

**INFLUENCIA DE FENÓMENOS MACROCLIMÁTICOS COMO EL FENÓMENO
DEL NIÑO Y DE LA NIÑA EN LOS EVENTOS DE ESTIAJE Y DE CAUDALES
MÁXIMOS DE LOS RÍOS TONA, SURATÁ Y FRÍO**

**ANGIE VIVIANA CÁCERES PARRA
LAURA ESPERANZA HERNÁNDEZ BUITRAGO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

**INFLUENCIA DE FENÓMENOS MACROCLIMÁTICOS COMO EL FENÓMENO
DEL NIÑO Y DE LA NIÑA EN LOS EVENTOS DE ESTIAJE Y DE CAUDALES
MÁXIMOS DE LOS RÍOS TONA, SURATÁ Y FRÍO**

**ANGIE VIVIANA CÁCERES PARRA
LAURA ESPERANZA HERNÁNDEZ BUITRAGO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

**Director
ANDRES ALMEYDA ORTIZ
Ing. Msc en Explotación de Presas**

**Codirector:
WALTER LEONARD ANTOLINEZ
Ing. Msc en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECANICA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

DEDICATORIA

Quiero agradecer especialmente a Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa tan importante de mi vida. A Esperanza, Hermes, Diego y Camilo por su amor, apoyo incondicional y por ser los guías de mi vida durante este proceso de formación. A mis amigos por hacer este camino más alegre y entretenido, y finalmente agradezco a mis profesores por su colaboración, entrega y paciencia para la realización de este proyecto.

LAURA ESPERANZA HERNÁNDEZ BUITRAGO

AGRADECIMIENTOS

Las autoras de la presente tesis de investigación agradecen al Ing. MSc Andrés Almeyda Ortiz e Ing. MSc Walter Antolinez quienes en su calidad de director y codirector respectivamente, brindaron su asesoría, colaboración y tiempo en el proceso de desarrollo del proyecto desde su fase inicial hasta su culminación. Además, reconocen el aporte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por facilitar la información necesaria para la realización de la investigación.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. ZONA DE ESTUDIO	14
1.1. SUBCUENCA SURATÁ	14
1.2. SUBCUENCA TONA	14
1.3. SUBCUENCA FRÍO	15
2. METODOLOGÍA	16
2.1. RECOPIACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN.....	16
2.1.1. Series de precipitación.....	17
2.1.2. Series de caudal.	18
2.2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS.....	19
2.2.1. Correlaciones de series de precipitación.	19
2.2.2. Curvas de doble masa.	21
2.3. ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES.....	23
2.4. ESTUDIO DEL FENÓMENO DEL NIÑO Y DE LA NIÑA EN COLOMBIA	24
2.4.1. Identificación de índices climáticos utilizados en la caracterización del Fenómeno de “El Niño” y de “La Niña”.	25
2.5. CORRELACIÓN ÍNDICES MACROCLIMÁTICOS ONI-SOI-NAO CON LOS FENÓMENOS DE “EL NIÑO” Y “LA NIÑA” EN COLOMBIA.....	29
2.6. FORMULACIÓN DE ECUACIONES PREDICTORAS DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL PARA POSIBLES EVENTOS DEL FENÓMENO DE “EL NIÑO” Y “LA NIÑA”	33
3. CONCLUSIONES	38
4. RECOMENDACIONES.....	40
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS.....	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa ubicación estaciones subcuencas del Suratá, Tona y Frío	15
Figura 2. Metodología trabajo de investigación	16
Figura 3. Curvas doble masa subcuenca Río Suratá.....	22
Figura 4. Caudales medios mensuales multianuales subcuenca Suratá	27
Figura 5. Precipitaciones medias mensuales multianuales subcuenca Suratá	27
Figura 6. Precipitación media mensual multianual Vs. Fenómenos macroclimáticos Estación Miraflores.....	28
Figura 7 Caudal medio mensual multianual Vs. Fenómenos macroclimáticos Estación Majadas.....	28
Figura 8. Caudal real Vs. Caudal aproximado Estación Majadas para el fenómeno de “El Niño”	36
Figura 9. Precipitación real Vs. Precipitación aproximada Estación La Lora para el fenómeno de “La Niña”	37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones pluviométricas monitoreadas por el IDEAM y el amb S.A E.S.P.....	17
Tabla 2. Estaciones finales objeto de estudio.....	17
Tabla 3. Estaciones descartadas por inactividad y pocos años de registro.....	18
Tabla 4. Estaciones limnimétricas objeto de investigación.....	19
Tabla 5. Coeficientes de correlación lineal de Pearson subcuenca Suratá.....	21
Tabla 6. Porcentaje de datos faltantes.....	23
Tabla 7. Índices oceánicos y atmosféricos objeto de análisis.....	26
Tabla 8. Procedimiento de razón de correlación Precipitación Vs. Índice SOI para el fenómeno del Niño Estación La Lora (Subcuenca Suratá).....	30
Tabla 9. Procedimiento de razón de correlación Precipitación Vs. Índice ONI para el fenómeno de la Niña Estación La Lora (Subcuenca Suratá).....	31
Tabla 10. Procedimiento de razón de correlación Caudal Vs. Índice SOI para el fenómeno de “El Niño” Estación Majadas (Subcuenca Suratá).....	32
Tabla 11. Procedimiento de razón de correlación Caudal Vs. Índice ONI para el fenómeno de “La Niña” Estación Majadas (Subcuenca Suratá).....	32
Tabla 12. Estaciones con ecuaciones predictoras.....	37

LISTA DE ANEXOS*

Anexo A. Tabla estaciones finales de estudio con meses y años de registro de lluvias

Anexo B. Coeficientes de correlación lineal de Pearson subcuenca del Tona

Anexo C. Valores totales y acumulados de las estaciones de la subcuenca del Suratá y Tona

Anexo D. Curva de doble masa subcuenca del río Tona

Anexo E. Curvas de doble masa estaciones de la subcuenca del Suratá y Tona

Anexo F. Tabla registro histórico del fenómeno de "El Niño" y "La Niña" en Colombia

Anexo G. Tabla índices ONI, SOI Y NAO y períodos del fenómeno de El Niño y La Niña en Colombia

Anexo H. Caudal medio mensual multianual subcuenca del Frío

Anexo I. Precipitación media mensual multianual subcuenca del Suratá vs. Fenómenos de variabilidad climática

Anexo J. Procedimiento razón de correlación ($r^2 \geq 0,7$) estaciones subcuenca Suratá

Anexo K. Ecuaciones predictoras de precipitación y caudal

* Ver documentos adjuntos en el CD-Rom

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DE FENÓMENOS MACROCLIMÁTICOS COMO EL FENÓMENO DEL NIÑO Y DE LA NIÑA EN LOS EVENTOS DE ESTIAJE Y DE CAUDALES MÁXIMOS DE LOS RÍOS TONA, SURATÁ Y FRÍO*

AUTORES: ANGIE VIVIANA CÁCERES PARRA
LAURA ESPERANZA HERNÁNDEZ BUITRAGO**

PALABRAS CLAVE: Ciclo ENOS, correlación, fenómenos macroclimáticos, índices oceánicos, subcuencas

DESCRIPCIÓN:

La incidencia de los fenómenos macroclimáticos en el comportamiento hidrológico de las corrientes de agua requiere un análisis detallado debido a los cambios ambientales que genera, además es importante prever posibles eventos de lluvia o sequía para evitar afectaciones drásticas en la población. Este trabajo investigativo analiza algunos índices oceánicos y atmosféricos que caracterizan los fenómenos del Niño y de la Niña asociados al ciclo ENOS y el comportamiento de dichos valores sobre la precipitación y los caudales de los ríos Suratá, Tona y Frío, localizados en el departamento de Santander, Colombia. Para este análisis se tomaron series de datos de 20 años de precipitación que corresponden a 12 estaciones cercanas a las subcuencas de los ríos a estudiar y tres estaciones con datos de caudales de dichas subcuencas, estos datos fueron sometidos a un análisis de consistencia, donde posteriormente se realizó el llenado de los datos faltantes de las series. Teniendo los datos verificados y completos de precipitación y caudal se realizó el análisis de las variables mediante gráficas que muestran valores medios mensuales multianuales, comparando así las estaciones por subcuencas con los índices escogidos, con base en la visualización de las gráficas y su correlación, se plantean indicadores que sirvan para prever futuros eventos de los fenómenos de “El Niño” y de “La Niña”.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director Andres Almeyda Ortiz.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF MACROCLIMATIC PHENOMENA AS THE PHENOMENON OF THE CHILD AND THE GIRL IN THE EVENTS OF STRETCHING AND MAXIMUM FLOWS OF THE TONA, SURATÁ AND COLD RIVERS*

AUTHORS: ANGIE VIVIANA CÁCERES PARRA
LAURA ESPERANZA HERNÁNDEZ BUITRAGO**

KEYWORDS: ENOS Cycle, macro climatic phenomena, correlation, oceanic index, sub-basin.

DESCRIPTION:

The incidence of the macro climatic phenomena on hydrological behavior of flowing water requires a detailed analysis due to environmental changes that it generates; also it is important to foresee for possible rain or drought events so that drastic effects could be avoided. This research project examines some oceanic and atmospheric indexes which characterize "El Niño" and "La Niña" phenomena associated with the ENSO cycle, this study also focuses on the behavior of these values on the precipitation and the flow of the rivers Suratá, Tona and Frío, located in the department of Santander, Colombia. For this analysis, some data was taken during 20 years of precipitation which correspond to 12 stations near the sub-basins of rivers to study and 3 stations with information on flows of these sub-basins, these data was subjected to analysis of consistency, where it was subsequently filling of missing data of the series. Having completed and verified data of precipitation and flow. The analysis of the variables with graphs was carried out showing monthly average values multi-year, so comparing stations by sub-basins with the selected indexes, using the method of reason for correlation, there are indicators used to predict future events of "El Niño" and "La Niña" phenomena.

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director Andres Almeyda Ortiz.

INTRODUCCIÓN

El Ciclo conocido como El Niño, La Niña – Oscilación del Sur – ENOS, es la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del océano Pacífico, en la escala interanual. Dada su localización geográfica, Colombia recibe la influencia directa de los procesos que se suscitan en el sistema acoplado océano-atmósfera del Pacífico tropical, asociada al ciclo ENOS.

El análisis de información histórica, indica que las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en Colombia son explicadas en buena parte, por la variabilidad climática interanual, relacionada con los fenómenos de El Niño y La Niña, los cuales han sido causa de sequías extremas y lluvia extraordinarias en diferentes regiones del país, ocasionando un efecto negativo sobre el medio físico natural y un impacto social y económicos de grandes proporciones [1]. Debido a dichos impactos en la hidrología de las corrientes, y con el objetivo de mitigar los efectos adversos que puedan presentarse por la variabilidad interanual de la lluvia, este trabajo de investigación estudia la influencia de estos eventos en épocas de estiaje y de aparición de caudales máximos de los ríos Suratá, Tona y Frío en los últimos 20 años, además se proponen indicadores que sean útiles para predecir los posibles eventos climáticos y el comportamiento de los caudales y lluvias para las subcuencas de los ríos mencionados anteriormente.

Esta comparación se realizará mediante métodos estadísticos de correlación, entre los caudales de los ríos a estudiar, de las precipitaciones tomadas mensualmente, y de los índices oceánicos y atmosféricos que tengan mayor incidencia en el comportamiento hidrológico de Colombia, teniendo en cuenta como factor de análisis el mismo intervalo de tiempo de ocurrencia de los fenómenos, para así conocer la influencia en el área de estudio.

1. ZONA DE ESTUDIO

1.1. SUBCUENCA SURATÁ

La subcuenca del Río Suratá forma parte de la Cuenca superior del Río Lebrija, la cual se encuentra localizada en el sector noroccidente y centro norte del área de jurisdicción. Posee una extensión total de 372.759 hectáreas y representa el 76,64% del área de jurisdicción de la CDMB. En aspectos climáticos, tiene una tendencia bimodal, con dos períodos lluviosos (Marzo – Mayo y Septiembre – Noviembre) y dos secos (Diciembre- Febrero y Junio – Agosto).

Esta cuenca hidrográfica abastece de agua el Área Metropolitana de Bucaramanga. Su ubicación es al norte de la ciudad de Bucaramanga y se comunica por la vía a los Municipios de la provincia Soto Norte. El Río Suratá nace en la microcuenca del río Suratá alto sobre la cota de los 3.800 msnm en el páramo de Monsalve y desemboca en el río Lebrija en la vereda Santa Rita, sobre la cota de los 1.000 msnm [2].

1.2. SUBCUENCA TONA

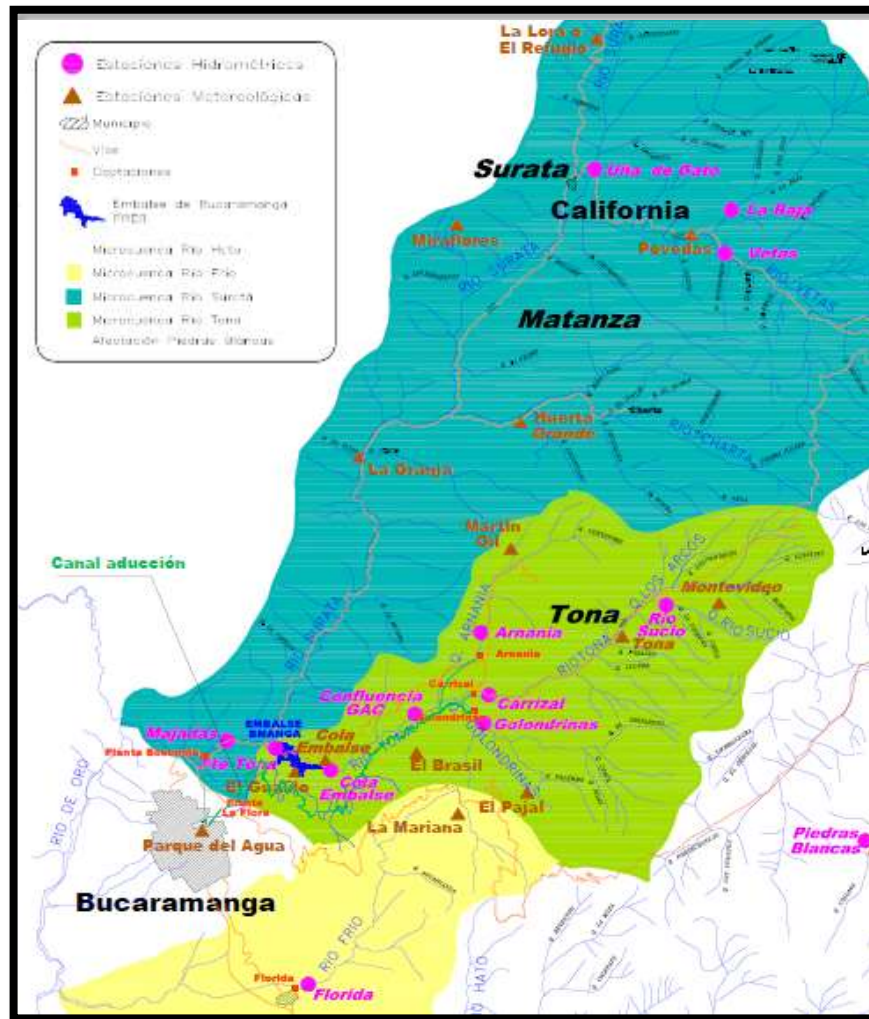
La subcuenca del río Tona se encuentra ubicada en la cordillera Oriental, al noreste de la ciudad de Bucaramanga con una área de 193,81 km². La subcuenca hidrográfica pertenece a la gran cuenca del río Lebrija, con 8.200 km² de área de drenaje. Sus afluentes principales son las quebradas Golondrinas, Arnania y Carrizal.

El río Tona tiene una longitud de 28,26 km desde su nacimiento al noreste de la cabecera municipal de Tona, en la cota 3.800 msnm, hasta la desembocadura en el río Suratá en la cota 750 msnm aproximadamente. La dirección del drenaje principal es NE – SW. Los principales cuerpos de agua en la subcuenca del río Tona son los siguientes: quebradas El Peñón, Los Arcos, Río Sucio, Lúcura, Vegas del Quemado, Arnania, El Aburrido, Montecristo y Golondrinas [3].

1.3. SUBCUENCA FRÍO

El río Frío nace a la altura del kilómetro 38 de la vía Bucaramanga-Pamplona, al oriente de Bucaramanga, a una elevación cercana a los 2.850 msnm. Su curso se dirige inicialmente hacia el norte y ya en el sitio denominado La Corcova cambia bruscamente hacia el suroccidente en dirección del municipio de Floridablanca. Esta cuenca tiene una extensión de 5.300 hectáreas en el sitio de captación de La Esperanza, siendo de condiciones húmedas en la mayor parte de su territorio [4]. En la **Figura 1** se muestra el mapa de la red hidrometeorológica, donde se puede observar la ubicación de las subcuencas de los ríos Suratá, Tona y Frío, además de las estaciones a estudiar.

Figura 1. Mapa ubicación estaciones subcuencas del Suratá, Tona y Frío

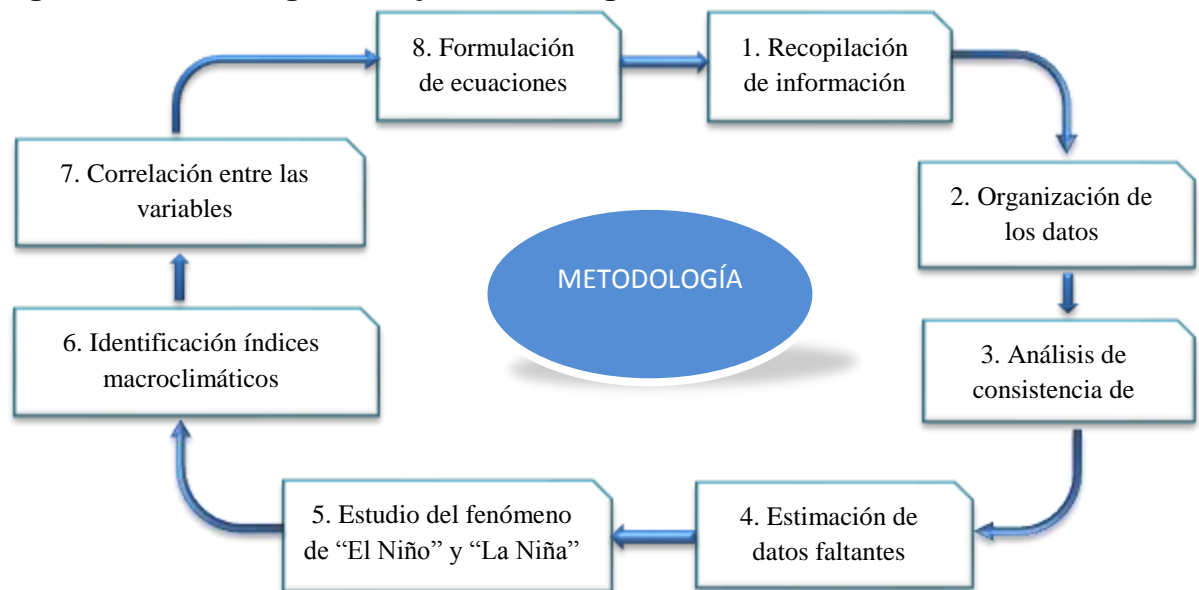


Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P)

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el desarrollo del proyecto se basó para su primera fase en recolectar los datos de precipitación y caudal, verificar su consistencia y realizar el procedimiento de estimación de datos faltantes, en la segunda fase se buscaron los índices relacionados con los fenómenos de “El Niño” y “La Niña”, y se compararon con las variables hidrológicas verificadas en la primera fase, obteniendo así indicadores o ecuaciones predictoras. En la **Figura 2** se muestra en resumen el proceso metodológico utilizado para el desarrollo de la investigación.

Figura 2. Metodología trabajo de investigación



2.1. RECOPIACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN

Para el trabajo de investigación se realizó la recopilación, estudio y análisis de las series hidrométricas de caudales de los ríos del área de influencia, que para este caso serán los ríos Suratá, Tona y Frío, ubicados en el departamento de Santander y de las estaciones pluviométricas asociadas a sus cuencas. Las estaciones seleccionadas para el estudio correspondientes a datos de precipitación fueron 16, de las cuales 6 corresponden a la subcuenca de Suratá, 9 a la del río Tona y 1 estación para Río Frío; para la información de caudales se

recopilaron datos de 1 estación para el río Suratá y 1 para el río Frío, y en el caso del río Tona se tuvieron en cuenta 3 estaciones limnimétricas.

2.1.1. Series de precipitación. Para esto se buscaron estaciones monitoreadas por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el área de estudio. La **Tabla 1** muestra las 16 estaciones escogidas que contienen información pluviométrica de las zonas que conforman las subcuencas del río Suratá, Tona y Frío.

Tabla 1. Estaciones pluviométricas monitoreadas por el IDEAM y el amb S.A E.S.P

ESTACIÓN	ENTIDAD	SUBCUENCA	COORDENADAS		ELEVACIÓN (msnm)	FECHA INSTALACIÓN (mes/año)
			LAT	LONG		
EL PAJAL	amb	TONA	N 7,08,2759	W 72,59,5750	2196	ago-99
EL BRASIL	amb	TONA	N 7,07,4838	W 73,06,3383	1662	jun-82
MARTIN GIL	amb	TONA	N 7,13,5210	W 72,59,5297	2000	sep-06
MIRAFLORES	amb	SURATÁ	N 7,20,5377	W 73,01,0983	2422	ene-00
LA MARIANA	amb	FRÍO	N 7,07,2206	W 73,00,2550	2478	ene-02
LA GALVICIA	IDEAM	TONA	N 7,12,4444	W 73,05,722	1779	ene-68
EL PICACHO	IDEAM	TONA	N 7,11	W 72,96,6389	3310	jul-67
TONA	IDEAM	TONA	N 7,196111	W 72,97,0556	1910	may-58
LA PLAZUELA	amb	TONA	N 7,09	W 72,58	2200	jul-82
LA LORA	amb	SURATÁ	N 7,24,3657	W 72,58,4501	2250	sep-82
LA GRANJA	amb	SURATÁ	N 7,15,4442	W 73,03,1977	1200	may-82
EL GUALILO	amb	TONA	N 7,08,3250	W 73,05,0170	1249	mar-07
HUERTA GRANDE	amb	SURATÁ	N 7,16,4021	W 72,59,4150	1650	may-85
MORROCHUITO	amb	TONA	-	-	-	ene-99
POVEDAS	amb	SURATÁ	N 7,20,4231	W 72,56,2375	2000	oct-85
MATAJIRA	IDEAM	SURATÁ	N 7, 13	W 73,04	996	nov-67

Fuente: Portal de Internet del IDEAM y datos del amb S.A E.S.P

Teniendo las 16 estaciones pluviométricas escogidas inicialmente para realizar la investigación y con base a los datos proporcionados por las entidades, se hizo un segundo proceso de selección, donde se compararon los años disponibles de registro de precipitación de las estaciones que contaran con series continuas, además que estuvieran activas y con información actualizada, en la **Tabla 2** se describen las características de dichas estaciones.

Tabla 2. Estaciones finales objeto de estudio

ESTACIÓN	ENTIDAD	SUBCUENCA	COORDENADAS		ELEVACIÓN (msnm)	# AÑOS REGISTRO
			LAT	LONG		
EL PAJAL	amb	TONA	N 7,08,2759	W 72,59,5750	2196	18
EL BRASIL	amb	TONA	N 7,07,4838	W 73,06,3383	1662	35
MARTIN GIL	amb	TONA	N 7,13,5210	W 72,59,5297	2000	49
MIRAFLORES	amb	SURATÁ	N 7,20,5377	W 73,01,0983	2422	17

ESTACIÓN	ENTIDAD	SUBCUENCA	COORDENADAS		ELEVACIÓN (msnm)	# AÑOS REGISTRO
			LAT	LONG		
LA MARIANA	amb	FRIO	N 7,07,2206	W 73,00,2550	2478	18
LA GALVICIA	IDEAM	TONA	N 7,12,4444	W 73,05,722	1779	48
EL PICACHO	IDEAM	TONA	N 7,11	W 72,96,6389	3310	49
LA LORA	amb	SURATÁ	N 7,24,3657	W 72,58,4501	2250	35
LA GRANJA	amb	SURATÁ	N 7,15,4442	W 73,03,1977	1200	35
HUERTA GRANDE	amb	SURATÁ	N 7,16,4021	W 72,59,4150	1650	19
POVEDAS	amb	SURATÁ	N 7,20,4231	W 72,56,2375	2000	17
MATAJIRA	IDEAM	SURATÁ	N 7, 13	W 73,04	996	49

En la **Tabla 3** se observan las estaciones descartadas, teniendo en cuenta el análisis detallado de los datos y de los años con los cuales se contó con información, así se descartaron 4 estaciones, por poca información o en su defecto por inactividad.

Dichas estaciones pertenecen a la subcuenca de Tona, quedando así 5 estaciones de estudio para esta zona, por otro lado, se trabajaron con las 6 estaciones de Suratá y la estación de río Frío mencionadas inicialmente en el proyecto.

Tabla 3. Estaciones descartadas por inactividad y pocos años de registro

ESTACIÓN	FECHA INSTALACIÓN (mes/año)	FECHA SUSPENSIÓN (mes/año)	ESTADO
LA PLAZUELA	jul-82	oct-98	INACTIVA
MORROCHUITO	ene-99	jun-06	INACTIVA
EL GUALILO	mar-07	-	POCOS AÑOS
TONA	may-58	jul-10	INACTIVA

De esta forma se disminuyó a 12 el número de estaciones objeto de estudio, teniendo en cuenta que algunas de las estaciones que se seleccionaron tienen varios períodos sin datos, debido a fallas instrumentales, ausencia del operador o cambio de administración (en el caso del amb); de igual manera se decidió incluirlas en el análisis pues cuentan con información pluviométrica reciente y se ubican sobre la zona de estudio. En el **Anexo A** se observan las 12 estaciones que se incluyeron finalmente para el estudio, con los años y meses correspondientes a su registro de lluvia.

2.1.2. Series de caudal. Se seleccionaron 6 estaciones limnimétricas, correspondientes a series de caudales de los ríos Suratá, Tona y Frío, que corresponden a las estaciones Majadas, Arnania-Carrizal-Golondrinas, y Río Frío respectivamente, mostradas en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Estaciones limnimétricas objeto de investigación

ESTACIÓN	ENTIDAD	CORRIENTE	SUBCUENCA	MUNICIPIO	FECHA INSTALACIÓN (mes/año)
MAJADAS	amb	R. SURATÁ	SURATÁ	SURATÁ	ene-87
LA FLORIDA	amb	R. FRÍO	FRÍO	FLORIDABLANCA	ene-80
ARNANIA	amb	R. TONA	TONA	TONA	ene-90
CARRIZAL	amb	R. TONA	TONA	TONA	ene-90
GOLONDRINAS	amb	R. TONA	TONA	TONA	ene-90

2.2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE DATOS

El análisis de consistencia de datos se realizó para comprobar si los datos con los que se cuenta, en este caso valores mensuales de precipitación y caudal registrados son veraces y confiables, ya que alguna modificación en la ubicación de la estación meteorológica, exposición o cambios en la instrumentación puede producir variaciones en la precipitación y caudales captados [5]. Este procedimiento de conocer la calidad de los datos es importante para obtener una predicción confiable al momento de calcular un valor proyectado de precipitación y caudal.

Con las 12 estaciones pluviométricas y las 6 estaciones limnimétricas escogidas, se analizaron series de datos de 20 años, que van desde 1995 hasta el año 2016. Después de analizar la información, se encontraron varios datos faltantes mensuales en las estaciones, por esto fue necesario realizar un estudio detallado de las series, por medio de las gráficas obtenidas a partir de los valores de precipitación y caudal mensual, para así observar la tendencia adoptada por los datos y verificar qué tan homogéneo era su comportamiento [6]. Este procedimiento se desarrolló por el método de la curva de doble masa, la cual minimiza o elimina errores sistemáticos en las mediciones de precipitación [7]. Para realizar este procedimiento se separaron las estaciones por las subcuencas a las que pertenecían, para tener un análisis detallado en cada zona y de esta forma poder comparar los datos.

2.2.1. Correlaciones de series de precipitación. Después de tener las estaciones distribuidas por subcuencas, se procedió a conocer el grado de asociación entre las precipitaciones de las distintas estaciones y así determinar el tipo de correlación existente, valores negativos del coeficiente indicaban un sentido inverso en la correlación y valores positivos señalaban correlaciones en sentido directo. Debido a la tendencia que adoptaban las curvas de precipitación y el concepto de la asociación entre variables, se usó el coeficiente lineal de

correlación de Pearson, donde sus valores oscilan desde -1 hasta 1, este coeficiente es un índice de tamaño del efecto pues indica la magnitud de la relación encontrada entre las variables a comparar, que para este caso fueron los valores de precipitación [8].

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Siendo:

r = Coeficiente de correlación de Pearson

σ_{xy} = Covarianza de (X, Y)

σ_x, σ_y = Desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

En este caso se compararon datos de precipitación entre estaciones cercanas para establecer su tendencia lineal, donde un valor de correlación mayor a 0,9 indica un buen régimen para el análisis por curva de doble masa, y variables que arrojen coeficientes menores de 0,3 sean negativos o positivos no tienen un buen ajuste. Cabe resaltar que únicamente se presenta un valor de correlación negativo entre las estaciones pluviométricas Brasil y Picacho de la subcuenca de Tona, lo que evidencia que los datos para dichas estaciones no tienen correlación entre sí.

De otro lado la subcuenca de río Frío no se analizó, ya que sólo se disponían de datos de una estación de precipitación llamada La Mariana, debido a que no se contó con información de otras estaciones en esta área, lo cual dificultaba calcular la correlación lineal de Pearson, y por consiguiente el análisis mediante el método de curva de doble masa.

En la **Tabla 5** se muestran los coeficientes obtenidos al comparar los datos de precipitación total, tomada anualmente de las 6 estaciones escogidas para la subcuenca del Suratá, y las 5 estaciones para la subcuenca Tona, excluyendo así la subcuenca de río Frío, por lo mencionado anteriormente. Para la subcuenca del río Suratá, los valores de coeficientes de correlación cercanos a 1 de la estación Matajira con las 5 estaciones de control, indicaron que existe un parámetro alto de asociación de los datos de precipitación, y que al elegir como estación índice Matajira para el análisis de doble masa, se pudo obtener un grado alto de confiabilidad en el proceso de estimación de datos faltantes.

En la observación de la subcuenca del Río Tona, La Galvicia, presentó valores de correlación de Pearson inferiores a 0,3, y en cambio El Pajal obtuvo valores más altos. Sin embargo, se decidió realizar el estudio con La Galvicia, pues contaba

con los datos completos, lo que facilita la aplicación de un método de estimación de datos. En el **Anexo B** se muestra la tabla de correlación para la subcuenca del Tona.

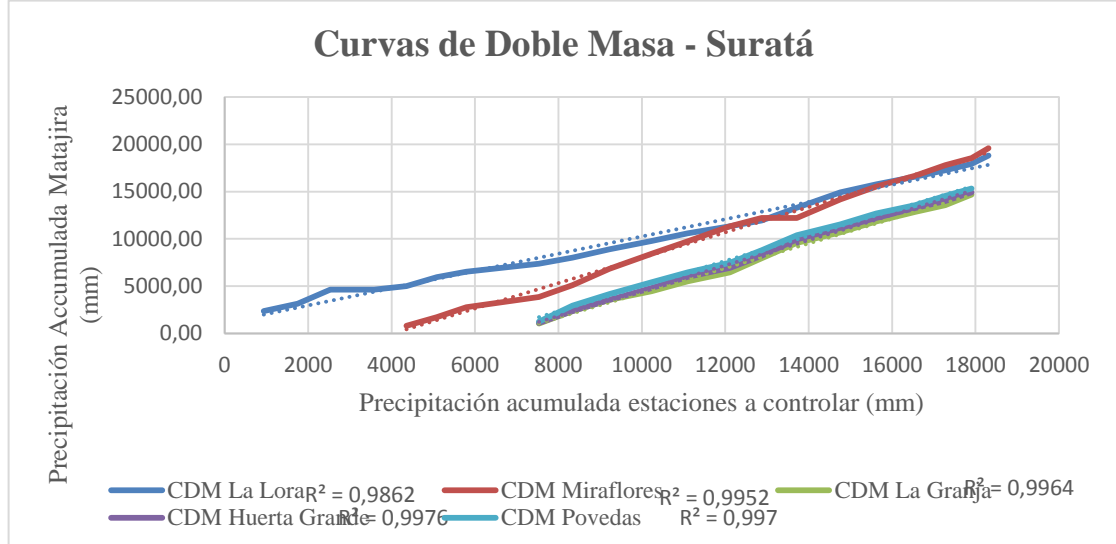
Tabla 5. Coeficientes de correlación lineal de Pearson subcuenca Suratá

ESTACIONES	MATAJIRA	LA LORA	LA GRANJA	HUERTA GRANDE	MIRAFLORES	POVEDAS
MATAJIRA	1					
LA LORA	0,9867	1				
LA GRANJA	0,9104	0,8743	1			
HUERTA GRANDE	0,8913	0,8457	0,9966	1		
MIRAFLORES	0,9508	0,9012	0,9770	0,9764	1	
POVEDAS	0,9522	0,9321	0,9886	0,9768	0,9764	1

*Sombreado corresponde a los coeficientes de correlación de Pearson de la estación Matajira respecto al resto de estaciones

2.2.2. Curvas de doble masa. Para la construcción de las curvas de doble masa se inició identificando una estación base o patrón para cada subcuenca seleccionada en el numeral anterior, que contara con datos completos y consistentes para ser comparada con las estaciones a controlar. Para el área de influencia del río Suratá se identificó como estación patrón, Matajira, y para el río Tona se escogió La Galvicia, que cumplieran con los parámetros para realizar el análisis de consistencia. Para la subcuenca del río Frío como sólo se mencionó anteriormente no fue posible destacar la relación de proporcionalidad gráficamente con otras estaciones de la misma cuenca, ya que sólo se cuenta con una estación [9]. Teniendo los datos mensuales de precipitación de las estaciones objeto de estudio, se calculó la lluvia total anual de cada estación, con la suma de todos los meses en cada año de registro y luego se tomaron sus valores acumulados para la serie de 20 años, para así poder elaborar las gráficas de curvas de doble masa (**Anexo C**). En la **Figura 3**, se muestra la tendencia de las curvas de doble masa de la subcuenca del Suratá.

Figura 3. Curvas doble masa subcuenca Río Suratá



En el **Anexo D**, se encuentra la gráfica de curva de doble masa correspondiente a la subcuenca del Tona. Además, en el **Anexo E** se pueden observar las gráficas individuales del método de consistencia de cada estación de las 2 subcuencas estudiadas, con su ajuste, con la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación respectivo.

Comparando la curva de doble masa de cada estación a controlar con la estación patrón, se observó tanto para la subcuenca de Suratá mostrada anteriormente, como la del Tona, que donde hay una variación en la tendencia hay ausencia de datos de lluvia, por tal razón no se corrigió información en estos tramos, pues se cuenta con un porcentaje considerable de datos faltantes, lo que evidencia que la inconsistencia de las gráficas en estos intervalos se debe a la ausencia de información. Por otro lado, se analizó que donde la gráfica sigue una tendencia lineal, los datos son consistentes y completos, lo que se confirmó con los coeficientes de determinación y correlación arrojados en el análisis, ya que oscilan entre valores de 0,98 y 0,99, por lo que no fue necesario aplicar el factor de corrección para el análisis de doble masa para los datos de precipitación de las subcuencas del Suratá y Tona.

Para los datos de caudal se encontró información completa de todas las estaciones de las subcuencas a analizar proporcionados por el amb S.A E.S.P, por tal razón no hubo necesidad de completar datos faltantes y se llegó a la conclusión que su comportamiento mantiene la misma tendencia, y valores de correlación de Pearson significativos, lo que señala que los datos siguen una distribución similar y se presume que son consistentes en su registro.

2.3. ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES

Teniendo verificada la información de precipitación se realizó el procedimiento de estimación de datos faltantes, dónde para escoger un método primero se observó la distancia entra las estaciones, segundo los modelos que se ajustaban a una estimación mensual y tercero el número de estaciones que contaran con los datos completos en la serie de años escogidos.

Tomando en consideración lo anterior, se llegó a la conclusión de usar el método de la relación normalizada, que consiste en comprobar que la precipitación de cualquiera de las estaciones auxiliares difiera en más de un 10% de la medida de la estación incompleta, en el cual los valores observados en las estaciones auxiliares se ponderaron mediante las relaciones o cocientes a la precipitación media correspondiente. Es decir, que el dato faltante mensual P_x fue calculado así: [10]

$$P_x = \frac{1}{n} \left(\frac{N_x}{N_1} P_1 + \dots + \frac{N_x}{N_n} P_n \right)$$

Dónde:

P_x = Dato faltante de precipitación

N_x = Precipitación media mensual en la estación incompleta, en milímetros.

N_1, \dots, N_n = Precipitación media mensual en las estaciones auxiliares 1... n (mm).

P_1, \dots, P_n = Precipitación mensual observada en las estaciones 1...n para la misma fecha que la faltante (mm).

En la **Tabla 6** se observa el número y porcentaje de datos faltantes para cada estación utilizada en la investigación.

Tabla 6. Porcentaje de datos faltantes

ESTACIÓN	TIPO ESTACIÓN	# DATOS FALTANTES	% DATOS FALTANTES
HUERTA GRANDE	PLUVIOMÉTRICA	1	0,64
POVEDAS	PLUVIOMÉTRICA	3	1,92
LA LORA	PLUVIOMÉTRICA	24	9,52
MIRAFLORES	PLUVIOMÉTRICA	18	8,82
LA GRANJA	PLUVIOMÉTRICA	0	0
MATAJIRA	PLUVIOMÉTRICA	0	0
MARTIN GIL	PLUVIOMÉTRICA	15	9,62
EL PAJAL	PLUVIOMÉTRICA	14	6,86

ESTACIÓN	TIPO ESTACIÓN	# DATOS FALTANTES	% DATOS FALTANTES
EL BRASIL	PLUVIOMÉTRICA	48	19,05
EL PICACHO	PLUVIOMÉTRICA	18	7,14
LA GALVICIA	PLUVIOMÉTRICA	0	0
LA MARIANA	PLUVIOMÉTRICA	35	23,97
MAJADAS	LIMNIMÉTRICA	0	0
LA FLORIDA	LIMNIMÉTRICA	0	0
ARNANIA	LIMNIMÉTRICA	0	0
CARRIZAL	LIMNIMÉTRICA	0	0
GOLONDRINAS	LIMNIMÉTRICA	0	0

2.4. ESTUDIO DEL FENÓMENO DEL NIÑO Y DE LA NIÑA EN COLOMBIA

Dentro de las escalas de variabilidad climática, los fenómenos ENSO en sus fases fría (“La Niña”) y cálida (“El Niño”) son determinantes en los patrones climáticos de diversas áreas de la superficie terrestre. El territorio colombiano es una de ellas, y como una clara demostración, se señala la presencia de “La Niña” 2010-2011, y el evento de “El Niño” 1997-1998, períodos que se encuentran comprendidos en la serie de 20 años que se estudia en el presente documento. Estos eventos fueron bastante notorios, generando emergencias considerables tanto de desabastecimiento como de inundaciones.

El efecto de “La Niña” se caracteriza por un aumento considerable de las precipitaciones (anomalías positivas) y una disminución de las temperaturas (anomalías negativas), en las regiones Andina, donde se encuentra el punto de referencia de esta investigación, además de las regiones Caribe y Pacífica [11].

Por otro lado, el efecto de “El Niño” es el término originalmente usado para describir la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas de lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Cabe señalar, que aunque la temperatura superficial del mar es el indicador más comúnmente utilizado para establecer la presencia de “El Niño”, se evalúan otros indicadores no solo oceánicos, sino a su vez atmosféricos. Por tal razón, para la consolidación del evento, debe existir un acoplamiento océano-atmósfera [12].

En cuanto al territorio comprendido para el estudio se conoce que en la región Andina, el impacto de “El Niño” es altamente significativo, en cuanto a deficiencia de lluvias, ya que en estudios realizado por el IDEAM se aprecia que el porcentaje

de territorio afectado por deficiencias de precipitación es apreciable en algunos eventos analizados y los meses en que predomina exceso o situación normal son ocasionales [13].

En el **Anexo F** se aprecia la tabla con los meses en que ocurrieron eventos de los fenómenos de variabilidad climática de “El Niño” y “La Niña” en Colombia, datos que fueron suministrados por el IDEAM.

2.4.1. Identificación de índices climáticos utilizados en la caracterización del Fenómeno de “El Niño” y de “La Niña”. Los índices climáticos se utilizan para describir el estado y los cambios que se producen en el sistema climático y son frecuentemente usados para realizar análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias. Para estos indicadores se utilizan ciertas variables que describen algunos aspectos del clima lo que se representa a través de una ecuación y estos pueden basarse en variables atmosféricas, como la presión, la temperatura, la precipitación y la radiación solar o también oceanográfica, como la temperatura superficial del mar. Los índices climáticos más comunes se elaboran a partir de la presión atmosférica y están basados en los gradientes de presión que existen entre dos o más localidades, por lo que se requieren registros mínimos de dos estaciones meteorológicas [14].

Para efectos del trabajo de investigación se tomó como referencia para el estudio el Índice Oceánico del Niño (ONI¹), el Índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO²), y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), los cuales describen los valores oceánicos y atmosféricos que intervienen en el comportamiento de los fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña. En la **Tabla 7** se observa la descripción de cada índice tomado para el trabajo investigativo y el rango de incidencia en los eventos de lluvia o estiaje que se tratan en este proyecto.

Hay que resaltar que el índice de Oscilación cuasibienal (QBO³) no se consideró para el estudio debido a que en investigaciones anteriores se concluyó que las correlaciones entre los valores del índice y los registros de lluvia en Colombia son muy bajas, lo que significa que la señal de la oscilación cuasi-bienal de los vientos estratosféricos no parece incidir de manera simple ni lineal sobre los eventos de precipitación en Colombia [15]. El SST3-4 tampoco se tuvo en cuenta, pues no se encontró un rango que relacionara directamente los valores de este índice con los

¹ Oceanic Niño Index

² North Atlantic Oscillation Index

³ Quasi-Biennial Oscillation

fenómenos del Niño y de la Niña en Colombia, por lo que dificultaba conocer la incidencia de estos valores sobre la climatología de la zona.

Tabla 7. Índices oceánicos y atmosféricos objeto de análisis

INDICE	DEFINICION	RANGOS
ÍNDICE OCEÁNICO DEL NIÑO (ONI)	Representa la desviación del promedio de la temperatura superficial del océano Pacífico	F. Niño --> Valores positivos $\geq 0,5$ °C durante tres (3) meses continuos
		F. Niña -->Valores negativos $\leq -0,5$ °C durante tres (3) meses continuos
		Neutro--> Valores entre $-0,5$ °C a $+0,5$ °C [16]
ÍNDICE OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE (NAO)	Es la alteración de la masa atmosférica entre las regiones subtropical y subpolar del océano Atlántico Norte, se caracteriza por variaciones en el gradiente de presiones a nivel del mar en escalas mensual y estacional.	F. Niño --> Valores positivos
		F. Niña -->Valores negativos
		Neutro--> Valores iguales a 0 [17]
ÍNDICE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI)	Es la diferencia entre las presiones atmosféricas estandarizadas entre un centro de alta presión cerca de Tahití y un centro de baja presión en Darwin.	F. Niño --> Valores negativos
		F. Niña -->Valores positivos
		Neutro--> Valores iguales a 0 [17]

En el **Anexo G** se encuentran las tablas con los valores correspondientes de los índices mencionados en la **Tabla 7** desde 1995 hasta 2016, período escogido para realizar el estudio, resaltando los períodos en que ocurrieron eventos del fenómeno de “El Niño” y “La Niña” en Colombia.

Tomando en consideración los valores de los índices que se escogieron para el trabajo investigativo y los meses en que ocurrieron fenómenos de “El Niño” y de “La Niña”, se realizó un análisis gráfico de las variables de precipitación y caudal de valores mensuales multianuales por subcuencas para conocer su comportamiento y así poder relacionarlos con los índices que identifican los fenómenos macroclimáticos de “El Niño” y “La Niña”. En la **Figura 4** y **Figura 5** se evidencia cómo la distribución del régimen de lluvias y de caudales para la subcuenca de Suratá se comportan de manera bimodal para el período comprendido de 20 años. En el **Anexo H** se encuentran las gráficas correspondientes a las subcuencas de Tona y Frío, las cuales muestran la misma tendencia.

Figura 4. Caudales medios mensuales multianuales subcuenca Suratá

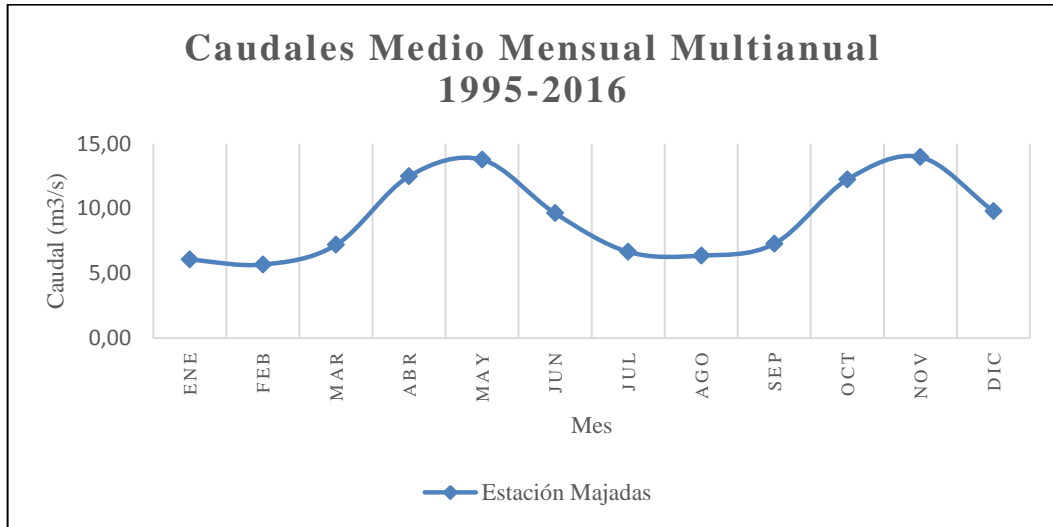
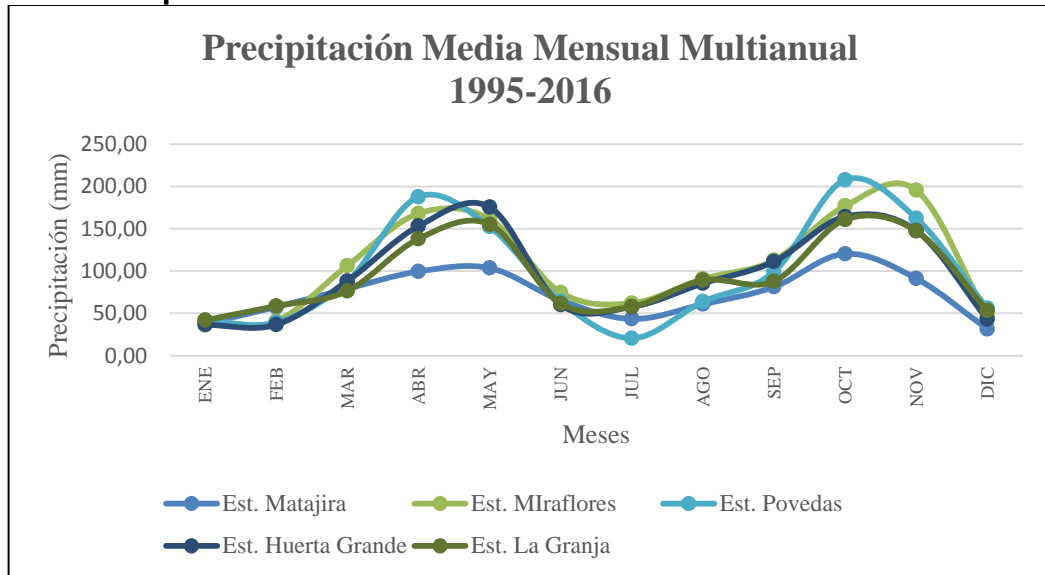


Figura 5. Precipitaciones medias mensuales multianuales subcuenca Suratá



Conociendo el régimen que siguen las subcuencas se comparan los meses en que hubo ocurrencia de los fenómenos climáticos de el Niño y de la Niña y los rangos de los índices que describen los eventos en el mismo lapso de tiempo. En la **Figura 6** se observa la secuencia que siguen los períodos secos, húmedos y neutros en la estación Miraflores correspondiente a la subcuenca de Suratá. En la **Figura 7** se muestra los fenómenos de variabilidad climática y su período neutro, para caudales de la estación Majadas perteneciente a la subcuenca del Suratá.

Figura 6. Precipitación media mensual multianual Vs. Fenómenos macroclimáticos Estación Miraflores

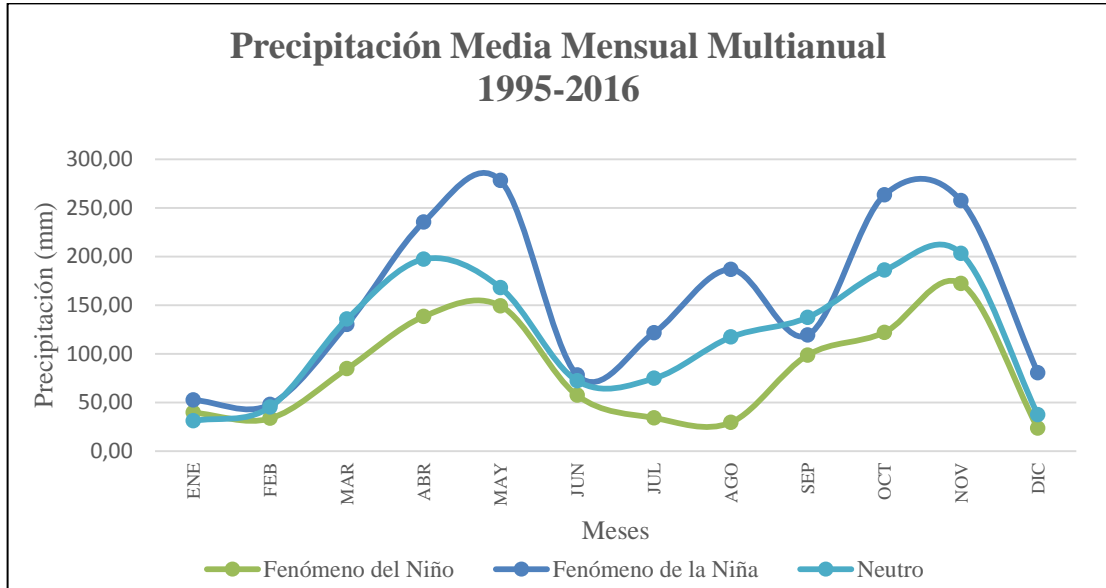
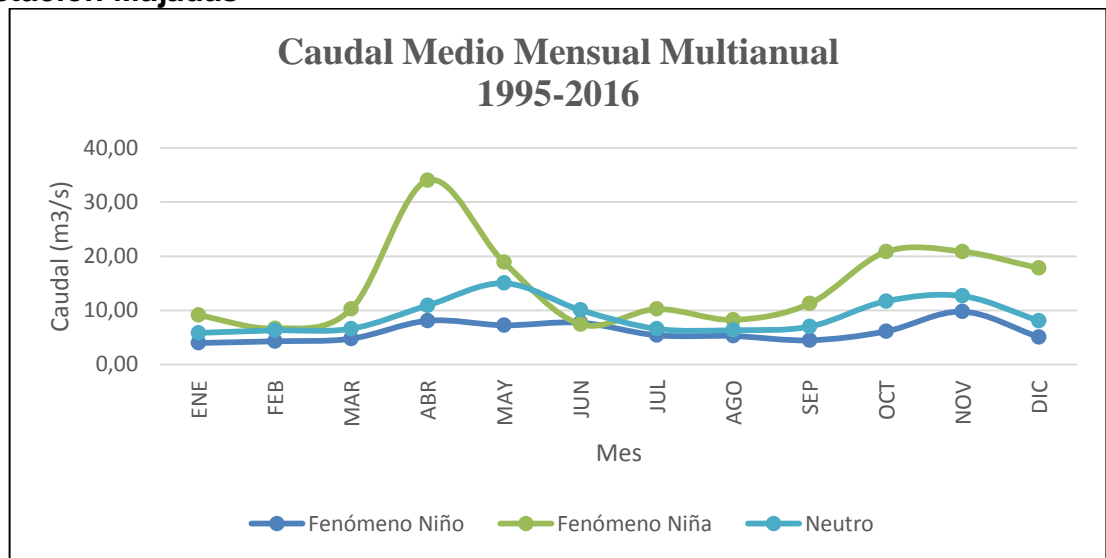


Figura 7 Caudal medio mensual multianual Vs. Fenómenos macroclimáticos Estación Majadas



En el **Anexo I** se observan los modelos gráficos que rigen las series para las demás estaciones analizadas, tanto de las estaciones restantes de la subcuenca del Suratá, como las 5 estaciones correspondientes a la subcuenca del Tona.

2.5. CORRELACIÓN ÍNDICES MACROCLIMÁTICOS ONI-SOI-NAO CON LOS FENÓMENOS DE “EL NIÑO” Y “LA NIÑA” EN COLOMBIA

Debido al comportamiento bimodal de los datos de precipitación y caudal, y el comportamiento de los índices, se buscó un método de correlación no lineal para buscar la incidencia entre estos valores, puesto que al realizar correlaciones paramétricas como la de Pearson (r) y otras no paramétricas como lo es el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), se encontraron valores muy bajos de correlación entre las variables hidrológicas y los índices macroclimáticos, los cuales no arrojaron relaciones significativas. Por tal motivo se usó la razón de correlación, método que vincula variables curvilíneas y es una medida de la relación entre la dispersión entre categorías individuales y la dispersión entre la muestra o la población completa, la razón de correlación (η^2) toma valores entre 0 y 1, tal como otros coeficientes de correlación, siendo los valores más cercanos a 1 indicativos de una buena correlación [18].

$$\eta^2 = \frac{\sum x n_x (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum x, i (y_{xi} - \bar{y})^2}$$

Dónde:

η^2 = Coeficiente de razón de correlación

x = Categoría de la observación

n_x = Número de observaciones en la categoría x

\bar{y}_x = Media de la categoría x

\bar{y} = Media de la población

Teniendo en cuenta la anterior definición del índice de razón de correlación, se calculó para las estaciones pluviométricas y limnimétricas de las subcuencas de Suratá, Tona y Frío el grado de asociación entre los datos de precipitación y caudal, con los índices seleccionados como objeto de análisis en el presente proyecto de investigación.

Para el procedimiento como primera instancia se calculó el promedio del valor medio mensual multianual de la precipitación o caudal, y de cada uno de los índices estudiados para los años en los que ocurrió fenómeno de “El Niño” y “La Niña” en Colombia. Posteriormente, se realizó el promedio general de todos los datos del análisis y con estos valores se aplicó la fórmula del método de la razón de correlación evaluando la diferencia entre la precipitación/caudal e índice con el promedio individual de cada variable y luego con el promedio general de los datos, así se calculó el coeficiente de razón de correlación que se denota con la sigla η^2

en la **Tabla 8** y **Tabla 9**, y que debían ser valores mayores a 0,7 para tener una buena correlación. Por tal razón, en dichas tablas se muestran los índices que mejor se correlacionaron para el Fenómeno de El Niño y La Niña en la estación pluviométrica La Lora referente a la subcuenca Suratá.

Se observó que la subcuenca del Tona en cuanto a precipitación, tuvo más estaciones que se correlacionaban con los índices, pues los coeficientes de razón de correlación encontrados fueron más altos que en la subcuenca del Suratá, la cual sólo contó con tres estaciones (La Lora, Huerta Grande, La Granja) que cumplieran con los rangos establecidos para establecer una relación significativa. En el **Anexo J**, se encuentra el procedimiento realizado para las estaciones pluviométricas y limnimétricas que mejor se asociaron a los eventos de lluvia y sequía con coeficientes de determinación (r^2) mayores o iguales a 0,7.

Tabla 8. Procedimiento de razón de correlación Precipitación Vs. Índice SOI para el fenómeno del Niño Estación La Lora (Subcuenca Suratá)

Fenómeno Niño VS SOI				General	
Precip.	Índice	Por categoría			
16,10	-1,8	1297,80	0,08	127,57	854,66
30,64	-2,4	461,61	0,79	10,53	890,10
35,40	-2,1	279,73	0,30	64,09	869,93
63,83	-1,3	137,08	0,09	1327,79	820,51
47,47	-1,6	21,70	0,00	402,89	840,68
74,43	-1,2	497,66	0,12	2212,65	817,65
44,82	-1,2	53,36	0,14	303,65	816,22
51,50	-1,4	0,39	0,01	581,07	831,43
53,27	-1,5	1,30	0,00	669,37	837,21
87,28	-1,7	1236,11	0,01	3586,67	844,55
83,81	-1,2	1004,21	0,13	3183,19	816,69
36,94	-1,2	230,50	0,14	91,17	816,01
52,13	-1,55				
Prom.Categoría	Suma	5221,45	1,84	Suma	12560,63
	Diferencia	5223,29		Suma total	22616,27
27,39					
Prom. General	Diferencia	17392,98			
	r^2	0,77			
	r	0,88			

Tabla 9. Procedimiento de razón de correlación Precipitación Vs. Índice ONI para el fenómeno de la Niña Estación La Lora (Subcuenca Suratá)

Fenómeno Niña VS ONI				General	
Precip.	Índice	Por categoría			
20,71	-1,10	7757,85	0,04	1423,44	3544,25
39,18	-0,95	4844,27	0,00	370,59	3526,42
140,62	-0,75	1013,62	0,02	6754,77	3502,70
198,05	-0,75	7968,47	0,02	19492,73	3502,70
114,00	-0,70	27,21	0,04	3087,62	3496,79
77,20	-0,50	997,53	0,17	352,18	3473,17
86,30	-0,90	505,51	0,00	776,54	3520,48
87,98	-0,90	432,72	0,00	873,10	3520,48
129,32	-0,98	421,56	0,00	5024,25	3529,39
179,33	-1,15	4976,39	0,06	14615,27	3550,21
152,82	-1,04	1939,38	0,02	8909,18	3537,11
79,90	-1,16	834,34	0,06	460,75	3551,40
108,78	-0,91				
Prom.Categoría	Suma	31718,84	0,44	Suma	62140,43
	Diferencia	31719,28		Suma total	104395,54
58,43					
Prom. General	Diferencia	72676,26			
	r^2	0,70			
	r	0,83			

Para los datos de caudal y para seguir exponiendo los resultados de la misma subcuenca de Suratá, con la estación Majadas se obtuvo para el fenómeno de “El Niño” con el índice SOI un coeficiente de razón de correlación aceptable, ya que es mayor de 0,7 (**Tabla 10**). En el caso de “La Niña” no hubo una incidencia considerable de ninguno de los índices estudiados en el proyecto, ya que el valor de los coeficientes de correlación para los tres índices fue menor al valor mínimo (0,7) para que haya una relación considerable, como se evidencia en la **Tabla 11**.

Tabla 10. Procedimiento de razón de correlación Caudal Vs. Índice SOI para el fenómeno de “El Niño” Estación Majadas (Subcuenca Suratá)

Fenómeno Niño VS SOI				General	
Caudal	Índice	Por categoría			
3,99	-1,20	4,16	0,00	1,83	14,71
4,30	-2,20	2,97	1,08	2,78	23,37
4,78	-1,15	1,56	0,00	4,59	14,32
8,09	-0,10	4,27	1,13	29,78	7,48
7,26	-1,30	1,52	0,02	21,39	15,48
7,73	-0,65	2,91	0,26	25,96	10,79
5,41	-1,17	0,37	0,00	7,72	14,45
5,27	-1,20	0,57	0,00	6,95	14,71
4,48	-1,33	2,38	0,03	3,42	15,68
6,12	-1,52	0,01	0,13	12,17	17,26
9,78	-1,02	14,07	0,02	51,00	13,36
5,08	-1,10	0,88	0,00	6,00	13,95
6,03	-1,16				
Prom.Categoría	Suma	35,66	2,67	Suma	173,60
	Diferencia	38,33		Suma total	349,15
2,63					
Prom. General	Diferencia	310,82			
	r^2	0,89			
	r	0,94			

Tabla 11. Procedimiento de razón de correlación Caudal Vs. Índice ONI para el fenómeno de “La Niña” Estación Majadas (Subcuenca Suratá)

Fenómeno Niña VS ONI				General	
Caudal	Índice	Por categoría			
9,11	2,46	9,53	13,11	41,95	0,03
6,67	2,52	0,42	13,55	16,29	0,01
10,25	2,58	17,81	13,99	57,92	0,00
34,01	2,10	783,03	10,63	984,27	0,29
18,88	0,00	165,13	1,35	263,75	6,94
7,45	1,00	2,02	4,67	23,16	2,67
10,24	3,00	17,74	17,31	57,79	0,13
8,26	1,85	5,01	9,07	31,67	0,62
11,24	1,90	27,16	9,37	73,99	0,54
20,81	1,77	218,57	8,57	330,31	0,75
20,86	1,77	220,11	8,57	332,20	0,75
17,81	3,87	138,83	25,28	230,22	1,52
14,63	2,07				
Prom.Categoría	Suma	1605,34	135,48	Suma	2443,53
	Diferencia	1740,82		Suma total	2457,79
9,05					
Prom. General	Diferencia	716,97			
	r^2	0,29			
	r	0,54			

2.6. FORMULACIÓN DE ECUACIONES PREDICTORAS DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL PARA POSIBLES EVENTOS DEL FENÓMENO DE “EL NIÑO” Y “LA NIÑA”

Considerando el comportamiento de precipitación, caudal y los índices se ajusta a una función polinómica. Se planteó realizar un ajuste polinomial multivariable que incluyera las variables mencionadas anteriormente con el tiempo de ocurrencia, esto con el fin de buscar ecuaciones que predigan eventos futuros del fenómeno de “El Niño” y “La Niña”. Se realizó un polinomio de grado 3 y se observó que los datos no se correlacionaban, por lo tanto se decidió aumentar el grado del polinomio a grado 6, que tuvo un ajuste óptimo.

El procedimiento de regresión polinomial está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un factor cuantitativo X en una variable dependiente Y. Se realizan pruebas para determinar el orden apropiado del polinomio y se puede graficar el modelo ajustado con intervalos de confianza y/o predicción [19].

El método de mínimos cuadrados se puede extender fácilmente al ajuste de datos de precipitación y caudal con un polinomio de grado superior [20]. En nuestro caso ajustamos un polinomio de grado seis con dos variables (índice y tiempo), pues gráficamente y mediante un ajuste polinomial de la curva se observó que un polinomio de dicho grado arrojaba valores de correlación mayores de 0,7.

$$y = a_0 + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{21}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{31}x_1^3 + a_{32}x_2^3 + a_{41}x_1^4 + a_{42}x_2^4 + a_{51}x_1^5 + a_{52}x_2^5 + a_{61}x_1^6 + a_{62}x_2^6$$

Siendo:

x_1 = Tiempo (en meses)

x_2 = Índice

y = Precipitación o Caudal

En este caso, la suma de los cuadrados de los residuos es:

$$sr = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2 - a_{21}x_1^2 - a_{22}x_2^2 - a_{31}x_1^3 - a_{32}x_2^3 - a_{41}x_1^4 - a_{42}x_2^4 - a_{51}x_1^5 - a_{52}x_2^5 - a_{61}x_1^6 - a_{62}x_2^6)^2$$

Dónde:

sr = Suma de residuos

a = Coeficiente

Para determinar los valores de $a_0, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, a_{31}, a_{32}, a_{41}, a_{42}, a_{51}, a_{52}, a_{61}, a_{62}$, se deriva con respecto a cada uno de los coeficientes desconocidos del polinomio.

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_0} = -2\Sigma(y_i - y_i - a_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2 - a_{21}x_1^2 - a_{22}x_2^2 - a_{31}x_1^3 - a_{32}x_2^3 - a_{41}x_1^4 - a_{42}x_2^4 - a_{51}x_1^5 - a_{52}x_2^5 - a_{61}x_1^6 - a_{62}x_2^6)$$

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_{11}} = -2\Sigma(y_i - y_i - a_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2 - a_{21}x_1^2 - a_{22}x_2^2 - a_{31}x_1^3 - a_{32}x_2^3 - a_{41}x_1^4 - a_{42}x_2^4 - a_{51}x_1^5 - a_{52}x_2^5 - a_{61}x_1^6 - a_{62}x_2^6) * x_1$$

Las derivadas anteriores se aplicaron para todos los coeficientes correspondientes al ajuste del polinomio obteniendo así un total de 13 ecuaciones.

Se simplificaron los símbolos de la sumatoria; todas las sumatorias van desde $i = 1$ hasta n . Al igualar estas derivadas a cero, se dará como resultado un Sr mínimo. Las ecuaciones se expresan como:

$$0 = \Sigma y_i - \Sigma a_0 - \Sigma a_{11}x_1 - \Sigma a_{12}x_2 - \Sigma a_{21}x_1^2 - \Sigma a_{22}x_2^2 - \Sigma a_{31}x_1^3 - \Sigma a_{32}x_2^3 - \Sigma a_{41}x_1^4 - \Sigma a_{42}x_2^4 - \Sigma a_{51}x_1^5 - \Sigma a_{52}x_2^5 - \Sigma a_{61}x_1^6 - \Sigma a_{62}x_2^6$$

Ahora, se observa que $\Sigma a_0 = n a_0$, se expresan las ecuaciones como un conjunto de 13 ecuaciones, con 13 incógnitas ($a_0, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, a_{31}, a_{32}, a_{41}, a_{42}, a_{51}, a_{52}, a_{61}, a_{62}$).

$$\Sigma y_i = n a_0 - \Sigma a_{11}x_1 - \Sigma a_{12}x_2 - \Sigma a_{21}x_1^2 - \Sigma a_{22}x_2^2 - \Sigma a_{31}x_1^3 - \Sigma a_{32}x_2^3 - \Sigma a_{41}x_1^4 - \Sigma a_{42}x_2^4 - \Sigma a_{51}x_1^5 - \Sigma a_{52}x_2^5 - \Sigma a_{61}x_1^6 - \Sigma a_{62}x_2^6$$

$$\Sigma y_i x_1 = \Sigma x_1 - \Sigma a_{11}x_1^2 - \Sigma a_{12}x_2 - \Sigma a_{21}x_1^3 - \Sigma a_{22}x_2^2 - \Sigma a_{31}x_1^4 - \Sigma a_{32}x_2^3 - \Sigma a_{41}x_1^5 - \Sigma a_{42}x_2^4 - \Sigma a_{51}x_1^6 - \Sigma a_{52}x_2^5 - \Sigma a_{61}x_1^7 - \Sigma a_{62}x_2^6$$

Los coeficientes de las incógnitas se evalúan de manera directa, a partir de los datos observados. En este caso, se observó que el problema de determinar un polinomio de 6 grado por mínimos cuadrados es equivalente a resolver un sistema de trece ecuaciones lineales simultáneas, las cuales se resolvieron mediante el método de eliminación de Gauss.

Para hallar un valor proyectado de precipitación o caudal con la ecuación mostrada anteriormente y dependiendo de la subcuenca a la que pertenezca y su estación correspondiente. Para la variable x_1 que hace referencia al tiempo se denotarán los meses enumerados de 1 a 12, siendo enero el primer mes hasta llegar al mes 12 que hace referencia a diciembre. En el caso de x_2 que indica el índice se deberá promediar los valores de índice del mes en el que se quiere conocer la precipitación o el caudal desde 1995 hasta el año actual, período en el que se realizó el presente estudio. Con esta predicción se observó que el índice SOI se ajusta mejor al fenómeno de El niño, y por esto recomienda usarlo para predecir este fenómeno. De otra parte, el índice ONI se ajustó mejor al fenómeno de la Niña. A continuación, se muestran las ecuaciones obtenidas para las estaciones de la subcuenca de Suratá, que presentaron coeficientes de determinación iguales o mayores a 0,7, lo que indicó que cumplían con un valor de correlación válido.

Estación Huerta Grande - Fenómeno Niña vs ONI

$$p = -710,86 - 16,49 t - 1958,18 i + 39,10 i^2 + 38,14 i^3 + 0,05 t^4 - 2521,52 i^4 + 0,03 i^5 + 1313,19 i^6$$

Estación La Granja - Fenómeno Niña vs ONI

$$p = -752,64 - 5,97 t - 1865,45 i + 34,01 i^2 + 33,18 i^3 + 0,02 t^4 - 2189,43 i^4 + 0,01 i^5 + 1111,65 i^6$$

Estación La Lora - Fenómeno Niño vs SOI

$$p = 130,94 + 1,41 t + 82,36 i - 2,89 i^2 - 2,14 i^3 + 5,66 i^4 - 0,55 i^6$$

Estación La Lora - Fenómeno Niña vs ONI

$$p = -597,84 - 41,57 t - 1921,72 i - 159,59 i^2 - 144,16 i^3 + 0,10 t^4 - 2310,80 i^4 + 0,01 i^5 + 1091,04 i^6$$

Estación Majadas Fenómeno Niño VS SOI

$$q = 8,04 + 0,09 t + 2,41 i + 0,21 i^2 + 0,17 i^3 - 0,52 i^4 + 0,12 i^6$$

Dónde:

p = Precipitación

q =Caudal
 t = Tiempo (# mes)
 i = Índice

Para comprobar que el resultado de la ecuación aplicando el método de proyección descrito anteriormente es una buena aproximación se realizó una comparación entre los valores reales tomados por la estación limnimétrica Majadas para el fenómeno de “El Niño” y la estación pluviométrica La Lora para el fenómeno de “La Niña”. En la **Figura 8** y **Figura 9** se señala esta comparación, que muestra los valores reales y los aproximados calculados con la respectiva ecuación para cada estación.

Figura 8. Caudal real Vs. Caudal aproximado Estación Majadas para el fenómeno de “El Niño”

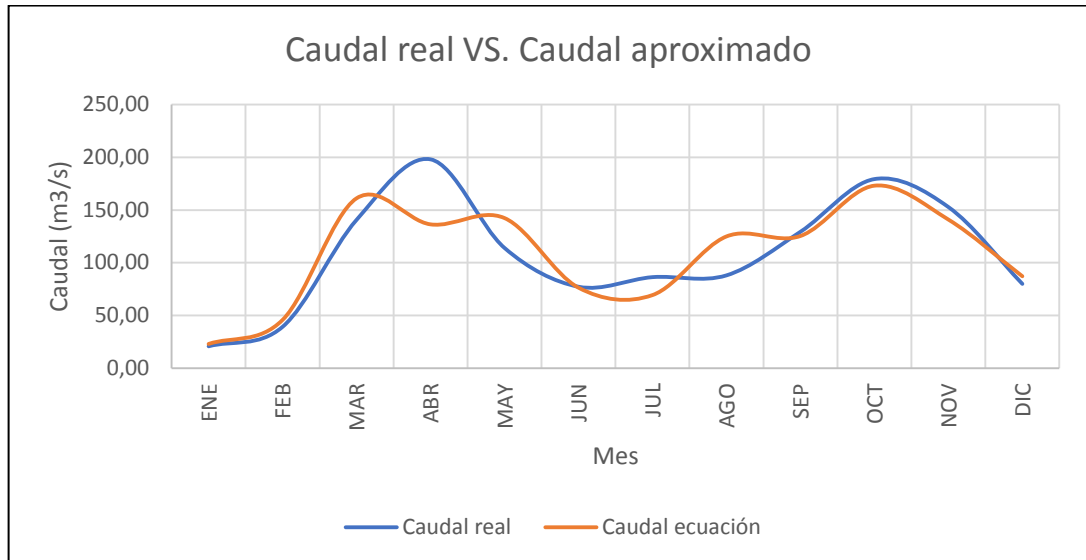
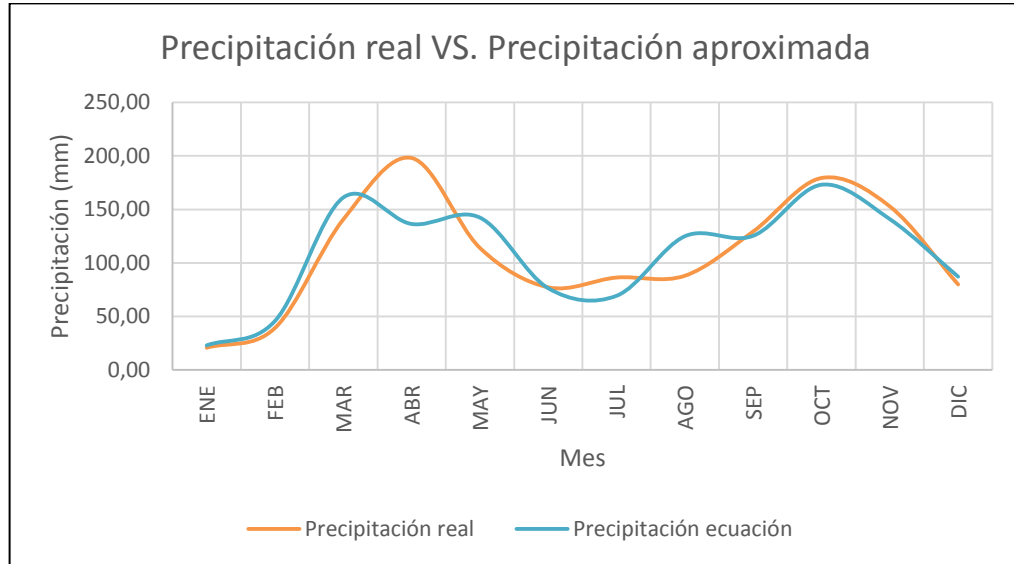


Figura 9. Precipitación real Vs. Precipitación aproximada Estación La Lora para el fenómeno de “La Niña”



En el **Anexo K**, se muestran las ecuaciones de predicción de valores de precipitación para posibles efectos de “La Niña” y “El Niño”, obtenidas para las subcuencas de Tona y Frío. En este último caso, sólo se evidencian ecuaciones para caudal, ya que no se hizo un análisis con las estaciones pluviométricas debido al número de datos faltantes con los que se contaba, y la dificultad para aplicar métodos de estimación. En la **Tabla 12** se ve en resumen las estaciones de estudio que cuentan con ecuaciones predictoras de precipitación y caudal.

Tabla 12. Estaciones con ecuaciones predictoras

ESTACIÓN	TIPO DE ESTACIÓN	ECUACIÓN	
		Fenómeno Niño	Fenómeno Niña
HUERTA GRANDE	Pluviométrica	NO	SI
LA GRANJA	Pluviométrica	NO	SI
LA LORA	Pluviométrica	SI	SI
LA GALVICIA	Pluviométrica	SI	SI
EL PICACHO	Pluviométrica	NO	SI
EL BRASIL	Pluviométrica	SI	SI
MARTIN GIL	Pluviométrica	NO	SI
EL PAJAL	Pluviométrica	SI	NO
MAJADAS	Limnimétrica	SI	NO
TONA	Limnimétrica	SI	NO
LA FLORIDA	Limnimétrica	NO	SI

3. CONCLUSIONES

Realizado el análisis de calidad de los datos de precipitación y caudal, comprobando que la información es consistente para la subcuenca del Suratá, en el caso del Tona como se obtuvieron valores de correlación bajos, no son muy verídicos los datos. Además, cabe resaltar que debido al gran porcentaje de datos faltantes en las series se dificultó el proceso de estimación de datos, pues se tenían pocas estaciones con los datos completos. La estación La Mariana de río Frío no se analizó porque únicamente se contaba con información de esta estación y no fue posible realizar el análisis de consistencia mediante el método de curva de doble masa.

Se verificó que al realizar correlaciones lineales como la de Pearson y Spearman se encontraron valores muy bajos de correlación entre las variables hidrológicas y climatológicas y los índices macroclimáticos, los cuales no arrojaron relaciones significativas. Por lo tanto, se llegó a la conclusión que debido al comportamiento bimodal de los datos de precipitación y caudal, y la tendencia de los índices, se necesitaba utilizar un método de correlación no lineal para encontrar la incidencia entre estos valores. Mediante el método de razón de correlación se comprobó que el fenómeno del “El Niño” se relaciona más con el índice SOI y “La Niña” con el índice ONI, para el tiempo neutro no hubo una incidencia de los índices objeto de estudio en la investigación.

Se obtuvieron un total de 14 ecuaciones para las subcuencas analizadas, de las cuales 3 pertenecen a proyección de caudales y el resto a precipitación, las cuales serán de gran utilidad para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P), en el proceso operativo y de regulación del embalse de Bucaramanga para futuros eventos extremos asociados a los fenómenos de “El Niño” y de “La Niña”. Cabe aclarar que la predicción de las variables de precipitación y caudal en la subcuenca del Tona puede no tener un alto grado de exactitud, debido a que las correlaciones de Pearson no arrojaron coeficientes significativos.

Finalmente se concluye que la influencia de los fenómenos macroclimáticos en los eventos de estiaje y el aumento de lluvias para las subcuencas de Suratá, Tona y Frío afectan de manera directa la hidrología y el clima en esta zona, ya que al relacionar los índices oceánico y atmosférico ONI⁴ y SOI⁵ respectivamente, se comprobó una relación directa entre dichos eventos. Específicamente el fenómeno

⁴ Índice Oceánico del Niño

⁵ Índice de Oscilación del Sur

de “El Niño” tuvo un mejor ajuste respecto al índice SOI, con coeficientes de determinación iguales o mayores a 0,7, mientras que el índice ONI describió mejor el comportamiento de eventos de lluvia en la zona de estudio que describen el fenómeno de “La Niña”. Por otra parte, el índice QBO⁶ se descartó debido a que en tesis realizadas anteriormente se evidenciaron correlaciones muy bajas entre los valores de las anomalías de dicho índice y los registros de lluvia en Colombia, lo que significa que la señal de oscilación de los vientos estratosféricos no parece incidir sobre los eventos de precipitación en el país. Además, se descartó el índice SST3-4⁷, pues no se encontraron rangos que relacionarán los valores de la temperatura con eventos de lluvia o estiaje en el área de estudio.

⁶ Índice de Oscilación Cuasibienal

⁷ Temperatura Oceánica Superficial en la zona 3-4

4. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un control más detallado en el registro de datos de las estaciones, ya que no se pudo analizar el comportamiento de la subcuenca del río Frío debido al alto porcentaje de datos faltantes y se observó que una de las causas de tener las series con datos incompletos, se debe en cierta medida a ausencia del operador y errores instrumentales. Además, se sugiere instalar más estaciones de control en la subcuenca del río Frío, y así facilitar el proceso de análisis de consistencia en este sector, permitiendo de esta manera la utilización de distintos métodos de estimación de datos que puedan compararse entre sí, para encontrar una predicción del dato inexistente más aproximada.

Por otro lado, se aconseja para mejorar la predicción de los datos de precipitación y caudal que quieran ser proyectados, aumentar el grado del polinomio de las ecuaciones resultantes por cada subcuenca, para lograr un mejor pronóstico del valor hidrológico o climatológico a obtener. Además, es necesario realizar ecuaciones de predicción teniendo en cuenta otros parámetros climáticos como temperatura, humedad, vientos, radiación solar, entre otros, con la finalidad de encontrar un grado menor o mayor de incidencia de los fenómenos macroclimáticos con estas variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. Montealegre, “Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia”: Boletín; IDEAM, Bogotá, 2007.
- [2] E. Páez, C. Suárez, R. Villalba, M. Duarte, S. Rueda, N. Suárez, A. Barón, S. Oliveros, “Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca Río Surata, Bucaramanga, 2002
- [3] amb. “Estudios y Diseños Fase 2 para el Proyecto de Regulación Embalse de Bucaramanga”: Memorando Técnico No.3, Bucaramanga, Mayo de 2008.
- [4] amb. “Aspectos hidrográficos e hidrológicos de las fuentes”, Bucaramanga, 2008.
- [5] “Análisis pluviométrico” [Tesis de investigación], Universidad de Piura, Miraflores.
- [6] L. Castro y Y. Carvajal, “Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas”; Revista EIDENAR- Ejemplar 9; Universidad del Valle, Cali, Mayo de 2010.
- [7] C. Perea y J. Lamus, “Estudio de la Precipitación en el área metropolitana de Bucaramanga” [Tesis de investigación de pregrado]; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.
- [8] D. Frías, “Inferencia estadística III”; Universidad de Valencia, Valencia, 2007.
- [9] “Guía del trabajo práctico N° 2: Procesamiento de los datos de precipitación”; Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.
- [10] M. Preciado, R. Mejía, M. Arganis, A. Ocón, “Análisis y aplicación de métodos temporales para completar registros faltantes de lluvia en la cuenca del Río Bolaños”, V Congreso Internacional de Meteorología de la OMMAC, México, 2011.
- [11] C. Euscátegui y G. Hurtado, “Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país”; IDEAM, Bogotá, 2010.
- [12] C. Euscátegui y O. Franco, “Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática “El Niño” y “La Niña”: Boletín No.94; IDEAM, Bogotá, Mayo de 2016.

[13] IDEAM, “Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el período 2012-2013 en Colombia”, Bogotá, Julio de 2012.

[14] J. Montealegre, “Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia”: Boletín; IDEAM, Bogotá, 2007.

[15] M. Zuluaga, J. Posada, G. Poveda, “Relación entre las fases de la oscilación cuasibienal (QBO), la precipitación mensual y la radiación de onda larga emergente en Colombia” [Tesis de posgrado]; Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

[16] V. Ramírez y A. Jaramillo, “Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia”, Caldas, 2009.

[17] UNAL, “Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño”, Urabá, 2011.

[18] UGR, “Cálculo de probabilidades II: Regresión y correlación”; Universidad de Granada, España, 2015.

[19] Statpoint Inc, “Regresión polinomial”, Abril de 2007

[20] S. Chapra y R. Canale, “Métodos Numéricos para Ingenieros”, 5ta Edición, 2007.

BIBLIOGRAFÍA

- AMB. “Aspectos hidrográficos e hidrológicos de las fuentes”, Bucaramanga, 2008.
- AMB. “Estudios y Diseños Fase 2 para el Proyecto de Regulación Embalse de Bucaramanga”: Memorando Técnico No.3, Bucaramanga, Mayo de 2008.
- CASTRO L. y CARVAJAL Y., “Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas”; Revista EIDENAR- Ejemplar 9; Universidad del Valle, Cali, Mayo de 2010.
- CHAPRA S. y CANALE R., “Métodos Numéricos para Ingenieros”, 5ta Edición, 2007.
- EUSCÁTEGUI C. y FRANCO O., “Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática “El Niño” y “La Niña”: Boletín No.94; IDEAM, Bogotá, Mayo de 2016.
- EUSCÁTEGUI C. y HURTADO G., “Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país”; IDEAM, Bogotá, 2010.
- FRÍAS D., “Inferencia estadística III”; Universidad de Valencia, Valencia, 2007.
- IDEAM, “Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el período 2012-2013 en Colombia”, Bogotá, Julio de 2012.
- MONTEALEGRE J., “Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia”: Boletín; IDEAM, Bogotá, 2007.
- MONTEALEGRE J., “Modelo Institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia”: Boletín; IDEAM, Bogotá, 2007.

PÁEZ E., SUÁREZ C., VILLALBA R., DUARTE M., RUEDA S., SUÁREZ N., BARÓN A., OLIVEROS S., “Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca Río Suratá, Bucaramanga, 2002

PEREA C. y LAMUS J., “Estudio de la Precipitación en el área metropolitana de Bucaramanga” [Tesis de investigación de pregrado]; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.

PRECIADO M., MEJÍA R., ARGANIS M., OCÓN A., “Análisis y aplicación de métodos temporales para completar registros faltantes de lluvia en la cuenca del Río Bolaños”, V Congreso Internacional de Meteorología de la OMMAC, México, 2011.

RAMÍREZ V. y JARAMILLO A., “Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia”, Caldas, 2009.

STATPOINT INC, “Regresión polinomial”, Abril de 2007

UGR, “Cálculo de probabilidades II: Regresión y correlación”; Universidad de Granada, España, 2015.

UNAL, “Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño”, Urabá, 2011.

UNIVERSIDAD DE PIURA, “Análisis pluviométrico” [Tesis de investigación], Miraflores.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE “Guía del trabajo práctico N° 2: Procesamiento de los datos de precipitación”; Argentina.

ZULUAGA M., POSADA J., POVEDA G., “Relación entre las fases de la oscilación cuasibienal (QBO), la precipitación mensual y la radiación de onda larga emergente en Colombia” [Tesis de posgrado]; Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

ANEXOS

Ver documentos adjuntos