

**ANÁLISIS CLIMÁTICO DE SECTORES EN LOS DEPARTAMENTOS DE
BOYACÁ Y CASANARE Y SU ALTERACIÓN POR FENÓMENOS
MACROCLIMÁTICOS Y DE CAMBIO GLOBAL**



**Universidad
de los Andes**

Tesis 2

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Autor

MELQUISEDEC CORTÉS ZAMBRANO

Asesor

MARIO A DÍAZ GRANADOS O.

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa agradecimiento a:

Ingeniero Mario Díaz-Granados, asesor de la investigación.

Ingeniero Gustavo Herrán Sandoval, Director Hidrología Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Programa Universidad - Empresa Universidad de los Andes

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios a mis padres a mi esposa y en especial a mi adorable hija.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVO GENERAL:	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	13
3.	MARCO TEÓRICO.....	14
3.1	FENOMENOS MACROCLIMÁTICOS:	16
3.1.1	FENOMENO MACROCLIMÁTICO EL NIÑO:.....	16
3.1.2	FENOMENO MACROCLIMÁTICO OSCILACIÓN DEL SUR:	20
3.1.3	FENOMENO MACROCLIMÁTICO ENSO:.....	21
3.3	EL ALTO PATIA.....	22
3.2	EL ALTIPLANO CUNDI BOYACENSE	22
3.4	EL DEPARTAMENTO CASANARE	22
3.5	EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ.....	23
3.6	INFORMACIÓN UTILIZADA	23
3.7	ANÁLISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO	25
3.7.1	Análisis de Homogeneidad.....	25
3.7.1.1	Gráfica de Series de Tiempo.....	25
3.7.1.2	Gráfica de Masa Simple.....	26
3.7.1.3	Gráfica de Masa Residual.....	26
3.7.1.4	Diagrama de Puntos.....	27
3.7.1.5	Histograma	27
3.7.1.6	Gráfica S-S	28
3.7.1.7	Gráfica Q-Q	29
3.7.2	Datos Faltantes.....	29

3.7.3	Análisis Estadísticos a las Series de Tiempo:	30
3.7.4	Análisis de Correlación:	35
3.7.4.1	Coeficiente de Autocorrelación:	35
3.7.4.2	Coeficiente de Correlación Cruzada:.....	36
3.7.5	Análisis de Fourier:	36
4.	METODOLOGÍA	39
4.1	ALTIPLANO CUNDI BOYACENSE	39
4.2	ALTO PATÍA.....	40
4.3	BOYACÁ Y CASANARE.....	41
4.3.1	Determinación de las estaciones a utilizar	41
5.5.1	Información solicitada al Ideam.....	45
4.3.3	Análisis de Datos Faltantes.....	48
4.3.3.1	Precipitación:	49
4.3.3.2	Caudal:	53
4.3.4	Análisis de las series de tiempo.....	57
4.3.4.1	Análisis de Homogeneidad.....	57
4.3.4.2	Análisis de Tendencia.	58
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	60
5.1	Climatología	60
5.2	Comportamiento de la precipitación en la zona de estudio.	64
5.3	Comportamiento del caudal en la zona de estudio.	65
5.4	Análisis de Homogeneidad	67
5.5	Análisis de tendencias	75
5.5.1	Tendencia Lineal.....	75
5.5.2	Test Mann Kendall	77
5.5.2.1	Precipitación:	78
5.5.2.2	Caudal:	79
5.5.2.3	Precipitación-Caudal:	80

5.5.2.4	MEI – Precipitación:	80
5.5.2.5	MEI – Caudal.....	81
5.5.3	Registros Makesens 1.0.....	82
5.5.3.1	Precipitación:	83
5.5.3.2	Caudal:	85
5.5.4	Comparación de resultados del test de Mann-kendall y Makesens 1.0.....	88
5.5.4.1	Precipitación:	88
5.5.4.2	Caudal:	89
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comportamiento histórico del Índice de la NAO.....	15
Figura 2	Comportamiento histórico del Índice de la OQB	15
Figura 3	Comportamiento del fenómeno El Niño.	17
Figura 4	Índice Niño 1-2 1950-2006.....	18
Figura 5	Índice Niño 3 1950-2006	18
Figura 6	Índice Niño 3-4 1950-2006.....	19
Figura 7	Índice Niño 4 1950-2006	19
Figura 8	Índice IOS 1950-2006	20
Figura 9	MEI 1950-2006	21
Figura 10	Hidrografía zona de estudio	24
Figura 11	Mapa estaciones analizadas región del Altiplano Cundiboyacense.....	39
Figura 12	Mapa estaciones analizadas región del Alto Patía.	40
Figura 13	Boyacá y Casanare.....	41
Figura 14	Presentación Programa Concoord.	42
Figura 15	Ubicación de las estaciones	45
Figura 16	Comparación de los datos de precipitación reales con los datos completados 52	
Figura 17	Ubicación de las estaciones de precipitación completas.....	53
Figura 18	Comparación de los datos de caudal reales con los datos completados	56
Figura 19	Ubicación de las estaciones de precipitación completas.....	57
Figura 20	Variación de la precipitación con la altitud	61
Figura 21	Variación del caudal con la altitud.....	62
Figura 22	Variación del caudal con la precipitación	63
Figura 23	Ciclo anual de precipitación.	65

Figura 24	Ciclo anual de caudal.	66
Figura 25	Serie de Precipitaciones Totales Anuales estación Apto Yopal 3521501....	68
Figura 26	Serie de Caudal Medio Anual estación Puente Yopal 3521701.....	68
Figura 27	Gráfico de Masa Simple estación Apto Yopal 3521501.	69
Figura 28	Gráfico de Masa Simple estación Puente Yopal 3521701	69
Figura 29	Gráfico de Masa Residual de la estación Apto Yopal 3521501	70
Figura 30	Gráfico de Masa Residual estación Puente Yopal 3521701.	70
Figura 31	Serie de Precipitaciones Totales Anuales estación Tauramena 3519502....	71
Figura 32	Figura 9. Gráfico de Masa Simple estación Tauramena 3519502.	71
Figura 33	Serie de Caudal Medio Anual estación Vado Hondo 3519702.	72
Figura 34	Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.....	72
Figura 35	Gráfico de Masa Residual estación Tauramena 3519502.	73
Figura 36	Gráfico de Masa Residual estación Vado Hondo 3519702.....	73
Figura 37	Histograma estación Tauramena 3519502.....	74
Figura 38	Histograma estación Puente Yopal 3521701.....	74
Figura 39	Tendencia lineal estación Vado Hondo 3519702.	75
Figura 40	Tendencia lineal estación Puente Yopal 3521701.....	76
Figura 41	Gráfico de Makesens estación Vado Hondo 3519702.	85
Figura 42	Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.....	87
Figura 43	Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Coordenadas Estaciones Limnimétricas y Limnigráficas	43
Tabla 2	Coordenadas Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas	44
Tabla 3	Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas solicitadas.....	46
Tabla 4	Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas solicitadas.....	47
Tabla 5	Estaciones de precipitación de igual ubicación	49
Tabla 6	Estaciones con nuevo periodo de precipitación	49
Tabla 7	Estaciones correspondientes al grupo A	50
Tabla 8	Estaciones correspondientes al grupo B.....	50
Tabla 9	Estaciones correspondientes al grupo C	51
Tabla 10	Estaciones correspondientes al grupo A de caudal	54
Tabla 11	Estaciones correspondientes al grupo B de caudal	54
Tabla 12	Estaciones correspondientes al grupo C de caudal	55
Tabla 13	VARIACIÓN PRECIPITACIÓN Vs. ALTITUD	61
Tabla 14	VARIACIÓN CAUDAL Vs. ALTITUD.....	62
Tabla 15	VARIACIÓN CAUDAL Vs PRECIPITACIÓN.....	63
Tabla 16	Interpretación Mann-Kendall.	77
Tabla 17	RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN MANN KENDALL.	78
Tabla 18	RESULTADOS DE CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.	79
Tabla 19	RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN - CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.	80
Tabla 20	RESULTADOS DE MEI PRECIPITACIÓN SEGÚN MANN KENDALL.	81
Tabla 21	RESULTADOS DE MEI CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.	82
Tabla 22	VARIACIÓN CAUDAL Vs PRECIPITACIÓN.....	83
Tabla 23	RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN MAKESENS.....	84

Tabla 24	RESULTADOS DE CAUDAL SEGÚN MAKESENS.	86
Tabla 25	MAKENDALL VS MAKESENS PRECIPITACIÓN.	88
Tabla 26	MAKENDALL VS MAKESENS CAUDAL.	89

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el principal recurso natural para el ser humano, quien la utiliza de forma imprescindible tanto para su consumo directo, como para diversas actividades agrícolas e industriales.

Colombia es uno de los países con mayores recursos hídricos en el mundo y frente a la necesidad de identificar los factores que están influyendo en la disminución de disponibilidad hídrica, precipitación y en el aumento de la temperatura en diferentes zonas del país debido a fenómenos macroclimáticos como El Niño (Montealegre, 1996), se han desarrollado diferentes estudios que pueden establecer y determinar la forma en que este fenómeno afecta el comportamiento de la hidrología y del clima en algunas regiones del país. (Villate, 2004 y Castañeda, 2005).

De acuerdo con el informe histórico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) de la ONU, se declaró que la variedad de actividades humanas ha generado un aumento en los gases de efecto invernadero impulsando la mayor parte del calentamiento, ha hecho que la demanda de agua se haya duplicado durante los últimos 50 años según lo confirma la Organización de las Naciones Unidas-ONU en el estudio "Amplia valoración de los recursos de agua potable en el mundo", debido principalmente al incremento de la población, al incremento de las actividades industriales y al uso irracional de este recurso, condiciones que alertan sobre crisis cercanas respecto a la cantidad disponible a mediano plazo de este bien.

El rápido calentamiento del planeta es un hecho irrefutable (Appenzeller & Dimick, 2004), los verdaderos interrogantes son en qué medida esto es responsabilidad nuestra y si estamos dispuestos a frenar ese proceso moderando el apetito de los humanos por los combustibles fósiles.

Como resultado de investigaciones anteriores (Villate, 2004), relacionadas con el tema desarrollado, se ha encontrado por ejemplo que el comportamiento del clima en el altiplano cundiboyacense no es uniforme y presenta cambios importantes de temperatura y precipitación que afectan entre otros, la economía y el desarrollo de esa zona del país; generando impactos en la sociedad y llegando al punto de cambiar actividades tales como la producción agrícola.

Los índices macroclimáticos con mayor influencia sobre la precipitación y la temperatura según investigaciones anteriores (Villate, 2004), son los relacionados con el NIÑO y el Índice de Oscilación del Sur (IOS). Ni la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) ni la Oscilación Quasi Bienal (QBO) presentan coeficientes altos de correlación. Se ha encontrado que sí presentan una correlación con la temperatura aunque ésta es baja.

En este estudio se buscó encontrar qué tan correlacionados están los índices de estos fenómenos con el caudal de los ríos y la precipitación de la zona de estudio y si de alguna manera se están afectando realizando análisis de tendencia en las series históricas usadas.

Debido a la insuficiente información y al número de datos faltantes en las series, la información no fue completa, por lo cual un aspecto que se tuvo en cuenta en la investigación fue revisar y analizar la calidad de los datos suministrados por el IDEAM y generados en las estaciones con que cuenta la zona de estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

Analizar variables de precipitación y caudal en los departamentos de Boyacá y Casanare, determinando la afectación que sufren debido a fenómenos macroclimáticos y de cambio global, y evaluando la posibilidad de generar tendencias temporales y espaciales de la zona en estudio a partir de la información suministrada por el IDEAM.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analizar los resultados encontrados en esta investigación a partir de las series históricas mensuales actuales existentes e identificar los cambios en la hidrología de la zona.
- Realizar análisis estadísticos y espaciales para cuantificar el efecto de los cambios climáticos en los departamentos de estudio.
- Interpretar el comportamiento de los fenómenos macroclimáticos en los últimos años y la incidencia que este tiene en el clima de los departamentos en estudio.
- Comparar el comportamiento del clima bajo condiciones normales y con periodos de fenómenos macroclimáticos.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos para determinar la incidencia los fenómenos climatológicos recientes en la disminución de los recursos hídricos.

3. MARCO TEÓRICO

Los cambios globales se generan a partir de procesos naturales y por actividades del hombre que afectan el medio ambiente en forma directa o a través de la acumulación de alteraciones locales o regionales (Villate, 2004). Este cambio consiste en un aumento de la temperatura de la superficie terrestre. Las escalas espaciotemporales de los procesos que conllevan al cambio global son variadas: algunos, como la deforestación, son a escala regional y pueden ser medidos en días; otros, como el calentamiento global y el cambio climático, cubren todo el planeta y se manifiestan en etapas que van desde el decenio hasta milenios.

Los procesos de reducción de disponibilidad de las aguas superficiales en los últimos años en el país, ha incrementado la explotación de las aguas subterráneas para diferentes usos (Cortés, 2005). Este aprovechamiento que la mayor parte de las veces se hace sin ninguna evaluación y control, ha generado en algunas áreas una serie de impactos ambientales negativos sobre el recurso (Cortés, 2005).

Algunos de los fenómenos macroclimáticos existentes son: El Niño, la Oscilación del Atlántico Norte (ver figura 1), la Oscilación Cuasi Bienal (ver figura 2) y la Oscilación del Sur. Para la investigación, el más representativo es el Fenómeno del Niño también llamado fenómeno del Pacífico, el cual está representado principalmente por un aumento en la temperatura de las aguas superficiales del océano Pacífico presentando una duración promedio de un año (Villate, 2004). Este fenómeno produce un aumento considerable en la temperatura del aire, aumento de la precipitación en algunas regiones y disminución en otras, generando bajas en la oferta de disponibilidad hídrica en sectores amplios de Colombia.

Figura 1 Comportamiento histórico del Índice de la NAO

Tomado de: Tomado de: <http://www.noaa.gov>

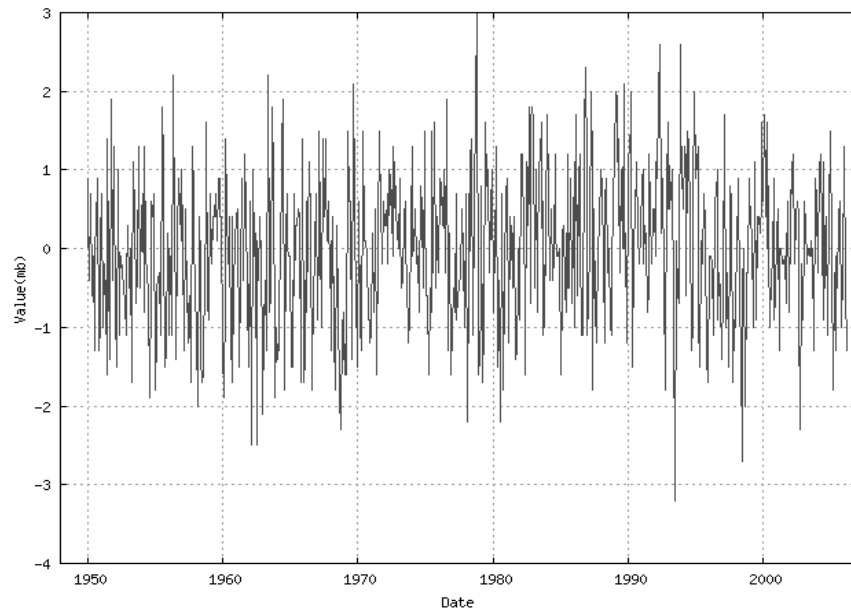
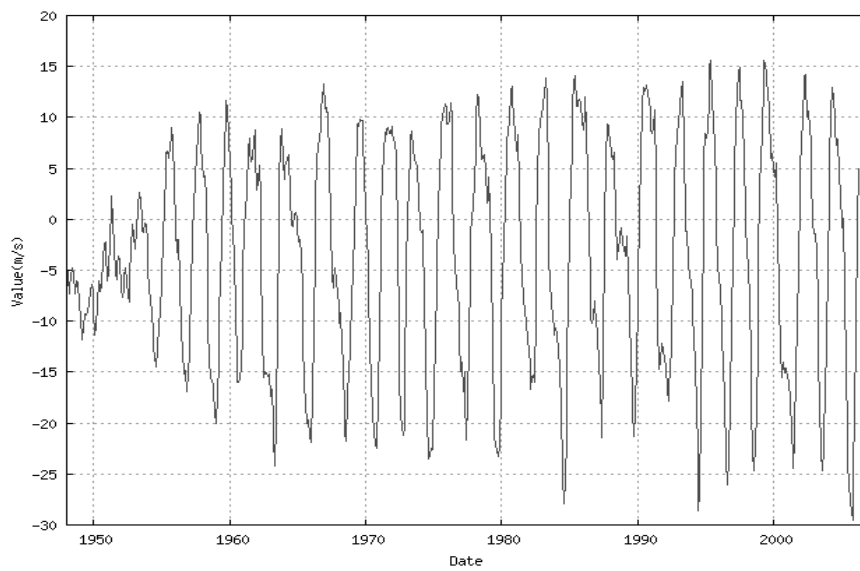


Figura 2 Comportamiento histórico del Índice de la OQB

Tomado de: Tomado de: <http://www.noaa.gov>



3.1 FENOMENOS MACROCLIMÁTICOS:

De acuerdo con estudios anteriormente realizados en Colombia, los índices de los fenómenos macroclimáticos que más influyen en la precipitación y otras variables hidroclimatológicas son los relacionados con el Fenómeno del Niño (Montealegre, 1996), OS y ENSO. La NAO y la OQB presentan correlaciones bajas. Debido a lo anterior los fenómenos que fueron analizados en esta investigación fueron El NIÑO, La Oscilación del sur (OS), y la relación ENSO.

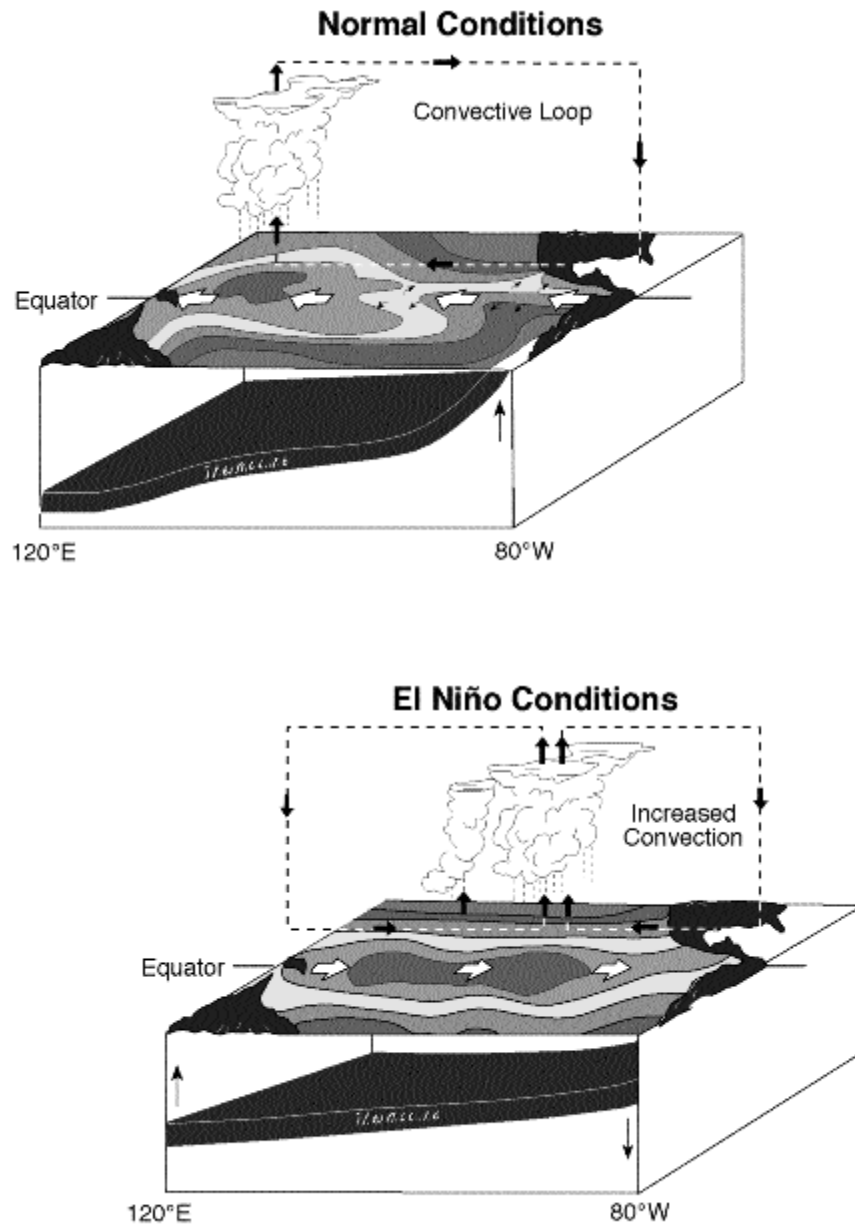
3.1.1 FENOMENO MACROCLIMÁTICO EL NIÑO:

El fenómeno macroclimático Niño es un fenómeno oceánico y atmosférico localizado en el océano Pacífico durante el cual aparecen, de forma inusual, condiciones cálidas a lo largo de la costa occidental de Ecuador, Perú, y Colombia, lo que provoca alteraciones climáticas de distinta magnitud. Se produce cuando los vientos constantes procedentes del Oeste se debilitan e incluso cambian de dirección.

Este cambio permite desplazarse hacia el Este, a lo largo de la línea del ecuador, a una gran masa cálida de agua (ver figura 3), generalmente localizada cerca de Australia, hasta que alcanza la costa de Sudamérica. El desplazamiento de tan enormes masas de aguas cálidas afecta a la evaporación, causando la formación de nubes que precipitan, y, consecuentemente, altera los patrones atmosféricos habituales.

Figura 3 Comportamiento del fenómeno El Niño.

Tomado de: <http://www.noaa.gov>



NOAA/PMEL/TAO

Para determinar el índice macroclimático de El Niño, se ha dividido el océano Pacífico ecuatorial en cuatro zonas, sobre las cuales es medida la temperatura superficial del agua, encontrando así cuatro índices diferentes que son Niño 1-2, Niño 3, Niño 3-4 y Niño 4 (ver figuras 4 a 7).

Figura 4 Índice Niño 1-2 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>

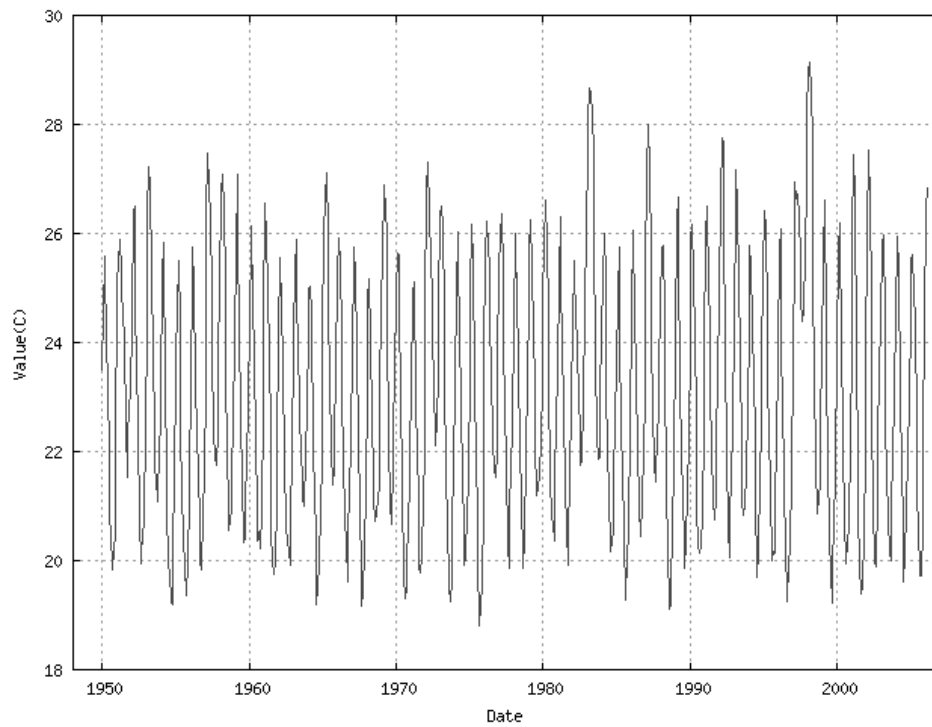


Figura 5 Índice Niño 3 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>

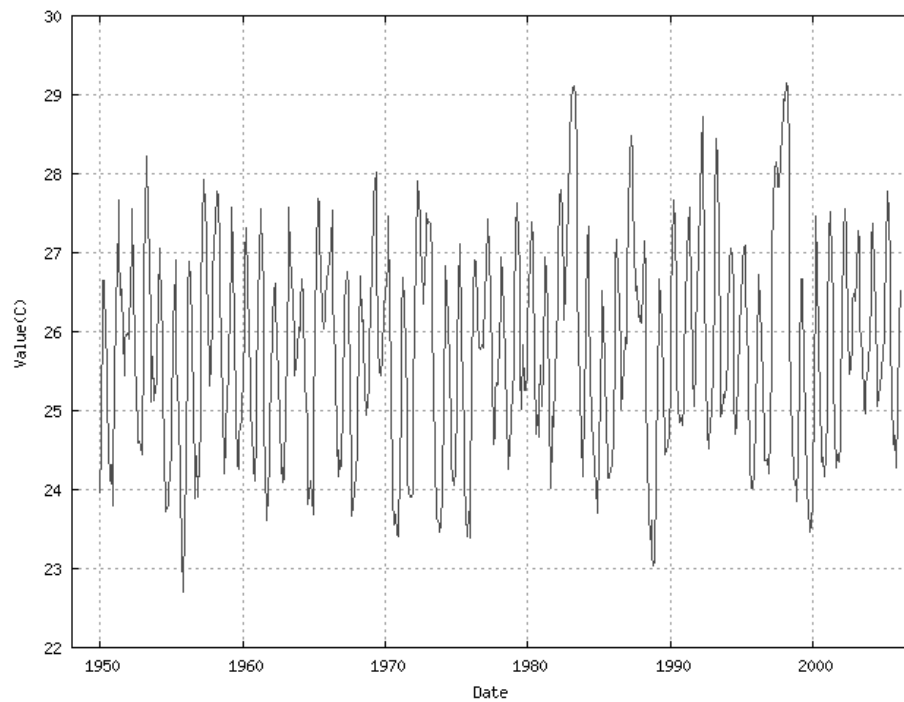


Figura 6 Índice Niño 3-4 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>

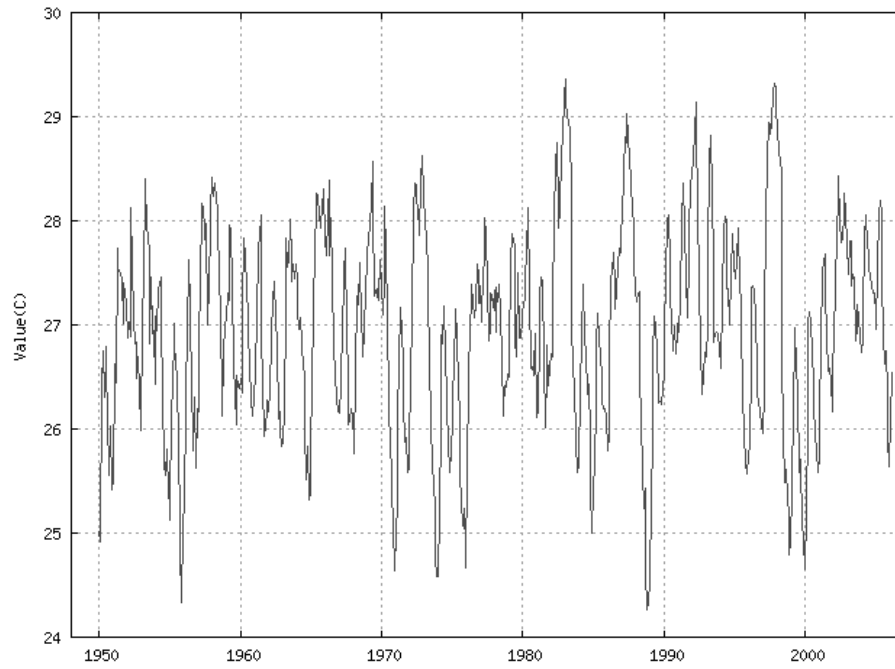
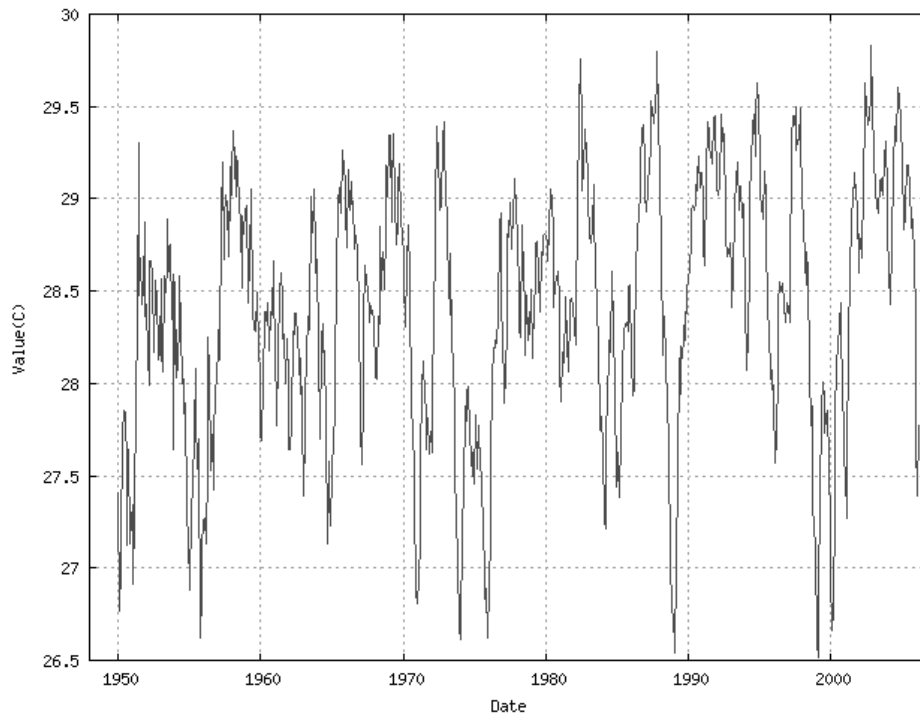


Figura 7 Índice Niño 4 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>



3.1.2 FENOMENO MACROCLIMÁTICO OSCILACIÓN DEL SUR:

Es un fenómeno causado por una onda estacionaria en la masa atmosférica que consiste en un gradiente de presiones entre el oeste y el este del océano Pacífico ecuatorial. La medida del comportamiento de este fenómeno se realiza a través del Índice de Oscilación del Sur (IOS), el cual consiste en tomar la diferencia estandarizada de la presión atmosférica a nivel del mar entre la ciudad Australiana de Darwin (localizada en el Pacífico Occidental) y la isla de Tahití (Pacífico central), por medio de la expresión mostrada en (1):

$$(1) \quad IOS = \frac{PA(Tahiti) - PA(Darwin)}{Desv.Sta.}$$

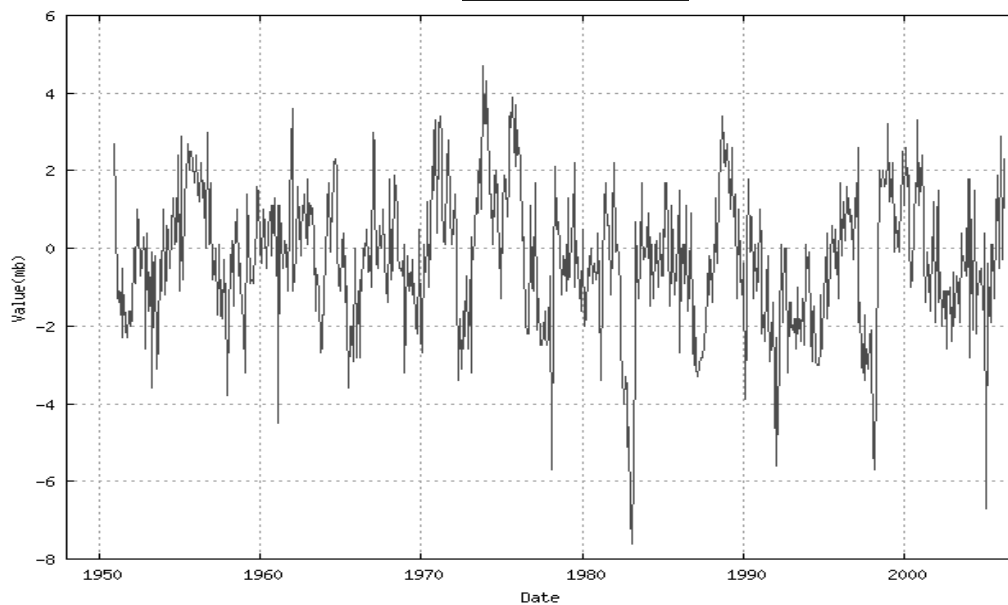
Donde:

PA(*) = Presión media mensual menos la media histórica para el mismo mes.

Desv.Sta = Desviación estándar de la diferencia de las presiones.

Figura 8 Índice IOS 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>



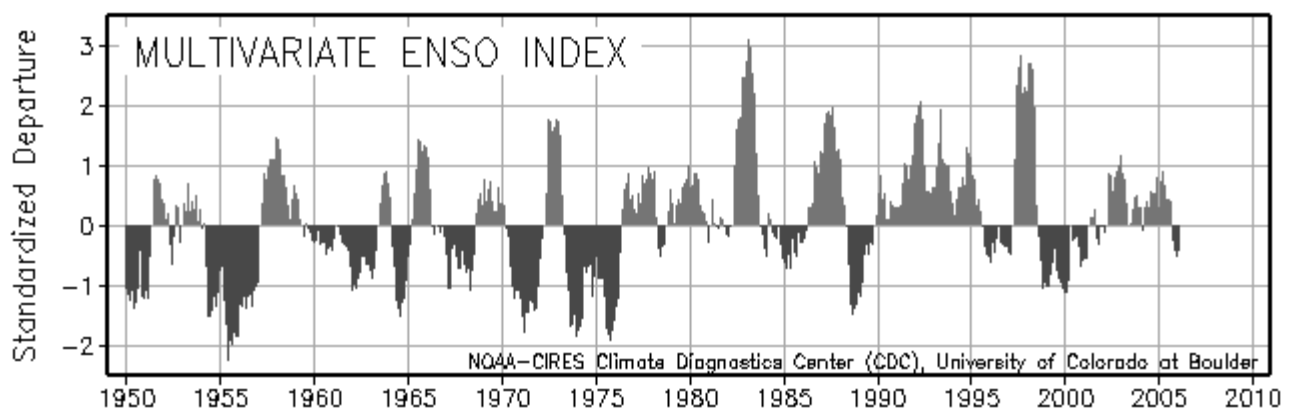
3.1.3 FENOMENO MACROCLIMÁTICO ENSO:

Consiste en un fenómeno natural producido por la interacción de una componente oceánica y otra atmosférica en la región del Océano Pacífico Ecuatorial. La componente oceánica es El Niño, que como ya se mencionó se trata de un calentamiento de la temperatura superficial del océano Pacífico, mientras que la componente atmosférica es la diferencia entre las presiones a nivel del mar conocida como la Oscilación del Sur (Villate, 2004).

El ENSO se origina en el Océano Pacífico tropical cerca de Australia debido a un aumento en la temperatura de las aguas superficiales. Con el correr del tiempo este máximo de temperaturas se desplaza hacia el este hasta alcanzar la costa de Sur América, causando un enfriamiento relativo en las aguas del Pacífico occidental (cerca de Asia). En la figura 9 se muestra la serie histórica del Índice Multivariado del Niño (MEI)

Figura 9 MEI 1950-2006

Tomado: <http://www.noaa.gov>



3.3 EL ALTO PATIA

Está localizada en una parte de la Cordillera Occidental, dentro de la jurisdicción de los departamentos de Cauca y Nariño. La región presenta una alta diversidad de climas y vegetación. La disponibilidad de agua es muy baja en esta zona, debido a la escasa precipitación y a que ésta es distribuida en forma de intensos aguaceros irregulares, a la deforestación indiscriminada y a la no aplicación de técnicas de manejo y de conservación del agua; la falta de este recurso, constituye una gran limitante para las actividades agropecuarias.

3.2 EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE

El altiplano cundiboyacense está conformado por planicies valles, limitado por montañas que superan los 4000 msnm, y se extiende a lo largo de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. La vegetación predominante en la región es de bosque seco montano bajo y el comportamiento se caracteriza por tener series de tiempo bimodales.

3.4 EL DEPARTAMENTO CASANARE

El Casanare limita por el norte con el departamento de Arauca; por el oriente con el departamento de Vichada; por el sur con el departamento del Meta; por el occidente con el departamento de Boyacá.

La mayor parte del territorio es plano y corresponde a la región de los llanos Orientales, con altitud variable entre los 110m y 230m. Al occidente se localiza un sector montañoso que va desde el piedemonte llanero hasta más de 3000 metros

sobre el nivel del mar, en la cordillera Oriental. Entre los accidentes orográficos se destacan la Cordillera del Zorro y los Cerros Aguamoco y Peña Negra. Dentro de su hidrografía se destacan los ríos Pauto, Guanapalo, Ariporo, Casanare, Cravo Sur, Cusiana, Túa, Tocaría, Guachiría, Upía y Unete. El Casanare se destaca como área estratégica para la conservación de ecosistemas de piedemonte.

3.5 EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

El departamento de Boyacá limita por el norte con los departamentos de Santander y Norte de Santander; al oriente con los departamentos de Arauca y Santander; por el sur con el departamento de Cundinamarca, y por el occidente con el departamento de Antioquia. La cordillera Oriental lo atraviesa de sur a norte; presenta terrenos quebrados, páramos, valles y altiplanos. Dentro de su hidrografía se destacan los ríos Magdalena, Guaguaquí, Suárez, Chicamocha y Garagoa, la Laguna de Tota, Cusiana, Upía y Cravo Sur.

3.6 INFORMACIÓN UTILIZADA

El río Cusiana es uno de los más representativos de la zona de estudio. Nace en territorio boyacense, posee una longitud aproximada de 365 kilómetros y es navegable en los últimos 115 kilómetros. La cuenca tiene un gran potencial agrícola y ganadero, aunque es más conocida internacionalmente por la explotación petrolera. Atraviesa los municipios de Aquitania, Labranzagrande y Pajarito en Boyacá, y Recetor, Aguazul, Tauramena y Maní en Casanare. Los afluentes principales son los ríos Charte, Unete, Salinero y Chitamena.

La información usada es recopilada por el IDEAM por medio de estaciones hidrometeorológicas ubicadas a lo largo de los departamentos y se utilizó con el fin de analizar el comportamiento climático actual de la zona.

La investigación se basa en el estudio y análisis de series históricas mensuales de caudales y precipitación utilizando datos discriminados generados por las diferentes estaciones Limnimétricas, Limnigráficas, Pluviométricas y Pluviográficas, existentes en la zona de estudio teniendo en cuenta para Boyacá únicamente las que drenan en dirección al Casanare (Figura.10), tratando de generar series completas y así determinar el cambio climático y los efectos de los Fenómenos Macroclimáticos en la región en los últimos años.

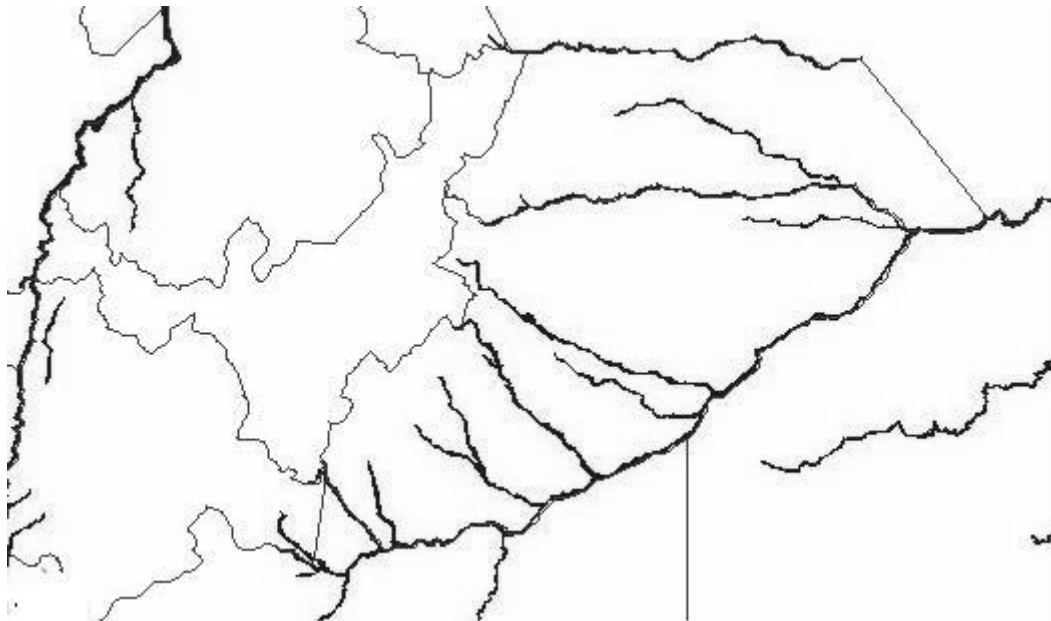


Figura 10 Hidrografía zona de estudio

Fuente: Autor

Se analizaron y se aplicaron algunos modelos que fueron utilizados en investigaciones anteriores (Villate, 2004 y Castañeda, 2005), determinando la existencia de tendencias en la media y relación que existe entre los fenómenos

macroclimáticos tenidos en cuenta para este estudio y la disminución en la disponibilidad hídrica de la región, a partir del análisis de las series de tiempo (sucesión o conjunto de observaciones de una variable ordenada temporalmente y medidas en un mismo intervalo de tiempo), teniendo en cuenta características como: ciclicidad, estacionalidad, aleatoriedad y evaluando la posibilidad de generar tendencias temporales y espaciales de la zona en estudio.

3.7 ANÁLISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO

3.7.1 Análisis de Homogeneidad

Previo a los análisis de tendencia se llevaron a cabo análisis de homogeneidad de las series hidrológicas usadas en esta investigación, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se utilizó. Para este proceso se usó una gran cantidad de herramientas gráficas y estadísticas que pueden usarse para soportar este tipo de análisis (Smith & Campuzano, 2000). Con esto fue posible tener una clara comprensión del comportamiento de la serie antes de los análisis confirmatorios.

3.7.1.1 Gráfica de Series de Tiempo

Una gráfica de la serie de tiempo es una gráfica de los valores de la serie contra el tiempo t , para $t = 1, 2, \dots, N$. Las gráficas de serie de tiempo pueden mostrar rápidamente ciertas características tales como periodicidades, estructura de dependencia, grado de variabilidad y aleatoriedad en adición a cambios y tendencias (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.1.2 Gráfica de Masa Simple

Las gráficas de Masa Simple son gráficas de la serie acumulada de la variable original contra el tiempo. Para construir esta gráfica primero se define la serie acumulada S_t como:

$$(2) \quad S_t = \sum_{i=1}^t X_i \quad t = 1, 2, \dots, N$$

La gráfica de Masa Simple es una gráfica de S_t contra el tiempo t , $t=1, 2, \dots, N$. Una serie sin un cambio en la media tendrá una gráfica de Masa Simple similar a una línea recta, mientras que una serie con un cambio en la media causará un cambio en la pendiente de la línea recta. Además, una serie con una tendencia tendrá una gráfica de Masa Simple no lineal o curvilínea (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.1.3 Gráfica de Masa Residual

Las gráficas de Masa Residual son gráficas de las desviaciones acumuladas de las series promedias contra el tiempo. Para construir esta gráfica primero se calcula la media de la serie X_t como:

$$(3) \quad \bar{\mu}_X = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t$$

y la serie de desviaciones acumuladas se define como:

$$(4) \quad D_t = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{\mu}_X) \quad t = 1, 2, \dots, N$$

La gráfica de Masa Residual es una gráfica de D_t contra el tiempo t , $t=1, 2, \dots, N$.

Una pendiente positiva indicará que los valores están por encima de la media y una pendiente negativa que los valores están por debajo de la media. La serie sin un cambio tendrá valores residuales variando alrededor del eje horizontal. En cambio, una serie con un cambio o una tendencia en la media mostrará una pendiente positiva o negativa (dependiendo si es un cambio descendente o ascendente) siguiendo una pendiente negativa o positiva (Smith & Campuzano, 2000)..

3.7.1.4 Diagrama de Puntos

Los Diagramas de Puntos son gráficos de los valores de los datos a lo largo de una línea horizontal o eje. El eje horizontal representa los valores que puede tomar la serie hidrológica, y en él se dibujan los diferentes valores de los datos ya no asociados a ningún eje de tiempo. Una serie con un cambio en la media mostrará en este diagrama dos concentraciones o grupos de datos a lo largo del eje horizontal. La serie con una tendencia en la media no mostrará ninguna concentración. En cambio, una serie sin cambios o tendencias en la media mostrará puntos concentrados alrededor del valor medio (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.1.5 Histograma

Los Histogramas son gráficas donde los datos disponibles se agrupan de acuerdo a su magnitud. Para dibujar un Histograma primero hay que definir los intervalos de clase. En este caso el rango total de ocurrencias (la diferencia entre los valores máximo y mínimo) se divide en varios intervalos. Se recomienda que el número de intervalos a ser utilizado sea tal que hayan por lo menos 5 observaciones en cada grupo. Una aproximación útil es hacer el número de intervalos igual al entero

más cercano al valor $ng = 1 + 3.3 \text{ Log}_{10} (N)$ (Kottegoda y Rosso, 1997) en donde N representa el número total de observaciones. Con el número de intervalos definido, los intervalos de clase pueden determinarse usando el rango total de ocurrencias y ng. Normalmente el ancho de los intervalos de clase es igual para todos (Smith & Campuzano, 2000)..

El número de ocurrencias en cada intervalo de clase puede definirse y se denomina frecuencia absoluta. Cuando las frecuencias absolutas se dividen por el número total de observaciones ellas son llamadas frecuencias relativas. El gráfico de los intervalos de clase sobre el eje horizontal contra las frecuencias absolutas o relativas en el eje vertical es llamado el Histograma. Usualmente éstas gráficas se dibujan como rectángulos en la dirección del eje vertical donde cada rectángulo representa la frecuencia de las observaciones en cada intervalo de clase. La gráfica que junta los puntos medios de las cimas de los rectángulos del histograma extendiendo el diagrama con intervalos de clase a ambos extremos, se denomina polígono de frecuencias relativas (Smith & Campuzano, 2000)..

Cuando una serie o un grupo de datos tiene un cambio en la media el Histograma o el polígono de frecuencias mostrará dos picos. Una serie con tendencias en la media mostrará varios picos o un Histograma casi horizontal. En cambio, una serie sin cambios o tendencias usualmente mostrará un solo pico con una forma relativamente simétrica (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.1.6 Gráfica S-S

La gráfica S-S es simplemente una gráfica de la serie a ser analizada contra otra serie. Es un gráfica de serie contra serie (S-S). Si las dos series tienen el mismo número de observaciones y si cada valor de una serie corresponde a un valor específico de la otra serie, se dice que son series apareadas. Las gráficas S-S son

para series apareadas. Si ambas series tienen la misma media, la gráfica S-S parecerá una gráfica de datos dispersos alrededor de una línea de 45° . Si una serie tiene consistentemente valores más altos que la otra serie, los puntos de la gráfica S-S se concentrarán en la parte superior (o en la inferior) de la gráfica. La gráfica S-S indicará entonces si una serie tiene valores promedios más altos o más bajos que otra serie. Cuando la gráfica S-S se hace usando una sola serie dividida en dos, antes de y después del punto sospechoso de cambio, podría indicar si hay un cambio en la media de la serie (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.1.7 Gráfica Q-Q

La gráfica Q-Q (Helsel e Hirsch, 1992) es una gráfica de los cuantiles de una serie contra los cuantiles de otra serie. La gráfica Q-Q es esencialmente la gráfica de los datos ordenados de la primera serie contra los datos ordenados de la segunda serie. En otras palabras, la gráfica Q-Q es una gráfica S-S usando los datos ordenados. La gráfica Q-Q requiere que las dos series a ser comparadas sean del mismo tamaño. La interpretación de la gráfica Q-Q es similar a la de la gráfica S-S. Si ambas series tienen las mismas medias, la gráfica Q-Q tendrá puntos alrededor de la línea de 45° . Si una de las series tiene consistentemente valores más altos o más bajos que la otra serie, se concentrarán los puntos en la parte superior (o más baja) de la gráfica (Smith & Campuzano, 2000).

3.7.2 Datos Faltantes

Uno de los problemas que frecuentemente se encontró al analizar los datos de las estaciones pluviométricas e hidrométricas fue la existencia de datos faltantes en las series registradas. Para completar las lagunas de estas series se podría haber reproducido el fenómeno físico relativo al dato en cuestión, procedimiento que

puede complicarse por la dificultad intrínseca para la modelización de algunos fenómenos como es el caso de las precipitaciones.

Otros procesos, como la generación de caudales, admiten simplificaciones que reproducen el ciclo hidrológico de acuerdo a leyes conceptuales o físicamente basadas. Existen gran cantidad de métodos para el llenado de datos, en este caso debido a la cantidad de estaciones utilizadas, se está empleando un software denominado CHAC (Borrell, 2003). Se realizó una revisión de las técnicas estocásticas de completado de series meteorológicas y de caudales mensuales, que es generalmente la escala temporal de trabajo utilizada en estudios de recursos y tema de esta tesis. Tal como observó, la aplicación de estas técnicas exige admitir hipótesis dependientes del tipo de dato, por las cuales usualmente se distingue entre datos meteorológicos e hidrométricos.

Este software fue desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento de España (CEDEX), y es de libre distribución y utilización. Para aplicar esta metodología es preciso agrupar previamente las estaciones meteorológicas en grupos homogéneos o afines estableciendo un control previo de las estaciones que sirven de referencia para el completado de una dada. Se evita así la transmisión de heterogeneidades y errores de unas estaciones a otras.

3.7.3 Análisis Estadísticos a las Series de Tiempo:

Se aplicaron procedimientos y análisis de series de tiempo en los que se establecieron correlaciones, tendencias temporales y espaciales; entre otras, de cada una de las series, así como la implementación de modelos simplificados, que

permiten simular comportamientos de las variables hidroclimáticas en la zona de estudio.

Las pruebas existentes y analizadas en este estudio para la detección de tendencias en la media son:

- Prueba de Mann-Kendall

El estadístico univariado de Mann-Kendall para una serie de tiempo $[Z_k, k = 1, 2, \dots, n]$ de datos es definido como:

$$(5) \quad T = \sum_{j < i} \text{sgn}(Z_i - Z_j)$$

donde:

$$(6) \quad \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{if } x = 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

Si no se presentan relaciones entre las observaciones ni tendencias en las series de tiempo, el test estadístico es normal y asintóticamente distribuido con:

$$(7) \quad E(T) = 0 \quad \text{Y} \quad \text{Var}(T) = n(n-1)(2n+5)/18.$$

Si la variable de repuesta es medida en varias estaciones (ω), el test estacionario de Mann-Kendall es estimado primero separando los datos en ω subseries, cada una representando una estación.

$$(8) \quad T_j = \sum_{k < l} \text{sign}(Z_{lj} - Z_{kj}) \quad j = 1, K \quad \omega$$

La ecuación (8) corresponde a la estadística de Mann-Kendall para cada estación j , la cual es sumada a través de todas las estaciones para obtener la estadística estacionaria, la cual puede ser observada en (9)

$$(9) \quad S = \sum_{j=1}^{\omega} T_j ,$$

En (9), S presenta una distribución asintóticamente normal con media cero y varianza definida por (10)

$$(10) \quad \text{Var}[S] = \sum_{j=1}^{\omega} \text{Var}[T_j] + \sum_{\substack{j, g=1 \\ g \neq j}}^{\omega} \text{Cov}(T_j T_g)$$

Donde:

$$(11) \quad \text{Var}[T_j] = \frac{n_j(n_j - 1)(2n_j + 5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i - 1)(2t_i + 5)}{18}$$

En (11), n_j corresponde al número de observaciones no faltantes para cada estación j , m es el número de grupos relacionados y t_i es la medida del grupo i relacionado.

La covarianza entre dos estadísticos de Mann- Kendall puede ser encontrada por medio de (12)

$$(12) \text{Cov}(T_j T_g) = \left[S_{jg} + 4 \sum_{m=1}^n R_{mj} R_{mg} - n(n_j + 1)(n_g + 1) \right] / 3$$

Donde n_j y n_g son el número de observaciones para cada estación j y g respectivamente y S_{gj} puede ser calculado por medio de (13)

$$(13) S_{jg} = \sum_{m < n} \text{sign}[(Z_{nj} - Z_{mj})(Z_{ng} - Z_{mg})]$$

R en (12) corresponde a la matriz de las observaciones de cada serie, donde los elementos de las series de cada estación son clasificados entre ellos mismos. La clasificación de cada elemento m^{th} dentro de cada estación i puede ser representado por (14).

$$(14) R_{mj} = \left[n_j + 1 + \sum_{k=1}^n \text{sign}(x_{mj} - x_{kj}) \right] / 2$$

Donde $\text{sign}(x_{mj} - x_{kj})$ es definido como cero si x_{mj} o x_{kj} , corresponden a datos faltantes, para asignar el rango medio $(n_j + 1)/2$ para el dato faltante.

La correlación incondicional puede ser encontrada por medio de (15)

$$(15) \rho_{gh} = \frac{\text{Cov}(T_g^n, T_j^n)}{\sqrt{\text{Var}(T_g^n) \text{Var}(T_j^n)}}$$

- Pruebas de MAKENSES 1.0

Detecta y estima tendencias en la serie de tiempo de valores mensuales por medio de la plantilla MAKESENS 1.0 (Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates for the Trend of Annual Data), desarrollada por el Finish Meteorological Institute y programada en Excel para la detección y estimación de las tendencias en series de tiempo de valores anuales.

Dicha plantilla fue modificada por sus creadores para correr la prueba estadística no paramétrica bidireccional de Mann-Kendall, la cual se utilizó para el análisis de las variables con el propósito de detectar tendencias, cambios graduales o abruptos durante el período de análisis.

MAKESENS efectúa dos tipos de análisis estadísticos:

Primero:

Evalúa la tendencia al presentar incrementos o decrecimientos en las series de tiempo por medio de la prueba de Mann-Kendall no paramétrica.

Segundo:

Calcula la pendiente de una tendencia lineal con el método Sen no paramétrico (Gilbert, 1987).

Estos métodos son usados aquí en sus formas básicas; el método Sen usa un modelo lineal para calcular la pendiente de la tendencia y controla que la diferencia entre los residuos sea constante con el tiempo. Estas pruebas brindan muchas más ventajas que las han hecho útiles y efectivas en el análisis de tendencias.

- Prueba de tendencia lineal
- Prueba de homogeneidad estacional

3.7.4 Análisis de Correlación:

Consiste en determinar el grado de relación o de asociación que existe entre dos variables o dos mediciones de cualquier parámetro hidrológico. Esto se hace por medio de un número adimensional conocido como el coeficiente de correlación, el cual varía entre -1 y 1 , valores que indican máximas relaciones negativas o positivas respectivamente. La correlación puede encontrarse para una serie de tiempo (coeficiente de Autocorrelación) o para dos series de tiempo independientes (coeficiente de correlación cruzada). Gráficamente pueden determinarse por medio de un correlograma, el cual contiene una serie de límites positivos y negativos que indican el grado de asociación de las mediciones.

3.7.4.1 Coeficiente de Autocorrelación:

Por medio de éste es posible determinar el grado de dependencia que tiene una medición con mediciones en tiempos pasados, determinándola en una base lineal. Este coeficiente se puede determinar para diferentes periodos de rezago, por medio de la ecuación (16):

$$(16) \quad \rho = \frac{\sum_{t=1}^{N-K} (s_t - \bar{s})(s_{t+k} - \bar{s})}{\sum_{t=1}^N (s_t - \bar{s})^2}$$

En la ecuación (16), el subíndice k representa el tiempo de rezago para el cual se quiere conocer el coeficiente de correlación de la serie en consideración.

3.7.4.2 Coeficiente de Correlación Cruzada:

Por medio de este coeficiente es posible determinar si dos conjuntos de datos varían conjuntamente, es decir, si los valores altos de un conjunto están asociados con los valores altos del otro (correlación positiva), si los valores bajos de un conjunto están asociados con los valores bajos del otro (correlación negativa) o si los valores de ambos conjuntos no están relacionados (correlación con tendencia a cero). Al igual que la Autocorrelación, este coeficiente también puede ser determinado para diferentes tiempos de rezago por medio de la ecuación (17):

$$(17) \quad \rho_{(x,y)} = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sqrt{\left[\left(\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 \right) \left(\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2 \right) \right]}}$$

Igualmente, en (17) , el parámetro k indica el tiempo de rezago para el cual se va a realizar la correlación entre las dos series.

Los valores encontrados de los coeficientes de correlación son comparados con los límites de independencia paramétrica, con el fin de determinar el grado de relación encontrado. La determinación de los límites es mencionada en el capítulo 4.

3.7.5 Análisis de Fourier:

La transformada discreta de Fourier es un método para determinar el espectro de frecuencia de señales digitales. Consiste en una técnica matemática que describe una serie de tiempo en términos de su periodicidad. Por medio de este análisis es posible determinar las frecuencias que más se repiten en una serie de tiempo.

Este análisis está basado describir un comportamiento periódico como una suma de armónicos donde cada armónico puede ser expresado en términos polares como (18).

$$(18) \quad y = A \sin(\theta - \phi).$$

Expresando (18) en términos temporales es posible describir una serie periódica de la siguiente manera:

$$(19) \quad y_t = \sum_{h=0}^N A_h \sin\left(\frac{2\pi ht}{N} + \phi_h\right)$$

La expresión (19) puede ser expresada utilizando la identidad de la suma de dos ángulos de un seno, con el fin de determinar los coeficientes A_h y ϕ_h con mayor facilidad, obteniendo la expresión (20):

$$(20) \quad y_h = \alpha_h \cos\left(\frac{2\pi ht}{N}\right) + \beta_h \sin\left(\frac{2\pi ht}{N}\right)$$

En la ecuación (20) los coeficientes representan el peso de la contribución del armónico, por lo cual éstos son los valores de vital importancia en el análisis, dichos coeficientes pueden ser encontrados por medio de las ecuaciones (21) y (22)

$$(21) \quad \alpha_h = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} y(t) \cos\left(\frac{2\pi ht}{N}\right)$$

$$(22) \quad \beta_h = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} y(t) \sin\left(\frac{2\pi ht}{N}\right)$$

La deducción de las ecuaciones (21) y (22) se multiplica cada factor de la ecuación (20) por coseno y seno respectivamente y luego aplicar los conceptos de ortogonalidad. La contribución de cada uno de los exponentes encontrados en las ecuaciones (21) y (22) debe ser unificada para encontrar el porcentaje de contribución de cada uno de los armónicos. Esto se realiza por medio de la ecuación (23)

$$(23) \quad h = \frac{\alpha_h^2 + \beta_h^2}{\sum_h \alpha_h^2 + \beta_h^2}$$

en donde h representa la contribución de cada armónico. Este porcentaje debe ser calculado para varios armónicos y graficarlo contra el número del armónico, obteniendo de esta forma el espectro de frecuencias, ya que el número del armónico es proporcional a la frecuencia.

4. METODOLOGÍA

Se revisaron los análisis previos realizados en el Altiplano cundiboyacense y el Alto Patía así como los resultados obtenidos en dichas investigaciones (Villate, 2004 y Castañeda, 2005). En las figuras 11, 12 se muestra las áreas de estudio.

4.1 ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE

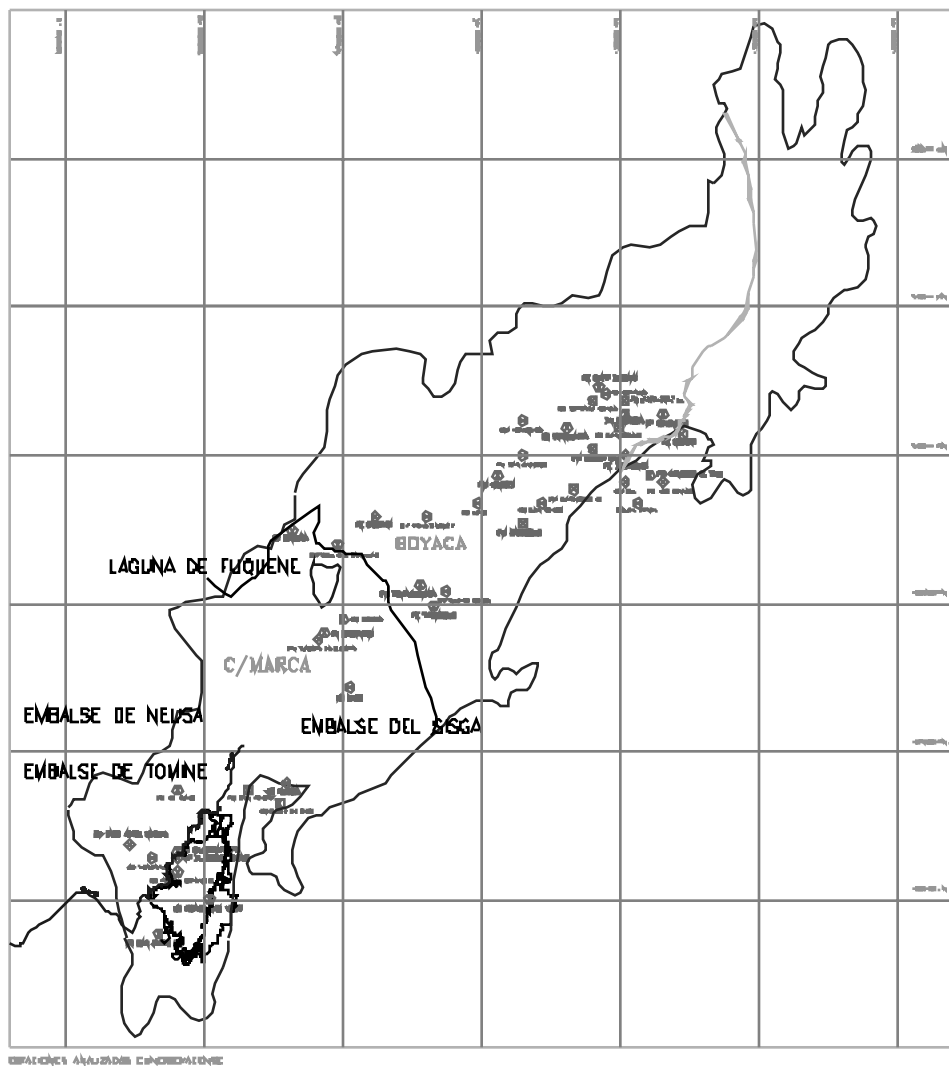
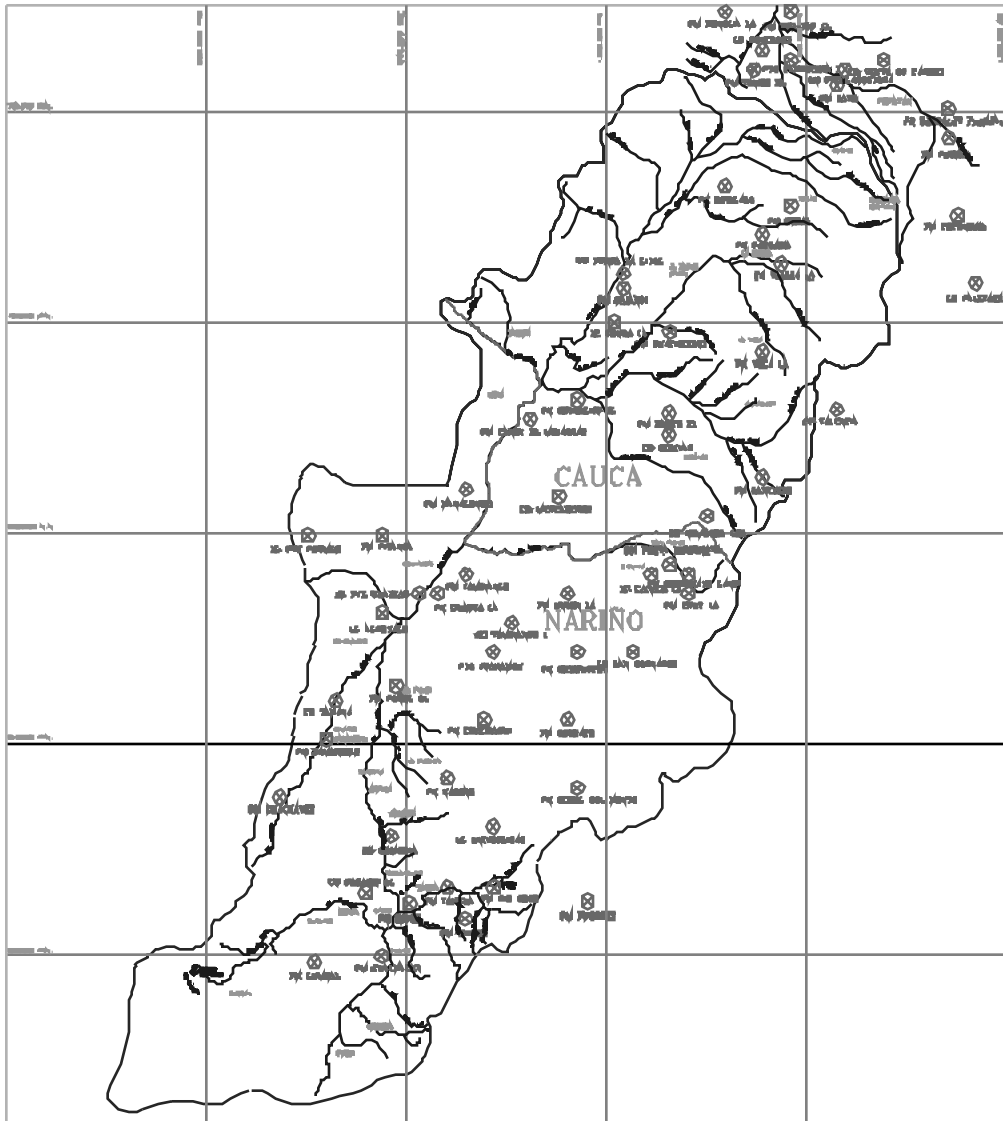


Figura 11 Mapa estaciones analizadas región del Altiplano Cundiboyacense.

Tomado de: (Castañeda, 2004)

4.2 ALTO PATÍA



ESTACIONES ANALIZADAS PATIA

Figura 12 Mapa estaciones analizadas región del Alto Patía.

Tomado de: (Castañeda, 2004)

4.3 BOYACÁ Y CASANARE



Figura 13 Boyacá y Casanare.

Tomado de ©1993-2003 Microsoft Corporation.

4.3.1 Determinación de las estaciones a utilizar

La primera etapa de la investigación partió de varias fuentes de información: un mapa de la vertiente del Orinoco, un mapa del Medio Magdalena y archivo en Excel con la información de las estaciones a nivel nacional. El procedimiento empleado para determinar las estaciones utilizadas para el desarrollo de la investigación fue la búsqueda ubicación y solicitud de de las estaciones de los departamentos de Boyacá y Casanare con información de caudales y precipitación media mensual, teniendo en cuenta aspectos como situación geográfica, entidad a la que pertenece, y cantidad de información de acuerdo a la fecha de instalación y suspensión si era el caso.

Los mapas contienen gran cantidad de información sobre la situación actual de la zona de estudio. Este se encuentra digitalizado en coordenadas Planas Gausianas. El aspecto más relevante tenido en cuenta fue el componente fluvial (ríos). Con esta información se realizó una selección preliminar de las estaciones a usar. Luego se realizó el trazado en AUTOCAD de los planos de Boyacá y Casanare y sobre éstos se delimitó la zona en estudio teniendo en cuenta la continuidad de las corrientes que llegan al río Meta.

El archivo en Excel tiene gran cantidad de información correspondiente a la distribución espacial de las estaciones correspondientes a la red hidrológica nacional del IDEAM. Para cada estación se tiene información del código, ciudad, cuenca, fechas de instalación y de suspensión y coordenadas. Las estaciones correspondientes al IDEAM se encuentran en coordenadas Geográficas.

Para localizar las estaciones provenientes del IDEAM, fue necesario el empleo de programas de conversión de coordenadas como el transformador de coordenadas de la Empresa Colombiana de Petroleos ECOPETROL Y EL CONCOORD (Figura 14), obtenido libremente de Internet, con el fin de dejar todas las estaciones en el mismo sistema de coordenadas y poder ubicarlas en el mapa, en la tabla 1 y tabla 2 se puede observar la transformación de coordenadas.



Figura 14 Presentación Programa Concoord.
Tomado del programa.

Tabla 1 Coordenadas Estaciones Limnimétricas y Limnigráficas

Nombre Estación	COORD.	Coordenadas geográficas	
DESAGUADERO	0530N7256W	1099753.171N	1127177.599E
CEIBAL EL	0505N7302W	1053648.126N	1116171.828E
REVENTONERA LA	0453N7303W	1031524.826N	1114357.955E
MOMBITA PTE ROMERA	0515N7257W	1072098.007N	1125381.458E
GUAICARAMO	0442N7303W	1011247.970N	1114388.434E
HORQUETA LA	0535N7249W	1108996.968N	1140089.178E
VADO HONDO	0531N7246W	1101634.791N	1145646.888E
RANCHERIAS	0526N7244W	1092425.054N	1149362.286E
NEGRA LA	0520N7243W	1081367.564N	1151234.630E
PTE LAS CANAS	0536N7250W	1110836.561N	1138238.173E
MANI	0450N7218W	1026166.868N	1197589.827E
PAJARITO	0517N7242W	1075840.839N	1153094.909E
FCA LA ESPERANZA	0507N7244W	1057396.912N	1149438.042E
BOCATOMA-CUSIANA	0507N7244W	1057396.912N	1149438.042E
PTE YOPAL	0522N7225W	1085137.012N	1184489.714E
ESTACION LA	0446N7137W	1019024.761N	1273471.113E
PTE LA CABANA	0526N7228W	1092497.424N	1178925.95E
PTE CARRETERA	0525N7217W	1090710.759N	1199258.630E
PLAYON EL	0528N7213W	1096265.238N	1206633.958E
PTE NONATO	0521N7204W	1083409.373N	1223309.312E
CABUYA LA	0609N7201W	1171953.809N	1228535.215E

Tabla 2 Coordenadas Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas

Nombre Estación	COORD.	Coordenadas geograficas	
POTRERITO	0529N7257W	1097906.201N	1125333.808E
AQUITANIA	0531N7253W	1101607.538N	1132715.786E
REVENTONERA	0452N7303W	1029681.471N	1114360.774E
CAZADERO	0517N7259W	1075778.261N	1121678.9501E
GUAMO DE SISBACA	0522N7255W	1085009.004N	1129053.263E
DON ANTONIO	0441N7302W	1009407.364N	1116240.694E
DON ANTONIO CAMELI	0441N7302W	1009407.364N	1116241.694E
HUERTA LA GRANDE	0439N7255W	1005740.920N	1129193.899E
TOQUILLA	0531N7247W	1101630.743N	1143799.553E
TAURAMENA	0501N7245W	1046331.683N	1147612.184E
TAURAMENA	0501N7245W	1046331.683N	1147612.184E
MORRO EL	0528N7228W	1096185.056N	1178916.0821E
YOPAL	0521N7224W	1083298.189N	1186342.865E
MOLINOS D CASANARE	0524N7219W	1088855.958N	1195567.882E
CHAPARRERA LA	0529N7214W	1098103.575N	1204780.309E
APTO YOPAL	0519N7223W	1079615.499N	1188201.188E

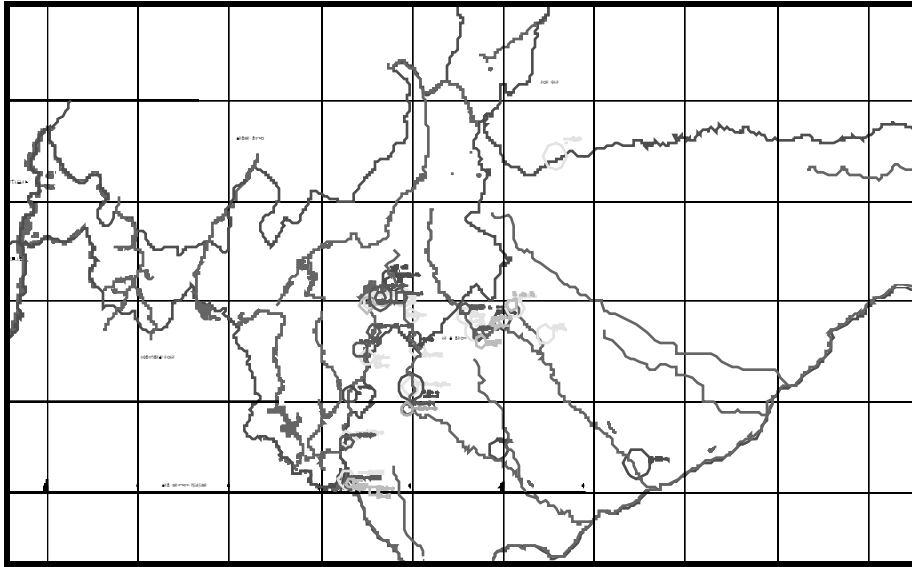


Figura 15 Ubicación de las estaciones

Fuente: Autor

Una vez localizadas todas las estaciones sobre el plano digitado en AUTOCAD (figura 15), se procedió a determinar cuáles estaciones eran las más convenientes de utilizar. Esto se realizó teniendo en cuenta la distribución espacial de las mismas con el fin de cubrir la mayor parte de la zona de estudio.

Un parámetro importante que se tuvo en cuenta para la determinación de las estaciones útiles fue la cantidad de años con información, eliminando aquellas estaciones que contenían información muy antigua, con menos de 10 años de información y las estaciones que no están actualmente en funcionamiento.

5.5.1 Información solicitada al Ideam

- Parámetro 1: Precipitación Total Mensual para las estaciones hidrométricas de sectores de Boyacá y Casanare, que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas solicitadas
Fuente: IDEAM

	CODIGO	ESTACION
1	3509001	POTRERITO
2	3509003	AQUITANIA
3	3509004	REVENTONERA
4	3509006	CAZADERO
5	3509007	GUAMO DE SISBACA
6	3509011	DON ANTONIO
7	3509502	DON ANTONIO CAMELI
8	3509511	HUERTA LA GRANDE
9	3519002	TOQUILLA
10	3519008	TAURAMENA
11	3519502	TAURAMENA
12	3521001	MORRO EL
13	3521002	YOPAL
14	3521004	MOLINOS D CASANARE
15	3521005	CHAPARRERA LA
16	3521501	APTO YOPAL

- Parámetro 17: Caudal medio mensual para las estaciones hidrométricas de sectores de Boyacá y Casanare, que se presentan en la tabla 4.

Tabla 4 Estaciones Pluviométricas y Pluviográficas solicitadas
Fuente: IDEAM

	CODIGO	ESTACION
1	3509701	DESAGUADERO
2	3509708	CEIBAL EL
3	3509709	REVENTONERA LA
4	3509710	MOMBITA PTE ROMERA
5	3510704	GUAICARAMO
6	3519701	HORQUETA LA
7	3519702	VADO HONDO
8	3519705	RANCHERIAS
9	3519706	NEGRA LA
10	3519707	PTE LAS CANAS
11	3519718	MANI
12	3519719	PAJARITO
13	3519720	FCA LA ESPERANZA
14	3519721	BOCATOMA-CUSIANA
15	3521701	PTE YOPAL
16	3521702	ESTACION LA
17	3521703	PTE LA CABANA
18	3521704	PTE CARRETERA
19	3521706	PLAYON EL
20	3523701	PTE NONATO
21	3602702	CABUYA LA

Número parámetro:

1 = Precipitación Total Mensual

3 = Precipitación Máx. 24 horas

5 = Temperatura Máxima Mensual

8 = Humedad Relativa Mensual

11 = Brillo Solar Mensual

13 = Tensión de Vapor

Viento Mensual

2 = Precipitación Número Días

4 = Temperatura Media Mensual

6 = Temperatura Mínima Mensual

10 = Evaporación Mensual

12 = Nubosidad

14 = Velocidad y Dirección del

15 = Recorrido del Viento Mensual	16 = Punto de Rocío
17 = Caudal Medio Mensual	18 = Caudal Máximo Mensual
19 = Caudal Mínimo Mensual	20 = Nivel Medio Mensual
21 = Nivel Máximo Mensual	22 = Nivel Mínimo Mensual
23 = Concentración de Sedimentos Mensual	24 = Transporte de Sedimentos Mensual
25 = Aforos Líquidos	26 = Aforos Sólidos
St = Sección Transversal	Gr = Granulometría
27 = Tabla conversión N-Q (curva gastos)	

El análisis de la calidad de la información que arroja cada una de las estaciones sirve para discriminarlas, teniendo en cuenta, la forma de interpretar datos faltantes si los hay, y definir cuales realmente pueden ayudar con la meta de establecer el clima de la región.

4.3.3 Análisis de Datos Faltantes

La información de las estaciones del IDEAM proveniente de estaciones pluviométricas, pluviográficas, climatológicas, limnimétricas y limnigráficas, fue estudiada y ordenada cuidadosamente, verificando que los datos cumplieran con los parámetros establecidos como longitud de la serie, ubicación y que la estación estuviera actualmente en funcionamiento. Lo principal en esta etapa fue tratar de completar la información y así tener todas las series con periodos de información lo más robusta posible.

4.3.3.1 Precipitación:

La información solicitada de este parámetro provenía de estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas, ésta presentaba datos faltantes. El primer método para completar los datos consistió en revisar y analizar los datos de las estaciones que se encontraban ubicadas en el mismo sitio. Al comparar los datos de estas estaciones se encontró que estas contenían la misma información con periodos de tiempo diferente, con lo que se logró aumentar la longitud de la serie histórica. Las estaciones que se encuentran ubicadas en el mismo sitio son las siguientes:

Tabla 5 Estaciones de precipitación de igual ubicación
Fuente: Autor

Código	Tipo	Nombre	fecha de instalación	fecha de suspensión
3509002	PM	Pueblo viejo	Jun-28	Jun-51
3509003	PM	Aquitania	Nov-57	Nov-52
3509011	PM	Don Antonio	Jun-93	
3509502	CP	Don Antonio Cameli	Oct-68	May-93
3519008	PM	Tauramena	Oct-60	Nov-74
3519502	CO	Tauramena	Nov-74	

Como las estaciones 3509002 y 3509003 se encuentran suspendidas y la información es muy corta, no se tomaron en cuenta para esta investigación. Las nuevas series logradas con la unión de las estaciones de la tabla 5 se presentan a continuación:

Tabla 6 Estaciones con nuevo periodo de precipitación
Fuente: Autor

Código	Tipo	Nombre	Código usado	Periodo	
3509011	PM	Don Antonio	3509011	Oct-68	Abr-05
3509502	CP	Don Antonio Cameli			
3519008	PM	Tauramena	3519502	Oct-60	Abr-05
3519502	CO	Tauramena			

El completado de datos de todas las series de precipitación se realizó por medio del programa Chac. De acuerdo al procedimiento que sigue el programa para el completado de información, en primer lugar fue necesario agrupar las estaciones, teniendo en cuenta su ubicación espacial, su altura sobre el nivel del mar y en la medida que fuera posible en función de su comportamiento climático.

- Grupo A: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 1700 y 3000 m.s.n.m. En la tabla 7 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 7 Estaciones correspondientes al grupo A

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3509001	PG	Potrerito	Olarte	3047	Aquitania
3509007	PM	Guamo Sisbaca	Upía	2575	Aquitania
3509006	PM	Cazadero	Upía	1725	Aquitania
3519002	PM	Toquilla	Cusiana	2950	Aquitania

Fuente Autor

Al analizar la totalidad de las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que todas ellas podían ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1984 a 2005. Todas las estaciones pudieron ser completadas para este periodo de tiempo, con un Umbral de Priorización de 0.535.

- Grupo B: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 300 y 450 m.s.n.m. En la tabla 8 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 8 Estaciones correspondientes al grupo B

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3509004	PG	Reventonera	Upía	390	Aquitania
3509011	PM	Don Antonio	Upía	300	Aquitania
3509511	PM	Huerta la Grande	Upía	255	Aquitania
3519502	PM	Tauramena	Cusiana	450	Aquitania

Fuente Autor

Al analizar las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que podían ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1995 a 2005. Todas las estaciones se completaron para ese periodo de tiempo, con un Umbral de Priorización de 0.473.

- Grupo C: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 300 y 650 m.s.n.m. En la tabla 9 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 9 Estaciones correspondientes al grupo C

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3521001	PM	Morro El	Cravo sur	656	Yopal
3521005	PG	Chaparrera La	Tocaría	395	Yopal
3521004	PG	Molinos	Cravo sur	330	Yopal
3521002	PM	Yopal	Cravo sur	320	Yopal
3521501	CP	Apto yopal	Cravo sur	325	Yopal

Fuente Autor

Al analizar la totalidad de las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que las estaciones podían ser completadas teniendo en cuenta dos periodos de tiempo así: 3521001, 3521002, 3521501 pudieron ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1974 a 1995, con un Umbral de Priorización de 0.54. Las estaciones 3521001, 3521005, 3521004 y 3521501 se completaron en un intervalo de tiempo entre 1995 a 2005, con un Umbral de Priorización de 0.618.

La estación 3521002 está suspendida desde el año 1994 pero cuenta con una de las series más completas con un periodo de 1947 a 1994 sin presentar datos faltantes, además de lo anterior esta estación se encuentra cercana a las estaciones 3521501 y 3521004 y comparte con ellas en gran porcentaje el comportamiento climático, razón por la cual fue tomada en cuenta para el completado de datos de las estaciones anteriormente mencionadas.

Adicionalmente al proceso de completado de datos de las series mensuales de precipitación se verificó que la información completada por el programa Chac fuera consistente con la información real. Este procedimiento se llevó a cabo eliminando los datos reales existentes en la serie y analizando la forma en que eran completados por el software dando como resultado Umbrales de Priorización del orden de 0.85. Con estos resultados se realizaron gráficas de datos simulados contra datos reales y se encontraron coeficientes de correlación del orden de 0.982 (Figura 16), resultados que indican un comportamiento satisfactorio del software empleado.

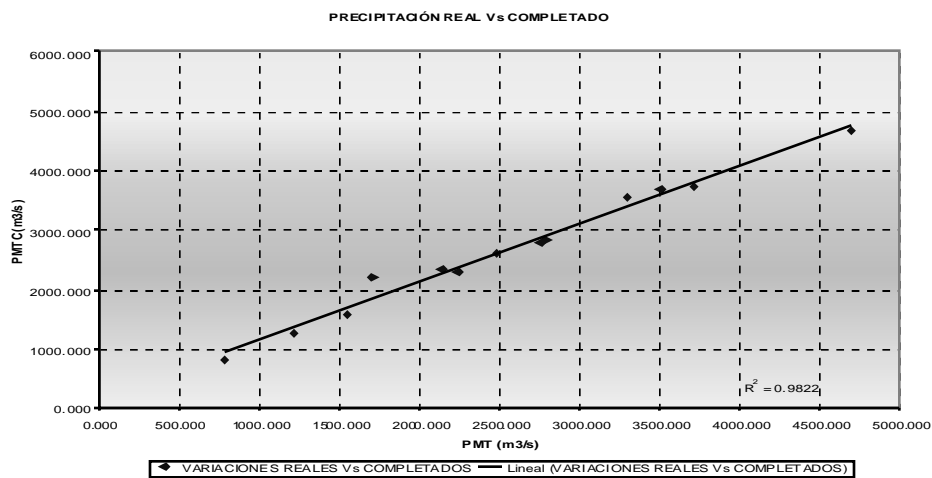


Figura 16 Comparación de los datos de precipitación reales con los datos completados

Fuente: Autor

Para el completado de información de precipitación media, se obtuvieron valores bajos del Umbral de Priorización con relación a los obtenidos con las series de caudal, esto es debido a la falta de información de este parámetro en la zona de estudio.

La Figura 17 muestra la ubicación de las estaciones que fueron utilizadas para el análisis de la precipitación en la zona de estudio. Se observa que desafortunadamente la zona sur-oriente del departamento de Casanare cuenta con poca información.

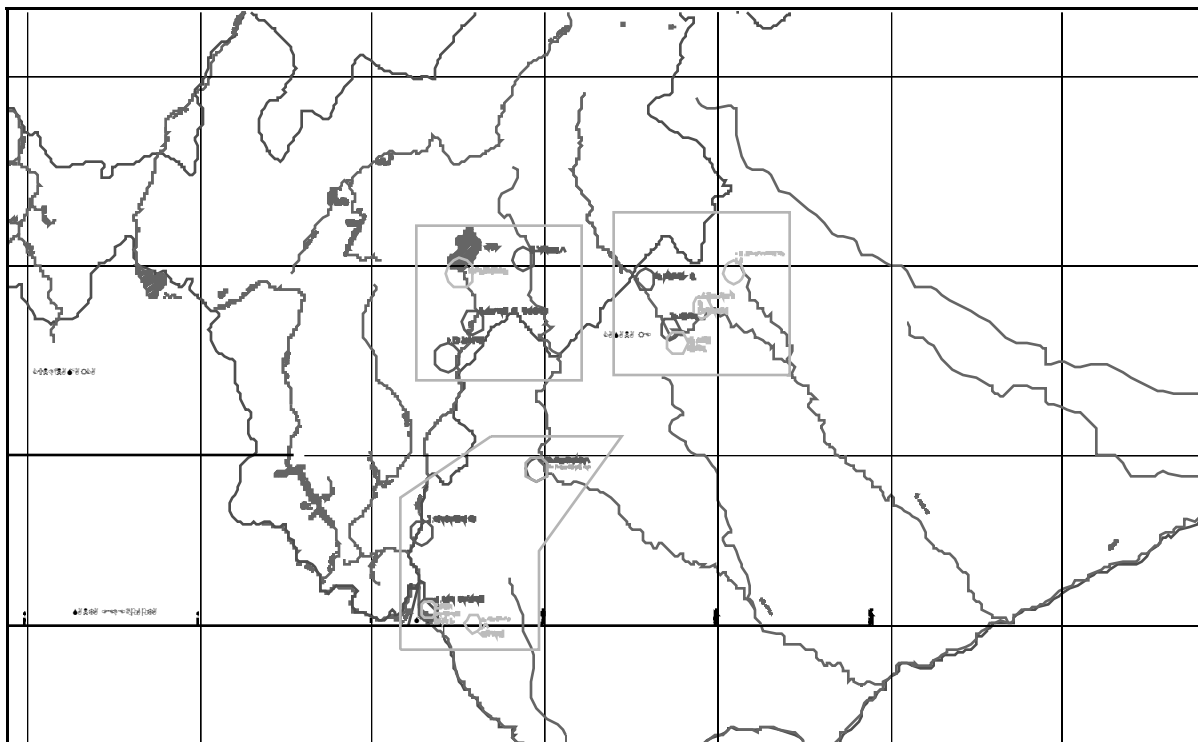


Figura 17 Ubicación de las estaciones de precipitación completas

Fuente: Autor

4.3.3.2 Caudal:

La información solicitada de este parámetro provenía de estaciones limnimétricas y limnigráficas y presentaba datos faltantes. El primer método para completar los datos consistió en revisar y analizar los datos de las estaciones enviadas por el IDEAM eliminando aquellas que contenían menos de cinco años de información y aquellas que se encontraban suspendidas.

Como la estación 3519701 se encuentra suspendida y la información de las estaciones 3519718, 3519719, 3519720 y 3523701 es muy corta, no se tomaron en cuenta para esta investigación.

El completado de datos de todas las series de caudal, se realizó por medio del programa Chac. Teniendo en cuenta el procedimiento que sigue el programa para

el completado de información, en primer lugar fue necesario agrupar las estaciones, teniendo en cuenta su ubicación espacial, su altura sobre el nivel del mar y en la medida que fuera posible en función de su comportamiento climático.

- Grupo A: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 2155 y 3000 m.s.n.m. En la tabla 10 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 10 Estaciones correspondientes al grupo A de caudal

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3519702	LG	Vado Hondo	Cusiana	2831	Aquitania
3519705	LG	Rancherías	Cusiana	2155	Pajarito
3519707	LM	Puente las Canas	Cusiana	3135	Aquitania
3509701	LG	Desaguadero	Olarte	3007	Aquitania

Fuente Autor

Al analizar la totalidad de las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que todas ellas podían ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1982 a 2003. Todas las estaciones pudieron ser completadas para este periodo de tiempo, con un Umbral de Priorización de 0.724.

- Grupo B: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 260 y 1216 m.s.n.m. En la tabla 11 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 11 Estaciones correspondientes al grupo B de caudal

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3509708	LM	Ceibal El	Upía	700	Paez
3509709	LG	Reventonera La	Upía	451	Sabana Larga
3509710	LG	Mombita Pte Romera	Upía	1216	Aquitania
3510704	LG	Guaicaramo	Upía	264	Sabana Larga

Fuente Autor

Al analizar las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que podían ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1987 a 2003. Todas las estaciones se completaron para ese periodo de tiempo, con un Umbral de Priorización de 0.54.

- Grupo C: Corresponde a estaciones cuya altura oscila entre 300 y 650 m.s.n.m. En la tabla 9 se pueden observar las estaciones que la conforman:

Tabla 12 Estaciones correspondientes al grupo C de caudal

Código	Tipo	Nombre	Corriente	Altura	Municipio
3521701	LG	Puente Yopal	Cravo sur	343	Yopal
3521703	LG	Puente La Cabaña	Cravo sur	481	Yopal
3521704	LM	Puente Carretera	Q. La Niata	224	Yopal
3521706	PM	Playo El	Tocaría	271	Nunchial

Fuente Autor

Al analizar la totalidad de las estaciones pertenecientes a este grupo, se encontró que las estaciones podían ser completadas en un intervalo de tiempo entre 1985 a 2003, con un Umbral de Priorización de 0.646.

La estación 3521702 cuenta con una de las series más incompletas con un periodo de 1979 a 2001 presentando datos faltantes durante el periodo 1989 a 1996, además de lo anterior esta estación se encuentra bastante alejada de las estaciones de los grupos A, B y C y no comparte con ellas el comportamiento climático, razón por la cual no fue tomada en cuenta para el completado de datos de las estaciones anteriormente mencionadas.

Debido a la situación geográfica de la estación 3521702 y a que en esa zona del departamento de Casanare no se cuenta con ningún tipo de estación

hidroclimatológica solo se tendrá en cuenta para determinar si en ese sector del departamento se presenta algún tipo de tendencia en el comportamiento climático.

Adicionalmente al proceso de completado de datos de las series mensuales de precipitación se verificó que la información completada por el programa Chac fuera consistente con la información real. Este procedimiento se llevó a cabo eliminando datos reales existentes en la serie y analizando la forma en que eran completados por el software dando como resultado Umbrales de Priorización del orden de 0.89.

Con estos resultados se realizaron gráficas de datos simulados contra datos reales y se encontró que los datos completados tienen alto grado de cercanía con los datos medidos, con coeficientes de correlación del orden de 0.998 (Figura 18), resultados que indican un comportamiento satisfactorio del software empleado.

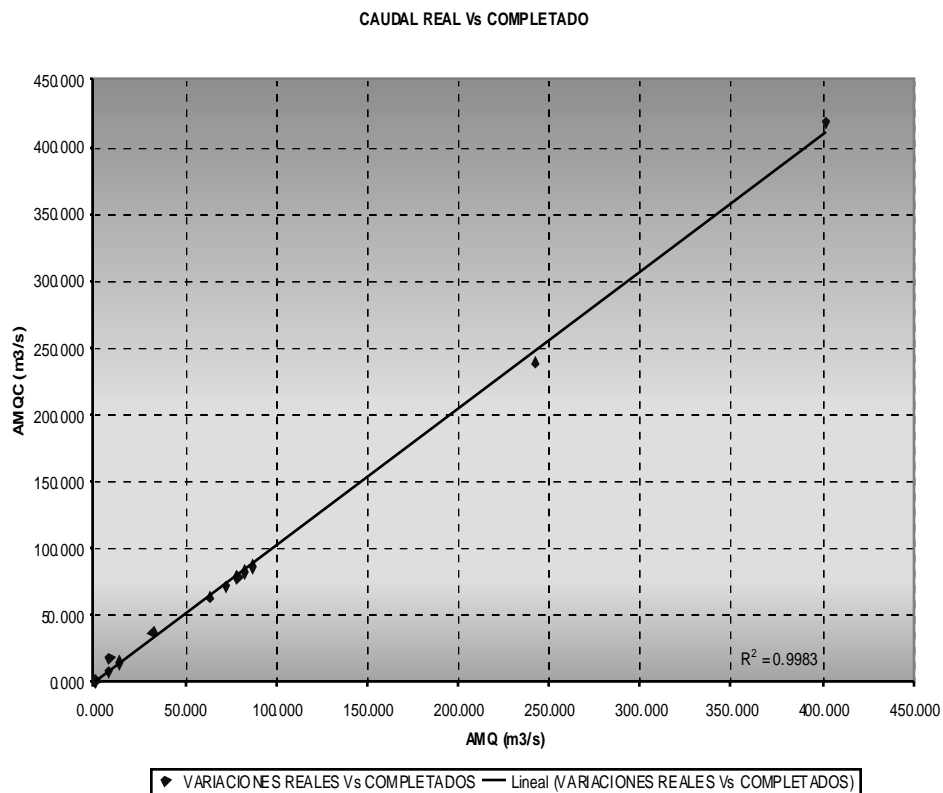


Figura 18 Comparación de los datos de caudal reales con los datos completados

Fuente: Autor

Para el completado de información de caudal, se obtuvieron valores no muy bajos de Umbral de Priorización con relación a los obtenidos con las series de precipitación.

La Figura 19 muestra la ubicación de las estaciones climatológicas que fueron utilizadas para el análisis de los caudales en la zona de estudio. Desafortunadamente la zona sur oriental del departamento cuenta con poca información de este parámetro.

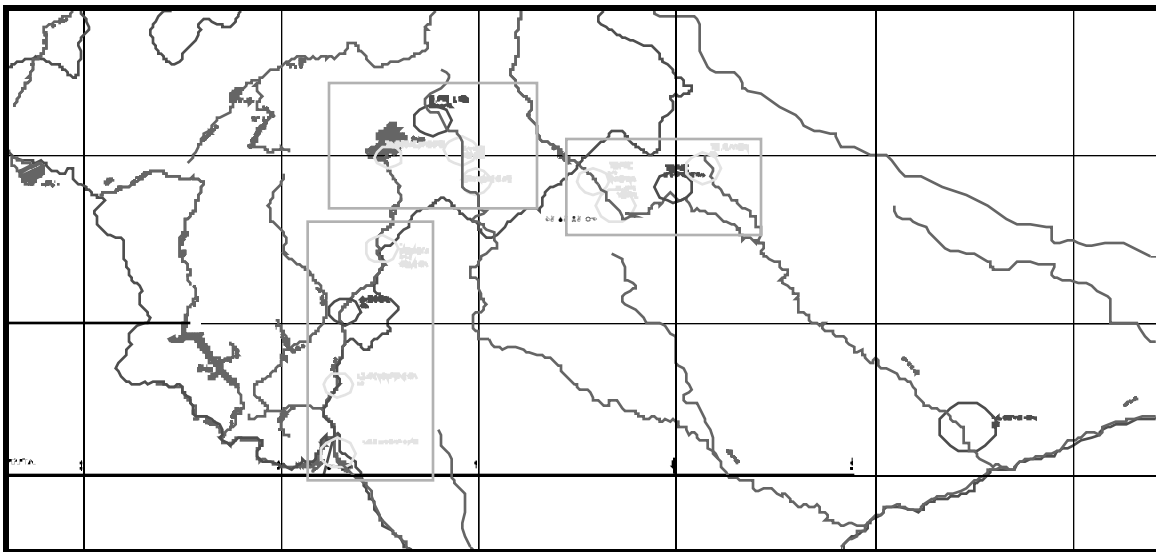


Figura 19 Ubicación de las estaciones de precipitación completas

Fuente: Autor

4.3.4 Análisis de las series de tiempo.

4.3.4.1 Análisis de Homogeneidad

Previo a los análisis de tendencia se llevaron a cabo análisis de homogeneidad de las series hidrológicas usadas en esta investigación, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se utilizó. Para este proceso se usó

una gran cantidad de herramientas gráficas y estadísticas que pueden usarse para soportar este tipo de análisis. Con esto fue posible tener una clara comprensión del comportamiento de la serie antes de los otros análisis.

Primero elaboraron una serie de gráficos estadísticos que permitieron evidenciar cambios o tendencias en las series de tiempo de cada una de las estaciones en donde se pudo observar la variabilidad temporal de dichas series y algunas características como: periodicidad, grado de variabilidad entre otras.

Seguido a esto se procedió a la determinación de los ciclos de precipitación de cada estación y consistió en calcular el promedio mensual multianual para las estaciones, una vez calculados estos valores son graficados en un histograma el cual muestra el comportamiento anual de la serie.

4.3.4.2 Análisis de Tendencia.

Una vez realizados los análisis exploratorios se procedió a analizar estadísticamente las series de tiempo con el fin de determinar tendencias en las series históricas, realizando autocorrelaciones y correlaciones cruzadas con los índices de los fenómenos macroclimáticos para determinar el comportamiento de las variables climáticas dentro de la zona de estudio.

Para el desarrollo de esta parte de la investigación se utilizó la plantilla MAKESENS 1.0 (Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates for the Trend of Annual Data) una hoja electrónica desarrollada por el Finnish Meteorological Institute y programada en Excel para la detección y estimación de las tendencias en series de tiempo de valores anuales.

Esta plantilla fue modificada por sus creadores para correr la prueba estadística nonparametric by direccional de Mann-Kendall, la cual se utilizó para el análisis tendencias. Esta prueba efectúa dos análisis, primero evalúa la tendendencia por la prueba Mann Kendall y en segundo lugar calcula la pendiente de una tendencia lineal se calcula por el método no parametrito SEN.

El método SEN usa un modelo lineal para calcular la pendiente de la tendencia y controla que la diferencia de los residuos sea constante en el tiempo.

Se realizó la prueba parcial Mann-Kendall por medio del programa desarrollado por Anders Grimvall, mejorado por Claudia Libiseller Universidad de Linköping, en colaboración con la universidad sueca de ciencias agrícolas; versión mejorada Septiembre 2003. Esta prueba determina que tan significativa o no puede ser una tendencia por medio de un estadístico.

Estas pruebas se realizaron con el fin de identificar no-homogeneidades en las series detectando la presencia de incrementos o decrecimiento en la serie de tiempo. Si no se presentan relaciones entre las observaciones ni tendencias el test se puede considerar normal y asintóticamente distribuido.

Este test es computado primero separando los datos en sub series obteniendo la estadística de Mann Kendall la cual es sumada para todos los meses para finalmente obtener la estadística estacionaria que nos define la tendencia en la serie de tiempo.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Climatología

En esta región se destacan diferentes climas de acuerdo con el relieve, y es por esto que se encontraron pisos térmicos desde el frío hasta el cálido dependiendo de su localización geográfica y altitud. En la zona de estudio las precipitaciones oscilan entre 700 y 7000 mm al año. La altura sobre el nivel del mar varía entre los 250 y los 3150 m.s.n.m.

El régimen normal de variación temporal de la precipitación se caracteriza por una distribución con ciclos anuales, con un periodo de valores máximos relativos y uno de mínimos relativos. Esta región cuenta con registros pluviométricos localizados desde el municipio de Aquitania hasta el municipio de Yopal.

El análisis de lluvias de esta región reporta unas precipitaciones promediadas multianualmente entre 800mm/año y 4700mm/año con una zona relativamente seca localizada en el municipio de Aquitania, de la cual se reportan precipitaciones promedio de 825 mm/año.

Para determinar la posible influencia de la altura con la precipitación se realizaron regresiones teniendo en cuenta la altura como variable independiente, los resultados obtenidos se mencionan a continuación (Ver Tabla 13 y Figura 20).

Tabla 13 VARIACIÓN PRECIPITACIÓN Vs. ALTITUD

VARIACIONES P Vs A			
ESTACION	AÑO	PMT	ALTITUD
3509511	1995/04	2827.53	255
3509011	1969/04	3566.28	300
3521002	1961/94	2786.11	320
3521501	1975/05	2313.37	325
3521004	1995/04	2224.98	330
3509004	1984/04	4691.73	390
3521005	1996/04	2330.42	395
3519502	1961/04	3683.55	450
3521001	1975/04	3729.72	656
3509006	1984/04	2601.47	1725
3509007	1984/04	1563.61	2575
3519002	1971/04	1273.50	2950
3509001	1965/04	825.98	3047

VARIACIÓN PRECIPITACIÓN Vs. ALTITUD

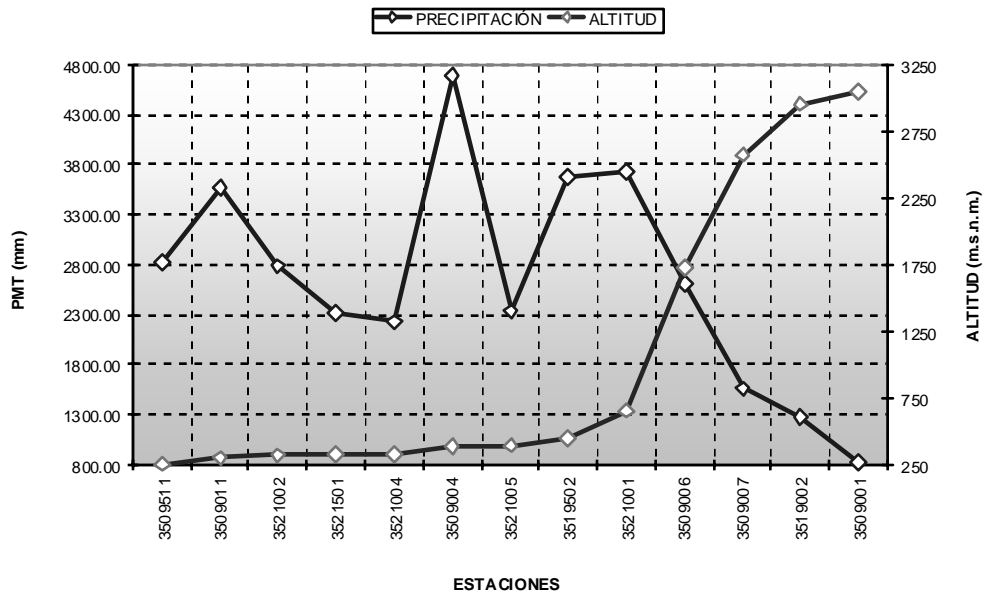


Figura 20 Variación de la precipitación con la altitud

Fuente: Autor.

Estos dos parámetros se encuentran relacionados con un coeficiente $R^2 = 0.5393$ razón por la cual se puede decir que la precipitación de la zona no está directamente relacionada con la altura.

Para determinar la posible influencia de la altura con el caudal se realizaron regresiones teniendo en cuenta la altura como variable independiente, los resultados obtenidos se mencionan a continuación (Ver Tabla 14 y Figura 21).

El rango de caudal medio mensual de la zona varía con la altitud entre los 100 y 3.200 m.s.n.m.

Tabla 14 VARIACIÓN CAUDAL Vs. ALTITUD

VARIACIONES Q Vs A			
ESTACION	AÑO	AMQ	ALTITUD
3521702	1979/01	238.07	134
3521704	1985/03	18.27	224
3521706	1983/03	86.27	271
3521701	1965/03	82.68	343
3509709	1975/03	78.28	451
3521703	1975/03	63.38	481
3509708	1986/03	71.67	700
3509710	1987/03	37.12	1216
3519705	1982/03	14.44	2155
3519702	1965/03	8.18	2831
3509701	1968/03	0.70	3007
3519707	1982/03	1.54	3135

VARIACIÓN CAUDAL Vs. ALTITUD

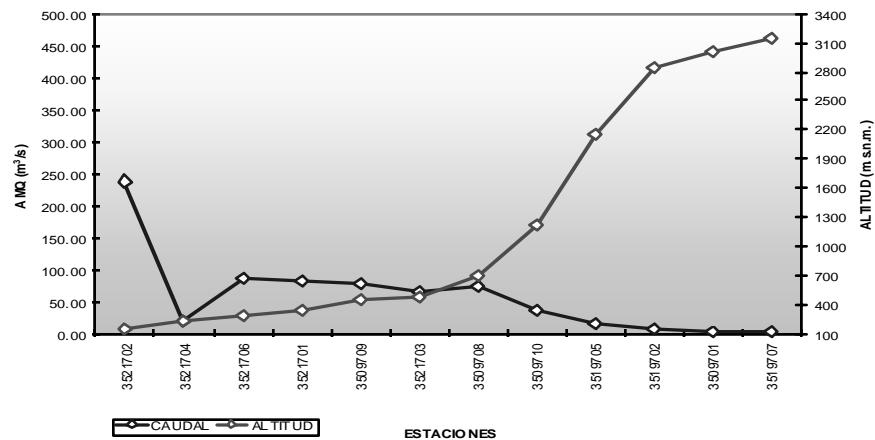


Figura 21 Variación del caudal con la altitud

Fuente: Autor.

Estos dos parámetros se encuentran relacionados con un coeficiente $R^2 = 0.43$, razón por la cual se puede decir que el caudal de la zona no está directamente relacionada con la altura.

Para determinar la posible influencia de la precipitación con el caudal se realizaron regresiones teniendo en cuenta la precipitación como variable independiente, los resultados obtenidos se mencionan a continuación (Ver Tabla 15 y Figura 22).

Tabla 15 VARIACIÓN CAUDAL Vs PRECIPITACIÓN.

VARIACIONES Q Vs P			
ESTACION	AÑO	PMT	AMQ
3509001/3509701	1968/04	825.98	0.70
3519002/3519702	1965/04	1273.50	8.18
3521004/3521704	1985/04	2224.98	18.27
3521005/3521706	1983/04	2330.42	86.27
3509006/3509710	1987/04	2601.47	37.12
3521002/3521701	1975/04	2786.11	82.68
3521001/3521703	1965/04	3729.72	63.38
3509004/3509709	1975/04	4691.73	78.28

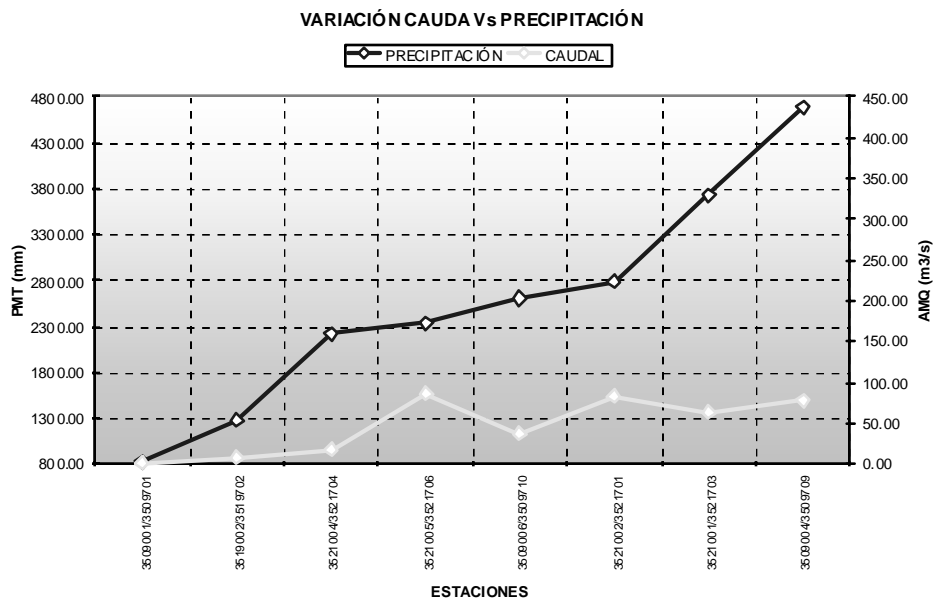


Figura 22 Variación del caudal con la precipitación

Fuente: Autor.

Estos dos parámetros se encuentran relacionados con un coeficiente $R^2 = 0.54$, con lo cual se puede establecer que no existe una total relación entre la precipitación y el caudal de la zona. Un factor que puede influir en los resultados obtenidos es la cercanía de las estaciones de caudal con la precipitación y el área aferente que maneja cada una.

5.2 Comportamiento de la precipitación en la zona de estudio.

Se analizó el comportamiento espacial, para establecer los ciclos de precipitación mensual multianual. La determinación de los ciclos de precipitación de cada estación se realizó por medio calculando el promedio mensual multianual, los valores son graficados en un histograma el cual muestra el comportamiento anual de la serie.

A través de los resultados obtenidos para cada estación fue posible determinar un comportamiento de ciclo anual constante a lo largo de la zona de estudio. Este comportamiento se presenta en las estaciones de Boyacá que limitan con las cuencas que drenan hacia los llanos orientales, es decir las estaciones localizadas en la parte oriental del Boyacá y las ubicadas en el departamento del Casanare.

Su comportamiento se caracteriza por tener un solo ciclo de precipitaciones en todo el año, presentando precipitaciones máximas entre los meses de mayo y agosto, y un periodo de baja precipitación entre diciembre y febrero. Un ejemplo de este tipo de comportamiento puede ser observado en la figura 23.

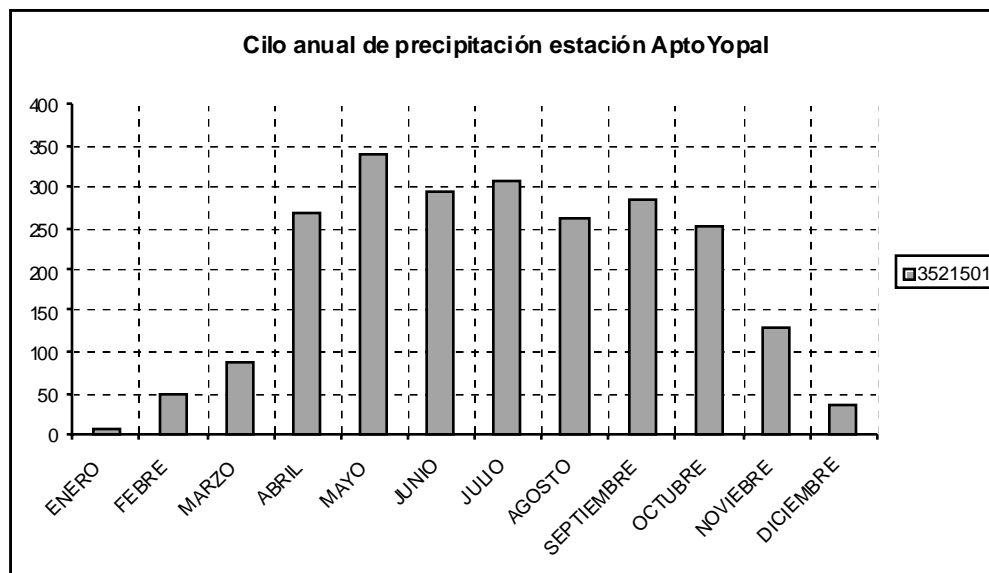


Figura 23 Ciclo anual de precipitación.

Fuente: Autor.

Se observa como el nivel de precipitaciones comienza en el nivel más bajo, asciende hasta llegar a un máximo en el mes mayo y comienza a descender para finalizar nuevamente en el mes de diciembre, mes de muy baja precipitación.

5.3 Comportamiento del caudal en la zona de estudio.

Se analizó el comportamiento espacial, para establecer los ciclos de caudal mensual multianual. La determinación de los ciclos de precipitación de cada estación se realizó por medio calculando el promedio mensual multianual, los valores son graficados en un histograma el cual muestra el comportamiento anual de la serie.

A través de los resultados obtenidos para cada estación fue posible determinar un comportamiento de ciclo anual constante a lo largo de la zona de estudio.

Este comportamiento se presenta en las estaciones de Boyacá que limitan con las cuencas que drenan hacia los llanos orientales, es decir las estaciones localizadas en la parte oriental del Boyacá y las ubicadas en el departamento del Casanare.

Se caracteriza por tener un solo ciclo de precipitaciones en todo el año, presentando precipitaciones máximas entre los meses de mayo y agosto, y un periodo de baja precipitación entre diciembre y febrero. Un ejemplo de este tipo de comportamiento puede ser observado en la figura 24.

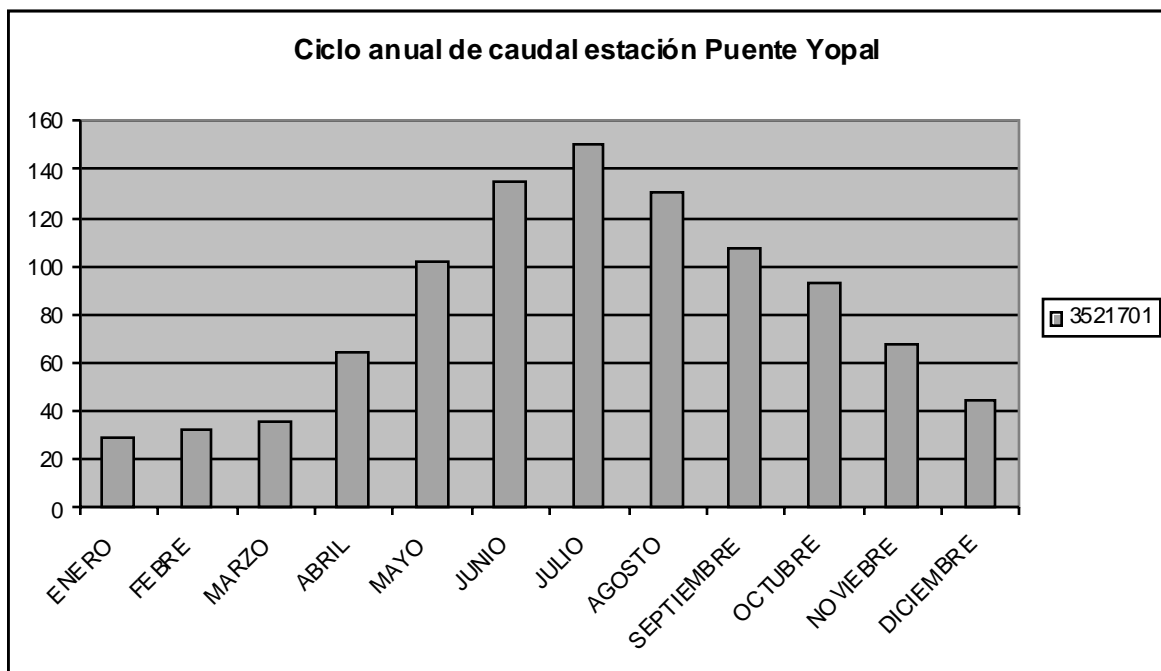


Figura 24 Ciclo anual de caudal.

Fuente: Autor.

Se observa como el nivel de precipitaciones comienza en el nivel más bajo, asciende hasta llegar a un máximo en el mes julio y comienza a descender para finalizar nuevamente en el mes de diciembre, mes de más baja precipitación.

5.4 Análisis de Homogeneidad

Previo a los análisis de tendencia se llevaron a cabo análisis de homogeneidad de las series hidrológicas usadas en esta investigación, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se utilizó. Para este proceso se usó una gran cantidad de herramientas gráficas y estadísticas que pueden usarse para soportar este tipo de análisis.

Los gráficos siguientes se desarrollaron para varias series hidrológicas que se sospechaban tenían cambios o tendencias en la media y/o la varianza. A manera de ejemplo se presentan los gráficos obtenidos para las precipitaciones totales anuales de la estación Apto Yopal, los cuales tiene una tendencia creciente en la media.

Las figuras 25 a la 27 muestran los gráficos obtenidos para esta serie que representan el análisis exploratorio discutido anteriormente. Con esto fue posible tener una clara comprensión del comportamiento de la serie antes de los análisis confirmatorios.

Con el desarrollo de este análisis se encontró que algunas de las series de tiempo de precipitación y caudal muestran en general una tendencia creciente (Fig. 25 y 26) en estaciones como Reventonera, Apto Yopal, Ceibal, Reventonera, Guaicaramo, Puente las Canas y Puente Yopal.

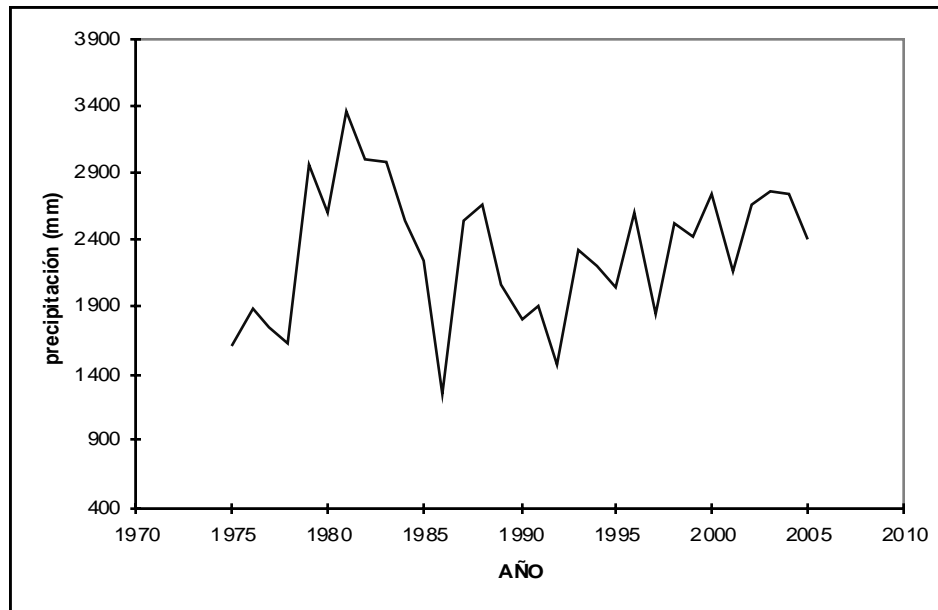


Figura 25 Serie de Precipitaciones Totales Anuales estación Apto Yopal 3521501.

Fuente: Autor.

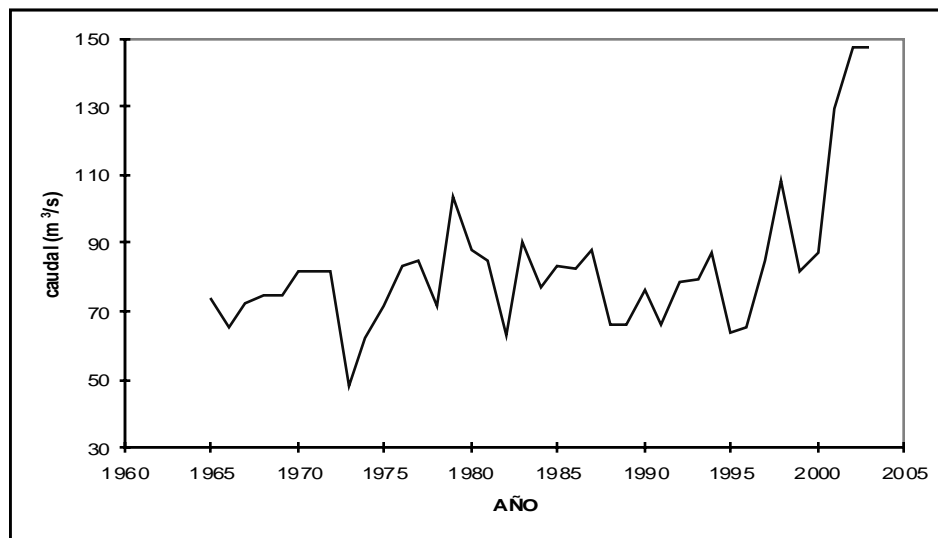


Figura 26 Serie de Caudal Medio Anual estación Puente Yopal 3521701.

Fuente: Autor.

Esta tendencia creciente fue una característica que se reflejó en las gráficas de Masa Simple del las estaciones mencionadas anteriormente, ya que la forma de

ésta no es una línea recta y la pendiente de la gráfica crece levemente con el tiempo indicando que las precipitaciones anuales en esa zona tienen una tendencia creciente (Figura 27 y 28).

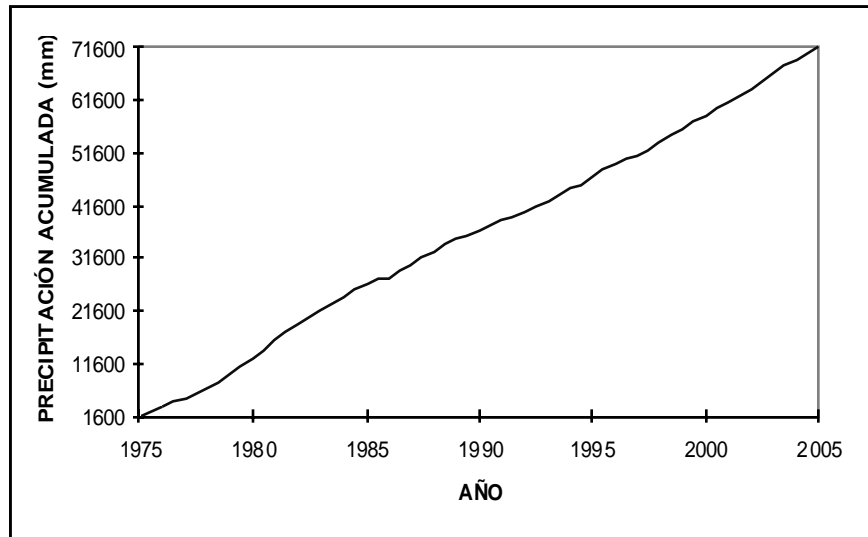


Figura 27 Gráfico de Masa Simple estación Apto Yopal 3521501.

Fuente: Autor.

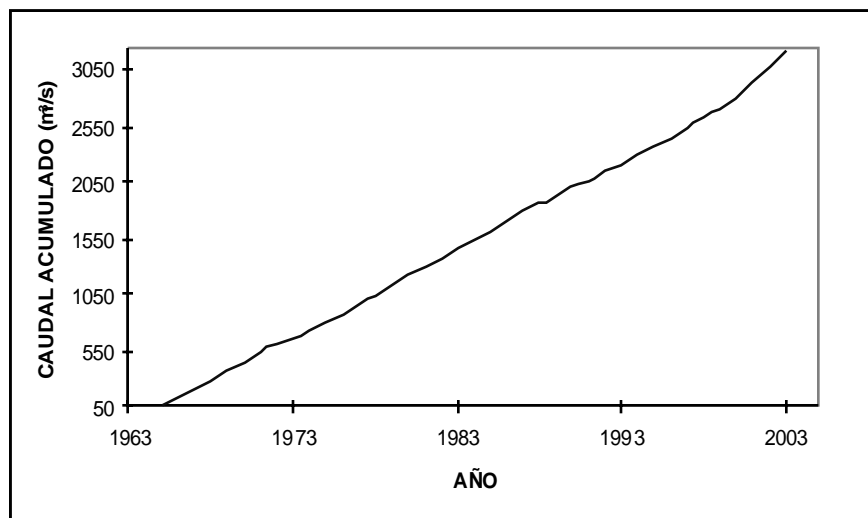


Figura 28 Gráfico de Masa Simple estación Puente Yopal 3521701

Fuente: Autor.

Las gráficas de Masa Residual muestra tres partes diferentes, primero un rápido decrecimiento indicando que en la primera parte las precipitaciones y caudales

están generalmente por debajo del valor medio de la serie (Figura 29 y 30), una segunda parte en la cual la gráfica de Masa Residual fluctúa alrededor de un valor constante (Fig. 30) y una tercera parte con valores que se incrementan indicando que en esta porción las precipitaciones están generalmente por encima de la media (Fig.29 y 30). La forma de esta gráfica es típica de series con una tendencia creciente en la media.

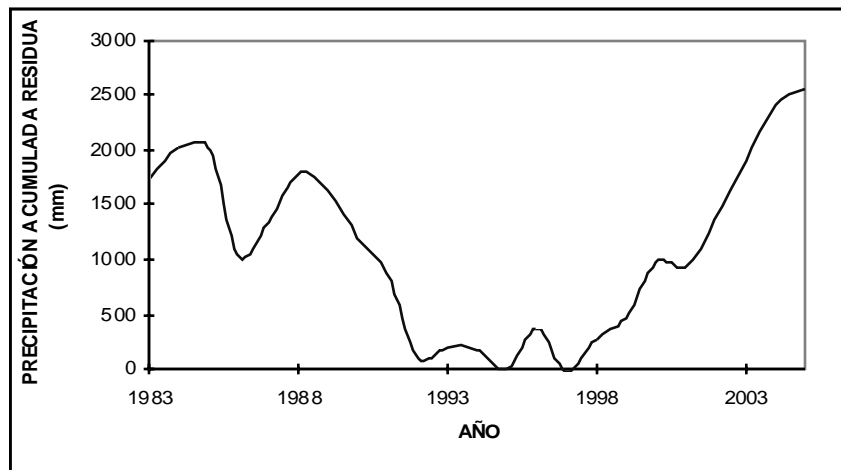


Figura 29 Gráfico de Masa Residual de la estación Apto Yopal 3521501

Fuente: Autor.

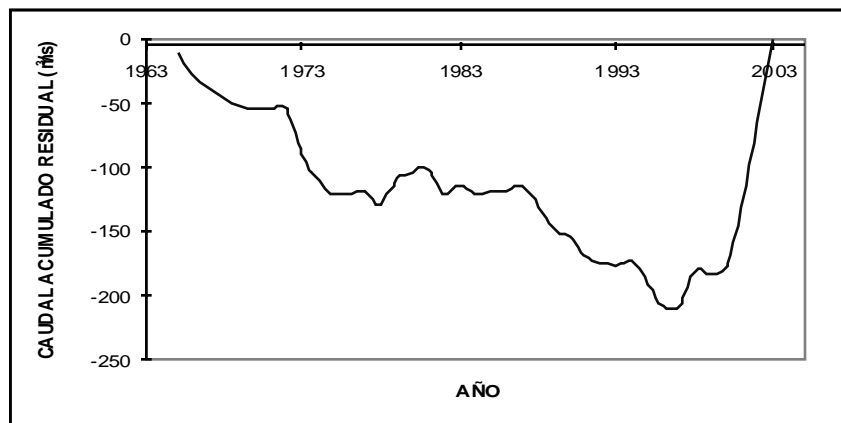


Figura 30 Gráfico de Masa Residual estación Puente Yopal 3521701.

Fuente: Autor.

El comportamiento que mostraron las gráficas de las series de tiempo de precipitación y caudal en estaciones como Tauramena, Yopal y Vado Hondo, reflejó

una tendencia decreciente en las gráficas de la serie de tiempo y Masa Simple (Fig.31 y 32) (Fig. 33 y 34).

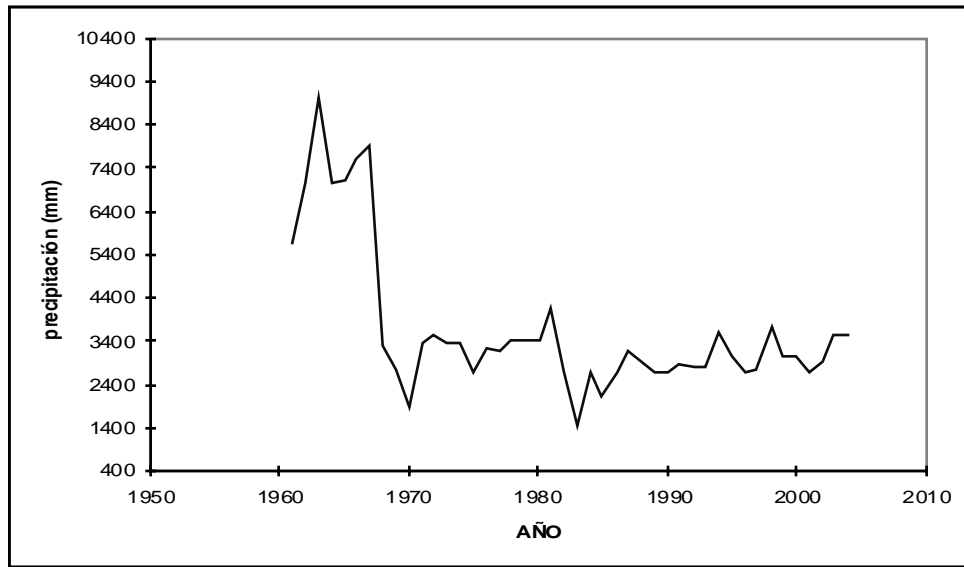


Figura 31 Serie de Precipitaciones Totales Anuales estación Tauramena 3519502.

Fuente: Autor.

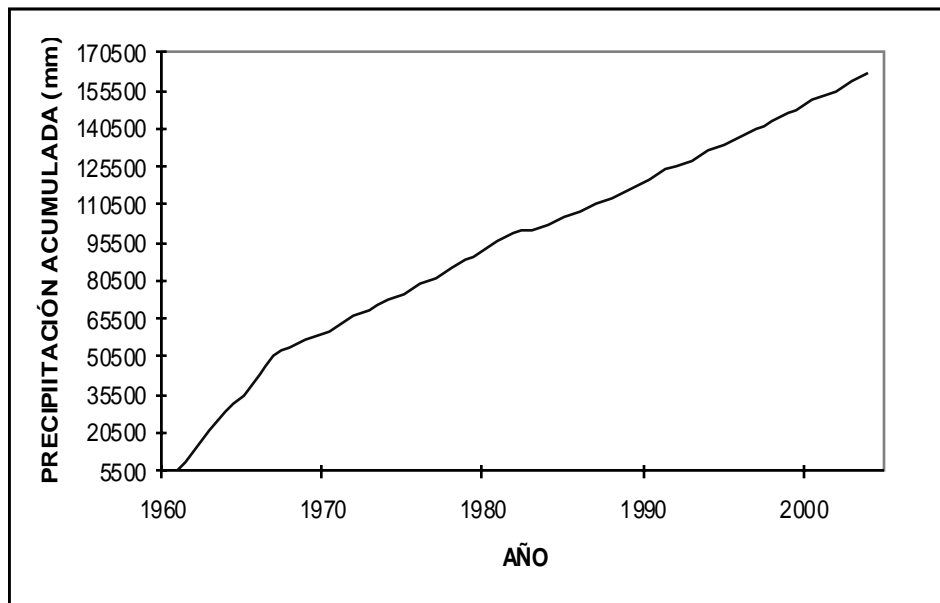


Figura 32 Figura 9. Grafico de Masa Simple estación Tauramena 3519502.

Fuente: Autor.

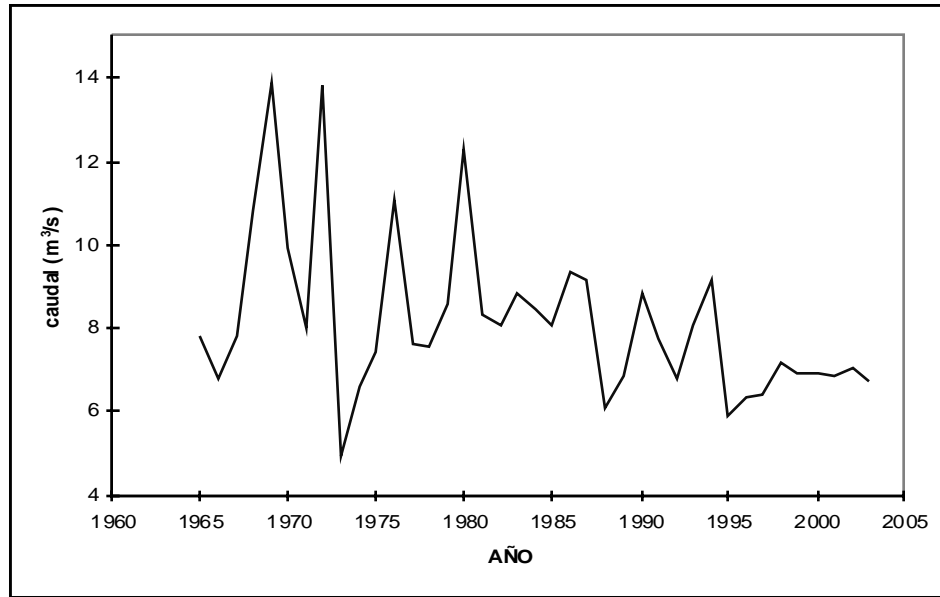


Figura 33 Serie de Caudal Medio Anual estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

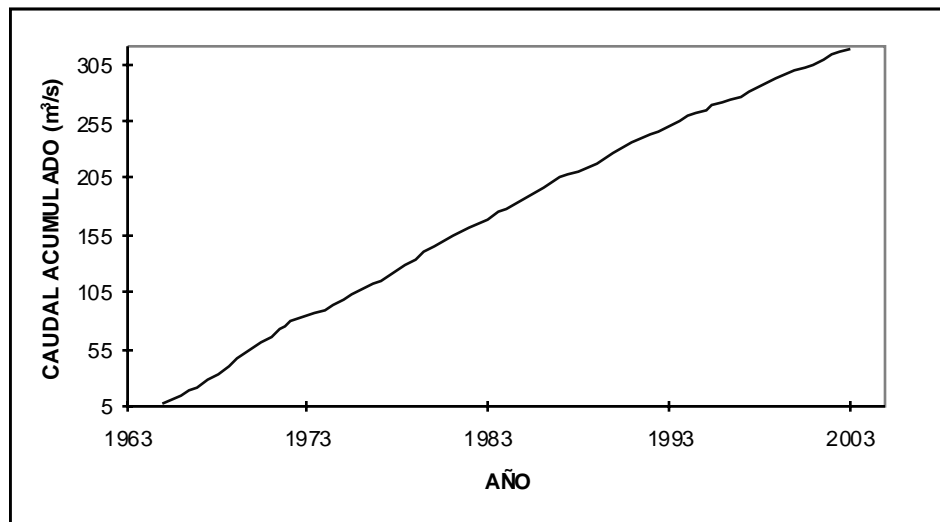


Figura 34 Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

La gráfica de Masa Residual mostró tres partes distintas, un rápido aumento indicando que en la primera parte los caudales y las precipitaciones están generalmente por encima de la media de la serie (Figura 35 y 36), una segunda parte en la cual la gráfica fluctúa alrededor de un valor constante (Figura 35) y finalmente valores que descienden indicando que esta parte las precipitaciones están generalmente por debajo de la media (Figura 35 y 36). La forma de esta gráfica es típica de series con una tendencia decreciente en el valor medio de la serie.

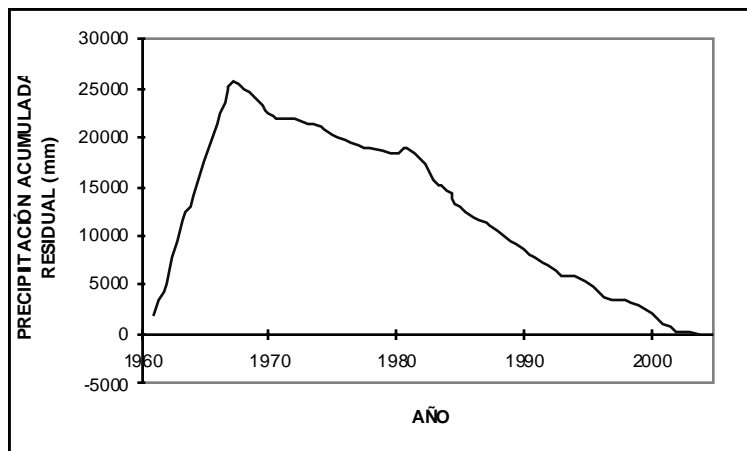


Figura 35 Gráfico de Masa Residual estación Taumamena 3519502.

Fuente: Autor.

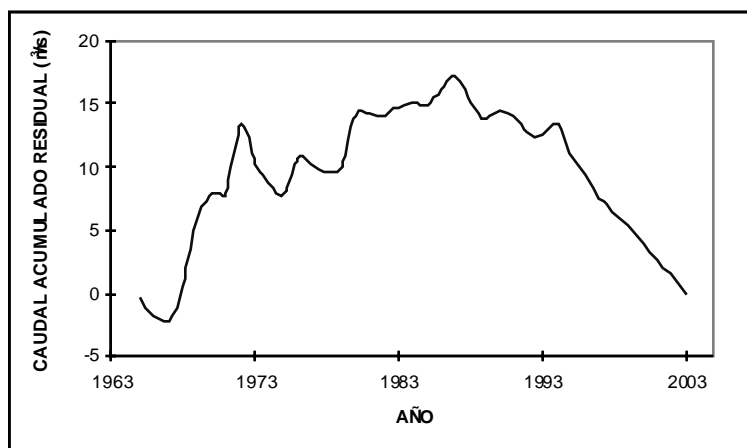


Figura 36 Gráfico de Masa Residual estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

Los histograma realizados (Figura 37 y 38) con la ayuda de la herramienta SPSS 13.0 para Windows no presentó comportamientos simétricos alrededor de un pico mostrando más bien zonas planas o de no concentraciones típicas de series con tendencia (Ricardo A. Smith y Claudia Campuzano, 2000).

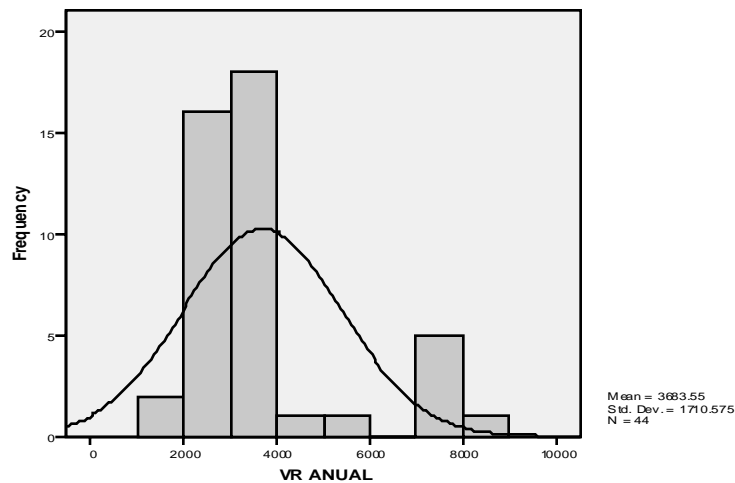


Figura 37 Histograma estación Tauramena 3519502.

Fuente: Autor.

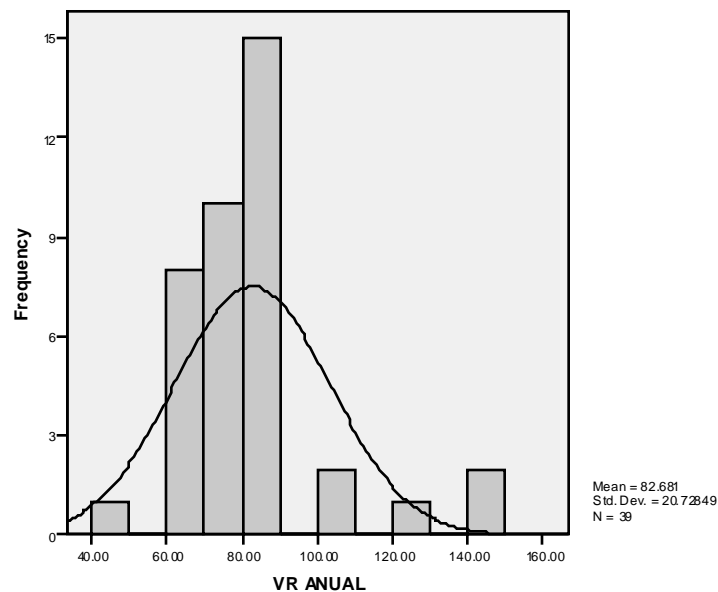


Figura 38 Histograma estación Puente Yopal 3521701.

Fuente: Autor.

5.5 Análisis de tendencias

5.5.1 Tendencia Lineal

Evalúa la tendencia al detectar la presencia de incrementos o decrecimientos, en la serie de tiempo este procedimiento se realizó con la ayuda del software Spell Stat a continuación se presentan como ejemplo las estaciones Vado Hondo y Puente Yopal. (Figuras 30 y 40):

- Vado Hondo:

Media:	8.1797
Varianza	3.9399
Desviación estándar	1.9849
Asimetría	1.3846
Kurtosis	2.0428
Max. Valor	13.85
Min. Valor	4.9337
Tendencia lineal	9.579 : -0.07364

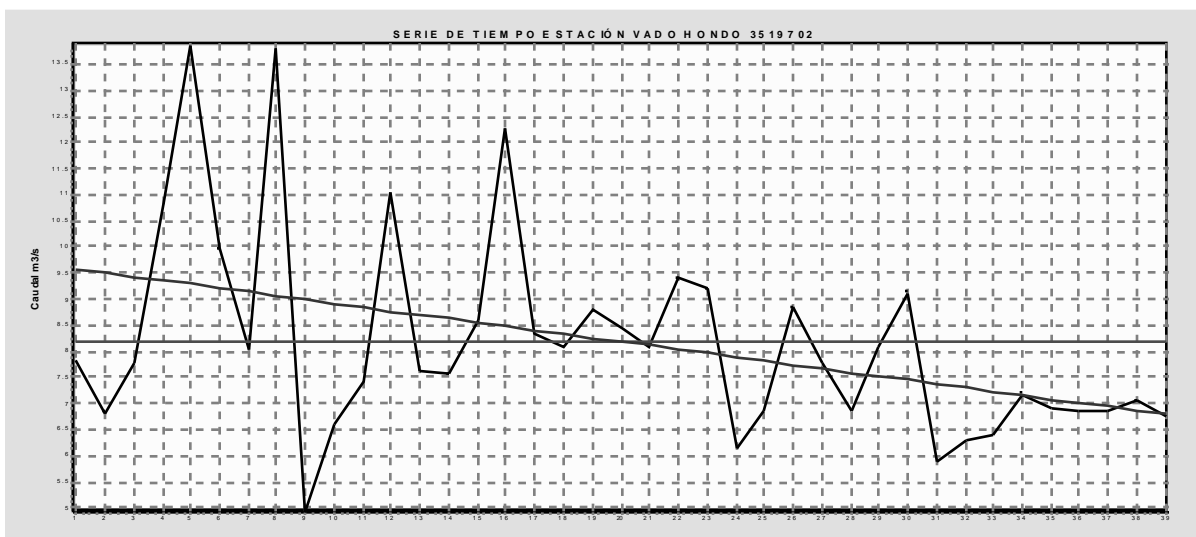


Figura 39 Tendencia lineal estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

- Puente Yopal:

Media:	82.681
Varianza:	429.6705
Desviación estándar	20.7285
Asimetría	1.824
Kurtosis	4
Max. Valor	147.7583
Min. Valor	48.3167
Tendencia lineal	65.372 : 0.91098

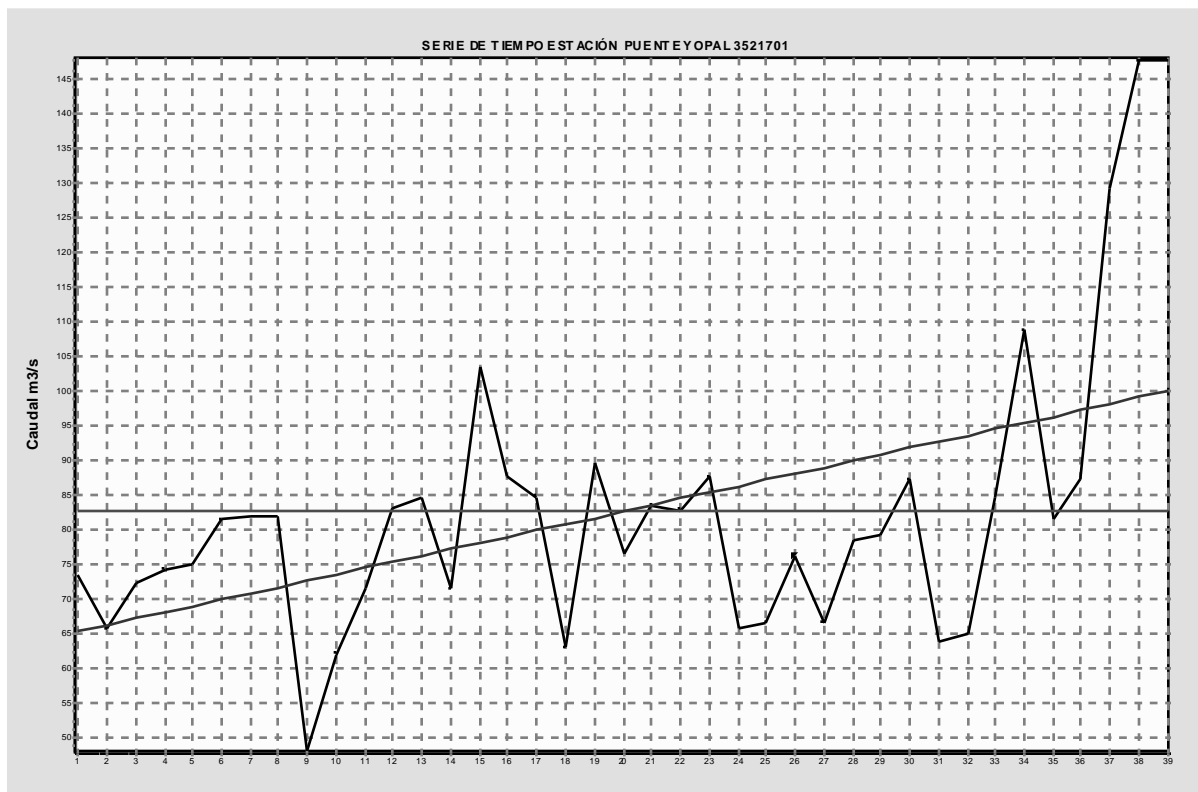


Figura 40 Tendencia lineal estación Puente Yopal 3521701.

Fuente: Autor.

5.5.2 Test Mann Kendall

En los análisis de hidrología se debe garantizar la estacionalidad en las series de tiempo en la media y la varianza, en caso contrario se debe calcular la tendencia ya que nos da un indicio del comportamiento histórico de las series de tiempo.

Teniendo en cuenta el objetivo de esta investigación es la determinación de tendencias no se realizó ningún procedimiento que modificara las características originales de las series.

Este Test fue usado para identificar no homogeneidades en el comportamiento de las variables y asumir la hipótesis de normalidad en las series precipitación, caudal, la relación precipitación-caudal, y relaciones con el índice del ENOS MEI con el fin de establecer y pronosticar cambios ocurridos en la zona de estudio en los últimos años.

La interpretación de los resultados arrojados al aplicar el Test de Mann Kendall a las series de tiempo empleadas en esta investigación se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 16 Interpretación Mann-Kendall.

PMT	PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL
AMQ	CAUDAL MEDIO MENSUAL
MK	TENDENCIA POSITIVA (+)
	TENDENCIA NEGATIVA (-)
p-value	>0.025 Tendencia no significativa en blanco
	<0.025 Tendencia significativa T

5.5.2.1 Precipitación:

En la tabla 17 se puede observar los resultados obtenidos a través del Test Mann Kendall para todas las estaciones usadas. Se encontró que la estación que presento mayor tendencia fue la estación Tauramena siendo ésta una tendencia significativa negativa.

Tabla 17 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN MANN KENDALL.

TENDENCIA PRECIPITACION TOTAL MENSUAL															
CODIGO DE LA ESTACIÓN	NOMBRE	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
3509001	Potrerito	MK-Stat	-0.55	2	1.41	-0.03	1.41	-0.1	1.78	-0.36	0.58	-0.51	-1.88	1.72	1.499
		p-value	0.584	0.045	0.159	0.972	0.159	0.916	0.075	0.718	0.560	0.608	0.061	0.085	0.134
		SIGNIFICADO													
3509004	Reventonera	MK-Stat	-1.49	-1.13	2.36	0.846	1.93	0.242	0.09	0.664	1.03	-0.33	0.272	1.96	1.802
		p-value	0.135	0.26	0.02	0.398	0.05	0.809	0.93	0.506	0.3	0.74	0.786	0.05	0.072
		SIGNIFICADO			T										
3509006	Casadero	MK-Stat	0.604	-0.3	2.05	0.604	0.72	0	-1.75	-0.3	0.97	0.121	-0.18	0.72	0.707
		p-value	0.546	0.76	0.04	0.546	0.47	1	0.08	0.763	0.33	0.904	0.856	0.47	0.48
		SIGNIFICADO													
3509007	Guamo Sisbaca	MK-Stat	0.121	-0.63	-0.6	0.06	0.42	-1.15	-1.03	-0.36	-1.9	-0.33	-1.87	0.12	-1.225
		p-value	0.904	0.53	0.55	0.952	0.67	0.251	0.3	0.717	0.06	0.74	0.061	0.9	0.221
		SIGNIFICADO													
3509011	Don Antonio	MK-Stat	-0.74	0.42	1.04	-0.35	0	-0.86	1.36	0.259	0.46	-0.84	0.804	1.93	0.514
		p-value	0.461	0.67	0.3	0.723	1	0.391	0.17	0.796	0.64	0.398	0.422	0.05	0.607
		SIGNIFICADO													
3509511	Huerta la Grande	MK-Stat	0.096	-1.16	-0.63	0.805	-0.63	-0.09	-0.45	0.805	1.52	0.626	0.089	1.88	0.696
		p-value	0.923	0.24	0.53	0.421	0.53	0.929	0.65	0.421	0.13	0.531	0.929	0.06	0.487
		SIGNIFICADO													
3519002	Toquilla	MK-Stat	-0.34	0.27	0.7	-0.27	0.22	-0.15	-0.21	0.875	1.3	0.163	-1.32	0.03	0.27
		p-value	0.732	0.79	0.49	0.79	0.82	0.882	0.84	0.382	0.19	0.87	0.187	0.98	0.787
		SIGNIFICADO													
3519502	Tauramena	MK-Stat	0.439	0.74	0.05	-1.67	-2.15	-2.82	-1.94	-1.81	-1.49	-1.94	-1.72	-1.33	-2.743
		p-value	0.661	0.46	0.96	0.095	0.03	0.005	0.05	0.07	0.14	0.052	0.086	0.19	0.006
		SIGNIFICADO						T							T
3521001	Morro El	MK-Stat	0.747	0.46	1.16	-0.66	0.7	0.375	0.73	-0.87	1.36	-0.54	0.946	1.79	1.228
		p-value	0.455	0.64	0.25	0.509	0.49	0.708	0.46	0.382	0.18	0.592	0.344	0.07	0.22
		SIGNIFICADO													
3521002	Yopal	MK-Stat	-0.05	0.89	-1.35	-0.13	-1.07	-1.16	-1.26	-0.22	1.16	-1.23	-0.87	-2.99	-1.833
		p-value	0.963	0.37	0.18	0.894	0.29	0.248	0.21	0.824	0.25	0.219	0.382	0	0.067
		SIGNIFICADO												T	
3521004	Molinos	MK-Stat	-0.09	-1.09	0.27	0.626	0.63	-0.27	-1.26	1.699	-0.27	0.805	0.984	1.52	0.916
		p-value	0.926	0.28	0.79	0.531	0.53	0.788	0.21	0.089	0.79	0.421	0.325	0.13	0.36
		SIGNIFICADO													
3521005	Chaparrera La	MK-Stat	0	-0.11	-0.42	-0.83	0.83	0	-1.46	-0.21	-0.83	-0.83	1.043	-0.21	-0.883
		p-value	1	0.92	0.68	0.404	0.4	1	0.14	0.835	0.4	0.404	0.297	0.83	0.377
		SIGNIFICADO													
3521501	Apto yopal	MK-Stat	1.52	1.53	0.76	0.391	0.63	1.241	0.66	1.037	1.12	0.476	-0.71	2.03	1.846
		p-value	0.128	0.13	0.44	0.696	0.53	0.215	0.51	0.3	0.26	0.634	0.475	0.04	0.065
		SIGNIFICADO													

5.5.2.2 Caudal:

En la tabla 18 se puede ver los resultados obtenidos a través del Test Mann Kendall para todas las estaciones de caudal usadas. Se encontró que la estación que presento mayor tendencia fue la estación Puente Yopal siendo ésta una tendencia positiva.

Tabla 18 RESULTADOS DE CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.

TENDENCIA PRECIPITACION TOTAL MENSUAL															
CODIGO DE LA ESTACION	NOMBRE	PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
3509001	Potrerito	MK-Stat	-0.55	2	1.41	-0.03	1.41	-0.1	1.78	-0.36	0.58	-0.51	-1.88	1.72	1.499
		p-value	0.584	0.045	0.159	0.972	0.159	0.916	0.075	0.718	0.560	0.608	0.061	0.085	0.134
		SIGNIFICADO													
3509004	Reventonera	MK-Stat	-1.49	-1.13	2.36	0.846	1.93	0.242	0.09	0.664	1.03	-0.33	0.272	1.96	1.802
		p-value	0.135	0.26	0.02	0.398	0.05	0.809	0.93	0.506	0.3	0.74	0.786	0.05	0.072
		SIGNIFICADO			T										
3509006	Casadero	MK-Stat	0.604	-0.3	2.05	0.604	0.72	0	-1.75	-0.3	0.97	0.121	-0.18	0.72	0.707
		p-value	0.546	0.76	0.04	0.546	0.47	1	0.08	0.763	0.33	0.904	0.856	0.47	0.48
		SIGNIFICADO													
3509007	Guamo Sisbaca	MK-Stat	0.121	-0.63	-0.6	0.06	0.42	-1.15	-1.03	-0.36	-1.9	-0.33	-1.87	0.12	-1.225
		p-value	0.904	0.53	0.55	0.952	0.67	0.251	0.3	0.717	0.06	0.74	0.061	0.9	0.221
		SIGNIFICADO													
3509011	Don Antonio	MK-Stat	-0.74	0.42	1.04	-0.35	0	-0.86	1.36	0.259	0.46	-0.84	0.804	1.93	0.514
		p-value	0.461	0.67	0.3	0.723	1	0.391	0.17	0.796	0.64	0.398	0.422	0.05	0.607
		SIGNIFICADO													
3509511	Huerta la Grande	MK-Stat	0.096	-1.16	-0.63	0.805	-0.63	-0.09	-0.45	0.805	1.52	0.626	0.089	1.88	0.696
		p-value	0.923	0.24	0.53	0.421	0.53	0.929	0.65	0.421	0.13	0.531	0.929	0.06	0.487
		SIGNIFICADO													
3519002	Toquilla	MK-Stat	-0.34	0.27	0.7	-0.27	0.22	-0.15	-0.21	0.875	1.3	0.163	-1.32	0.03	0.27
		p-value	0.732	0.79	0.49	0.79	0.82	0.882	0.84	0.382	0.19	0.87	0.187	0.98	0.787
		SIGNIFICADO													
3519502	Tauramena	MK-Stat	0.439	0.74	0.05	-1.67	-2.15	-2.82	-1.94	-1.81	-1.49	-1.94	-1.72	-1.33	-2.743
		p-value	0.661	0.46	0.96	0.095	0.03	0.005	0.05	0.07	0.14	0.052	0.086	0.19	0.006
		SIGNIFICADO						T							T
3521001	Morro El	MK-Stat	0.747	0.46	1.16	-0.66	0.7	0.375	0.73	-0.87	1.36	-0.54	0.946	1.79	1.228
		p-value	0.455	0.64	0.25	0.509	0.49	0.708	0.46	0.382	0.18	0.592	0.344	0.07	0.22
		SIGNIFICADO													
3521002	Yopal	MK-Stat	-0.05	0.89	-1.35	-0.13	-1.07	-1.16	-1.26	-0.22	1.16	-1.23	-0.87	-2.99	-1.833
		p-value	0.963	0.37	0.18	0.894	0.29	0.248	0.21	0.824	0.25	0.219	0.382	0	0.067
		SIGNIFICADO												T	
3521004	Molinos	MK-Stat	-0.09	-1.09	0.27	0.626	0.63	-0.27	-1.26	1.699	-0.27	0.805	0.984	1.52	0.916
		p-value	0.926	0.28	0.79	0.531	0.53	0.788	0.21	0.089	0.79	0.421	0.325	0.13	0.36
		SIGNIFICADO													
3521005	Chaparrera La	MK-Stat	0	-0.11	-0.42	-0.83	0.83	0	-1.46	-0.21	-0.83	-0.83	1.043	-0.21	-0.883
		p-value	1	0.92	0.68	0.404	0.4	1	0.14	0.835	0.4	0.404	0.297	0.83	0.377
		SIGNIFICADO													
3521501	Apto yopal	MK-Stat	1.52	1.53	0.76	0.391	0.63	1.241	0.66	1.037	1.12	0.476	-0.71	2.03	1.846
		p-value	0.128	0.13	0.44	0.696	0.53	0.215	0.51	0.3	0.26	0.634	0.475	0.04	0.065
		SIGNIFICADO													

5.5.2.3 Precipitación-Caudal:

En la tabla 19 se puede ver los resultados obtenidos a través del Test Mann Kendall al relacionar las estaciones de precipitación con las de caudal usadas. Se encontró que la presencia de tendencias en las series de precipitación no genera ningún tipo de tendencia significativa en el caudal.

Tabla 19 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN - CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.

TENDENCIA PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL				
		MANN-KENDALL		
CODIGO	ESTACIÓN	PMT - AMQ		
		MK	p-value	Tendencia
3509001/3509701	Potrerito	0.68033297	0.24814683	
3509004/3509709	Reventonera	1.39543965	0.08144165	
3509006/3509710	Casadero	1.5098723	0.06553801	
3509011/3510704	Guamo Sisbaca	1.64698049	0.04978103	
3519002/3519702	Don Antonio	-0.80782716	0.20959504	
3521001/3521703	Huerta la Grande	-1.28235869	0.09985842	
3521002/3521701	Toquilla	0.56610566	0.28566098	
3521004/3521704	Tauramena	-0.92629524	0.17714628	
3521005/3521706	Morro El	0.90371757	0.18307259	

5.5.2.4 MEI – Precipitación:

En la tabla 20 se pueden observar los resultados obtenidos a través del Test Mann Kendall al relacionar las estaciones de precipitación con el índice del fenómeno ENOS (EL Niño – Oscilación del Sur). Se encontró que la presencia de este fenómeno en relación con las series de precipitación genera un aumento en la tendencia aunque esta de acuerdo al test no es significativa.

Tabla 20 RESULTADOS DE MEI PRECIPITACIÓN SEGÚN MANN KENDALL.

TENDENCIA PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL				
CODIGO	ESTACIÓN	MANN-KENDALL		
		MEI - PMT		
		MK	p-value	Tendencia
3509001	Potrerito	1.60255629	0.05451633	
3509004	Reventonera	1.22292035	0.11067989	
3509006	Casadero	0.65310451	0.25684445	
3509007	Guamo Sisbaca	-0.79012741	0.21472668	
3509011	Don Antonio	0.18475628	0.4267101	
3509511	Huerta la Grande	-0.23951491	0.40535317	
3519002	Toquilla	0.09689921	0.46140322	
3519502	Tauramena	-1.61868804	0.0527572	
3521001	Morro El	0.73011194	0.23266088	
3521002	Yopal	-0.99046832	0.16097263	
3521004	Molinos	0.75814948	0.22418075	
3521005	Chaparrera La	-0.16458924	0.43463365	
3521501	Apto yopal	1.37163214	0.08508899	

5.5.2.5 MEI – Caudal

En la tabla 21 se pueden observar los resultados obtenidos a través del Test Mann Kendall al relacionar las estaciones de caudal con el índice del fenómeno ENOS (EL Niño – Oscilación del Sur). Se encontró que la presencia de este fenómeno en relación con las series de caudal genera un incremento en la tendencia en estaciones como Puente Yopal y Mombita Puente Romera.

Tabla 21 RESULTADOS DE MEI CAUDAL SEGÚN MANN KENDALL.

TENDENCIA EN CAUDALES MEDIOS MENSUALES				
		MANN-KENDALL		
CODIGO	ESTACIÓN	MEI - AMQ		
		MK	p-value	Tendencia
3509701	desaguadero	-0.59911345	0.27454862	
3509708	ceibal el	1.31388424	0.09444258	
3509709	reventonera la	1.47870095	0.06961013	
3509710	mombita pte romera	2.33159408	0.00986103	T
3510704	guaicaramo	1.50928059	0.06561355	
3519702	vado hondo	-1.82194461	0.0342317	
3519705	rancherías	0.15579042	0.43809911	
3519707	pte las canas	0.88011234	0.18939923	
3521701	puente yopal	2.63161182	0.00424904	T
3521702	estacion la	1.16958745	0.12108351	
3521703	puente la cabaña	-0.59367102	0.27636609	
3521704	pte carretera	0.292099	0.38510547	
3521706	playon el	-1.46114345	0.07198804	

5.5.3 Registros Makesens 1.0.

Efectuado sobre las series de precipitación y caudal, con el fin de establecer y pronosticar cambios ocurridos en la zona de estudio en los últimos años. El procedimiento empleado consistió principalmente en la aplicación de los Test de Mankesens a las series de tiempo empleadas en esta investigación.

Este Test primero evalúa la tendencia por la prueba Mann Kendall y luego usa un modelo lineal para calcular la pendiente de la tendencia y controla que la diferencia entre los residuos sea constante en el tiempo.

La interpretación de los resultados arrojados al aplicar este Test a las series de tiempo empleadas se puede observar en la tabla 22.

Tabla 22 VARIACIÓN CAUDAL Vs PRECIPITACIÓN.

TENDENCIA :	NEGATIVO DISMINUCION
	POSITIVO AUMENTO
NIVEL DE SIGNIFICADO:	XXX = 0.1 %
	XX = 1 %
	X = 5 %
	T = 10 %
	en blanco > 10 %

En la tabla 22 se puede observar que la mayor tendencia se presenta para valores inferiores al 0.001.

5.5.3.1 Precipitación:

En la tabla 17 se puede observar los resultados obtenidos a través del Test Makesens para las estaciones usadas. Se encontró que la estación que presentó mayor tendencia de acuerdo con la tabla 22 fue la estación Tauramena.

De acuerdo con la figura 41 se observa que se cumple con las premisas de los métodos usados por este Test encontrando que las tendencias de las series tenidas en cuenta disminuyen monotónicamente.

Tabla 23 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN SEGÚN MAKESENS

TENDENCIA PRECIPITACION TOTAL MENSUAL															
CODIGO DE LA ESTACION	NOMBRE	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
3509001	Potrerito	TENDENCIA PMT	-0.067	0.317	0.479	-0.009	0.634	-0.017	0.551	-0.175	0.209	-0.148	-0.573	0.382	2.087
		SIGNIFICADO		*					+					+	+
3509004	Reventonera	TENDENCIA PMT	-0.78	-1.38	7.96	5.714	14.5	1.094	0.72	3.5	6.35	-2.48	1.161	5.29	27.64
		SIGNIFICADO			*			+							+
3509006	Casadero	TENDENCIA PMT	0.506	-0.64	4.8	2.009	2.67	0.16	-4.9	-1.54	2.05	0.186	-0.19	1.72	5.942
		SIGNIFICADO			*					+					
3509007	Guamo Sisbaca	TENDENCIA PMT	0.085	-0.43	-0.48	0.125	1.11	-2.48	-4.92	-0.87	-1.97	-0.93	-2.2	0.09	-10.54
		SIGNIFICADO									+			+	
3509011	Don Antonio	TENDENCIA PMT	-0.06	0.15	1.34	-1.05	0	-2.28	2.25	0.257	0.97	-2.06	1.09	2.22	4.928
		SIGNIFICADO													+
3509511	Huerta la Grande	TENDENCIA PMT	0	-10.9	-4.14	8.729	-7.63	-1.76	-2	3.9	21	6.178	0.16	7.1	48.32
		SIGNIFICADO													+
3519002	Toquilla	TENDENCIA PMT	0	0.02	0.3	-0.27	0.38	-0.21	-0.3	1.167	1	0.107	-0.82	0.01	4.45
		SIGNIFICADO													
3519502	Tauramena	TENDENCIA PMT	0	0.14	0.04	-2.58	-4.65	-9.72	-6.39	-3.84	-1.99	-3.78	-2.27	-1.1	-24.85
		SIGNIFICADO					+	*	**	+	+	+	+		*
3521001	Morro El	TENDENCIA PMT	0	0.36	2.44	-2.53	2.8	1.182	2.2	-2	3.92	-1.56	2.14	2.13	6.179
		SIGNIFICADO													+
3521002	Yopal	TENDENCIA PMT	0	0.39	-1.41	-0.29	-2.15	-1.66	-2.42	-0.67	1.43	-2.14	-0.7	-1.55	-10.44
		SIGNIFICADO												**	
3521004	Molinos	TENDENCIA PMT	0	-3.57	0.78	14.67	4.64	-6.8	-11.2	17.75	-2.72	5.48	6.514	6.03	31.38
		SIGNIFICADO													
3521005	Chaparrera La	TENDENCIA PMT	0	0	-1.13	-17.6	26.7	-1.27	-16.9	-1.88	-7.03	-5.45	10.25	-2.32	-30.73
		SIGNIFICADO													
3521501	Apto yopal	TENDENCIA PMT	0	0.6	0.78	0.5	2.22	2.189	1.89	2.115	1.93	0	-1.2	0.08	10.74
		SIGNIFICADO													

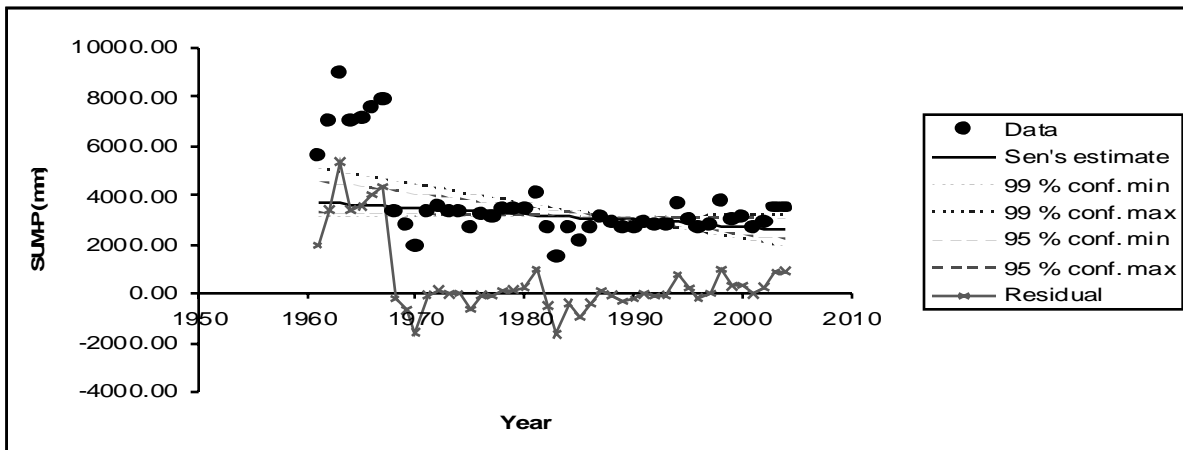


Figura 41 Gráfico de Makesens estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

5.5.3.2 Caudal:

En la tabla 24 se puede ver los resultados obtenidos a través del Test Makesens para las estaciones de caudal usadas. Se encontró que la estaciones que presentaron mayor tendencia fueron la estación Puente Yopal y EL Ceibal con tendencia positiva y Vado Hondo con tendencia significativa negativa.

Tabla 24 RESULTADOS DE CAUDAL SEGÚN MAKESENS.

TENDENCIA EN CAUDALES MEDIOS MENSUALES															
CODIGO DE LA ESTACIÓN	NOMBRE	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
3509701	desaguadero	TENDENCIA AMO	0	0	0	-0	-0	2E-04	0	0.022	0.01	-0	0	0	0.003
		SIGNIFICADO									+				
3509708	ceibal el	TENDENCIA AMO	0.34	0.15	0.23	0.445	2.79	3.6	1.06	4.8	3.5	1.795	1.889	0.21	1.970
		SIGNIFICADO	+				+			+	+				
3509709	reventonera la	TENDENCIA AMO	0.273	0.34	0.32	-0.17	0.96	-0.46	1.81	0.632	1.65	1.2	-0.12	-0.13	0.649
		SIGNIFICADO	**	**							+	*			
3509710	mombita pte romera	TENDENCIA AMO	0.334	0.27	0.45	0.743	2.21	0.888	-0.57	0.07	-0.01	-0.62	0.075	0.39	0.140
		SIGNIFICADO	*	*	*										
3510704	guaicaramo	TENDENCIA AMO	1.784	2.45	2.73	3.77	2.7	-5.41	2.19	7.348	6.78	3.12	0.162	2.09	2.209
		SIGNIFICADO	**	**	*						+	+			
3519702	vado hondo	TENDENCIA AMO	-0.01	-0.01	0.01	-0.06	-0.05	-0.11	-0.2	-0.11	-0.04	-0.04	0	0.04	-0.057
		SIGNIFICADO								+				+	*
3519705	rancherías	TENDENCIA AMO	-0.02	-0.04	-0.06	-0.06	0.05	-0.24	-0.09	0	0.1	-0.01	0.05	0	-0.022
		SIGNIFICADO													
3519707	pte las canas	TENDENCIA AMO	0.008	0	0	0	0.01	0	0	0.059	0.03	0	0.02	0.03	0.014
		SIGNIFICADO	+												
3521701	puente yopal	TENDENCIA AMO	0.25	0.26	0.4	0.295	1.02	1.4	1.22	0.954	1.24	0.969	0.282	0.16	0.493
		SIGNIFICADO			+		*	*	*	+	**	**			
3521702	estacion la	TENDENCIA AMO	1.576	2.43	1.81	-1.03	0	-9.22	-1.32	-1.63	0.43	-0.22	0.325	2.86	-0.168
		SIGNIFICADO	*	**				*						**	
3521703	puente la cabaña	TENDENCIA AMO	-0.87	-0.65	-0.79	-0.11	0.36	-0.31	0.88	0.347	0.21	-0.26	-0.19	-0.45	-0.140
		SIGNIFICADO	*	+											
3521704	pte carretera	TENDENCIA AMO	-0.01	-0.01	0	0.067	-0.48	-0.52	-0.73	-0.4	-0.36	0	-0.16	-0.1	-0.062
		SIGNIFICADO							*						
3521706	playon el	TENDENCIA AMO	-0.01	-0.1	-0.09	0.517	-1.47	-0.67	-1.52	-1.23	-2.09	-1.69	-0.78	-0.12	-0.803
		SIGNIFICADO													

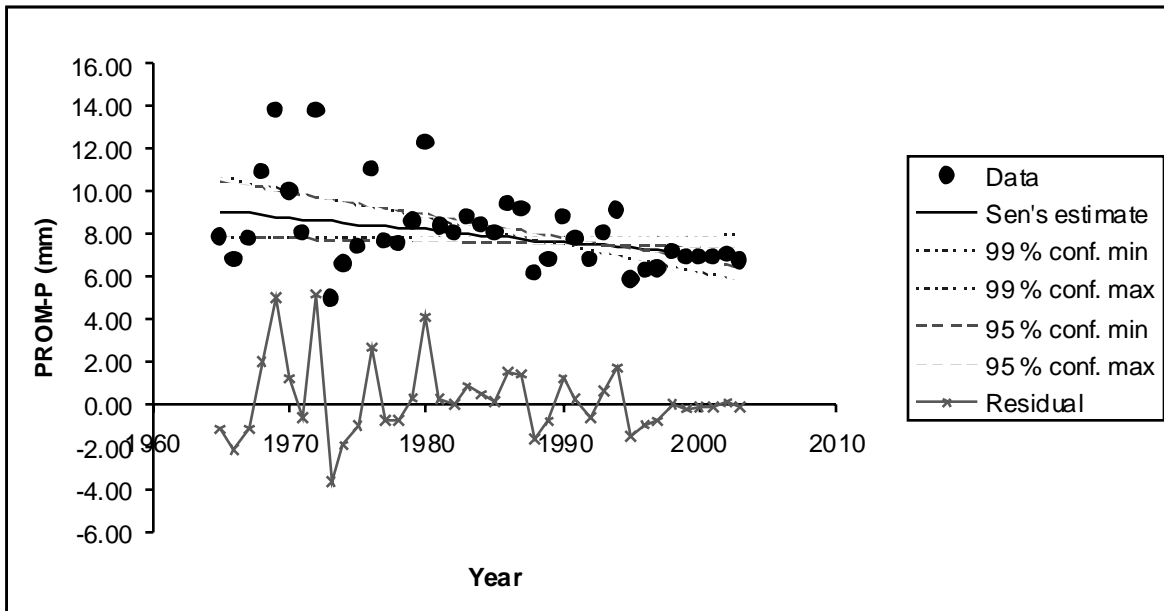


Figura 42 Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

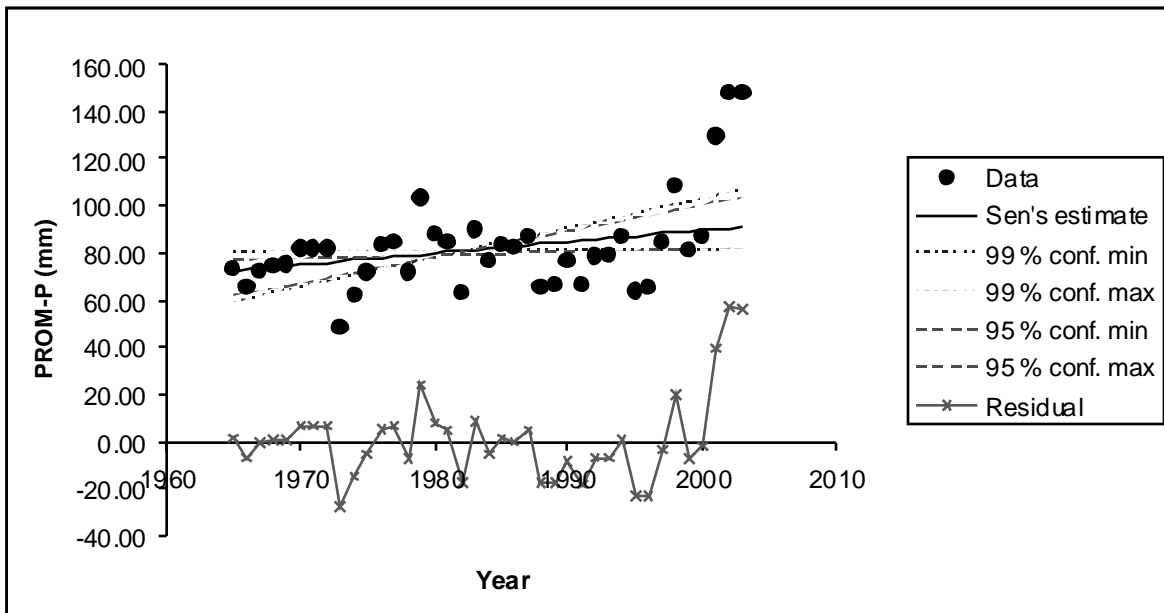


Figura 43 Gráfico de Masa Simple estación Vado Hondo 3519702.

Fuente: Autor.

Los cálculos estadísticos tienen un alto nivel de importancia teniendo en cuenta que el ángulo entre las líneas de confianza es pequeño (figura 42 y 43). Además

de lo anterior se observan los residuos vemos que éstos parecen ser de una distribución aleatoria que indica que el modelo lineal puede aplicarse.

Los métodos usados cumplen con sus premisas teniendo en cuenta que las tendencias encontradas en las series de tiempo empleadas disminuyen monótonicamente (figura 42 y 43).

5.5.4 Comparación de resultados del test de Mann-kendall y Makesens 1.0

5.5.4.1 Precipitación:

Como se observa en la tabla 25 los resultados obtenidos por los dos Test estadísticos concuerdan en gran medida. Los resultados de la estadística estacionaria de Mann Kendall (MK-Stat) concuerdan con la estadística Z del test Makesens. Estos análisis difieren un poco teniendo en cuenta el grado de significancia por esta razón el Test Mann Kendall no resalta tendencias percibidas por el test Makesens.

Tabla 25 MAKENDALL VS MAKESENS PRECIPITACIÓN

ANÁLISIS DE TENDENCIAS									
PRECIPITACIÓN MENSUAL									
PMT 3519502 Tauramena									
SERIE DE TIEMPO	Año Inicial	Año Final	n	MAKESENS			Mann-Kendall		
				Test Z	Signific.	Q	MK-Stat	p-value	Signific.
ENE-P (mm)	1961	2004	44	0.43		0.000	0.43878314	0.660818678	
FEB-P (mm)	1961	2004	44	0.73		0.138	0.740097195	0.45924102	
MAR-P (mm)	1961	2004	44	0.04		0.036	0.050573899	0.959665062	
ABR-P (mm)	1961	2004	44	-1.66	+	-2.584	-1.668938674	0.095129534	
MAY-P (mm)	1961	2004	44	-2.14	*	-4.652	-2.154448107	0.031205047	
JUN-P (mm)	1961	2004	44	-2.81	**	-9.719	-2.822023576	0.004772167	T
JUL-P (mm)	1961	2004	44	-1.93	+	-6.394	-1.942137081	0.052120508	
AGO-P (mm)	1961	2004	44	-1.80	+	-3.844	-1.810545592	0.070211221	
SEP-P (mm)	1961	2004	44	-1.48		-1.989	-1.48702478	0.137008266	
OCT-P (mm)	1961	2004	44	-1.93	+	-3.777	-1.942137081	0.052120508	
NOV-P (mm)	1961	2004	44	-1.71	+	-2.274	-1.719600541	0.085505078	
DIC-P (mm)	1961	2004	44	-1.32		-1.105	-1.325171743	0.185114195	
SUM-P (mm)	1961	2004	44	-2.44	*	-24.849	-2.743253995	0.006083361	T

5.5.4.2 Caudal:

Como se observa en la tabla 26 los resultados obtenidos por los dos Test estadísticos concuerdan, característica que se refleja en la relación de la estadística estacionaria de Mann Kendall (MK-Stat) con la estadística Z del test Makesens. Estos análisis difieren un poco teniendo en cuenta el grado de significancia otorgado para cada test por esta razón el Test Mann Kendall que tiene un rango de significancia p-value mucho menor no resalta tendencias percibidas por Makesens.

Tabla 26 MAKENDALL VS MAKESENS CAUDAL

ANÁLISIS DE TENDENCIA									
CAUDAL MENSUAL									
AMQ 3521701 Puente yopal									
Serie de Tiempo	Año inicial	Año final	n	MAKESENS			Mann-Kendall		
				Test Z	Signific.	Q	MK-Stat	p-value	Signific.
ENE-P (mm)	1965	2003	39	1.10		0.250	1.113156653	0.265641156	
FEB-P (mm)	1965	2003	39	1.11		0.255	1.125173823	0.260515383	
MAR-P (mm)	1965	2003	39	1.68	+	0.397	1.693686102	0.090324947	
ABR-P (mm)	1965	2003	39	0.41		0.295	0.423452514	0.671965137	
MAY-P (mm)	1965	2003	39	2.15	*	1.019	2.165657143	0.030337396	
JUN-P (mm)	1965	2003	39	2.08	*	1.400	2.093065283	0.036343327	
JUL-P (mm)	1965	2003	39	2.29	*	1.224	2.298573996	0.021529142	T
AGO-P (mm)	1965	2003	39	1.77	+	0.954	1.778500559	0.07532168	
SEP-P (mm)	1965	2003	39	3.06	**	1.241	3.072830499	0.002120389	T
OCT-P (mm)	1965	2003	39	2.90	**	0.969	2.916199921	0.003543234	T
NOV-P (mm)	1965	2003	39	0.83		0.282	0.846843051	0.397082609	
DIC-P (mm)	1965	2003	39	0.34		0.159	0.350860654	0.72569289	
PROM-P (mm)	1965	2003	39	2.71	**	0.493	2.772816096	0.005557352	T

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de estudios anteriores indican que hay evidencias que soportarían la hipótesis de que las variaciones en las cantidades de precipitación son originadas por los cambios climáticos que se han venido presentando en los últimos años.

Se observa que el comportamiento del clima en la zona de estudio es uniforme, la precipitación y el caudal presentan un comportamiento similar, mostrando ciclos anuales en estaciones localizadas en las cuencas pertenecientes a la zona en estudio.

Los análisis exploratorios dieron una buena información gráfica sobre el comportamiento general de la serie hidrológica que se analizó concordando con los resultados obtenidos en los análisis confirmatorios.

Analizando el comportamiento de las series históricas, es evidente que el caudal en algunos sectores está aumentando de manera importante, esto se observa principalmente en Yopal, Páez y en Sabana Larga, donde se concentran la mayor cantidad de estaciones con tendencias positivas importantes.

El comportamiento de la precipitación se encuentra sectorizado en zonas donde se tiende a la disminución y en otras que cobijan el aumento siendo estas últimas las que contenían la mayor cantidad de estaciones.

Para la zona en estudio, el fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) no genera una tendencia significativa en la precipitación, se observa que este influye en mayor medida sobre el caudal incrementando la tendencia.

El análisis exploratorio debe siempre ser usado antes de cualquier análisis confirmatorio teniendo en cuenta que los diferentes gráficos resaltan diferentes propiedades de las series y se pueden considerar como complementarios a los resultados arrojados por los Test de tendencias.

Los análisis llevados a cabo a partir de la metodología planteada, resultarían más adecuados realizándolos con información real completa, para corroborar la veracidad en el comportamiento de cada una de las variables.

Es común en hidrología que cuando se identifican inconsistencias (tendencias) en las series hidrológicas, éstas deben ser removidas de la serie y el análisis se hace con la información resultante. Esto debe tratarse con sumo cuidado ya que la serie resultante será artificial y no es claro si esto es lo más apropiado. Cada serie es un caso distinto que debe analizarse y tomar decisiones con cuidado.

Es importante continuar con este tipo de investigaciones, analizando en detalle algunos aspectos y parámetros que no fueron tenidos en cuenta para este trabajo como: temperatura, velocidad del viento, evaporación, esto con el fin de establecer con más certeza el comportamiento del clima de la región y su relación con los diferentes fenómenos externos que pueden de una u otra forma modificarlo.

Como reflexión final y en general se están elevando las concentraciones de dióxido de carbono, se calientan los océanos se derriten los glaciares, sube el nivel del mar, adelgaza el hielo marino, se deshuela el permafrost, se presentan más incendios forestales devastadores, se encogen los lagos, colapsan las plataformas del hielo, cada vez las sequías son mas prolongadas, aumento de las

precipitaciones, se secan los arroyos de montaña, aumento repentino de la temperatura son algunas de las marcas que está dejando el calentamiento en nuestro planeta y en el país, pero solo son una muestra de los estragos que podrían venir. Podemos actuar a tiempo para evitarlos no será fácil limitar las emisiones para un mundo adicto a los combustibles fósiles.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Appenzeller T, Dimick D. 2004. El Calentamiento Global. *Nacional Geographic*, 15 (3), 2
- Borrell Elena. 2003. Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (C.H.A.C.). Cedex, España.
- Castañeda, Olga Lucía. 2005. Análisis de la Incidencia de los Fenómenos Climáticos en la Hidrología del Altiplano Cundiboyacense y la Región Árida del Alto Patía. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil) Universidad de los Andes.
- Cortés, Andrés Fernando. 2005. Evaluación de la Capacidad del Agua Subterránea en la Ciudad de Tunja para Abastecimiento de Acueducto. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil) Universidad de los Andes.
- Díaz-Granados O, Mario. Notas de Clase. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría en ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Estrela Monreal, Teodoro, Alvarez Rodríguez, Javier. 2003. Técnicas Estadísticas de Completado de Series Mensuales Hidrometeorológicas. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX
- Germán Poveda, Jaime I. Vélez, Oscar Mesa, Carlos D. Hoyos, J Freddy Mejía, Olga J. Barco, Paula L. Correa. 2004. Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. Universidad Nacional de Colombia.
- Helsel, D.R. y Hirsch, R.M., 1992. *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier. Amsterdam, p. 522.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.
- Juan José N, Rodney M, Juan R, Freddy H. 2004. Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio

climático en la costa del Ecuador. Instituto Oceanográfico de la Armada Guayaquil – Ecuador.

Libiseller Claudia & Grimvall Anders. 2001. Performance of Partial Mann-Kendall Tests for Trend Detection in the Presence of Covariates. Department of Statistics, Linköping University, SE-58183 Linköping, Sweden.

Meyer, Paul. 1998. Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas. Washington State University. México.

Montealegre, E. 1996. .Análisis del comportamiento de la precipitación en Colombia Durante la ocurrencia de los fenómenos ENOS.

Portus Govinden, Lincoyán. 1989. Estadística. Universidad Javeriana.

Ricardo A. Smith y Claudia Campuzano. 2000. Análisis exploratorio para la detección de cambios y tendencias en series hidrológicas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Villate Corredor, Jose Julián. 2004. Influencia de los Fenómenos Macroclimáticos y Calentamiento Global en la Hidrología del Altiplano Cundiboyacense. Tesis (Magíster en Ingeniería Civil) Universidad de los Andes.

www.ideam.gov.co

www.igac.gov.co

www.noaa.gov

www.casanare.gov.co