

**ESTUDIO DE LA  
HIDROMETEOROLOGÍA  
MENSUAL DE LA CUENCA  
ALTA DEL RÍO CAUCA EN  
EL DEPARTAMENTO DEL  
VALLE DEL CAUCA  
DURANTE LAS FASES  
EXTREMAS DEL  
FENÓMENO ENOS**

**IRENE AYALA ARBOLEDA  
CÓDIGO 201331561**

**YESID CARVAJAL ESCOBAR. PhD.**



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de los Recursos Naturales y del  
Ambiente  
Programa Académico de Ingeniería de  
Agrícola  
Santiago de Cali, Febrero 2017.**

**ESTUDIO DE LA HIDROMETEOROLOGÍA MENSUAL DE LA CUENCA ALTA  
DEL RÍO CAUCA EN EL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA  
DURANTE LAS FASES EXTREMAS DEL FENÓMENO ENOS**

**Trabajo de Grado para Optar por el Título de:  
Ingeniera Agrícola**

**IRENE AYALA ARBOLEDA**

**DIRECTOR  
PHD. YESID CARVAJAL ESCOBAR**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA  
2017**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

**Presidente del jurado:** \_\_\_\_\_

**Jurado:** \_\_\_\_\_

**Jurado:** \_\_\_\_\_

*Santiago de Cali, 3 de Febrero del 2017.*

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

*... A mi familia, a Angelo por su paciencia y apoyo; al grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos- IREHISA de la escuela EIDENAR de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, por el apoyo a esta investigación; a la Universidad del Valle, por esta grandiosa oportunidad; a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y al IDEAM por los registros históricos de las estaciones climáticas, y por último y no menos importante a los profesores Yesid Carvajal, Olga Lucia Baquero y Henry Jiménez por sus consejos y aportes.*

*A todos muchas gracias.*

## LISTADO DE SIGLAS

**CVC** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.  
**ENOS** El Niño Oscilación del Sur.  
**ZCIT** Zona de Convergencia Intertropical.  
**TSM** Temperatura Superficial del Mar.  
**SOI** Índice de Oscilación del Sur.  
**IDEAM** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.  
**IPCC** Panel Intergubernamental del Cambio Climático.  
**IREHISA** Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos.  
**MEI** Índice Multivariado del ENOS.  
**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration.  
**NOA** Oscilación del Atlántico Norte.  
**ONI** Índice Oceánico del Niño.  
**FOES** Funciones Ortogonales Empíricas.  
**ACC** Análisis de Correlación Canónica.  
**PRICC** Plan Regional Integral de Cambio Climático de Bogotá – Cundinamarca.  
**GFDL** Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.  
**HadCM2** Integrated assessment of Hadley Centre.  
**ECHAM** The atmospheric component of the MPI-M Earth System Model.  
**CEPAL** Comisión Económica para América Latina y el Caribe.  
**CENEPRED** Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.

## RESUMEN

Frente a los impactos actuales y futuros del cambio climático, existe una necesidad de obtener información sobre la naturaleza y el alcance de los posibles riesgos e impactos asociados al cambio climático. En esta dirección, son esenciales los análisis y estudios de las respuestas de los sistemas a los cambios en el clima.

De acuerdo con esto, resulta apropiado contar con información correcta y herramientas que faciliten la toma de decisiones frente al cambio climático; el trabajo de grado busca proponer una metodología para determinar las alteraciones de la precipitación durante los fenómenos El Niño y La Niña, con base en los datos históricos de las estaciones meteorológicas del Valle del Río Cauca.

Se presenta en este trabajo de grado una descripción de los antecedentes relacionados con el estudio de la Hidroclimatología de la cuenca alta del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca. Como parte del marco conceptual, se sintetiza sobre los aspectos relativos al clima, la variabilidad climática y sus escalas de variación, así como las características más relevantes del Ciclo El Niño, La Niña – Oscilación del Sur – ENOS. Se establecen además de forma resumida las particularidades del efecto de estos fenómenos sobre el clima de Colombia y de la zona de estudio.

Se adoptó en este estudio como índice de identificación de los fenómenos de El Niño y La Niña el correspondiente a las anomalías mensuales de la temperatura superficial del océano en la región niño 3-4, se presentan las características más relevantes del mismo y se categorizan los fenómenos de presencia ENOS con base en este índice.

Se describió los aspectos metodológicos correspondientes a las características de la base de datos utilizada; la descripción general de las series pluviométricas seleccionadas y algunas estadísticas relativas a la distribución espacial de las series y los datos faltantes, así como las características de los algoritmos desarrollados de acuerdo con la metodología desarrollada por Montealegre (2012).

Los productos obtenidos del desarrollo de la metodología, durante la fase de cálculo fueron la representación gráfica de las anomalías de precipitación derivados de los eventos El Niño y La Niña y el balance de agua de las estaciones Juanchito y Anacaro. Se desarrolló el análisis de los resultados y se estableció las características de los mapas de alteración pluviométrica, durante los eventos El Niño y La Niña a nivel bimestral de temporada seca y lluviosa y meses de transición y se formuló las conclusiones generales de este trabajo de grado.

**Palabras Clave:** ENOS, Variabilidad Climática, Hidroclimatología.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>10</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>12</b>
<b>3. OBJETIVOS.</b>	<b>13</b>
3.1 Objetivo General.	13
3.2 Objetivos Específicos.	13
<b>4. ANTECEDENTES.</b>	<b>14</b>
<b>5. MARCO TEÓRICO.</b>	<b>18</b>
5.1 El Clima.	18
5.1.2 Variabilidad Climática.	18
5.1.3 Escalas de la Variabilidad Climática.	18
5.2 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).	19
5.2.1 Fases fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS).	20
5.2.2 Efecto del fenómeno ENOS en Colombia.	22
5.2.3 Índices de mayor significación utilizados en ENOS.	23
5.3 Vulnerabilidad.	26
5.4 Adaptación.	27
5.5 Resiliencia.	27
5.6 Índices Categóricos.	28
5.7 Balance Hídrico.	28
<b>6. METODOLOGÍA.</b>	<b>30</b>
6.1 Descripción del área de estudio.	32
6.1.1 Zona de estudio:	32
6.1.2 Periodos Analizados.	35
6.1.3 Promedio multianual mensual	36
6.1.4 Meses de afectación.	36
6.1.5 Afectación trimestral.	38
6.2 Cálculo de índices de anomalías de Precipitación.	40
6.2.1 Índice puntual (no acumulado).	40
6.2.2 Índice Acumulado.	40
6.2.3 Tabla de Frecuencia Absoluta y Frecuencia relativa.	41
6.2.4 Condiciones de mayor probabilidad.	41
6.2.5 Determinación cuantitativa de las áreas afectadas para la precipitación.	42
6.3 Cálculo del índice de anomalías Caudales de escurrimiento del río Cauca.	42
6.3.1 Índice puntual (no acumulado).	44
6.3.2 Índice Acumulado.	44

6.3.3 Tabla de Frecuencia Absoluta y Frecuencia relativa.	45
6.3.4 Condiciones de mayor probabilidad.	45
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>46</b>
7.1 Índices Categóricos Precipitación.	46
7.1.1 Fenómeno El Niño.	46
7.1.1.1 Descripción de los mapas correspondientes a la condición más probable de afectación del patrón pluviométrico durante la ocurrencia de fenómeno El Niño.	47
7.1.2 Fenómeno La Niña.	54
7.1.2.1 Descripción de los mapas correspondientes a la condición más probable de afectación del patrón pluviométrico durante la ocurrencia de fenómenos La Niña.	56
7.2 Índices Categóricos Caudales Río Cauca.	63
7.2.1 Fenómeno El Niño.	63
7.2.1 Fenómeno La Niña.	68
7.3 Escorrentía mensual del Río Cauca.	72
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>76</b>
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>79</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.1:</b> Temperatura del agua del Océano en colores (rojo-cálido; azul-fresco).....	17
<b>Figura 5.1:</b> Fases del Fenómeno ENOS.....	20
<b>Figura 5.2:</b> Mapas Globales centrados en el Océano Pacífico.....	23
<b>Figura 5.3:</b> Regiones de desarrollo y monitoreo del fenómeno ENOS sobre el Océano.....	24
<b>Figura 5.4:</b> Ubicación de los sitios en las que se mide la presión atmosférica.....	25
<b>Figura 6.1:</b> Zona de estudio.....	29
<b>Figura 6.2:</b> Esquema metodológico del estudio.....	30
<b>Figura 6.3:</b> Mapa de la zona de estudio. Cuenca alta del Río Cauca por su paso por el Departamento del Valle del Cauca. ....	33
<b>Figura 6.4:</b> Precipitación media mensual multianual Estación El Paraíso. ....	35
<b>Figura 6.5:</b> Algoritmo utilizado en este estudio para determinar los índices categóricos.....	38
<b>Figura 6.6:</b> Caudal medio mensual multianual Estación Juanchito y Anacaro 1961-2012...	42
<b>Figura 6.7:</b> Caudal medio mensual multianual Estación Anacaro 1961-2012.....	42
<b>Figura 7.1:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el período Julio-Agosto 1997-1998...	49
<b>Figura 7.2:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el mes de Septiembre 2009-2010.....	49
<b>Figura 7.3:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Octubre-Noviembre 1991-1992.....	50
<b>Figura 7.4:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Enero-Febrero, 1994-1995.....	51
<b>Figura 7.5:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Junio, 1986-1987.....	52
<b>Figura 7.6:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Julio-Agosto 2010-2011....	56
<b>Figura 7.7:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Septiembre, 1984-1985....	58
<b>Figura 7.8:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Enero-Febrero, 1998-1999..	59
<b>Figura 7.9:</b> Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Marzo, 1995-1996.....	60
<b>Figura 7.10:</b> Caudal medio mensual Estación La Balsa Eventos El Niño y Normal.....	61
<b>Figura 7.11:</b> Caudal medio mensual Estación Juanchito Eventos El Niño (1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) y Normal (1985-1986). ....	64
<b>Figura 7.12:</b> Caudal medio mensual Estación Anacaro, El Niño (1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) y Normal (1985-1986). ....	65
<b>Figura 7.13:</b> Caudal medio mensual Estación Juanchito, Eventos La Niña (1998-1999; 2007-2008; 2010-2011) y Normal (1985-1986). ....	69
<b>Figura 7.14:</b> Caudal medio mensual Estación Anacaro, Eventos La Niña (1998-1999; 2007-2008; 2010-2011) y Normal (1985-1986). ....	70
<b>Figura 7.15:</b> Balance de escorrentía del río Cauca, caudales mensuales multianuales.....	73

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 6.1:</b> Estaciones hidrométricas seleccionadas periodo 1962-2012. ....	32
<b>Tabla 6.2:</b> Porcentaje del área de la Cuenca en el Departamento.....	32
<b>Tabla 6.3:</b> Algoritmo para identificar la serie de precipitación de las estaciones. ....	34
<b>Tabla 6.4:</b> Años de eventos ENOS, región Niño 3-4. ....	36
<b>Tabla 6.5:</b> Meses de Afectación del fenómeno El Niño (primer año), información suministrada por la NOAA. ....	36
<b>Tabla 6.6:</b> Meses de Afectación del fenómeno El Niño (Año Hidrológico), para la estación El Vesubio. ....	37
<b>Tabla 6.7:</b> Rango de Variación del Índice Acumulado (Montealegre, 2012). ....	40
<b>Tabla 6.8:</b> Rango de Variación del Índice Acumulado Caudales (Montealegre, 2012).....	44
<b>Tabla 7.1:</b> Datos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación estacional de las lluvias. ....	46
<b>Tabla 7.2:</b> Condición más probable de afectación durante la ocurrencia de ENOS, Evento El Niño.....	47
<b>Tabla 7.3:</b> Datos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación pluviométrica. ....	54
<b>Tabla 7.4</b> Condición más probable de afectación durante la ocurrencia de ENOS, Evento La Niña.....	55
<b>Tabla 7.5:</b> Datos porcentuales Estación Juanchito, Evento El Niño. ....	63
<b>Tabla 7.6:</b> Datos porcentuales Estación Anacaro Evento El Niño.....	63
<b>Tabla 7.7:</b> Datos porcentuales Estación Juanchito, Evento La Niña.....	67
<b>Tabla 7.8:</b> Datos porcentuales Estación Anacaro, Evento La Niña.....	68
<b>Tabla 7.9:</b> Balance y datos de caudales mensuales multianuales de las estaciones Anacaro y Juanchito (m <sup>3</sup> /s) .....	72

## 1. INTRODUCCIÓN.

Desde el decenio anterior se han señalado evidencias del calentamiento global y de cambio climático generadas por procesos naturales como por actividades antrópicas. Estos fenómenos han sido muy notorios hacia finales del siglo XX y serán más marcados en la medida que trascorra el siglo XXI, cuando afectarán considerablemente los ecosistemas y a los seres humanos de diferentes regiones del planeta (Pabón, 2012). El cuarto informe de Evaluación del Panel intergubernamental de Expertos sobre cambio climático (IPCC, 2007) sustenta que el calentamiento global trae asociado fenómenos como el ascenso del nivel de los océanos y la pérdida de biodiversidad.

La variabilidad climática y el cambio climático generan frecuentemente anomalías de precipitación (Sedano *et al.*, 2012), que impactan de manera negativa en ecosistemas y sectores socioeconómicos del país, con pérdidas de vidas humanas, de bienes, migraciones masivas, degradación ambiental, escasez de alimentos, de energía, agua y otras necesidades básicas, donde el fenómeno de origen meteorológico como El Niño-Oscilación Sur (ENOS) aumentarán de magnitud y frecuencia (Cardona *et al.*, 2013). Estas anomalías han dinamizado el ciclo hidrológico en la región principalmente por dos factores: 1) hay una mayor radiación solar, causada por su ubicación en la zona ecuatorial, y 2) existe una fuerza activa de gravedad en la región, debido a que la cordillera de los Andes se divide en tres al ingresar al país (Ávila, Carvajal & Gutiérrez, 2014).

Todos estos impactos han generado que, durante las últimas décadas se encuentren en Colombia diferentes estudios en los cuales se trata de evidenciar los efectos espacio temporales de la precipitación y temperatura de las dos fases del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS) (Enríquez, 2014).

Debido a que el ENOS ha generado una reducción de la precipitación en algunas regiones del territorio colombiano donde es posible iniciar un proceso de desertificación con la consecuente reducción del área de tierra productiva en el país (IDEAM, 2010), generando de esta manera impactos irreversibles en los procesos productivos agrícolas. Los cambios de temperatura del aire y de precipitación formarán cambios en los patrones de generación de plagas y enfermedades en plantas y animales (Carvajal *et al.*, 2005). Con relación al comercio nacional e internacional habría alteraciones, puesto que se crearían algunas ventajas competitivas por regiones, si existiera la voluntad política para la adaptación a los cambios climáticos, con lo que se facilitaría rivalizar frente a otras regiones o países.

Colombia por ser un país, ubicado en la Franja Intertropical de Convergencia (FIC) favorece e intensifican el desarrollo de precipitaciones torrenciales, así como desabastecimiento del recurso hídrico (Puertas & Carvajal, 2008), y por su accidentada orografía, es un país susceptible a catástrofes y desastres naturales, los cuales son producto del 90% a fenómenos hidrometeorológicos (Carvajal *et al.*, 1998). Se debe mencionar, el incremento de los deslizamientos, remociones de masa, erosión, crecientes e inundaciones, durante La Niña; y los incendios forestales y la sequía durante El Niño, que son quizás, los más silenciosos y

peor comprendidos de los desastres naturales, debido a que su influencia espacio-temporal amplia, afectando a un mayor número de personas y regiones (Carvajal, Jiménez & Materón, 1999). Si los efectos de los fenómenos extremos se incrementan, el país se verá expuesto a eventos de desastre de origen hidrometeorológico, por lo tanto deben eliminarse prácticas sociales que incrementan la vulnerabilidad. La ONU y el Banco Mundial reportan a Colombia como el tercer país de mayor riesgo climático en el mundo, evidenciando la urgencia de incorporar una concepción de resiliencia en los procesos de planificación del desarrollo, en todos los ámbitos de la sociedad (Sedano *et al.*, 2012).

El Valle del Cauca es uno de los departamentos más afectados por su cercanía al Océano Pacífico, zona de influencia del fenómeno ENOS (Carvajal *et al.*, 1998). Esto se debe a que presenta una gran variedad climática debido a su diversidad de pisos térmicos. Además de los factores generales de la circulación global y del cambio en la posición del sol durante el año, la topografía, la convección profunda, la cercanía a la costa y la vegetación, son los principales factores que gobiernan el clima local (Carvajal & Segura, 2005).

La agricultura es el principal renglón en la economía de la región Vallecaucana, destacándose por ser la más tecnificada debido a su implementación de monocultivos. Por lo antes mencionado por Carvajal (2005), el Valle del Cauca sufre los efectos de los eventos derivados de la variabilidad climática, que repercute sobre las condiciones socioeconómicas de la región, por lo cual su entendimiento y comprensión permite mitigar efectos adversos y obtener los beneficios de una mejor predicción climática (Carvajal & Segura, 2005).

El presente trabajo de grado responde al interés de ampliar el conocimiento sobre las alteraciones que se observan en los regímenes de precipitación mensual y los caudales mensuales del río Cauca, se determinó como caudal de entrada del Río Cauca, la estación Juanchito y como salida la estación Anacaro para acotar el análisis en la zona de estudio, ante la presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, con base en los datos históricos de las estaciones hidrometeorológicas localizadas en la zona. En este trabajo se calcularon índices categóricos para 66 (sesenta y seis) series de precipitación, se evaluaron los años y meses de afectación del fenómeno El ENOS, la información fue seleccionada de la NOAA. Los meses que corresponde a este estudio es el año hidrológico que abarca los meses de julio del primer año, hasta junio del segundo año, esto con el fin de obtener un nuevo conocimiento acerca de la afectación durante los meses de transición ínter-estacional (septiembre, diciembre, marzo y junio) y los meses de temporadas secas (julio-agosto y enero-febrero) y lluvias (octubre-noviembre y abril-mayo) catalogados de bimestral. Se encontró que para el fenómeno El Niño es el evento que más influye en la hidrometeorología mensual de la cuenca Alta del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, con reducciones del 60,0% en los caudales. Además del análisis de precipitación, se realizó un análisis de escorrentía del río Cauca a la entrada y la salida, específicamente en las estaciones Juanchito y Anacaro, donde el efecto del Chorro del Choco incide en la hidroclimatología de la zona de estudio.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Debido a los grandes impactos generados por las fases extremas del fenómeno ENOS en Colombia, el Gobierno nacional formuló el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) que busca reducir el riesgo y los impactos socio-económicos asociados al cambio y a la variabilidad climática. El objetivo último es reducir el riesgo y los impactos socioeconómicos asociados a la Variabilidad y el Cambio Climático en Colombia (Loaiza, 2014).

Según Orozco (2011), la variabilidad climática está teniendo fuertes repercusiones sobre diferentes variables hidrometeorológicas; induciendo cambios en el patrón de precipitación que afecta directamente la disponibilidad hídrica de los ríos. En la cuenca del río Cauca la necesidad de este tipo de estudios tiene cada vez mayor importancia, dado que en la actualidad vive el 25% de la población del país y en manejo de recurso hídrico la cuenca presenta un potencial hidroenergético, y uno de ellos es la represa de Salvajina, que podría ser alterada por los posibles cambios de incremento o descenso en la precipitación, debidos al fenómeno ENOS.

La propuesta de trabajo de grado, expone las características generales y los procesos de desarrollo de los principales fenómenos climáticos que definen la variabilidad climática intra e inter anual de la cuenca alta del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca; determinándose las alteraciones de la precipitación mensual, y los caudales mensuales del río Cauca en las estaciones Juanchito y Anacaro, durante las fases extremas del fenómeno ENOS, con base en los datos históricos de las estaciones hidrometeorológicas de la región.

Los retos del cambio climático y de la variabilidad climática en la región del Valle del Cauca trascienden de lo ambiental y abarca todas nuestras actividades diarias. La variabilidad climática altera los patrones de consumo, de producción y de desarrollo, ya que estos están influenciados en gran medida de como cambie el clima; a mayor recurrencia de los eventos extremos sobre nuestra región tendrán efectos directos sobre la economía y el desarrollo social. Estos eventos van en detrimento de la calidad de vida de los ciudadanos y de la fauna y flora presente, generando menos espacios para la adaptación a la variabilidad y al cambio climático.

Este trabajo tiene un aporte a la estimación en la predicción de la hidrometeorología en el la cuenca alta del río Cauca en el departamento del Valle del Cauca, logrando de esta manera una mayor aproximación al conocimiento científico más preciso de cómo, el fenómeno ENOS en sus fases extremas impacta el régimen hidrometeorológico. Es importante tener en cuenta que la información contenida en esta investigación aporta al conocimiento de las zona de mayor afectación bajo eventos extremos, donde se podrían utilizar para establecer estrategias en la gestión del recurso hídrico, con el fin de lograr una mejor planificación y uso sostenible de los recursos.

### **3. OBJETIVOS.**

#### ***3.1 Objetivo General.***

Determinar las alteraciones de la precipitación y escorrentía mensual en la cuenca alta del río Cauca a su paso en el departamento del Valle del Cauca durante las fases extremas del fenómeno ENOS, con base en los datos históricos de las estaciones hidrometeorológicas.

#### ***3.2 Objetivos Específicos.***

- Estimar los índices categóricos de los registros de precipitación y de caudales mensuales de las estaciones hidrometeorológicas de la zona de estudio, durante los bimestres secos y lluviosos y los meses de transición.
- Espacializar la distribución de la precipitación mensual, en los bimestres secos y lluviosos y los meses de transición, durante las fases extremas del fenómeno ENOS en la zona de estudio.
- Analizar las incidencias del Fenómeno ENOS en la escorrentía mensual del río Cauca, en la entrada (Estación Juanchito) y a la salida (Estación Anacaro) en la zona de estudio.

#### 4. ANTECEDENTES.

Uno de los primeros registros que indican la relación entre las temperaturas del Océano Pacífico y la lluvia es el estudio de Walker, durante el periodo de 1904 a 1937, en el cual relacionó las lluvias monzónicas y las observaciones superficiales, con base a este trabajo investigativo se generaron otros estudios para predecir las inundaciones del río Nilo y la lluvia en Australia, indicando además conexiones entre la presión atmosférica y la lluvia alrededor de India, Australia y Java (Allan *et al.*, 1996).

Curtis *et al.*, (2001) relacionan sequías en el Amazonas, Congo, y América Central e inundaciones en Argentina, Perú y el Este de África, durante el Niño. Berri & Bertossa (2004) encontraron una relación entre las anomalías de la precipitación y la temperatura del océano Pacífico sobre varias regiones tropicales y sub-tropicales

El Modelo Integral desarrollado en 1997 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), avanzó en la determinación del efecto directo de fenómeno ENOS sobre las áreas marítima y costera del Pacífico colombiano, y en el estudio de su influencia sobre el clima nacional, particularmente sobre los patrones de lluvia y temperatura del aire y en el análisis preliminar de su impacto socioeconómico (Montealegre, 2012).

El trabajo investigativo realizado por Mulligan (2000) donde se aplicó la regionalización con escalamiento estadístico a los datos generados por GFDL, HadCM2 y ECHAM para generar escenarios de cambio climático para el Valle del Cauca. Obtuvo como resultado que hacia el 2050 la región del Valle del Cauca, la temperatura del aire podría aumentar hasta en 2.7°C por encima de lo observado en 1998-1999, mientras que la precipitación anual tendría un incremento de 27 a 59 milímetros (0.4-0.5% del valor observado en 1995-1996).

En el año 2007, el IDEAM actualizó la componente meteorológica, ampliando la base informática del análisis del efecto del fenómeno ENOS, hasta el año 2005 y obteniendo una nueva comprensión sobre el efecto climático del fenómeno ENOS para diferentes intensidades del evento en Colombia. Igualmente, este modelo logró un mejor conocimiento del efecto a escala trimestral y durante las estaciones secas y lluviosas, en las diferentes regiones del país (IDEAM, 2007).

El presente documento se basó en el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital (PRICC), el cual profundizó el conocimiento sobre las alteraciones que se observan en los regímenes de la precipitación y la temperatura del aire en la Región Capital, ante la presencia de los fenómenos extremos del ENOS, con base en los datos históricos de las estaciones meteorológicas localizadas en Cundinamarca (Montealegre, 2012).

En el estudio de la región Capital realizado por Montealegre (2012), se verificó que el mayor efecto climático ocurre durante el primer trimestre del segundo año, el cual coincidente con la fase madura de los eventos, cuando se presentan las mayores anomalías en el océano y la atmósfera del Pacífico tropical. En general, el efecto de los fenómenos típicos El Niño y la

Niña sobre la precipitación estacional de Cundinamarca, es más acentuado en las temporadas secas que en las lluviosas.

En el Estudio Nacional del Agua, desarrollado por Bedoya *et al.*, (2010), se tipificaron las anomalías en caudales debidas a eventos de El Niño y La Niña sobre 180 estaciones hidrológicas distribuidas en el territorio colombiano. La clasificación de los diferentes años fue realizada con base en índices macroclimáticos que evaluaron el estado y desarrollo del ENOS. De acuerdo a ello, encontraron que el ciclo anual de la hidrología en Colombia está afectado en su magnitud por el fenómeno El ENOS y que, en general, ocasiona que se presenten mayores caudales y riesgos de fenómenos extremos durante la fase de La Niña y déficits pronunciados durante El Niño.

El estudio desarrollado por Carvajal & Segura (2005), incluyen las variables macroclimáticas como variables auxiliares, representaron los datos en la validación, al tener en cuenta un mayor porcentaje de varianza en los caudales. Se concluyeron que los métodos multivariados de análisis son una herramienta para entender las relaciones del ENOS o fenómenos similares con la hidrología de la región. Los resultados dan confianza sobre la aplicabilidad de los modelos multivariados de funciones ortogonales empíricas (FOES) y el análisis de correlación canónica (ACC) para entender el ENOS y fenómenos similares bajo perspectivas locales o regionales. El Valle del Cauca la fase cálida del ENOS (El Niño) está asociada a la disminución de la precipitación y el caudal, mientras la fase fría (La Niña) está asociada a un incremento en los mismos. Existe una teleconexión muy importante entre la variabilidad del ENOS y la hidrología de la región, con un rezago anticipado de 2 a 3 meses.

Puertas & Carvajal (2008) encontraron que El Niño se caracteriza por el incremento de la TSM (Temperatura superficial del Océano), así como la disminución del IOS (índice de oscilación del sur) (ver imagen 4.1). En Colombia, al centro, norte y occidente del país este fenómeno ocasiona la disminución en la precipitación e incrementa la temperatura del aire; variaciones contrarias suceden durante La Niña. Conjuntamente existe mayor incidencia de ENOS en la temperatura del aire. Además, el trabajo concluye que el fenómeno ENOS tiene una mayor incidencia sobre la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura media del aire, principalmente en el trimestre DEF (diciembre-enero-febrero). Por último, es importante resaltar que la TSM representa la mayor incidencia de ENOS sobre Colombia, según lo mostraron los coeficientes de correlación que se aproximaron a los mayores obtenidos con el índice multivariado de ENOS (MEI), el cual reúne seis variables del fenómeno ENOS.

Ávila, Carvajal & Gutiérrez (2014), seleccionaron variables macroclimáticas encargadas del monitoreo del ENOS en el Océano Pacífico para asociarlas con variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Cali, y de esta manera analizar el comportamiento de los caudales bajo la influencia del fenómeno ENOS donde está más influenciado por las precipitaciones. En este trabajo investigativo se encontró que las variables macroclimáticas ONI (Índice Oceánico del Niño) y MEI (Índice Multivariado del ENOS) son las que tienen mayor incidencia sobre las variables hidrometeorológicas, con un coeficiente de correlación entre el 24,0 y el 44,0%, lo que es una aproximación del porcentaje de influencia del

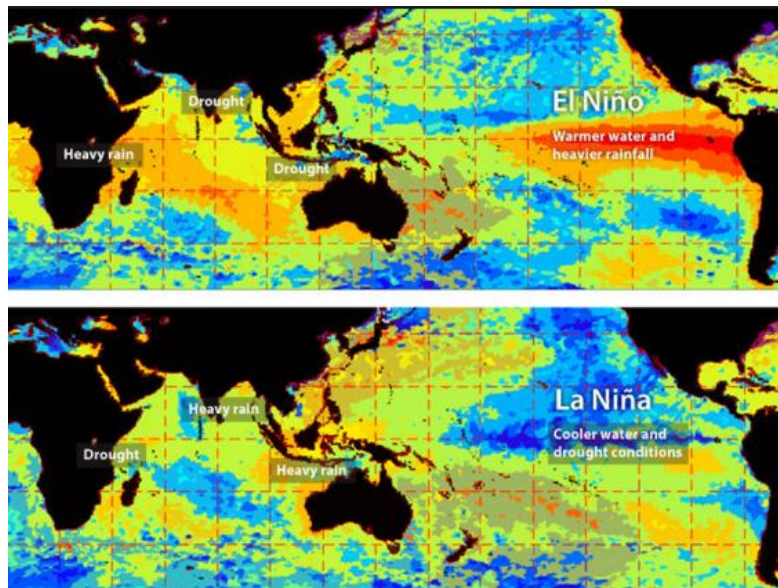


fenómeno ENOS sobre la precipitación, y el caudal, para de esta manera determinar la oferta hídrica en la zona de estudio decrece un 40,0% en la fase extrema El Niño y aumenta la disponibilidad en un 65,0% en épocas de La Niña.

Gutiérrez *et al.*, (2013), determinó que las fases extremas del fenómeno ENOS presentaron un efecto sobre la oferta hídrica de la cuenca del río Dagua, ubicado en el departamento del Valle del Cauca, donde se encontraron cambios en la media anual de la variable precipitación con reducciones del 39,0% (1111 mm/anuales) y aumentos del 84,0% (2393 mm/anuales); y en la media anual de la variable caudal, con disminuciones del 40,0% (11,6 m<sup>3</sup>/s) y aumentos del 50,0% (14,5 m<sup>3</sup>/s) sobre su afluente.

En el estudio Gutiérrez *et al.*, (2013) encontró que el análisis de la oferta hídrica, con las Variables Macroclimáticas: MEI y Temperatura en la Región Niño 3, presentaron mayor grado de incidencia sobre las variables hidrometeorológicas de la cuenca con una correlación negativa de -0,45 en la precipitación, con un rezago de 0 meses y -0,55 de caudal con un rezago de 2 meses, respectivamente. En este trabajo concluyeron que en la fase extrema del ENOS que genera mayores anomalías sobre la variable precipitación es la fase La Niña, donde sus valores sobrepasan el 60,0% de la media anual.

**Figura 4.1: Temperatura Superficial del Océano en colores (rojo-cálido; azul-fresco).**



*Fuente: <http://www.tiempo.com/ram/13493/la-nina-y-los-fenomenos-meteorologicos-extremos-actuales-p>*

El trabajo investigativo desarrollado por Andrade (2013), muestra la variabilidad en los valores estimados entre los meses analizados: los valores para el periodo enero-febrero son los más secos por lo tanto bajos, y son más grandes que los valores del período más húmedo octubre-noviembre. Esto es razonable dado el aumento de la temperatura durante el período

más seco y la disminución de la temperatura durante el período más húmedo, así como la influencia sustancial del fenómeno de El Niño y La Niña durante el período 1971-2002.

Gaviria & Rodríguez (2014), enfocaron su investigación en la aplicabilidad meteorológica de tres modelos probabilísticos, correspondiente a las funciones de distribución *Gumbel*, *LogNormal* y *LogPearson* Tipo III, para series máximas de precipitaciones diarias para la región de la cuenca alta del río Cauca. Concluyeron que el 80% de las estaciones presentó comportamiento No Estacionario, lo que se representa en variaciones de los valores de la media y la varianza de la serie de precipitaciones máximas diaria. Esto se da por la incidencia de la variabilidad climática en la zona de estudio, que altera el régimen de lluvias, ocasionando picos altos y bajos de manera discontinua en las precipitaciones.

Cardona, Ávila, Carvajal & Jiménez (2014), calcularon nueve índices de extremos climáticos utilizando el programa *RClimdex* para identificar cambios o tendencias en la precipitación diaria registrada en las cuencas hidrográficas de los ríos Dagua y Cali, ubicadas al Sur-Occidente colombiano en el Valle del Cauca.

Solarte & González (2015) realizaron el análisis y la comparación de la frecuencia de eventos máximos de precipitación en 48 y 72 horas, 5, 7, 15 y 30 días consecutivos en las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca alta del río Cauca, utilizando las funciones de distribución de probabilidad *Gumbel*, *LogNormal*, *LogPearson tipo III* con diferentes períodos de retorno, donde determinaron su mejor ajuste.

## **5. MARCO TEÓRICO.**

### **5.1 El Clima.**

Una de las definiciones más aceptadas del clima es de Lowry (1973): conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y las evoluciones del tiempo en una porción determinada del espacio. Eslava (1993), el clima es una expresión del comportamiento de la atmosfera, puesto que es el resultado de las condiciones atmosféricas expresadas como un conjunto de valores de los elementos y fenómenos meteorológicos en determinado lugar y tiempo. Lobato (2009), lo define como el estado medio de los elementos meteorológicos de una localidad considerando un período largo de tiempo. El clima de una localidad viene determinado por los siguientes factores: latitud, longitud, altitud, orografía y continentalidad.

#### **5.1.2 Variabilidad Climática.**

La variabilidad climática, se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo cortos (estacional, anual etc.) (Montealegre, 2002). De acuerdo con Mejía (1999) la variabilidad espacial del clima de Colombia está principalmente determinada por:

1. Situación tropical, bajo la influencia de los vientos alisios y la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical;
2. Vecindad con los Océanos Pacífico y Atlántico, fuentes muy importantes de humedad que penetra hacia el interior;
3. Conformación fisiográfica que incluye la presencia de la cordillera de los Andes cruzando el país de suroeste a noreste, con valles interandinos y vertientes de cordillera con marcadas diferencias climáticas;
4. La circulación propia de la cuenca del Amazonas, en donde Colombia tiene una gran extensión (incluyendo la región más lluviosa de toda la cuenca);
5. Variabilidad de los procesos de la hidrología superficial, tales como los contrastes en humedad de suelo y evapotranspiración, fuertemente influenciados por la vegetación, el tipo de suelos, el aspecto (ángulo cenital local), y la circulación de vientos locales.

#### **5.1.3 Escalas de la Variabilidad Climática.**

Dentro de sus fluctuaciones temporales, las siguientes se consideran las de mayor trascendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos (Montealegre, 2002):

Estacional: A esta escala corresponde la fluctuación del clima a nivel mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. (Montealegre, 2012).

Inter-Anual: La Variabilidad climática a escala de tiempo interanual está fuertemente controlada por la ocurrencia del evento El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). El ENOS tiene una variabilidad estacional y una componente cuasi-bienal con un tiempo de recurrencia entre 2 a 2,5 años y una baja frecuencia, con una recurrencia entre 4-5 años. (Poveda, 2004). El Ciclo conocido como El Niño, La Niña - Oscilación del Sur - ENOS, es la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual (IDEAM, 2007).

Inter-Decadal: La variabilidad climática a escala de varias décadas está dominada por el cambio climático y el cambio ambiental global de largo plazo, así como por fenómenos macro-climáticos que operan en tal escala temporal. Existen dos fenómenos que operan, una de ellas es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que tienen una influencia significativa sobre el clima en Colombia y son parte de la variabilidad natural del clima de la Tierra (Poveda, 2004).

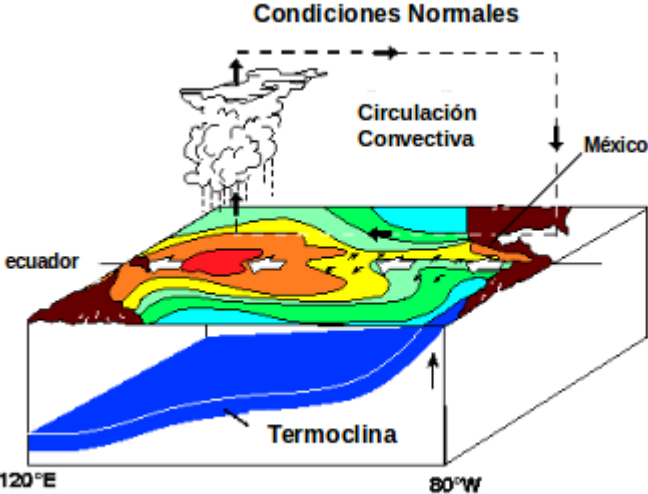
## ***5.2 El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).***

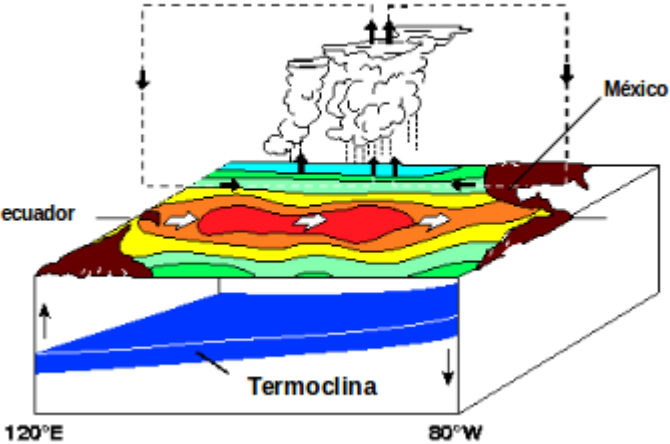
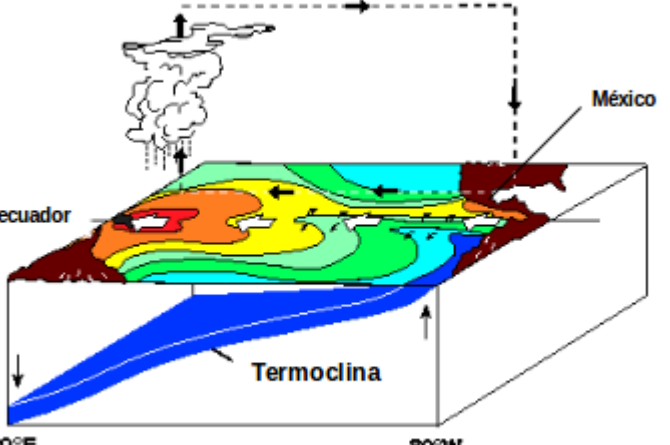
El clima colombiano, a escala de tiempo interanual, varía de forma natural ligado a la ocurrencia de fenómenos de macro-escala. El sistema El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus dos fases extremas, El Niño y La Niña, es el fenómeno más importante que afecta el clima del país (Poveda & Mesa, 2002).

El Niño se refiere a una condición anómala en la temperatura de la superficie oceánica que registra el Pacífico tropical del Este (Núñez, 2013). El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta principalmente a través de un calentamiento o enfriamiento anormal de la Temperatura Superficial del Océano (TSM) en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental. Estas variaciones alcanzan las costas norte y sur de América y generan alteraciones en los patrones climáticos, que se desarrollan en algunas regiones muy apartadas del globo. Por su parte, el ciclo ENOS se desarrolla en forma aperiódica y en una escala de tiempo mayor que la corriente de El Niño, ya que su aparición se presenta a intervalos irregulares que oscilan aproximadamente entre los 3 y 7 años (Maturana, 2004).

### 5.2.1 Fases fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS).

Tabla 5.1: Fases del fenómeno El Niño.

	<p><b>Condiciones normales</b></p> <p>El centro de baja presión atmosférica se concentra sobre el Pacífico occidental y la zona de alta presión sobre el Pacífico este o central.</p> <p>La circulación atmosférica se refleja a través de la celda de Walker con los Alisios orientales en los niveles inferiores y su contra flujo en los niveles superiores de la atmósfera.</p> <p>La zona de precipitaciones más fuertes (lluvias y tormentas tropicales) corresponde a Indonesia o el Pacífico occidental, las áreas relativamente secas se ubican sobre el Pacífico Oriental.</p> <p>Las aguas con anomalías positivas de la temperatura superficial del mar positivas se concentran en el Pacífico occidental; a lo largo de la costa occidental de América del sur, se registra surgencia de aguas frías.</p>
------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p style="text-align: center;"><b>Condiciones de El Niño</b></p>  <p>Diagrama que muestra las condiciones de El Niño en el Pacífico central u oriental. Se observan las líneas del Ecuador y México. La termoclina se ha hundido en el lado occidental (derecha) y se ha elevado en el lado oriental (izquierda). Se observan nubes y lluvia sobre el lado occidental, y una zona de menor nubosidad sobre el lado oriental. Se indican las líneas del Ecuador y México.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Condiciones El Niño</b></p> <p>Las bajas presiones se registran sobre el Pacífico central u oriental y las altas, sobre el Pacífico occidental.</p> <p>Los Alisios se debilitan o cesan por completo, lo que resulta en ausencia de surgencias de aguas frías en la costa occidental de América del Sur.</p> <p>Las aguas con anomalías de TSM positivas se desplazan hacia el Pacífico Central u oriental, trayendo consigo fuertes lluvias a las zonas del Pacífico oriental, clasificadas como secas.</p> <p>La circulación atmosférica ecuatorial de Walker se debilita o desaparece. Las temperaturas superficiales del mar durante este periodo están 2° a 3.5° C por encima del promedio.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Condiciones de La Niña</b></p>  <p>Diagrama que muestra las condiciones de La Niña en el Pacífico central u oriental. Se observan las líneas del Ecuador y México. La termoclina se ha hundido profundamente en el lado occidental (derecha) y se ha elevado en el lado oriental (izquierda). Se observan nubes y lluvia sobre el lado occidental, y una zona de menor nubosidad sobre el lado oriental. Se indican las líneas del Ecuador y México.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Condiciones La Niña</b></p> <p>Son opuestas a las condiciones El Niño y por esa razón, en ocasiones se denomina el Anti-Niño;</p> <p>Se caracteriza por presentar condiciones semejantes a las normales, pero con mayor velocidad de los vientos Alisios orientales y como resultado mayor surgencia de aguas frías;</p> <p>Las aguas superficiales cálidas se acumulan con mayor intensidad al oeste, en el Pacífico occidental;</p>

	<p>Las temperaturas superficiales del mar durante ese periodo se presentan entre 1° y 3° C por debajo del promedio.</p> <p>La surgencia o ascenso de las aguas subsuperficiales hacia la capa superficial, es inducida por la acción de los vientos que soplan paralelos a la costa <sup>(1)</sup>.</p>
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*Fuente: IDEAM, 2010; [www.esrl.noaa.gov/psd/map/index.old.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/map/index.old.html) & [http://smn.cna.gob.mx/images/enos/normal\\_enos.png](http://smn.cna.gob.mx/images/enos/normal_enos.png)*

### **5.2.2 Efecto del fenómeno ENOS en Colombia.**

Los eventos extremos asociados incluyen inundaciones y sequias, tienen repercusiones socioeconómicas tales como: alteración de ecosistemas, inundaciones y avalanchas, pérdidas por productividad agrícola y pesquera y por déficit en la generación en la energía eléctrica, perturbaciones ecológicas y epidemias de enfermedades, entre otros (Poveda & Rojas, 1997).

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un ciclo global tiene dos extremos: una fase cálida conocida como El Niño y una fase fría, conocida como La Niña (CENEPRED, 2013). Cada evento de La Niña es diferente y su repercusión en el clima colombiano está dada por su intensidad y como por la interacción que se puede presentar con otros fenómenos océano-atmosféricos presentes en el Atlántico, específicamente en el mar Caribe. El incremento de las precipitaciones eleva la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en diferentes zonas del territorio nacional, así como deslizamientos de tierra por saturación de agua en los suelos (CEPAL, 2012).

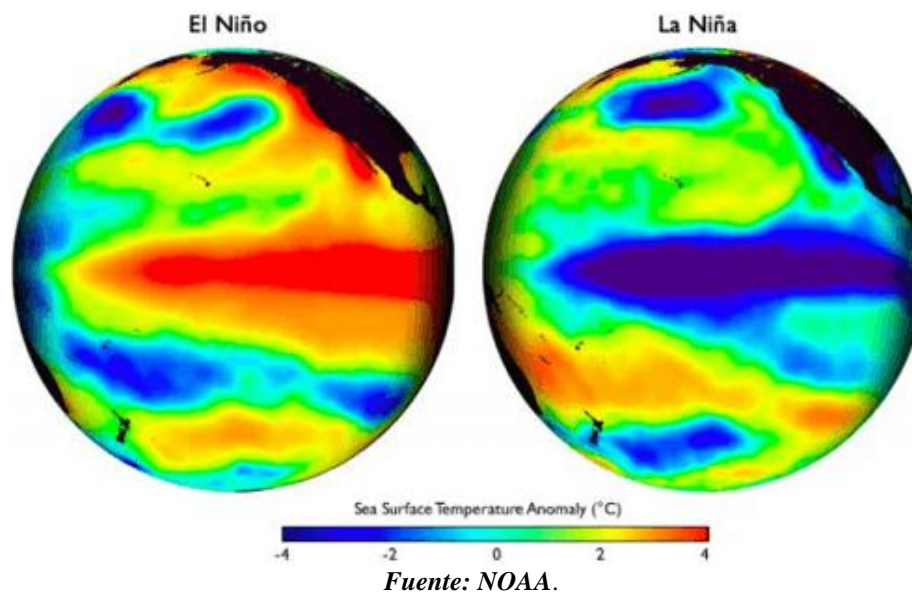
Debido a que el fenómeno ENOS es el conjunto más poderoso de variaciones Océano-Atmosféricas en la región del océano Pacífico ecuatorial y se manifiesta con variaciones anómalas de la presión atmosférica (Oscilación del Sur) y de la temperatura en la superficie en el océano Pacífico (Puertas & Carvajal, 2008). En Colombia, los episodios de El Niño han generado variaciones de  $\pm 60,0\%$  en la precipitación y aumentos en la temperatura media mensual del aire hasta de 20,0 °C (Bonilla, Rosales & Maldonado, 2003).

Las pérdidas materiales generados por El Niño de 1997-1998 en todo el planeta se han estimado en US\$ 33 mil millones. En América Latina y el Caribe se cita que los costos directos de este episodio llegaron a US\$ 8,5 mil millones. En Colombia se reportó un impacto

<sup>1</sup> Página consultada: [www.cona.cl/chileysumar/surgencia.htm](http://www.cona.cl/chileysumar/surgencia.htm)

de US\$ 564 millones durante el mismo periodo (Bonilla *et al*, 2003). Una de las consecuencias más graves del fenómeno de La Niña (2010-2011) es la continuada y elevada precipitación ocurrida de manera generalizada en amplias zonas del país incluido el Valle del Cauca, la crecida y el desborde de ríos y cuerpos de agua, que inundaron en forma extensa y prolongada regiones que en inviernos normales no se habrían inundado. Tras la ola invernal en Colombia, entre septiembre de 2010 y mayo de 2011, el número de emergencias se elevó a 2.219, conformadas por 1.233 inundaciones (55,6% del total de emergencias), 778 deslizamientos (35,1%), 174 vendavales y 24 avalanchas. Los 10 eventos restantes se componen de tormentas eléctricas, granizadas y tornados (CEPAL, 2012).

**Figura 5.2: Mapas Globales centrados en el Océano Pacífico.**



### **5.2.3 Índices de mayor significación utilizados en ENOS.**

Según Poveda (2002), una clasificación de años para el ENSO se hace, por lo general, con el uso de diferentes índices océano-atmosféricos implementados por agencias climáticas, como la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, por sus siglas en inglés), para realizar la evaluación de anomalías sobre registros hidroclimáticos, como series de lluvias, caudales y niveles mensuales encontró correlaciones simultáneas y rezagadas representativas entre estos índices y los caudales agregados a nivel trimestral, que se interpretan como la validez estadística de la conexión entre el fenómeno ENSO y la hidrología colombiana. Bedoya *et al.*, (2010), especificó que los valores de correlación simultánea son altos durante el trimestre diciembre-enero-febrero, lo que indica una alta influencia del fenómeno en esta época y es consecuente con Puertas & Carvajal (2008).



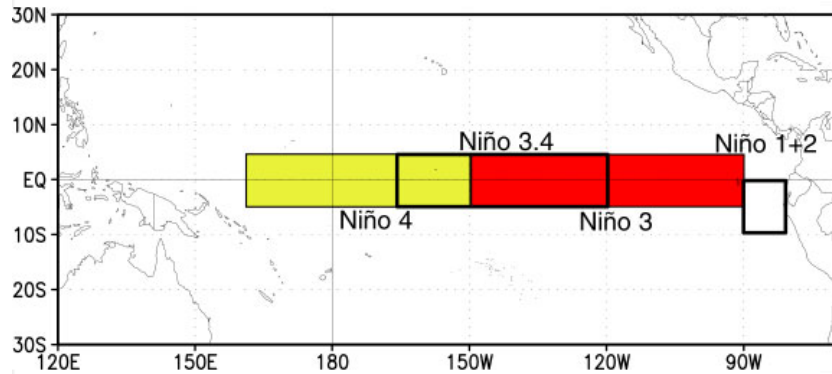
La temperatura superficial del mar es una de las características más utilizadas en los estudios de variabilidad climática, por ser un índice significativo de la interacción océano -atmósfera, ya que refleja los procesos de intercambio de calor y humedad (IDEAM, 2010). Bajo condiciones normales, entre más caliente es la superficie del océano más calor y humedad se concentra en los niveles inferiores de la atmósfera, lo que crea condiciones inestables (aire frío y seco en niveles medios y aire caliente y húmedo en los niveles bajos) esto contribuye al desarrollo de tormentas tropicales.

El monitoreo de este evento se realiza sobre el Pacífico ecuatorial, que para tal efecto se dividió en cuatro regiones: El Niño-1+2 ( $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ S,  $90^{\circ}$ O- $80^{\circ}$ O), Niño-3 ( $5^{\circ}$ N- $5^{\circ}$ S,  $150^{\circ}$ O- $90^{\circ}$ O), Niño-3.4 ( $5^{\circ}$ N- $5^{\circ}$ S,  $170^{\circ}$ O- $120^{\circ}$ O) y Niño-4 ( $150^{\circ}$ O- $160^{\circ}$ E y  $5^{\circ}$ N- $5^{\circ}$ S), como se presenta en la figura 5.3. En esta zona existe una gran cantidad de artefactos de medición a los cuales se suma una red de mareógrafos en ambas costas del Pacífico Central y observadores voluntarios a bordo de barcos (Jiménez, 2016). El ciclo anual de las lluvias y los mecanismos de circulación que explican las anomalías climáticas durante las dos fases del ENOS tienen principal origen sobre el océano Pacífico tropical, en las regiones conocidas como Niño-4, Niño-3 y Niño 1+2 (Poveda & Mesa, 1999).

El rango de variabilidad de la TSM en la región Niño 3 es más amplio que el de la región Niño 3-4 es una de las razones por las cuales los investigadores y los centros especializados de seguimiento del fenómeno ENOS no coinciden en la determinación de las épocas de comienzo y finalización de los eventos, como tampoco en la determinación de la magnitud de su intensidad en ambas áreas. Al comparar los índices obtenidos para las dos regiones aparecen en la región 3-4, ocho fenómenos que no son registrados como tales en la región Niño 3: 1963-64; 1968-69; 1977-78; 1993; 1994-95; 2002-03 y 2006-07. Para el caso de la niña ocurre algo similar se han reportado seis eventos en los años 1950-51; 1961-62; 1983-84; 1984-85; 1995-96 y 2000-01; que no son catalogados como fenómenos la niña utilizando el índice de la región Niño 3 (Montealegre, 2012).

Bamston *et al* (1997), promueven la utilización del índice ENSO de la región 3-4 para los estudios de El Niño, sustentando su punto de vista en la mayor correlación entre el índice Niño 3.4 y el Índice de Oscilación del Sur, comparado con los índices de la zona Niño 3. Aunque los mismos autores reiteran que la diferencia no es significativa y en la mayoría de los casos la correlación entre Niño 3 y 3-4 es muy alta.

**Figura 5.3: Regiones de desarrollo y monitoreo del fenómeno ENOS sobre el Océano.**



*Fuente: NOAA & Montealegre, 2012.*

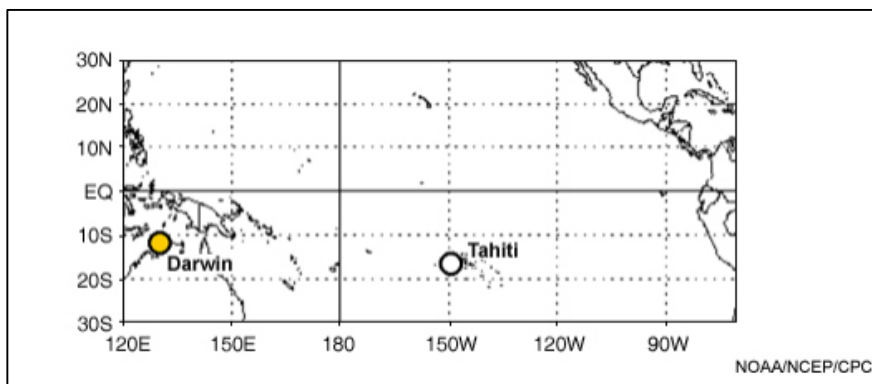
Para este estudio se tomó como índice de identificación de los fenómenos de El Niño y la Niña, el de las anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3-4, desarrollado por la NOAA <sup>(2)</sup>, para identificar los meses de afectación del fenómeno ENOS.

### **5.2.3.1 Índice de la Oscilación del Sur (SOI).**

La Oscilación del Sur es una onda estacionaria en la masa atmosférica que produce un gradiente de presiones entre el oeste y el este del Pacífico ecuatorial. Es, un centro de alta presión localizado cerca de Tahití, mientras que un centro de baja presión se percibe en Indonesia y el norte de Australia cerca de Darwin. Este gradiente de presión es comúnmente representado por el SOI, Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), definido como la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas de ambos sitios (Keppenne, 1992). Las anomalías negativas del SOI están asociadas a los eventos cálidos sobre el océano Pacífico (El Niño) y las positivas con los eventos fríos (La Niña) (Poveda & Mesa, 1996). Los valores negativos de las diferencias de presión sin normalizar menores a -8 indican los episodios El Niño, en tanto que los valores positivos mayores a 8 son típicos de La Niña; sin embargo, cuando los datos son normalizados los valores límite son -0.5 y 0.5 (Jiménez, 2016).

<sup>2</sup> [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

**Figura 5.4: Ubicación de los sitios en las que se mide la presión atmosférica para hallar el SOI.**



*Fuente: NOAA/NCEP/CPC; <http://www.nc-climate.ncsu.edu/edu>*

### **5.2.3.2 Índice Oceánico ONI.**

Este índice climático está basado en la temperatura superficial del mar (océano Pacífico). Como indicador para realizar el seguimiento del fenómeno, se ha utilizado el índice oceánico ONI, el cual ha sido construido por el Centro de Predicción climática de la NOAA (Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos). El ONI se expresa como la anomalía de la temperatura de la superficie del Océano Pacífico con respecto al promedio, en la región Niño 3-4 (5° N-5° S, 120° - 170° W). Esta anomalía debe ser calculada con los promedios móviles de tres meses. Se dice que un fenómeno el Niño se ha establecido, cuando la diferencia es mayor a + 0.5°C durante cinco meses o más. Por el contrario, el fenómeno La Niña se declara cuando la diferencia es menor a - 0.5°C de acuerdo con este indicador (Euscátegui & Hurtado, 2012). La temperatura utilizada para calcular el índice pertenece al banco de datos *Extended Reconstructed Sea Surface Temperatura* del *National Climatic Data Center* <sup>(3)</sup> de la NOAA.

### **5.3 Vulnerabilidad.**

El cambio climático tendrá un fuerte impacto en América Latina y el Caribe. En el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) indica: “*un incremento en la intensidad y frecuencia de huracanes en el Caribe, los cambios en los patrones de precipitaciones, el aumento de los niveles de las riberas en Argentina y Brasil, y la reducción de los 5 glaciares en la Patagonia y los Andes, son fenómenos que indican el impacto que el calentamiento global podría tener en la región*” (Honty, 2007).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y en el Tercer Informe de Evaluación del año 2001, prevé otros impactos:

<sup>3</sup> Información extraída de: <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/>.

1. Se harán más frecuentes las inundaciones y las sequías, que aumentarán las cargas de sedimentos y degradarán la calidad del agua en algunas áreas.
2. Disminuirán los rendimientos de las cosechas. En algunas regiones, se verán amenazadas las tareas de granjas de subsistencia.
3. La distribución geográfica de las enfermedades transmitidas por vectores se extenderá hacia los polos y hacia mayores alturas sobre el nivel del océano.
4. Los asentamientos costeros, las actividades productivas, las infraestructuras y los ecosistemas de manglares serán afectados negativamente por el aumento del nivel de los océanos.
5. Aumentará la tasa de pérdida de diversidad biológica.

La vulnerabilidad tiene dos componentes, el primero que mide la debilidad del sistema, que se denomina sensibilidad, y el segundo que mide la capacidad del sistema de afrontar y recuperarse ante un evento, para lo cual se utilizará el término de capacidad de adaptación. (Departamento Nacional de Planeación, 2012).

En Colombia el índice de pobreza supera el 46,0% en las ciudades y 65,0% en el campo, donde repercute en una situación crítica de vulnerabilidad, que implica la necesidad de abordar la influencia del ENOS en la oferta hídrica del país (Ávila *et al.*, 2014). Si no se realiza estudios y alertas tempranas, es muy posible que aumente la vulnerabilidad a la ocurrencia de desastres y dejando amplios sectores con baja capacidad de respuesta ante eventos extremos.

#### **5.4 Adaptación.**

El IPCC define la adaptación como aquellas iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados de un cambio climático (Loaiza, 2014). La adaptación es uno de los asuntos clave para el futuro de América Latina. Bajo ese concepto se incluyen las acciones que permiten a los sistemas ecológicos, sociales y económicos la adaptación paulatina a las nuevas amenazas relacionadas con los factores climáticos globales de manera de reducir la vulnerabilidad que se presente en ellos (Honty, 2007). Con el fin de reducir la vulnerabilidad, una adaptación oportuna a las nuevas condiciones ambientales en el cambio climático se convierte en un imperativo y norma a seguir (Debels *et al.*, 2009).

#### **5.5 Resiliencia.**

En una de las características más importantes la cual está relacionada fundamentalmente con la magnitud de las fuerzas o presiones que un sistema puede absorber permaneciendo en un estado estable y además con el grado en que el sistema es capaz de auto-organizarse y el nivel por el cual el sistema puede construir su capacidad de aprendizaje y adaptación (Piñeiro, 2013). Si se analiza de otra manera, el lado débil de estos sistemas es la vulnerabilidad. Cuando un sistema socio-ecológico pierde resiliencia puede ser más vulnerable a un cambio el cual podría ser asimilado en otras circunstancias (Vidal, Delgado & Andrade, 2013).

Uno de los resultados en la pérdida o cambio en este factor, son los llamados cambios de régimen que ocurren en los sistemas, O sea, cuando el sistema se mueve hacia otra posición con nuevas características. (Folke *et al.*, 2002). Utilizado como un indicador, puede ser un elemento a considerar en estrategias dirigidas al ordenamiento ambiental de un territorio dado, por ser una propiedad que refleja las características ecológicas de la región y por lo tanto un factor clave en la asignación de los usos de un espacio geográfico relativamente homogéneo (Piñeiro, 2013), de disturbio que puede ser absorbido antes de que el sistema redefine su estructura por los cambios de variables y procesos en el comportamiento de control del mismo.

### **5.6 Índices Categóricos.**

La variable se utiliza para referirnos a cualquier característica, que toma valores diferentes en un conjunto de observaciones. Entendemos por variable cualitativa o categórica aquella que toma valores no numéricos. La característica que se mide en el individuo sería, en este caso, una cualidad (un atributo) del mismo (Martín & Munar, 2003). Además son datos con un número limitado de valores o categorías distintas. Las variables categóricas pueden ser variables de cadena (alfanuméricas) o variables numéricas que utilizan códigos numéricos para representar a categorías. Las variables categóricas pueden ser nominales u ordinales.

**Nominal:** Una variable puede ser tratada como nominal cuando sus valores representan categorías que no obedecen a una clasificación específica. Algunos ejemplos de variables nominales son: región, código postal o confesión religiosa.

**Ordinal:** Una variable puede ser tratada como ordinal cuando sus valores representan categorías con alguna clasificación intrínseca. En esta investigación se define el índice categórico para los 5 rangos de afectación lo cual permite restringir la variabilidad (absoluta o relativa) de las anomalías registradas en la precipitación y caudales mensuales, asignándole a cada rango de comportamiento y descripción del efecto, una variable alfanumérica: déficit severo (-2), déficit (-1), normal (0), exceso (1) y exceso severo (2) (Montealegre, 2012).

### **5.7 Balance Hídrico.**

Consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa al conjunto de una cuenca o a una cierta parte de ella definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado período de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento<sup>4</sup>.

El balance hídrico se basa en la ley física de conservación de masas y es definido como *“Balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la*

---

<sup>4</sup> Tomado de [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado\\_itop/415/pdfs/Capitulo%207.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%207.pdf).

*variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua*". La formulación matemática del balance, por lo tanto, expresa la igualdad entre los aportes de agua que entran a un sistema hidrográfico determinado y la cantidad de agua que sale del sistema, considerando las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante el periodo de tiempo determinado (Bedoya *et al.*, 2010). Existen diferentes balances dependiendo de donde se realizan y cuya finalidad es distinta:

1. Balance de agua en el suelo edáfico o zona radicular para el cálculo de la escorrentía total o excedentes.
2. Balance de agua en un embalse para determinar las aportaciones del río al embalse.
3. Balance de agua en un embalse para el cálculo de su efecto laminador sobre una avenida.
4. Balance en un tramo de un río entre dos estaciones de aforo con el propósito de determinar cómo se transmite una avenida y las pérdidas por infiltración a través del lecho del río.
5. La determinación de la recarga a partir del balance en un acuífero entre dos fechas dadas en las cuales se conocen los restantes flujos de entrada y salida.

Los componentes del ciclo hidrológico que se relacionan más directamente con la disponibilidad de agua y que intervienen en la ecuación del balance hídrico son la precipitación como variable de entrada, la evapotranspiración real y la escorrentía como variables de salida (Bedoya *et al.*, 2010).

## 6. METODOLOGÍA.

Se describen los aspectos de carácter metodológico desarrollado con el propósito de obtener el efecto climático del fenómeno El Niño y La Niña en la cuenca alta del río Cauca por su paso por el departamento del Valle del Cauca. La metodología se presenta en el esquema de la figura 6.2, el cual se dividió en tres grandes etapas: la primera corresponde a los estudios preliminares de la precipitación mensual multianual de la cuenca alta de río Cauca en el departamento del Valle del Cauca; en la segunda etapa se verificaron los periodos donde se presentó el fenómeno ENOS con base en la información de la NOAA, para determinar los meses de afectación. Se adaptó la metodología de Montealegre (2012) donde se analizó únicamente el segundo y tercer trimestre del primer año hidrológico y el primero y el segundo trimestre del segundo año, que cubren los bimestres secos y lluviosos y los meses de transición entre ellos, tomando para el cálculo solo los meses afectados por el fenómeno ENOS. La última etapa correspondió al procesamiento de datos mediante cinco categorías de afectación, calculando el índice acumulado y la frecuencia absoluta, para determinar la mayor alteración de las precipitaciones ocasionadas por el fenómeno ENOS con base a las frecuencias relativas de los meses estudiados. Se elaboraron los mapas de afectación mediante técnicas de interpolación. En la última etapa de la metodología se realizó un análisis del río Cauca, donde se calcularon los índices categóricos a la entrada y salida del río en la cuenca, en las estaciones Juanchito y Anacaro. Posteriormente se realizó un balance de aguas entre estas dos estaciones.

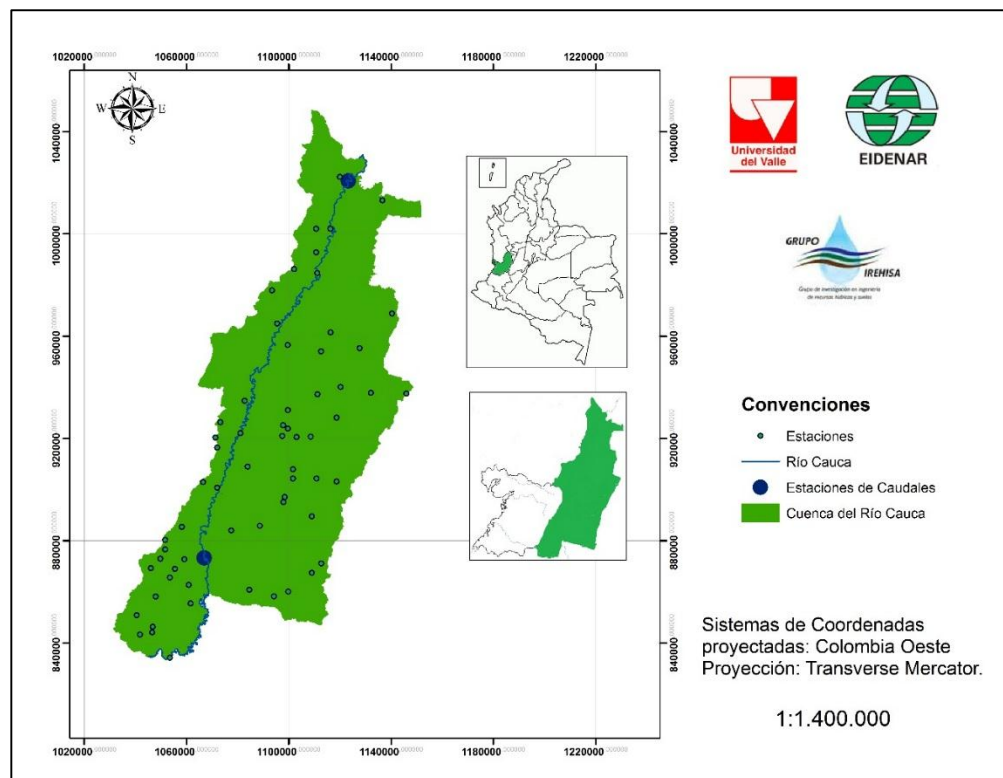
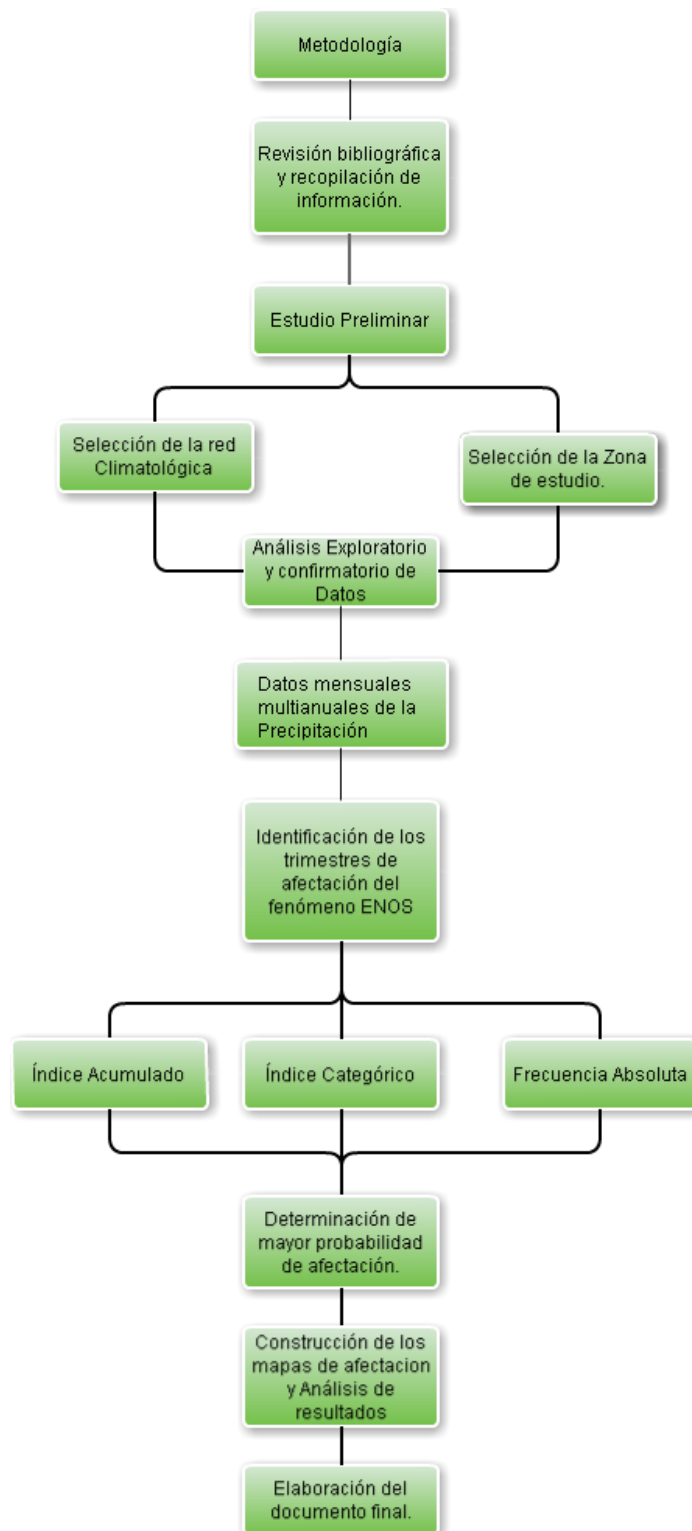


Figura 6.1 Zona de Estudio. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.2: Esquema metodológico del estudio.**



*Fuente: El Autor basado en Montealegre (2012).*



## ***6.1 Descripción del área de estudio.***

El Departamento del Valle del Cauca es una división político-administrativa ubicada en la zona suroccidental de Colombia. Cuenta con una superficie total de 22.140km<sup>2</sup>, que equivale al 1.9% del territorio nacional. Cerca de un 38% de su territorio, corresponde a la región Pacífica y un 62% a la región Andina. Lo integran 42 municipios, 21 de los cuales se ubican en la margen izquierda del río Cauca, 20 a la derecha y el de Buenaventura que limita con el Océano Pacífico. Se divide en cuatro regiones fisiográficas, cada una de ellas con una caracterización topográfica y económica particular: la llanura del Pacífico con una superficie de 6.549 km<sup>2</sup>, la parte plana del valle geográfico del río Cauca con 3.370 km<sup>2</sup> y las cordilleras Occidental con 7.314 km<sup>2</sup> y Central con 4.907 km<sup>2</sup> (Perafán, 2011; CVC, 2006).

El departamento del Valle del Cauca, está constituido por dos grandes vertientes hidrográficas, muy diferenciadas entre sí: la vertiente del Océano Pacífico y la del río Cauca. La condición geográfica de poseer vertientes hacia dos regiones diferentes, se debe a que tiene dos sistemas montañosos muy marcados (cordilleras occidental y central) con altitudes que van desde el nivel del mar, hasta más de 4.000 msnm y cuenta además con diferentes grados de precipitación que varían entre los 900 milímetros anuales en algunos valles Intra-montanos y los 13.000 milímetros en la vertiente pacífica, generan en este espacio relativamente pequeño dentro del contexto nacional una variada gama de climas que van desde los pluviales cercanos a la costa Pacífica y en algunas zonas montañosas, hasta los muy secos tanto en zonas bajas como altas (Montoya, 2010).

### **6.1.1 Zona de estudio:**

La zona plana o valle del río Cauca, consiste en una planicie ubicada entre las cordilleras Occidental y Central que alcanza una extensión total de 376.000 hectáreas (Perafán, 2011). Es una planicie originada por una depresión tectónica interandina, en el departamento tiene aproximadamente 200 km de largo por 15 de ancho en promedio. Este valle está formado por depósitos de origen aluvial del cuaternario con suelos profundos y superficies de alta fertilidad. El área oriental del Valle es más ancha que la occidental, donde se forman abanicos largos y de poca pendiente (CVC, 1994). El Valle geográfico del Río Cauca es toda la franja plana que atraviesa el río Cauca a su paso por los departamentos de Cauca, Valle y Risaralda. Comprende un área de aproximadamente 300 km<sup>2</sup>, con una elevación promedio sobre el nivel del mar de 950 metros y temperaturas que se mantienen cercanas a los 24°C. La parte más amplia del valle se ubica en inmediaciones del municipio de Yumbo, con aproximadamente 40 kilómetros y la más angosta mide 15 kilómetros cerca del municipio de Buga (Castillo, 2007). Es necesario ampliar esta zona de estudio a la cuenca alta del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca, porque la expansión de la frontera agrícola en la zona plana es muy alta, lo que ha generado un alto deterioro.

El río Cauca nace en el Macizo Andino Colombiano entre las Cordilleras Occidental y Central en el departamento del Cauca y desemboca en el río Magdalena. En el recorrido de

sus primeros 578 km (48% del total) se conforma la cuenca alta, con una extensión aproximada de 18,000 Km<sup>2</sup> y elevaciones que van desde 900 a 4,000 msnm. Confluyen cerca de 39 tributarios que incrementan hasta tres veces el caudal medio del río desde el embalse Salvajina (152 m<sup>3</sup>/s aprox.) hasta su salida del departamento del Valle del Cauca (568 m<sup>3</sup>/s aprox.) (Carvajal & Enciso, 2016). El río Cauca, que atraviesa la región en un recorrido de 340 km, se destaca estratégicamente en el contexto nacional, porque en su cuenca se asienta la industria azucarera, una parte de la zona cafetera, de desarrollo minero y un sector significativo de la industria manufacturera del país (Carvajal & Segura, 2005). Para este estudio se utilizaron las estaciones Juanchito y Anacaro, a la entrada y salida de la cuenca alta del río Cauca a su paso por el departamento del Valle del Cauca respectivamente (ver tabla 6.1).

**Tabla 6.1: Estaciones hidrométricas seleccionadas periodo 1962-2012.**

Río	Estación	Área (Km <sup>2</sup> )	Caudal mensual medio multianual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mensual medio máximo multianual (m <sup>3</sup> /s)	Caudal mensual medio mínimo multianual (m <sup>3</sup> /s)
Cauca	Juanchito	8.584	279	434	150
	Anacaro	17.234	409	1072	102

*Fuente: Carvajal & Segura, 2005 & Elaboración propia.*

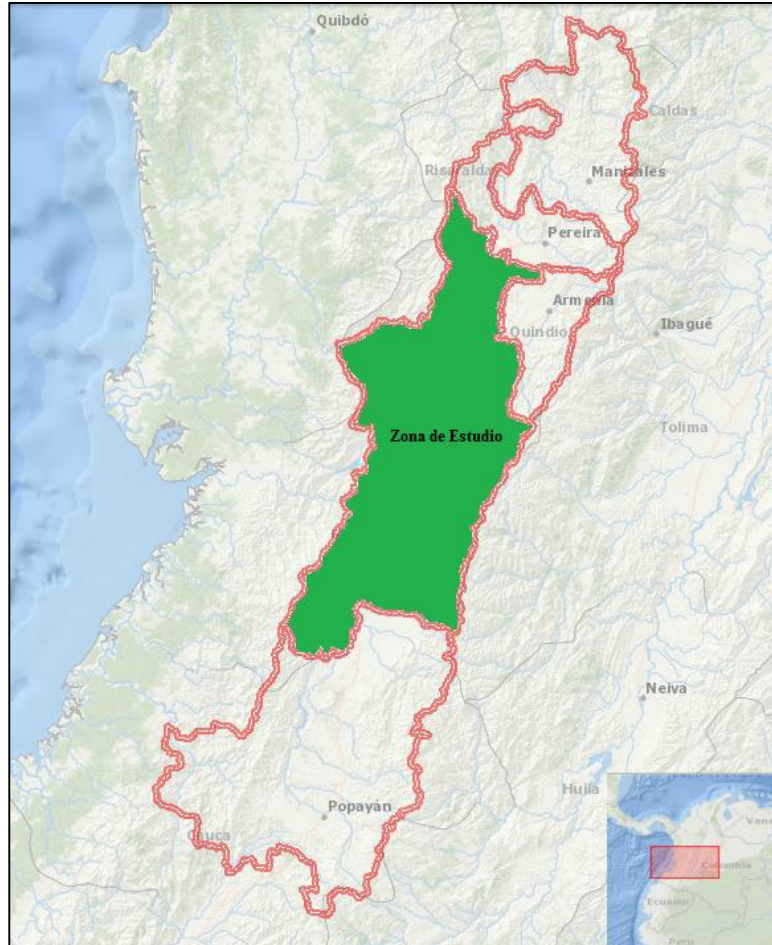
El río Cauca se subdivide en tres grandes regiones, la cuenca alta, media y baja. La cuenca alta comprende un área de 3.031.488 hectáreas, de la cual el 34,1% se encuentra en el departamento del Cauca, 37,9% en el Valle, 6,4% en el Quindío, 7,9% en Risaralda y 13,7% en Caldas (Figura 6.3). Su altitud varía desde los 5.400 msnm en las nieves perpetuas de la cordillera central y los 950 en el valle aluvial del Cauca (AVA, 2013). El recurso hídrico, el Valle del Cauca es primordial para el desarrollo de las actividades agrícolas, pues estas actividades demandan el 75% del recurso del departamento. Finalmente, debe tenerse en cuenta que el área estudiada en la Cuenca, no abarca el 100% del territorio; a continuación, se detalla el porcentaje del área de la Cuenca en el departamento:

**Tabla 6.2: Porcentaje del área de la Cuenca en el Departamento.**

Departamento	Municipios del Departamento	Área Depto. Km <sup>2</sup>	Municipios de la Cuenca	Área de la Cuenca Km <sup>2</sup>	Porcentaje de área de la cuenca en el Depto.
Valle del Cauca	42	20.622	33	11.485	<b>55.7%</b>

*Fuente: AVA (2013) & Elaboración propia.*

**Figura 6.3: Mapa de la zona de estudio. Cuenca alta del Río Cauca por su paso por el Departamento del Valle del Cauca.**



*Fuente: Adaptado de Agricultura, Vulnerabilidad y Adaptación (AVA) (2013).*

La información utilizada para el desarrollo de la metodología fue obtenida directamente del Grupo de Investigación en Recursos Hídricos (IREHISA) por la CVC e IDEAM. La base del análisis es mensual y se emplearon en total 66 estaciones pluviométricas que contaron con más de 20 días de información y con un porcentaje de datos faltantes menor al 10%. Se identificaron los datos faltantes, para cada estación pluviométrica, con el criterio de tener un porcentaje de datos faltantes menor al 10% del total de datos, utilizando el método racional deductivo que permite llenar hasta un máximo de once datos faltantes por año, apoyándose en la información que brindan los años con información completa. Este método, considera que la precipitación del mes faltante, es igual al porcentaje de precipitación promedio mensual, respecto al total anual acumulado promedio en esa estación (Puertas *et al.*, 2011). Las series de precipitación empiezan en el año de 1951 hasta el 2013, pero la longitud de esas

series es muy irregular, en algunas regiones de la zona de estudio, en la tabla 6.3, se puede apreciar una muestra de la variabilidad que existe.

**Tabla 6.3: Algoritmo para identificar la serie de precipitación de las estaciones.**

Nombre	Década 60s									Década 70s									Década 80s											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aguacatal										1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AERO Buenaventura			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Alto Anchicaya																	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Angosturas											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Aero Bonilla																	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Austria										1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bahía Málaga																						1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bajo Calima											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Barragán												1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bolo Blanco											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bosque Yotoco																						1	1	1	1	1	1	1	1	1
Brasilia					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Buenavista																	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Buenos Aires												1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bugalgrande											1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.1.2 Periodos Analizados.

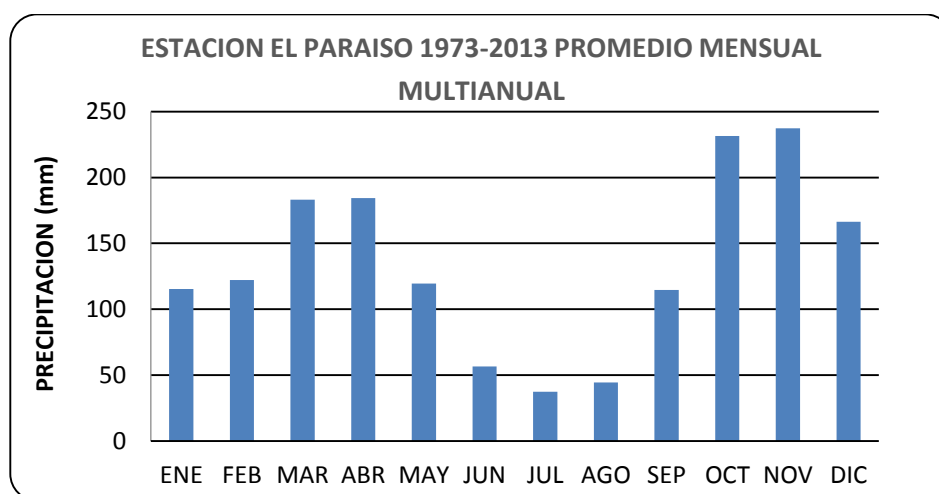
Considerando el año hidrológico como el comprendido entre el comienzo de julio de determinado año (Año 1) hasta el fin de junio del siguiente (Año 2), se tomó ese intervalo de meses debido a que año hidrológico no coincide necesariamente con el año sidéreo del 1 de enero al 31 de diciembre de un mismo año. El año hidrológico se establece para intentar reflejar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones y variables climáticas sobre una determinada zona hidrográfica (Poveda *et al.*, 2001). Se realizó un consenso según el índice evaluado, para este estudio se tomó como referencia las anomalías de la temperatura superficial del Océano Pacífico región Niño 3-4, de acuerdo con lo expresado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de los Estados Unidos, “*las desviaciones de las temperaturas promedio de la superficie marítima en esta región ecuatorial del Pacífico son de importancia decisiva para determinar los principales cambios en el régimen pluvial tropical, que influyen en las corrientes en chorro y los regímenes de temperatura y lluvia en todo el mundo*”<sup>5</sup>”, esto se realizó para llegar a la identificación de las fases del fenómeno ENSO para cada uno de los años entre 1951 y 2013.

<sup>5</sup> Información sustraída de <http://www.pmel.noaa.gov/el-nino/what-is-el-nino>

### 6.1.3 Promedio multianual mensual

Del archivo consolidado de datos mensuales de precipitación, se calculó el promedio mensual multianual de cada una de las series (estaciones). Involucrando la totalidad de los datos, desde su fecha de instalación hasta el año 2013. No se utilizó un periodo estándar para este procedimiento dada la alta variabilidad cronológica de los registros. En la figura 6.4 se evidencia la precipitación media mensual multianual de la estación El Paraíso, donde se muestra la bimodalidad que caracteriza a la cuenca alta del río Cauca.

Figura 6.4: Precipitación media mensual multianual Estación El Paraíso.



Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.4 Meses de afectación.

#### Evento Típico

Se obtuvo como resultado de analizar todos los fenómenos El Niño y la Niña ocurridos desde su fecha de instalación hasta el año 2013, sin importar el carácter de su magnitud débil, moderada o fuerte (ver tabla 6.4). En la metodología de Montealegre (2012), específica que la estimación del efecto climático derivado de un evento típico considera únicamente los meses durante los cuales se verificó la presencia de los fenómenos del ciclo ENOS, en el Océano Pacífico tropical, esta identificación se realizó de acuerdo a las anomalías registradas por el ONI (Índice Oceánico desarrollado por la NOAA) el cual debe ser igual o superior (igual o inferior) a medio grado Celsius de anomalía, para que un evento sea clasificado como un episodio pleno de El Niño o La Niña, estos umbrales deben ser excedidos por un periodo de al menos tres meses consecutivos (ver tabla 6.5).

**Tabla 6.4: Años de eventos ENOS, región Niño 3-4.**

La Niña	El Niño
1950-1951	1951-1952
1954	1953-1954
1955-1956	1957-1958
1964-1965	1958-1959
1967-1968	1963-1964
1970-1971	1965-1966
1972	1968-1966
1973-1974	1969-1970
1974	1972-1973
1975-1976	1976-1977
1984-1985	1977-1978
1988-1989	1979-1980
1995-1996	1982-1983
1998-1999	1986-1987
2000-2001	1991-1992
2007-2008	1994-1995
2010-2011	1997-1998
2011-2012	2002-2003
	2004-2005
	2006-2007
	2009-2010

*Fuente: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) 1/3*

**Tabla 6.5: Meses de Afectación del fenómeno El Niño (primer año), información suministrada por la NOAA.**

AÑO	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1965	1966												
1968	1969												
1969	1970												
1972	1973												
1976	1977												
1977	1978												
1979	1980												
1982	1983												
1986	1987												
1991	1992												
1994	1995												
1997	1998												
2002	2003												
2004	2005												
2006	2007												
2009	2010												

*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.1.5 Afectación trimestral.

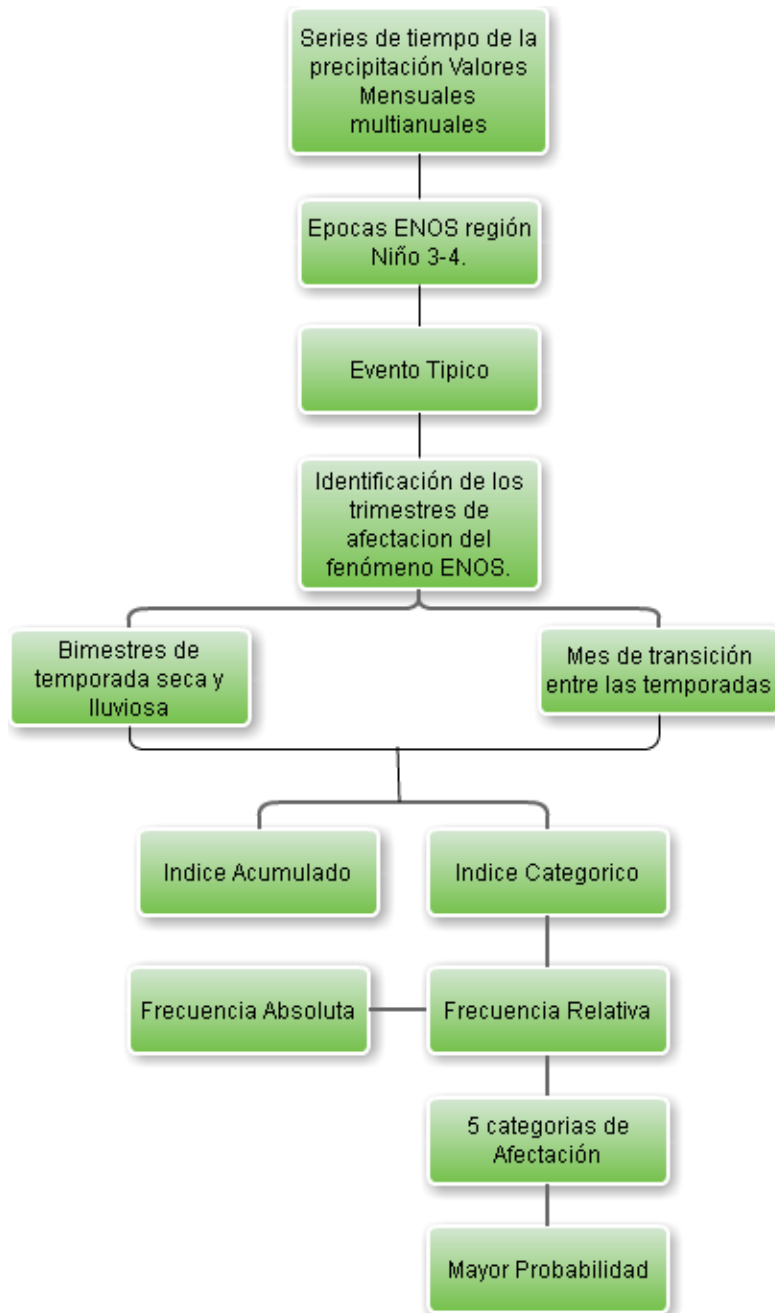
Los periodos de análisis son el tercer y cuarto trimestre del primer año hidrológico y los dos primeros del segundo año, considerados como los de mayor afectación (Evento Maduro del fenómeno ENOS). Estos trimestres son divididos para casos de este estudio en bimestres de la temporada seca (julio-agosto; enero-febrero) y lluviosa (octubre-noviembre; abril-mayo) y en meses de transición (septiembre, diciembre y marzo) entre esas temporadas. Los cálculos para los índices porcentuales puntuales, acumulado y categórico, se realizaron considerando los bimestres y meses de transición (que son los meses en los cuales se presenta una parte característica (seca o lluviosa) y la otra, la característica opuesta (lluviosa o seca) de forma independiente.

**Tabla 6.6: Meses de Afectación e índice acumulado y puntual del fenómeno El Niño (Año Hidrológico), para la estación El Vesubio.**

Índice Acumulado Evento El Niño Estación El Vesubio 1967-2013								
AÑO NIÑO	JA1	S1	ON1	D1	EF2	M2	AM2	J2
1963-1964								
1965-1966								
1968-1969	0	81	68	29	41	70	69	140
1969-1970	27	128	79	154	129	78	133	97
1972-1973	67	51	72	57	49	32	74	110
1976-1977	36	61	100	95	6	45	50	70
1977-1978	121	119	78	142	77	181	110	61
1979-1980	149	101	88	93	56	22	48	76
1982-1983	50	73	61	10	14	86	110	47
1986-1987	79	56	101	11	71	122	42	39
1991-1992	98	96	58	54	78	61	57	86
1994-1995	70	46	88	94	48	69	112	96
1997-1998	26	56	66	4	93	82	75	68
2002-2003	25	98	111	182	77	183	138	250
2004-2005	286	227	192	70	230	179	148	160
2006-2007	128	58	152	209	81	263	210	140
2009-2010	59	5	65	92	19	32	73	149

*Fuente: Elaboración propia: Julio-Agosto (JA1); Septiembre (S1); Octubre-Noviembre (ON1); Diciembre (D1) del primer año hidrológico; Enero-Febrero (EF2); Marzo (M2); Abril-Mayo (AM2) y Junio (J2) del segundo año hidrológico.*

Figura 6.5: Algoritmo utilizado en este estudio para determinar los índices categóricos.



Fuente: Adaptado de Montealegre (2012).



## 6.2 Cálculo de índices de anomalías de Precipitación.

Se construyeron índices mensuales, bimestrales y de transición que detectan anomalías o alteraciones del comportamiento de la precipitación con respecto a la media mensual multianual, las anomalías son calculadas como el cociente entre un dato cualquiera y su valor promedio multianual, expresado en porcentaje (%).

### 6.2.1 Índice puntual (no acumulado).

Si el índice es puntual, es decir, para un solo mes en particular, para este estudio son los meses de transición: marzo y diciembre (mes de transición entre temporadas secas a lluviosas), septiembre y junio (mes de transición entre temporadas lluviosas a secas); el índice puntual ( $I_p$ ) se calculó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_{p_{ij}} = \frac{P_{ij}}{P_j} * 100 \quad [1]$$

$I_{p_{ij}}$ : índice del parámetro del mes  $j$  y el año  $i$ .

$P_{ij}$ : valor del parámetro a nivel mensual del mes  $j$  y el año  $i$ .

$P_j$ : promedio multianual del parámetro del mes.

### 6.2.2 Índice Acumulado.

Se calculó el promedio multianual de cada uno de los periodos bimestrales de los periodos secos y lluviosos de las fases extremas del fenómeno ENOS y se estableció la relación comparativa entre el valor acumulado de la lluvia registrada durante el periodo considerado y el correspondiente valor promedio de dicho periodo. Los meses evaluados fueron julio-agosto; octubre-noviembre; enero-febrero; abril-mayo, los cuales representan temporadas secas y lluviosas. El valor que se obtuvo es el índice acumulado, el cual refleja, en términos porcentuales, la característica del comportamiento registrado: Normal, deficitario o excesivo de la lluvia durante el periodo analizado.

$$I P_i = \frac{\sum_{j=N1}^{j=N2} (P_{ij})}{\sum_{j=N1}^{j=N2} (P_j)} \quad [2]$$

$I P_i$ : índice acumulado del parámetro para cada período definido en el año  $i$ .

$N1, N2$ : son los meses de inicio del año  $i$  y de finalización del año  $i$  e  $i + 1$ .

$P_{ij}$ : valor del parámetro en el mes  $j$  del año  $i$ .

$P_j$ : promedio multianual del parámetro en el mes.

Para cada estación se calculó el índice acumulado, en términos porcentuales, cubriendo la totalidad del período, los bimestres o las temporadas secas o lluviosas afectadas por los eventos Niño y Niña de diferentes categorías de intensidad (débil, moderado o fuerte). Para cada caso, se obtuvo una matriz de **n** estaciones x **m** eventos, con el índice porcentual acumulado. Con base en el índice puntual y acumulado, se establecieron las siguientes categorías de interpretación (ver tabla 6.7).

**Tabla 6.7: Rango de Variación del Índice Acumulado (Montealegre, 2012).**

<b>Rango de Variación</b>	<b>Descripción del efecto</b>	<b>Índice Categórico</b>
$IP_i \leq 40\%$	Déficit severo (muy por debajo de lo normal)	<b>-2</b>
$40\% \leq IP_i \leq 80\%$	Déficit (por debajo de lo normal)	<b>-1</b>
$80\% \leq IP_i \leq 120\%$	Normal	<b>0</b>
$120\% \leq IP_i \leq 160\%$	Excedente (por encima de lo normal)	<b>1</b>
$IP_i \geq 160\%$	Excedente severo (por encima de lo normal)	<b>2</b>

### 6.2.3 Tabla de Frecuencia Absoluta y Frecuencia relativa.

A partir de la matriz de índices categóricos, se calcularon las frecuencias absolutas y relativas con la que se presenta cada índice dentro de cada una de las categorías definidas (-2, -1, 0, 1, 2). Las matrices que resultaron, son consideradas para todas las estaciones seleccionadas, las frecuencias con las que se presentaron los diferentes grados de afectación dentro de las cinco categorías definidas. Como la longitud de los registros no fue la misma para todas las estaciones consideradas, los valores de la frecuencia absoluta no son comparables entre sí, por lo cual fue necesario calcular la frecuencia relativa, para todos los casos.

### 6.2.4 Condiciones de mayor probabilidad.

Con base en los datos de la frecuencia relativa, se estableció la condición más probable de afectación en presencia de un evento ENOS, derivado del mayor valor porcentual obtenido de las frecuencias relativas. En síntesis, las tablas construidas mediante esta metodología correspondieron a la probabilidad de alteración de la precipitación expresada en términos porcentuales en la zona de estudio para cinco categorías de afectación durante la ocurrencia del fenómeno típico el Niño y la Niña, en consecuencia, los mapas elaborados con base en estas tablas, son mapas de la mayor probabilidad de alteración de la precipitación.

Durante esta etapa del análisis se dieron situaciones de conflicto: cuando los porcentajes de la frecuencia relativa tuvieron igual proporción entre dos categorías opuestas, se dio prelación a la fase que se estuvo analizando. Si además el mayor valor de la tabla de frecuencias corresponde a la condición normal, pero la suma de los porcentajes de las condiciones fría o cálida iguala o supera este valor, se dio prelación al mayor valor de la condición analizada.

### **6.2.5 Determinación cuantitativa de las áreas afectadas para la precipitación.**

Para la realización de los mapas de afectación del fenómeno El Niño-Oscilación Sur se recurrió al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la ejecución del método de interpolación se realizó con en el *Software ArcGis 10.1* con la herramienta *Geostatistical Analyst*, se utilizó la herramienta *Spline*, este método de interpolación estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, resultando una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada la cual permitió explorar la variabilidad de datos examinando tendencias globales y permitiendo investigar a su vez la autocorrelación y la correlación entre los datos seleccionados. El tipo de *Spline* utilizado fue el de Tensión, esta modifica el criterio de minimización para que los términos de la derivada primera se incorporen a los criterios de minimización. El parámetro de Peso especifica el peso adjunto a los términos de la derivada primera durante la minimización, que se denomina  $\Phi$  (*phi*). Un peso de cero resulta en la interpolación por *Spline* por lámina delgada básica. Al utilizar un valor de peso mayor, se reduce la rigidez de la lámina y, a medida que *phi* se acerca a infinito en el límite, la superficie se aproxima a la forma de una membrana u hoja de goma que pasa por los puntos; la superficie interpolada resulta suave<sup>6</sup>.

Para el método de *Spline* de Tensión, el parámetro definido fue 5, y el parámetro de cantidad de puntos que identifica el número de puntos que se utilizan en el cálculo de cada celda interpolada fue de 12.

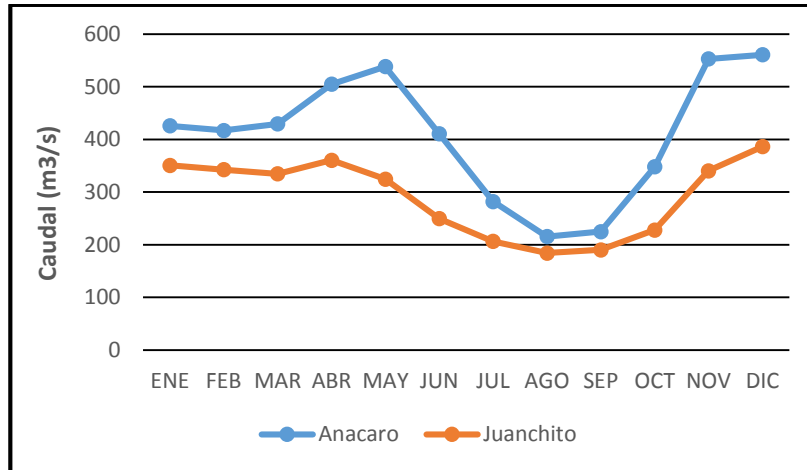
### **6.3 Cálculo del índice de anomalías Caudales de escurrimiento del río Cauca.**

El caudal de un río es un parámetro importante que permite analizar variaciones espacio-temporales de él. Su estudio es de gran utilidad porque a partir de su dinámica, permite explicar o predecir geofomas, problemas de degradación y erosión. El conocimiento de su dinámica fluvial podría generar soluciones y donde se determinaría las posibilidades de aprovechamiento del recurso hídrico (Torrado, 2010). Por otra parte, a través del balance de aguas de esorrentía de una cuenca se puede realizar una evaluación cuantitativa espacio-temporal del recurso agua de la zona de estudio. En la figura 6.6 se evidencia las dos estaciones que se utilizaron en este estudio, donde la estación que presenta más caudal se encuentra en la estación Anacaro, se evidencia además los picos de bimodalidad (temporadas secas y lluviosas).

---

<sup>6</sup> Información de *ArcGIS*, <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.html>

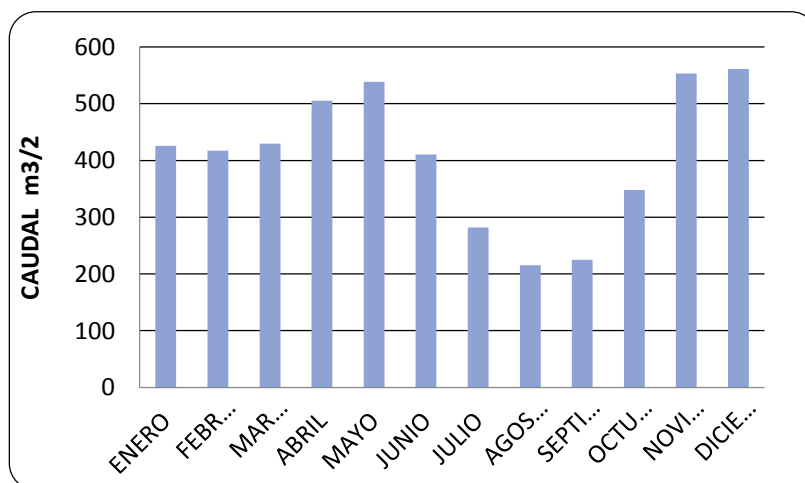
**Figura 6.6: Caudal medio mensual multianual Estación Juanchito y Anacaro, periodo 1985-2012.**



*Fuente: Elaboración propia.*

Se construyeron índices trimestrales que detectaron anomalías o alteraciones del comportamiento de los caudales de entrada y salida del río Cauca. Se realizó un balance de aguas del río Cauca en la zona de estudio entre las estaciones Juanchito y Anacaro respectivamente para estudiar las modificaciones de la escorrentía en los periodos críticos del fenómeno ENOS. Estos datos se corresponden a la media mensual multianual (ver figura 6.7). Las anomalías se estimaron, expresando en porcentaje (%), entre un dato cualquiera y su valor promedio. De acuerdo con Carvajal, Enciso & Sandoval (2016) los datos de la estación Juanchito fueron analizados en el periodo post-Salvajina de 1985 a 2011, para la estación Anacaro, donde el efecto de la regulación no es significativo se utilizó el registro histórico desde 1961 a 2012.

**Figura 6.7: Caudal medio mensual multianual Estación Anacaro 1961-2012.**



*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.3.1 Índice puntual (no acumulado).

Si el índice es puntual, es decir, para un solo mes en particular, en este caso son los meses de transición: septiembre, diciembre, marzo y junio; el índice ( $I_p$ ) se calculó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_{p_{ij}} = \frac{P_{ij}}{P_j} * 100 \quad [3]$$

$I_{p_{ij}}$ : índice del parámetro del mes  $j$  y el año  $i$ .

$P_{ij}$ : valor del parámetro a nivel mensual del mes  $j$  y el año  $i$ .

$P_j$ : promedio multianual del parámetro del mes.

### 6.3.2 Índice Acumulado.

Se calculó el promedio multianual de cada uno de los periodos bimestrales de los periodos secos y lluviosos de las fases extremas del fenómeno ENOS en el río Cauca y se estableció la relación comparativa entre el valor acumulado de los caudales registrados durante el periodo considerado y el correspondiente valor promedio de dicho periodo. Los bimestres evaluados fueron julio-agosto; octubre-noviembre; enero-febrero; abril-mayo, los cuales representan temporadas secas y lluviosas respectivamente. El valor que se obtuvo es el índice acumulado, el cual refleja, en términos porcentuales, la característica del comportamiento registrado: Normal, deficitario o excesivo de los caudales durante el periodo analizado.

$$I P_I = \frac{\sum_{j=N1}^{j=N2} (P_{ij})}{\sum_{j=N1}^{j=N2} (P_j)} \quad [4]$$

$I P_i$ : índice acumulado del parámetro para cada período definido en el año  $i$ .

$N1, N2$ : son los meses de inicio del año  $i$  y de finalización del año  $i$  e  $i + 1$ .

$P_{ij}$ : valor del parámetro en el mes  $j$  del año  $i$ .

$P_j$ : promedio multianual del parámetro en el mes.

Con base en el índice puntual y acumulado, se establecieron las siguientes categorías de interpretación. Para cada estación se calculó el índice acumulado, en términos porcentuales, cubriendo la totalidad del período, los trimestres o las temporadas secas o lluviosas afectadas por los eventos Niño y Niña de diferentes categorías de intensidad (débil, moderado o fuerte). Para cada caso, se obtuvo una matriz de  $n$  estaciones x  $m$  eventos, con el índice porcentual acumulado.

### 6.3.3 Tabla de Frecuencia Absoluta y Frecuencia relativa.

A partir de la matriz de índices categóricos, se calcularon las frecuencias absolutas y relativas con la que se presenta cada índice dentro de cada una de las categorías definidas (-2, -1, 0, 1, 2). Las matrices que resultaron, son consideradas para todas las estaciones seleccionadas, las frecuencias con las que se presentaron los diferentes grados de afectación dentro de las cinco categorías definidas (ver tabla 6.8). Como la longitud de los registros no fue la misma para todas las estaciones consideradas, los valores de la frecuencia absoluta no son comparables entre sí, por lo cual fue necesario calcular la frecuencia relativa, para todos los casos.

**Tabla 6.8: Rango de Variación del Índice Acumulado - Caudales (Montealegre, 2012).**

Rango de Variación	Descripción del efecto	Índice Categórico
$IP_i \leq 40\%$	Déficit severo (muy por debajo de lo normal)	-2
$40\% \leq IP_i \leq 80\%$	Déficit (por debajo de lo normal)	-1
$80\% \leq IP_i \leq 120\%$	Normal	0
$120\% \leq IP_i \leq 160\%$	Excedente (por encima de lo normal)	1
$IP_i \geq 160\%$	Excedente severo (por encima de lo normal)	2

*Fuente: Elaboración propia.*

### 6.3.4 Condiciones de mayor probabilidad.

Con base en los datos de la frecuencia relativa, se estableció la condición más probable de afectación en presencia de un evento ENOS, derivado del mayor valor porcentual obtenido de las frecuencias relativas. En síntesis, las tablas construidas mediante esta metodología correspondieron a la probabilidad de alteración de los caudales expresada en términos porcentuales para cinco categorías de afectación durante la ocurrencia del fenómeno típico el Niño y la Niña.

Durante esta etapa del análisis se dieron situaciones de conflicto: cuando los porcentajes de la frecuencia relativa tuvieron igual proporción entre dos categorías opuestas, se dio prelación a la fase que se estuvo analizando. Si además el mayor valor de la tabla de frecuencias corresponde a la condición normal, pero la suma de los porcentajes de las condiciones fría o cálida iguala o supera este valor, se dio prelación al mayor valor de la condición analizada.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 *Índices Categóricos Precipitación.*

Con miras a verificar el tipo de efecto que los fenómenos extremos de El Niño y La Niña producen sobre los patrones de precipitación en la zona de estudio durante los meses de afectación, que son los meses de transición y los meses de temporadas secas y lluviosas, se examinaron los datos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación para cada una de las categorías definidas (déficit severo, déficit, normal, excedente y excedente severo).

Carvajal *et al.*, (1998) reportan que el valle del río Cauca presenta un régimen de precipitación bimodal, como resultado de la actividad de la ZCIT, con dos trimestres secos (diciembre- febrero y junio-agosto) y dos lluviosos (Marzo-Mayo y Septiembre-Noviembre) (Puertas & Carvajal, 2008; Puertas *et al.*, 2011). La precipitación anual de la zona interandina del Valle oscila entre 4000 mm y los 1200 mm en las partes altas y plana respectivamente. Del total de precipitación, el 70,0% corresponde a los meses lluviosos, y el 30,0% a los secos. La información recopilada permite inferir que los periodos de ocurrencia de El Niño, las precipitaciones se reducen hasta un 50,0%, ocasionando la disminución de los caudales medios hasta alcanzar los mínimos históricos más bajos.

#### 7.1.1 Fenómeno El Niño.

En la tabla 7.1, se evidencia la mayor probabilidad de afectación para cada una de las categorías definidas; el fenómeno de El Niño (fase cálida), demuestra la deficiencia de precipitación en el Valle alto del río Cauca por su paso por el departamento del Valle del Cauca, como condición más probable de déficit. Se evaluaron a nivel trimestral desde el tercer trimestre del primer año, hasta el segundo trimestre del segundo año, abarcando todo el año hidrológico. A nivel estacional o por temporadas secas y lluviosas, se evidencia que el fenómeno El Niño está definido con porcentajes del 80,0% como déficit; el 78,8% de las series de la temporada octubre-noviembre del primer año muestra un comportamiento normal, lo mismo ocurre con abril-mayo del segundo año con un porcentaje de 74,3% de normalidad. Los meses más afectados por déficit es el trimestre Diciembre-Enero-Febrero. Este resultado se obtuvo de analizar por cada periodo, la frecuencia absoluta del índice categórico, donde se obtuvo el porcentaje de participación por cada categoría de afectación (déficit severo, déficit etc.) realizándose un Contar.Si y dividiéndose por el total de las estaciones, se obtuvo la mayor probabilidad de afectación de la precipitación.

**Tabla 7.1: Índices categóricos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación estacional de las lluvias.**

<b>EVENTO EL NIÑO</b>	<b>-2 (%)</b>	<b>-1(%)</b>	<b>0(%)</b>	<b>1(%)</b>	<b>2(%)</b>	
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	45,5	39,4	15,2	-	-
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Sep</b>	9,1	56,1	34,8	-	-
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Oct-Nov</b>	0,0	21,2	78,8	-	-
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Dic</b>	19,7	65,2	15,1	-	-
	<b>Ene-Feb</b>	19,7	72,7	7,6	-	-
	<b>Mar</b>	6,1	53,0	41,0	-	-
	<b>Abr-May</b>	0,0	25,8	74,3	-	-
	<b>Jun</b>	39,4	36,4	24,2	-	-

*Fuente: Elaboración propia.*

El análisis de correlaciones realizado por Peña *et al.*, (2001) demostró que existe una marcada tendencia de las variables climáticas locales a depender de los parámetros externos del ENOS. El análisis de correlaciones discriminadas por meses y temporadas mostró que las anomalías climáticas locales causadas por los fenómenos El Niño y La Niña son mucho más notorias en algunos meses y temporadas en particular, durante las temporadas secas, específicamente en los meses de enero, febrero, julio y agosto y, por el contrario, son mucho menores durante los meses de abril, mayo y octubre, pertenecientes a las temporadas lluviosas; esto concuerda con la investigación, si se tiene en cuenta que el desplazamiento de los datos se da a la izquierda de la tabla donde los más altos valores de porcentaje de afectación se encuentran en déficit. Se evidencia además que durante los meses DEF la afectación fue del 80,0% de todas las series de precipitación utilizadas para este estudio.

#### ***7.1.1.1 Descripción de los mapas correspondientes a la condición más probable de afectación del patrón pluviométrico durante la ocurrencia de fenómeno El Niño.***

Generar los mapas de anomalías de precipitación se realizó con la finalidad de observar en qué lugar de la zona de estudio presentó un mayor impacto de El Niño-Oscilación Sur, en cuanto a reducción y/o aumento de la precipitación, esto se realizó con el fin de ampliar el conocimiento de cuáles serán las zonas que se afectarán en el momento de ocurrir nuevamente eventos de tal magnitud en la región y así poder contar con planes de contingencia, para reducir la afectación de las diferentes actividades económicas de la región y también para prevenir pérdidas humanas y económicas en el momento de que los desastres se presenten debido a estos eventos extremos.

Para la realización de los mapas se contó con el *Software ArcGis 10.1* con la herramienta *Geostatistical Analyst (Spline)*. Los mapas con los índices categóricos no pudieron interpolarse directamente ya que son datos discretos y para interpolar se requiere continuidad; Montealegre (2012), en el cual se basó gran parte de la metodología no específica como se realizó este tipo de espacializaciones de precipitación en Cundinamarca, por tal motivo se



recurrió a interpolar solo las series de índices porcentuales acumuladas (Julio-Agosto, etc.) y puntuales (Marzo, etc.) que presentaran un porcentaje de alteración mayor, dependiendo del Fenómeno estudiado El Niño o La Niña. La metodología de Montealegre (2012) no toma un periodo común de series de precipitación, para esta investigación se tomó el registro desde el año 1982-2013 donde se obviaron los años anteriores. Los años escogidos para cada evento de estudio fueron: Julio-Agosto (1997-1998) el cual presentó 95,5% de afectación por déficit severo. Septiembre (2009-2010) el cual presentó un déficit severo y déficit en 47,0% y 45,5% respectivamente. Octubre-noviembre (1991-1992) el cual enseñó un déficit en 57,6% de las estaciones. Diciembre (1997-1998) el cual mostró déficit severo en el 65,2% de las estaciones. Enero-Febrero (1994-1995) el cual presentó un déficit severo en 51,5% y un déficit en 42,4% de las estaciones. Marzo (1991-1992) mostró un déficit severo en el 39,4% y un déficit en el 50,0% de las estaciones. Abril-Mayo (1991-1992) presentó un 72,7% de las estaciones en déficit y Junio (1986-1987) mostró un déficit severo en el 42,4% de las estaciones y un déficit en el 42,4% de ellas, estos mapas se encuentran en los anexos del trabajo de grado (ver tabla 7.2).

**Tabla 7.2 Condición más probable de afectación durante la ocurrencia de ENOS, Evento El Niño.**

Periodo	Años de Afectación	-2 (%)	-1 (%)	0(%)	1(%)	2(%)
		IP <= 40	40 < IP <= 80	80 < IP <=120	120< IP <= 160	IP > 160
<b>Jul-Ago</b>	1997-1998	95,5	1,5	3,0	-	-
<b>Sep</b>	2009-2010	47,0	45,5	7,6	-	-
<b>Oct-Nov</b>	1991-1992	6,1	57,6	36,4	-	-
<b>Dic</b>	1997-1998	65,2	30,3	4,5	-	-
<b>Ene-Feb</b>	1994-1995	51,5	42,4	6,1	-	-
<b>Mar</b>	1991-1992	39,4	50,0	10,6	-	-
<b>Abr-May</b>	1991-1992	10,6	72,7	16,7	-	-
<b>Jun</b>	1986-1987	42,4	42,4	15,1	-	-

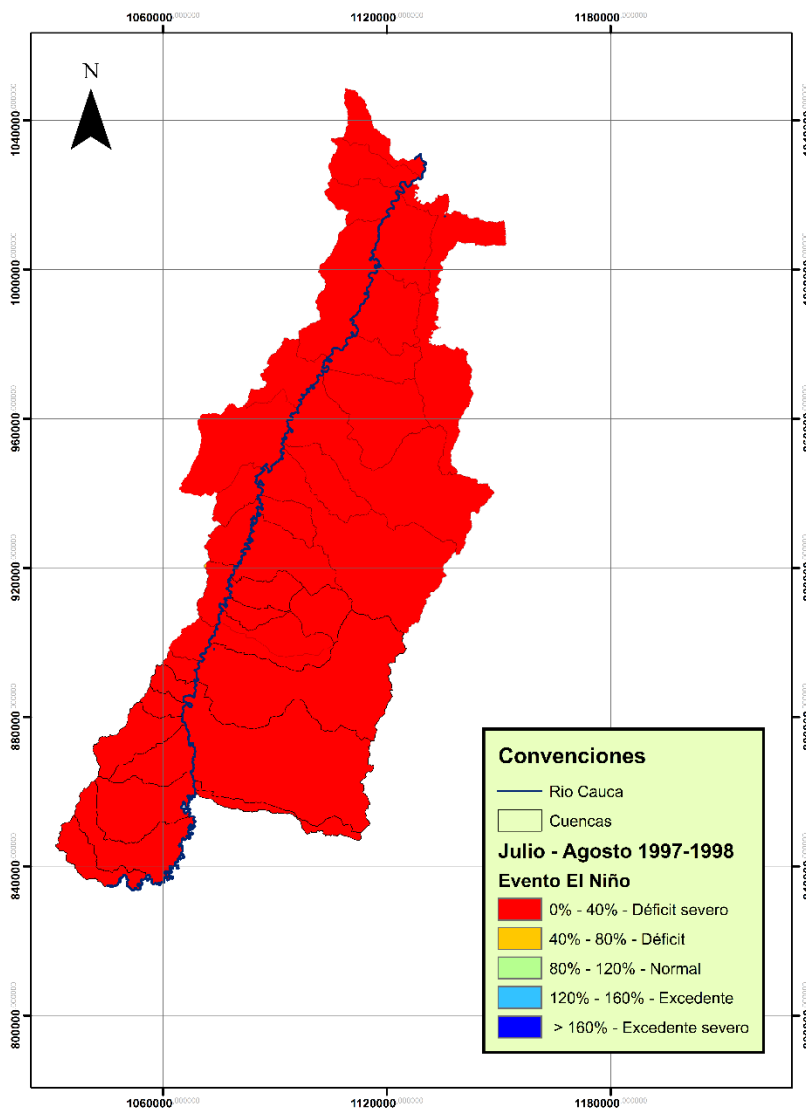
*Fuente: Elaboración propia.*

### **El Niño, periodo Julio-Agosto, año 1997-1998.**

Este evento, que se prolongó durante doce meses, inició en mayo de 1997 y finalizó en abril de 1998. El evento extremo del fenómeno El Niño se representa en el mapa con una alta afectación (ver figura 7.1); el análisis realizado a las 66 estaciones pluviométricas ubicadas en la zona de estudio, donde se tuvo en cuenta el índice acumulado de julio-agosto para todas las series de precipitación la mayor afectación fue presentada por el año 1997-1998, donde el fenómeno ocurrido en ese año se catalogó como fuerte, caracterizado además, por su atipicidad; se observaron deficiencias de precipitación en gran parte de la cuenca. La distribución espacial de las anomalías que corresponde a las estaciones Venecia de la cuenca del río Riofrío y Cajones de la cuenca del río Desbaratado, que durante este evento presentaron valores atípicos de 59,8% y 70,0% respetivamente, encontrándose dentro de la

categoría normal, la estación Venecia tiene incidencia por la región Pacífico la cual para este evento recibe humedad proveniente de los vientos alisios debilitados.

**Figura 7.1: Anomalías de precipitación ocurrida en el período Julio-Agosto 1997-1998.**



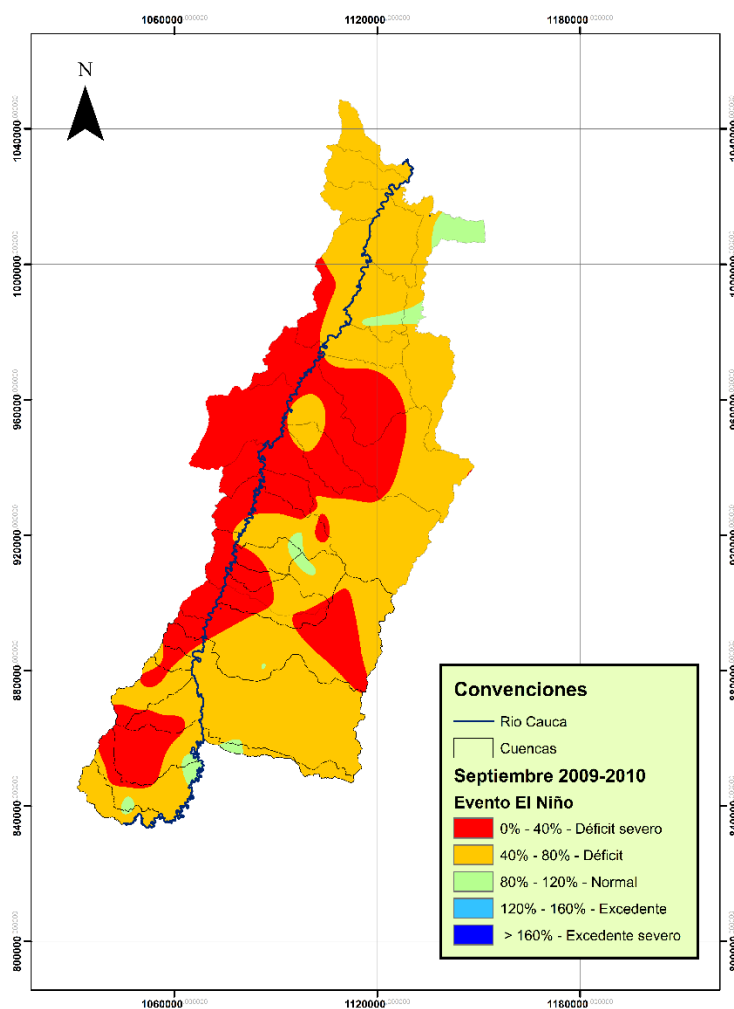
*Fuente: Elaboración propia.*

### **El Niño, periodo Septiembre, año 2009-2010.**

El evento de 2009-2010 fue catalogado de débil (ver figura 7.2), para el análisis del mes de septiembre que es un mes de transición entre temporada seca y lluviosa, se evidencia en el mapa de distribución espacial tanto eventos de déficit y condiciones normales. El déficit se presenta incidencia en la zona plana de la cuenca y el exceso lo representa en este caso la

estación La Magdalena de la cuenca del río Guadalajara y El Placer de la cuenca del río Tuluá, generando un ojo de buey en la zona plana de la cuenca; revisando la precipitación se evidencia que el máximo fue de 168 mm y el mínimo de 38 mm, además se debe tener en cuenta la transición del mes, de seco a húmedo debido a la ZCIT. Además se muestra claramente cómo el inicio de la afectación, ocurre durante el tercer trimestre del primer año, una vez establecido plenamente el desarrollo del fenómeno en el sector central del Pacífico tropical. Los déficits de precipitación observados toman el carácter de severos en áreas muy localizadas del sector central de la cuenca.

**Figura 7.2: Anomalías de precipitación ocurrida en el mes de Septiembre 2009-2010.**

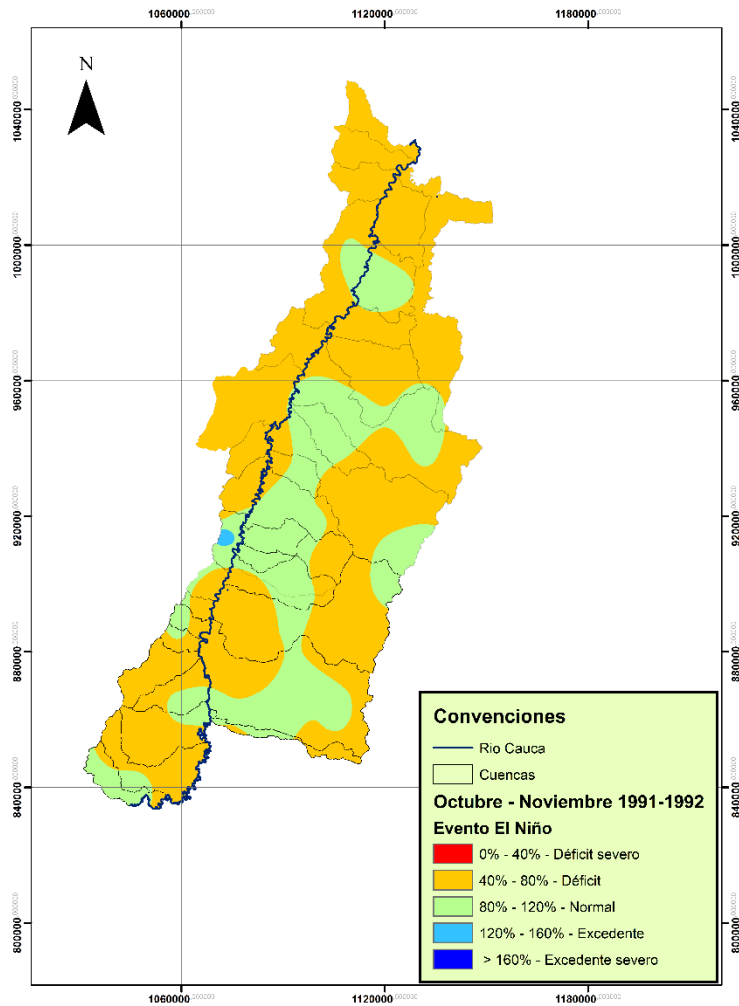


*Fuente: Elaboración propia.*

## El Niño, periodo octubre-noviembre, 1991-1992.

En el mapa la cuenca alta del río Cauca presenta un comportamiento parcialmente normal (ver figura 7.3), en la estación Buenos Aires de la cuenca Yotoco, se evidencia condición de exceso eso se debe al contacto con la región pacífica y si se analiza la relación cordillera-Valle se entendería el comportamiento normal de la precipitación aun cuando haya una presencia de fenómenos extremos, algunas estaciones como Boloblanco y La Italia ubicadas en la vertiente occidental de la cordillera Central, el comportamiento es normal; para la cordillera occidental las estaciones El Retiro de la cuenca del río Pescador, presenta el mismo comportamiento. El evento ocurrido en el año 1991-1992 fue catalogado como moderado, pero este evento impacto de forma importante los recursos hidro-energéticos de Colombia.

**Figura 7.3: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Octubre-Noviembre 1991-1992.**

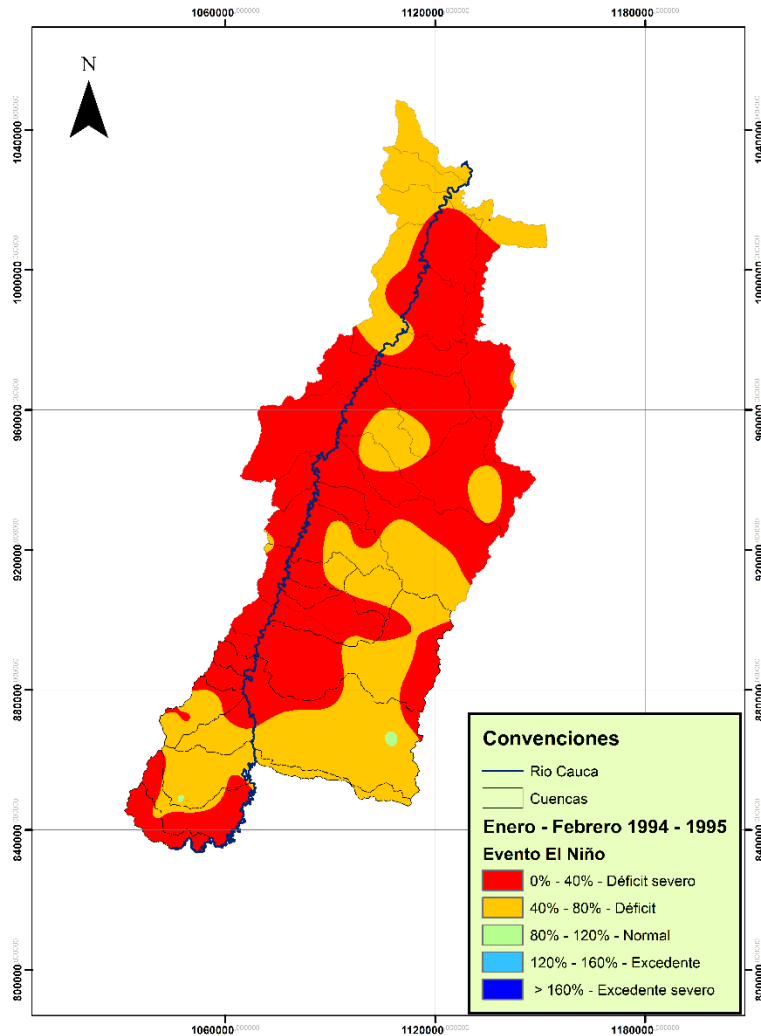


*Fuente: Elaboración propia.*

### El Niño, periodo enero-febrero, 1994-1995.

El evento denota mayor déficit severo en la vertiente oriental de la cordillera occidental, aunque la parte noreste de la cuenca presenta también déficit severo. La parte sur de la cuenca específicamente la estación La Soledad presentan condiciones de normalidad (87,0%), lo mismo con la estación Aguacatal (117,0%) de la cuenca Cali.

**Figura 7.4: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Enero-Febrero, 1994-1995.**



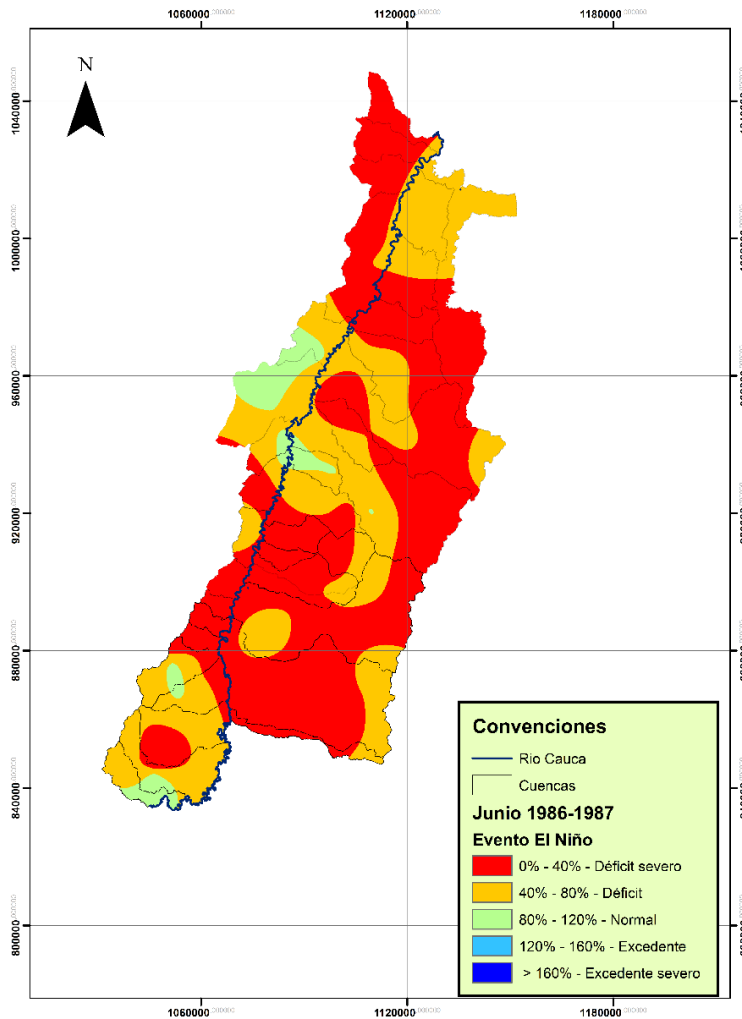
*Fuente: Elaboración propia.*

El primer trimestre del segundo año presenta la más alta variación y coincidiendo generalmente con la fase madura de los eventos (época en las que se presentan las máximas anomalías en la estructura térmica superficial del Pacífico tropical), los déficits de precipitación cubren la mayor parte de la cuenca.

## El Niño, periodo junio, 1986-1987.

El año 1986-1987 fue catalogado el evento como Moderado, se evidencia en la cordillera central en la vertiente occidental una alta afectación por déficit severo, también el efecto es visible en la parte sureste de la cuenca. Para la parte sur de la cuenca alta del río Cauca se presenta condiciones normales. Lo mismo ocurre para la cuenca Mediacanoa, cuenca del río San Pedro y cuenca del río Cali.

**Figura 7.5: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Junio, 1986-1987.**



*Fuente: Elaboración propia.*

En general, el efecto de los fenómenos típicos El Niño sobre la precipitación estacional en la cuenca Alta del Río Cauca es más acentuado en las temporadas secas que en las lluviosas. En efecto, durante la primera temporada lluviosa del primer año el comportamiento es prácticamente normal (Octubre-Noviembre), mientras que en la segunda (Abril-Mayo), sólo se observan algunos núcleos deficitarios dispuestos en forma dispersa. En la primera temporada seca del primer año de ocurrencia del fenómeno El Niño, los déficits son

generalizados en toda la cuenca, adquiriendo el carácter de severo; en la primera temporada seca del segundo año y muy cerca de la fase madura de los eventos, la condición deficitaria se extiende por toda la cuenca, aunque las anomalías de carácter severo sólo aparecen en forma dispersa en el centro, sureste y noroeste de la cuenca.

La señal propia de la fase cálida de ENSO queda muy bien reflejada, en relación con la intensidad y el carácter de las anomalías de precipitación, durante las diferentes etapas de transición entre las temporadas lluviosas y secas, tal como se observaron en los anteriores mapas. En resumen, septiembre (final de la primera temporada seca del año hidrológico), las anomalías se han extendido y se observan pequeños núcleos con alteraciones severas hacia la parte media de la cuenca. En diciembre (ver anexo), una vez finalizada la primera temporada lluviosa y coincidiendo con la fase madura del fenómeno El Niño, se registra una condición deficitaria de lluvia en toda la cuenca, junto con la extensión de los núcleos con afectación de carácter severo en el sur, centro, nororiente y oriente. En marzo del segundo año (ver anexo), la situación tiende a normalizarse, cuando los déficits de agua, aunque generalizados, sólo presentan áreas muy reducidas con afectación severa. Para el final de la segunda temporada lluviosa del año (junio), la magnitud y el cubrimiento de los déficits de lluvia, se reduce a núcleos pequeños y dispersos a lo largo de toda la cuenca alta del río Cauca.

### **7.1.2 Fenómeno La Niña.**

En la tabla 7.3, se evidencia la mayor probabilidad de afectación para cada una de las categorías definidas; el fenómeno de La Niña (fase fría), demuestra el aumento de precipitación en la cuenca alta del río Cauca por su paso por el departamento del Valle del Cauca, como condición más probable de exceso. Se evaluaron a nivel trimestral desde el tercer trimestre del primer año, hasta el segundo trimestre del segundo año, lo que abarca todo el año hidrológico. A nivel estacional o por temporadas secas y lluviosas, se evidencia que el fenómeno La Niña está definido con porcentajes del 80,0% como exceso en el período de julio-agosto; octubre-noviembre del primer año muestra un comportamiento normal 77,3%; lo mismo ocurre con abril-mayo del segundo año con un porcentaje de 87,9% de normalidad. Los meses más afectados por exceso son los meses de Enero-Febrero y Junio. Del período húmedo, la segunda temporada es la más lluviosa (Octubre y Noviembre) con precipitaciones superiores a 200 mm/mensuales (Carvajal & Enciso, 2016), esto no se logra evidenciar en este estudio ya que se evidencia comportamiento normal en las series de precipitación.

**Tabla 7.3: Índices categóricos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación pluviométrica.**

EVENTO LA NIÑA		-2 (%)	-1 (%)	0(%)	1(%)	2(%)
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	-	-	18,2	19,7	62,1
	<b>Sep</b>	-	-	63,6	27,3	9,1
	<b>Oct-Nov</b>	-	-	77,3	22,7	0,0
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Dic</b>	-	-	59,1	30,3	10,6
	<b>Ene-Feb</b>	-	-	45,4	33,3	21,2
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Mar</b>	-	-	83,3	12,1	4,5
	<b>Abr-May</b>	-	-	87,9	12,1	0,0
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Jun</b>	-	-	48,2	31,8	19,7

*Fuente: Elaboración propia.*

La investigación realizada por Poveda (2004) afirma que los factores que afectan la distribución espacio-temporal de la precipitación, se deben al patrón general de circulación atmosférica, al relieve de la cordillera Occidental y Central, la convección profunda, la distancia al Océano Pacífico y la vegetación; además a las zonas de calmas ecuatoriales o de convergencia intertropical.

La cuenca recibe gran influencia de la región pacífica, ya que los eventos hidroclimatológicos se encuentran influenciados por la variabilidad espacial y temporal del llamado chorro del Choco gran aportante de humedad en esta zona, Poveda (1998) lo denomina este evento como vientos transecuatoriales que soplan sobre el Océano Pacífico adquiriendo una trayectoria de Oeste a Este hacia el interior del país como una corriente superficial. Especialmente en la región pacífica hay una fuerte correlación entre la advección de humedad por el chorro del Choco y las diferentes fases del ENOS, donde la primera se debilita durante El Niño y se intensifica durante La Niña, contribuyendo a la presencia de anomalías hidrológicas durante ambas fases de gran intensidad (Rueda & Poveda, 2006).

Esto se evidencia en la vertiente occidental de la cordillera Central ya que presenta el mayor índice de precipitación en la región, evidenciado en el número de ríos tributarios en la margen derecha del río Cauca (Carvajal *et al.*, 2016). Por tal motivo fue necesario la inclusión de esas estaciones climatológicas para un estudio más amplio de los impactos del fenómeno extremo El Niño-Oscilación del Sur. El recorrido de las masas de aire húmedo y frío provenientes de la corriente del chorro del Choco que ascienden por el flanco occidental de la cordillera Occidental y confluyen con los vientos alisios del este, las masas de aire de la cordillera Occidental recorren su vertiente oriental en forma de vientos catabáticos hacia la planicie del valle, donde descienden y se calientan empujando la humedad hacia la ladera occidental de la cordillera Central, donde según Poveda (1998), la lluvia derivada de los ingresos de aire húmedo hacia la cordillera, ocurre principalmente en las laderas y no en el fondo del valle, que por ser más estrecho y alto es más seco, por tal motivo esta vertiente presenta el mayor índice de precipitación y por ende un número amplio de tributarios, se



evidencia en los mapas de afectación donde se observa una marcada influencia de las estaciones allí presentes.

**7.1.2.1 Descripción de los mapas correspondientes a la condición más probable de afectación del patrón pluviométrico durante la ocurrencia de fenómenos La Niña.**

Los años escogidos para cada evento de estudio fueron: Julio-Agosto (2010-2011) el cual presentó 75,8% de afectación por excedente severo. Septiembre (1984-1985) el cual presentó exceso severo en 65,2% de las estaciones. Octubre-Noviembre (2010-2011) el cual mostró un exceso severo en 36,4% y un 43,9% de exceso de las estaciones. Diciembre (2011-2012) el cual presentó exceso severo en el 51,5% de las estaciones. Enero-Febrero (1998-1999) el cual presentó un exceso severo en el 81,8% de las estaciones. Marzo (1995-1996) mostró un exceso severo en el 34,8% y un exceso en el 30,3% de las estaciones. Abril-Mayo (2011-2012) presentó un exceso en 36,4% de las estaciones en déficit y Junio (1998-1999) presentó un exceso en el 43,9% de las estaciones (ver tabla 7.4).

**Tabla 7.4 Condición más probable de afectación durante la ocurrencia de ENOS, Evento La Niña.**

Periodo	Años de Afectación	<b>-2 (%)</b>		<b>-1 (%)</b>		<b>0(%)</b>		<b>1(%)</b>		<b>2(%)</b>	
		IP <= 40	40 < IP <= 80	80 < IP <= 120	120 < IP <= 160	IP > 160					
<b>Jul-Ago</b>	2010-2011	-	1,5	9,1	13,6	75,8					
<b>Sep</b>	1984-1985	-	3,0	7,6	24,2	65,2					
<b>Oct-Nov</b>	2010-2011	1,5	1,5	16,7	43,9	36,4					
<b>Dic</b>	2011-2012	3,0	1,5	15,2	28,8	51,5					
<b>Ene-Feb</b>	1998-1999	1,5	6,1	1,5	9,1	81,8					
<b>Mar</b>	1995-1996	-	6,1	28,8	30,3	34,8					
<b>Abr-May</b>	2010-2011	1,5	1,5	40,9	36,4	19,7					
<b>Jun</b>	1998-1999	1,5	7,6	10,6	36,4	43,9					

*Fuente: Elaboración propia.*

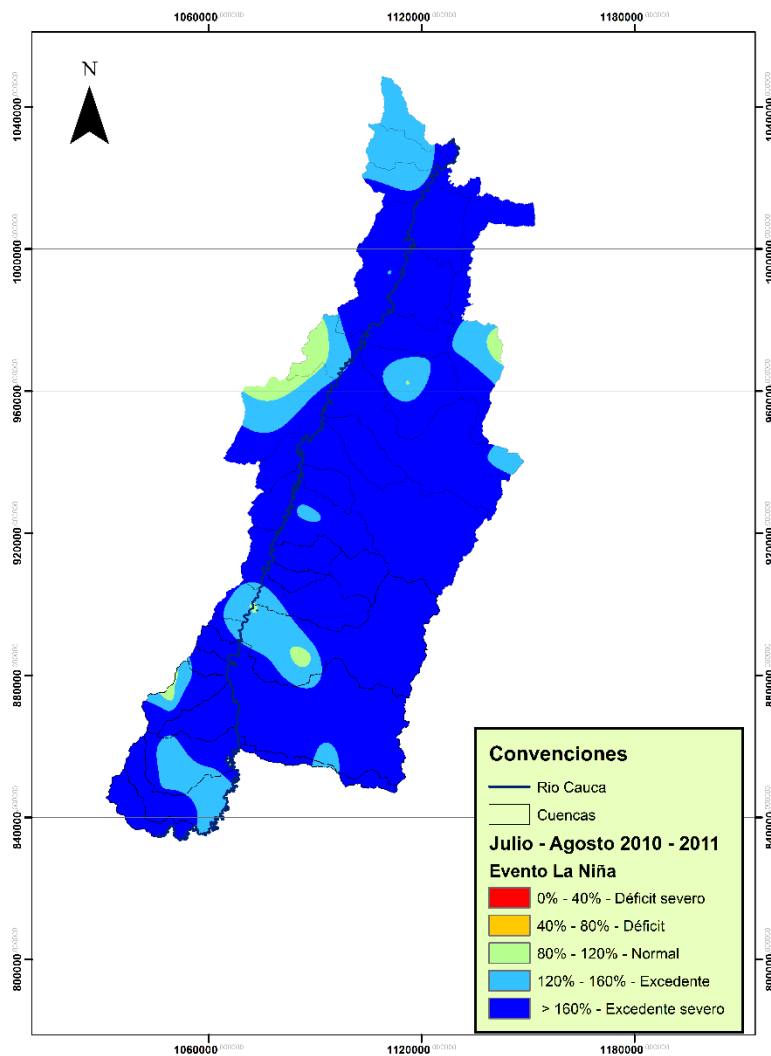
**La Niña, periodo Julio-Agosto, año 2010-2011.**

Cuando se presenta el fenómeno típico de La Niña la condición más probable es la ocurrencia de un aumento de las lluvias en la cuenca hidrográfica, se presenta en el mapa con una alta influencia (ver figura 7.6); el análisis realizado a las 66 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca alta del río Cauca, donde se tuvo en cuenta el índice acumulado de julio-agosto para todas las series de precipitación, la mayor afectación fue presentada por el año 2010-2011, este fenómeno tuvo una alta incidencia en el comportamiento hidroclimático de la cuenca, la mayoría de los meses del segundo semestre del 2010 presentaron lluvias excesivas, dando como resultado excedente severo de precipitación cubriendo la totalidad de la cuenca. Solo unos núcleos no fueron afectados por el evento, la cuenca Jamundí y Amaime presenten

comportamientos normales, lo mismo ocurre con la cuenca La Vieja y La Paila al norte de la cuenca alta del río Cauca, y al sur de la cuenca del río Cauca.

Un comportamiento similar al observado durante el evento cálido (El Niño), ocurre durante el fenómeno frío (La Niña), cuando las mayores anomalías pluviométricas (excedentes de carácter severo) se presentan durante el tercer trimestre del primer año.

**Figura 7.6: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Julio-Agosto 2010-2011.**



*Fuente: Elaboración propia.*

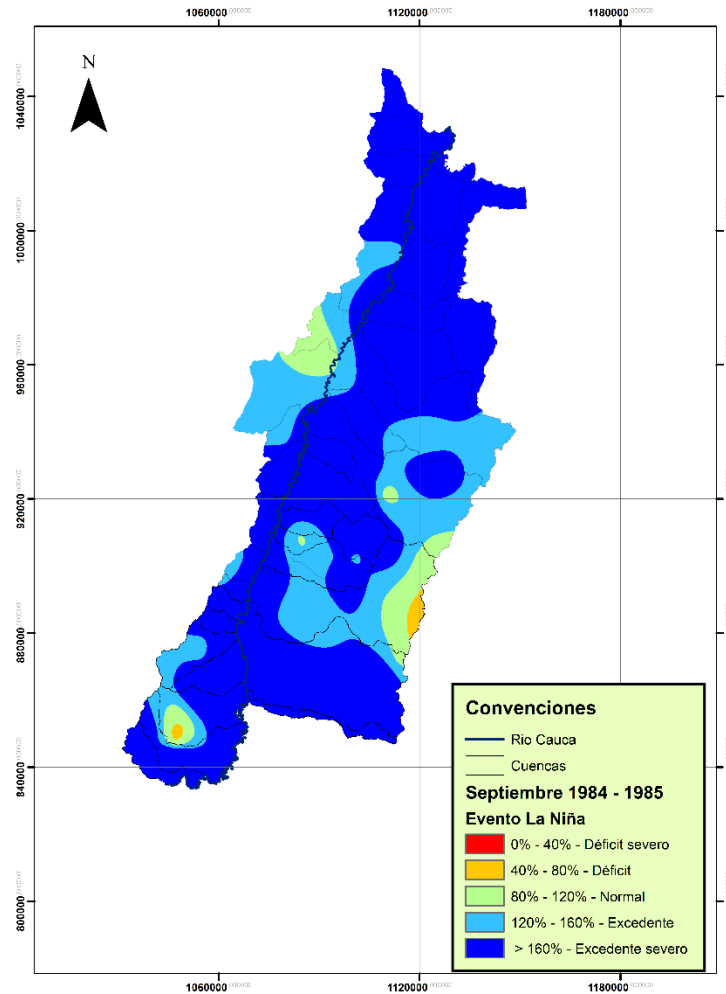
### **La Niña, periodo septiembre, 1984-1985.**

Este fenómeno inicia en octubre de 1984 y finaliza en septiembre del siguiente año, con una duración total de doce meses (ver figura 7.7). El año 1984-1985 no fue catalogado por el índice de la región Niño-3 como año de afectación La Niña, pero en la NOAA reporta como año de afectación.

El efecto climático registrado sobre el patrón pluviométrico en la cuenca alta del río Cauca durante el mes de transición estacional septiembre, en presencia del fenómeno La Niña, es igualmente muy marcado, particularmente al final de la primera temporada seca y al inicio de la lluviosa (octubre-noviembre), cuando se registran los mayores excedentes de precipitación, con núcleos de afectación severa a todo lo largo de la parte plana de la cuenca; la zona montañosa de la cordillera central presenta un comportamiento pluviométrico normal e inclusive llega a ser deficitario, correspondiente a la cuenca Amaime y Jamundí.

Durante el cuarto trimestre del primer año, ocurre una situación similar a la observada, por la misma época, en la fase cálida de ENSO, cuando la intensidad y el cubrimiento de las anomalías se reduce, debido generalmente a la influencia de ondas intra-estacionales, tipo *Madden & Julián* (Montealegre, 2012).

**Figura 7.7: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Septiembre, 1984-1985.**

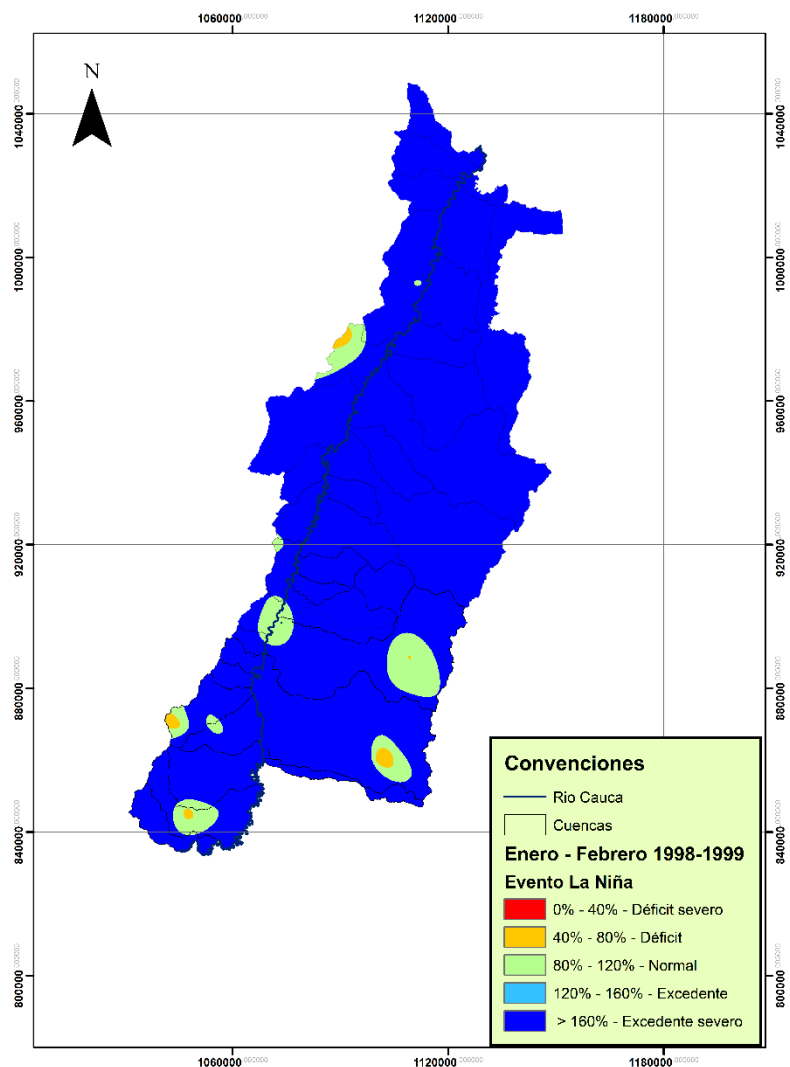


*Fuente: Elaboración propia.*

### **La Niña, periodo enero-febrero, 1998-1999.**

En la figura 7.8 se representa las alteraciones pluviométricas registradas durante el evento La Niña 1998-1999, se evidencia las excedencias de precipitación, abarcando la totalidad de la región, solo se aprecian algunos déficits de forma dispersa y muy localizada en el sur de la cuenca y en la cordillera occidental. Este evento fue catalogado de Moderado y su incidencia abarca dos años (1998-2000), datos reportados por la NOAA. Se aprecia claramente como el mayor efecto climático, ocurre durante el primer trimestre del segundo año, ya que coincide con la fase madura de estos fenómenos, cuando se presentan las mayores anomalías de las variables climáticas en el océano y en la atmósfera del Pacífico tropical. Para el segundo y tercer trimestre del segundo año, el comportamiento pluviométrico presenta una gran variabilidad, con el predominio de condiciones normales y la presencia de núcleos aislados con diferente grado de afectación.

**Figura 7.8: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Enero-Febrero, 1998-1999.**



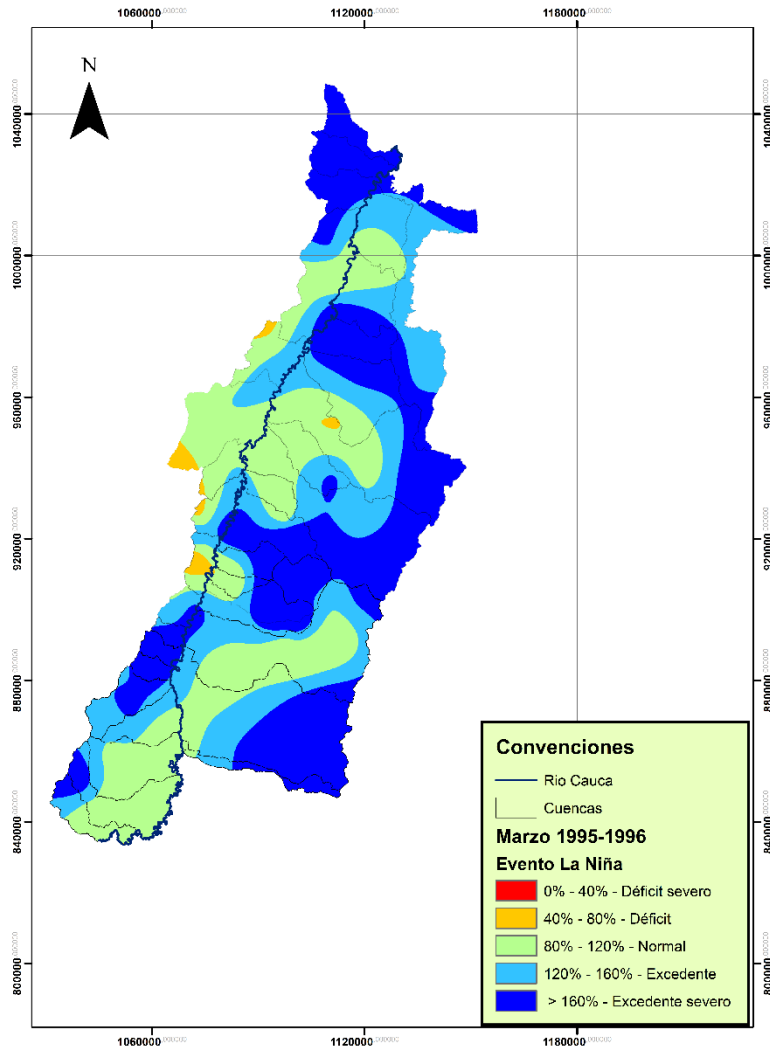
*Fuente: Elaboración propia.*

### **La Niña, periodo marzo, 1995-1996.**

Entre septiembre de 1994 y marzo de 1995 se presentó el fenómeno de El Niño y durante el mismo periodo, pero entre 1995 y 1996, se desarrolló el fenómeno de La Niña, siendo esta la una ocasión en la cual se presentan los dos fenómenos extremos ENOS con la misma duración y con coincidencia en los meses de su desarrollo. El fenómeno de La Niña, empezó en septiembre de 1995 y terminó en marzo de 1996. El año 1995-1996 no fue catalogados

por el índice de la región Niño-3, pero en la NOAA reporta como año de afectación La Niña (ver figura 7.9). Marzo es un mes de transición de periodo seco a húmedo, se evidencia en la cuenca una variabilidad marcada de normal a exceso, son núcleos que tienen una incidencia mayor en la vertiente occidental de la cordillera central.

**Figura 7.9: Anomalías de precipitación ocurrida en el periodo Marzo, 1995-1996.**



*Fuente: Elaboración propia.*

Durante la fase fría (La Niña) del ciclo El ENOS, se observa un panorama más generalizado de afectación, con mayor afectación en los sectores central y occidental de la cuenca. Salvo la primera temporada lluviosa (octubre-noviembre) cuando se registra un comportamiento muy cercano a lo normal en la mayor parte de la cuenca, en presencia de un fenómeno típico La Niña; la segunda temporada lluviosa (abril-mayo) y las dos temporadas secas registran aumentos un poco significativos en los volúmenes de precipitación. Durante la segunda

temporada seca (enero-febrero) se registran excedentes de precipitación en los sectores oriental y central, concentrándose los de carácter severo (excedentes superiores al 60,0% de lo normal). En la segunda temporada lluviosa (abril-mayo) hay una disminución considerable en la magnitud y cubrimiento de las anomalías en la cuenca, disminución en el centro y parte de la cordillera occidental, pero en la vertiente oriental de la cordillera se intensifica en carácter severo.

El efecto climático registrado sobre el patrón pluviométrico en la cuenca durante los meses de transición estacional, en presencia del fenómeno La Niña, es igualmente muy marcado, particularmente al final de la segunda temporada lluviosa (diciembre), cuando se registran los mayores excedentes de precipitación, con núcleos de afectación severa a todo lo largo de la zona montañosa. Durante los meses de transición de temporada seca a lluviosa, como el mes de septiembre se observa de ocurrencia del fenómeno La Niña en toda la zona plana lo mismo ocurren en marzo, la señal característica de El ENSO es igualmente nítida en toda la cuenca e inclusive llega a ser muy marcado.

Puertas & Carvajal (2008) expresan en su estudio que la variabilidad asociada al ENOS, en la escala trimestral (Multianual), presentó incremento del 30,0% en promedio de los coeficientes de correlación en el trimestre DEF, obteniendo las correlaciones significativas en los trimestres DEF (diciembre-enero-febrero) y JJA (junio-julio-agosto), con un descenso en los trimestres MAM (marzo-abril-mayo) y SON (septiembre-octubre-diciembre) (hasta del 34,0% en las correlaciones significativas). En general, la precipitación trimestral (excepto en MAM) presentó mayores coeficientes de correlación. El fenómeno ENOS tiene mayor incidencia sobre la variabilidad intranual de la precipitación y la temperatura media del aire, principalmente en el trimestre DEF.

Puertas *et al.*, (2011) mostraron evidencia de alteraciones en la concentración de la precipitación diaria a escala trimestral, indicando que las reales temporadas secas (DEF y JJA) y lluviosas (MAM y SON) las constituyen, prácticamente, los dos meses centrales de las respectivas temporadas tradicionales y existe una tendencia al adelanto en alrededor de 15 días en la fecha de inicio entre temporadas secas y lluviosas.

En este estudio, las mayores alteraciones que se estimaron durante DEF y JJA en la precipitación durante el fenómeno Extremo El Niño y La Niña, pueden estar explicadas en parte, por una mayor actividad del fenómeno ENOS evidenciada en años recientes. Estas anomalías climáticas inducidas por El ENOS en la región, se atribuyen a que la costa Pacífica de Colombia presenta vientos superficiales del Oeste con un marcado ciclo anual, los cuales durante los extremos de El ENOS, muestran una mayor intensificación de la corriente de CHORRO de bajo nivel del Oeste durante la fase fría (La Niña) de El ENOS (ocasionando entre otros, el aumento de la precipitación) y por otro lado se manifiestan como un debilitamiento durante El Niño (Poveda, 1998). Mesa *et al.*, (1997) Señala que la influencia del ENSO es más evidente en el occidente y suroccidente del país, con menor influencia en la Costa Caribe y en las estaciones de la Cordillera Oriental que pertenecen a la Amazonía y Orinoquía.

Se evidencian señales de afectación en la región norte y centro de la cuenca y hacia el flanco oriental de la cordillera Occidental, mientras las tendencias decrecientes se concentran en la región sur y la zona plana de la cuenca. Sumándole a la investigación el estudio realizado por Ochoa & Poveda (2008) demuestra que el cambio climático tiene una correlación con las precipitaciones de la cuenca ya que presentan señales que evidencian tendencias negativas y positivas con patrones de distribución espacial no definidos, además identifiqué que los caudales tienen tendencia decreciente.

## ***7.2 Índices Categóricos Caudales Río Cauca.***

Para determinar el tipo de efecto que los fenómenos El Niño y La Niña producen sobre los patrones de caudal en el río Cauca a la entrada y salida de la zona de estudio, en las estaciones Juanchito y Anacaro respectivamente, se examinaron los datos porcentuales correspondientes a la mayor probabilidad de afectación para cada una de las categorías definidas, obteniéndose los siguientes resultados:

### **7.2.1 Fenómeno El Niño.**

A nivel trimestral se analizó el comportamiento de los caudales de los dos últimos trimestres del primer año y los dos primeros del segundo año (ver tabla 7.5), estos fueron analizados de forma más específica por temporadas secas y lluviosas y meses de transición. En la estación Juanchito la señal característica del fenómeno ENSO, para la fase extrema de El Niño está bien definida con porcentajes mayoritarios de 67,0% y el 43,0% en índice categórico déficit, durante el Cuarto trimestre del primer año y el Primer trimestre del segundo año. Para la primera temporada seca (Julio-Agosto) del primer año, se observa un predominio de las condiciones normales, en contraste con la segunda temporada seca de los meses de estudio (Enero-Febrero) y las temporadas lluviosas (Octubre-Noviembre y Abril-Mayo), la señal característica de El Niño aparece bien definida con déficit de caudales del 63,0% y el 40,0% en la entrada de la zona de estudio, información que corresponde a Carvajal, Enciso & Sandoval (2016) donde el caudal del río Cauca presenta dos periodos de mayor y menor caudal, como respuesta a la bimodalidad de la precipitación, siendo más evidente este comportamiento en las estaciones aguas abajo de Salvajina. Para los meses de transición que son el mismo periodo inter-estacional, que presentan transición entre las temporadas secas a lluviosas como Septiembre y Marzo, y las lluviosas a secas, Diciembre y Junio, se comprueba que la señal característica de la fase cálida (El Niño) permanece definida y con mayores porcentajes en Diciembre (63,0%) y Junio (100,0%) mes en el cual se inicia la primera temporada seca del segundo año y Marzo con un porcentaje alto de afectación de 67,0% de déficit. Debido a que solo se tomó en cuenta para el cálculo de los índices categóricos, los registros históricos post-Salvajina (1985-2012), debido a la incidencia de la regulación del embalse, donde solo se consideró el régimen actual del río Cauca.



**Tabla 7.5: Índices categóricos porcentuales Estación Juanchito, Evento El Niño (1985-2012).**

EVENTO		-2(%)	-1(%)	0(%)	1(%)	2(%)
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	-	20,0	80,0	-	-
	<b>Sep</b>	-	43,0	57,0	-	-
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Oct-Nov</b>	-	63,0	25,0	13,0	-
	<b>Dic</b>	-	63,0	38,0	-	-
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Ene-Feb</b>	13,0	63,0	25,0	-	-
	<b>Mar</b>	17,0	67,0	17,0	-	-
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Abr-May</b>	-	40,0	60,0	-	-
	<b>Jun</b>	-	100,0	-	-	-

*Fuente: Elaboración propia.*

Se analizó el comportamiento de los caudales de los dos últimos trimestres del primer año y los dos primeros del segundo año en la estación Anacaro (ver tabla 7.6), se evidencia la señal característica de la fase extrema de El Niño con porcentajes mayoritarios de 47,0% y 60,0% durante el Cuarto trimestre del primer año y el Primer trimestre del segundo año respectivamente. Para la primera temporada seca (Julio-Agosto) del primer año, se observa un predominio de las condiciones normales (60,0%), en contraste con la segunda temporada seca de los meses de estudio (Enero-Febrero) y las temporadas lluviosas (Octubre-Noviembre y Abril-Mayo), la señal característica de El Niño aparece bien definida con déficit de caudales del 59,0%, 47,0% y 38,0% respectivamente en la estación Juanchito. Para los meses de transición, que presentan transición entre las temporadas secas a lluviosas como Marzo y Septiembre, y las lluviosas a secas Junio y Diciembre, se comprueba que la señal característica de la fase cálida (El Niño) permanece definida y con mayores porcentajes en Septiembre (64,0%) cuando inicia la primera temporada húmeda y finaliza la temporada seca (Julio-Agosto) y marzo (60,0%) cuando finaliza la temporada seca e inicia la lluviosa.

**Tabla 7.6: Índices categóricos porcentuales Estación Anacaro, Evento El Niño (1962-2012).**

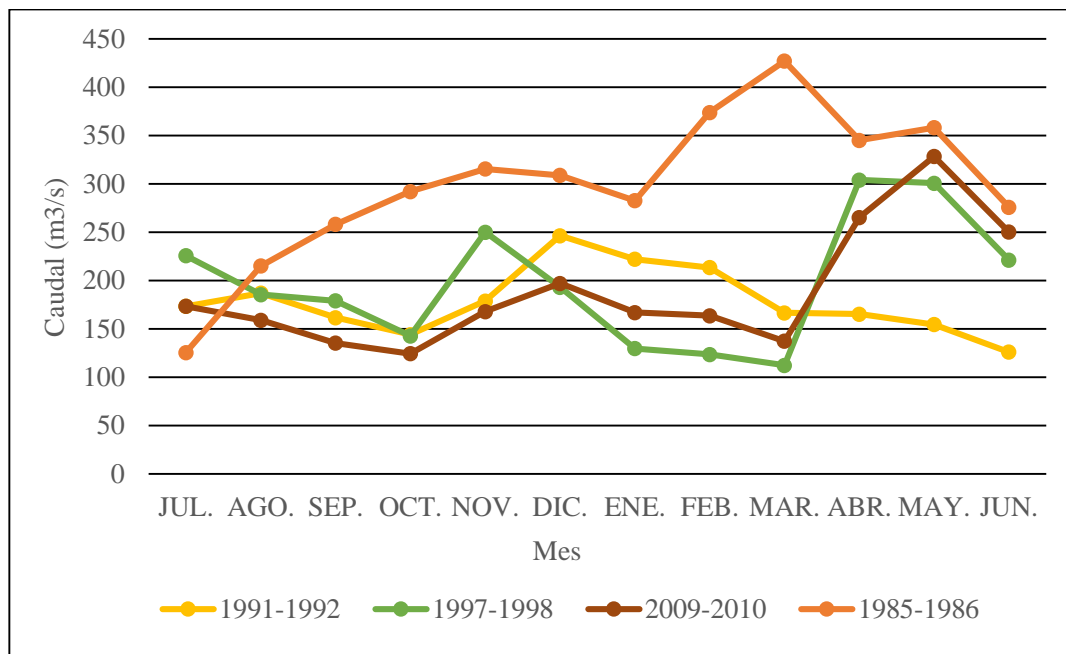
EVENTO		-2(%)	-1(%)	0(%)	1(%)	2(%)
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	-	40,0	60,0	-	-
	<b>Sep</b>	-	64,0	36,0	-	-
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Oct-Nov</b>	6,0	47,0	24,0	24,0	-
	<b>Dic</b>	12,0	47,0	41,0	-	-
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Ene-Feb</b>	24,0	59,0	18,0	-	-
	<b>Mar</b>	30,0	60,0	10,0	-	-
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Abr-May</b>	13,0	38,0	25,0	25,0	-
	<b>Jun</b>	-	50,0	50,0	-	-

*Fuente: Elaboración propia.*

En la siguiente figura (7.11) se observa los caudales medios mensuales de la estación Juanchito, para los meses comprendidos desde Julio-Junio (año hidrológico) y los años con presencia del fenómeno El Niño clasificados como fuertes (1991-1992 y 1997-1998) y

moderado (2009-2010), estos eventos son importantes analizarlos por sus impactos generados sobre el funcionamiento normal de diversos sectores, principalmente el sector eléctrico ya que este depende del recurso hídrico. Se evidencia la bimodalidad de los datos, con picos en noviembre y abril-mayo, y caudales bajos en enero-febrero. El periodo de estudio inicia en 1985, por la incidencia que tiene Salvajina en la regulación de los caudales del Río Cauca.

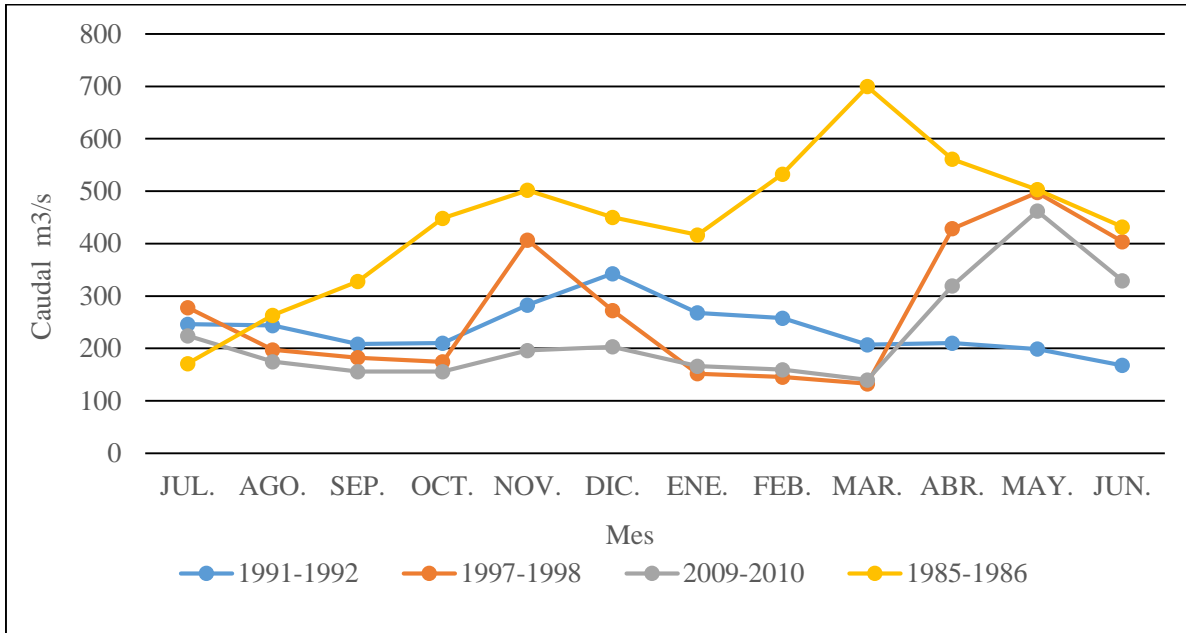
**Figura 7.11: Caudal medio mensual Estación Juanchito Eventos El Niño (1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) y Normal (1985-1986).**



*Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 7.12 se observan los caudales medios mensuales de la estación Anacaro, para los meses comprendidos desde julio-junio (año hidrológico de este estudio) y los años con presencia del fenómeno El Niño clasificados como fuertes (1991-1992 y 1997-1998) y moderados (2009-2010). Se evidencia un aumento de los caudales con respecto a la estación Juanchito, evidenciándose la incidencia de los ríos tributarios, se mantiene la bimodalidad de los datos, con picos en noviembre y abril-mayo, y caudales bajos en enero-febrero. El año normal (1985-1986), muestra como el efecto ENOS impacta en los caudales medios mensuales del río Cauca.

**Figura 7.12 Caudal medio mensual Estación Anacaro, El Niño (1991-1992; 1997-1998; 2009-2010) y Normal (1985-1986).**



*Fuente: Elaboración propia.*

El efecto climático depende de la época del año en que se presente el fenómeno. Generalmente, el mayor impacto tiene lugar entre Diciembre y Abril, debido a que en el Pacífico ecuatorial las temperaturas superficiales son más cálidas en esta época del año (Bedoya *et al.*, 2010). Se observa que los resultados obtenidos para la fase extrema del fenómeno El Niño en el río Cauca en las estaciones Juanchito y Anacaro, los meses en los que se presentaron mayor variabilidad fueron Enero-Febrero (Primer trimestre del segundo año) y el mes de transición Marzo.

Poveda (2002), evaluó anomalías sobre registros hidroclimáticos, como series de lluvias, caudales y niveles mensuales encontrando correlaciones simultáneas y rezagadas representativas entre los índices océano-atmosféricos y los caudales agregados a nivel trimestral, que se interpretan como la validez estadística de la conexión entre el fenómeno el ENSO y la hidrología colombiana. Los valores de correlación simultánea fueron altos durante el trimestre Diciembre-Enero-Febrero, lo que indica una alta influencia del fenómeno en esta época, concordando con este estudio. El estudio de Poveda (2002), tiene correlación con las fase extrema El Niño estudiada en este documento, no se empleó la misma relación de meses pero se evidencio que tanto Diciembre y Enero-Febrero presentan los porcentajes de afectación de déficit más alto con respecto a los demás meses.

Bedoya *et al.*, (2010) en el Estudio Nacional del Agua afirma que el área hidrológica Magdalena-Cauca presenta las mayores disminuciones por efecto de eventos de El Niño; se estima una reducción promedio de 26,0%, con respecto a los años clasificados como Normal, sobre las 94 estaciones analizadas en el área de la cuenca Magdalena-Cauca. El estudio evidencio que la cuenca del río Cauca presenta reducciones importantes en los caudales a la altura de la cuenca media, con una reducción promedio de 38,0% para el trimestre DEF en 18 estaciones hidrológicas operadas por el IDEAM en la región.

Poveda (2004) explica que durante la fase cálida del fenómeno ENOS (El Niño) un evento importante es el debilitamiento de la corriente del Choco, la reducción en número e intensidad de las ondas tropicales del este sobre el Atlántico tropical norte, además el desplazamiento de la ZCIT (zona de convergencia intertropical) hacia el sur oeste de su posición normal como consecuencia del establecimiento de una celda anómala de Hadley sobre el trópico americano, también se evidencia la alteración del balance de humedad atmosférica, especialmente, en los niveles más bajos de la atmosfera; y por último y el efecto más visible es la reducción de la precipitación, puesto que al reducirse la humedad del suelo, la evapotranspiración, y la actividad vegetal durante el Niño, disminuye la precipitación reciclada, que en Colombia es estimada entre un 30-40%, esto se evidencia en disminución de caudales y precipitaciones.

El déficit no es marcado para la estación Anacaro, debido a que recibe los aportes de los tributarios que incrementan el caudal del río Cauca (Amaime, Guadalajara, Tuluá, Bugalagrande), lo que no ocurre con la estación Juanchito, donde se observan disminuciones del 60,0% de los niveles de caudal. La cuenca posee un alto grado de afectación debido a la influencia del fenómenos ENOS en la variabilidad climática en el occidente colombiano, para el evento El Niño se tiene que los años más incidentes fueron los años 1991-1992; 1997-1998 y 2009-2010, donde se reporta condiciones de déficit en el 63,0% de las series analizadas, estos corresponden a los meses de mayor estiaje diciembre-enero-febrero y marzo. El análisis hidrológico realizado en el evento El Niño 1997-1998 se observa la influencia de este fenómeno en el bimestre Enero-Febrero y el mes de transición Marzo, el índice acumulado para Enero-Febrero (37,0%) y el índice puntual para Marzo de 34,0%. En esta estación analizada, se registró el caudal mínimo más representativo (Marzo 112 m<sup>3</sup>/s de 1998), comparado con los caudales de estiaje, registrados de otros eventos El Niño. En la estación Anacaro ocurre un evento similar de disminución de los caudales para el mismo evento El Niño de 1997-1998 (Enero-Febrero 151,7 m<sup>3</sup> /s y 145,4 m<sup>3</sup> /s respectivamente y Marzo 132,6 m<sup>3</sup>/s), en comparación con otros evento El Niño, este presentó las mayores disminuciones. Este resultado coincide con por Poveda (2004) el cual identificó la importante influencia del ENOS sobre la hidrología y en especial los caudales en Colombia y en región.

### 7.2.1 Fenómeno La Niña.

Se analizó el comportamiento de los caudales de los dos últimos trimestres del primer año y los dos primeros del segundo año, para la estación Juanchito la señal característica del fenómeno ENSO (ver tabla 7.7), para la fase extrema La Niña está bien definida con porcentajes mayoritarios de 43,0% y el 57,0% durante el cuarto trimestre del primer año y el primer trimestre del segundo año respectivamente. Para la primera temporada seca (julio-agosto) del primer año, se observa un predominio de las condiciones de excedente; lo mismo ocurre con la temporada lluviosa (octubre-noviembre) que representan condiciones de exceso, también la temporada lluviosa (abril-mayo) con porcentajes mayoritarios de 40,0%. Se logra evidenciar aunque se evalúa el efecto de La Niña en el río Cauca, las condiciones deberían ser de exceso, pero algunas series como julio-agosto; diciembre; marzo; abril-mayo se presentaron condiciones de déficit, esto quiere decir los datos de caudales medios mensuales estuvieron por debajo de la media, reportando déficit en esas temporadas. Para los meses de septiembre y marzo que presentan transición entre las temporadas secas a lluviosas tienen porcentajes altos de exceso 43,0% y 38,0% respectivamente, y los meses diciembre y junio que presentan transición entre las temporadas lluviosas a secas, se comprueba que la señal característica de la fase fría (La Niña) permanece definida y con mayores porcentajes en Diciembre (57,0%) junio presenta un comportamiento normal.

**Tabla 7.7: Índices categóricos porcentuales Estación Juanchito Evento La Niña, 1985-2012.**

EVENTO		-2(%)	-1(%)	0(%)	1(%)	2(%)
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	-	14,0	29,0	43,0	14,0
	<b>Sep</b>	-	-	43,0	43,0	14,0
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Oct-Nov</b>	-	-	29,0	43,0	29,0
	<b>Dic</b>	-	29,0	-	14,0	57,0
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Ene-Feb</b>	-	13,0	25,0	38,0	25,0
	<b>Mar</b>	-	25,0	-	38,0	38,0
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Abr-May</b>	-	40,0	-	40,0	20,0
	<b>Jun</b>	-	-	67,0	-	33,0

*Fuente: Elaboración propia.*

Se analizó el comportamiento de los caudales en la estación Anacaro, la señal característica del fenómeno ENSO (ver tabla 7.8), para la fase extrema La Niña está definida con porcentajes mayoritarios de 50,0% y 40,0% durante el Primer trimestre del segundo año y el Segundo trimestre del segundo año. Para la primera temporada seca (Julio-Agosto) del primer año, se observa un predominio de las condiciones de excedente; para la temporada lluviosa de los meses de estudio (Octubre-Noviembre) que representan condiciones de exceso en conjunto la temporada lluviosa (Abril-Mayo) con porcentajes mayoritarios de 38,0% para ambos bimestres. Para el mes de septiembre se evidencia condiciones normales (45,0%) y marzo que presenta también transición entre las temporadas secas a lluviosas tienen

porcentajes altos de exceso severo 50,0%, y los meses diciembre y junio que presentan transición entre las temporadas lluviosas a secas, se comprueba que la señal característica de la fase fría (La Niña) permanece definida y con mayores porcentajes de 36,0% y 40,0% para excedente severo.

**Tabla 7.8: Índices categóricos porcentuales Estación Anacaro, Evento La Niña.**

EVENTO		-2(%)	-1(%)	0(%)	1(%)	2(%)
TERCER TRIMESTRE AÑO 1	<b>Jul-Ago</b>	-	9,0	27,0	45,0	18,0
	<b>Sep</b>	-	-	45,0	27,0	27,0
CUARTO TRIMESTRE AÑO 1	<b>Oct-Nov</b>	-	8,0	23,0	38,0	31,0
	<b>Dic</b>	7,0	14,0	14,0	29,0	36,0
PRIMER TRIMESTRE AÑO 2	<b>Ene-Feb</b>	-	15,0	31,0	31,0	23,0
	<b>Mar</b>	-	8,0	25,0	17,0	50,0
SEGUNDO TRIMESTRE AÑO 2	<b>Abr-May</b>	-	25,0	13,0	38,0	25,0
	<b>Jun</b>	-	20,0	40,0	-	40,0

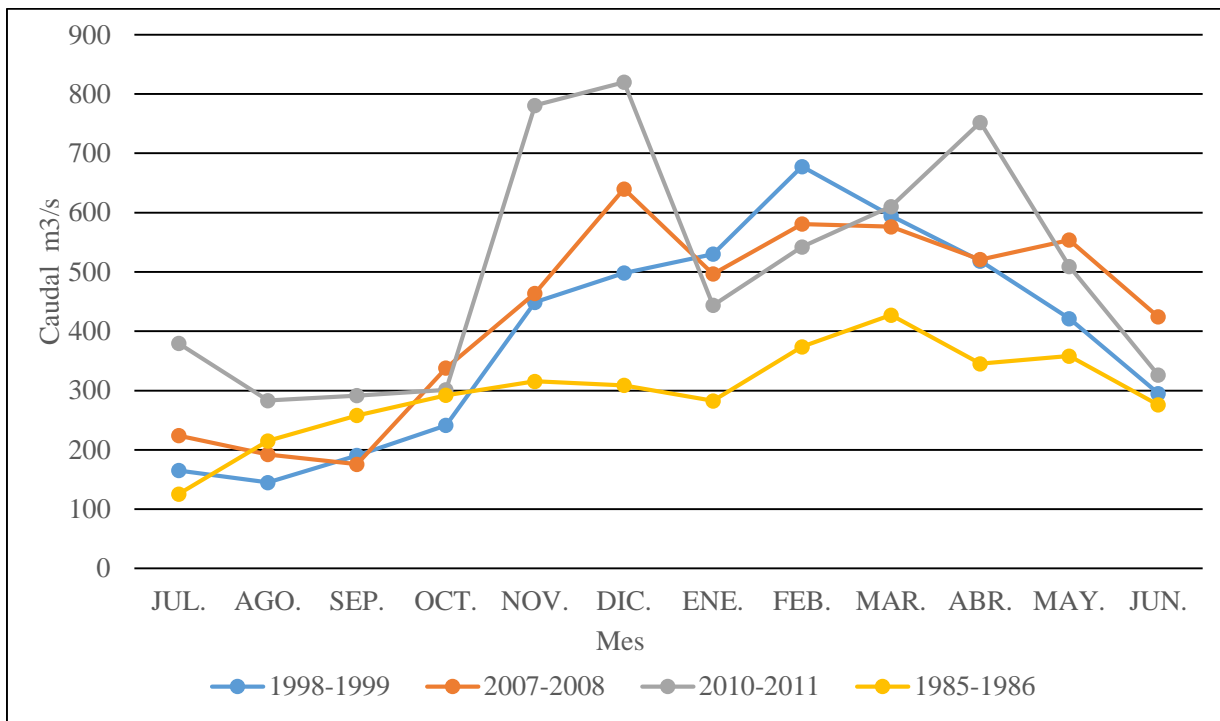
*Fuente: Elaboración propia.*

Bedoya *et al.*, (2010) en el Estudio Nacional de Aguas realizó un análisis de anomalías promedio sobre caudales para eventos de La Niña en el trimestre septiembre-octubre-noviembre en las estaciones ubicadas en las áreas hidrológicas del Magdalena-Cauca; se evidencio que se registran las mayores afectaciones durante estos meses. Específicamente, se observó un aumento que supera el 60%, con respecto al promedio, sobre la cuenca media del río Cauca para eventos La Niña. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con la cuenca del río Cauca estudiada por Carvajal & Segura (2005), donde el ciclo promedio anual es de carácter bimodal, con niveles máximos en Abril-Mayo y Octubre-Noviembre.

Además es importante anotar que las oscilaciones climáticas durante el año 2010 resultaron ser severas sobre las zonas del país con mayor influencia del fenómeno ENSO como es el caso de la zona Andina, dinamizando los niveles desde los más mínimos hasta los más altos registrados históricamente en algunos puntos de medición, como en el caso de la zona del río Cauca (Bedoya *et al.*, 2010). De acuerdo con Carvajal, Enciso & Sandoval (2016) el río Cauca es la principal fuente hídrica superficial del Valle del Cauca y en los últimos 25 años ha registrado importantes crecientes causando inundaciones como las ocurridas entre el periodo 2010 – 2011, cuyos efectos repercutieron en pérdidas económicas para la región.

En la figura (7.12) se observa los caudales medios mensuales de la estación Juanchito, para los meses comprendidos desde julio-junio y los años con presencia del fenómeno La Niña clasificados como fuertes (2007-2008; 2010-2011) y moderado (1998-1999). Se observa para el evento 2010-2011 los caudales más altos registrados, además para ese periodo los índices acumulados reportaron en algunas estaciones entre 150% y 200%.

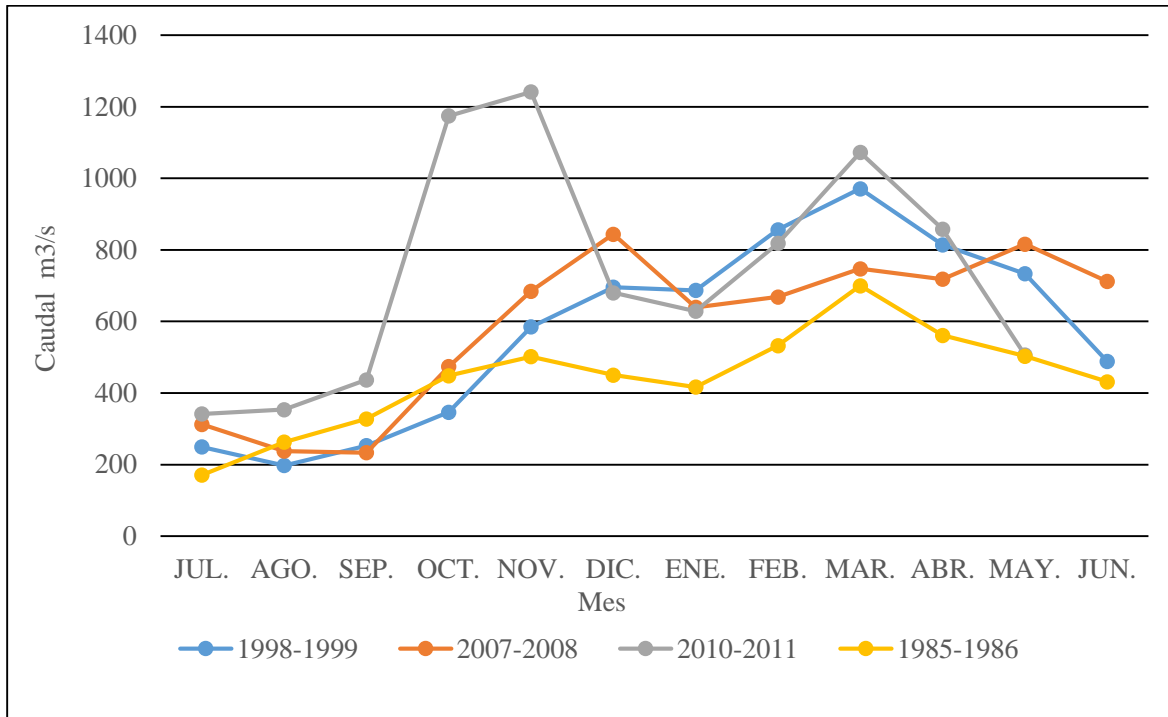
**Figura 7.12 Caudal medio mensual Estación Juanchito, Eventos La Niña (1998-1999; 2007-2008; 2010-2011) y Normal (1985-1986).**



*Fuente: Elaboración propia.*

En la figura (7.14) se observa los caudales medios mensuales de la estación Anacaro, para los meses comprendidos desde julio-junio y los años con presencia del fenómeno La Niña clasificados como fuertes (2007-2008; 2010-2011) y moderado (1998-1999). Se observa para el evento 2010-2011 los caudales más altos registrados, además para ese periodo los índices acumulados reportaron en algunas estaciones entre 200% y 300%. Una evidencia de la variabilidad climática es esta ola invernal (2010-2011), donde se registró un incremento notable de las precipitaciones y sus consecuentes inundaciones devastaron buena parte del territorio, afectando el sector agropecuario, causando daños a la infraestructura vial y de comunicaciones.

**Figura 7.14: Caudal medio mensual Estación Anacaro, Eventos La Niña (1998-1999; 2007-2008; 2010-2011) y Normal (1985-1986).**



*Fuente: Elaboración propia.*

El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno que produce cambios de gran magnitud en los balances de agua y energía globales, este ocasiona fuertes anomalías hidroclimáticas representadas en sus fases cálida (La Niña) y fría (El Niño) (Poveda, 2004), las cuales traen como consecuencia aumento de las temperaturas en el primer caso y eventos de precipitación muy intensos en el segundo lo que propicia grandes variaciones en los caudales de los ríos. Además cuando se presenta la fase fría, se incrementa el ingreso de humedad a la región, al intensificarse la corriente del CHOCO, los vientos alisios del este; y de otro lado, también es causada por la retroalimentación de la precipitación reciclada, esto es debido a que la humedad del suelo y la evapotranspiración, juegan un papel importante durante la fase extrema del fría del ENOS en el trópico.

La cuenca alta del río Cauca posee un alto grado de afectación debido a la influencia del fenómenos ENOS en la variabilidad climática en el occidente colombiano; la hidrometeorología presenta un régimen bimodal con periodos lluviosos: en Marzo-Abril-Mayo y Septiembre-Octubre-Noviembre y de menor precipitación durante Diciembre-Enero-Febrero y Junio-Julio-Agosto como resultado del doble paso o migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), caracterizada por bajas presiones atmosféricas superficiales, ascenso de vientos húmedos y alta nubosidad (Carvajal *et al.*, 2016). Por lo tanto caudal del río Cauca presenta dos periodos de mayor y menor caudal, como respuesta



a la bimodalidad de la precipitación, siendo más evidente este comportamiento en las Estación limnigráfica o fluviográfica aguas abajo de Salvajina.

Estrada (2015) realizó una modelación hidrológica para el río Palo (segundo mayor aportante de caudal a el río Cauca en la zona de estudio) donde los caudales simulados presentaron una alta asociación a la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase fría La Niña, pues se observó que durante el periodo de simulación 1974-2012, muchos de los caudales máximos registrados, sucedieron durante la ocurrencia del fenómeno de La Niña; es así como los caudales máximos en un 75,0% de la veces, coincidieron con periodos asociados a La Niña. En relación al caudal del río Cauca la tendencia de los valores coincide con diversos estudios, entre ellos el de Ávila *et al.*, (2014) donde los meses en que se presentan mayores anomalías de caudal ocurren en coincidencia con los periodos de mayor estiaje en el ciclo anual, lo que hace más crítica la situación, dado que hace más notoria la reducción de los caudales del río Cali (tributario del río Cauca).

El efecto de déficit no es marcado para la estación Anacaro, debido a que recibe los aportes de los tributarios no regulados por Salvajina que incrementan el caudal del río Cauca (Ovejas Palo, Amaine, Tuluá, Bugalagrande,). Para el evento La Niña se tiene que los años más incidentes fueron los años 1998-1999, 2007-2008 y 2010-2011, donde se reporta condiciones de exceso en el 40% de las series analizadas, estos excesos corresponden a los meses de transición septiembre, diciembre, marzo y junio. El análisis hidrológico realizado en el evento La Niña 2010-2011 se observa la influencia de este fenómeno en el trimestre Octubre- Noviembre-Diciembre, el índice acumulado para octubre-noviembre 176,0% y el índice puntual para Diciembre de 221,0%. En esta estación analizada, se registró el caudal máximo más representativo (Diciembre 1241 m<sup>3</sup>/s), comparado con los caudales picos, registrados de otros eventos La Niña. En la estación Juanchito ocurre un evento similar de aumento de los caudales para el mismo evento La Niña de 2010-2011 (Noviembre 542,8 y Diciembre 880,8 m<sup>3</sup>/s) pero este resultado no es incidente comparado con Anacaro, el aporte de los tributarios es bastante representativo.

### **7.3 Escorrentía mensual del Río Cauca.**

Al realizarse el balance hídrico en las estaciones se tomó los dos tramos del río comprendidos entre las dos estaciones de aforo en las que se conocen los caudales. Conocidos los caudales al comienzo y al final del tramo, se evaluaron las pérdidas (o ganancias) de caudal. Al realizarse el balance de aguas de escorrentía en la zona de estudio, donde se tomó los datos de los caudales mensuales multianuales para las dos estaciones: Anacaro (en la salida) y Juanchito (entrada), donde se verificó que el balance de escorrentía para los meses multianuales un régimen de bimodalidad, donde los meses picos (mayores caudales mensuales multianuales) Abril-Mayo y Octubre-Noviembre corresponden a los meses de la estación lluviosa y los meses Enero-Febrero y Julio-Agosto a la estación seca (menores caudales mensuales multianuales).

**Tabla 7.9: Balance y datos de caudales mensuales multianuales de las estaciones Anacaro y Juanchito (m<sup>3</sup>/s).**

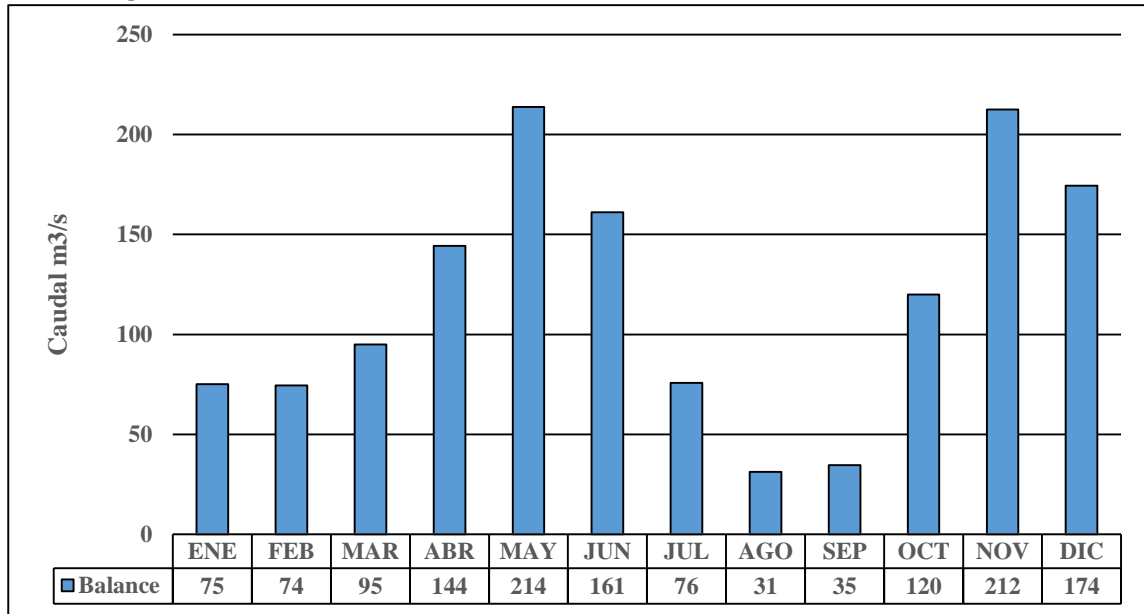
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ANACARO	426.0	417.1	429.6	505.1	538.5	410.6	282.2	215.5	224.9	348.0	553.0	561.0
JUANCHITO	350.8	342.7	334.7	360.7	324.7	249.6	206.4	184.2	190.3	228.0	340.6	386.6
BALANCE	75.2	74.4	94.9	144.4	213.8	161.1	75.7	31.3	34.6	120.0	212.4	174.4

*Fuente: Elaboración propia.*

Desde la estación Juanchito hasta la estación Anacaro, el recorrido del río Cauca capta las aguas de varios tributarios que vierten sus aguas y aumentan el caudal (Carvajal *et al.*, 2016), donde la importancia de la cordillera central, en la cual nacen numerosos tributarios (río Guachal, río Amaime, río Guadalajara, río Tuluá, río Bugalagrande y río Paila), tiene el mayor índice de precipitación, esto se verificó en los mapas donde el resultado de excedente dio mayor en la zona, esto es el resultado del recorrido de las masas de aire húmedo y frío provenientes de las corriente del Chorro del Choco, que suben por la cordillera Occidental y descienden a la planicie del valle generando vientos, donde estos al descender calientes empujan la humedad hacia la cordillera central, específicamente la vertiente occidental de la cordillera Central, generando lluvias. En la figura 7.15 Se evidencia el balance del caudal mensual multianual de río Cauca a la entrada y salida de la zona de estudio, donde la bimodalidad del régimen hidrológico de la cuenca (estaciones secas y lluviosas) también tiene incidencia y afectan al caudal como resultado del doble paso o migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que se caracteriza por bajas presiones atmosféricas superficiales, ascenso de vientos húmedos y alta nubosidad. Los meses en los cuales se evidencia valores altos de caudales medios mensuales multianuales corresponden a los meses de abril-mayo y noviembre-diciembre. Los meses de temporada seca como son enero-febrero y julio-agosto, se reporta en el balance resultados bajos en comparación con los meses lluviosos, la incidencia de la ZCIT es marcada.

El balance hídrico se basa en la ley física universal de conservación de masas y representa una de las herramientas de mayor uso en la práctica hidrológica; se expresa la equivalencia entre los aportes de agua que entran por un lado en una unidad hidrográfica determinada y la cantidad de agua que se evacua por el otro, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado, para este caso el intervalo de tiempo 1985-2012.

**Figura 7.15: Balance de escorrentía del río Cauca, caudales mensuales multianuales.**



*Fuente: Elaboración propia.*

Adicionalmente, el Río Cauca a su paso por el departamento, beneficia 33 municipios. Sin embargo, debido a una inadecuada administración de los recursos ambientales y debilidad en los sistemas de sanidad, el río presenta serios problemas de contaminación hídrica y degradación del ecosistema. Los desafíos radican en el manejo eficiente del recurso hídrico, dado que este recurso es de vital importancia en el desarrollo de las actividades agrícolas. Además, la falta de información sobre los posibles impactos del cambio climático y vulnerabilidad asociada implica una adaptación a esta variabilidad de los eventos ENOS.

Actualmente la cuenca hidrográfica del río Cauca presenta un alto deterioro, debido principalmente al uso inadecuado del suelo, la deforestación, contaminación hídrica de origen antrópico y desecamiento de ciénagas y humedales, para la expansión de la frontera agrícola especialmente en la zona plana. Debido a esto, los principales desafíos en la cuenca radican en el manejo eficiente del recurso hídrico, puesto que para departamentos como Cauca y Valle del Cauca el uso de este recurso es primordial para el desarrollo de las actividades agrícolas, pues éstas actividades demandan el 42% y el 75% del recurso en cada departamento, respectivamente (AVA, 2013).

Los niveles de los caudales del río y las zonas de anomalías de precipitación demuestran como la incidencia del fenómeno ENOS en la cuenca genera impactos negativos. La variabilidad climática puede traer importantes implicaciones para los cultivos agrícolas de la región. Como ejemplo, se podrían correr las fechas de siembra, lo cual podría tener importantes implicaciones sobre la distribución anual de la seguridad alimentaria, incluso podría implicar aumento en la demanda de variedades de cultivos con ciclos más cortos para evitar problemas de estrés hacia finales del ciclo de cultivo. En el caso de los cultivos

perennes, será necesario requerir sistemas para la producción agrícolas mucho más resilientes frente la variabilidad climática, como por ejemplo sistemas con sombra que sean capaz de reducir temperaturas dentro del cultivo, y reducir estrés hídrico o de calor durante las épocas secas.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los cambios registrados hasta el momento en los regímenes de lluvia y de caudal están relacionados con las fases extremas de ENOS, ocasiona alteraciones en los procesos naturales que conforman el ciclo hidrológico y afectan la dinámica y la distribución espaciotemporal de la oferta hídrica. Los meses en los que se presentan las mayores anomalías de precipitación coinciden con los periodos de mayor estiaje en el ciclo anual (diciembre-enero-febrero y Marzo), lo que hace más crítica la situación, dado que hace más visible la reducción de la precipitación y por ende los caudales del río Cauca. Los resultados oscilaron en la fase cálida entre el 60% y el 80% de déficit de precipitación y para los caudales en las estaciones Juanchito y Anacaro en el 60% y 40% de déficit, esto permite inferir que El Niño, presenta efecto sobre la oferta hídrica de la cuenca alta del río Cauca. Para el evento La Niña los resultados porcentuales estuvieron cerca a la normalidad.

Al estar bajo un evento ENOS bien sea El Niño o La Niña, se presenta mayor afectación sobre la zona alta de la cuenca. Se observó además que la fase extrema de ENOS que genera mayores anomalías sobre la variable precipitación es la fase El Niño donde se presenta el 80,0% del déficit; además durante la fase cálida se ha registrado caudales mínimos históricos en el río Cauca, en las estaciones Juanchito y Anacaro, bajo la presencia del ENOS fase cálida se registró una disminución del caudal en 60,0%.

El balance de aguas del río Cauca deja en evidencia la importancia de la vertiente occidental de la cordillera Central, que bajo el efecto del Chorro del Choco, donde las masas de vapor de agua, los vientos y la altitud generan lluvias, hace que esa zona sea de mayor precipitaciones, generando que los tributarios en la margen derecha del río Cauca sea mayor en número, lo que al final se observa en el balance, un aumento significativo de las aguas de escorrentía en la estación Anacaro con respecto a la estación Juanchito. Además la hidrometeorología del balance de aguas de escorrentía presenta un régimen bimodal con periodos lluviosos y secos, donde se determinó el aporte de aguas más alto a la cuenca del río Cauca (Mayo 214,0 m<sup>3</sup>/s) y el aporte de aguas más bajo (Agosto 31m<sup>3</sup>/s).

El uso de la metodología de Montealegre (2012), se refiere a la relación que existe entre la precipitación acumulada en un año y la precipitación media anual para un periodo de tiempo dado, expresado de manera porcentual, donde los valores porcentuales estimados para cada año que indican déficit son los valores menores que 100% y el excedente valores mayores a 100%, por su parte los valores porcentuales próximos a cero corresponden a valores cercanos al promedio histórico. Esta metodología presenta una desventaja, es que valores extremos de precipitación pueden influenciar indebidamente el valor normal y en consecuencia afectar los valores del índice. Esta metodología puede ser utilizada para la predicción de eventos extremos en el estudio de la variabilidad climática para entender las relaciones de ENOS o fenómenos similares con la hidrología de la zona de estudio pero presenta sus limitaciones.

La señal característica de los fenómenos del ciclo ENOS en la Cuenca alta del río Cauca, por su paso por el departamento del Valle del Cauca, se refleja en déficits de precipitación durante

El Niño y excedentes de lluvia durante La Niña. En la fase cálida (El Niño), la deficiencia de precipitación, como condición más probable, aparece tan solo en un 40% y 70% del total de observaciones. En la fase fría (La Niña), se observa un horizonte más generalizado de afectación, aunque los excedentes de agua y el comportamiento normal tienen prácticamente la misma frecuencia de ocurrencia.

La señal característica del ENSO para los meses de temporada seca y lluviosa (bimestrales) y los meses de transición ambas fases, aparece muy bien definida al examinar las anomalías negativas (El Niño) y positivas (La Niña) de precipitación, registradas durante el tercero y cuarto trimestres del primer año hidrológico y el primer trimestre del segundo año hidrológico. Adicionalmente, se puede comprobar que el mayor efecto climático ocurre durante el primer trimestre del segundo año, el cual es muchas veces coincidente con la fase madura de los eventos, es decir, cuando se presentan las mayores anomalías en el océano y la atmósfera del Pacífico tropical.

El efecto de los fenómenos típicos El Niño y la Niña sobre la precipitación bimestral de la cuenca, es más acentuado en las temporadas secas que en las lluviosas. En la primera temporada seca del segundo año y muy cerca de la fase madura de los eventos, la condición deficitaria durante El Niño, se extiende a casi toda la cuenca.

El análisis de los meses de transición o periodo inter-estacional, es decir, aquellos meses en los que se presenta la transición de las temporadas las lluviosas a las secas (junio y diciembre) y las temporadas secas a lluviosas (marzo y septiembre) permite comprobar que la señal característica de ENSO permanece muy bien definida, particularmente durante la fase cálida (El Niño).

Con respecto a la distribución espacial de la precipitación durante las fases extremas del fenómeno ENOS, se realizó sobre la vertiente occidental de la cordillera Central y sobre la vertiente oriental de la cordillera Occidental, para enfatizar la importancia de la orografía sobre la cuenca en el comportamiento de las precipitaciones. Es recomendable analizar además los impactos de las actividades antrópicas en la cuenca, tales como deforestación y cambios en el uso del suelo, que trae como consecuencia alteraciones en el ciclo hidrológico.

El fenómeno ENOS, en sus dos fases (fría y cálida) es uno de los principales determinantes en la generación de épocas de estiaje y de crecidas en el río Cauca y las dos temporadas analizadas El Niño 1997-1998 y La Niña 2010-2011 fueron los de mayor impacto en la cuenca alta del río Cauca, con caudales de 122 m<sup>3</sup>/s para El Niño en marzo de 1998 y 880 m<sup>3</sup>/s en Diciembre de 2010 en la estación Juanchito, donde se reportó los para El Niño condiciones de déficit en el 63,0% de los caudales y para el evento La Niña el 39,0% de los caudales presenta exceso severo. Para la estación Anacaro, ubicada al norte de la cuenca la afectación alta, fue marzo de 1998 con un caudal de 132,6 m<sup>3</sup>/s para el evento El Niño. En la fase fría el caudal máximo registrado fue en diciembre 1241,0 m<sup>3</sup>/s del evento La Niña 2010-2011. El periodo de mayor efecto del fenómeno ENOS en sus fases extremas, corresponde al cuarto trimestre del primer año y al primer trimestre del segundo año.

Se recomienda la homogeneización de las series de precipitación para el tratamiento conjunto de los datos, ya que permite, hacer análisis más robustos, y reducir la incertidumbre existente respecto a la representatividad y consistencia de una muestra local, ya que una excesiva heterogeneidad de los datos en la región puede conducir a valores erróneos en la estimación de parámetros estadísticos, ya que para este estudio no se empleó una homogeneización en los registros de precipitación, por lo tanto para el análisis de los años de mayor incidencia del fenómeno ENOS, fue necesario emplear la serie desde 1982.

Este análisis constituye un insumo muy valioso para la formulación de políticas públicas y diseñar estrategias adecuadas para disminuir la vulnerabilidad ante el cambio climático. Los actores públicos y privados a nivel nacional y regional pueden usar la información generada como insumos para definir medidas de adaptación tanto en el presente, como para el futuro. El empleo de la metodología permitió identificar cual era la zona con mayor y menor vulnerabilidad en la Cuenca Alta del Río Cauca. El análisis general muestra que la zona de estudio presenta los mayores índices de vulnerabilidad cuando sucede un evento El Niño.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Allan, R; Lin Des, Y, & Parker, D. (1996). El Niño Southern Oscillation and climatic variability. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia. 405 pág,
- Andrade-Bejarano, M. (2013). Monthly Average Temperature Modeling in an Intertropical Region. *Weather and Forecasting*, 28(5), 1099-1115 pág.
- Ávila Díaz, A. 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*, 18(41), 120-133 pág.
- Análisis Interinstitucional y Multisectorial de Vulnerabilidad y Adaptación al cambio climático para el sector agrícola de la Cuenca Alta del Río Cauca (AVA), (2013). Impactando políticas de adaptación. Metodología de análisis de vulnerabilidad para la cuenca alta del río cauca. Reporte técnico
- Bamston, AG, Chelliah, M., & Goldenberg, SB (1997). Documentación de una región altamente SST relacionados con ENOS en el Pacífico ecuatorial: Investigación nota atmósfera y el océano, 35 (3), 367-383 pág.
- Bedoya, M., Contreras, C & Ruiz, F. (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático. *Estudio Nacional del agua 2010*, 282-320 pág.
- Berri, G. J., & Bertossa, G. I. (2004). The influence of the tropical and subtropical Atlantic and Pacific Oceans on precipitation variability over Southern Central South America on seasonal time scales. *International journal of climatology*, 24(4), 415-435 pág.
- Bonilla, A., Rosales, R., & Maldonado, J. (2003). El valor económico de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en el sector azucarero colombiano. *Desarrollo Y Sociedad*, (52), 1-38.
- Cardona, F; Ávila, A; Carvajal, Y & Jiménez, H (2013): Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales del Valle del Cauca (Colombia). *Tecnológicas*, vol. 17, no. 32, pp. 85-95 pág.
- Carvajal, Y; Jiménez, H & Materón, H (1998). Incidencia del Fenómeno ENSO en la Hidroclimatología del Valle del Río Cauca-Colombia. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*. 743-751 pág.
- Carvajal, Y., Grisales, C., & Mateus, J. (1999). Correlación de variables macroclimáticas del Océano Pacífico con los caudales en los ríos interandinos del Valle del Cauca (Colombia). *Revista Peruana de Biología*, 6(3), 009-017 pág.



- Carvajal, Y; Jiménez, H & Materón, H. (1999). Efectos ecológicos del fenómeno ENOS en Colombia; El Niño 1997-98 y su impacto sobre los Ecosistemas Marino Terrestre. Rev. Perú Biol. ISSN 1561-0837. Vol. Extraordinario 152-159 pág.
- Carvajal, Y., & J. Segura. (2002). Aplicación de métodos estadísticos para la regionalización de precipitación mensual en el Valle del Cauca Meteorología Colombia. 5:13-21. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Carvajal, Y. & J. Segura. (2005). Modelos multivariados de predicción de caudal mensual utilizando variables macroclimáticas. Caso de estudio Río Cauca. Revista Ingeniería y Competitividad. Volumen 7 - No. 1 – Julio.
- Carvajal, Y., Correa, G. A., & Muñoz, F. M. (2007). Modelos de predicción de caudal utilizando variables macroclimáticas y técnicas estadísticas multivariadas en el Valle del río Cauca. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, (6), 67-81 pág.
- CENEPRED (2013). Centro Nacional De Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres: Escenario de Riesgos ante el Fenómeno La Niña en la costa del Perú, Lima: Dirección de Gestión de Procesos.
- CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2012). Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011 Bogotá: Misión BID - CEPAL.
- Conde-Álvarez, C., & Saldaña-Zorrilla, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Ambiente y desarrollo, 23(2), 23-30 pág.
- Curtis, S., Adler, R., Huffman, G., Nelkin, E., & Bolvin, D. (2001). Evolution of tropical and extratropical precipitation anomalies during the 1997–1999 ENSO cycle. International Journal of Climatology, 21(8), 961-971 pág.
- CVC. (1994). Atlas de recursos naturales del Valle del Cauca. Tomo 1. Primera edición, Cali. P.17-25.
- CVC-UNIVALLE (2004), Proyecto de modelación del río Cauca PMC-Fase I., Volumen I, capítulo 3, Caracterización del río Cauca, tramo Salvajina La Virginia, Corporación Autónoma del Valle, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle Del Cauca (2006): Aplicación de Técnicas Estadísticas en las Series Climatológicas Mensuales Totales de Precipitación, Evaporación y Brillo Solar, Santiago De Cali, Colombia.

- Departamento Nacional de Planeación-DNP (2012). Plan nacional de adaptación al cambio climático. (Online). Disponible en: [http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/ABC\\_Cambio\\_Climatico.pdf](http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/ABC_Cambio_Climatico.pdf). [Consulta Sep. 2015].
- Enríquez, O; Guzmán, A & Narváez, G (2014). Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña. Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía Vol. 23, n° 1, ene.-jun. Del 2014 | ISSN 0121-215X. PP. 165-178 pág.
- Enciso, A., Carvajal, Y., & Sandoval, M. (2016). Análisis hidrológico de las crecientes históricas del río Cauca en su valle alto. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 18(1), 46-57.
- Eslava, J. A. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. *Rev. Acad. Colombiana de Ciencias*. 18(71), 507-538.
- Estrada Barbosa, F., & López Torres, J. S. (2015). Modelación hidrológica del río Palo utilizando el modelo hidrológico HBV para simular escenarios de variabilidad climática asociados al fenómeno ENOS en su fase fría La Niña [recurso electrónico] (Tesis de Pregrado).
- Euscátegui, C & Hurtado, G (2012). Análisis Del Impacto Del Fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la Hidroclimatología del País. IDEAM - Subdirección de Meteorología. Colombia.
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *AMBIO: A journal of the human environment*, 31(5), 437-440 pág.
- Gaviria, A. & Rodríguez, A. (2014). Análisis de Frecuencia de Precipitaciones Máximas Diarias en la Cuenca Alta del Río Cauca, Utilizando Distribuciones de Probabilidad. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Gunderson L. H. (2000). Ecological resilience in theory and application. *Annual. Revist. Ecology. Systems*. 31:425–439 pág.
- Gutiérrez, S., Carvajal, Y., & Ávila, A. (2013). Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua. *Entre Ciencia e Ingeniería*.
- Honty, G. (2007). América Latina ante el cambio climático. Observatorio de la Globalización, CLAES, marzo [disponible en [www.energiasur.org](http://www.energiasur.org)].

- IDEAM - Subdirección de Meteorología (2007): Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. José Edgar Montealegre Bocanegra Actividades desarrolladas en el marco del contrato de prestación de servicios No IDEAM 063-2007.
- IDEAM - Subdirección de Meteorología (2010): Cambio Climático en Temperatura, Precipitación y Humedad Relativa Para Colombia Usando Modelos Meteorológicos De Alta Resolución. Investigador: José Franklyn Ruiz M. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático. Bogotá, D. C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2010): Estudio sobre la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el caribe colombiano. Subdirección de Meteorología.
- IPCC (2007). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambio Climático 2007, informe síntesis. Primera impresión, ISBN 92-9169-322-7.
- Keppenne, C. L., & Ghil, M. (1992). Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation index. *Journal Of Geophysical Research-All Series-*, 97, 20-449 pág.
- Jiménez, M (2016). Indicadores Climáticos, boletín con información hidroclimáticas de los mares de México. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global. Recuperado el día 24 de junio del 2016. <http://www.inapesca.gob.mx/portal/sala-de-prensa/boletines/349-boletin-hidroclimatico-de-los-mares-de-mexico>.
- Loaiza, W (2014). Evaluación de Sequías Meteorológicas y Procesos de Adaptación de las Comunidades Agrícolas de la Cuenca Del Río Dagua – Valle Del Cauca. Caso De Estudio: Microcuenca La Centella. Universidad Del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil y Geomántica. Maestría en Desarrollo Sustentable.
- Lowry, W. P. (1973). Compendio de apuntes de climatología para la formación del personal meteorológico de la clase IV. In OMM (No. 327). OMM.
- Lobato, R. (2009). Climatología Básica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Coordinación de Hidrología- Sub coordinación de Hidrometeorología. SEMANART. Recuperado de: [http://galileo.imta.mx/FUPROGRO/doc\\_eventos/c01\\_LobatoR\\_CB.pdf](http://galileo.imta.mx/FUPROGRO/doc_eventos/c01_LobatoR_CB.pdf).
- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. El Niño-La Niña 1997-2000: sus efectos en Chile, 13-28 pág.
- Martín, J. A., & Munar, M. C. (2003). Introducción a la estadística descriptiva para economistas. Universitat de les Illes Balears.

- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., & Botero, B. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA*, 127, 7-26 pág.
- Mesa, S., Poveda, O. J., & G Carvajal, L. (1997). Introducción al clima de Colombia (No. Doc. 21345) CO-BAC, Bogotá).
- Montealegre., Edgar, J., & Caicedo, J. D. P. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21 pág.
- Montealegre, E., & Pabón, J. (2002). Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. *Meteorología Colombiana*. 5:59-65. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Montealegre, E. (2012). Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá Cundinamarca Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital Bogotá –Cundinamarca (PRICC).
- Montoya, A. (2010). Conformación del mapa de ecosistemas del Valle del Cauca empleando Sistemas de Información Geográfica. En: *Ventana Informática*. No. 22 (ene-jun., 2010). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales. ISSN: 0123-9678. 11-38 pág.
- Mulligan M., (2000). Downscaled Climate Change Scenarios for Colombia and their Hydrological Consequences. *Advances in Environmental Monitoring and Modeling*, Vol. 1, No. 1. 3-35 pág.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J. D., Pardo, A., & Rendon, J. (2015). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *Ingenierías USBmed*, 3(1), 62-68 pág.
- Núñez, D. (2013). Variabilidad de la sequía meteorológica de largo plazo en la parte mexicana de la Cuenca del río bravo, Tesis; Universidad Autónoma de Nuevo León, facultad de ciencias forestales; Linares, Nuevo León, México.
- Orozco, O. L. P., Escobar, Y. C., & Angel, M. Q. (2011). Estudio De Tendencias De La Precipitación Mensual En La Cuenca Alta-Media Del Río Cauca, Colombia. *Study Of Monthly Rainfall Trends In The Upper And Middle Cauca River Basin, Colombia*. *Dyna*, 169, 113 pág.

- Pabón, D. (2012). Cambio Climático en Colombia: Tendencias en la Segunda Mitad Del Siglo XX y Escenarios Posibles Para el Siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261-278 pág.
- Pabón J.D., N. Rodríguez, N.R. Bernal, M.A. & Castiblanco, Y.V. (2013). Modelamiento del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local-regional sobre los andes colombianos. *Rev. Académica Colombiana Ciencias* 37 (144): 379-391, 2013. ISSN 0370-3908.
- Penalba, Olga C, & Rivera, Juan A. (2015). Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. *Meteorológica*, 40(2), 33-57. Recuperado en 16 de noviembre de 2016, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-468X2015000200003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2015000200003&lng=es&tlng=es).
- Peña, A., E. Cortes & F. Montealegre. 2001: Incidencia de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca. Parte II – Análisis de Correlaciones. *Meteorología. Colombia*. 3:119-128. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.
- Perafán Cabrera, A. (2011). Transformaciones paisajísticas en la zona plana Vallecaucana. Biblioteca digital Universidad del Valle.
- Piñero Soto, R., Salinas Chávez, E., Puga Millán, R., & Areces Mallea, A. (2013). La resiliencia como indicador en el ordenamiento ambiental del Golfo Batabanó, Cuba.
- Poveda, G & Mesa, O. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XI, Numero 1. 21-27 pág.
- Poveda, G & W. Rojas (1997); Evidencias de la asociación entre brotes epidémicos de malaria en Colombia y el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias*. 21 (81); 421-429. ISSN 0370-3908.
- Poveda, G & O. J. Mesa (1999); La corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del Choco”) y otras corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias*. 23 (89); 517-528. ISSN 0370-3908.
- Poveda, G.; Jaramillo, A.; Gil, M. M.; Quiceno, N. & Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, Vol. 37, Nro. 8, 2169-2178 pág.
- Poveda, G., Vélez, j., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., Mejía, J., Barco, O., & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macro-climáticos sobre el ciclo anual de la

hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*. 6:121-130. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-Decadal hasta la escala diurna. *Revista Académica Colombiana Ciencias*, 28(107), 201-222.
- 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*. *Rev. Ingeniería y Desarrollo*, (23) 104-118 pág.
- Puertas, O., Carvajal, Y. & Quintero, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación 448 mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna* 78 (169), 112-120 pág.
- Rueda, O. & Poveda, G. (2006). Variabilidad espacial y temporal del chorro del “CHOCO” y su efecto en la Hidroclimatología de la región del Pacífico colombiano. *Meteorología Colombiana*. 10, 132-145 pág.
- Sedano, K; Carvajal, Y; & Díaz, Á. (2012). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista. Luna. Azul*, 37, 219-238 pág.
- Solarte, M & González, R. (2015). Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en dos y más días consecutivos en la cuenca alta del río cauca. Tesis de Pregrado. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Tercer Informe de Evaluación Cambio climático (2001). Impactos, adaptación y vulnerabilidad Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico. Parte de la contribución del Grupo de trabajo II al Tercer Informe de Evaluación Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Thrush, S. F., Hewitt, J. E., Dayton, P. K., Coco, G., Lohrer, A. M., Norkko, A. & Chiantore, M. (2009). Forecasting the limits of resilience: integrating empirical research with theory. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*.
- Torrero, Mariana P (2010). Análisis Del Balance Hídrico Para El Río Cataratas, Chubut, Argentina, Equipo interdisciplinario para el estudio de procesos atmosféricos en el cambio global, Pontificia Universidad Católica Argentina, Ciudad Autónoma De Buenos Aires.
- Vidal, L. F., Delgado, J., & Andrade, G. I. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales alto-andinos de Colombia al cambio climático global. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 69-85 pág.

