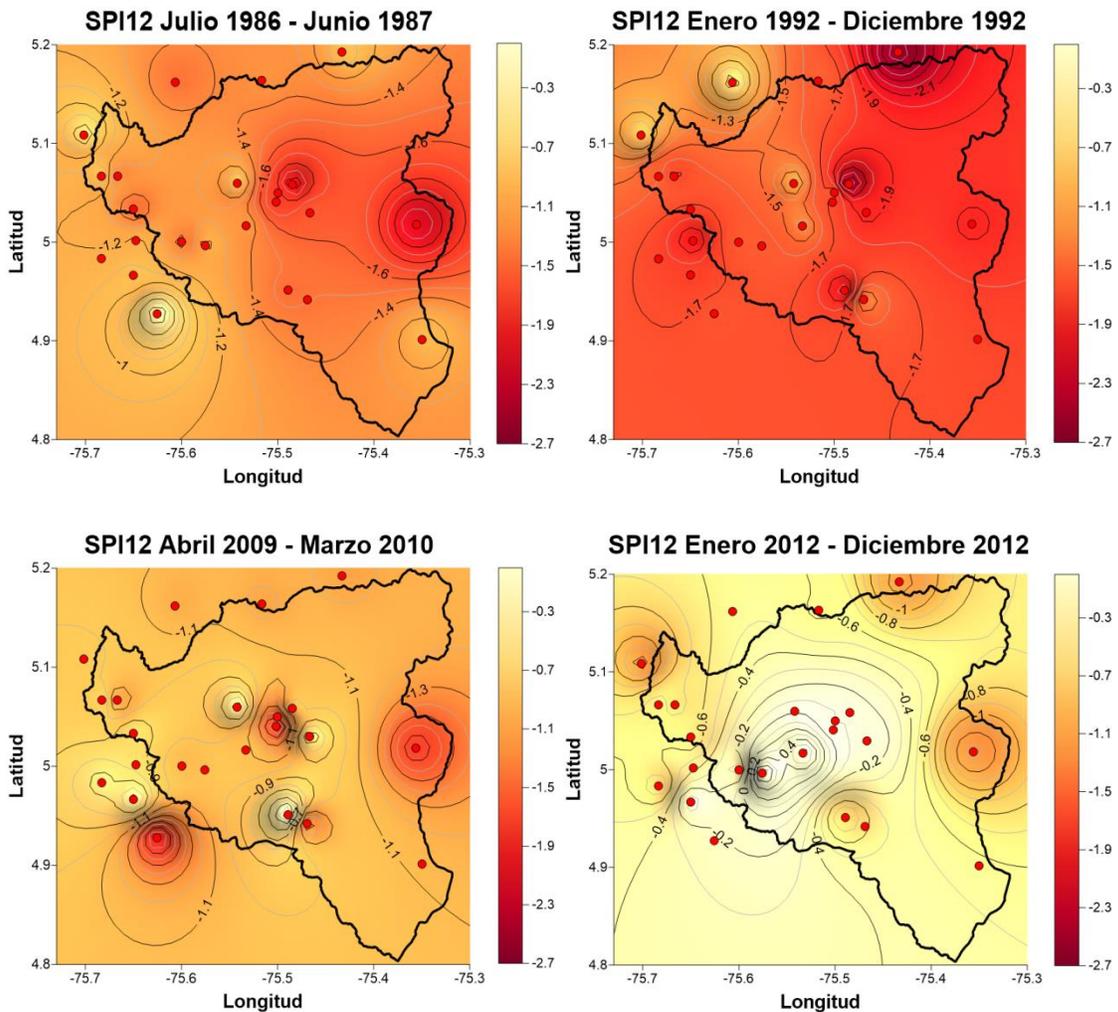


**Figura 5-28:** SPI de 12 meses, Períodos húmedos fuertes.

Fuente: Elaboración propia.

### ▪ SPI 12 (Períodos Secos)

Con relación a los períodos secos históricos, la Figura 5-29 permite visualizar los resultados obtenidos del SPI12 durante 1981-2012. En la cuenca del río Chinchiná, sobresale el SPI12 de enero de 1992 a diciembre de 1992, con un valor promedio del índice de  $-1.74 \pm 0.19$ , categorizado como severamente seco. El valor más extremo de SPI12 para dicho período se obtuvo en la estación La Cristalina (-2.66), mientras que el menor impacto fue evidente en Neira río Tapias (-0.65).



**Figura 5-29:** SPI de 12 meses, Períodos secos fuertes.  
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente es importante recalcar la relación directa de la mayoría de estos valores de SPI con la ocurrencia del fenómeno de El Niño Oscilación de El Sur en sus dos fases: episodios cálidos (El Niño) y episodios fríos (La Niña). Se destaca, por ejemplo, el período comprendido entre enero de 1992 y diciembre de 1992, época en la cual el país atravesó

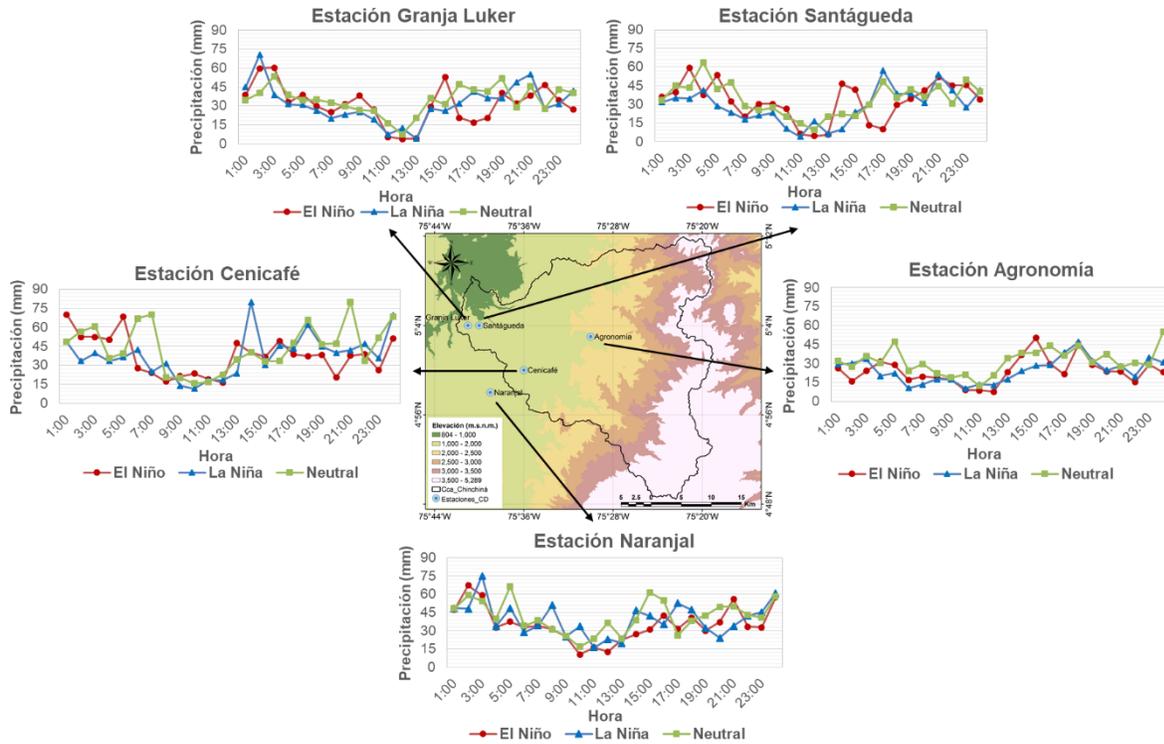
una fuerte crisis energética producto de la alta intensidad del fenómeno de El Niño que azotó la región colombiana (IDEAM, 2005; 2008). Con relación a los períodos húmedos, de febrero de 2011 a diciembre de 2012, gran parte del territorio sufrió los desastres ocasionados por la fase fría del ENSO, La Niña, que generó fuertes alteraciones en el régimen de precipitaciones normales afectando gravemente los recursos hídricos y diversos sectores socioeconómicos debido a la gran magnitud de pérdidas humanas y materiales que dejó su paso por el país (IDEAM, 2010; Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2010; Ocampo, Vélez & Londoño, 2014).

### **5.3.4 Análisis del ciclo diurno de la precipitación**

La Figura 5-30 muestra el comportamiento de la precipitación horaria en la cuenca del río Chinchiná por efecto de variabilidad climática para el período 1981-2012. Se observó que la estación Cenicafé presentó los valores más extremos de lluvia durante el ciclo diurno, con precipitaciones que superaron los 75 mm/hora y que fueron evidentes sobre todo a las 2:00 p.m. durante la ocurrencia de episodios fríos del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur y a las 9:00 p.m. bajo condiciones neutrales. El período valle, característico de horas con menores precipitaciones fue de 10:00 a.m. a 12:00 m.

Por otro lado, en la estación Agronomía, ubicada en el municipio de Manizales, el comportamiento de los eventos extremos de lluvia horaria para el período histórico evaluado fue más homogéneo; sin embargo, también fueron evidentes incrementos considerables de la precipitación en las horas de la tarde, sobre todo entre las 3:00 p.m. y las 6:00 p.m. De igual manera, se evidenció un período de precipitaciones menos intensas en las horas de la mañana, particularmente de 9:00 a.m. a 12:00 m. al igual que el presentado en la estación Cenicafé.

Las estaciones Granja Luker, Santágueda y Naranjal manifestaron un comportamiento similar entre sí que permitió demostrar incrementos en la precipitación en las primeras horas de la madrugada, que van disminuyendo progresivamente conforme aumentan las horas, hasta llegar a un período de lluvias menos frecuentes, comprendido entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m., hora a partir de la cual, las lluvias vuelven a incrementar su intensidad en el resto del transcurso de la tarde y noche.



**Figura 5-30:** Resultados del ciclo diario de la precipitación para la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-14 consolida los resultados obtenidos del análisis de ciclo diario para la estación Cenicafé. En ella se encuentran los valores de las anomalías de los episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) con respecto a los resultados obtenidos para condiciones neutrales. Se pudo evidenciar que las mayores anomalías en la precipitación horaria para el período 1981-2012 se presentaron a las 6:00 a.m. con reducciones de un 66% durante El Niño y a las 2:00 p.m. con incrementos del 100% durante La Niña. Adicionalmente, se presentan gráficas de superficie que permiten tener una mejor visualización del comportamiento de los eventos extremos durante el ciclo diario y su variación según los meses del año; igualmente, se muestra el análisis por condición hidrológica.

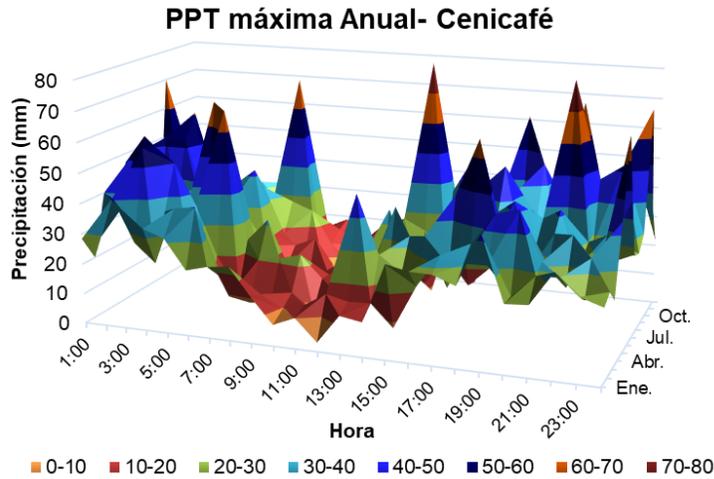
Para la estación Cenicafé, los resultados se esquematizan en las Figuras 5-31 y 5-32. Durante la ocurrencia de El Niño, los valores más extremos de lluvia se presentaron durante las primeras horas de la mañana, específicamente a la 1:00 a.m. y 5:00 a.m. en los meses junio y septiembre respectivamente. Hacia el segundo semestre del año, particularmente entre agosto y septiembre, fue evidente un período de menos lluvia entre las 7:00 a.m. y las 3:00 p.m.; durante La Niña, las lluvias fueron más intensas en la tarde,

con picos entre las 6:00 p.m. y las 7:00 p.m. en los meses de marzo y abril y a las 2 de la tarde para septiembre y octubre. Bajo condiciones frías, las horas de menos lluvia se presentaron entre las 9:00 a.m. y 11:00 a.m. en todo el año, mientras que, para condiciones neutrales, los máximos de precipitación se distribuyen más frecuentemente en todo el gráfico de superficie, lo cual permitió concluir que no necesariamente la ocurrencia de los episodios del ENSO puede afectar el comportamiento de los eventos extremos. Se deben considerar otros fenómenos macroclimáticos, o realizar análisis con otros índices diferentes al ONI, para identificar cuáles factores climáticos tienen incidencia directa sobre la dinámica de las lluvias en la cuenca.

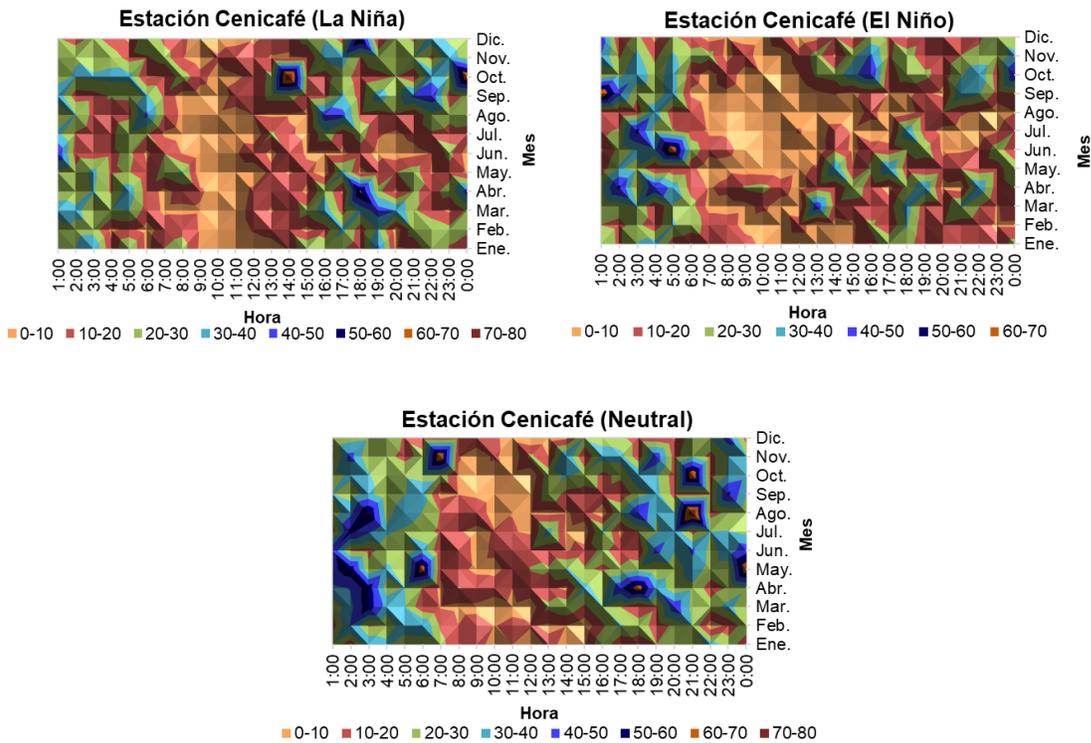
**Tabla 5-14:** Análisis de lluvias máximas horarias por condición hidrológica para la estación Cenicafé.

Hora	Valores máximos de precipitación horaria (mm) por condición hidrológica			% Anomalía (El Niño)	% Anomalía (La Niña)
	El Niño	La Niña	Neutral		
1:00	70.0	48.4	48.3	45%	0.2%
2:00	52.3	33.2	56.5	-7%	-41.2%
3:00	52.2	39.6	60.6	-14%	-34.7%
4:00	50.2	33.4	35.6	41%	-6.2%
5:00	68.1	36.3	39.2	74%	-7.4%
6:00	27.5	42.1	66.9	-59%	-37.1%
7:00	24.0	24.9	70.0	-66%	-64.4%
8:00	17.1	31.6	20.4	-16%	54.9%
9:00	21.4	13.8	20.0	7%	-31.0%
10:00	23.3	11.5	15.7	48%	-26.8%
11:00	18.9	18.6	16.8	13%	10.7%
12:00	16.4	18.2	22.6	-27%	-19.5%
13:00	47.3	23.7	34.7	36%	-31.7%
14:00	40.0	80.0	40.0	0%	100.0%
15:00	36.8	30.5	33.1	11%	-7.9%
16:00	49.3	45.6	33.4	48%	36.5%
17:00	38.6	43.3	47.5	-19%	-8.8%
18:00	37.2	61.8	65.7	-43%	-5.9%
19:00	38.3	44.8	46.7	-18%	-4.1%
20:00	20.3	39.7	47.0	-57%	-15.5%
21:00	37.4	41.8	80.0	-53%	-47.8%
22:00	38.8	46.9	33.4	16%	40.4%
23:00	26.1	35.3	51.9	-50%	-32.0%
0:00	51.3	69.2	68.4	-25%	1.2%

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-31:** Resultados del ciclo diario de la precipitación para la estación Cenicafé. Fuente: Elaboración propia.



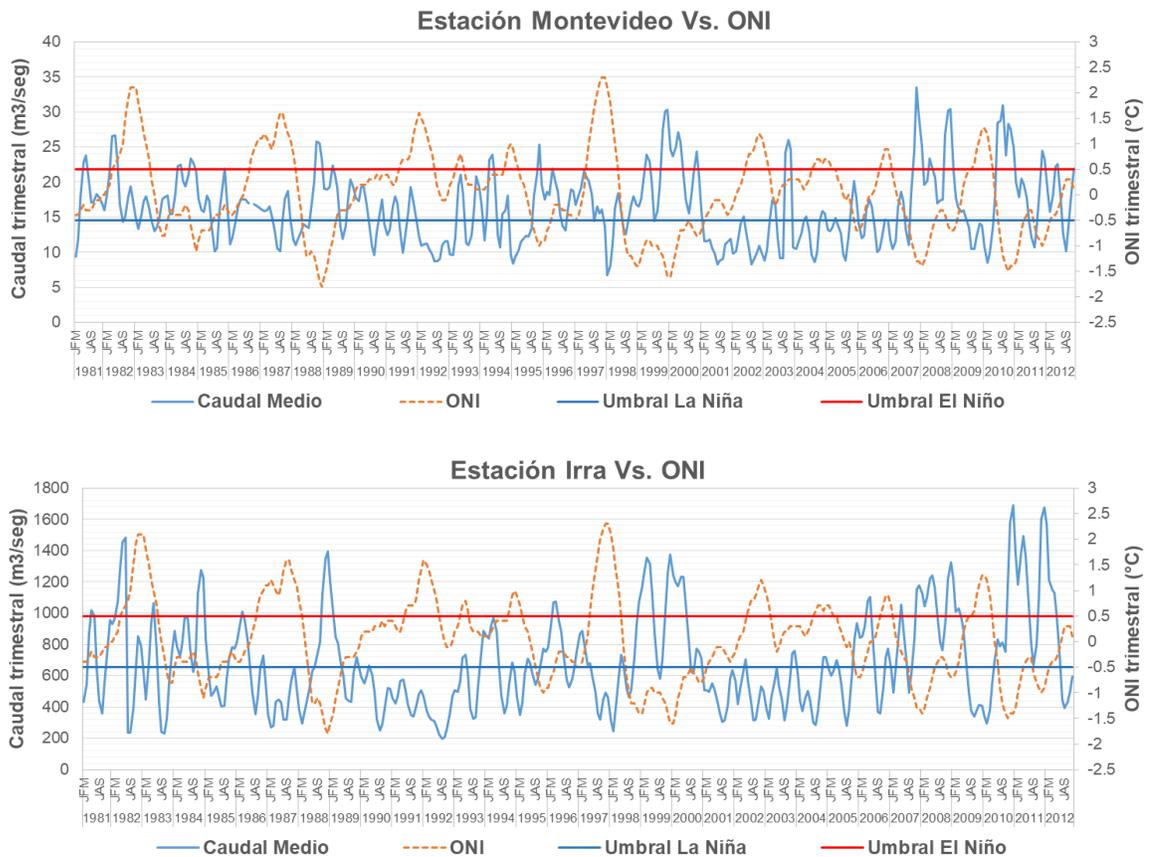
**Figura 5-32:** Análisis por condición hidrológica del ciclo diario de la precipitación en la estación Cenicafé. Fuente: Elaboración propia.

En general, para la subcuenca del río Chinchiná, lugar de concentración de las 5 estaciones con información horaria suministradas para el estudio, se presentaron incrementos de las lluvias horarias durante las primeras horas de la madrugada, particularmente entre la 1 y las 5 de la mañana, hora a partir de la cual las precipitaciones

son menos frecuentes e intensas hasta aproximadamente la 1 de la tarde; en ese punto las lluvias vuelven a retomar fuerza conforme aumentan las horas del día, alcanzando fuertes intensidades alrededor de las 3 p.m.

### 5.4 Análisis trimestral: Caudales medios Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI)

Los resultados del análisis trimestral del comportamiento de los caudales medios en la cuenca del río Chinchiná y el establecimiento de correlaciones con la ocurrencia de los episodios cálidos y fríos del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO, se presentan en la Figura 5-33.



**Figura 5-33:** Análisis trimestral de los caudales medios y su relación con el Índice Oceánico de El Niño (ONI).  
Fuente: Elaboración propia.

Visualmente se aprecian relaciones de inversa proporcionalidad, pues cuando el índice supera el umbral de 0.5°C (El Niño), los caudales medios se reducen, mientras que cuando el índice disminuye su valor por debajo del umbral de -0.5°C (La Niña), los caudales medios

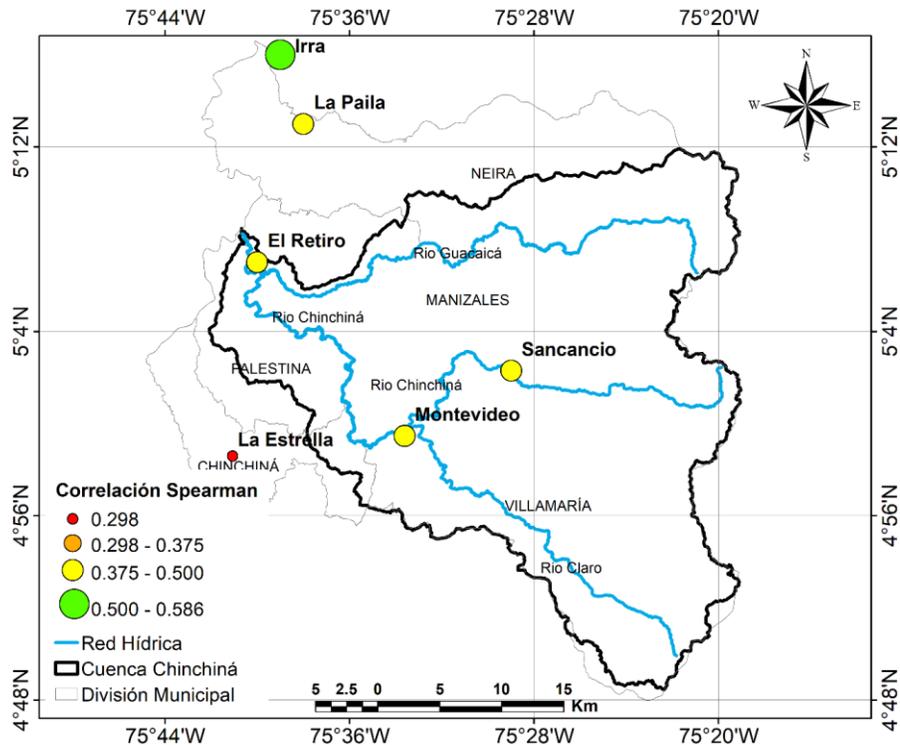
se hacen más extremos. Se realizó el análisis de correlaciones numéricas mediante el cálculo de coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, para validar los resultados gráficos.

La Tabla 5-15 muestra los resultados numéricos obtenidos al aplicar los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para verificar la relación existente entre los caudales trimestrales y el Índice Oceánico de El Niño en la cuenca del río Chinchiná. Se pudo evidenciar que, cuando no se hace ningún rezago en la variable, la correlación de Spearman mostró mejores resultados en las estaciones evaluadas.

**Tabla 5-15:** Coeficientes de correlación: Caudales medios trimestrales Vs. ONI

Estación	Correlaciones sin rezago		Correlaciones para 1 mes de rezago		Correlaciones para 2 meses de rezago		Correlaciones para 3 meses de rezago	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
La Estrella	-0.184	<b>-0.298</b>	-0.174	-0.280	-0.163	-0.253	-0.149	-0.229
Montevideo	-0.469	<b>-0.473</b>	-0.440	-0.437	-0.387	-0.385	-0.314	-0.320
Sancancio	-0.338	<b>-0.390</b>	-0.342	-0.390	-0.324	-0.372	-0.288	-0.340
El Retiro	-0.440	<b>-0.464</b>	-0.416	-0.429	-0.375	-0.384	-0.321	-0.331
Irra	-0.562	<b>-0.586</b>	-0.517	-0.541	-0.459	-0.487	-0.393	-0.429
La Paila	-0.473	<b>-0.472</b>	-0.449	-0.443	-0.407	-0.405	-0.355	-0.362

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-34:** Correlación de Spearman: Caudales medios trimestrales en la cuenca del río Chinchiná Vs. Índice Oceánico de El Niño (ONI).

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-34 muestra los resultados del cálculo de la correlación de Spearman entre los caudales medios trimestrales y el índice oceánico de El Niño en la cuenca del río Chinchiná sin rezagar los datos. Se evidenció que la correlación más alta se presentó en la estación Irra, localizada sobre el río Cauca y la menor en la estación La Estrella ubicada en el municipio de Chinchiná.

## **5.5 Evaluación de eventos extremos de caudal**

El análisis de los eventos extremos se realizó teniendo en cuenta la función de distribución de probabilidad que mejor se ajustó a los máximos diarios de caudal promedio y la evaluación de curvas de duración de caudales; en ambos casos, los resultados se presentaron considerando tanto los registros históricos completos de las series temporales, como los subconjuntos de datos obtenidos al filtrarlas por condición hidrológica (El Niño, La Niña, Neutral).

### **5.5.1 Curvas de distribución de probabilidad de valor extremo**

Los resultados obtenidos para el ajuste de curvas de distribución de probabilidad empleando el software AFINS 2.0, mostraron que, en general, la función Two Components Extreme Value (TCEV) es la que mejor representa el comportamiento de los extremos de caudal en la cuenca del río Chinchiná teniendo en cuenta los criterios de máxima verosimilitud, el análisis gráfico y la simplicidad de los modelos estadísticos.

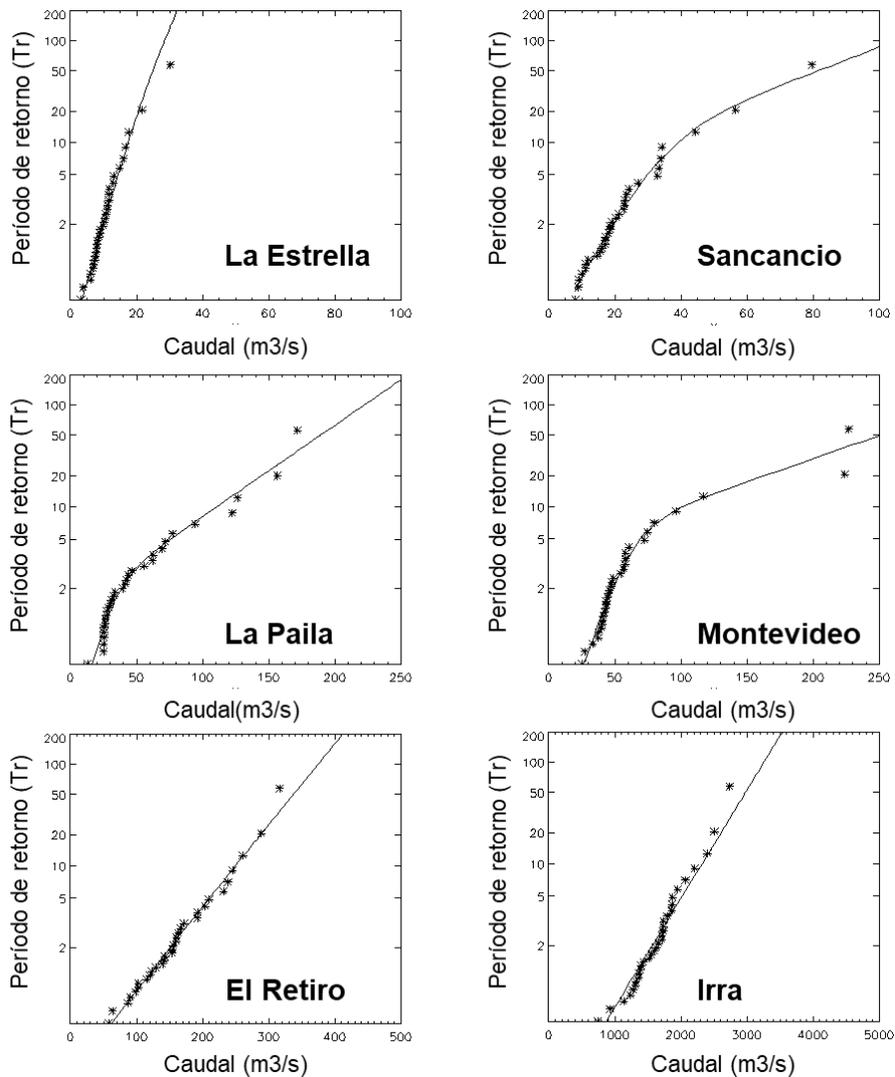
La Figura 5-35 muestra los resultados obtenidos para las 6 estaciones de caudal empleadas en el estudio. Se observó gráficamente que la función de distribución TCEV hizo una buena estimación del comportamiento de los caudales a través del tiempo tanto para los períodos de retorno más bajos como para los más elevados.

La Tabla 5-16 resume los resultados de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno según la función de distribución Two Components Extreme Value “TCEV”.

**Tabla 5-16:** Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Tr) según la función de distribución de probabilidad "TCEV".

Estación	Caudales máximos (m <sup>3</sup> /s) para la función de distribución de probabilidad "TCEV"					
	Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
El Retiro	209.9	249.3	299.5	336.9	374.0	459.1
Estrella	14.4	17.4	21.5	24.9	28.4	37.5
Irra	2021.0	2319.5	2696.4	2976.5	3252.2	3884.2
La Paila	75.4	110.5	155.6	189.0	222.0	297.5
Montevideo	69.5	101.3	185.0	250.3	314.7	462.2
Sancancio	29.9	39.1	59.1	81.3	104.7	158.7

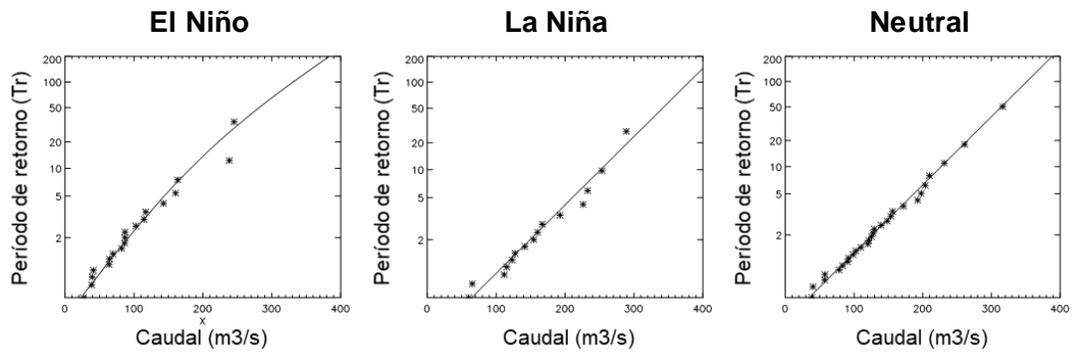
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-35:** Curvas de distribución de probabilidad obtenidas con la función Two Components Extreme Value (TCEV) para los caudales máximos en la cuenca del río Chinchiná.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, para la estación El Retiro, por ser una de las series que posee registros históricos con menor cantidad de faltantes, se realizó un análisis de curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica: El Niño, La Niña y Neutral para el período 1981-2012. Se separaron las series según la anomalía de la temperatura superficial del mar, presentada por el Índice Oceánico de El Niño – ONI. Los resultados gráficos contenidos en la Figura 5-36 permitieron identificar que la función de probabilidad Two Components Extreme Value ofreció una buena representación del comportamiento de los caudales máximos durante las fases del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO en la estación El Retiro localizada en el municipio de Palestina, Caldas.



**Figura 5-36:** Curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica según la función TCEV para la estación El Retiro.  
Fuente: Elaboración propia

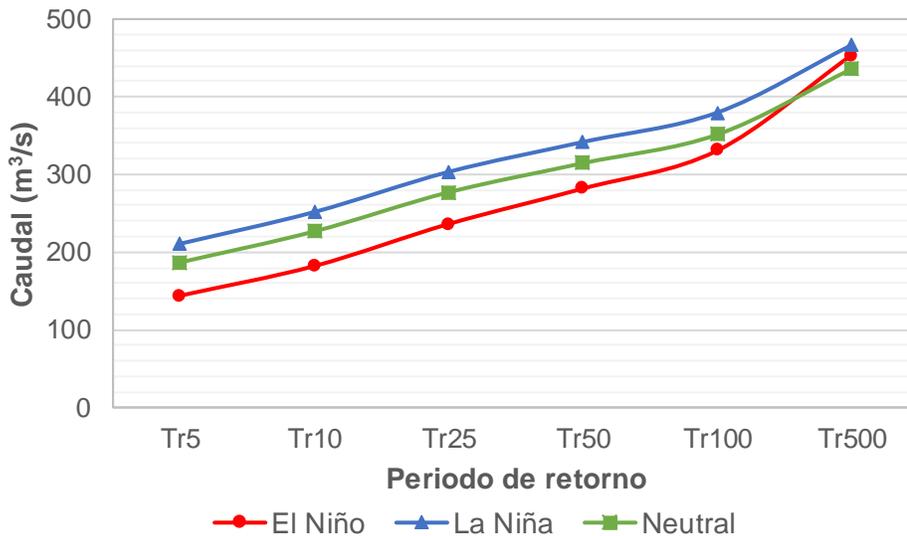
La Tabla 5-17 muestra los resultados consolidados del análisis de caudales máximos por condición hidrológica para la estación El Retiro. Adicionalmente, se calcularon las anomalías de los caudales durante El Niño y La Niña, con relación a los períodos neutrales o sin presencia de evento. Se pudo concluir que, para períodos de retorno bajos (5, 10 y 25 años), se obtuvieron los mayores incrementos y reducciones durante los fenómenos de La Niña y El Niño respectivamente.

De la misma forma, se pudo evidenciar que los descensos de los caudales en la cuenca tuvieron una magnitud significativamente mayor que los aumentos generados por La Niña; en este sentido, se puso de manifiesto la mayor vulnerabilidad de los caudales ante episodios cálidos y secos con variaciones sustanciales que afectan el recurso hídrico de la región.

**Tabla 5-17:** Análisis de caudales máximos por condición hidrológica para la estación El Retiro

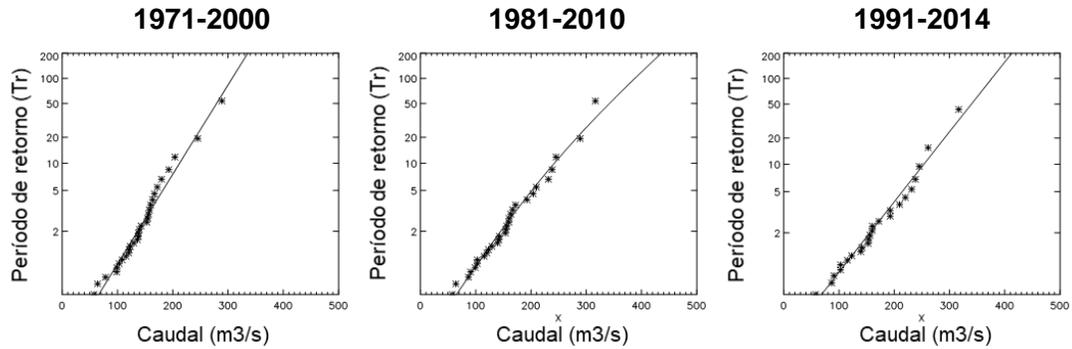
Condición hidrológica	Caudales máximos (m <sup>3</sup> /s) para la estación El Retiro según la función de distribución de probabilidad "TCEV"					
	Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
El Niño	143.9	182.1	236.2	281.7	330.7	453.5
La Niña	210.8	251.6	303.3	341.7	379.6	466.4
Neutral	186.8	226.7	277.0	314.5	351.3	435.7
Anomalía % (El Niño)	-23%	-20%	-15%	-10%	-6%	4%
Anomalía % (La Niña)	13%	11%	9%	9%	8%	7%

Fuente: Elaboración propia

**Figura 5-37:** Comparación del comportamiento de los caudales máximos según condición hidrológica para diferentes periodos de retorno en la estación El Retiro  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-37 representa gráficamente el comportamiento de los caudales máximos en el tiempo. Se observó un comportamiento característico de los impactos de las fases del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO sobre la región: Aumento de los caudales durante La Niña y disminución durante El Niño.

Por último, con el fin de identificar variaciones en la función de distribución de probabilidad a través de periodos de 3 décadas, se utilizó el registro histórico completo disponible para la estación El Retiro (1971-2014), el cual permitió establecer 3 periodos tridecadales para el análisis: 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2014; la Figura 5-38 muestra los resultados obtenidos.



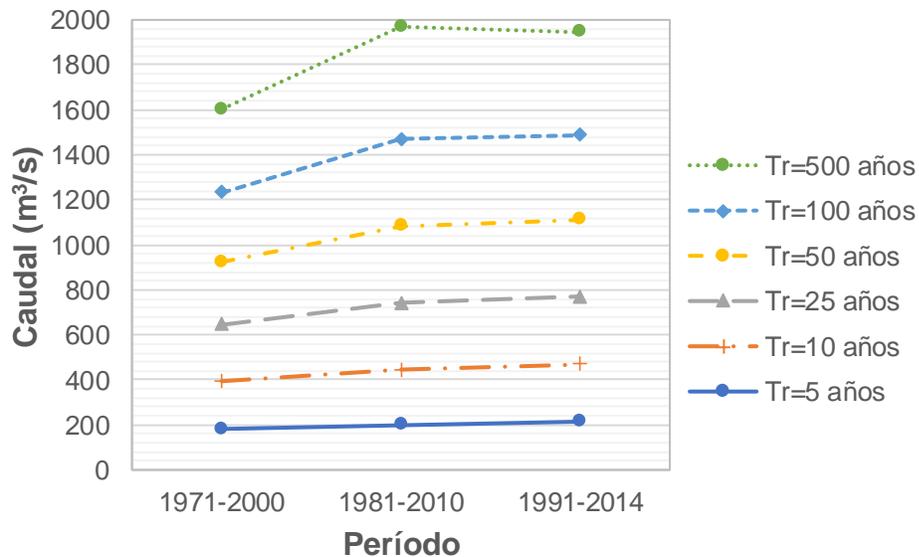
**Figura 5-38:** Curvas de distribución de probabilidad por períodos tridecadales según la función TCEV para la estación El Retiro.  
Fuente: Elaboración propia.

Se observó que la función TCEV otorgó una buena representación de la dinámica de los eventos extremos de caudal cuando son analizados subconjuntos de 30 años. La Tabla 5-18 consolida los valores de caudales máximos para diferentes períodos de retorno.

**Tabla 5-18:** Análisis de caudales máximos por períodos tridecadales para la estación El Retiro.

Período	Caudales máximos (m <sup>3</sup> /s) para diferentes períodos de retorno según la distribución de probabilidad TCEV					
	Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100	Tr500
1971-2000	181.9	212.2	250.6	279.1	307.3	371.8
1981-2010	201.6	242.2	297.5	341.9	387.7	498.8
1991-2014	214.5	253.6	303.0	339.8	376.1	459.4

Fuente: Elaboración propia

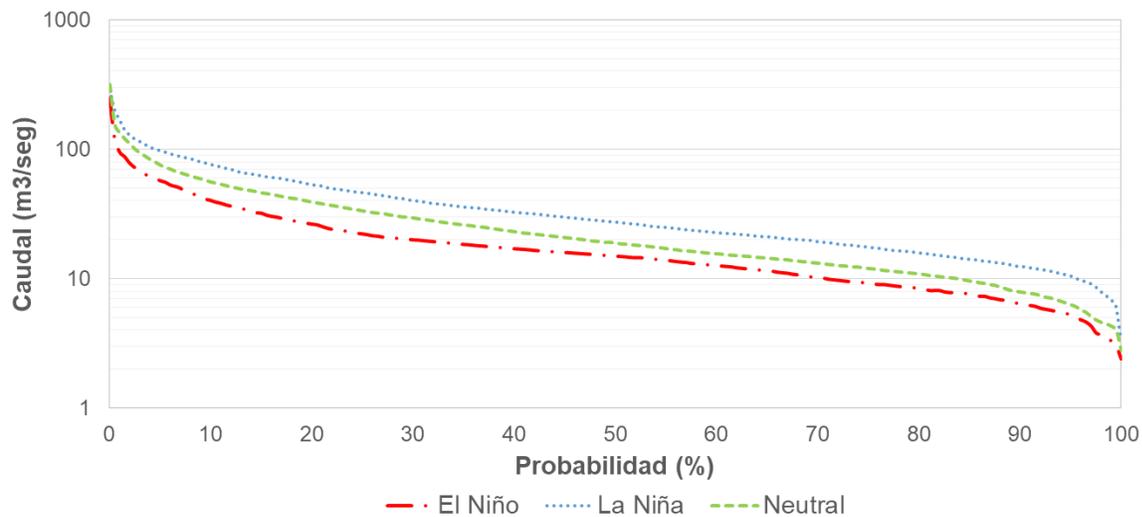


**Figura 5-39:** Comparación de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno en la estación El Retiro.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-39 evidencia intensificación de los eventos extremos de caudal en la estación El Retiro cuando se analizan separadamente períodos de 30 años de registros continuos de la estación.

### 5.5.2 Curvas de duración de caudales

El análisis de las curvas de duración de caudales diarios, suministra información importante para la evaluación de caudales ecológicos y es insumo base para el desarrollo de proyectos relacionados con pequeñas centrales hidroeléctricas. Las Figuras 5-40, 5-41 y 5-42, muestran los resultados de curvas de duración de caudales (CDC) por condición hidrológica para algunas de las estaciones localizadas en la cuenca del río Chinchiná. Se pudo evidenciar que, como era de esperarse, durante el fenómeno de El Niño los caudales disminuyen, mientras que, en La Niña, aumentan. Para entender la proporción en que suceden estos cambios, se consolidaron los resultados de algunos de los porcentajes de probabilidad de excedencia más representativos en las Tablas 5-19, 5-20 y 5-21.



**Figura 5-40:** Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación El Retiro.

Fuente: Elaboración propia.

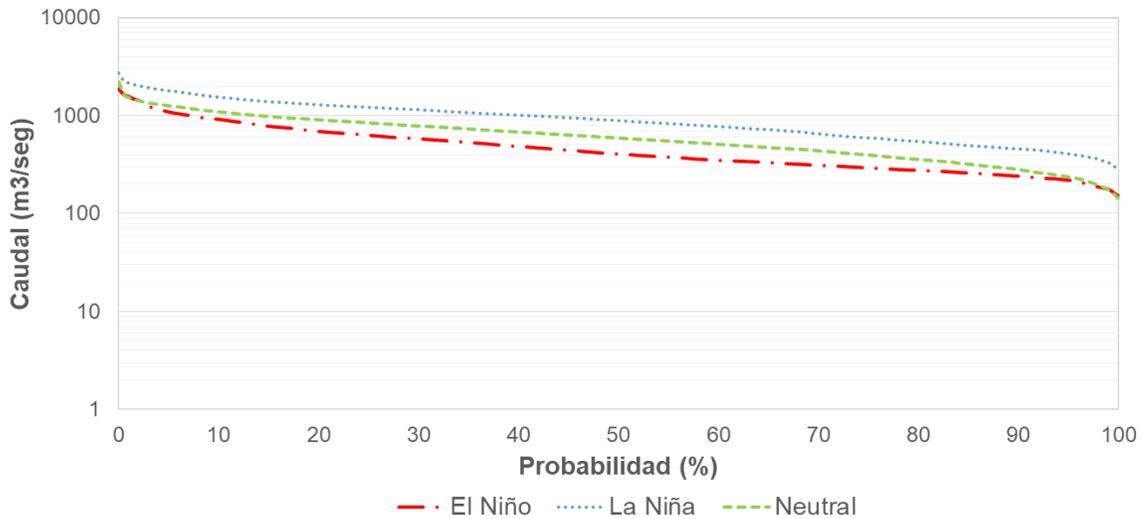
Con relación al comportamiento de los caudales mínimos durante el fenómeno de El Niño y La Niña en la estación El Retiro, se pudo identificar que el Q97.5 exhibió la mayor anomalía cuando se compara el caudal durante los episodios fríos con respecto a los períodos neutrales o sin presencia de evento. En promedio, el aumento de caudal para este porcentaje de excedencia durante La Niña es de 81.3%, evidenciando una fuerte

afectación en la dinámica de los caudales medios mínimos. Por otro lado, las anomalías calculadas para el Q10, relacionado con la probabilidad de ocurrencia de caudales máximos, evidenciaron que, durante el fenómeno de La Niña, se tuvo un aumento promedio de 37.2% con relación a la probabilidad de excedencia durante los períodos normales. En general, las anomalías presentadas en las curvas de duración de caudales son significativamente mayores cuando las fuentes hídricas son afectadas por la ocurrencia del fenómeno de La Niña.

**Tabla 5-19:** Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación El Retiro.

Estación El Retiro					
Probabilidad (%)	Caudal(m <sup>3</sup> /s)			% Anomalía El Niño	% Anomalía La Niña
	El Niño	La Niña	Neutral		
10	40.1	76.7	55.9	-28.3%	37.2%
20	26.3	53.3	39.1	-32.7%	36.3%
25	22.1	46.4	33.5	-33.9%	38.7%
50	14.9	27.5	18.9	-21.2%	45.5%
75	9.1	17.6	12.0	-24.2%	46.7%
95	5.2	10.6	6.3	-17.5%	67.8%
97.5	3.8	8.7	4.8	-20.8%	81.3%
99	3.3	6.9	4.3	-23.3%	60.5%

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-41:** Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación Irra.

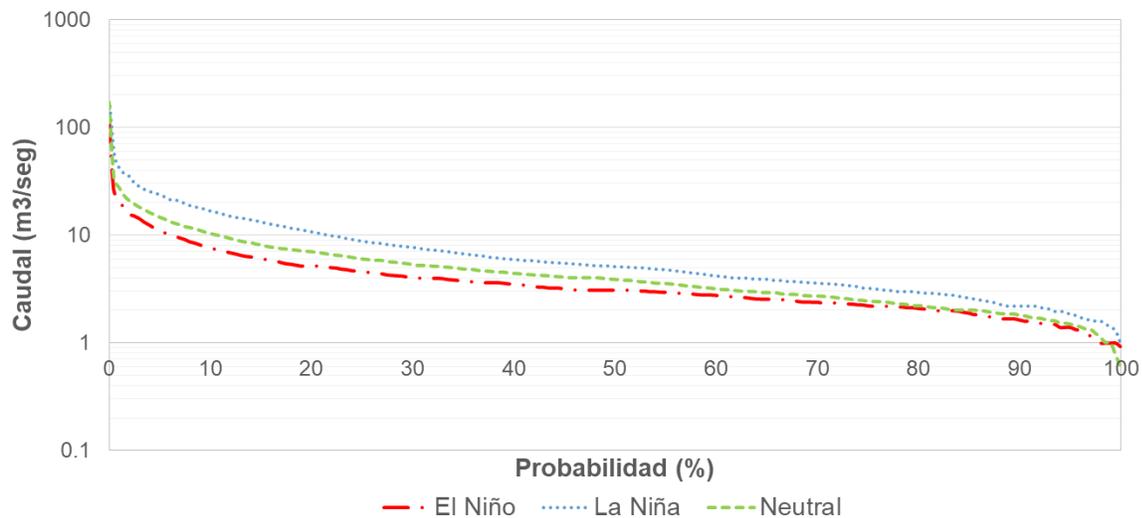
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para la estación Irra permitieron concluir que las anomalías con relación a los periodos neutrales en las probabilidades de excedencia de caudales, tanto para máximos como para mínimos, fueron mayores con la ocurrencia de la fase fría del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur. La mayor afectación fue evidente en el Q99, donde se pudo apreciar un incremento de hasta 89.8% de los caudales mínimos durante La Niña. Con relación a las disminuciones ocasionadas por la fase cálida, el Q50 exhibió la mayor susceptibilidad, con una reducción de caudal de hasta un 32% aproximadamente.

**Tabla 5-20:** Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación Irra.

Estación Irra					
Probabilidad (%)	Caudal(m <sup>3</sup> /s)			% Anomalía El Niño	% Anomalía La Niña
	El Niño	La Niña	Neutral		
10	912.0	1561.0	1090.0	-16.3%	43.2%
20	686.3	1305.0	907.0	-24.3%	43.9%
25	629.0	1229.0	842.0	-25.3%	46.0%
50	402.2	898.2	591.0	-31.9%	52.0%
75	290.0	597.0	397.0	-27.0%	50.4%
95	217.0	410.0	237.0	-8.4%	73.0%
97.5	192.0	372.0	204.5	-6.1%	81.9%
99	176.0	334.0	176.0	0.0%	89.8%

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5-42:** Curvas de duración de caudales por condición hidrológica para la estación La Paila.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la estación La Paila, localizada en el municipio de Neira, la mayor anomalía presentada durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña fue evidente en el Q10, con un porcentaje de incremento de 62.3% con relación a los períodos neutrales. Respecto a las disminuciones en los caudales ocasionadas por el déficit de precipitaciones, el Q20 exhibió la mayor reducción durante el fenómeno de El Niño con un descenso promedio de 25.5%.

**Tabla 5-21:** Probabilidad de excedencia de caudales y análisis por condición hidrológica en la estación La Paila.

Estación La Paila					
Probabilidad (%)	Caudal(m <sup>3</sup> /s)			% Anomalía El Niño	% Anomalía La Niña
	El Niño	La Niña	Neutral		
10	7.7	16.7	10.3	-25.2%	62.3%
20	5.2	10.7	7.0	-25.5%	53.7%
25	4.6	8.8	6.0	-23.1%	47.2%
50	3.1	5.1	3.9	-19.5%	32.5%
75	2.2	3.2	2.4	-8.3%	33.1%
95	1.4	1.8	1.5	-5.4%	24.3%
97.5	1.1	1.6	1.2	-9.8%	31.1%
99	1.0	1.4	1.0	0.0%	40.0%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados comprueban que, durante el fenómeno de La Niña, las mayores afectaciones son evidentes en el comportamiento de las curvas de duración de caudales en la cuenca del río Chinchiná, con una incidencia mayor sobre todo en los caudales medios mínimos. La construcción de este tipo de curvas permite a los tomadores de decisiones identificar si, durante la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática como el ENSO, las fuentes hídricas están preparadas para suministrar la demanda suficiente a cada uno de los sectores o si es necesario tomar medidas alternas para suplir las necesidades experimentadas durante períodos secos.

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

Este trabajo final de maestría consolida los resultados obtenidos de la aplicación de diferentes metodologías, empleadas con el objetivo de determinar cómo es la dinámica de los eventos hidrológicos extremos en la cuenca del río Chinchiná y el efecto que ejerce la variabilidad climática sobre su comportamiento.

Con relación a la dinámica de los eventos extremos de precipitación, los resultados obtenidos para el ajuste de curvas de distribución de probabilidad, empleando el software AFINS 2.0, permitieron identificar que la función de distribución Generalized Extreme Value (GEV) mostró los mejores resultados teniendo en cuenta el criterio de máxima verosimilitud o probabilidad conjunta y el análisis gráfico. La espacialización de los datos mediante el uso del método de interpolación IDW, puso de manifiesto la mayor intensificación de eventos extremos en la zona noroccidental de la cuenca, particularmente en los municipios de Chinchiná y Palestina. Respecto a la influencia de patrones locales como la altitud sobre la intensidad de las lluvias extremas, se pudo concluir que es notoria una intensificación de estos eventos a partir de los 1225 m.s.n.m., hasta los 1905 m.s.n.m., rango considerado como el óptimo pluviométrico de la cuenca del río Chinchiná.

El análisis de curvas de distribución de probabilidad por condición hidrológica evidenció que, para períodos de retorno elevados, los extremos de lluvia durante la fase cálida del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (El Niño) tienden a ser de mayor intensidad que durante La Niña, mientras que, para bajos períodos de retorno, durante La Niña y bajo condiciones neutrales, los extremos de lluvia son mayores. Esto permitió concluir que durante los episodios cálidos y fríos del fenómeno ENSO, no se obtuvieron relaciones directas que afectaran los valores extremos y tuvieran un comportamiento característico de cada fenómeno: mayores precipitaciones durante La Niña y menores durante El Niño, sino que pueden existir otros fenómenos macroclimáticos que influyen en la dinámica de los extremos de la lluvia en la cuenca. El análisis realizado por períodos tridecadales de precipitación en la estación Cenicafé, evidenció intensificación de los eventos extremos

para bajos períodos de retorno cuando se analizan separadamente ciclos de 30 años de registros continuos de información.

Respecto a la evaluación de índices climáticos y análisis de tendencias, los resultados obtenidos con RClimdex probaron que, en las cuencas de alta montaña, existe gran variabilidad espacio-temporal en la precipitación que se refleja también en los índices climáticos de eventos extremos. Las tendencias, positivas y negativas, evidencian intensificación de estos eventos en algunas estaciones y reducción en otras, aspectos que coinciden con los estudios previos realizados a nivel nacional.

Los resultados de los índices climáticos de eventos extremos asociados con máximos de precipitación, sugieren una mayor intensificación en las estaciones localizadas en la cuenca media y baja; sin embargo, este comportamiento puede ser ocasionado por una mayor concentración de las estaciones en estas zonas con registros históricos más antiguos y de mejor calidad. En general, la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de precipitación, analizados mediante el cálculo de índices climáticos, ha mostrado un aumento en la mayoría de las estaciones de la cuenca con significancia estadística considerando un nivel de confianza del 90%.

También es importante concluir que existe una relación directa del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) con la ocurrencia del fenómeno de El Niño Oscilación de El Sur en sus dos fases: episodios cálidos (El Niño) y episodios fríos (La Niña), pues los resultados obtenidos de su análisis permitieron identificar que los períodos húmedos y secos más marcados durante el período 1981-2012, corresponden a épocas donde el fenómeno afectó gran parte del territorio colombiano, generando numerosas pérdidas tanto materiales como humanas. Esta relación existente es particularmente importante para estudios de proyecciones climáticas y predicciones.

Por último, con relación al ciclo diurno de la precipitación en la cuenca del río Chinchiná, se pudo evidenciar que durante el período 1981-2012, se presentaron incrementos de las lluvias horarias durante las primeras horas de la madrugada, particularmente entre la 1 y las 5 de la mañana; a partir de allí, las precipitaciones son menos frecuentes e intensas hasta aproximadamente la 1 de la tarde; en ese punto, las lluvias vuelven a retomar fuerza conforme aumentan las horas del día, alcanzando fuertes intensidades alrededor de las 3 p.m.

Respecto a la dinámica de los eventos extremos de caudal en la cuenca, los resultados obtenidos para el ajuste de curvas de distribución de probabilidad empleando el software AFINS 2.0, mostraron que, en general, la función Two Components Extreme Value (TCEV) es la que mejor representa el comportamiento de los extremos de caudal en la cuenca del río Chinchiná teniendo en cuenta los criterios de máxima verosimilitud, el análisis gráfico y la simplicidad de los modelos estadísticos. El análisis por condición hidrológica, puso de manifiesto que para períodos de retorno bajos (5, 10 y 25 años), se obtuvieron los mayores incrementos y reducciones durante los fenómenos de La Niña y El Niño respectivamente. Se observó un comportamiento característico de los impactos de las fases del Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur – ENSO sobre la región: aumento de los caudales durante La Niña y disminución durante El Niño. Fue evidente la intensificación de los eventos extremos de caudal en la estación El Retiro cuando se analizaron separadamente períodos de 30 años de registros continuos. Adicionalmente, los resultados comprueban que, durante el fenómeno de La Niña, las mayores afectaciones son evidentes en el comportamiento de las curvas de duración de caudales en la cuenca del río Chinchiná, con una incidencia mayor sobre todo en los caudales medios mínimos.

Todos estos factores, sumados a las características fisiográficas y geomorfológicas permiten que la escorrentía generada por episodios intensos de lluvia se disperse y por tanto las inundaciones son poco frecuentes. Sin embargo, la intensificación de eventos extremos y las altas y variables pendientes del terreno provocan que la cuenca sea más propensa a la ocurrencia de deslizamientos o avalanchas, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades más expuestas, localizadas en zonas de alto riesgo.

Los diferentes resultados obtenidos aportan información clave sobre la dinámica de los eventos hidroclimáticos extremos en la cuenca del río Chinchiná, los cuales deben analizarse en detalle por los diferentes actores para la definición de estrategias integradas que contribuyan a la toma de decisiones a nivel local. Así mismo, deben considerarse en los planes de gestión integral del recurso hídrico y en las medidas de adaptación al cambio y la variabilidad climática en la cuenca.

Se recomienda seguir con el monitoreo de la red de estaciones hidrometeorológicas, sobre todo las localizadas en el área de influencia de la cuenca del río Chinchiná, donde se resaltan aquellas pertenecientes a las redes automáticas telemáticas de Manizales y Caldas. La correcta manipulación y seguimiento de los datos permitirá que en un futuro se

pueda hacer un estudio más detallado, que conlleve a obtener conclusiones más precisas y significativas con relación al comportamiento de los eventos hidrológicos extremos en la región.

## Bibliografía

**Abaurrea, J. (2007).** *Fenómenos Extremos: Análisis y Caracterización*. Departamento de Métodos Estadísticos. Universidad de Zaragoza.

**Abdussalam, A. (2015).** Changes in indices of daily temperature and precipitation extremes in northwest Nigeria. *Science World Journal Vol. 10 (No 2)*, p. 18-26.

**Acevedo Aristizábal, Lina Alexandra. (2009).** *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

**Aguilar, E. et al. (2005),** Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003, *J. Geophys. Res.*, *110*, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.

**Alcaldía de Manizales. (2003).** Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales 2003-2005. Disponible en: [www.manizales.gov.co](http://www.manizales.gov.co)

**Alexander, L. V. et al. (2006),** Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *J. Geophys. Res.*, *111*, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.

**Ang, A. H-S. & Tang, W. H. (1984).** Probability concepts in engineering, planning and design. Volume II: Decision, Risk and Reliability. New York: John Wiley and Sons.

**Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D. & Ruiz, J. F. (2013).** Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo de El Niño, La Niña Oscilación del Sur (ENSO). *Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático. Subdirección de Meteorología – IDEAM*, 33 p.

**Armenta, G. & Ruiz, J. (2012).** Indicadores de eventos extremos en los escenarios de Cambio Climático para el periodo 2011-2040. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

**Asia-Pacific Network for Global Change Research (APN). (2007).** *Development of Indices and Indicators for Monitoring Trends in Climate Extremes and its Application to Climate Change Projection*. Seúl, República de Korea.

**Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y. & Gutiérrez Serna, S. E. (2014).** Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, Vol. 18, No. 41, p. 120-133.

**Ávila Parra, K. & Martín Vide, J. (2013).** Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental. *Cuadernos Geográficos*. Vol. 52, No 1, p. 69-83.

**Banco de la República. (2007).** El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia. Bogotá.

**BBC Mundo. (2011).** ¿Cómo ocurre El Niño y La Niña? Londres, Inglaterra. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nDJUPk6iVRQ>

**Benaïchata, L., Mederbal, K. & Chouieb, M. (2015).** Climate change detection with extreme weather factors concerning Algeria. *European Scientific Journal*, vol.11, No.17, p. 220-232.

**Bojariu, R. & Gimeno L. (2003).** Modelling and predictability of the North Atlantic Oscillation. *Earth Sci. Rev.*, 63, p. 145-168.

**Botero Hernández, B. A. (2015).** Análisis estadístico de variables hidroclomáticas. *Análisis de homogeneidad*. Manizales, Colombia: Especialización en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia.

**Breña Puyol, A. F. & Jacobo Villa, M. A. (2006).** *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

**Burgos Fonseca, Y. & González García, I. (2012).** Análisis de indicadores de extremos climáticos en la isla de Cuba. *Revista de Climatología ISSN 1578-8768 Vol. 12*, p. 81-91.

**Campos Aranda, D. (1992).** Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. San Luis Potosí, México. p. 22-23.

**Campos Aranda, D. (1998).** Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina.

**Cardona, F., Ávila, A., Carvajal, Y. & Jiménez, H. (2013).** Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *Tecnológicas*, ISSN 0123-7799, Vol. 17, No. 32, p. 85-95.

**Chow, V. (1953).** Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois Engineering Experiment Station. *Bulletin Series N° 414*.

**Chow, V. (1964).** Statistical and probability analysis of hydrological data. Part I. Frequency analysis. En V. T. Chow, *Handbook of applied hydrology: A Compendium of Water-resources Technology*, 1468 p. McGraw Hill book Company.

**Chow, V., Maidment, D. & Mays, L. (1993).** Hidrología Aplicada. Santa Fe de Bogotá: McGraw Hill.

**Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2009).** Cambio Climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas.

**Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. (2005).** Caracterización de la cuenca del Río Chinchiná. Manizales: CORPOCALDAS.

**Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS. (2013).** Plan De Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná en el Departamento de Caldas. Síntesis del diagnóstico.

**CORPOCALDAS, ASOCARS & Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. (2015).** Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná en el departamento de Caldas- POMCA Chinchiná. Manizales.

**CORTOLIMA, Universidad Nacional de Colombia & Centro de Estudios para la Prevención de Desastres. (CEPREVÉ). (2015).** INFORME FINAL. Contrato Interadministrativo No. 052-2013. Ibagué.

**Costa dos Santos, C., Neal, C., Rao, T. & da Silva, B. (2011).** Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over Utah, USA. *International Journal of Climatology*, p. 1813 – 1822.

**Costa dos Santos, C. A. (2014).** Recent changes in temperature and precipitation extremes in an ecological reserve in federal district, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 29, No. 1, p. 13-20.

**Dekking, F., Kraaikamp, C., Lopuhaä, H. & Meester, L. (2005).** Testing Hypotheses. En C. Kraaikamp, F. M. Dekking, H. P. Lopuhaä, & L. E. Meester, *A Modern Introduction to Probability and Statistics. Understanding Why and How*. p. 373-394. Netherlands: Springer.

**Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2015).** Indicadores demográficos de Caldas. Información estadística.

**Donat, M. G. et al. (2013),** Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset, *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 118, p. 2098–2118, doi:10.1002/jgrd.50150.

**Dore, MH. (2005).** Climate Change and changes in global precipitation patterns: What do we know? St Catharines, Canada: Climate Change Laboratory, Brock University.

**Duque, E. (2013).** Geología en la cuenca del río Chinchiná. Comunicación personal. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

**Duque, E., Duque, G. & Murillo, C. (2009).** Geomecánica de laderas en Manizales. Foro: *Gestión del riesgo por inestabilidad de terrenos en Manizales*, 13 de agosto de 2009, Manizales.

**Eslava, J. (1993).** Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol.18, No.71, p. 507-538. Bogotá.

**Esteban Vea, P., Prohom Durán, M. & Aguilar, E. (2012).** Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2000). *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*. Vol. 167, p. 87-106.

**Fallas, J & Valverde, C. (2007).** Inundaciones en Costa Rica y estudio de caso en una cuenca forestada del Caribe Costarricense: Evidencia de los últimos 34 años. *Congreso Geoprosesamiento 2007. Universidad Estatal a Distancia*. San José, Costa Rica.

**Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo del Eje Cafetero – FOREC et al. (2000).** Construcción de un ordenamiento territorial para el desarrollo sostenible de la ecorregión del eje cafetero. Ministerio del medio ambiente.

**Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. & Peterson, T. (2002).** Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, Vol. 19, p. 193-212.

**Garreaud, Vuille, Compagnucci & Marengo. (2008).** Present-day South American climate. *PALAEO3 Special Issue Vol. 281, p. 180-195*.

**Gbode, I., Akinsanola, A. & Ajayi, V. (2015).** Recent Changes of Some Observed Climate Extreme Events in Kano. *International Journal of Atmospheric Sciences*.

**González Salazar, A., Juárez, A. & Loza Ramírez, L. (2008).** Curvas de Intensidad, Duración y Período de Retorno como herramienta de análisis en la prevención de riesgos por precipitaciones intensas en la zona metropolitana de Guadalajara. *Sincronía. ISSN 1562-384X*, No. 2.

**Groisman, P., Knight, R., Easterling, D., Karl, T., Hegerl, G. & Razuvaev, V. (2005).** Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. *Journal of Climate*, Vol. 18, p. 1326-1350.

**Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2007).** Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza.

**Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2008).** El Cambio Climático y el agua. Ginebra, Suiza.

**Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático – IPCC. (2012).** Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Ginebra. Suiza.

**Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2013).** Resumen Técnico. Cambio climático 2013. Bases físicas. *Contribución de Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf).

**Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2014).** *Climate change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

**Gunawardhana, L. & Al-Rawas, G. (2014).** Trends in extreme temperature and precipitation in Muscat, Oman. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014*. Bologna, Italy. IAHS Publ. 364.

**Haylock, M., Peterson, T., Alves, L., Ambrizzi, T., Anunciação, Y., Baez, J., . . . Vincent, L. (2005).** Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate Vol. 19*, p. 1590-1512.

**Herzog, Martínez, Jorgense & Tiessen. (2013).** Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales. *Inter-American institute for Global Change Research and Scientific Committee on Problems of the Environment*, p. 348.

**Hipel, K. & McLeod, A. (1994).** Chapter 23. Nonparametric tests for trend detection. En K. Hipel, & A. McLeod, *Time series modelling of water resources and environmental systems* p. 853 - 938. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

**Hoyos, Escobar, Restrepo, Arango & Ortiz. (2013).** Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of and extreme weather event. *Applied Geography. Vol. 39*, p. 16–25.

**Hurrell & Van Loon. (1997).** Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change Vol. 36*, p. 301–326.

**Hurrell, J.W., Y. Kushnir, M. Visbeck & G. Ottersen. (2003).** An Overview of the North Atlantic Oscillation. In *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact, Geophys. Monogr., Vol. 134 edit by J.W.*

**INGEOMINAS. (1993).** Mapa geológico de Caldas. Manizales.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales - IDEAM (1998).** Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno Frío del Pacífico (La Niña) en Colombia en el segundo semestre de 1998 y primer semestre de 1999. Bogotá: IDEAM, 88 p.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2005).** *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2007).** Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Subdirección de Meteorología. Bogotá D.C. – Colombia.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2008).** Informe sobre evaluación de los recursos hídricos de Colombia. Bogotá.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales – IDEAM. (2009).** Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Subdirección de meteorología. Bogotá.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010).** Estudio Nacional de Agua 2010. Bogotá.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010).** Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales – IDEAM. (2014).** Aspectos teóricos de la Metodología del Análisis Compuesto (AC) aplicada a estudios de variabilidad climática. Bogotá.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2015).** Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C., 2015. 496 p.

**Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2004).** Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Caldas. Bogotá. 2ª edición.

**Instituto Oceanográfico de la Armada - INOCAR. (2011).** El Niño: Generalidades. Guayaquil – Ecuador.

**Jaramillo, A. (2005).** *Clima Andino y Café en Colombia*. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFE.

**Jones, P.D., Osborn, T. J. & Briffa, K. R. (2003).** Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface climate parameters, in *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Geophys. Monogr., Vol. 134, edited by J.W. Hurrell et al., p. 51-62.*

**Kamiguchi, K., Arakawa, O. & Kitoh, A. (2011).** Long-term Changes in Japanese Extreme Precipitation Analyzed with APHRO\_JP\_EX. *Global Environmental Research, Vol. 15, p. 91-99.*

**Katz, R. & Brown, B. (1992).** Extreme Events in a Changing Climate: Variability Is More Important Than Averages. *Climatic Change Vol. 21*, DOI: 10.1007/BF00139728, p. 289-302.

**Keggenhoff, I., Elizbarashvili, M., Amiri-Farahani, A. & King, L. (2014).** Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and Climate Extremes Vol. 4*, p. 75-85.

**León, Zea & Eslava. (2000).** Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb. Vol. 1*, p. 31-38. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

**Madden & Julian. (1971).** Detection of a 40-50 days oscillation in the zonal wind in the tropical pacific. *J. Atmos. Sci., Vol. 28*, p. 702-708.

**Mantua & Hare. (2002).** The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography Vol. 58*. p. 35-44.

**Marigi, S., Njogu, A. & Githungo, W. (2016).** Trends of Extreme Temperature and Rainfall Indices for Arid and Semi-Arid Lands of South Eastern Kenya. *Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol. 4*, p. 158-171.

**Marín, J.P, Ocampo, O.L & Vélez, J.J. (2014).** Eventos Hidroclimáticos extremos en cuencas andinas: Caso de estudio cuenca del río Chinchiná. *XXI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Villa de Leyva, Boyacá, 25 al 27 de septiembre de 2014.

**Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A. & Cánovas, A. M. (2009).** El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. *Revista Habanera de Ciencias Médicas, Vol. 8, No. 2*, p.19.

**Martínez, Ruiz, Andrade, Blacutt, Pabón, Jaimes, Leon, Villacís, Quintana, Montealegre & Euscátegui. (2013).** Sistemas del clima de los Andes tropicales. En: *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales*. p. 117-130.

**McKee, T.B., N.J. Doesken & J. Kleist. (1993).** The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17 a 22 de enero de 1993. American Meteorological Society, Boston, p. 179–184.

**Mejía, Mesa, Poveda, Vélez, Hoyos, Mantilla, Barco, Cuartas, Montoya & Botero. (2000).** Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *XIV Seminario de Hidráulica e Hidrología, 7-9 de septiembre*, Villa de Leyva, Boyacá.

**Ministerio de hacienda y crédito público. (2010).** Decreto 4831. Bogotá.

**Mitchell & Wallace. (1992).** The annual cycle in the equatorial convection and sea surface temperature. *Journal of Climate Vol. 5*, p. 1140-1156.

- Monsalve Sáenz, G. (2004).** *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Montealegre, E. & J. Pabón. (2002).** Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. *Meteorol. Colomb. Vol. 5, p. 59-65. ISSN 0124-6984*. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Montealegre, E. (2005).** *Escalas de variabilidad Climática*. Instituto de Hidrología Meteorología y Medio Ambiente. IDEAM. Bogotá.
- Naranjo Sarmiento, L. A. (2016).** *Influencia de la Oscilación del Sur - El Niño y La Niña sobre la temperatura y la velocidad del viento en la subcuenca de los ríos Blancos y del sector Cordón del Plata - Argentina*. Universidad Internacional de Andalucía.
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2013).** Ciclones Tropicales: Guía de preparación. *Servicio Nacional de Meteorología*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2015).** National Weather Service. Recuperado el 19 de febrero de 2015, de Climate Prediction Center: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.
- Ocampo, O. L. (2012).** Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ocampo, O. L. & Vélez, J. J. (2014).** Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 13, No. 24*, p. 43–58.
- Ocampo, O., Vélez, J. & Londoño, A. (2014).** Análisis de vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Chinchiná. Universidad Nacional de Colombia.
- Ocampo, O., Vélez, J. & Marín, J. (2014).** Intensificación de eventos extremos de precipitación en cuencas andinas colombianas y su influencia en el régimen de caudales: Caso del río Chinchiná. *XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago, Chile.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2005).** Tiempo, Clima, Agua y Desarrollo Sostenible. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2009).** La información sobre el clima, un instrumento para reducir los riesgos de desastres. *Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima*. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2011).** El Clima y Tú. Ginebra, Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (2011).** Resumen de conclusiones y cifras actualizadas sobre el cambio climático. Ginebra, Suiza.

**Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012).** El tiempo, el clima, el agua: Motores de nuestro futuro. Ginebra, Suiza.

**Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012).** *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario.* Ginebra, Suiza.

**Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2013).** *El estado del clima mundial 2001-2010. Un decenio de fenómenos climáticos extremos.* Ginebra, Suiza.

**Oria, C. (2009).** Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático en la cuenca del río Mantaro. Proyecto de adaptación al retroceso acelerado de los glaciares en los Andes tropicales –PRAA. *Memoria Técnica. Componente Meteorológica – SENAMHI – Perú.*

**Oswaldo Benavides, Henry., Mayorga Márquez, Ruth. & Hurtado Moreno, G. (2007).** Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RCLimdex. IDEAM–METEO/007-2007 Nota Técnica del IDEAM. Subdirección de Meteorología. Diciembre 2007.

**Pabón Caicedo J.D. (2012).** Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Vol. 36, No. 139, p. 261-278.* ISSN 0370-3908.

**Pabón, Eslava & Gómez. (2001).** Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología colombiana. Vol. 4,* p. 47-59.

**Pabón, J. & Rivera. (1993).** Análisis de la variabilidad interanual de los caudales de los ríos Magdalena y Cauca. *Atmósfera, Vol. 20, p. 1-11.*

**Pabón, Zea, León, Montealegre, Hurtado & González. (1998).** La Atmósfera, El Tiempo y El Clima. En: *El Medio Ambiente en Colombia.* Bogotá: IDEAM. p. 35-91.

**Peterson, T. C., X. Zhang, M. Brunet-India & J. L. Vázquez-Aguirre. (2008).** Changes in North American extremes derived from daily weather data, *J. Geophys. Res., Vol. 113, D07113, doi:10.1029/2007JD009453.*

**Pettitt, A. (1979).** A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Journal of Applied Statistics. Vol. 28, No. 2, p. 126-135.*

**Pinilla, M.C., Pinzón, C. (2012).** Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RCLimdex, en la parte central del departamento de Santander, Colombia. Grupo técnico. Convenio Fundación Natura Colombia- ISAGEN E.S.P.

**Poveda et al. (2011).** Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots, *Climate Dynamics, Vol. 36, p. 11-12.*

**Poveda, G. (2004).** La hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la escala Interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Ciencia Vol. 28, No. 107, p. 201-222.*

**Poveda G. & O. J. Mesa. (1999).** La corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del Chocó) y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Vol. 23, No. 89, p. 517-528. ISSN 0370-3908.*

**Poveda, G., O. Mesa, P. Agudelo, J. Álvarez, P. Arias, H. Moreno, L. Salazar, V. Toro & S. Vieira. (2002).** Influencia del ENSO, oscilación Madden-Julían, ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diurno de precipitación en los Andes Tropicales de Colombia. *Meteorol. Colomb. Vol. 5, p. 3-12. ISSN 0124-6984.* Bogotá, D.C. – Colombia.

**Poveda, Vélez, Mesa, Hoyos, Mejía, Barco & Correa. (2002).** Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología colombiana, Vol. 6, p.121-130.*

**Poveda, G., Turbay, S., Vélez, J. J., Ocampo, O. L., Acevedo, E. C. & Bedoya, M. (2014).** Vulnerabilidad y adaptación a las variaciones climáticas extremas en la cuenca de la quebrada Los Cuervos, afluente del río Chinchiná, Colombia.

**Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W. & Flannery, B. (1992).** *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, 2nd Edition.* Cambridge.

**Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2000).** Panorama del Impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe.

**Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. (2004).** La reducción de riesgos de desastres: Un Desafío para el desarrollo, un informe mundial. Dirección de Prevención de Crisis y de Recuperación.

**Puertas, O. & Carvajal, Y. (2008).** “Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer”. *Revista Ingeniería y Desarrollo, Vol. 23, p. 104-118.*

**Restrepo, L. & Gonzáles, J. (2007).** De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, Vol. 20, No. 2, p. 183-192.*

**Roy & Rouault. (2013).** Spatial patterns of seasonal scale trends in extreme hourly precipitation in South Africa. *Applied Geography Vol. 39, p. 151-157.*

**Saavedra, J. (2001).** Planificación Ambiental de los Recursos Forestales en la Región de la Araucanía, Chile. Definición de las Unidades Homogéneas de Gestión. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 342 p.

**Salazar Oliveros, J. C. (2016).** Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales (CDC) en cuencas no instrumentadas. Caso de aplicación para Colombia en

los departamentos de Santander y Norte de Santander. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

**Santos, J. L. (2004).** *RClimdex (1.0) Manual del Usuario. Versión en español.* Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño- CIIFEN.

**Satyanarayana, T., Rao, A., Rao, V., Manikandan, N. & Venkateswarlu, B. (2010).** Trends of Extreme Temperature and Rainfall Indices for selected locations in India. *Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad-500 059.*

**Sensoy, S., Türkoğlu, N., Akçakaya, A., Ekici, M., Demircan, M., Ulupinar, Y. et al. (2013).** Trends in Turkey climate indices from 1960 to 2010. *6th Atmospheric Science Symposium, Istanbul, Turkey.*

**Serrano Vincenti, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E. & Villacís, M. (2012).** Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el distrito metropolitano de Quito. *La Granja, Revista de Ciencias de la Vida, Vol. 16, No. 2, p. 23-47.*

**Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. (2014).** El Fenómeno El Niño en el Perú. *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – PLANAGERD 2014-2021 (Objetivo Nacional y Objetivo Estratégico 1).*

**Sohrabi, M., Marofi, S. & Ababaei, B. (2009).** Investigation of temperature and precipitation indices by using RClimDex and R software in Semnam province. *International Water Resource Conference.* Shahroud, Iran.

**Summerfield, M. A. (1991).** *Global Geomorphology.* Editorial Longman Scientific and Technical; Inglaterra.

**University Corporation for Atmospheric Research – UCAR. (2017).** Niño SST indices (Niño 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.

**Velasco Hernández, M., Morales Acoltzi, T., Estrella Chulim, N. G., Díaz Ramos, R., Juárez Sánchez, J. P., Hernández Vázquez, M. & otros. (2015).** Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol. 6, No. 7, p. 1587-1599.*

**Velásquez, A. & Rosales, C. (2002).** Los pasos de El Niño en Colombia 1980 – 2001. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

**Vélez, J., Orozco, M., Duque, N. & Aristizábal, B. (2015).** *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos.* Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Facultad de Administración.

**Wang, W., Chen, X., Shi, P. & Van Gelder, P. (2008).** Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China.

*Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, Vol. 12 No. 1, p. 207-221.*

**Yazid, M. & Humphries, U. (2015).** Regional Observed Trends in Daily Rainfall Indices of Extremes over the Indochina Peninsula from 1960 to 2007. *Climate Vol. 3*, p. 168-192.

**Zhang, X. & Yang, F. (2004).** *RClimDex (1.0) Manual del Usuario. p. 1–22.* Climate Research Branch. Environment Canadá. Downsview, Ontario, Canadá.