



SEÑALES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA

Lina María Aguirre Otálvaro

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2020

SEÑALES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA

Lina María Aguirre Otálvaro

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:

Ph.D Yasel José Costa Salas

Codirector:

MSc Edison Ramiro Cepeda Arias

Línea de Investigación:

Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente-DSMA

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2020

(Dedicatoria o lema)

Todo el esfuerzo y entrega, plasmados en este trabajo, es dedicado a Dios. Al Ser que nos regala cada día la oportunidad de ser mejores personas, colocando al servicio de los demás todos los dones recibidos.

A mi esposo, quién sin importar las circunstancias siempre me ha brindado su apoyo y su amor incondicional.

A mi familia, en especial a mis padres, quienes fueron mi motor y por quienes siempre seguiré luchando con amor y dedicación.

Agradecimientos

Al ingeniero Yasel José Acosta Salas, director de la investigación, por su colaboración incondicional y valiosas orientaciones, necesarias para culminar con éxito este trabajo.

Al ingeniero Edison Ramiro Cepeda Arias, codirector de la investigación, por su apoyo, motivación constante y por sus orientaciones durante el desarrollo del trabajo, fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Resumen

El presente trabajo de investigación identifica el comportamiento hidrometeorológico en la Cuenca Alta del Río Chicamocha ubicada el Departamento de Boyacá y analiza los fenómenos atribuidos a la variabilidad climática y al cambio climático a escala de cuenca. A partir de la recopilación de información hidrometeorológica proveniente de la red de instrumentación del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se analizaron series temporales de variables como precipitación, temperatura y caudal, durante el periodo de estudio comprendido entre los años 1985 y 2017. El desarrollo metodológico identificó la validez, confiabilidad y homogeneidad de la información mediante pruebas estadísticas y metodologías gráficas, con el objetivo de realizar un análisis (anual y mensual) de detección y estimación de tendencias por medio del empleo de diferentes pruebas no paramétricas, en particular Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen. Las tendencias estimadas y detectadas evidencian señales de cambio climático en la cuenca, como un aumento o disminución en el comportamiento histórico de las variables. El análisis de las series temporales en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias, evidencian la presencia de fenómenos macroclimáticos en diferentes escalas temporales de variabilidad climática. Los resultados de esta investigación brindan una fuente de información técnica y confiable para la toma de decisiones relacionada con la adaptabilidad y resiliencia al cambio climático local y global con la finalidad de comprender históricamente el comportamiento hidrometeorológico de la región.

Palabras claves: Cambio Climático, Variabilidad climática, Hidrometeorología, Tendencias climatológicas, Mann-Kendall, Cuencas alto andinas.

Abstract

This research identifies the hydrometeorological behavior in the Upper Chicamocha River Basin located in the Department of Boyacá and analyzes the phenomena attributed to climate variability and climate change at the basin scale. Based on the compilation of hydrometeorological information, from the instrumentation network of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), time series of variables such as precipitation, temperature, and flow were analyzed during the study period between 1985 and 2017. The methodological development identified the validity, reliability, and homogeneity of the information through statistical tests and graphic methodologies, to carry out analysis (annual and monthly) of detection and estimation of trends through the use of different non-parametric tests, in particular, Mann-Kendall and Sen's slope estimator. The estimated and detected trends show signs of climate change in the basin, such as an increase or decrease in the historical behavior of the variables. The analysis of the time series in the domain of time and frequencies, show the presence of macroclimatic phenomena in different time scales of climatic variability. The results of this research provide a source of technical and reliable information for decision-making related to adaptability and resilience to local and global climate change to historically understand the hydrometeorological behavior of the region.

Keywords: Climate Change, Climate Variability, Hydrometeorology, Weather Trends, Mann-Kendall, High Andean Basins.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
1. MARCO TEÓRICO	27
1.1 La Variabilidad Climática Colombiana	27
1.2 Escalas de Variabilidad Climática.....	27
1.2.1 Estacional.....	27
1.2.2 Intraestacional o Intra-anual.....	28
1.2.3 Interanual.....	28
1.2.4 Interdecadal.....	28
1.3 Cambio Climático Global.....	28
1.4 Cambio Climático en Colombia	29
1.5 Cambio Climático en Boyacá	30
1.6 Régimen Climático en la Cuenca Alta del Río Chicamocha.....	32
1.6.1 Precipitación.....	33
1.6.2 Temperatura.....	34
1.6.3 Caudal.....	35
1.7 Eventos Hidroclimatológicos Extremos.....	37
1.8 Análisis de Tendencia en Series de Tiempo.....	38
1.9 Análisis de Series Temporales en el Dominio del Tiempo y en el Dominio de las Frecuencias	39
2. ESTADO DEL ARTE	40
3. METODOLOGÍA	47
3.1 Desarrollo Metodológico.....	47
3.2 Zona de Estudio	48
3.3 Recopilación de Información Hidrometeorológica.....	49
3.4 Análisis Exploratorio de Datos.....	50
3.5 Análisis Hidroclimatológico de la Cuenca Alta del Río Chicamocha	51
3.6 Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio del Tiempo y en el Dominio de las Frecuencias.....	51
3.7 Análisis de Tendencias de las Variables Hidrometeorológicas Mensuales	51
3.8 Espacialización de Tendencias	53
3.9 Elaboración de Base de Datos Georreferenciada de las Tendencias	53
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	54

4.1	Recopilación de Información	54
4.2	Análisis Exploratorio de Datos.....	56
4.2.1	Identificación de Datos Anómalos.....	56
4.2.2	Llenado de Datos Faltantes	57
4.2.3	Análisis de Homogeneidad	59
4.2.4	Pruebas de Aleatoriedad y Normalidad.....	63
4.3	Análisis Hidroclimatológico de la Cuenca Alta del Río Chicamocha	65
4.3.1	Caudal	66
▪	Caudal mensual.....	67
▪	Comportamiento anual del caudal máximo mensual.....	69
▪	Comportamiento anual del caudal medio mensual.....	71
▪	Comportamiento anual del caudal mínimo mensual.....	73
4.3.2	Temperatura	75
4.3.3	Precipitación Total Mensual	80
▪	Precipitación Media Anual	81
4.4	Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio del Tiempo.....	85
4.5	Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio de las Frecuencias..	88
4.6	Análisis de Tendencias en las Variables Hidrometeorológicas a Nivel Anual ...	95
4.6.1	Precipitación	95
4.6.2	Caudal	99
4.6.3	Temperatura	104
4.7	Análisis de Tendencias en las Variables Hidrometeorológicas a Nivel Mensual	109
4.7.1	Precipitación Total Mensual Multianual.....	109
4.7.2	Temperatura Mensual Multianual (máxima, media y mínima)	110
4.7.3	Caudal Mensual Multianual (máximo, medio y mínimo)	112
4.8	Espacialización de Tendencias	114
4.9	Base de Datos Georreferenciada de las Tendencias.....	119
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de temperatura media en el periodo de referencia 1976-2005 y para el periodo 2071-2100.	31
Figura 2. Mapa del cambio esperado de la temperatura media para el periodo 2071-2100, respecto al periodo de referencia 1976-2005.	31
Figura 3. Mapa de precipitación promedio en el periodo de referencia 1976-2005 y para el periodo 2071- 2100.	32
Figura 4. Mapa del cambio esperado de la precipitación para el periodo 2071-2100, respecto al periodo de referencia 1976-2005.	32
Figura 5. Variabilidad anual de la precipitación (mm) durante el periodo 1990-2014 para La Cuenca Alta del Río Chicamocha.	33
Figura 6. Variabilidad anual de la temperatura (°C) durante el periodo 1990-2014 para la Cuenca Alta del Río Chicamocha.	34
Figura 7. Variabilidad temporal de los caudales medios mensuales multianuales (m ³ /s), durante el periodo 1990-2014 para las subcuencas de la Cuenca Alto Chicamocha.	35
Figura 8. Variabilidad espacial de los caudales medios simulados (m ³ /s), durante el periodo 1990-2014 para las subcuencas de la Cuenca Alto Chicamocha.	36
Figura 9. Variación anual de caudales máximos y mínimos para las unidades de subcuencas.	37
Figura 10. Inundaciones ola invernal 2010, 2011 y 2012 en la Cuenca Alta del Río Chicamocha.	38
Figura 11. Dominio del Tiempo en comparación con el Dominio de Frecuencia.	40
Figura 12. Síntesis de la metodología del presente trabajo de investigación.	48
Figura 13. Mapa de ubicación de la zona de estudio. (a) Sur América, (b) Colombia, (c) Departamento de Boyacá, y (d) Cuenca Alta del Río Chicamocha.	49
Figura 14. Metodología empleada para el análisis exploratorio de datos.	50
Figura 15. Metodología empleada para la identificación y estimación de tendencias en las series temporales.	52
Figura 16. Estaciones hidrometeorológicas analizadas.	54
Figura 17. Diagramas de cajas. (a) estación Maguncia, (b) estación SENA, (c) estación Surbata-bonza.	57

Figura 18. Series de precipitación total mensual estación Duitama. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.....	58
Figura 19. Series de caudal medio mensual estación Maguncia. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.....	59
Figura 20. Series de temperatura mínima mensual estación UPTC. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.....	59
Figura 21. Gráficos de masa simple para series de precipitación total mensual (izquierda). Gráficos de masa doble en series ejemplo de precipitación (derecha).	62
Figura 22. Gráficos de masa simple para serie de caudal máximo mensual (izquierda). Gráficos de doble masa para algunas series de caudal (derecha).	62
Figura 23. Gráficos de masa simple (izquierda) para las series de temperatura media mensual. Gráficos de doble masa (derecha) para algunas series de temperatura media mensual	62
Figura 24. Histograma y gráfica de probabilidad normal de caudal medio en la estación La Gruta.	63
Figura 25. Histograma y gráfica de probabilidad normal de precipitación en la estación UPTC.	64
Figura 26. Histograma y gráfica de probabilidad normal de temperatura media en la estación Belencito.	64
Figura 27. Mapas de estaciones empleadas en la caracterización hidroclimatológica de las diferentes variables.....	66
Figura 28. Comportamiento estacional del caudal máximo mensual (1985- 2015).	68
Figura 29. Comportamiento estacional del caudal medio mensual (1985- 2015).	68
Figura 30. Comportamiento estacional del caudal mínimo mensual (1985 - 2015).	69
Figura 31. Comportamiento anual del caudal máximo mensual.....	69
Figura 32. Comportamiento anual del caudal máximo mensual (continuación).....	70
Figura 33. Comportamiento anual del caudal máximo mensual (continuación).....	71
Figura 34. Comportamiento anual del caudal medio mensual.	71
Figura 35. Comportamiento anual del caudal medio mensual (continuación).	72
Figura 36. Comportamiento anual del caudal medio mensual (continuación).	73
Figura 37. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual.	73
Figura 38. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual (continuación).	74

Figura 39. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual (continuación).	75
Figura 40. Comportamiento estacional de la temperatura máxima mensual (1985- 2017).	76
Figura 41. Comportamiento estacional de la temperatura media mensual (1985- 2017).	76
Figura 42. Comportamiento estacional de la temperatura mínima mensual (1985- 2017).	77
Figura 43. Comportamiento anual de la temperatura máxima mensual.	78
Figura 44. Comportamiento anual de la temperatura media mensual.	78
Figura 45. Comportamiento anual de la temperatura media mensual (continuación).....	79
Figura 46. Comportamiento anual de la temperatura mínima mensual.	79
Figura 47. Comportamiento anual de la temperatura mínima mensual (continuación)....	80
Figura 48. Comportamiento estacional de la precipitación total (1985- 2017).....	81
Figura 49. Precipitación anual (1985-2017).	82
Figura 50. Comportamiento anual de la precipitación.	82
Figura 51. Comportamiento anual de la precipitación (continuación).	83
Figura 52. Comportamiento anual de la precipitación (continuación).	84
Figura 53. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de precipitación total mensual.....	85
Figura 54 Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal máximo mensual.....	86
Figura 55 Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal medio mensual.	86
Figura 56. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal mínimo mensual.....	86
Figura 57. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura máxima mensual.....	87
Figura 58. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura media mensual.....	87
Figura 59. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura mínima mensual.....	87

Figura 60. Función de densidad espectral de precipitación total mensual (estación Pesca).....	88
Figura 61. Función de densidad espectral de caudal máximo mensual (estación El Molino).	88
Figura 62. Función de densidad espectral de caudal medio mensual (estación La Vega).	89
Figura 63. Función de densidad espectral de caudal mínimo mensual (estación San Rafael LM).....	89
Figura 64. Función de densidad espectral de temperatura máxima mensual (estación Surbata Bonza).	90
Figura 65. Función de densidad espectral de temperatura media mensual (estación Tinguavita).	90
Figura 66. Función de densidad espectral de temperatura mínima mensual.	91
Figura 67. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para la precipitación anual.	96
Figura 68. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de precipitación anual.	98
Figura 69. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal mínimo anual.....	100
Figura 70. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal máximo anual.....	100
Figura 71. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal medio anual.....	100
Figura 72. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal máximo anual.....	103
Figura 73. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal medio anual.	103
Figura 74. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal mínimo anual.	103
Figura 75. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura máxima anual.	105
Figura 76. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura media anual.	106
Figura 77. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura mínima anual.	106

Figura 78. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura máxima anual.....	108
Figura 79. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura mínima anual.....	108
Figura 80. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura media anual.....	108
Figura 81. Mapa de tendencias de precipitación anual.....	114
Figura 82. Mapa de tendencias de caudal máximo anual.....	115
Figura 83. Mapa de tendencias de caudal mínimo anual.....	116
Figura 84. Mapa de tendencias de temperatura máxima anual.....	116
Figura 85. Mapa de tendencias de temperatura media anual.....	117
Figura 86. Mapa de tendencias de temperatura mínima anual.....	117
Figura 87. Numero de tendencias encontradas por municipio.....	118
Figura 88. Estructura de la base de datos georreferenciada.....	119
Figura 89. Interfaz de visualización de metadatos de la base de datos georreferenciada.....	120

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Cuadro resumen contexto Internacional.	41
Tabla 2. Cuadro resumen contexto Nacional.	44
Tabla 3. Cuadro resumen contexto Regional.	46
Tabla 4. Cantidad de estaciones hidrolimatólogicas utilizadas.	54
Tabla 5. Parámetros Hidrometeorológicos solicitados.	55
Tabla 6. Información general de las estaciones hidrometeorológicas.	55
Tabla 7. Datos faltantes en las series de precipitación total mensual.	57
Tabla 8. Datos faltantes en las series de caudal mensual.	58
Tabla 9. Datos faltantes en las series de temperatura mensual.	58
Tabla 10. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de caudal máximo mensual.	59
Tabla 11. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de temperatura media mensual.	60
Tabla 12. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de precipitación total mensual.	60
Tabla 13. Resultados obtenidos con la prueba de homogeneidad de U de Mann-Whitney para las series temporales mensuales de precipitación, temperatura y caudal.	61
Tabla 14. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de caudal mensual máximo.	64
Tabla 15. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de temperatura mensual media.	65
Tabla 16. Periodicidad encontrada en las series de precipitación total mensual.	91
Tabla 17. Periodicidad encontrada en las series de caudal máximo mensual.	92

Tabla 18. Periodicidad encontrada en las series de caudal medio mensual.	93
Tabla 19. Periodicidad encontrada en las series de caudal mínimo mensual.	93
Tabla 20. Periodicidad encontrada en las series de temperatura máxima mensual.	94
Tabla 21. Periodicidad encontrada en las series de temperatura media mensual.	94
Tabla 22. Periodicidad encontrada en las series de temperatura mínima mensual.	95
Tabla 23. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la precipitación total anual.	97
Tabla 24. Resumen de estaciones de precipitación con tendencias estadísticamente significativas.	99
Tabla 25. Resumen de estaciones hidrométricas con tendencias estadísticamente significativas.	99
Tabla 26. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal máximo anual.	101
Tabla 27. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal medio anual.	101
Tabla 28. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal mínimo anual.	102
Tabla 29. Resumen de estaciones de temperatura con tendencias estadísticamente significativas.	104
Tabla 30. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura máxima anual.	107
Tabla 31. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura media anual.	107
Tabla 32. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura mínima anual.	107
Tabla 33. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la precipitación total mensual multianual.	109
Tabla 34. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura máxima mensual multianual.	111
Tabla 35. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura media mensual multianual.	111
Tabla 36. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura mínima mensual multianual.	111

Tabla 37. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal máximo mensual multianual.	112
Tabla 38. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal medio mensual multianual.....	113
Tabla 39. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal mínimo mensual multianual.	113
Tabla 40. Municipios con presencia de tendencias.....	118

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Series de precipitación total mensual completas	129
Anexo B. Series de temperaturas medias mensuales (máxima, mínima, media) completas.....	132
Anexo C. Series de caudal medios mensuales (máximo, mínimo, medio) completas.	134
Anexo D. Estadísticos básicos de las series de precipitación, caudal medio, máximo y mínimo y temperatura media, máxima y mínima.	139
Anexo E. Resultados de prueba de correlación serial para series temporales de precipitación total, temperatura y caudal mensual.	141
Anexo F. Función de autocorrelación de las series de precipitación, caudal y temperatura a nivel mensual.	144
Anexo G. Función de densidad espectral de las series de precipitación, caudal y temperatura a nivel mensual.	154

Introducción

El Departamento de Boyacá no es ajeno a los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático global, siendo afectado cada vez más por la escasez del recurso hídrico, tanto en cantidad, como en calidad, acelerado por la creciente influencia antropogénica (CORPOBOYACÁ, 2006). En los últimos años se ha incrementado aparentemente la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos en el Departamento como precipitaciones intensas, desbordamiento de fuentes hídricas y sequías más prolongadas, hechos atribuidos comúnmente al cambio climático.

Se considera que la variabilidad y el cambio climático tienen una relación directa, donde interactúan constantemente asociados a los cambios en el forzamiento radiativo no natural. También son asociados al forzamiento climático, el cual es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio, que tiene su origen en el efecto invernadero antropogénico. En general, se puede decir que el cambio climático vuelve más extremos e intensos los fenómenos de variabilidad climática, siendo posible en los próximos años un aumento eventos extremos climáticos (que desencadenan inundaciones, deslizamientos e incendios forestales) asociados a los fenómenos ENSO (El Niño– La Niña) (Alzate et al., 2015).

La ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos ocupa el segundo lugar en la lista de riesgos derivados del cambio climático, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Algunos investigadores aseguran que no se tienen evidencias de que el calentamiento global tenga relación directa con variables climatológicas como la precipitación, sino que responden directamente a la variabilidad climática que actualmente sufre el trópico americano (Poleo, 2016).

La Cuenca Alta del Río Chicamocha es la más importante de la región, considerando que su riqueza hídrica es utilizada para diferentes usos, como el abastecimiento del distrito de riego más extenso de la zona llamado Usochichamocha, el abastecimiento de agua para diferentes sistemas de acueducto, el enfriamiento de sistemas termoeléctricos y la recreación. Igualmente, es de gran importancia su ubicación geográfica ya que en esta cuenca existen diversos sistemas socio-económicos como el corredor industrial del Departamento, sistemas de producción agropecuaria, entre otros, los cuales son ejes importantes para el desarrollo de la región.

La Cuenca Alta del Río Chicamocha en la actualidad presenta diversas problemáticas que en ocasiones son asociadas con el cambio climático, como por ejemplo reducción del recurso hídrico disponible para diferentes usos y aprovechamientos (acueductos, saneamiento básico, Distrito de Riego de Usochichamocha y la represa de enfriamiento de la termoeléctrica Termo-Paipa) durante temporadas de sequía, pérdida de cultivos debido a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones y sequías),

pérdida de diversidad en páramos y ecosistemas estratégicos para la región, así como alteraciones del ciclo hidrológico local, a nivel espacial y temporal. Así mismo se pueden relacionar las afectaciones mencionadas anteriormente con la poca conciencia y educación ambiental por parte de los habitantes de la región.

Comúnmente son relacionadas las afectaciones al medio ambiente con la falta de conocimiento, control y políticas por parte de los entes gubernamentales encargados de la regulación de los impactos antrópicos relacionados con la contaminación atmosférica. De igual forma con la falta de interés y preocupación de las industrias para mitigar y remediar los daños o afectaciones al medio ambiente y a las comunidades cercanas.

Los entes intergubernamentales deberían ejecutar programas adecuados de mitigación enfocados a la adaptabilidad ante la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos o afectaciones relacionadas con el cambio climático. Las diferentes problemáticas se convierten en un gran reto para la toma de decisiones y la formulación de proyectos que involucren la gestión integral de los recursos naturales, en especial el recurso hídrico.

Actualmente es evidente para la región la ausencia de estudios confiables y acertados a escala de cuenca. Por esta razón, es importante involucrar un mayor grado de conocimiento e investigación sobre la variabilidad climática y cambio climático a nivel local. Los nuevos conocimientos se convertirán en un verdadero aporte científico para la toma de decisiones relacionadas con la mitigación y adaptabilidad al cambio climático en la región.

El estado del arte que se realizó en la presente investigación a nivel internacional, nacional y regional indica que la mayoría de estudios que involucran el análisis de la variabilidad climática y el cambio climático, lo hacen sin incluir simultáneamente variables hidrometeorológicas de gran interés como la precipitación, la temperatura y el caudal (Gao et al., 2018; Madsen et al., 2014; Mayorga et al., 2011). En algunos casos solamente son incluidas variables atmosféricas (precipitación y temperatura) (Oria et al., 2017), en otros, solamente precipitación (Bocheva et al., 2009), o en su defecto principalmente variables hidrológicas como precipitación y caudal (Cortes Zambrano, 2008). Localmente no ha sido objeto de investigación el comportamiento de estas variables a nivel espacial y temporal en la Cuenca Alta del Río Chicamocha, involucrando largos periodos de tiempo, al menos correspondiente a una “normal climatológica” (mínimo 30 años), de acuerdo con las recomendaciones de la organización meteorológica mundial (OMM). Las anteriores consideraciones refuerzan el propósito de la investigación planteada, la cual se configuraría como un importante aporte al conocimiento de la hidrometeorología colombiana (regional), permitiendo su integración con la variabilidad climática y el cambio climático global.

“A nivel general las investigaciones señalan las causas antropogénicas como responsables del cambio climático, específicamente el calentamiento global, y no a la variabilidad natural del clima” (Yumul et al., 2011). Por otra parte, investigadores afirman que la correlación entre la variación de la temperatura y el aumento en las inundaciones y sequías, en otras palabras, eventos hidrometeorológicos extremos, se presenta principalmente como efecto de la variabilidad climática, más que del cambio climático resultado del calentamiento global (Poleo, 2016).

Según Návar (2015), el cambio climático es un fenómeno relacionado con el ser humano, y la variabilidad climática es un proceso natural que ocurre en diferentes escalas

temporales y espaciales. Establecer los límites o diferencias entre los conceptos variabilidad climática y cambio climático es complejo, aún más en regiones en las que se presenta una fuerte influencia de la variabilidad en las condiciones del clima (Organización Meteorológica Mundial, 2010). Por lo tanto, Poleo (2016) indica que para combatir, mitigar y adaptarse al cambio climático es inevitable comprender cuáles son sus consecuencias y problemas asociados. Unido a lo anterior, el autor plantea comprender realmente qué es originado por variabilidad climática o los ciclos naturales del planeta y qué tiene una raíz antropogénica es de gran importancia para la adaptabilidad al cambio climático. Motivo por el cual la presente investigación aborda, las posibles relaciones entre fenómenos hidrometeorológicos extremos con la variabilidad climática y el cambio climático a escala local (Cuenca Alta del Río Chicamocha), permitiendo así analizar estas hipótesis.

La autoridad ambiental regional (Corpoboyacá) y los entes gubernamentales involucrados con las problemáticas mencionadas anteriormente carecen de herramientas soportadas técnicamente que permitan efectuar programas relacionados con la mitigación y adaptabilidad al cambio climático en la región. Estas herramientas disminuirían las afectaciones a las poblaciones más vulnerables en los aspectos social, cultural y ambiental, generando un desarrollo sostenible y acorde a las necesidades propias del Departamento.

El presente trabajo de investigación pretende identificar el comportamiento hidrometeorológico en la Cuenca Alta del Río Chicamocha (Departamento de Boyacá) y analizar las señales presentes en series temporales relacionadas con la variabilidad climática y el cambio climático en la región. A partir de la recopilación de información hidrometeorológica, proveniente de la red de instrumentación del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), son analizadas series temporales de variables como precipitación, temperatura y caudal, durante el periodo de estudio comprendido entre los años 1985 y 2017. Los resultados de esta investigación brindan una fuente de información técnica y confiable para la toma de decisiones relacionada con la adaptabilidad y resiliencia al cambio climático local y global con la finalidad de comprender históricamente el comportamiento hidrometeorológico de la región.

La investigación del comportamiento hidrometeorológico en la región, podría dar claridad a la interpretación de sucesos ocurridos por variabilidad climática o los atribuidos al calentamiento global. De esta manera será más precisa, sencilla y pertinente la mitigación o adaptabilidad a la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

Para lograr el objetivo general se plantearon algunos objetivos específicos como fueron: a) Analizar, a nivel local, con base en información secundaria, los regímenes de: precipitación, temperatura y caudales en la Cuenca Alta del Río Chicamocha; b) Investigar, a partir de información primaria, por medio del análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias, el comportamiento de variables meteorológicas como: precipitación total mensual, temperatura media mensual, temperatura media máxima mensual, temperatura media mínima mensual y caudales en la Cuenca Alta del Río Chicamocha; c) Estudiar la tendencia de variables meteorológicas asociadas al cambio climático global como: precipitación total mensual, temperatura media mensual, temperatura media máxima mensual, temperatura media mínima mensual y caudal; y d) Generar información espacial de tendencias para variables hidrometeorológicas asociadas con cambio climático bajo un Sistema de Información Geográfica (SIG).

A continuación, se presenta el respectivo fundamento teórico y el estado del arte de la investigación desarrollada. Posteriormente, se describe la metodología desarrollada, para el logro de los objetivos definidos. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos, así como las interpretaciones, hallazgos, generalizaciones y relaciones que los resultados indican.

1. MARCO TEÓRICO

Los tópicos teóricos que se describen a continuación, que incluyen la variabilidad climática colombiana y sus escalas, el cambio climático global y sus efectos en Colombia, así como el análisis de tendencia de series, son el soporte teórico de esta investigación.

1.1 La Variabilidad Climática Colombiana

El clima en Colombia varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio (Pérez et al., 1998). Dentro de sus fluctuaciones temporales se consideran las de mayor trascendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos la estacional, intraestacional o intra-anual, interanual e interdecadal (IDEAM, 2005).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. Durante un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de lo normal. La Normal Climatológica o valor normal se utiliza para definir y comparar el clima y generalmente representa el valor promedio de la serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos treinta (30) años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como anomalía.¹

Los fenómenos de variabilidad climática cada vez tienen mayor intensidad sobre los recursos hídricos en el territorio nacional. En esa medida, la variabilidad climática se ha vuelto un tema fundamental para encaminar los recursos hacia las demandas de esta problemática. No obstante, existen altos niveles de incertidumbre debido a la alta complejidad de los estudios de impacto sobre la respuesta hidrológica en el contexto de la variabilidad y el cambio climático (García & Botero, 2012).

1.2 Escalas de Variabilidad Climática

Como se mencionó anteriormente, el clima varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio. Dentro de sus fluctuaciones temporales, las siguientes se consideran las de mayor trascendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos en Colombia:²

1.2.1 Estacional

A esta escala corresponde la fluctuación del clima a nivel mensual. La determinación del ciclo anual de los elementos climáticos es una fase fundamental dentro de la variabilidad climática a este nivel. En esta escala una de las más importantes fluctuaciones del clima colombiano es explicada por el movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), en el trópico lo más usual es que se presente temporadas lluviosas y temporadas secas alternadamente.

¹ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Atlas Climatológico de Colombia. 2005. p.16.

² Ibid., p.16.

1.2.2 Intraestacional o Intra-anual

Este tipo de variabilidad es menos notorio. La mayoría de veces estas oscilaciones pasan desapercibidas, porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intraestacionales se destaca una señal de tipo ondulatorio, denominada de treinta a sesenta (30-60) días, por su ciclo de duración, siendo asociadas con las ondas de Madden y Julian (Pérez et al., 1998).

1.2.3 Interanual

La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación, un ejemplo son los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur, la cual corresponde a una oscilación de largo plazo en la dirección del viento zonal de la baja y media estratosfera ecuatorial, con un período irregular que varía entre 20 y 35 meses; en cada lapso se alternan los vientos de componente Este con los del Oeste (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2016). Otras fluctuaciones de las variables climáticas en la escala interanual podrían estar asociadas con la Oscilación Cuasibienal (QBO).

1.2.4 Interdecadal

La amplitud de estas oscilaciones es menor, razón por la cual este tipo de variabilidad pasa desapercibida para el común de la gente. No obstante, estas oscilaciones de largo plazo están influyendo notablemente en las actividades de la sociedad en ciclos interdecadales y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables climáticas. La variabilidad climática global a escala de varias décadas está dominada por el cambio climático y el cambio ambiental global de largo plazo, así como por fenómenos macroclimáticos que operan en tal escala temporal como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

1.3 Cambio Climático Global

Las investigaciones científicas más recientes, confirman que el clima de la Tierra está cambiando rápidamente, debido a que las temperaturas mundiales aumentaron aproximadamente un (1) grado Fahrenheit en el transcurso del último siglo³, y es probable que aumenten aún más rápido en las próximas décadas. Hay evidencias serias sobre la relación de este calentamiento con el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (Zheng et al., 2019). Varios estudios han mostrado evidencia de cambios recientes en los patrones climáticos y climáticos, y la comunidad científica está de acuerdo de manera abrumadora con el hecho de que la atmósfera de la Tierra se ha estado calentando debido a la emisión continua de gases de efecto invernadero (Funatsu et al., 2019).

A nivel mundial existe evidencia contundente sobre tendencias estadísticamente significativas, de la temperatura en Australia y Italia (Livada et al., 2019; Oria et al., 2017)

³ Panel Intergubernamental de Cambio Climático de la Organización de Naciones Unidas (IPCC).

y evidencia de disminución de la precipitación anual en el norte de China. En Colombia hay reportes acerca del incremento en los valores de algunas variables atmosféricas (Alzate et al., 2015; Mayorga et al., 2011). El calentamiento global es uno de los retos más importantes que enfrenta la humanidad.

Como se ha venido señalando en informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013; IPCC, 2014), el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero tiene como resultado cambios en la variabilidad climática diaria, estacional, interanual y a lo largo de decenios. Estos informes también señalan que son de esperar cambios en la frecuencia, intensidad y duración de fenómenos climáticos extremos. El cambio climático afecta la disponibilidad de agua en las cuencas hidrográficas (IPCC, 2007) y constituyen una preocupación mundial especialmente por sus implicaciones sobre las comunidades humanas. Los cambios que se presentan en el clima pueden afectar en varios aspectos los sistemas socio-económicos y ambientales en diferentes regiones y países del mundo (IPCC, 2001), por tal razón resulta muy significativo conocer cuáles son las afectaciones o cambios actuales y futuros del clima a nivel regional y local en el territorio colombiano.

El impacto del calentamiento global puede ser catastrófico y una amenaza potencial para la existencia de la humanidad (Freije et al., 2017). Por lo tanto, es esencial que todos y especialmente la comunidad científica, tengan una apreciación completa de la cuestión, así como de las posibles soluciones al problema. Este conocimiento podrá ser un paso esencial como punto de partida para cambios necesarios en las economías, la utilización de los recursos y el enfoque de la naturaleza (Aydin, 2010).

El calentamiento global es un fenómeno complejo y su impacto a gran escala son difíciles de predecir con certeza. Sin embargo, cada año los científicos tienen más información sobre la forma en que el calentamiento global está afectando al planeta, y muchos de ellos concuerdan en que es probable que algunas consecuencias ocurran si continúan las tendencias actuales (Cepeda, 2010).

1.4 Cambio Climático en Colombia

Colombia no ha sido ajena a los cambios dramáticos del clima global. En el año 2010, el país evidenció uno de los periodos más críticos en términos de anomalías en precipitación respecto al promedio anual (García & Botero, 2012).

El aumento de la evidencia científica apunta a la existencia de una relación entre el cambio climático antropogénico y el aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Lo anterior ha servido de estímulo para la realización de estudios sobre el impacto económico y social que dichos eventos podrían originar (Attention, 2017).

Debe resaltarse que las características físico-geográficas especiales del territorio colombiano inducen una expresión particular del cambio climático, que puede diferir un tanto de las estimaciones globales del cambio, diversos grupos de investigación han venido analizando el tema en el país (Pabón, 2008). En estudios específicos se han señalado las tendencias de múltiples variables hidroclimatológicas para diferentes regiones del territorio colombiano (Pabón, 2009).

La evidencia sobre el calentamiento del planeta es incontrovertible. El monitoreo sistemático del IDEAM indica que, de manera similar al resto del planeta, los glaciares colombianos pierden entre cincuenta centímetros (50 cm) y un metro (1 m) de espesor cada año, retrocediendo consecuentemente entre diez y veinte metros al año. Esta institución también ha registrado en Cartagena y en Tumaco, incrementos del nivel promedio del mar de entre tres (3) y cinco (5) milímetros por año, durante los últimos cincuenta años, lo cual ha hecho que en este período el nivel medio del mar en las costas colombianas haya aumentado diez (10 cm) centímetros en el Caribe y veintidós (22 cm) centímetros en el Pacífico. Por otra parte, durante los últimos 50 años la temperatura promedio de la superficie aumentó 0.65°C. No puede ser coincidencia que, a partir de 1995, prácticamente todos los años hayan sido los más calientes de la historia. El IDEAM tiene evidencias de que el incremento de la temperatura es mayor a mayores alturas, lo que permite suponer que los impactos serán mayores a mayor altitud. (Costa Posada, 2007)

Los modelos globales de clima también pronostican una redistribución de las lluvias debido a cambios en la circulación de la atmósfera. La mayoría de los modelos prevén aumento de la precipitación en el Pacífico colombiano y reducción en la cuenca del Caribe. El IDEAM ha detectado un pequeño, pero estadísticamente significativo, aumento de la precipitación en el occidente del país, lo que corrobora de alguna forma los modelos globales.

1.5 Cambio Climático en Boyacá

De acuerdo a la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA., 2015), donde se definen Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100, se caracteriza la potencial susceptibilidad a nivel departamental, de presentar cambios notables en las principales variables climatológicas que alteran la prestación de servicios ecosistémicos y las dinámicas de desarrollo asociados al territorio de análisis.

La vulnerabilidad entorno a la cuenca del río Alto Chicamocha es alta, considerando que la temperatura podrá incrementar para el fin del siglo XXI en el departamento 2.4°C respecto al valor medio de referencia (ver Figuras 1 y 2). Dicha afirmación, pondría límites a los usos del suelo, generando escenarios de disminución en la productividad agrícola y mayor recurrencia del desabastecimiento de las fuentes hídricas especialmente en zonas con Índice de Uso del Agua Alto y Muy Alto. Este ensamble multi-escenario, indica que, para fin de siglo las Provincias más afectadas serían: Occidente, Distrito Fronterizo, la Zona de Manejo Especial y Neira.

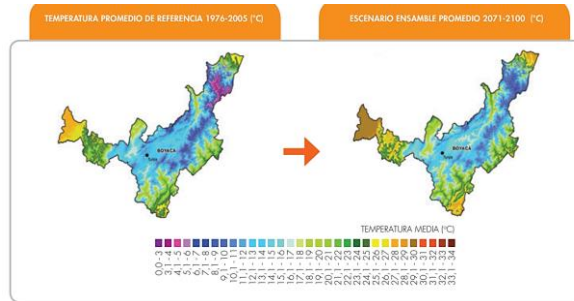


Figura 1. Mapa de temperatura media en el periodo de referencia 1976-2005 y para el periodo 2071-2100. Fuente: Tercera Comunicación de Cambio Climático.

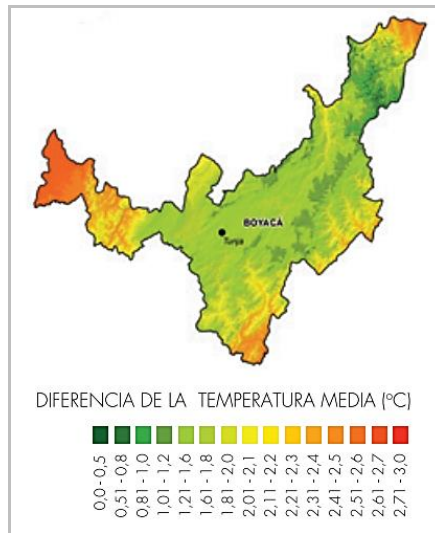


Figura 2. Mapa del cambio esperado de la temperatura media para el periodo 2071-2100, respecto al periodo de referencia 1976-2005. Fuente: Tercera Comunicación de Cambio Climático.

Es de anotar, que el potencial cambio en la precipitación en la cuenca es menos acentuado (Figuras 3 y 4). La extensión total del departamento de Boyacá, no tendrá cambios representativos en el parámetro de precipitación (3.19%), respecto al promedio de referencia de 1976-2005. Sin embargo, desde un análisis visual de la representación cartográfica, se observan cambios más pronunciados en la zona aferente a la cuenca del Alto Río Chicamocha, especialmente en las inmediaciones del centro poblado de Tunja. (Corporación Autónoma de Boyacá, 2018).

En cuanto a los posibles efectos del cambio climático se presume que en general el sector que se puede ver principalmente afectado es el agropecuario dados los aumentos progresivos de temperatura para las Provincias de Occidente y Distrito Fronterizo. El sector vial podrá verse afectado especialmente en la Provincia Centro y Oriente por aumentos de precipitación y posibles deslizamientos. En general, páramos y áreas de nieve estarán sometidos a estrés térmico y la biodiversidad asociada podrá verse afectada por desplazamientos altitudinales.

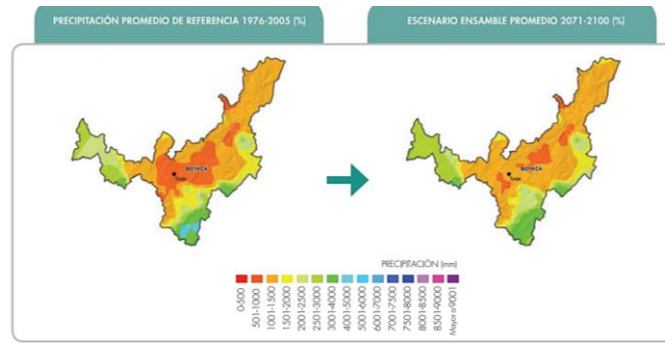


Figura 3. Mapa de precipitación promedio en el periodo de referencia 1976-2005 y para el periodo 2071- 2100. Fuente: Tercera Comunicación de Cambio Climático.

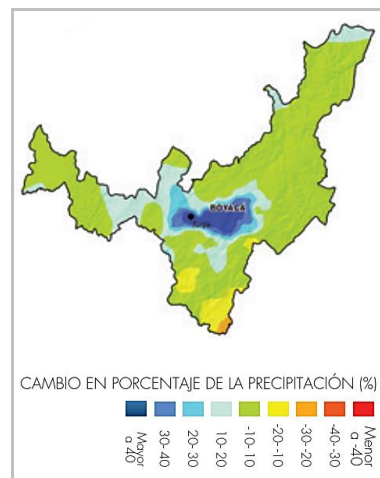


Figura 4. Mapa del cambio esperado de la precipitación para el periodo 2071-2100, respecto al periodo de referencia 1976-2005. Fuente: Tercera Comunicación de Cambio Climático.

1.6 Régimen Climático en la Cuenca Alta del Río Chicamocha

El clima es el tiempo meteorológico predominante de una determinada región geográfica y de una época concreta. Evaluado a largo plazo generalmente corresponde a un periodo largo (no menor a 30 años). El régimen climático es influenciado por la altitud, las formas geológicas y la cercanía o no al mar. Al ser un promedio, recoge en un dato toda la variabilidad existente en ese periodo de tiempo y como se basa en el análisis de datos de muchos días permite describir las condiciones atmosféricas predominantes en un lugar (IDEAM, 2016).

A continuación, se presenta una síntesis y análisis de los resultados más recientes reportados para la caracterización espacio temporal del clima en el documento “Actualización del Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica del río Alto Chicamocha” presentado por Corpoboyacá (2018).

El clima de la zona de estudio está dominado principalmente por la topografía del relieve y por los movimientos de la zona de confluencia intertropical (ZCIT), los cuales tienen relación con el aumento o disminución de la precipitación y la temperatura sobre la cuenca a lo largo del año (Corpoboyacá, 2018).

1.6.1 Precipitación

El análisis de la precipitación fue realizado a nivel regional para la cuenca alta del río Chicamocha, teniendo en cuenta información histórica a escala mensual de los registros de 35 estaciones en un periodo de 25 años comprendido entre enero de 1990 hasta diciembre de 2014, estaciones localizadas en la cuenca y en su área de influencia.

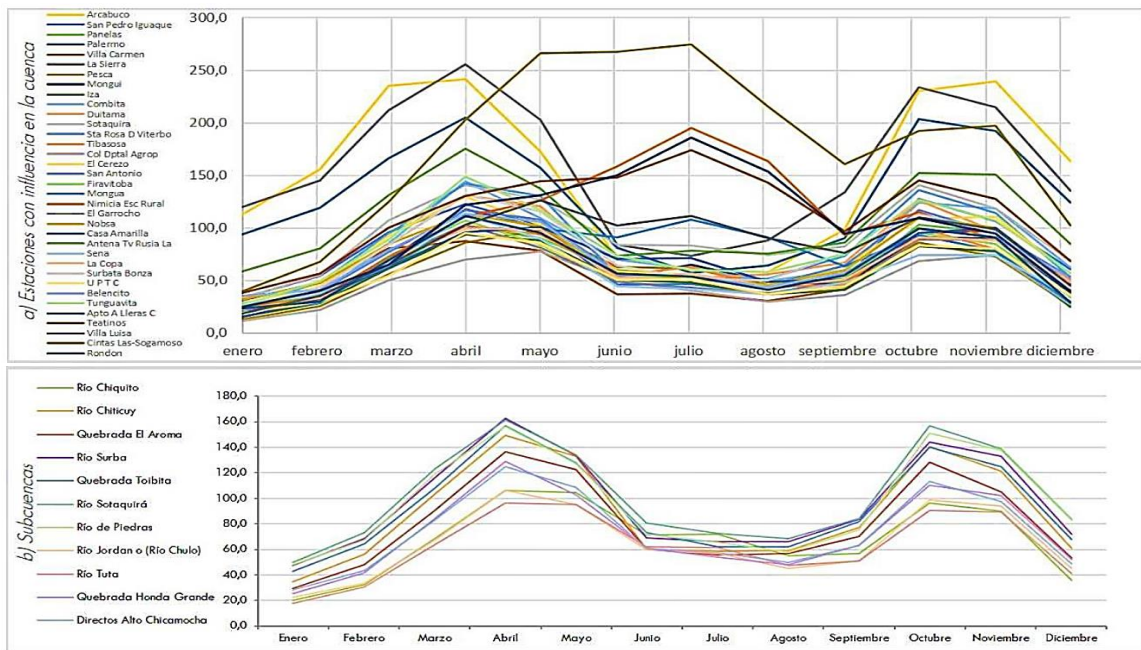


Figura 5. Variabilidad anual de la precipitación (mm) durante el periodo 1990-2014 para La Cuenca Alta del Río Chicamocha. Fuente: Consorcio POMCA 2015 003.

La Cuenca Alta del Río Chicamocha posee un régimen de precipitaciones de tipo bimodal, el cual explica la presencia de dos épocas de altas precipitaciones ubicadas entre los meses de marzo a mayo y los meses de septiembre a noviembre. Se aprecia también que los meses de abril y de octubre se presentan las mayores precipitaciones. Entre estos periodos se encuentran los periodos de baja pluviosidad comprendidos entre junio a agosto y diciembre a febrero (ver en la Figura 5).

Algunas zonas de la cuenca presentan la condición bimodal, sin embargo, poseen un incremento atípico para el mes de julio, esto sucede para las zonas que se encuentran sobre el flanco noreste de la cuenca en la zona del páramo de Ocetá (Corpoboyacá, 2018). Esta circunstancia particular es influenciada por el movimiento fuerte hacia el sur de la ZCIT en esta área, lo que también provoca que hacia el noreste del país se presente un régimen de tipo monomodal (Corpoboyacá, 2018).

El análisis espacial de la precipitación permite identificar y clasificar zonas donde se presenten similitudes entre condiciones pluviométricas. Para realizar este análisis usaron

una distribución espacial de la precipitación media anual y media mensual multianual, en el periodo de estudio seleccionado.

La cuenca alta del río Chicamocha presenta según este estudio una variabilidad espacial en la precipitación anual que en promedio es de 869 mm/año (Corpoboyacá, 2018). A nivel de subcuencas se identifica la mayor precipitación en el Río Surba con 1162.1 mm/año en la parte norte de la cuenca, extendiéndose hacia la zona noroeste desde el páramo de la Rusia hasta el páramo de Iguaque, cubriendo las subcuencas de Chiticuy, Surba, Toibita y Sotaquirá, por la zona sureste de la cuenca se extiende sobre el páramo de Ocetá hacia el páramo de Sarna cubriendo la subcuenca del Río Chiquito. A partir de los páramos se presenta un gradiente descendente de precipitación hacia las zonas más bajas de la cuenca, caracterizando valores mínimos cerca al municipio de Tunja sobre las cuencas de Río Chulo y Tuta con precipitaciones de 774.3 mm/año, identificadas como áreas áridas en productos de sensores remotos (imágenes satelitales).

1.6.2 Temperatura

La variabilidad anual de la temperatura media no presenta grandes fluctuaciones durante el año oscilando entre 1 y 3 °C (Corpoboyacá, 2018). La Figura 6 permite inferir que las condiciones de elevación de las estaciones corresponden a un factor altamente significativo en las variaciones. A nivel anual se presentan dos grupos de estaciones: el primero muestra claramente el régimen bimodal directamente proporcional al régimen de precipitaciones, identificando sus picos de máxima y mínima temperatura en periodos similares a las estaciones tales como Bertha, Surbata Bonza, Apto lleras, El Túnel, UPTC, Cardón El, Villa del Carmen, Belencito, Cerinza, Beteitiva, Tunguavita, Villa Luisa, La Copa y Rondón. El segundo grupo caracteriza un régimen monomodal directamente proporcional al régimen de precipitaciones en las estaciones de Villa de Leiva, Andalucía y la Sierra.

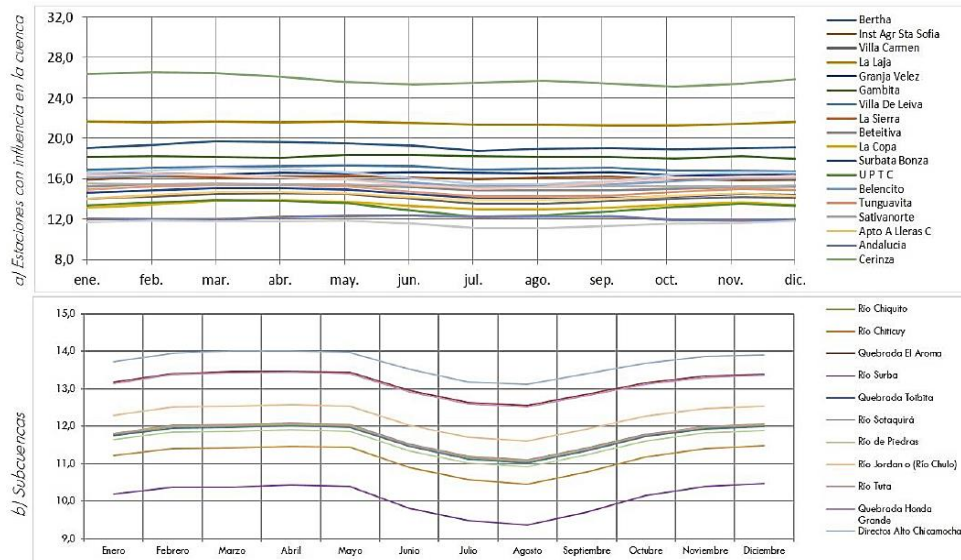


Figura 6. Variabilidad anual de la temperatura (°C) durante el periodo 1990-2014 para la Cuenca Alta del Río Chicamocha. Fuente: Consorcio POMCA 2015 003.

El comportamiento espacial de la temperatura en la cuenca está determinado principalmente por la relación entre la elevación y la temperatura, donde estimaron gradientes de 6°C cada 1000 m.s.n.m. en las épocas de baja precipitación y 6.2 °C cada 1000 m.s.n.m. en las épocas de alta precipitación. En las zonas con mayor elevación, cercanas a los 3950 m.s.n.m. donde se encuentran los páramos La Rusia, Iguaque, Oceta y Sarna, se centralizan temperaturas de 5.2 °C/año y en las zonas con menor elevación cercanas a los 2500 m.s.n.m. sobre los cauces principales de la cuenca, estimaron temperaturas de 14.6 °C/año (Corpoboyacá, 2018).

1.6.3 Caudal

Para determinar la caracterización de la información hidrométrica dentro del POMCA generaron un modelo hidrológico (Soil Moisture Accounting Procedure) SMAP, cuyos datos hidroclimáticos de entrada estuvieron comprendidos por la precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial.

A partir la Figura 7, se observa cómo las unidades estudiadas de la Cuenca Alto Chicamocha presentan los regímenes monomodal o bimodal que se observan en las estaciones de medición (Corpoboyacá, 2018). La gráfica a nivel mensual multianual permite identificar que algunas unidades son influenciadas por los dos regímenes, presentando una variación atípica con tres picos en el año, el suceso es provocado porque en ocasiones el movimiento de la ZCIT es de mayor rango, originando que en algunos años confluya por determinadas unidades una sola vez y en otras, converja dos veces en su movimiento, al compensarse los años en que estos sucede con los que no lo hace genera graficas a nivel mensual multianual con estas protuberancias en el periodo junio a agosto.

En la cuenca se observa que la mayor oferta hídrica se concentra en la parte baja, donde confluyen los aportes de todas las áreas de drenaje. Las subcuencas que generan los mayores aportes son las del río Tuta, río Sotaquirá y río Chiquito, es de destacarse la primera dado que genera el mayor aporte, a diferencia de sus homólogas. Las subcuencas que brindan el menor aporte son Q. Toibita, Q honda Grande y Q. El Aroma.

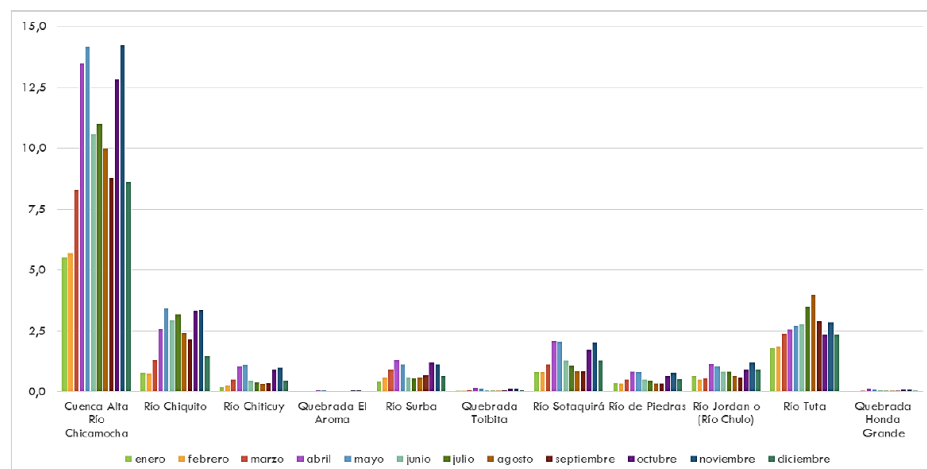


Figura 7. Variabilidad temporal de los caudales medios mensuales multianuales (m³/s), durante el periodo 1990-2014 para las subcuencas de la Cuenca Alto Chicamocha. Fuente: Consorcio POMCA 2015 003.

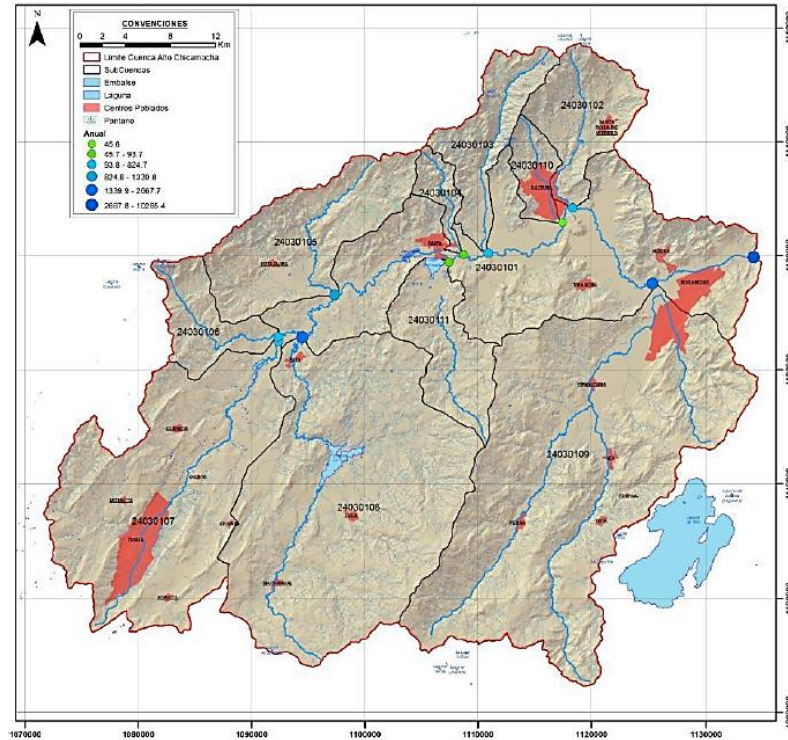


Figura 8. Variabilidad espacial de los caudales medios simulados (m^3/s), durante el periodo 1990-2014 para las subcuencas de la Cuenca Alto Chicamocha. Fuente: Consorcio POMCA 2015 003.

El modelo desarrollado para la cuenca Alta del río Chicamocha descrito anteriormente, les permitió generar valores de caudales medios mensuales, impidiéndoles el cálculo de valores máximos y mínimos absolutos, dicha información fue generada a partir de la metodología aplicada en el ENA 2014 en el contexto de las unidades de análisis (Corpoboyacá, 2018). Los valores de caudales fueron calculados como la relación entre los caudales máximos o mínimos (según sea el caso) de una estación de monitoreo respecto al caudal medio de la misma estación, multiplicado por el caudal medio modelado de las unidades de subcuenca o microcuencas cercanas al área de aferencia de la estación. Como resultado los caudales máximos y mínimos obtenidos poseen el régimen fundado por el modelo de caudales medios, y los máximos o mínimos se encontrarán por encima o debajo de este según la proporción calculada mediante la relación de caudales máximos o mínimos con respecto a la media en la estación de monitoreo.

Los caudales mínimos para cada unidad poseen una baja variación en el tiempo con tendencia constante a lo largo del año, oscilando entre $\pm 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto a $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ para las unidades de menor aporte y entre $\pm 0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto a los $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ para las unidades de mayor aporte las cuales son las subcuencas de río Tuta, río Sotaquirá y río Chiquito, mostrando la mayor variabilidad. En contraste, los caudales máximos presentan una mayor variación respecto a la condición de mínimos, destacando principalmente los periodo de transición cuando empieza o finaliza el periodo de lluvias marcando la mayor oscilación de caudales con valores de $\pm 0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto a $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$ para las áreas con menor aporte; río Chulo, río De Piedras, Q Honda Grande, Q Toibita y Q el Aroma y de $\pm 3.27 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto a $6.55 \text{ m}^3/\text{s}$ para las áreas de mayor aporte; río Tuta, Río

Sotaquirá, río Surba, Río Chiticuy y Río Chiquito. Es conveniente agregar que las unidades que poseen altas variaciones en los caudales son aquellas que por su extensión son potencialmente influenciadas por las condiciones climáticas, principalmente el régimen de precipitación (ver Figura 9).

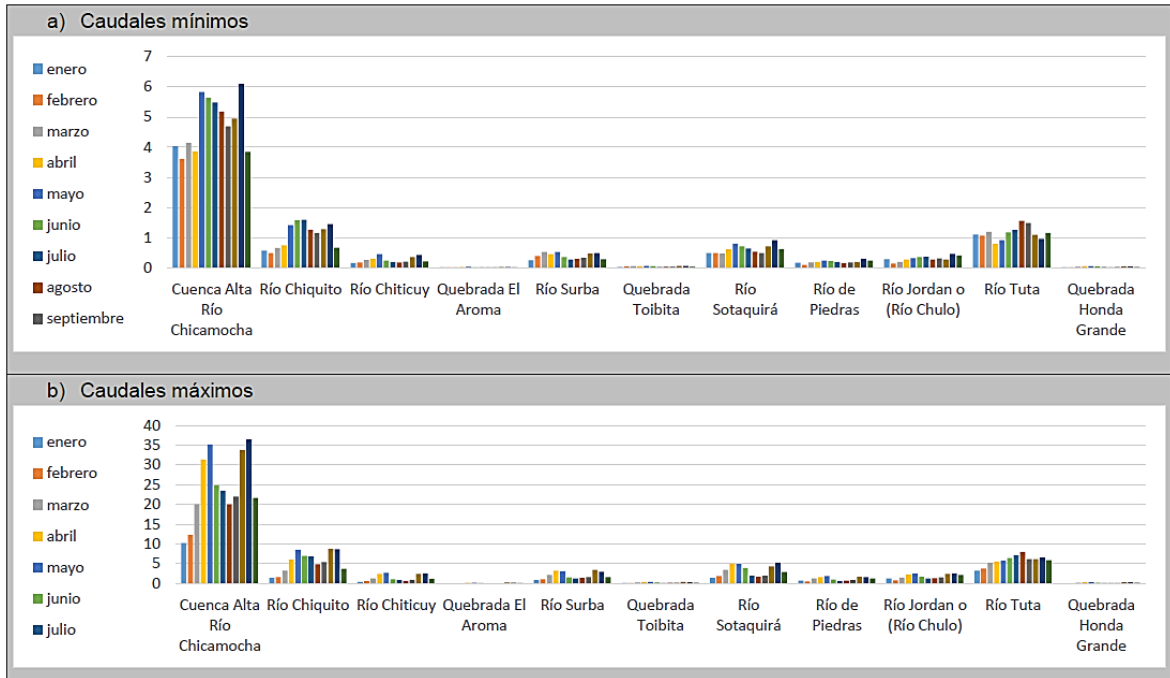


Figura 9. Variación anual de caudales máximos y mínimos para las unidades de subcuencas. Fuente: Consorcio POMCA 2015 003.

1.7 Eventos Hidroclimatológicos Extremos

Los eventos extremos deben ser entendidos en tres direcciones: el fenómeno de variabilidad climática que se presenta, su intensidad y su consecuencia. De esta forma, no todos los fenómenos meteorológicos de variabilidad climática producen un evento extremo. Ahora bien, los eventos extremos pueden estar referidos a cualquier elemento del clima, desde la precipitación hasta la temperatura o el viento. Los eventos hidrometeorológicos extremos están referidos solo a aquellos que involucran alguna forma de precipitación (líquida o sólida) y relacionados con sus valores umbrales o extremos, tanto el déficit como el superávit. Sus consecuencias van desde inundaciones hasta erosiones edáficas y estructurales por arrastre o fricción de agua (Retana, 2012).

El fenómeno de la niña en Colombia en la ola invernal del 2010, 2011 y 2012, dejó 1.818.472 personas damnificadas; 474.411 familias; 253 heridos; 103 desaparecidos; 2049 viviendas destruidas, 275 mil viviendas han sufrido daños y 666 municipios afectados más la capital (Corprodinco, 2011).

Según la valoración de daños y pérdidas ola invernal en Colombia 2010-2011, Banco Interamericano de Desarrollo – BID, Comisión Económica para América Latina y el Caribe – Cepal, el Departamento de Boyacá presentó 66.697 personas afectadas, 19.307 hogares y 12.456 viviendas. La distribución de viviendas por evento que produjo la

afectación en el Departamento de Boyacá, muestra que 6.996 hogares se vieron afectados por las inundaciones. 7.458 por deslizamientos, 1468 por vendavales y 677 por avalanchas. Según reportes informativos en la Cuenta alta del Río Chicamocha se vieron afectadas un gran numero de personas, por ejemplo en la ciudad de Tunja se inundaron 14 barrios, afectando alrededor de 250 familias.



Figura 10. Inundaciones ola invernal 2010, 2011 y 2012 en la Cuenca Alta del Río Chicamocha.
Fuente: Grupo de Investigación "Conociendo La Ciudad", autor.

1.8 Análisis de Tendencia en Series de Tiempo

Un incremento o disminución sostenida en las características de las series de tiempo es conocido como tendencia. Cambios naturales o antrópicos como: deforestación, urbanización, y cambios a gran escala en las condiciones de los recursos hídricos, asociados con el ciclo hidrológico, son responsables de la introducción de tendencias en las series de tiempo.

Algunas de las pruebas de detección de tendencia propuestas en la literatura incluyen: prueba de regresión para tendencia lineal (paramétrica), prueba de regresión para tendencias no lineales (paramétrica), prueba de Rango-Correlación de Kendall (paramétrica), prueba de Mann-Kendall (no paramétrica) y prueba de Spearman (no paramétrica). Numerosos estudios realizados en los últimos años a nivel mundial, han evaluado la presencia de tendencia en las variables climáticas e hidrometeorológicas, buscando detectar señales del calentamiento global (Berg & Hall, 2015; Gocic & Trajkovic, 2013; Madsen et al., 2014; Xu et al., 2010). De manera similar se han desarrollado estudios particulares para algunas variables como: temperatura y precipitación (Arnone et al., 2013; Gao et al., 2018; Pal & Al-Tabbaa, 2009; Wang et al., 2017) y caudales en ríos (Petrow & Merz, 2009; Xu et al., 2010).

La prueba más ampliamente empleada para detectar tendencia monotónica de incremento o disminución en series de tiempo es el método no-paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Generalmente es empleada en forma conjunta con el método de estimación de pendiente (T-S, Thiel–Sen), desarrollado por Thiel (1950) y Sen (1968) y posteriormente complementado por Gilbert (1987).

La potencia de la prueba de Mann-Kendall es muy elevada, ya que indica que la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando existe una tendencia es tan alta como la que daría un test paramétrico. La hipótesis nula de esta prueba establece que las observaciones son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. En los casos en que exista autocorrelación en las series, esta afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significación de las tendencias. Para corregir este efecto, Hamed y Rao (1998) derivan una relación teórica para calcular la varianza del estadístico de la prueba para series autocorrelacionadas y proponen una prueba MK modificada; Yue, et al. (2002) presentan una técnica de preblanqueo (*trend-free pre-whitening, TFPW*) que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie. Hirsch and Slack (1984) desarrollaron una prueba de tendencia para datos estacionales con correlación serial conocida como Mann-Kendall estacional.

Estas metodologías comúnmente empleadas en los análisis de tendencia para variables hidrometeorológicas asociadas con cambio climático, serán una herramienta fundamental en la estimación y detección de tendencias estadísticamente significativas en las variables seleccionadas, en búsqueda de señales de cambio climático en la zona de estudio.

1.9 Análisis de Series Temporales en el Dominio del Tiempo y en el Dominio de las Frecuencias

Para abordar el dominio del tiempo de las variables generalmente es utilizado el análisis de autocorrelación, el cual se define como la correlación cruzada de una señal consigo misma. La autocorrelación de una serie temporal derivada de un proceso, es simplemente la correlación de dicho proceso con una versión desplazada en el tiempo de la propia serie temporal. La función de autocorrelación resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal (Atmosféricos et al., 2009).

El análisis espectral o análisis en el dominio de las frecuencias es el problema de estimar el espectro de potencia de un proceso estocástico dado los datos parciales, generalmente solo un número finito de muestras de la función de autocorrelación de precisión limitada. La mayoría de los métodos de estimación espectral en uso ignoran el ruido en las muestras de autocorrelación y tratan solo el problema de tratar con las muestras de autocorrelación faltantes (Blahut, 2002). En otras palabras, el análisis espectral busca identificar la magnitud de la señal o la potencia con respecto a la frecuencia de dicha variable.

Los análisis en el dominio del tiempo (función de autocorrelación) y en el dominio de las frecuencias (función espectral) son de gran importancia puesto que permiten complementar el análisis tradicional de series temporales (ver Figura 11). De esta manera podrían ser identificados efectos de ciclicidad o estacionalidad en las variables

hidrometeorológicas. Estos análisis ayudarían a identificar señales de ocurrencia de fenómenos macroclimáticos (en diferentes escalas temporales) y a diferenciarlos de las señales atribuibles al cambio climático.

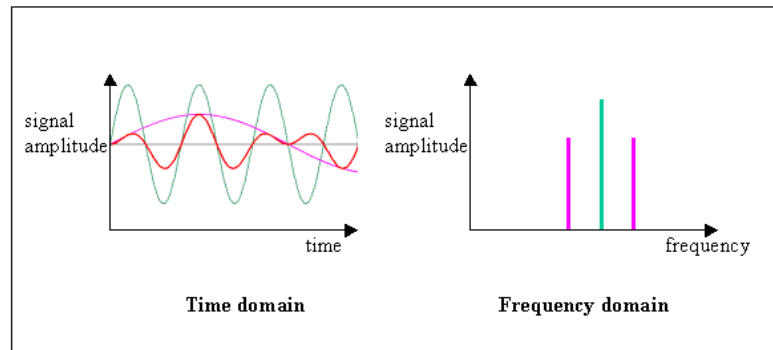


Figura 11. Dominio del Tiempo en comparación con el Dominio de Frecuencia. Fuente: *National Instruments*.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realizó una recopilación bibliográfica de investigaciones relacionadas con el tema del presente proyecto de investigación, tanto a nivel regional, nacional e internacional. Dicha recopilación se presenta a manera de resumen en las Tabla 1 a 3, donde se indica el nombre de la investigación, los autores, las variables analizadas (temperatura, precipitación y caudal), la metodología empleada y los resultados obtenidos.

Se identificó que a nivel internacional existe una gran preocupación y necesidad de conocer el comportamiento hidroclimatológico pasado y futuro de las diferentes regiones, con el fin de comprender mejor los fenómenos hidroclimatológicos extremos y mejorar la adaptabilidad al calentamiento global. Debe resaltarse que la presente investigación se centra en el estudio del cambio climático a partir de información hidroclimatológica histórica y no con fines de simulación futura de cambio climático.

Se encontró que en las diferentes investigaciones recopiladas analizan la variabilidad climática y el cambio climático, por medio de variables hidrometeorológicas como la precipitación, temperatura y caudal. No obstante, lo hacen sin incluir dichas variables simultáneamente en la mayoría de investigaciones estudiadas en el presente proyecto. Solo 4 de 27 investigaciones analizaron simultáneamente variables hidroclimatológicas (precipitación, temperatura y caudal). Algunas investigaciones solo incluyen variables atmosféricas como precipitación y temperatura (12 de 27), mientras que otras solo precipitación (6 de 27), o en su defecto variables hidrológicas como precipitación y caudal (2 de 27) y por separado las variables de temperatura y caudal (3 de 27).

Regionalmente no ha sido objeto de investigación el comportamiento simultáneo de estas variables (precipitación, temperatura y caudal) a nivel espacial y temporal en la Cuenca Alta del Río Chicamocha, teniendo en cuenta largos periodos de tiempo, al menos correspondiente a una "normal climatológica" (mínimo 30 años), de acuerdo con las recomendaciones de la organización meteorológica mundial (OMM).

Tabla 1. Cuadro resumen contexto Internacional.

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
	T	P	C		
Retana, (2012)		X		A partir de la ubicación temporal y espacial de los fenómenos atmosféricos, se estableció una relación con el percentil 90 de la precipitación mensual y anual de 48 estaciones meteorológicas de la base de datos del IMN, representativas de las zonas afectadas	Con el estudio concluyó que la variabilidad climática experimentada en las últimas décadas se seguirá repitiendo con una tendencia continua de disminución, existiendo evidencias documentadas de recientes sequías en la zona que han impactado negativamente la actividad agropecuaria
Tiscornia, Cal, & Giménez, (2016)	X	X		Se realizó una regresión simple entre la serie observada y el aumento de la temperatura global de la superficie del mar, se utilizaron también 23 modelos de circulación general y se determinó la variabilidad decadal mediante la aplicación de un filtro de pasa-bajos	Concluyeron que para todas las variables estudiadas y en todas las localidades y períodos analizados, la variabilidad interanual es la de mayor incidencia
Krishnakumar, Prasada Rao, & Gopakumar, (2009)		X		Analizaron la variación mensual, estacional y anual de las lluvias mediante la prueba de rangos de Man-Kendall y tendencia lineal	Los análisis revelaron disminuciones significativas de las lluvias monzónicas del sur occidente, mientras otros sectores presentaban considerable aumento en la estación post-monzón. Durante las estaciones de invierno y verano el incremento de la tendencia fue insignificante
Arnone et al., (2013)		X		Utilizaron la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para detectar cualquier tendencia potencial en las series temporales analizadas	Los resultados proporcionaron una visión general de las posibles tendencias en algunas características de la precipitación a nivel regional y local
Pal & Al-Tabbaa, (2009)		X		Examinaron los posibles cambios de tendencia en las lluvias extremas, por medio de la técnica no-paramétrica de Mann-Kendall aplicada a series de datos diarios	Los resultados mostraron que hay grandes diferencias intra-regionales en las tendencias en diferentes estaciones del año, siendo este un indicador de cambio climático local en las últimas cinco décadas

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
Xu, Liu, Fu, & Chen, (2010)	X	X	X	Utilizaron la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para detectar las tendencias de variables hidroclimáticas en la cuenca del río Tarim, en China. Adicionalmente implementaron el software Arcgis para la interpolación de la distribución espacial de las tendencias hidrometeorológicas	Como resultados encontraron que las variables de temperatura anual y la precipitación experimentaron una tendencia creciente, mientras que el caudal presentó una tendencia mixta de disminuir y aumentar. Concluyeron igualmente que la actividad humana contribuyó a la disminución del caudal aguas abajo de la cuenca del río Tarim
Tabari, Shifteh, & Rezaeian, (2011)	X	X		Pruebas de Mann-Kendall, Mann-Whitney regresión lineal y pruebas estadísticas de rango Mann-Kendall. Evaluaron el efecto de la correlación serial en las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y para determinar el año aproximado de comienzo de las tendencias emplearon la prueba estadística de rango de Mann-Kendall	Encontraron que las pruebas de tendencia detectaron significantes incrementos en las series de temperatura media anual, máxima y mínima aproximadamente del 69%, el 23% y el 46% de las estaciones, respectivamente. La prueba estadística de rango de Mann-Kendall indicó que las tendencias significativas crecientes de los datos de temperatura del aire comenzaron en la década de 1970 en la mayoría de las estaciones
Wang, Pan, Chen, & Ye, (2017)	X	X		Paquete Rclimdex, Adicionalmente la función ortogonal empírica (EOF), la prueba de Mann-Kendall y la prueba de CUSUM. Todas las estaciones estudiadas fueron sometidas a un análisis de homogeneidad, como la prueba estándar de homogeneidad normal y el método de acumulación de partida	Pudieron determinar que el clima mostró una tendencia de calentamiento a escala anual y estacional. Los eventos cálidos aumentaron y los eventos fríos disminuyeron. Los índices de precipitación regionales y los índices de temperatura mínima mostraron cambios abruptos alrededor de 1986, mientras que los índices de temperatura máximos cambiaron abruptamente en 1996
Gao, Huang, Chen, Chen, & Liu, (2018)		X		Modelos aditivos generalizados para los parámetros de Ubicación, Escala y Forma, por sus siglas en inglés GAMLSS, el cual tiene dos tipos diferentes, modelo paramétrico completo y semi-paramétrico. Se utilizaron conjuntamente funciones de distribución como: Gamma, Log-normal, Gamma generalizada, Gamma inversa, Gaussiana inversa, Gumbel inverso y Normal oblicua Tipo 2	Los resultados muestran que la no estacionariedad es significativa a escalas locales. Por otro lado, concluyeron que el cambio climático natural tiene un gran impacto en el estado medio de precipitación extrema, mientras que las actividades antropogénicas conducen a una variabilidad significativa
Petrow & Merz, (2009)			X	Prueba de Mann-Kendall, la cual es una robusta prueba no paramétrica. Pre blanqueamiento sin tendencia (TFPW) por sus siglas en ingles. Estimador no paramétrico de tendencias de pendiente desarrollado por Sen	Demostraron que no hay un aumento ubicuo de las inundaciones en variables de magnitud o frecuencia en la segunda mitad del siglo 20. Sin embargo, inundaciones significativas permitieron detectar tendencias en una fracción considerable de las cuencas.

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
Bocheva, Marinova, Simeonov, & Gospodinov, (2009)		X		Análisis estadístico de las series de datos de precipitación. La técnica de distribución de Poisson y las pruebas no paramétricas como la prueba de Mann-Kendall	Evidenciaron un aumento significativo (más del 32%) de los días con fuertes precipitaciones en 24 horas, mientras que la precipitación anual total presenta una tendencia ligeramente decreciente en muchas regiones del país. Además, la contribución de la lluvia / nieve intensa y torrencial a los totales de precipitación anuales observados aumenta
Livada et al., (2019)	X			Regresión lineal para estimar la tendencia lineal (pendiente) y su significación estadística (utilizando una prueba de t de Student) y la prueba de Mann-Kendall	Concluyeron que en la mayoría de los casos se observa una tendencia al aumento estadísticamente significativa para la temperatura máxima, mínima y media del aire ambiente en todos los meses, excepto en febrero, abril y diciembre. Los cambios observados se deben a fenómenos de cambio climático tanto globales como locales
Oria, Ferraresi, & Tanda, (2017)	X	X		Empleo de 13 modelos climáticos regionales (MCR), basados en dos vías de concentración representativas (RCP4.5 y RCP8.5). Para la determinación de Tendencias históricas implementaron la prueba de Mann-Kendall (MK) y el estimador de pendiente de Theil-Sen (TS)	Los datos históricos resaltan una disminución general de la precipitación anual a una tasa promedio de 22 mm por década, pero, en muchos casos, las tendencias no son estadísticamente significativas. Por el contrario, la temperatura media anual muestra una tendencia al alza, estadísticamente significativa en la mayoría de los casos
Madsen et al., (2014)		X	X	Revisión bibliográfica del análisis de tendencias de precipitaciones extremas e inundaciones hidrológicas en Europa basado en observaciones y proyecciones climáticas futuras	Los estudios indican que hay alguna evidencia de un aumento general en la precipitación extrema observada, mientras que no hay indicios claros de tendencias crecientes significativas a nivel regional o nacional
Gocic & Trajkovic, (2013)	X	X		Utilizaron los métodos no paramétricos de Mann-Kendall y Sen para detectar y estimar tendencias positivas o negativas estadísticamente significativas en los datos meteorológicos. Las ocurrencias de cambios bruscos se detectaron utilizando gráficos de suma acumulativa y bootstrapping	Encontraron tendencias crecientes en las temperatura máxima y mínima anual. La humedad relativa disminuyó significativamente en verano. Además, no detectaron tendencias significativas en las series de precipitaciones de verano e invierno. En general, los resultados del uso de las pruebas de Mann-Kendall y Sen, demostraron el buen desempeño de estas técnicas de detección de tendencia en las variables meteorológicas
Charles & Liu, (2009)	X	X		Evalúan las tendencias con la prueba de Kendall y se discuten a la luz de los escenarios climáticos futuros a partir de los resultados de multi-GCM	Los resultados indican que la llanura del Norte de China no se ha vuelto más cálida y seca en las últimas cuatro décadas. La precipitación anual ha disminuido en aproximadamente 43.9 mm (6.7%, aunque no es estadísticamente significativo), así como las medias anuales de la media diaria. Las temperaturas máximas y mínimas han aumentado en 0.838°C, 0.188°C y 1.468°C, respectivamente, durante los últimos 40 años

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
	T	P	C		
Ding, Wang, & Lu, (2018)	X			Prueba de Mann-Kendall y la prueba de Sen, El análisis de correlación de Pearson también fue utilizado para analizar las correlaciones	Los resultados indican que las temperaturas máximas y mínimas anuales muestran tendencias crecientes significativas, mientras que el DTR (rango de temperatura diurna) muestra una tendencia decreciente significativa con una tasa de $-0.11^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Todos los índices cálidos regionales muestran tendencias crecientes significativas
Tian & Yang, (2017)	X	X		El análisis Mann-Kendall (MK) y el análisis de regresión lineal (LR) se utilizaron para analizar las tendencias de temperatura y precipitación	Como resultado durante este período de tiempo la tasa de calentamiento promedio en las Tres Cuencas ($0.22^{\circ}\text{C}/10$ años) fue cercana a la de la superficie terrestre global ($0.21^{\circ}\text{C}/10$ años). Sin embargo, la tasa de calentamiento mostró una alta variabilidad espacial en la región de estudio, que oscila entre $0,05^{\circ}\text{C}/10$ años y $0,49^{\circ}\text{C}/10$ años

Tabla 2. Cuadro resumen contexto Nacional.

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
	T	P	C		
Ochoa & Poveda, (2008)	X	X	X	Utilizaron los resultados de la prueba de tendencia lineal de largo plazo en la media de series hidroclimatológicas con un nivel de confianza del 95%	Las señales más claras de cambio climático son las de temperaturas mínimas y medias, que muestran un comportamiento creciente generalizado. Mientras que en mayor parte de las series de precipitación no se detectó ninguna tendencia, excepto por algunas estaciones con tendencia creciente en Antioquia y Boyacá. Las series de caudales medios de las cuencas más grandes mostraron tendencia decreciente

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
Pérez, Poveda, Mesa, Carvajal, & Ochoa, (1998)	X	X	X	Emplearon pruebas de cambio y pruebas de tendencia, mediante el Análisis Bayesiano para identificar posibles puntos de cambio. Para la identificación de tendencias se utilizaron la prueba de Mann-Kendall, Prueba de tendencias lineal, Prueba de Hotelling-Past, Prueba de Kendall estacional, Prueba de Sen, Prueba de homogeneidad estacional y Prueba de Kendall- Mann-Sneyers	Descubrieron que existe una clara tendencia de calentamiento que se observa en las series de temperaturas y que concuerda con las series de temperaturas medias
Ruiz, Moreno, Gutiérrez, & Zapata, (2008).	X	X		Procesaron las temperaturas medias mensuales y los registros de precipitación Total mensual de siete estaciones meteorológicas cercanas de la Red Global de Clima Histórico (GHCN). Analizan cambios en la media, varianza, y tendencias significativas en las series temporales climatológicas	Concluyeron que en las cabeceras del río Claro se observaron cambios en la media y la varianza, y tendencias significativas en las series temporales históricas de temperaturas mínimas y máximas, humedad relativa, eventos de lluvia y luz solar
Mayorga, Hurtado, & Benavides, (2011)	X	X		Realizan un análisis de las series históricas utilizando el programa RCLIMDEX (versión 2.12.1). Además, realizaron el análisis de las series históricas de precipitación total anual correspondiente al periodo 1971-2010 para 86 estaciones ubicadas en las principales ciudades del país	Con el estudio encontraron que el comportamiento de la precipitación acumulada ha aumentado en el país y que la mayor disminución ocurre en el suroccidente del territorio. Otro aporte fue que la mayor disminución de la precipitación anual se observó en el suroccidente del país, especialmente en el occidente de Nariño, así como en sectores del medio Magdalena, Boyacá y en sectores de Guainía
Alzate et al., (2015)	X	X		Utilizaron la estadística no-paramétrica y un proceso de interpolación a través del método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) para modelar la distribución espacial de las tendencias climáticas en la zona de estudio. Además, evaluaron la bondad de ajuste del método de interpolación a través de la técnica de validación cruzada	Los resultados obtenidos muestran que la temperatura media ha cambiado entre 0,1 y 0,4°C por década en las cuencas. La precipitación ha aumentado de 0 a 250 mm/década y los ciclos ENSO generan alteraciones en la variabilidad climática de las cuencas de manera diferenciada a nivel estacional e interanual

Tabla 3. Cuadro resumen contexto Regional.

Cita Bibliográfica	Variable			Metodología	Resultados obtenidos
	T	P	C		
Rincón (2001)	X	X		El análisis exploratorio fue realizado mediante medidas de tendencia central y medidas de dispersión. Para la generación de los mapas de tendencia de temperatura y teniendo en cuenta que la muestra se clasificó como paramétrica se utilizó el Método de Kriging Disyuntivo. Realizan el análisis de la correlación espacial entre las dos variables mediante el método de Sperman	Encontraron que la temperatura no presenta niveles de variación, mientras que la precipitación muestra una variable de tendencia irregular en los dos periodos de tiempo analizados
Cortes Zambrano, (2008)		X	X	Para el análisis de homogeneidad usaron herramientas gráficas (gráficas de masa simple y masa residual, histogramas) y estadísticas. Para el llenado de datos faltantes emplearon el programa Chac. En el análisis de tendencias utilizaron la plantilla de MAKESENS (<i>Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates for the Trend of Annual Data</i>)	El comportamiento del clima en la zona de estudio es uniforme, y la precipitación y el caudal presentan un comportamiento similar, mostrando ciclos anuales en estaciones localizadas en las cuencas pertenecientes a la zona de estudio
Rojas, Arce, Peña, Boshell, & Ayarza, (2010)	X	X		Para estimar la tendencia emplearon el método de pendiente de Sen y para determinar el nivel de confianza se utilizaron la prueba de Mann-Kendall. Utilizaron el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para generar los mapas de la distribución espacial de las tendencias	Con la investigación concluyeron que el cambio climático tiene manifestaciones muy locales en términos del comportamiento de las temperaturas y la precipitación para la zona de estudio
Corporación Autónoma de Boyacá, (2018)	X	X	X	Para el análisis de tendencias se usaron los estadísticos Rho de Spearman, Mann-Kendal, Pendiente Sen y Regresión Lineal. Período de estudio menor a una normal climatológica (1990-2014)	Se encontraron tendencias de incremento en las tres variables estudiadas.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los métodos y herramientas utilizados en esta investigación, así como el área de estudio y los diversos tipos de datos recopilados. La información recopilada, insumo importante para el desarrollo del presente trabajo fue solicitada y recibida oportunamente por parte del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

3.1 Desarrollo Metodológico

La metodología ha sido planteada teniendo en cuenta que se pretende conocer mediante un análisis de tendencia de series de tiempo, la relación o grado de asociación que existe entre las variables hidrometeorológicas con el cambio climático o la variabilidad climática en la zona de estudio, (ver síntesis Figura 12).

Las fuentes de información fueron en su mayoría secundarias, tales como: información hidroclimatológica mensual proveniente de la red de monitoreo hidrometeorológico del IDEAM, libros, artículos científicos, revistas indexadas, Diagnóstico del Plan De Ordenamiento Hídrico – PORH de la Cuenca Media y Alta Del Río Chicamocha, el Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha (2006 y 2018). Adicionalmente información espacial como cartografía base correspondiente a la red de drenaje, cabeceras municipales, estaciones hidrometeorológicas, modelo digital de elevación DEM obtenido del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), cartografía temática como pendientes, uso de suelo y cobertura vegetal.

Para el desarrollo del análisis exploratorio de datos, se identificó la validez, confiabilidad y homogeneidad de la información mediante la aplicación de diferentes pruebas estadísticas y metodologías gráficas. Con el objetivo de realizar un exhaustivo y riguroso análisis de detección y estimación de tendencias, se emplearon pruebas de tendencia paramétricas y no paramétricas mostradas en el Capítulo 2.

La información hidrometeorológica mensual consultada fue empleada con la finalidad de realizar un análisis hidroclimatológico de la cuenca posterior al análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias de las series temporales. En cuanto al análisis espacial de las tendencias y las variables estudiadas, este se realizó mediante el empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), y la implementación de una base de datos georreferenciada.

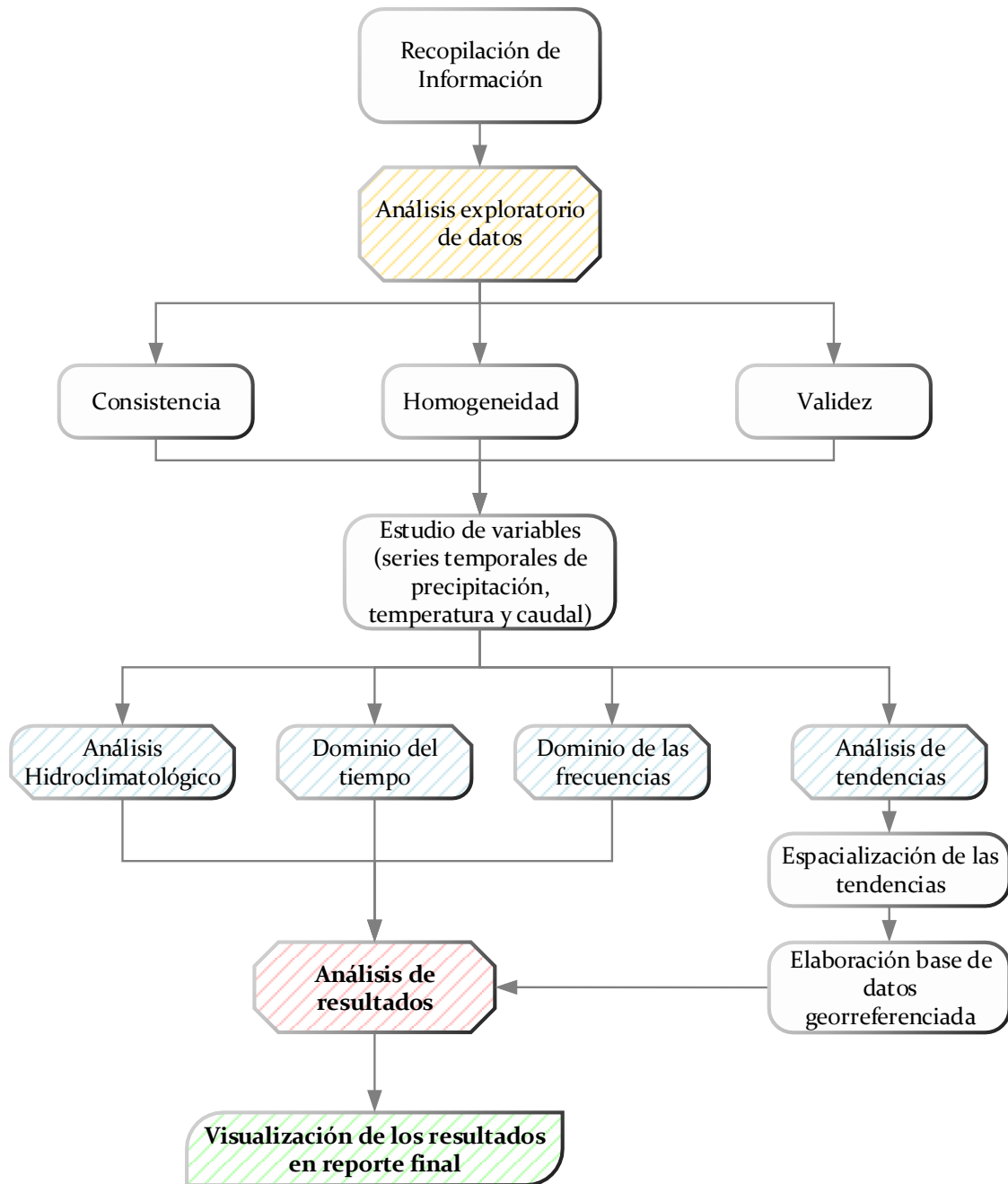


Figura 12. Síntesis de la metodología del presente trabajo de investigación.

3.2 Zona de Estudio

El proyecto se desarrolló en la Cuenca Alta del Río Chicamocha, que comprende veinte cuatro (24) municipios del Departamento de Boyacá: Tunja, Chivata, Corrales, Sora, Topaga, Motavita, Soracá, Combita, Oicatá, Siachoque, Sotaquirá, Tuta, Toca, Paipa, Pesca, Duitama, Tibasosa, Firavitoba, Iza, Cuitiva, Tota, Sogamoso, Nobsa y Santa Rosa. La Cuenca Alta del Río Chicamocha, está ubicada en la parte central de la

Cordillera Oriental con un área de 2147.704 km² (ver Figura 13). La red hídrica de la cuenca es extensa, con una longitud total aproximada de 4.500 km. Esta cuenca está conformada por trece (14) subcuencas, así: río Rí Tuta, Directos Alto Chicamocha, Río Chulo, Río Pesca, Río Tota, Río Sotaquirá, Río Chiquito, Río Chiticuy, Río Surba, Río Moniquirá, Quebrada Honda Grande, Río Piedras y Quebrada El Aroma. Adicionalmente posee 2 embalses con un área total de 5,10 km², 152 lagunas equivalentes a 3,08 km² y 18 pantanos con un área total de 1,99 km², datos recopilados del Consorcio POMCA 2015.

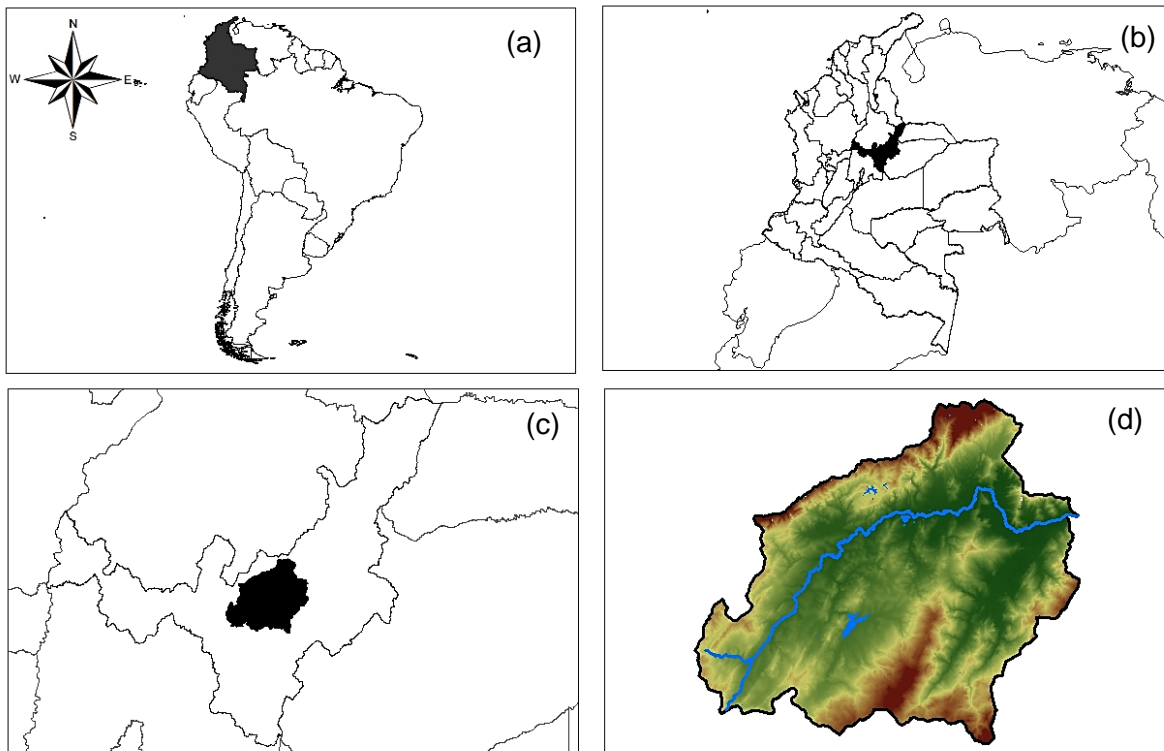


Figura 13. Mapa de ubicación de la zona de estudio. (a) Sur América, (b) Colombia, (c) Departamento de Boyacá, y (d) Cuenca Alta del Río Chicamocha, Fuente: IGAC y Autora.

3.3 Recopilación de Información Hidrometeorológica

Se recopiló información meteorológica mensual proveniente de estaciones seleccionadas con el criterio de que posean registros de un período homogéneo de tiempo (normal climatológica) de al menos treinta (30) años (1985-2017), y que cubran ampliamente la zona de estudio. La información a recopilar incluye parámetros como: precipitación total, con veinticuatro (24) estaciones; temperatura (mínima, media y máxima), con siete (7) estaciones; caudal medio, mínimo y máximo en doce (12) estaciones.

También se recopiló información hidrométrica mensual de caudales medios, mínimos y máximos, correspondientes a doce (12) estaciones: siete (7) limnigráficas y cinco (5) limnimétricas, con registros durante el período de tiempo comprendido entre 1985-2017.

Adicionalmente, existen dieciséis (16) estaciones cuyos datos se recopilaron, algunas de estas, aunque no cumplen exactamente con el periodo de estudio, poseen registros

menores de 30 años, siendo así útiles para efectos de comparación, validación, verificación, análisis de confiabilidad de las series, correlaciones y análisis estadísticos conducentes a la complementación y ajuste de la información.

3.4 Análisis Exploratorio de Datos

Se pretende en esta actividad realizar el análisis de consistencia, homogeneidad y validez de la información hidrometeorológica mensual, recopilada de las diferentes variables correspondientes a las estaciones seleccionadas para el estudio. Adicionalmente, se realizó la estimación de datos faltantes a través de diferentes metodologías ampliamente conocidas en hidrología.

Los métodos o herramientas empleados para el desarrollo de esta actividad fueron las pruebas gráficas para la determinación de outliers como diagramas de cajas y patillas (*Box-Plot*), la prueba estadística de Grubbs y la prueba estadística de Rosner. Para el llenado de datos faltantes el método de *additive outlier approach* con el empleo del software TRAMO (Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing Observations and Outliers), desarrollado por el Banco de España y análisis de regresión lineal simple y múltiple con las estaciones más cercanas (con las que la correlación fue significativa), mediante ajuste por mínimos cuadrados. Las pruebas estadísticas de homogeneidad empleadas fueron: U de Mann-Whitney (Mann Whitney), Kolmogorov-Smirnov, Wald-Wolfowitz y Rachas; junto con un conjunto de metodologías implementadas con éxitos en otros proyectos de investigación (Cepeda & Rodríguez, 2010).

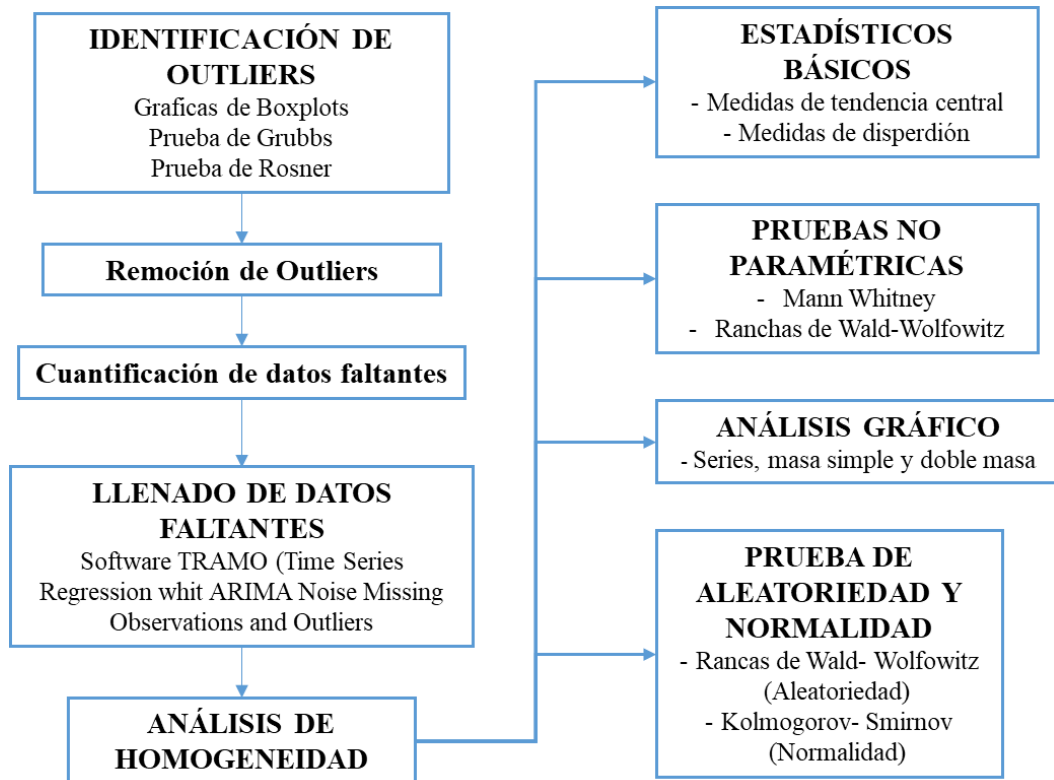


Figura 14. Metodología empleada para el análisis exploratorio de datos.

3.5 Análisis Hidroclimatológico de la Cuenca Alta del Río Chicamocha

El análisis hidroclimatológico se realizó a nivel local para la cuenca alta del río Chicamocha, partiendo de la información hidrometeorológica de las 24 estaciones localizadas dentro de la cuenca y su área de influencia con un periodo de tiempo de 32 años comprendido entre 1985 y 2017. Con esta actividad se determinó el comportamiento temporal de las variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura y caudal) a nivel mensual y anual.

3.6 Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio del Tiempo y en el Dominio de las Frecuencias

Se realizó la caracterización y determinación del régimen hidrológico, incluyendo el dominio del tiempo (función de autocorrelación) y en el dominio de las frecuencias (análisis espectral) de las variables relacionadas con cambio climático durante el período de tiempo 1985-2017. Esta actividad tendiente a encontrar posibles correlaciones de las variables mencionadas con los fenómenos macroclimáticos, mediante el empleo de diferentes herramientas computacionales.

Con el fin de conocer directamente la variabilidad climática estacional e interanual de la precipitación y las temperaturas (media, máxima y mínima), para cada una de las series correspondientes a al período de tiempo seleccionado, se calculó la función de autocorrelación (ACF) con un nivel de significancia del 5%. El análisis espectral o análisis en el dominio de las frecuencias se desarrolló mediante el cálculo de la función de densidad espectral para cada una de las series, obteniéndose de allí el armónico fundamental y las frecuencias más sobresalientes, previa suavización del periodograma, mediante el método de la ventana de Parzen, (1962)

3.7 Análisis de Tendencias de las Variables Hidrometeorológicas Mensuales

Los análisis de tendencia mencionados en el marco conceptual se realizaron para las series mensuales multianuales y para las series anuales en cronología normal, agregadas a partir de la información mensual recopilada y procesada. Los dos tipos de series fueron analizados en el período homogéneo de tiempo 1985-2017, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) sobre el período mínimo de estudio para análisis climáticos (normal climatológica de treinta años).

Para la identificación y estimación de las tendencias de incremento o disminución de las series de caudal, temperatura y precipitación se utilizaron pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas de identificación y estimación de tendencias, detección de correlación serial, así como de detección de cambios y diferencias en la media. Las

herramientas computacionales a utilizada son TREND v 1.0.2 y MAKESENS 1.0 para la Prueba de Mann-Kendall, en forma conjunta con el método de estimación de pendiente (T-S, Thiel-Sen) y la prueba Mann-Kendall estacional donde se remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie (Cepeda & Rodríguez, 2010).

TREND está diseñado para facilitar las pruebas estadísticas de tendencias, cambios, aleatoriedad en datos hidrológicos y otras series de tiempo. TREND tiene 12 pruebas estadísticas basadas en el Taller de Expertos de la OMM / UNESCO sobre Detección de Tendencias / Cambios y en el CRC para la Hidrología de Captación, "Pautas Hidrológicas: Técnicas de Estimación en Hidrología Australiana" (Chiew & Siriwardena, 2005).

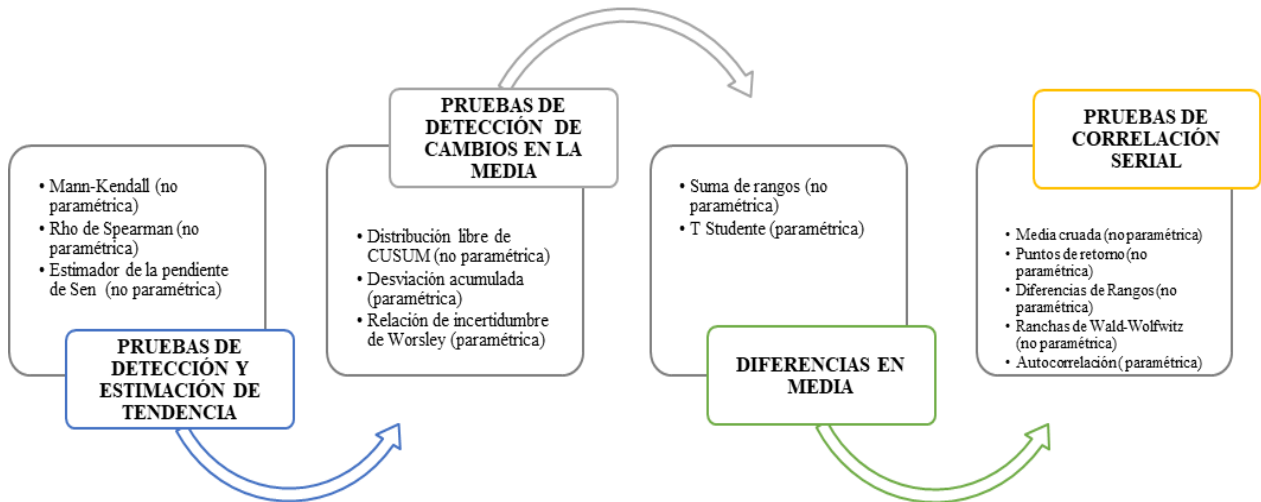


Figura 15. Metodología empleada para la identificación y estimación de tendencias en las series temporales.

El programa MAKESENS fue desarrollado para detectar y estimar tendencias en las series temporales de valores anuales de concentraciones atmosféricas y de precipitación. El procedimiento MAKESENS se basa en la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para la tendencia y en el método no paramétrico de Sen para la magnitud de la tendencia. La prueba de Mann-Kendall es aplicable a la detección de una tendencia monótona de una serie de tiempo sin ciclo estacional o de otro tipo. El método de Sen utiliza un modelo lineal para la tendencia.

La plantilla MAKESENS fue creada en Microsoft Excel 97 y las macros se codificaron con Microsoft Visual Basic. (Instituto Meteorológico De Finlandia). Este software fue desarrollado dentro de un proyecto de investigación apoyado por los países nórdicos y bálticos, por *Finnish Meteorological Institute, Air Quality Research* de Helsinki, Finlandia (Salmi et al., 2002).

3.8 Espacialización de Tendencias

Se generaron mapas de tendencia de las variables hidrometeorológicas (precipitación total mensual, temperatura mensual: media, media máxima, media mínima; y caudal) mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica utilizando el software ArcGIS 10.3 mediante de la extensión *Spatial Analyst* y *3D Analyst*, así como en las herramientas (*Toolbox*) de Análisis Espacial, Análisis y 3D Análisis.

En estos mapas se indicó la tendencia (positiva o negativa) y la magnitud correspondiente para las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca.

3.9 Elaboración de Base de Datos Georreferenciada de las Tendencias

En esta actividad se implementó una *geodatabase* en el software ArcGIS 10.3. Se buscó principalmente estructurar, en formato SIG, la información espacial de las tendencias junto con la información alfanumérica recopilada y generada en las demás actividades del proyecto de investigación, permitiendo tener la información ordenada, estructurada, disponible para análisis, procesamiento, consulta y presentación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Recopilación de Información

Como se mencionó en el Capítulo 3, se recopiló información meteorológica mensual proveniente de estaciones seleccionadas con el criterio de que posean registros de un período homogéneo de tiempo (normal climatológica) de al menos treinta (30) años (1985-2017), y que cubran ampliamente la zona de estudio (ver Figura 16). En la Tabla 4, se presentan las diferentes variables recopiladas y la cantidad de estaciones involucradas.

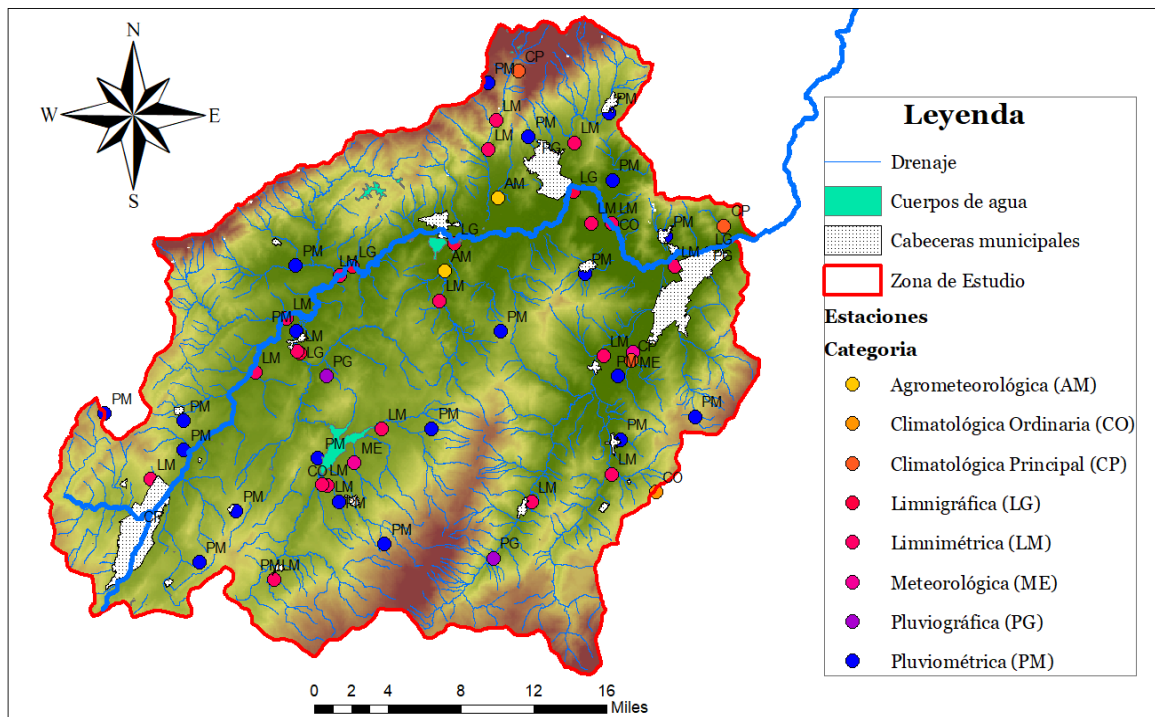


Figura 16. Estaciones hidrometeorológicas analizadas. Fuente: IGAC, IDEAM y Autora.

Tabla 4. Cantidad de estaciones hidroclimatológicas utilizadas.

VARIABLES	CANTIDAD DE ESTACIONES
Precipitación total	24
Temperatura (máxima, media y mínima)	7
Caudal	12

Para solicitar la información al IDEAM fue necesario definir los parámetros hidrometeorológicos necesarios y las diferentes estaciones existentes (ver Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Parámetros Hidrometeorológicos solicitados.

CATEGORÍA	PARÁMETRO
Pluviográfica	Precipitación Totales (mm)
Pluviométrica	Precipitación Totales (mm)
Climatológica Ordinaria	Precipitación Totales (mm)
	Temperatura Máxima (°C)
	Temperatura Media (°C)
	Temperatura Mínima
Climatológica Especial	Precipitación Totales (mm)
	Temperatura Máxima (°C)
	Temperatura Media (°C)
	Temperatura Mínima
Meteorológica Especial	Precipitación Totales (mm)
	Temperatura Máxima (°C)
	Temperatura Media (°C)
	Temperatura Mínima
Limnimétrica	Caudales máximos (m ³ /s)
	Caudales medios (m ³ /s)
	Caudales mínimos (m ³ /s)
Limnigráfica	Caudales máximos (m ³ /s)
	Caudales medios (m ³ /s)
	Caudales mínimos (m ³ /s)

Tabla 6. Información general de las estaciones hidrometeorológicas.

Código	Nombre	Clase	Categoría	Corriente	Municipio	Altitud	Fecha Instalación	Años
24010840	Panelas	Met	PM	Pomeca	Motavita	3.195	15/08/1980	37
24030120	Pesca	Met	PG	Pesca	Pesca	2.678	15/02/1957	60
24030140	Siachoque	Met	PM	Firaya	Siachoque	2.720	15/07/1957	60
24030230	Iza	Met	PM	Pesca	Iza	2.470	15/02/1958	59
24030310	Combita	Met	PM	Chulo	C-Ômbita	2.820	15/08/1958	59
24030350	Duitama	Met	PG	Chiticuy	Duitama	2.540	15/01/1959	58
24030380	Sotaquirá	Met	PM	Sotaquirá	Sotaquirá	2.860	15/09/1960	57
24030400	Sta. Rosa D Viterbo	Met	PM	El Manzano	Santa Rosa De Viterbo	2.690	15/02/1964	53
24030410	Tibasosa	Met	PM	Chicamocha	Tibasosa	2.500	15/01/1964	53
24030510	Cerezo El	Met	PM	Salitre	Paipa	2.900	15/01/1970	47
24030530	San Antonio	Met	PM	Tuta	Tuta	2.580	15/04/1971	46
24030540	Firavitoba	Met	PM	Pesca	Firavitoba	2.486	15/04/1971	46
24030770	Garrocho El	Met	PM	Qda. Alizal	Toca	2.836	15/03/1974	40
24030790	Nobsa	Met	PM	Chicamocha	Nobsa	2.500	15/02/1964	53
24030800	Casa Amarilla	Met	PM	Toca	Toca	3.200	15/03/1974	43
24030820	Azulejos Los	Met	PG	Tuta	Tuta	2.780	15/06/1976	41
24030840	Antena Tv Rusia La	Met	PM	Surba	Duitama	3.650	15/08/1980	37
24030940	Sena	Met	PG	Chicamocha	Sogamoso	2.500	15/04/1981	36
24035120	Surbata Bonza	Met	AM	Surba	Duitama	2.485	15/03/1944	73

Código	Nombre	Clase	Categoría	Corriente	Municipio	Altitud	Fecha Instalación	Años
24035130	U P T C	Met	CP	Chulo	Tunja	2.690	15/02/1962	55
24035150	Belencito	Met	CP	Chicamocha	Nobsa	2.530	15/02/1967	50
24035170	Tunguavita	Met	AM	Salitre	Paipa	2.470	15/01/1968	49
24035300	San Cristobal	Met	ME	Qda Raiba	Toca	2.700	15/07/1971	43
24035340	Apto A Lleras C	Met	CP	Chicamocha	Sogamoso	2.500	15/01/1974	43
24037030	Palo El	Hid	LG	Tuta	Tuta	2.600	15/05/1955	62
24037070	Maguncia	Hid	LM	Sotaquirá	Sotaquirá	2.534	15/01/1964	53
24037080	La Gruta	Hid	LM	Pesca	Pesca	2.500	15/03/1979	38
24037090	San Rafael	Hid	LM	Chulo	Tuta	2.500	15/01/1964	53
24037110	La Resaca	Hid	LM	Chiquito	Firavitoba	2.492	15/03/1964	53
24037120	La Vega	Hid	LM	Iza	Cuítiva	2.550	15/01/1964	53
24037130	La Reforma	Hid	LG	Chicamocha	Sotaquirá	2.523	15/06/1966	51
24037190	San Rafael	Hid	LG	Chicamocha	Duitama	2.500	15/02/1972	45
24037290	Pte. Chameza	Hid	LG	Chicamocha	Nobsa	2.490	15/02/1971	46
24037450	Molino El	Hid	LM	Salitre	Paipa	2.539	15/06/1964	53
24037480	Trinidad La	Hid	LM	Surba	Duitama	2.500	15/08/1978	39
35095030	El Túnel	Met	CO	Lag De Tota	Cuítiva	3.000	15/02/1971	46

4.2 Análisis Exploratorio de Datos

A continuación, se presentan los resultados del análisis exploratorio de datos para las series temporales estudiadas.

4.2.1 Identificación de Datos Anómalos

La detección de datos anómalos u *outlier* consiste en identificar o establecer aquellos datos o conjuntos de datos que presentan inconsistencias y que no se ajustan al comportamiento de los demás datos. Para la identificación de los datos anómalos se emplearon diagramas de cajas y patillas (Figura 17 a manera de ejemplo) en conjunto con el software TRAMO.

Se identificaron un total de 94 datos anómalos de las 76 series estudiadas (caudal, temperatura y precipitación mensual), con la siguiente distribución; caudal máximo mensual 15 datos (0,4%), caudal medio mensual 23 datos (0,6%), caudal mínimo mensual 19 datos (0,5%), temperatura media mensual 6 datos, en la temperatura máxima y mínima mensual no se encontraron datos anómalos. Para precipitación total mensual fueron evidenciados 30 datos anómalos con un porcentaje del 0,3%.

De los 94 datos identificados como anómalos se retiraron 5 pertenecientes al caudal máximo ya que su valor era demasiado elevado con respecto a la media de los demás datos. Se tomó la decisión de dejar los demás datos ya que podrían tener relación con la variabilidad climatológica de la región.

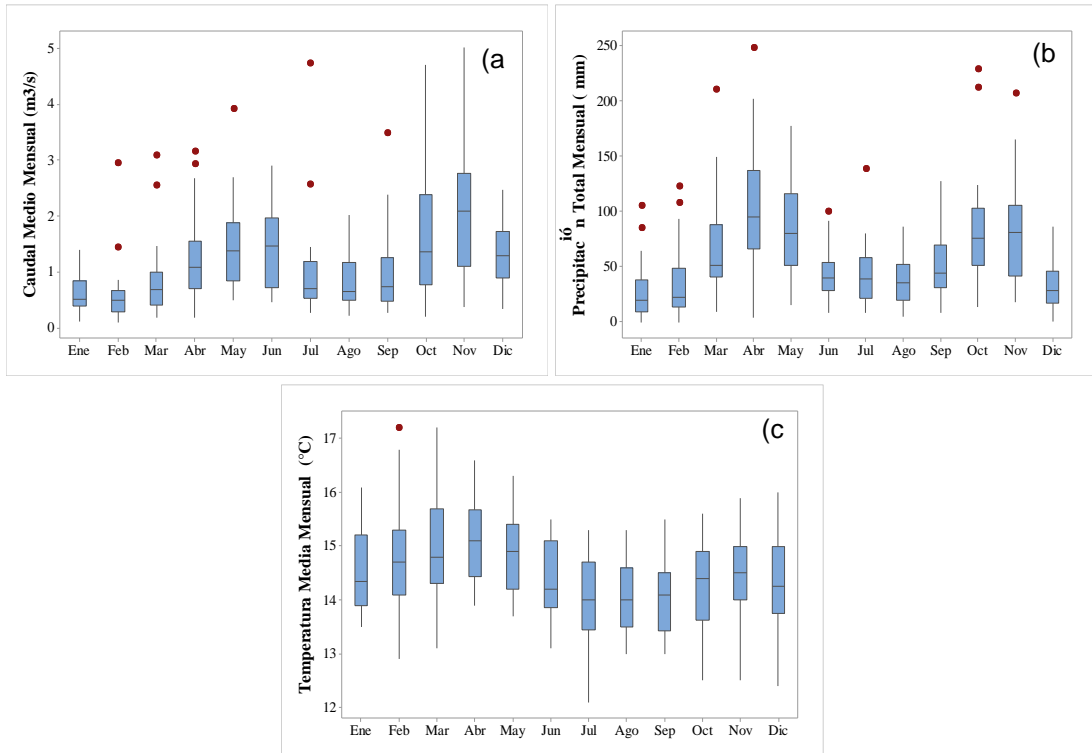


Figura 17. Diagramas de cajas. (a) estación Maguncia, (b) estación SENA, (c) estación Surbata-bonza.

4.2.2 Llenado de Datos Faltantes

Con la finalidad de presentar de forma resumida las estaciones con un porcentaje de datos faltantes menor del 30%, se realizó un cuadro resumen donde se puede observar las respectivas estaciones con la cantidad de datos faltantes y el porcentaje obtenido con respecto a la cantidad total de datos registrados (Tabla 7 a la 9).

Tabla 7. Datos faltantes en las series de precipitación total mensual.

Estaciones	UPTC	Panelas	Pesca	Siachoque	Iza	Combita	Duitama	Sotaquirá	El Tunel
Datos Faltantes	7	19	50	9	19	28	25	6	86
Porcentaje %	1,8	4,8	12,6	2,3	4,8	7,1	6,3	1,5	21,7
Estaciones	El Carrocho	Nobsa	Casa Amarilla	Los Azulejos	La Antena Tv Rusia	SENA	Surbata Bonza	Belencito	A.P.T.O A Lleras. C
Datos Faltantes	64	8	29	48	5	27	6	25	38
Porcentaje %	16,2	2,0	7,3	12,1	1,3	6,8	1,5	6,3	9,6
Estaciones	Sta Rosa D Viterbo	Tibasosa	El Cerezo	San Antonio	Firavitoba	Tunguavita	San Cristobal		
Datos Faltantes	6	29	3	14	4	15	55		
Porcentaje %	1,5	7,3	0,8	3,5	1,0	3,8	13,9		

Tabla 8. Datos faltantes en las series de caudal mensual.

Caudal Mínimo	Estaciones	Maguncia	El Palo	La Gruta	San Rafael LM	La Resaca	La Vega	La Reforma	San Rafael LG	Pt. Chámeza	El Molino	La Trinidad
	Datos Faltantes		28	2	60	33	84	42	17	47	6	68
Porcentaje %		7,5	0,5	16,1	8,9	22,6	11,3	4,6	12,6	1,6	18,3	9,1
Caudal Medio	Datos Faltantes	28	3	61	33	85	43	18	48	7	55	34
	Porcentaje %	7,5	0,8	16,4	8,9	22,8	11,6	4,8	12,9	1,9	14,8	9,1
Caudal Máximo	Datos Faltantes	28	2	60	33	85	42	17	47	6	62	37
	Porcentaje %	7,5	0,5	16,1	8,9	22,8	11,3	4,6	12,6	1,6	16,7	9,9

Tabla 9. Datos faltantes en las series de temperatura mensual.

Temperatura Mínima	Estaciones	Surbata Bonza	UPTC	Belencito	Tunguavita	A.P.T.O A.Lleras.C	El Túnel
	Datos Faltantes		107	25	104	21	28
Porcentaje %		27,0	6,3	26,3	5,3	7,1	27,0
Temperatura Media	Datos Faltantes	9	13	29	14	25	68
	Porcentaje %	2,3	3,3	7,3	3,5	6,3	17,2
Temperatura Máxima	Datos Faltantes	88	26	135	50	30	158
	Porcentaje %	22,2	6,6	34,1	12,6	7,6	39,9

Todas las series que poseían datos faltantes en una proporción mayor al 30% no se tuvieron en cuenta para posteriores análisis, como fue el caso de las estaciones Belencito y El túnel, correspondientes a la variable de temperatura máxima. Por último, mediante el software TRAMO fueron procesadas y completadas las series temporales, como se muestra a manera de ejemplo en las figuras 18 a la 19. Ver Anexo A, B y C: Series mensuales completas de precipitación, temperatura y caudal.

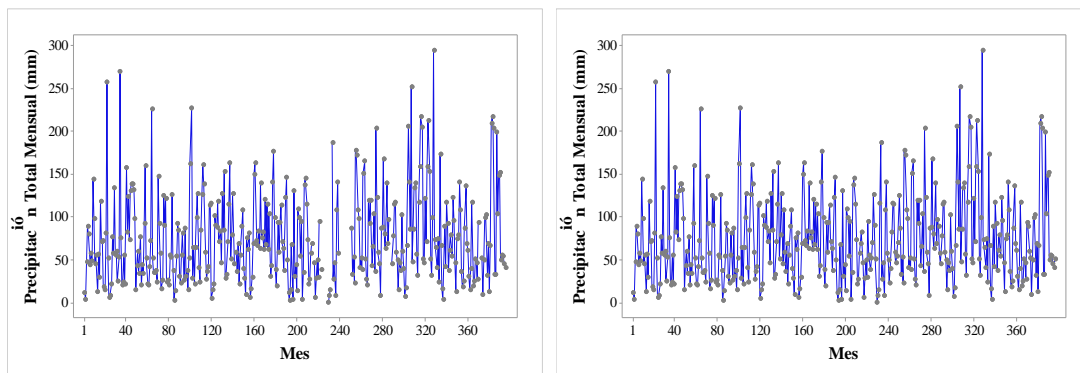


Figura 18. Series de precipitación total mensual estación Duitama. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.

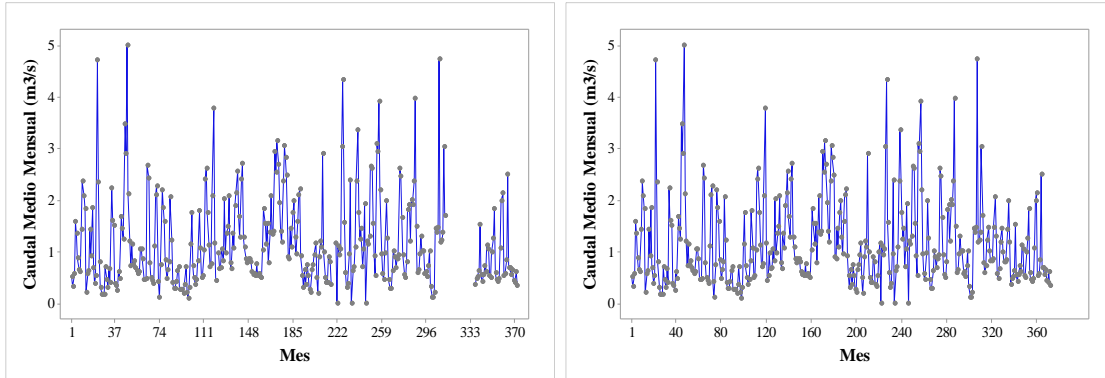


Figura 19. Series de caudal medio mensual estación Maguncia. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.

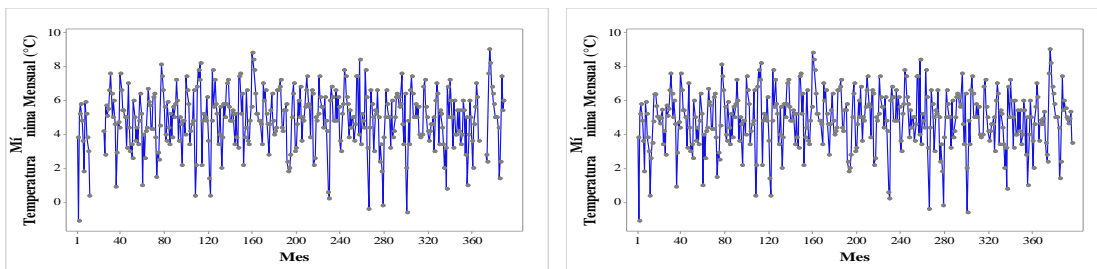


Figura 20. Series de temperatura mínima mensual estación UPTC. Izquierda, serie con datos faltantes. Derecha, serie con datos completos.

4.2.3 Análisis de Homogeneidad

Debe resaltarse que la homogeneidad en el análisis de series temporales desde el punto de vista hidrológico es muy importante al ser asociada con la estabilidad del proceso estocástico subyacente en el tiempo. Los resultados relacionados con estadísticos básicos, prueba de normalidad, prueba de correlación serial, pruebas gráficas y estadísticas de homogeneidad, son descritos a continuación.

- **Estadísticos básicos**

Los estadísticos básicos para cada una de las series temporales fueron estimados. En las tablas 10 a 12, se pueden observar algunos de los resultados del análisis a manera de ejemplo, los demás resultados se pueden ver en el Anexo D. De igual forma se puede evidenciar una alta variabilidad de los datos de precipitación total mensual y caudal máximo, medio y mínimo mensual, mientras que en el caso de las temperaturas la variabilidad no es tan notable.

Tabla 10. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de caudal máximo mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Maguncia	3,397	0,17	3,145	9,89	92,58	0,155	2,52	21,65	2,05	6,21

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
El Palo	8,026	0,392	7,537	56,812	93,91	0,001	5,896	63	2,45	10,61
La Gruta	4,165	0,219	3,871	14,988	92,94	0,105	3,33	22,01	1,45	2,75
San Rafael LM	2,769	0,135	2,492	6,211	90,01	0,14	1,92	13,46	1,82	3,3
La Resaca	48,7	24,3	411,2	169084,9	843,97	0	5,3	4316	9,71	93,22
La Vega	3,43	0,235	4,276	18,281	124,65	0,011	1,675	24,28	1,94	3,7
La Reforma	11,344	0,536	10,1	102,016	89,03	0,011	8,59	85,5	3,03	15,58
San Rafael LG	14,361	0,675	12,164	147,959	84,7	0,013	10,83	91	2,02	6,4
Pt. Chámeza	20,818	0,97	18,558	344,404	89,14	2,076	16,02	125	2,2	6,64
El Molino	0,789	0,0741	1,3055	1,7042	165,45	0,01	0,203	5,41	2,33	4,67
La Trinidad	3,103	0,266	4,877	23,786	157,18	0,034	1,644	39	4,45	24,98

Tabla 11. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de temperatura media mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Surbata Bonza	14,499	0,0441	0,867	0,752	5,98	12,1	14,5	17,2	0,18	0,03
UPTC	13,213	0,0347	0,679	0,461	5,14	11,1	13,2	15,8	0,21	0,61
Belencito	15,745	0,0545	1,045	1,091	6,63	13,6	15,7	18,4	0,11	-0,83
Tunguavita	14,784	0,0399	0,779	0,607	5,27	13,1	14,7	16,6	0,22	-0,62
A.P.T.O A.Lleras.C	14,345	0,043	0,828	0,686	5,77	11,7	14,3	17,2	0,15	0,67
El Tunel	11,552	0,0313	0,568	0,322	4,91	10	11,5	13,5	0,27	0,64

Tabla 12. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de precipitación total mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var.	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
UPTC	54,78	2,03	40,03	1602,77	73,08	0,1	45,1	303,3	1,73	5,68
Panelas	15,65	0,459	8,918	79,526	56,98	0	14,6	56,7	1,07	2,61
Pesca	55,79	2,11	39,31	1545,65	70,47	0	51	215,1	0,94	1,33
Siachoque	62,19	2,43	47,87	2291,87	76,98	0	52	249	1,15	1,31
Iza	52,16	2,19	42,57	1812,34	81,62	0	42,7	226,8	1,2	1,3
Combita	74,39	2,89	55,35	3063,46	74,4	0	61	395,5	1,42	3,4
Duitama	74,57	2,76	53,16	2826,38	71,3	0	61,1	294,4	1,14	1,34
Sotaquirá	93,18	2,9	57,19	3270,29	61,37	0	83,4	307,9	0,79	0,48
Sta Rosa D Viterbo	79,93	2,89	57,04	3253,15	71,36	1,2	66,35	300,7	1,08	1
Tibasosa	60,85	2,59	49,55	2455,21	81,43	0	49,1	293,3	1,39	2,51
El Cerezo	73,52	2,68	53,2	2830,05	72,36	0	60,5	301,9	1,16	1,63
San Antonio	70,61	2,6	50,74	2574,43	71,86	0	58,8	310,2	1,35	2,64

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Coef.Var.	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Firavitoba	57,86	2,26	44,69	1997,55	77,25	0	49,1	239,6	1,24	1,72
El Carrocho	56,58	2,37	43,17	1863,36	76,29	0	49,8	239,5	1,12	1,61
Nobsa	68,98	2,47	48,67	2368,57	70,56	1,2	60,8	245,1	1,01	0,9
Casa Amarilla	64,43	2,49	47,61	2266,9	73,9	0	57,4	258,5	1,22	1,81
Los Azulejos	67,28	2,72	50,68	2568,69	75,33	0	55,45	308,2	1,22	1,76
La Antena Tv Rusia	103,92	3,4	67,28	4526,75	64,74	0	88,6	362,7	1,07	1,28
Sena	58,43	2,29	43,9	1927,54	75,14	0	46,9	248	1,35	2,17
Surbata Bonza	73,79	2,55	50,41	2541,16	68,31	0	63,4	266,6	0,94	0,67
Belencito	68,48	2,49	47,95	2299,68	70,02	0,2	61,6	305,1	1,2	1,84
Tunguavita	81,58	2,84	55,38	3066,78	67,88	0	70,7	283,9	1,01	0,75
San Cristobal	62,4	2,36	43,52	1894,06	69,74	0	53,4	291,5	1,28	2,72
A.P.T.O A Lleras. C	62,42	2,41	45,53	2073,15	72,94	0	53,25	246,7	1,19	1,4
El Tunel	64,52	2,5	44,03	1938,9	68,24	0	59,4	257,2	1,07	2,01

▪ **Prueba U de Mann-Whitney**

Los resultados obtenidos de la prueba estadística no paramétrica (U de Mann-Whitney) permitieron detectar series consideradas homogéneas a un nivel de significancia de 0.05 (ver Tabla 13). Para el caso de la precipitación total mensual es evidente la aceptación de homogeneidad para las 25 series con un porcentaje del 96%. Para las series de caudal medio y máximo mensual, el porcentaje de homogeneidad están entre los rangos de 73% y 82% respectivamente, mientras para el caudal mínimo la homogeneidad fue menor al 50%. En cuanto a las series de temperatura media ninguna pudo considerarse homogénea. Las demás series de temperatura con un porcentaje del 67% no aprueban la prueba estadística de homogeneidad.

Tabla 13. Resultados obtenidos con la prueba de homogeneidad de U de Mann-Whitney para las series temporales mensuales de precipitación, temperatura y caudal.

Variable	Precipitación	Caudal Mínimo	Caudal Medio	Caudal Máximo	Temperatura Mínima	Temperatura Media	Temperatura Máxima
Porcentaje de Homogéneo (%)	96	45	73	82	33	0	33

▪ **Análisis Gráfico**

Las pruebas gráficas evidencian la homogeneidad en la mayoría de las series de precipitación total mensual, caudal máximo, medio y mínimo y de igual forma para las series de temperatura media y máxima, como se muestra en las figuras 21 a la 23, a manera de ejemplo con algunas series de los resultados obtenidos.

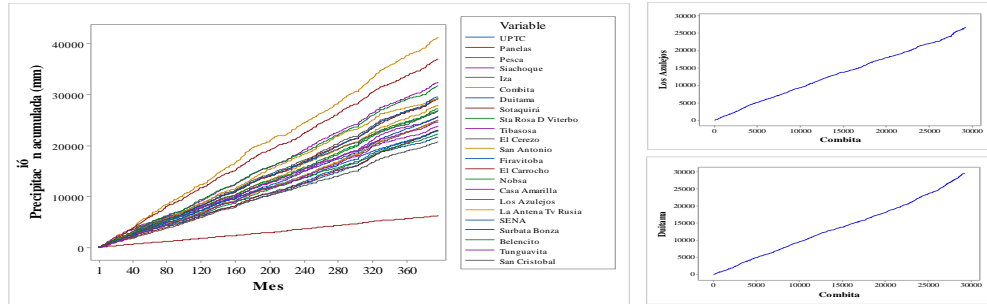


Figura 21. Gráficos de masa simple para series de precipitación total mensual (izquierda). Gráficos de masa doble en series ejemplo de precipitación (derecha).

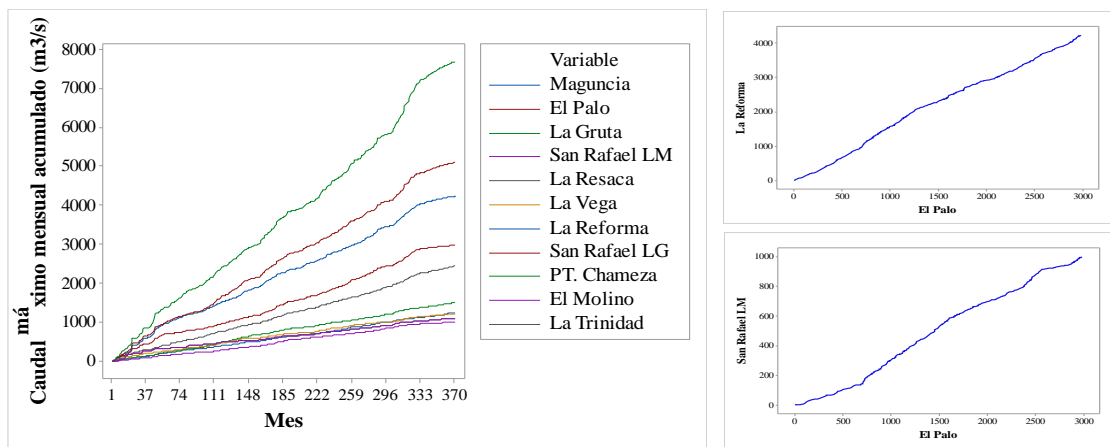


Figura 22. Gráficos de masa simple para serie de caudal máximo mensual (izquierda). Gráficos de doble masa para algunas series de caudal (derecha).

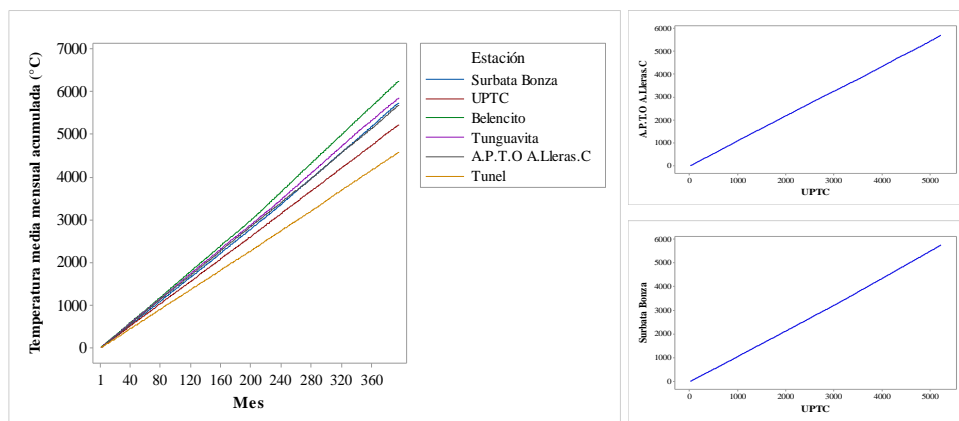


Figura 23. Gráficos de masa simple (izquierda) para las series de temperatura media mensual. Gráficos de doble masa (derecha) para algunas series de temperatura media mensual

De acuerdo con el análisis gráfico las curvas de masa y doble masa evidencian homogeneidad en la mayoría de las series de precipitación y caudal. Los resultados obtenidos corroboran los provenientes de las pruebas estadísticas.

Las gráficas para series de temperatura media y máxima no muestran ausencia de homogeneidad, caso contrario ocurrió con los resultados obtenidos mediante la prueba estadística no paramétrica (U de Mann-Whitney). Dicho comportamiento se evidenció también en investigaciones anteriores (Cepeda, 2010) en donde relacionan este comportamiento con la poca variación en las magnitudes de temperatura con relación a las medidas de tendencia central.

Es evidente que la no homogeneidad es una característica de un bajo número de las series analizadas. Dicha característica puede ser evidencia de la presencia de tendencias, relacionadas con señales de cambio climático (caso de las temperaturas) o a posibles circunstancias propias de la operación en las estaciones.

4.2.4 Pruebas de Aleatoriedad y Normalidad

Se realizaron pruebas de normalidad tanto gráficas como estadísticas en las variables de temperatura, precipitación y caudal mensual. Los análisis gráficos utilizados fueron los histogramas y los gráficos de probabilidad normal (ver ejemplos en las Figura 24 a 26).

Las series de precipitación total mensual, temperatura mensual y caudal mensual no cumplen en su mayoría supuestos de normalidad. El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. En estos casos el valor p es mayor que el nivel de significancia (0.05), por lo cual la decisión es rechazar la hipótesis nula y por consiguiente concluir que los datos analizados poseen una distribución no normal.

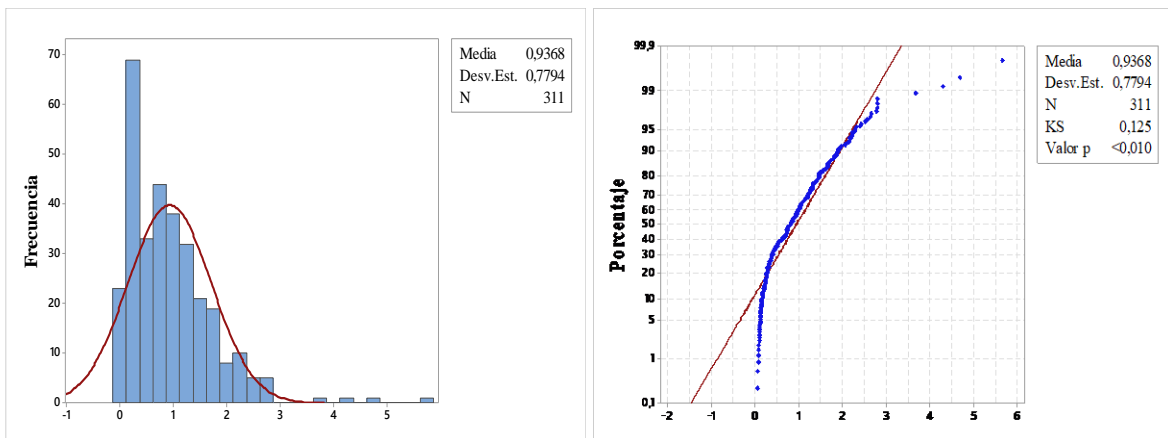


Figura 24. Histograma y gráfica de probabilidad normal de caudal medio en la estación La Gruta.

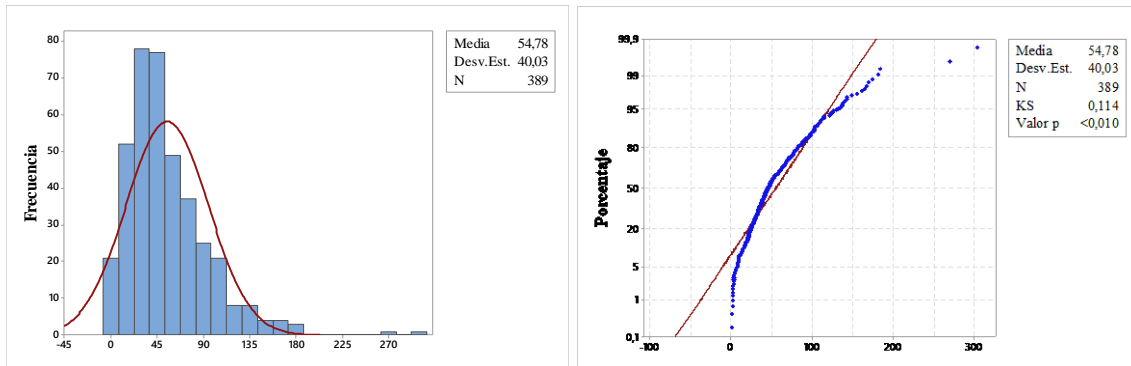


Figura 25. Histograma y gráfica de probabilidad normal de precipitación en la estación UPTC.

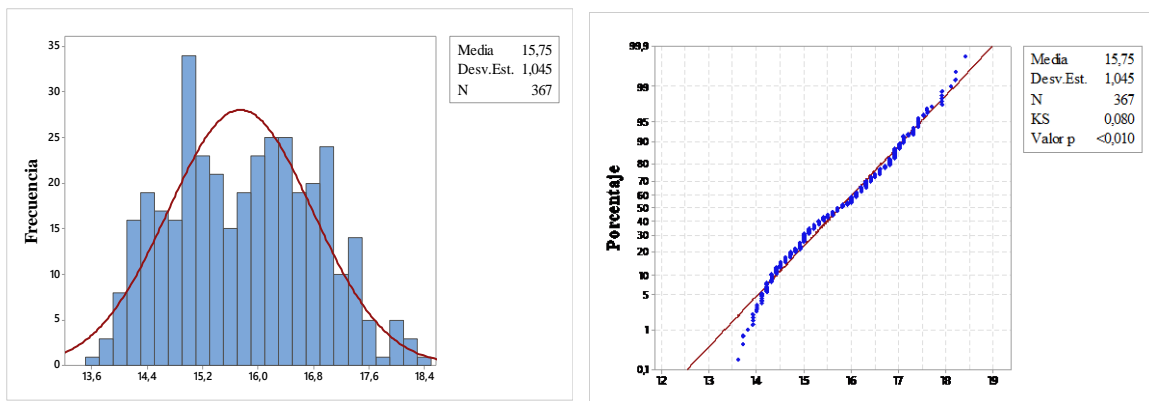


Figura 26. Histograma y gráfica de probabilidad normal de temperatura media en la estación Belencito.

▪ Correlación serial

La prueba de corridas permitió identificar que la totalidad de las series de precipitación, caudal y temperatura presentan un comportamiento no aleatorio (ver Tablas 14 a 15 y Anexo E). Todos los resultados arrojaron un valor p por debajo de 0,05, ratificando la aceptación de la hipótesis alterna la cual indica que los datos no son aleatorios. La no aleatoriedad de las series podría tener relación con tendencias propias del cambio climático y con el comportamiento cíclico, propios de fenómenos hidroclimatológicos.

Tabla 14. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de caudal mensual máximo.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Maguncia	372	3,3298	232	140	125	175,62	0
El Palo	372	8,0201	227	145	89	177,96	0

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
La Gruta	372	4,0441	212	160	115	183,37	0
San Rafael LM	372	2,6859	243	129	107	169,53	0
La Resaca	372	39,3639	366	6	13	12,81	0,741
La Vega	372	3,2708	259	113	127	158,35	0
La Reforma	372	11,372	227	145	111	177,96	0
San Rafael LG	372	13,7141	233	139	97	175,12	0
Pt. Chámeza	372	20,6473	237	135	113	173,02	0
El Molino	372	2,9592	262	110	119	155,95	0
La Trinidad	372	2,9592	262	110	119	155,95	0

K= media de la muestra

Tabla 15. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de temperatura mensual media.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Surbata Bonza	396	14,5032	209	187	65	198,39	0
UPTC	396	13,2122	202	194	116	198,92	0
Belencito	396	15,7891	190	206	40	198,68	0
Tunguavita	396	14,7786	203	193	77	198,87	0
A.P.T.O A.Lleras.C	396	14,3675	197	199	89	198,99	0
El Tunel	396	11,574	197	199	98	198,99	0

K= media de la muestra

4.3 Análisis Hidroclimatológico de la Cuenca Alta del Río Chicamocha

La topografía, posición geográfica y la zona de confluencia intertropical (ZCIT) juegan un importante papel en la hidroclimatología del Departamento de Boyacá. Estos factores tienen relación con el aumento o disminución de la precipitación y la temperatura sobre la cuenca a lo largo del año como lo indica Corpoboyacá (2018).

El análisis hidroclimatológico es abordado a partir del análisis temporal de la información suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ver Figura 27. La hidroclimatología para la zona de estudio incluyó los parámetros hidrometeorológicos en los cuales se centró la investigación: precipitación total mensual, caudales medios, máximos y mínimos mensuales y temperatura máxima, mínima y media mensual.

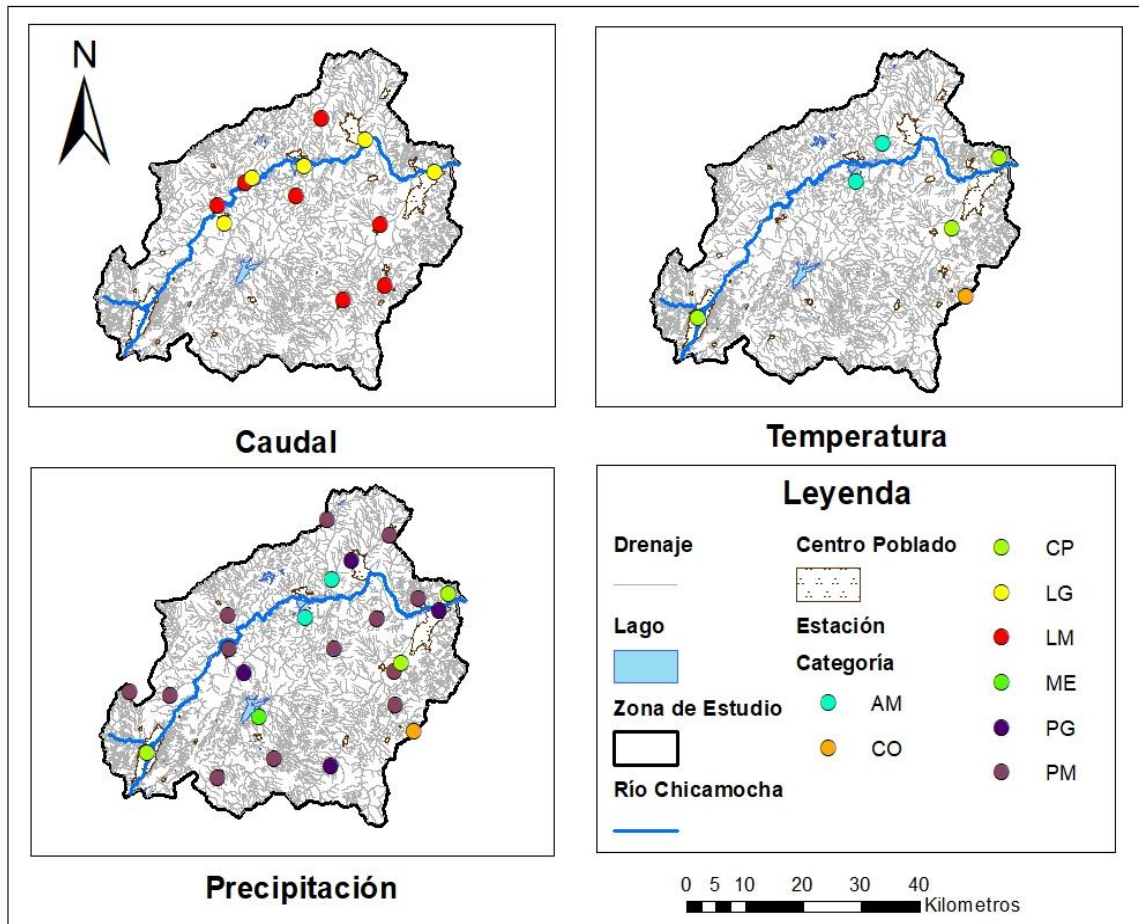


Figura 27. Mapas de estaciones empleadas en la caracterización hidroclimatológica de las diferentes variables. Fuente: IGAC, IDEAM y Autora.

4.3.1 Caudal

El caudal fue analizado a partir de las estaciones Maguncia, El Palo, La Gruta, San Rafael (LM), La Resaca, La Vega, La Reforma, San Rafael (LG), Puente Chámeza, El Molino y La Trinidad. Las estaciones consideradas no contaban con suficientes registros para los años 2016 y 2017, por consiguiente, se decidió tomar como periodo de estudio el comprendido entre 1985 y 2015 para las variables de caudal máximo, medio y mínimo cumpliendo así con la normal climatológica de 30 años.

- Caudal mensual

Las Figuras 28, 29 y 30 muestran el comportamiento mensual del caudal máximo, medio y mínimo. En la Figura 28 se puede observar un régimen bimodal acentuado, en el cual los meses de abril y mayo durante el primer semestre del año presentan caudales máximos de mayor magnitud, con el mes de marzo como periodo de transición entre temporada seca y húmeda. De igual forma sucede en el segundo semestre, en donde sobresalen los meses de octubre y noviembre, como los meses con mayor magnitud de caudal máximo, con septiembre como el mes de transición. Estos incrementos de caudal máximo concuerdan muy bien con las dos temporadas de lluvia presentes durante todo el año en la zona de estudio, debidas principalmente al efecto del movimiento de la ZCIT.

Se identifican los meses de enero y febrero como los meses con registros de caudal máximo más bajos del año, seguidos por los de los meses de septiembre y diciembre. Se evidencia también que la estaciones con la mayor magnitud de caudal máximo mensual multianual son la estación de Puente Chámeza, ubicada en el municipio de Nobsa (rio Chicamocha); seguida por la estación San Rafael (LG), en el municipio de Duitama (rio Chicamocha). El caudal máximo más bajo se reportó en la estación El Molino en el municipio de Paipa, sobre la quebrada el Salitre; seguida por la estación San Rafael (LM) en Tuta, sobre el afluente del rio Chulo.

El comportamiento estacional del caudal medio y mínimo mensual (ver figuras 29 y 30) también presenta un régimen bimodal. Estos resultados muestran que los meses de abril, mayo y junio, durante la primera temporada de lluvias del año los caudales poseen una mayor magnitud; mientras para la segunda temporada, los máximos corresponden con los meses de octubre y noviembre, respectivamente.

En el caso del caudal mínimo mensual, el régimen bimodal no es tan marcado como en las estaciones La Reforma, San Rafael (LG), El Palo, la Estación y El Molino, en esta última el caudal mínimo permanece casi constante durante todo el año. Este comportamiento constante es atribuido a la regulación hidráulica de los caudales realizada a la salida de la Represa la Copa, la cual abastece el distrito de Riego Usochicamocha.

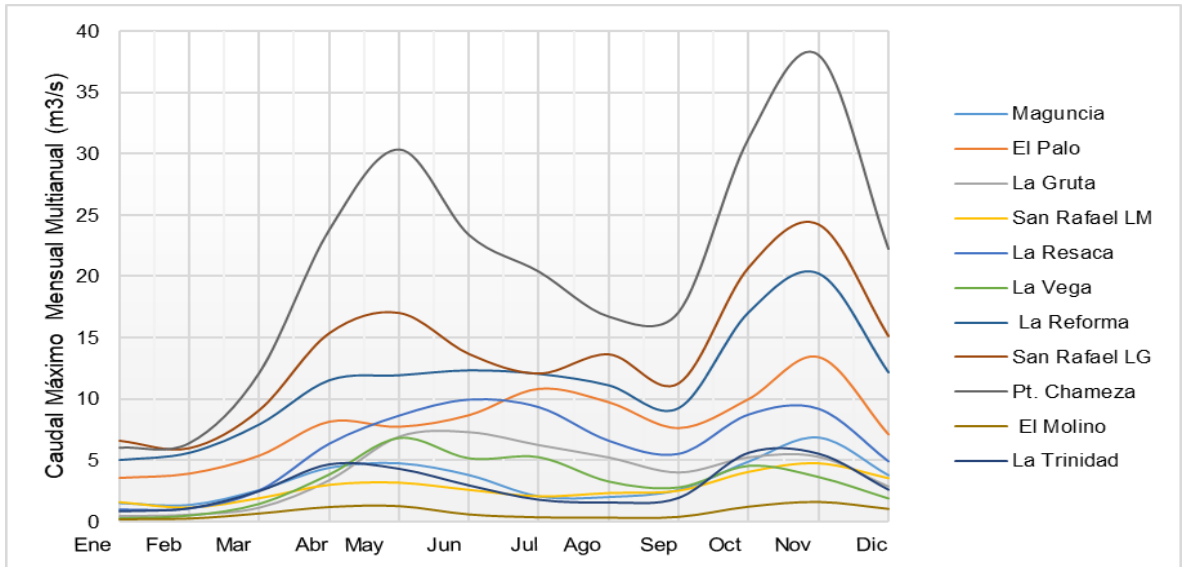


Figura 28. Comportamiento estacional del caudal máximo mensual (1985- 2015).

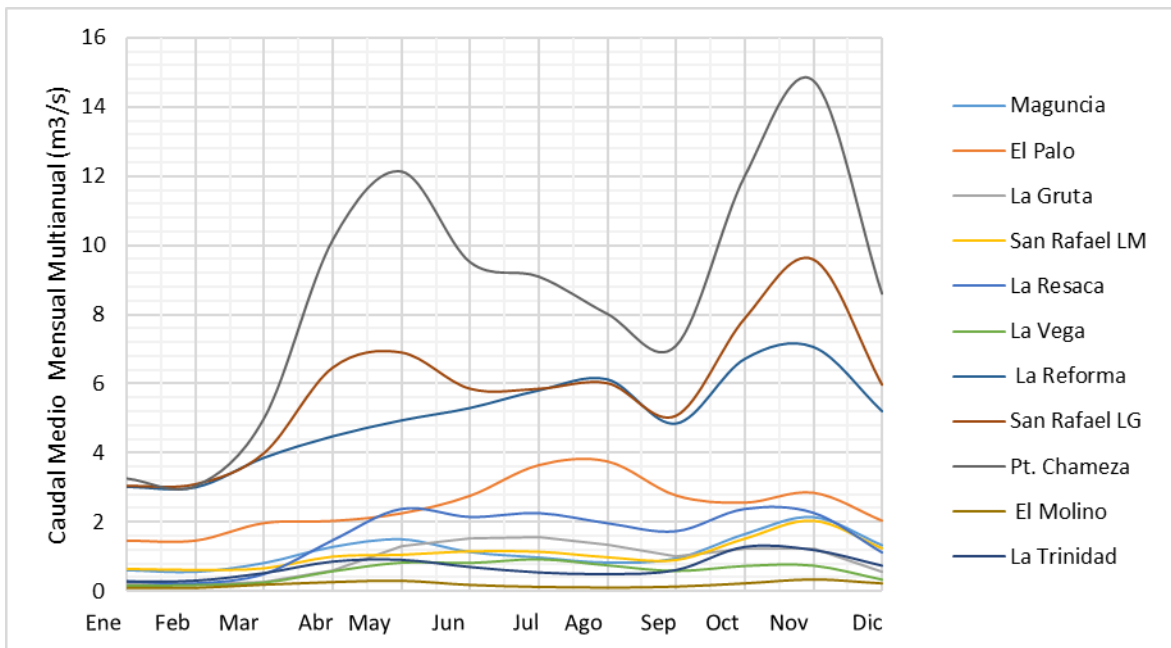


Figura 29. Comportamiento estacional del caudal medio mensual (1985- 2015).

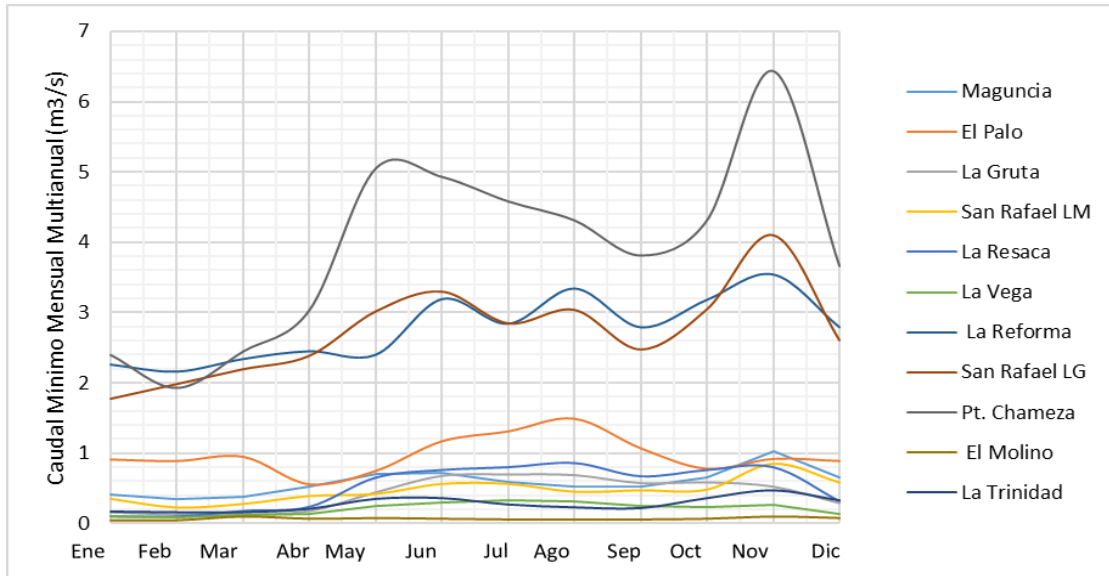


Figura 30. Comportamiento estacional del caudal mínimo mensual (1985 - 2015).

▪ Comportamiento anual del caudal máximo mensual

El comportamiento anual del caudal máximo mensual en las estaciones analizadas dentro de la zona de estudio es mostrado en las Figuras 31 a la 33. Se puede evidenciar que el 81% de las estaciones presentan un incremento del caudal máximo entre los años 2010 al 2011, periodo clasificado por el IDEAM como de gran influencia de la variabilidad climática interanual asociado con los fenómenos ENSO. Este fenómeno en su fase fría conocido como el fenómeno de la Niña, se ha caracterizado por un incremento en la precipitación y por consiguiente con un incremento en los caudales. Lo anterior concuerda con las series temporales mostradas en las gráficas.

En estas gráficas anuales también son notorios periodos de tiempo asociados con la fase cálida del ENSO (fenómeno de El Niño), correspondientes a las sequías ocurridas durante los años 1992 a 2000. Se evidencia que durante este período de tiempo el 45,5% de las estaciones estudiadas presentan bajas magnitudes.

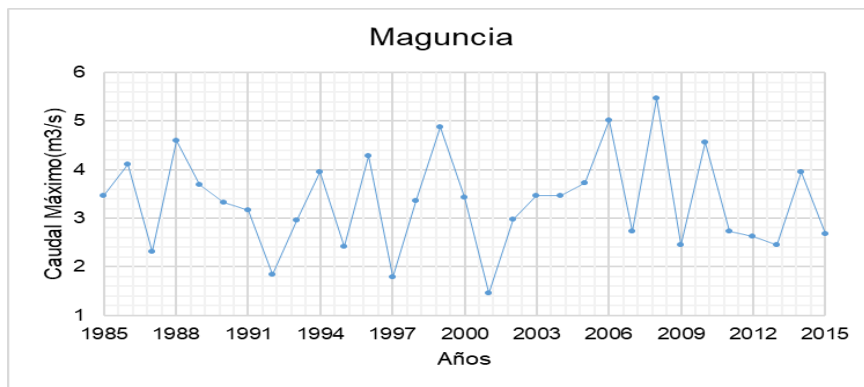


Figura 31. Comportamiento anual del caudal máximo mensual.



Figura 32. Comportamiento anual del caudal máximo mensual (continuación).

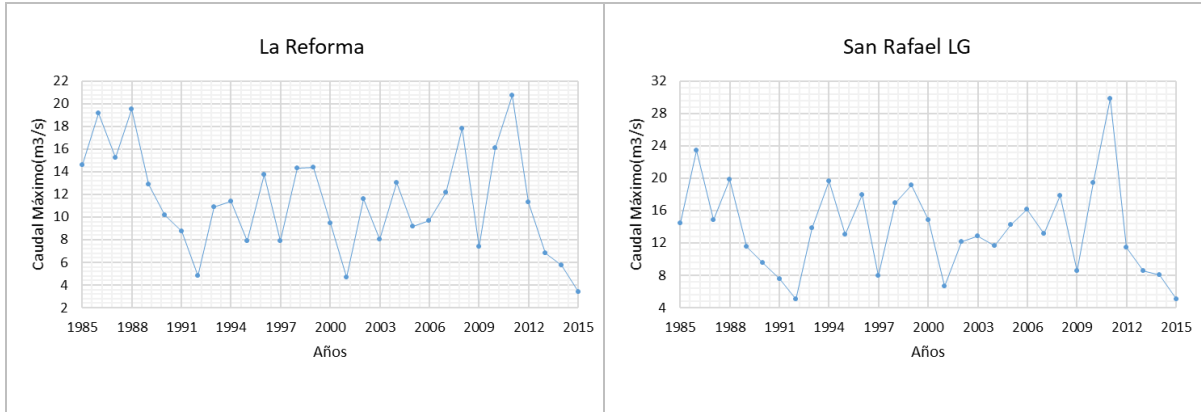


Figura 33. Comportamiento anual del caudal máximo mensual (continuación).

- Comportamiento anual del caudal medio mensual

Para el caudal medio se identificó el mismo patrón de incremento en los años 2010 al 2011. El 67% de las estaciones es evidente la influencia marcada del fenómeno de La Niña, de conocidas afectaciones debidas a la ola invernal en la región y el país (ver Figuras 34 a la 36).

Pudo estimarse también que diez (10) estaciones con registros de caudal medio, correspondientes al 91%, presentaron una disminución marcada de los caudales durante el período de tiempo comprendido entre los años 1991 y 1992. El comportamiento descrito anteriormente, obedece a la variabilidad climática asociada con la presencia del fenómeno de El Niño. Durante este período tiempo se presentaron sequías muy prolongadas y un intenso verano en el país, provocando que los diferentes embalses presentaran niveles muy bajos y críticos, con el consecuente déficit de energía hidroeléctrica. Estos problemas finalmente derivaron en un racionamiento (apagón) de energía generalizado y programado en todo el país durante casi un año.

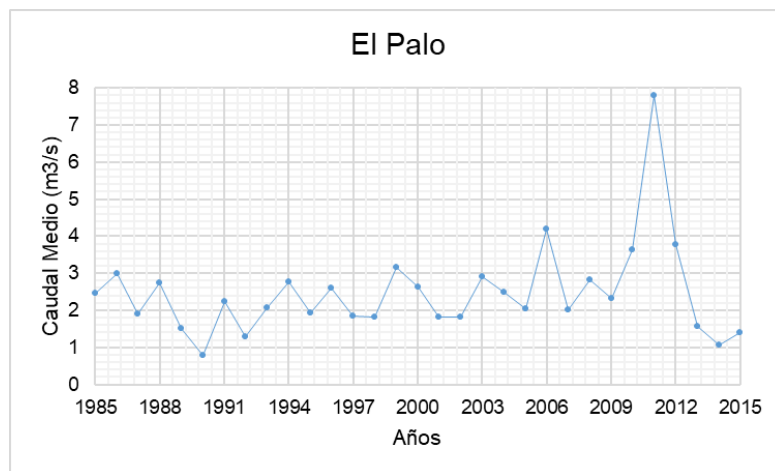


Figura 34. Comportamiento anual del caudal medio mensual.



Figura 35. Comportamiento anual del caudal medio mensual (continuación).

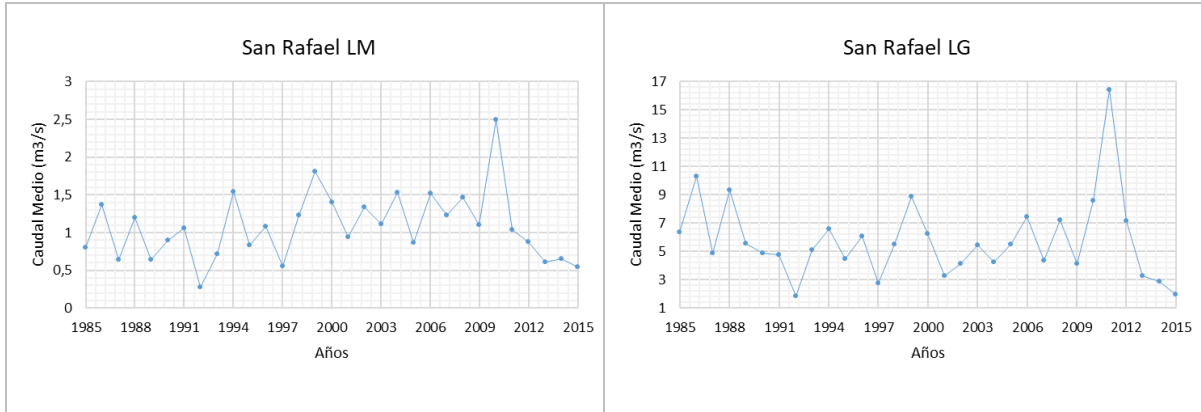


Figura 36. Comportamiento anual del caudal medio mensual (continuación).

▪ Comportamiento anual del caudal mínimo mensual

Estas series temporales también evidencian señales asociadas con la variabilidad climática (ENSO en sus dos fases La Niña y El Niño), ver Figuras 37 a la 39. Se pudo observar que el caudal mínimo tuvo un incremento considerable en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2011, en un 36,3% de las estaciones analizadas. El caudal mínimo es la variable hidrométrica con menor cantidad de estaciones en donde se registraron afectaciones por el fenómeno de La Niña, ocurrido en Colombia durante 2010 y 2011. No obstante, todo lo contrario, ocurre en el año 1992, siendo una de las variables que registra mayor cantidad de estaciones con reducción de caudal (82%), por disminución de la precipitación asociada con al fenómeno de El Niño.

Las estaciones que registran caudales con mayores magnitudes son: la Reforma, en Sotaquirá; San Rafael LG, en Duitama; y Puente Chámeza, en Nobsa; las tres ubicadas en el Río Chicamocha. De igual manera se identificaron las estaciones en las que los caudales permanecieron relativamente constantes durante todo el periodo de estudio comprendido entre 1985 y 2015. Dichas estaciones son: La Gruta, en el municipio de Pesca; San Rafael (LM), en Tuta; La Resaca, en Firavitoba; y la Vega en Cuítiva. Este comportamiento puede ser atribuido a que dichas estaciones se encuentran en zonas de influencias de embalses (salida) en donde en época de sequía son regulados los caudales.

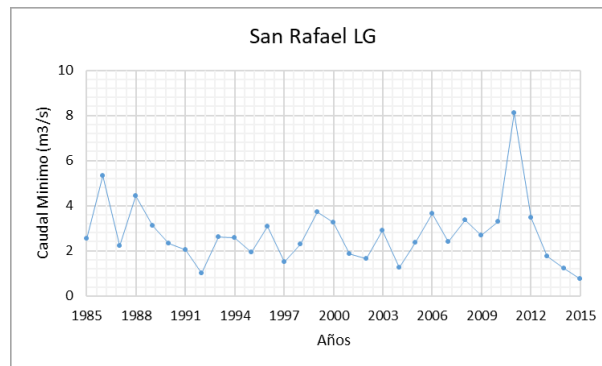


Figura 37. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual.



Figura 38. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual (continuación).

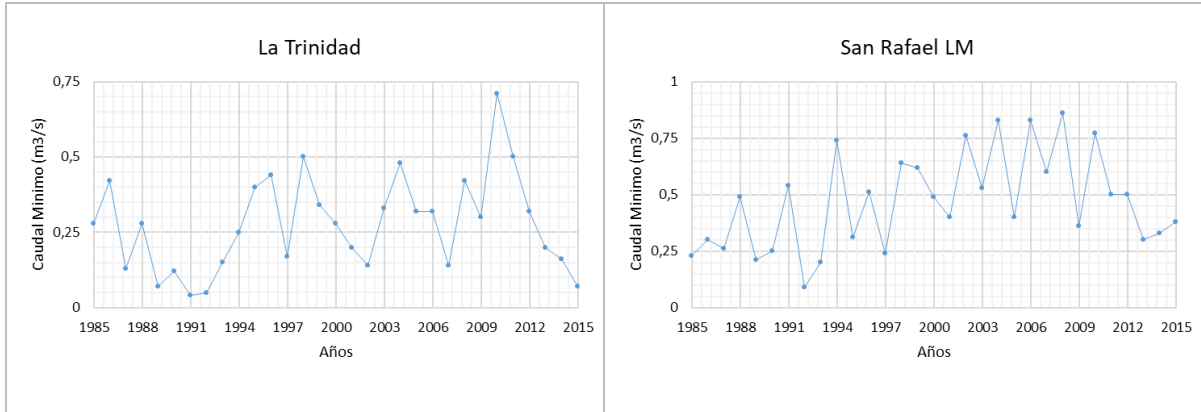


Figura 39. Comportamiento anual del caudal mínimo mensual (continuación).

4.3.2 Temperatura

El análisis climatológico de las variables asociadas con temperatura fue realizado de acuerdo con el tipo de registro suministrado por el IDEAM. Cuatro (4) estaciones para temperatura máxima, las cuales son: Surbata Bonza, UPTC, Tinguavita y Apto. A. Lleras. C. Para las variables de temperatura media y mínima fueron seleccionadas seis (6) estaciones: Surbata Bonza, UPTC, Tinguavita, Apto. A. Lleras. C, Belencito y El Túnel. Todas las variables mencionadas fueron estudiadas para el periodo de tiempo comprendido durante 1985 y 2017.

En las Figuras 40 a la 42, se muestra el comportamiento estacional de las series mensuales de temperatura media, máxima y mínima. Las estaciones se encuentran ubicadas en elevaciones entre 3000 y 2485 m.s.n.m. con una oscilación de temperaturas extremas entre -3°C y 26°C.

Los meses con mayor magnitud de temperatura máxima mensual (ver Figura 40) corresponden a enero, febrero y marzo. La diferencia mensual en promedio en cada estación es de 4°C, siendo una variación considerable.

La temperatura media mensual (ver Figura 41) presenta menos variabilidad en sus datos, si se compara con los datos de temperatura máxima. En promedio la diferencia entre las temperaturas extremas de cada estación es de 2°C.

Para las temperaturas máxima y mínima (ver Figuras 40 y 42), se puede evidenciar que presentan un comportamiento de transición entre el régimen anual unimodal y el bimodal. Específicamente la temperatura mínima presenta un régimen bimodal más acentuado (ver Figura 42). Los meses de más altas temperaturas son los meses de abril, mayo y junio; mientras que los de temperaturas inferiores son los meses de agosto, septiembre y octubre. Las estaciones que presentan mayores temperaturas son Belencito y UPTC, con magnitudes de entre 3°C y 7°C.

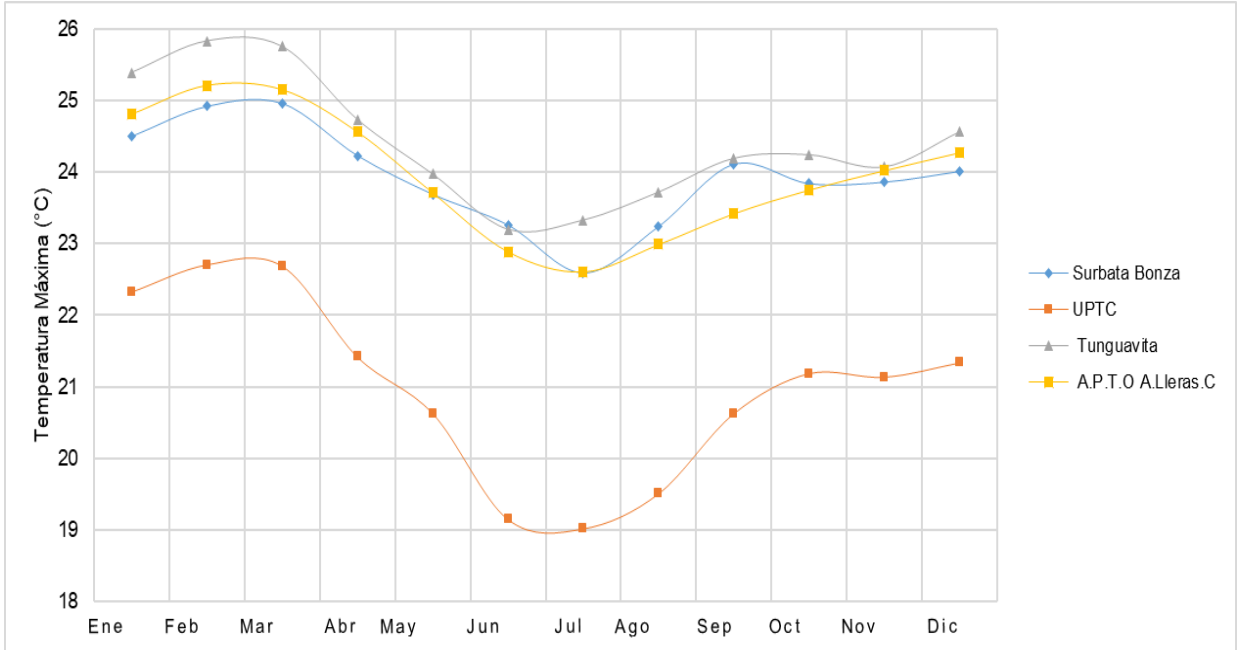


Figura 40. Comportamiento estacional de la temperatura máxima mensual (1985- 2017).

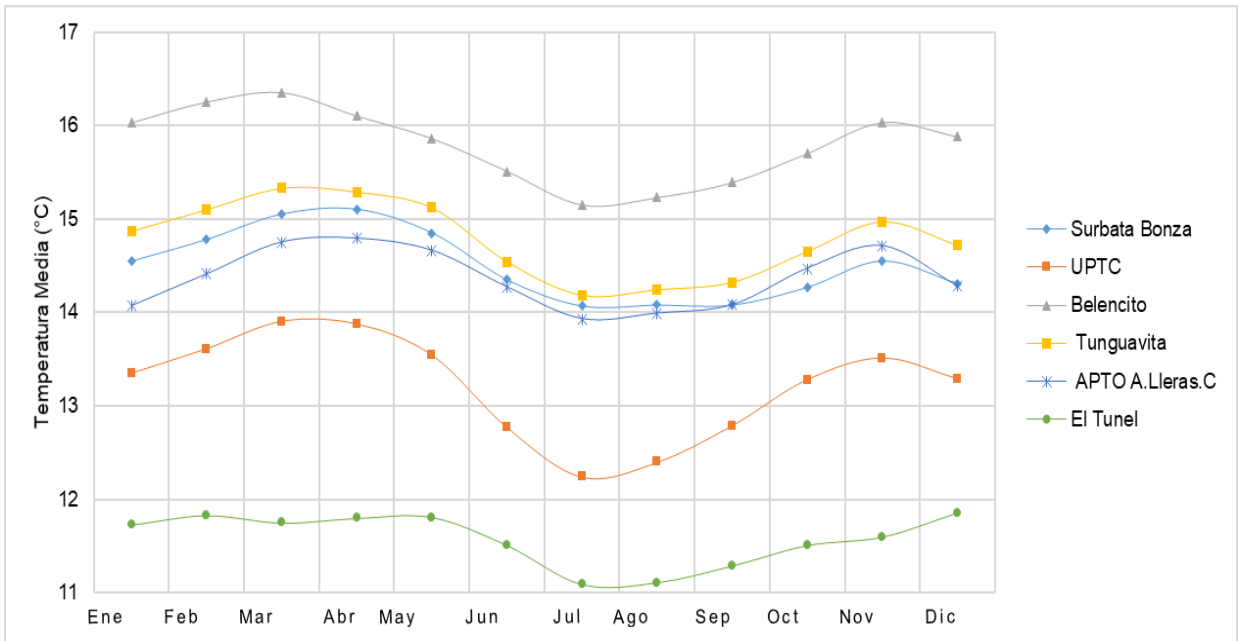


Figura 41. Comportamiento estacional de la temperatura media mensual (1985- 2017).

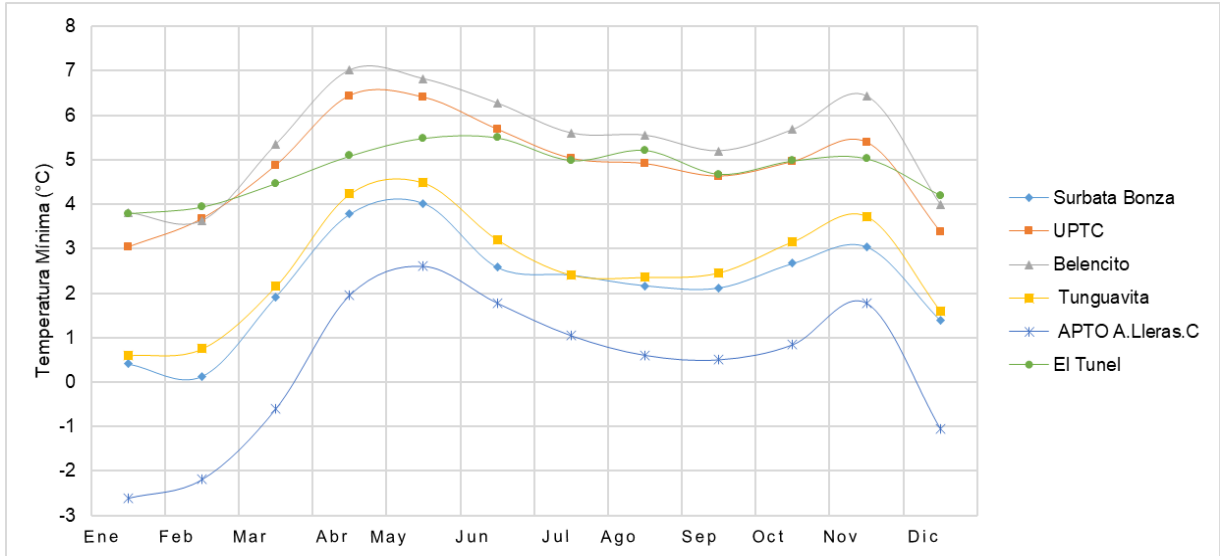


Figura 42. Comportamiento estacional de la temperatura mínima mensual (1985- 2017).

▪ Comportamiento Anual de la Temperatura Máxima, Media y Mínima Mensual

Se pudo evidenciar que en todas las estaciones con registros de temperatura máxima existe un incremento durante el año 1992 (ver Figura 43). Dicho incremento se presenta en el 100% de las estaciones durante el año 1989 y 2016. Lo anterior es consistente con la ocurrencia del ENSO en su fase cálida (El Niño). En términos generales, sobresale una estrecha relación entre los picos más pronunciados mostrados en las Figuras 43 a la 47, con los fenómenos atribuidos a la variabilidad climática del fenómeno ENSO, no solamente en la fase cálida, también en la fase fría (La Niña).

En las gráficas de temperatura media se evidencia un importante incremento (ver Figura 44), como ocurrió en la estación Belencito, desde el año 1999 hasta el 2006, siendo el presagio de un comportamiento asociado con cambio climático. Estaciones como Tunguavita y Surbatabonza, presentan el mismo comportamiento mencionado anteriormente. Por otra parte, se evidencia que, en los años 1998 y 2010, en todas las estaciones en la temperatura media se presenta un incremento, con plena coincidencia de la ocurrencia del fenómeno ENSO en su fase La Niña.

La temperatura mínima (ver Figura 46) presenta un incremento muy alto en el año 2011, lo que también coincide con la ocurrencia del fenómeno La Niña en el país. Caso contrario sucedió en los años 1997 y 2015, año donde se presentó un intenso fenómeno El Niño, evidenciando sequías muy prolongadas. En la mayoría de las estaciones analizadas las temperaturas mínimas descendieron notablemente, en aproximadamente 1 °C con relación al año anterior. La estación Belencito, ubicada en Nobsa, presenta un descenso (4.5°C) muy pronunciado en la temperatura mínima en el año 1997, con respecto al año 1996. Desde entonces sus temperaturas no han superado incrementos de 2°C aproximadamente.

En general se pudo identificar que la temperatura mínima para años con ocurrencia de fenómenos atribuidos a variabilidad climática (La Niña, épocas de lluvias) la temperatura

mínima se incrementó considerablemente, comportamiento opuesto a la temporada del fenómeno El Niño (épocas de sequías) en el que las temperaturas disminuyeron drásticamente.

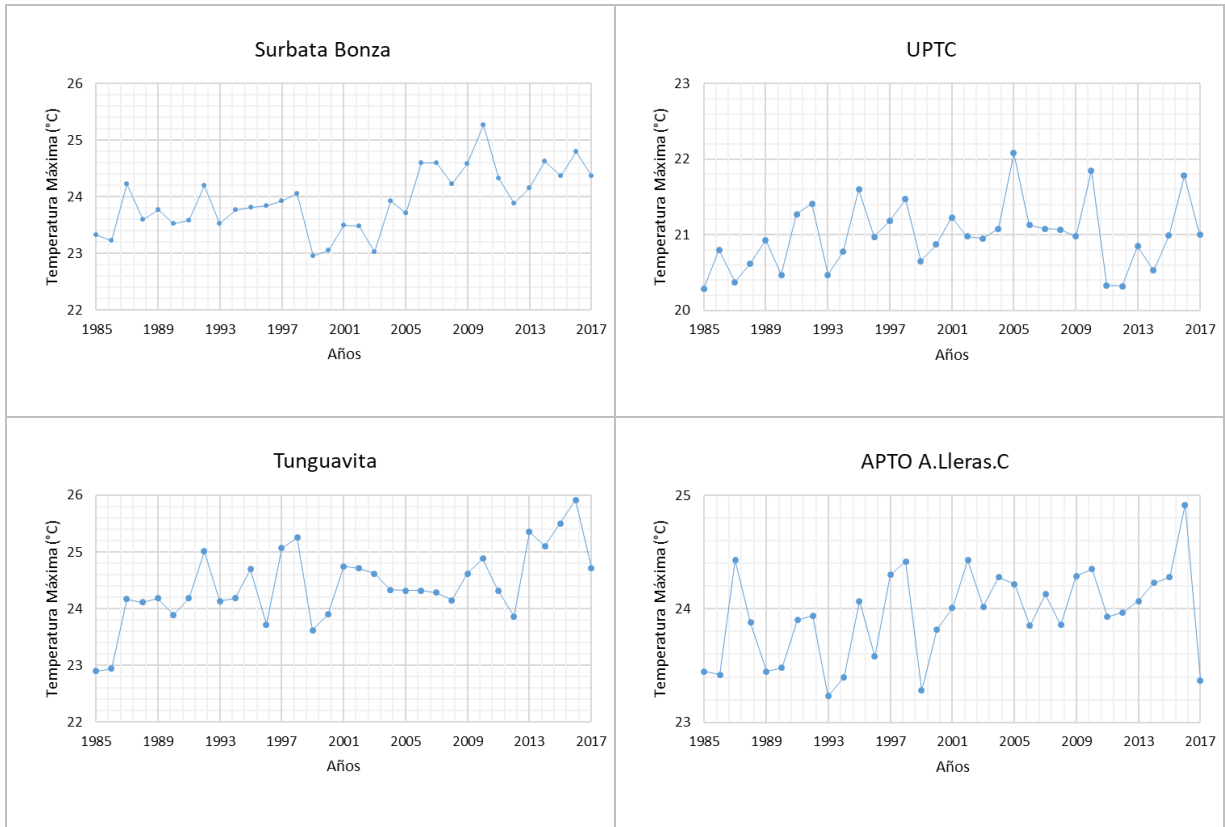


Figura 43. Comportamiento anual de la temperatura máxima mensual.

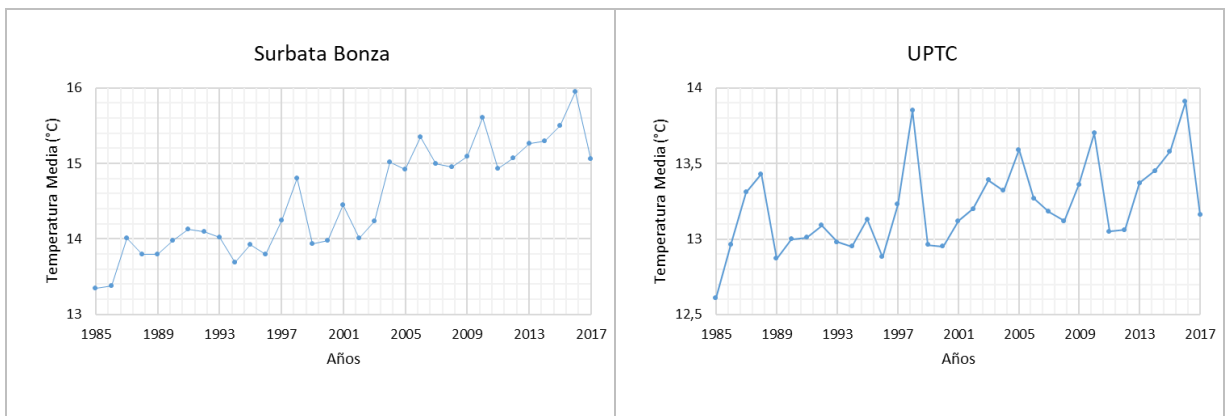


Figura 44. Comportamiento anual de la temperatura media mensual.

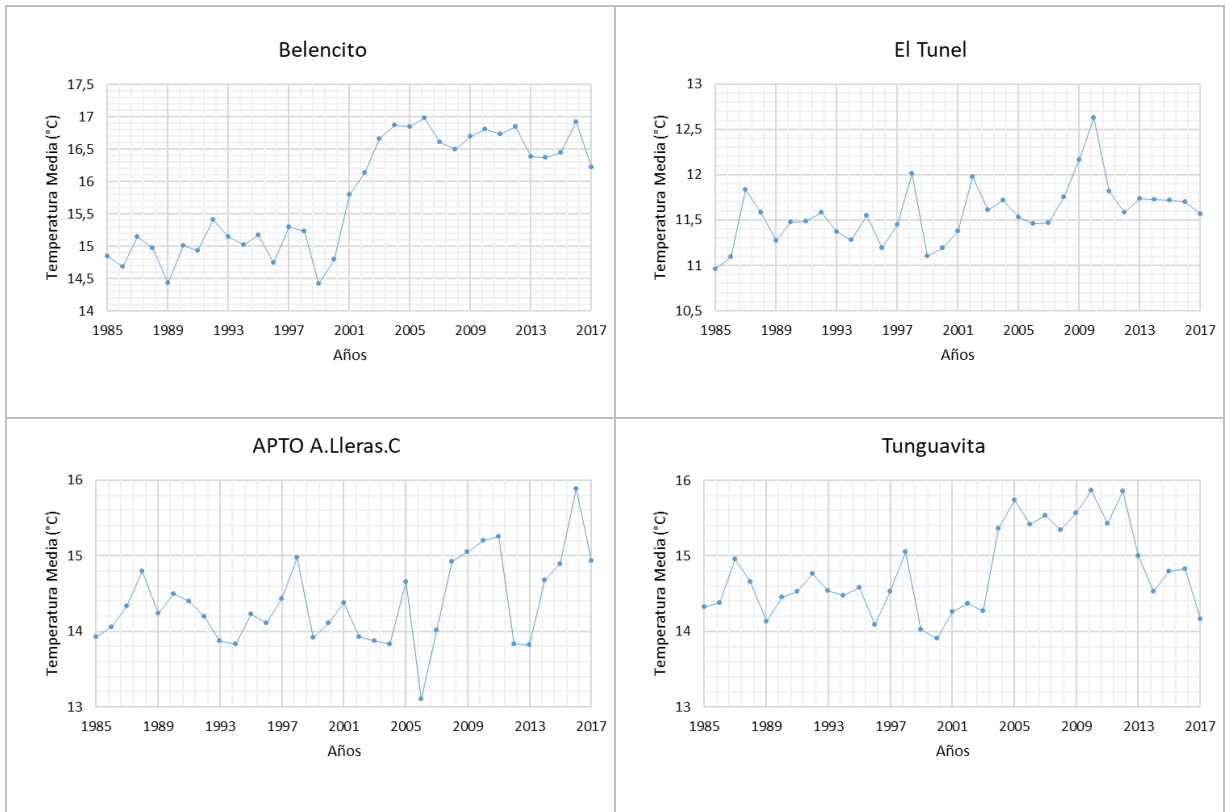


Figura 45. Comportamiento anual de la temperatura media mensual (continuación).

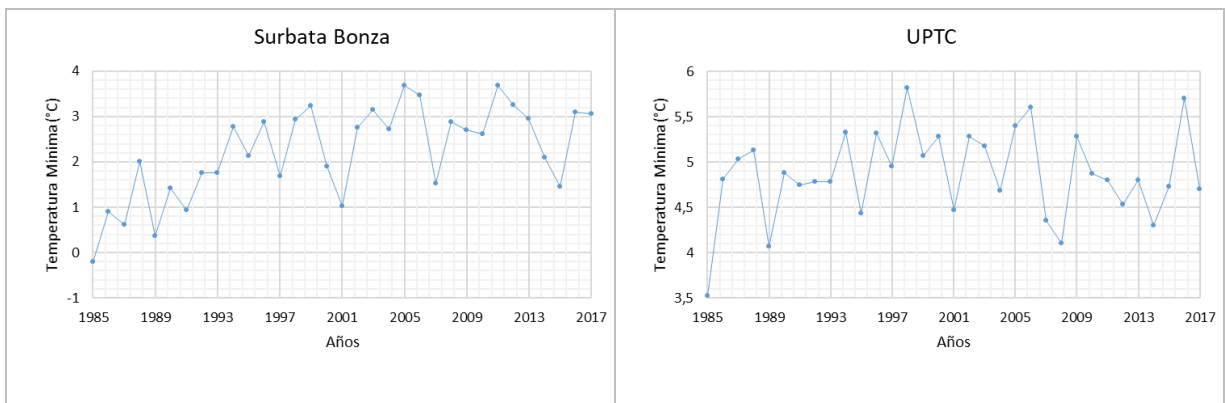


Figura 46. Comportamiento anual de la temperatura mínima mensual.

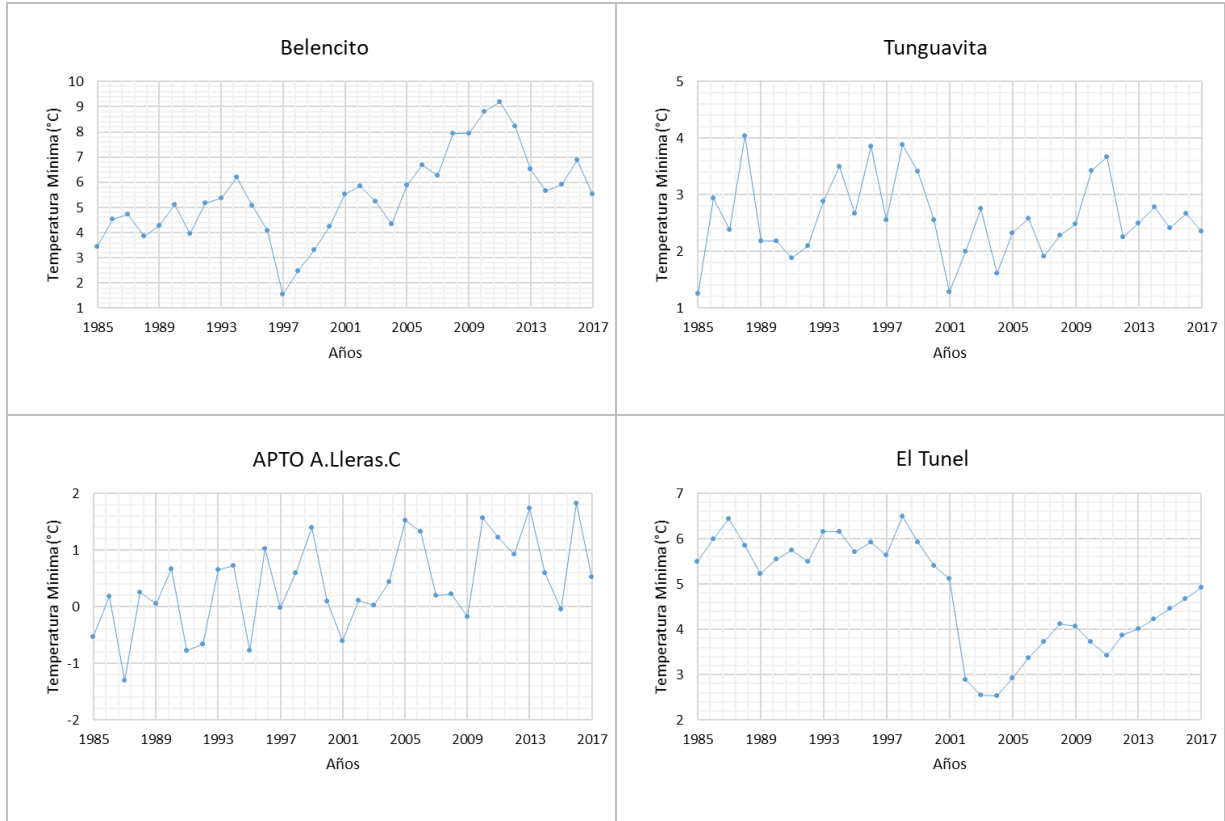


Figura 47. Comportamiento anual de la temperatura mínima mensual (continuación).

4.3.3 Precipitación Total Mensual

Para realizar el análisis hidroclimatológico de la precipitación se emplearon veinticinco (25) estaciones correspondientes al período de estudio comprendido durante 1985 y 2017.

El comportamiento estacional de la precipitación mensual (ver Figura 48) evidencia un régimen bimodal acentuado. Este régimen es debido principalmente al doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la cuenca en estudio durante el año.

Son evidentes los dos períodos de lluvia durante el año y los dos períodos con menor precipitación (períodos secos). El primer periodo de lluvias comienza su incidencia en el mes de marzo del primer semestre del año, prolongándose hasta mayo; el segundo inicia en septiembre y termina en noviembre. Estos dos meses (marzo y septiembre) son considerados de transición entre períodos secos y de lluvia.

Por otra parte, en el primer período seco del año son identificables los meses considerados más secos: diciembre, febrero y enero. Sobresale el mes de enero como el de menores registros de precipitaciones, seguido por febrero y diciembre. En el segundo período seco, correspondiente a los meses de junio, julio y agosto, los registros de precipitación son superiores en comparación con el primer periodo seco del año.

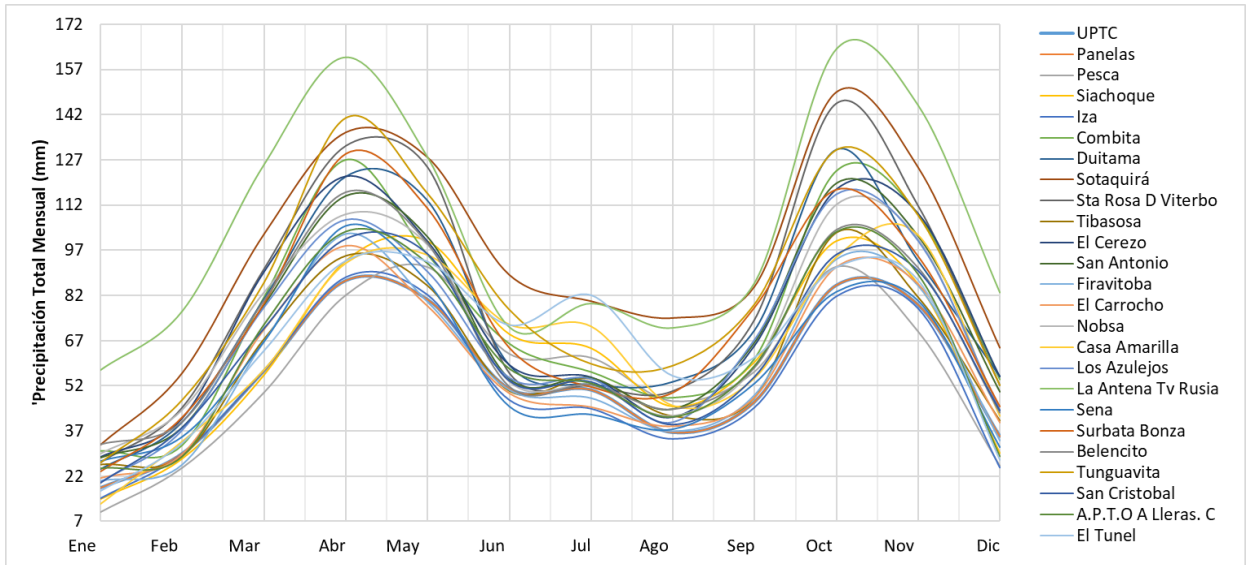


Figura 48. Comportamiento estacional de la precipitación total (1985- 2017).

▪ Precipitación Media Anual

Como un indicador general, la precipitación media anual durante el periodo de estudio es de 850,4 mm, obtenida media el promedio aritmético de las 25 estaciones analizadas.

En la Figura 49 se pueden observar los resultados de los valores totales mensuales de la precipitación agregados a nivel anual en cada estación. Se evidencia que las estaciones con mayores registros de precipitación (mayores a 1000 mm/año) son: la Estación de La Antena Tv Rusia, ubicada en el municipio de Duitama; seguida por la Estación Sotaquirá, localizada en el municipio del mismo nombre. Las estaciones que presentan los registros con magnitudes más bajas de precipitación corresponden a las estaciones de Iza, UPTC y Pesca, con registros de 626,7 mm, 656,3 mm y 673,2 mm, respectivamente.

En los años 2010 y 2011, se registraron en todas las estaciones magnitudes muy altas de precipitación, comparadas con los años anteriores. Estas altas magnitudes oscilaron en un rango de entre 1111,1 mm y 1905,4 mm (ver Figuras 50 a la 52). La estación Antena Tv Rusia registró la magnitud más alta de precipitación durante los años mencionados anteriormente, con un total de 1905,4 mm, siendo la más alta registrada en todas las estaciones durante el período de estudio (33 años). Son notorios periodos extremadamente secos, como ocurrió para los años 1989, 1992, 1997, 2001, 2009 y 2015; y periodos con grandes magnitudes de precipitación como ocurrió durante los años 1988, 1996, 1999 y 2011.

El comportamiento de la precipitación media anual, descrito anteriormente, permite identificar señales claras y reconocibles de fenómenos atribuidos a variabilidad climática a escala interanual en la zona de estudio. Los años con mayores y menores magnitudes de precipitación coinciden con los períodos de incidencia directa del fenómeno del ENSO - Oscilación del sur en sus dos fases: La Niña (épocas de lluvias) y El Niño (épocas de sequias). Esta coincidencia temporal fue analizada a partir de la variabilidad interanual observada en las series anuales de precipitación y contrastadas con la ocurrencia del

ENSO y las intensidades reportadas por *la National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), basadas en el índice oceánico de El Niño (ONI).

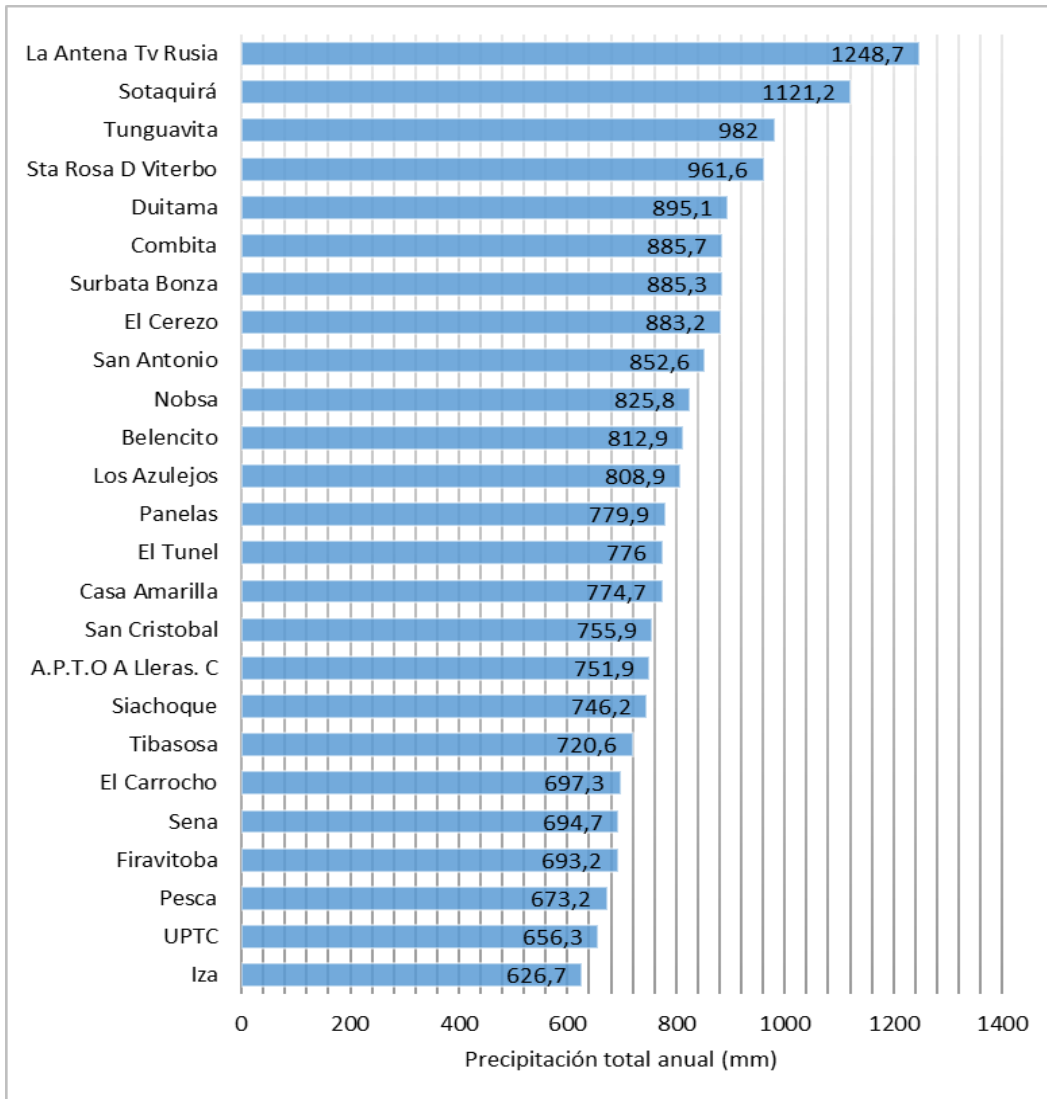


Figura 49. Precipitación anual (1985-2017).

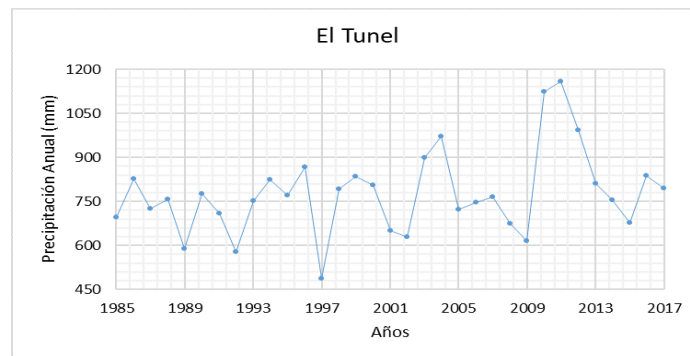


Figura 50. Comportamiento anual de la precipitación.

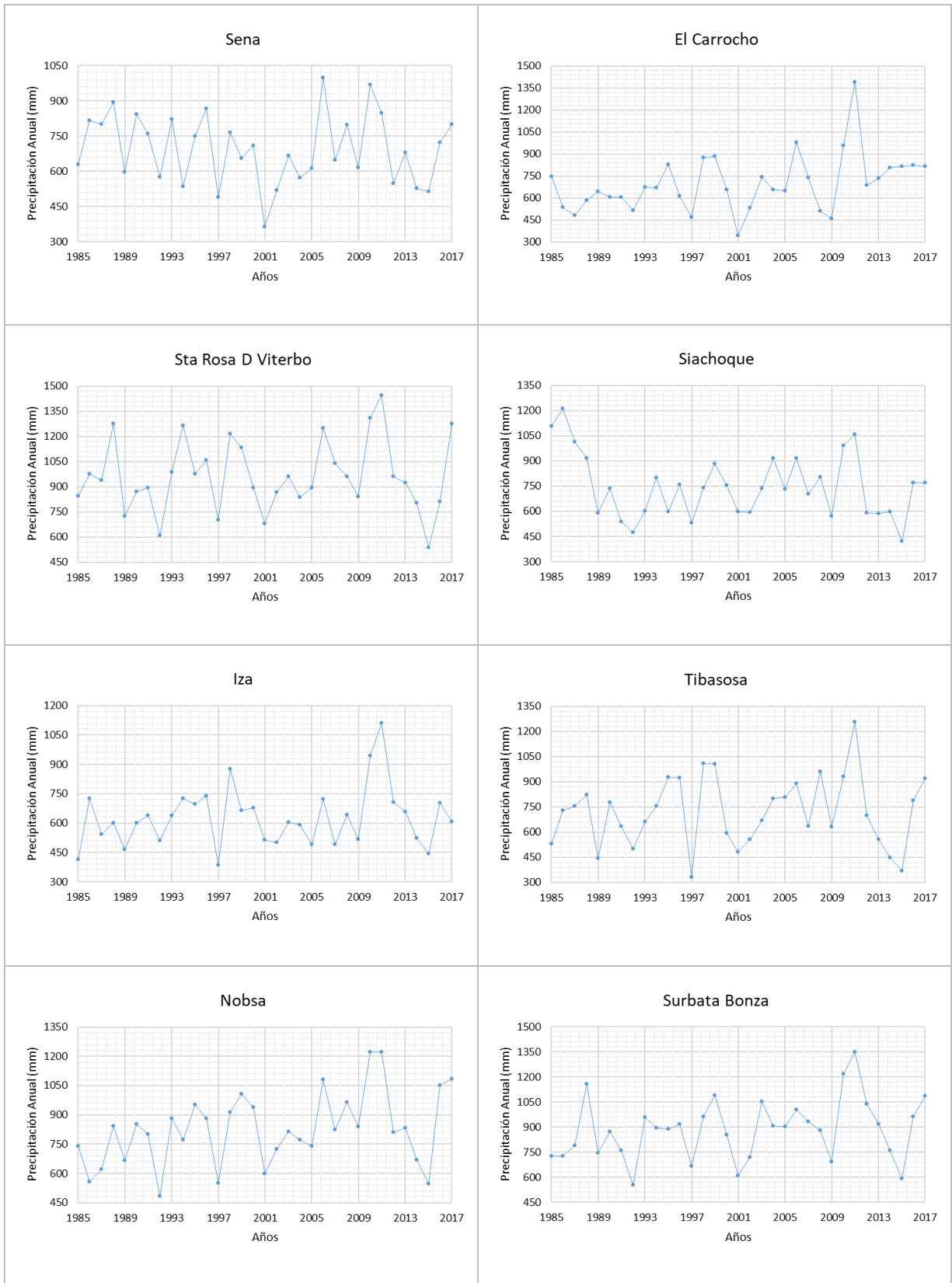


Figura 51. Comportamiento anual de la precipitación (continuación).



Figura 52. Comportamiento anual de la precipitación (continuación).

4.4 Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio del Tiempo

Los resultados obtenidos con las funciones de autocorrelación (ACF) de todas las series temporales, permitieron precisar el comportamiento en el dominio del tiempo para definir con mayor exactitud los regímenes presentes (ver Anexo F). A manera de ejemplo en las Figura 53 a la 59 se presentan ACF para series de algunas de las estaciones hidrometeorológicas de precipitación, temperatura y caudal. Las líneas rojas a trazos representan correlaciones para variable aleatoria con bandas de confianza del 95%.

Las series de precipitación en su gran mayoría se pueden considerar como periódicas, a nivel semestral y/o anual, con un régimen bimodal (altas correlaciones para rezagos 3, 6, 9 y 12).

En el caso de la temperatura media máxima mensual los regímenes son claramente unimodales (alta correlación para el rezago 12) en la estación Surbatá Bonza; mientras que en otras es bimodal (correlaciones significativas para rezagos 6 y 12), específicamente en las estaciones: UPTC, Tinguavita y Aeropuerto A. Lleras C. Para la temperatura media mensual y media mínima mensual también se presentan altas magnitudes de correlación que reflejan regimenes unimodales y bimodales, con presencia de correlaciones no despreciables para rezagos 3 y 9, respectivamente.

Los caudales mensuales máximo, medio y mínimo mensual, presentan altas magnitudes de correlación para rezagos 6 y 12, con periodicidad en la mayoría de los casos. Estos resultados ponen de manifiesto la influencia de la ZCIT en la zona de estudio asociada con la variabilidad climática estacional.

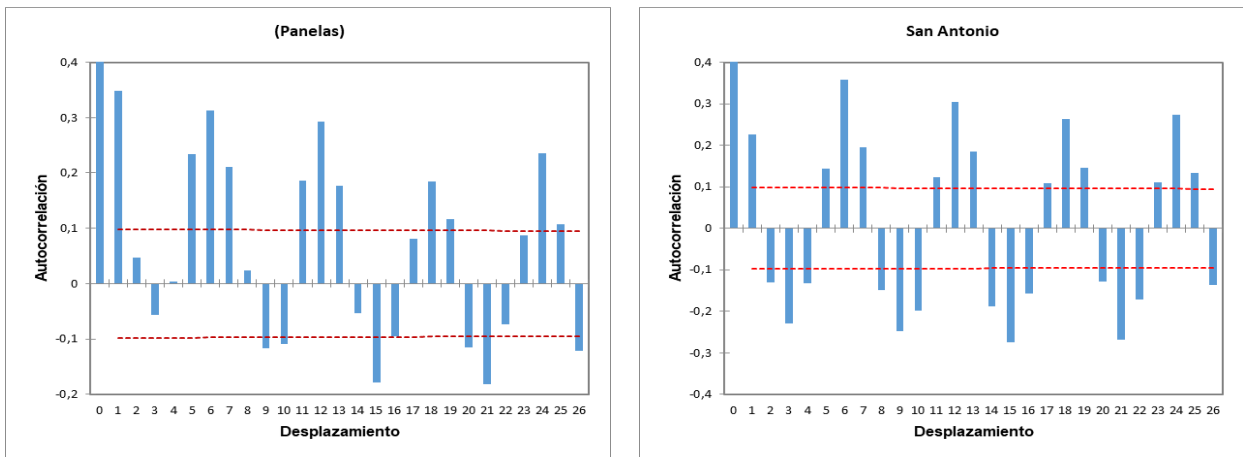


Figura 53. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de precipitación total mensual.

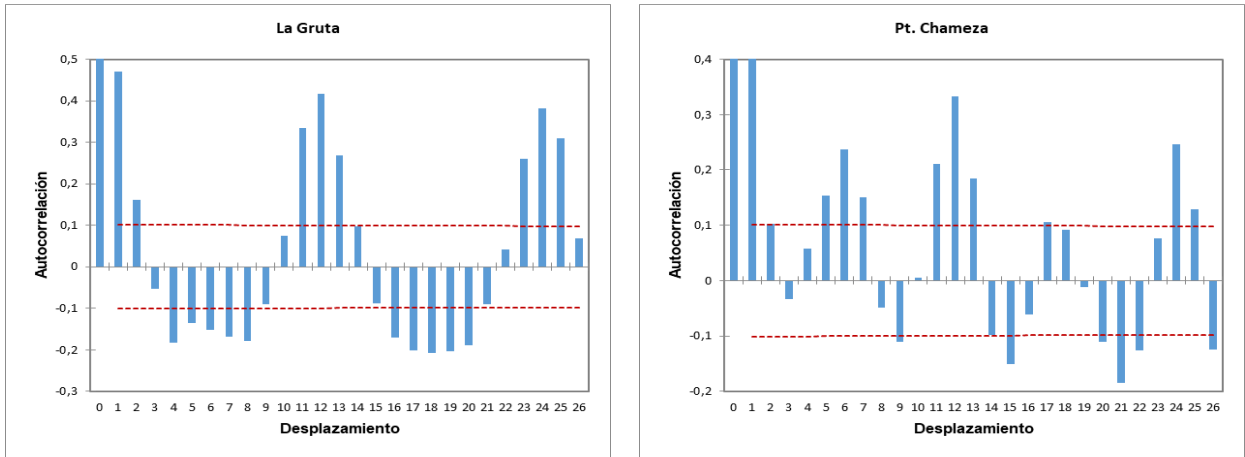


Figura 54 Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal máximo mensual.

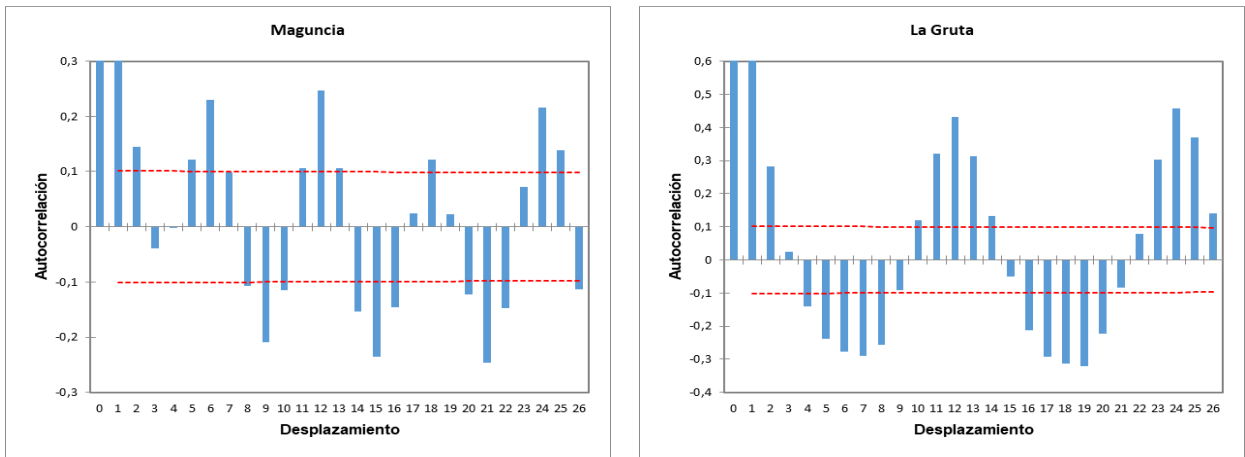


Figura 55 Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal medio mensual.

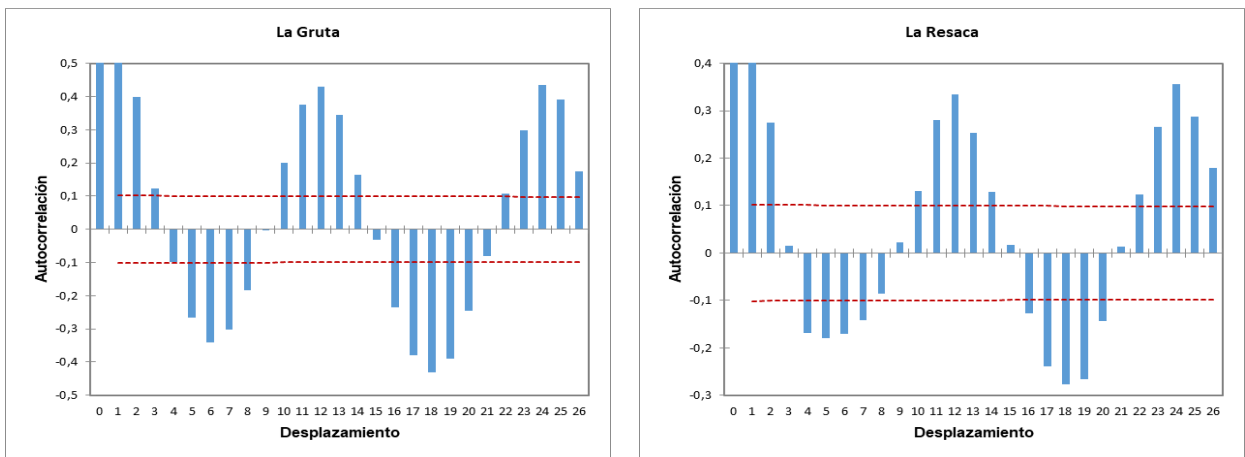


Figura 56. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de caudal mínimo mensual.

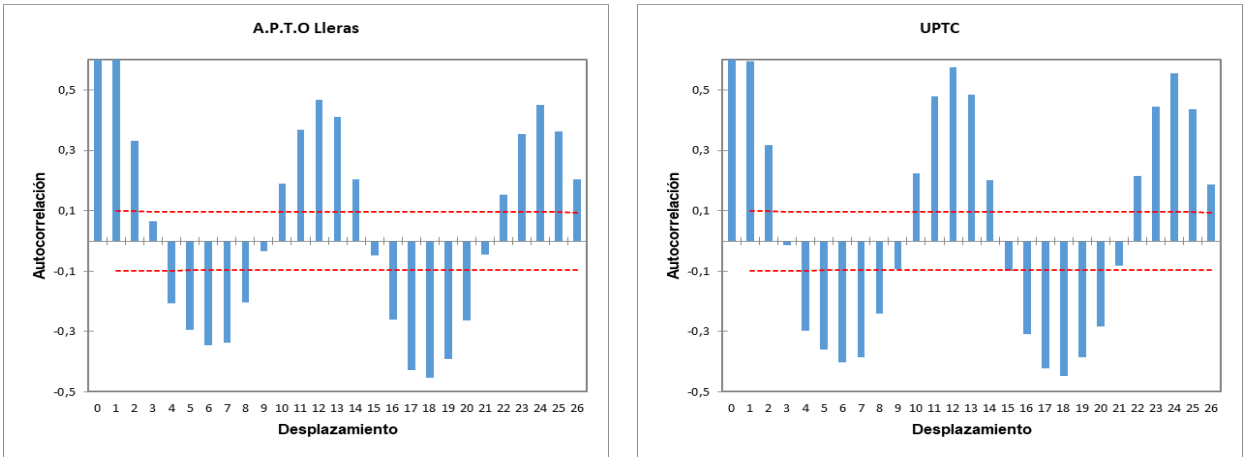


Figura 57. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura máxima mensual.

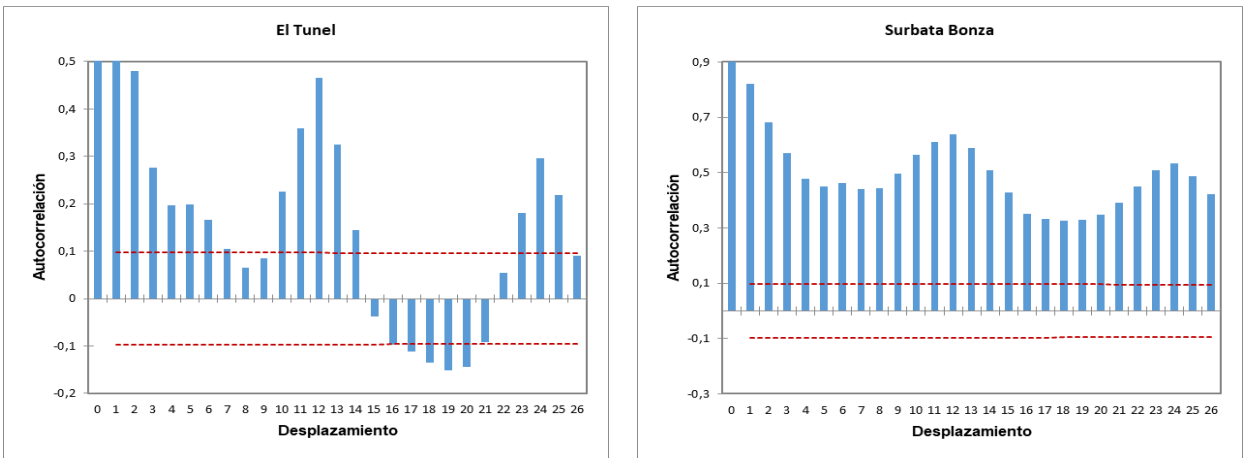


Figura 58. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura media mensual.

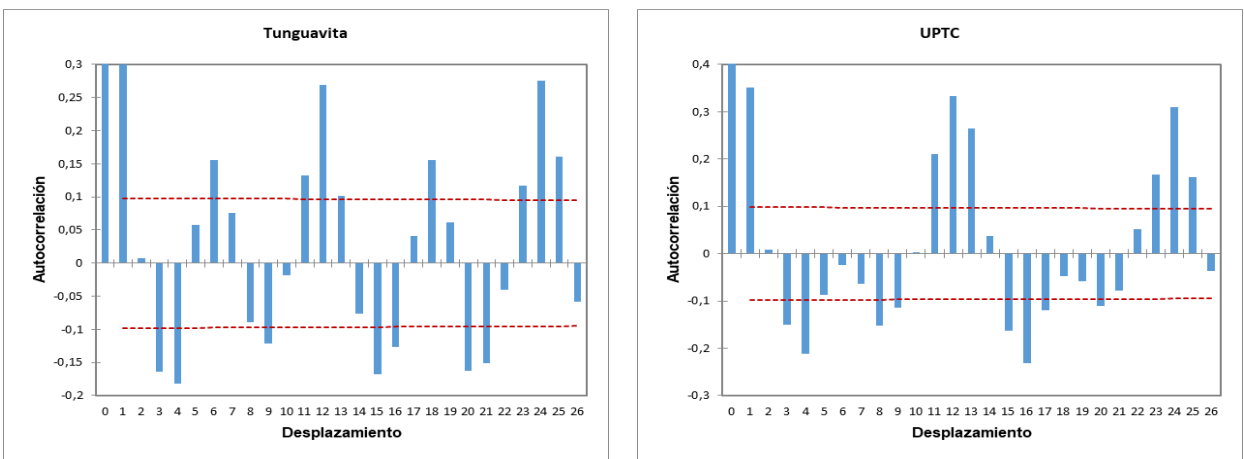


Figura 59. Función de Autocorrelación (ACF) de algunas series de temperatura mínima mensual.

4.5 Análisis de Variables Hidrometeorológicas en el Dominio de las Frecuencias

En el Anexo G se pueden observar las gráficas de la función de densidad espectral (periodogramas) para cada una de las series investigadas. En las Tablas 16 a la 22, se presentan los resultados del análisis, indicándose el armónico fundamental y las frecuencias más sobresalientes. A manera de ejemplo, en las Figuras 60 a la 66 se ilustran los resultados obtenidos para las series temporales de las diferentes variables.

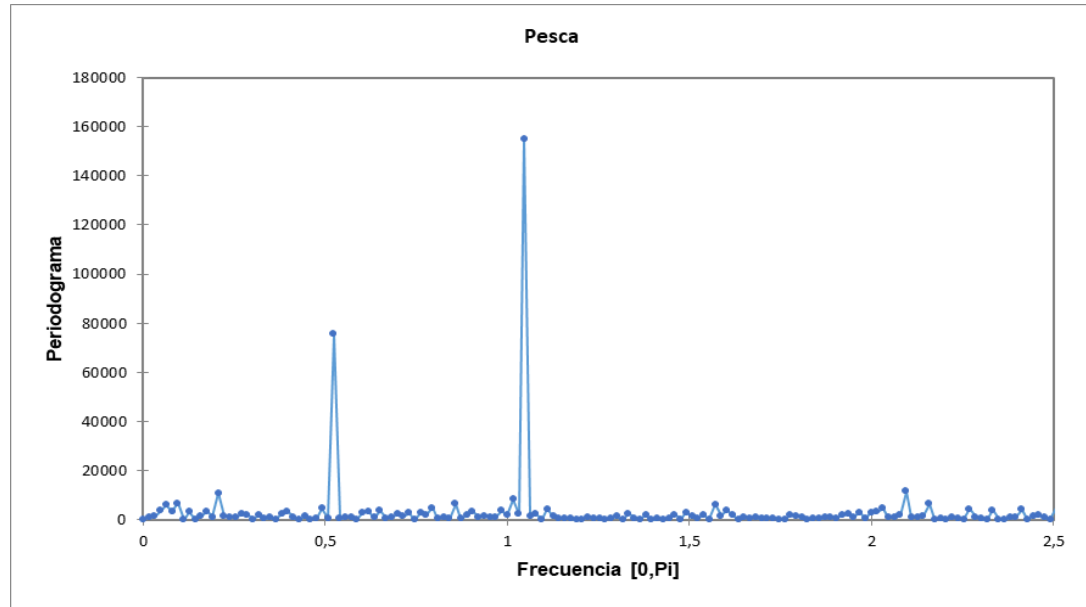


Figura 60. Función de densidad espectral de precipitación total mensual (estación Pesca).

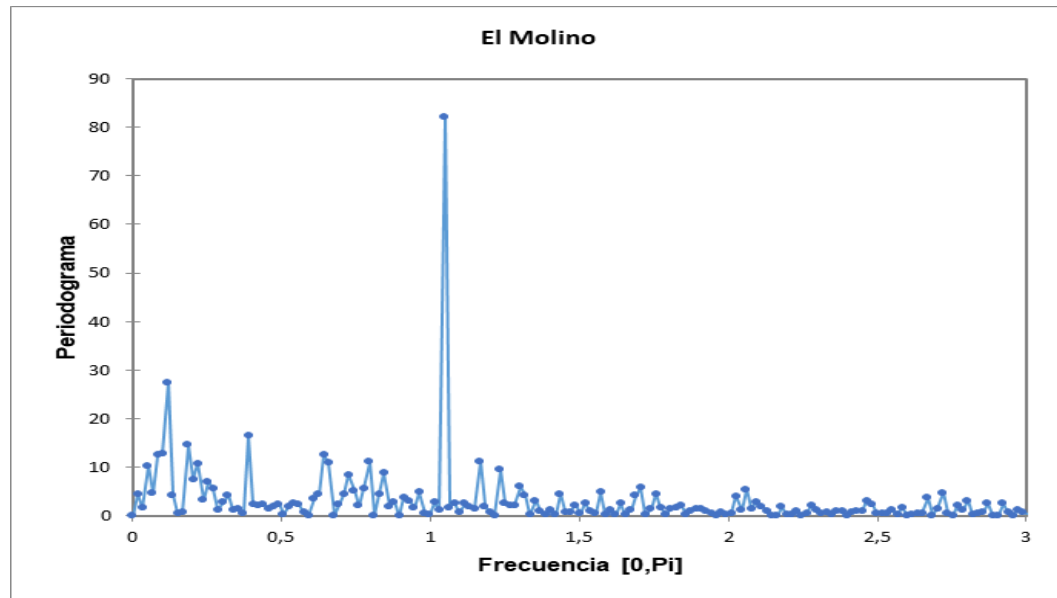


Figura 61. Función de densidad espectral de caudal máximo mensual (estación El Molino).

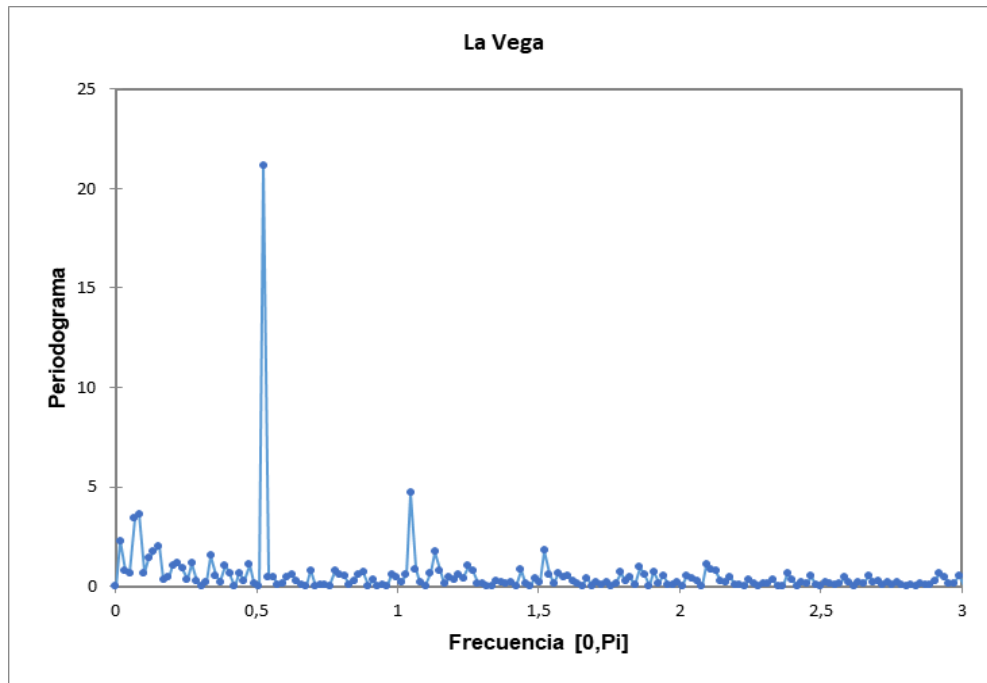


Figura 62. Función de densidad espectral de caudal medio mensual (estación La Vega).

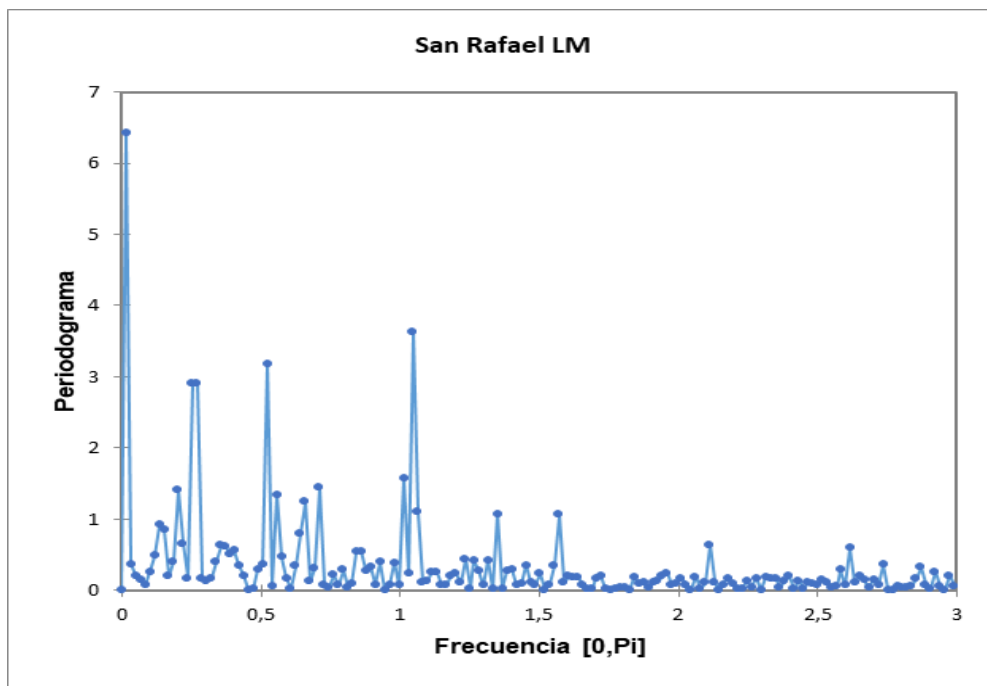


Figura 63. Función de densidad espectral de caudal mínimo mensual (estación San Rafael LM).

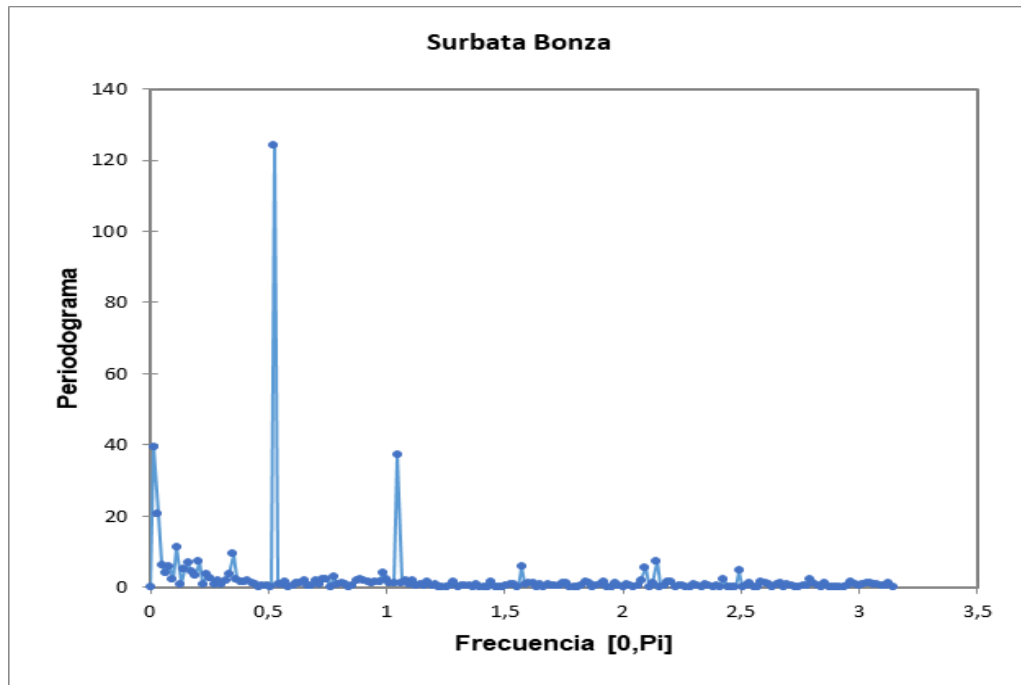


Figura 64. Función de densidad espectral de temperatura máxima mensual (estación Surbata Bonza).

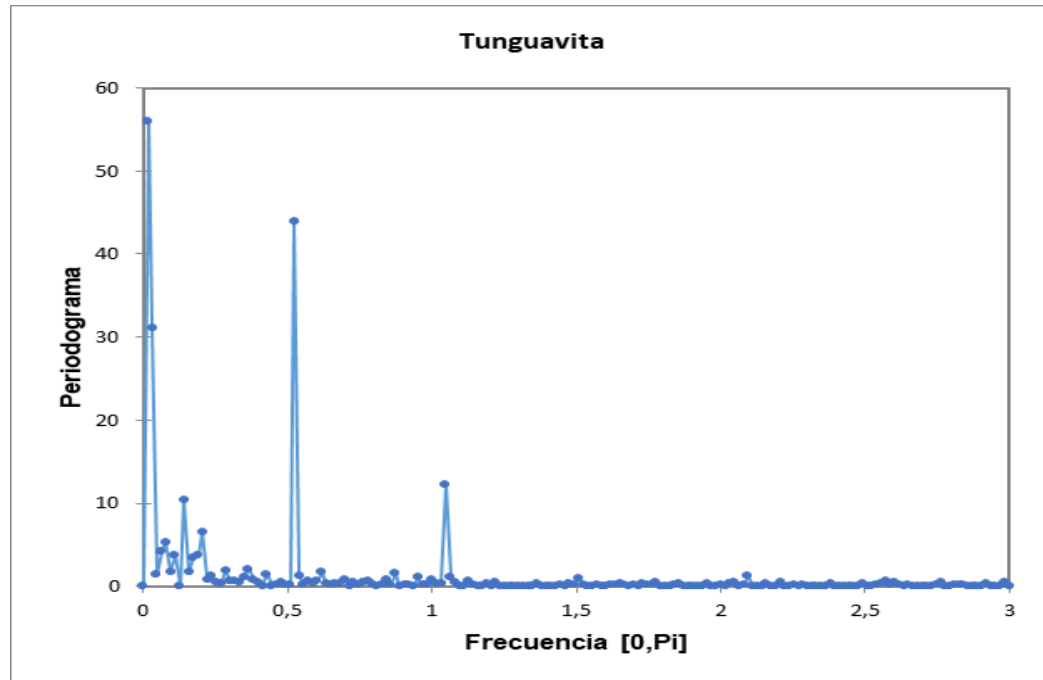


Figura 65. Función de densidad espectral de temperatura media mensual (estación Tunguavita).

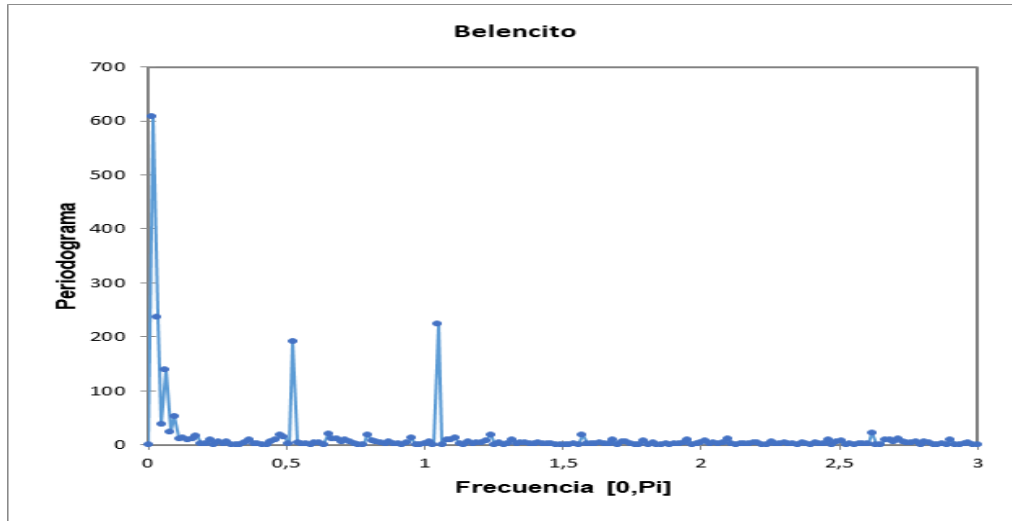


Figura 66. Función de densidad espectral de temperatura mínima mensual.

Las series de las estaciones hidrometeorológicas analizadas presentan periodicidades, asociadas con escalas temporales de variabilidad climática, estacional e interanual principalmente. Predomina el efecto estacional de la ZCIT y el efecto interanual en pocas series, asociado con el fenómeno ENSO-Oscilación del sur y la Oscilación Cuasibienal (QBO).

En la escala de variabilidad climática estacional es evidente que la mayor parte de las series presentan diferentes armónicos, adicionales al fundamental. Estos resultados son consistentes con los obtenidos del análisis en el dominio del tiempo y con la evidencia física meteorológica del doble paso de la ZCIT sobre la región Andina colombiana.

Tabla 16. Periodicidad encontrada en las series de precipitación total mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T (mes)	T (años)	Posible Fenómeno Asociado
UPTC	Fundamental	1,0471	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Panelas	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Pesca	Fundamental	0,524	0,0833	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Siachoque	Fundamental	0,524	0,0833	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Iza	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Combita	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Duitama	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Sotaquirá	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Sta Rosa D Viterbo	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Tibasosa	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Cerezo	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
San Antonio	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T (mes)	T (años)	Posible Fenómeno Asociado
Firavitoba	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Carrocho	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Nobsa	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Casa Amarilla	Fundamental	0,524	0,0833	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
	3	1,571	0,2500	4	0,33333333	No definido
Los Azulejos	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Antena Tv Rusia	Fundamental	0,206	0,0328	30,4615385	2,53846154	ENSO Y QBO
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Sena	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Surbata Bonza	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Belencito	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Tunguavita	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
San Cristobal	Fundamental	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
A.P.T.O A Lleras. C	Fundamental	0,524	0,0833	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
	3	2,094	0,3333	3	0,25	No definido
El Tunel	Fundamental	0,524	0,0833	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,1667	6	0,5	ZCIT (semestral)
	3	1,571	0,2500	4	0,33333333	No definido
	4	2,094	0,3333	3	0,25	No definido

Tabla 17. Periodicidad encontrada en las series de caudal máximo mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Maguncia	Fundamental	1,047	0,167	6,000	0,5	ZCIT (semestral)
El Palo	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
La Gruta	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
San Rafael LM	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
	3	1,503	0,23924731	4,1797753	0,3483146	No definido
La Resaca	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Vega	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Reforma	Fundamental	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
San Rafael LG	Fundamental	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Pt. Chameza	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Molino	Fundamental	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Trinidad	Fundamental	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Tabla 18. Periodicidad encontrada en las series de caudal medio mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Maguncia	Fundamental	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Palo	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
La Gruta	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666666	6	0,5	ZCIT (semestral)
San Rafael LM	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
	3	1,571	0,25	4	0,33333333	No definido
La Resaca	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Vega	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Reforma	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
San Rafael LG	Fundamental	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Pt. Chameza	Fundamental	0,524	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Molino	Fundamental	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Trinidad	Fundamental	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Tabla 19. Periodicidad encontrada en las series de caudal mínimo mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Maguncia	Fundamental	0,523598776	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Palo	Fundamental	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Gruta	Fundamental	0,523598776	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
San Rafael LM	Fundamental	0,523598776	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Resaca	Fundamental	0,202683397	0,032258065	31	2,58333333	ENSO Y QBO
	2	0,523598776	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
	3	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
La Vega	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
La Reforma	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
San Rafael LG	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Pt. Chameza	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Molino	No tiene					
La Trinidad	Fundamental	0,253354246	0,040322581	24,8	2,066666667	ENSO Y QBO
	2	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	3	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Tabla 20. Periodicidad encontrada en las series de temperatura máxima mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Surbata Bonza	Fundamental	0,349	0,055555556	18	1,5	QBO
	2	0,524	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	3	1,047	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
UPTC	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Tunguavita	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
A.P.T.O A.Lleras.C	Fundamental	0,523598776	0,083333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,166666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Tabla 21. Periodicidad encontrada en las series de temperatura media mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Surbata Bonza	Fundamental	0,523598776	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16667	6	0,5	ZCIT (semestral)
UPTC	Fundamental	0,523598776	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Belencito	Fundamental	0,523598776	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
Tunguavita	Fundamental	0,524	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047	0,16667	6	0,5	ZCIT (semestral)
A.P.T.O A.Lleras.C	Fundamental	0,524	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Tunel	Fundamental	0,524	0,08333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,047197551	0,16667	6	0,5	ZCIT (semestral)

Tabla 22. Periodicidad encontrada en las series de temperatura mínima mensual.

Estación	Armónico	w (rad/mes)	f (ciclos/mes)	T(mes)	T(años)	Posible Fenómeno Asociado
Surbata Bonza	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
UPTC	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Belencito	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
Tunguavita	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
A.P.T.O A.Lleras.C	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)
El Tunel	Fundamental	0,52359878	0,08333333	12	1	ZCIT (anual)
	2	1,04719755	0,16666667	6	0,5	ZCIT (semestral)

4.6 Análisis de Tendencias en las Variables Hidrometeorológicas a Nivel Anual

En el presente apartado se dan a conocer los resultados conseguidos mediante el análisis anual de tendencias de las variables hidrometeorológicas de precipitación, temperatura y caudal. Se evidencia también la validez de implementar pruebas no paramétricas como las de Mann-Kendall y Rho Spearman para determinar dichas tendencias, ya que como se describió en el apartado 4.2.4 todas las variables no son normalmente distribuidas indicando la pertinencia de emplear pruebas no paramétricas.

4.6.1 Precipitación

En la Tabla 23 se pueden observar los resultados obtenidos a través de las diferentes pruebas paramétricas y no paramétricas utilizadas para encontrar las tendencias; Mann-Kendall, Rho Spearman y Tendencia lineal, pruebas para el cambio de paso en la media/mediana; distribución libre CUSUM, desviación acumulativa, relación de probabilidad de Worsley, pruebas de diferencia en la media/mediana en dos períodos de datos diferentes; Rango-Suma, Prueba *t* de Student, pruebas de aleatoriedad; Cruce medio, Puntos de inflexión, Diferencia de rango y Autocorrelación. Adicionalmente, se pueden identificar en la Tabla 23, los estadísticos de prueba de Mann-Kendall (Z) y la magnitud de la tendencia mediante la prueba de Mann-Kendall (Q) para la precipitación total anual.

Para la interpretación de las pruebas de tendencias se identificaron dos hipótesis (H0), hipótesis nula cuando no existe una tendencia en la serie y (Ha) hipótesis alternativa cuando hay una tendencia en la serie. Cuando los valores de *p* computados son menores al nivel de significancia ($\alpha = 0.1$, equivalente a un nivel de confianza mayor al 90%) se

debe rechazar la hipótesis nula H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_a . En las Tablas 23 a 32, la letra A significa el rechazo de la hipótesis nula H_0 y la letra N la aceptación de la hipótesis nula H_0 , los números entre paréntesis hacen referencia al nivel de significancia estadística de las pruebas empleadas.

Según el análisis de consistencia, homogeneidad y validez de la información descrito en el apartado 4.2.4, los resultados indicaron no aleatoriedad. De esta manera podría existir una relación con tendencias propias asociadas con cambio climático y con el comportamiento cíclico de los fenómenos hidroclimatológicos. Estos análisis son consistentes con los resultados obtenidos en un gran número de estaciones a partir del empleo de las pruebas de aleatoriedad realizadas en este capítulo.

En el Figura 67 se pueden observar a manera de ejemplo las tendencias obtenidas para la precipitación anual con la prueba de Mann-Kendall y el estimador de la pendiente de Sen.

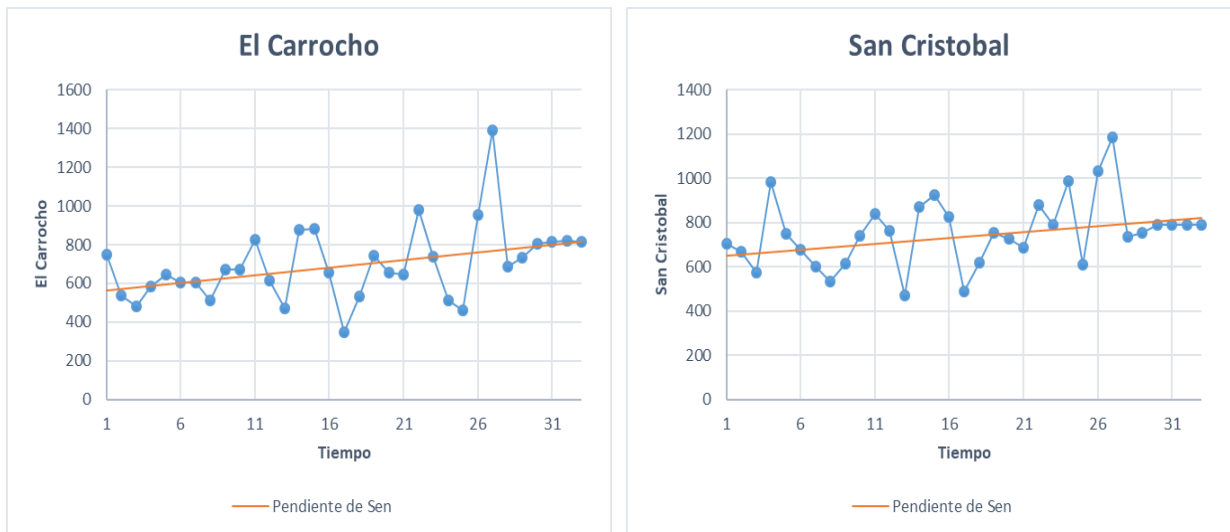


Figura 67. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para la precipitación anual.

Tabla 23. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la precipitación total anual.

Estación	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
UPTC	0,36	1,148	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,05)
Panelas	0,67	3,717	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,10)	N	N	A(0,10)
Pesca	-0,82	-1,512	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,10)	N	N	A(0,10)
Siachoque	-0,96	-2,025	N	N	N	N	A(0,1)	A(0,01)	N	N	N	N	N	A(0,05)
Iza	0,76	1,771	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Combita	-0,70	-3,240	N	N	N	N	A(0,1)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,05)	N	N	A(0,05)	A(0,05)
Duitama	1,53	6,234	N	N	A(0,1)	N	A(0,1)	N	N	N	A(0,1)	N	N	N
Sotaquirá	-0,79	-2,312	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Sta Rosa D Viterbo	0,08	0,259	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Tibasosa	0,57	2,828	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,05)	N	N
El Cerezo	0,02	0,061	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,05)	N	N
San Antonio	1,64	5,286	A(0,1)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Firavitoba	0,79	2,476	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,10)	A(0,05)
El Carrocho	2,43	7,873	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	N	N	N	A(0,05)	A(0,10)
Nobsa	2,18	8,375	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	N	A(0,05)	N	N	N	N	N	N	N
Casa Amarilla	-0,36	-1,013	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,05)
Los Azulejos	-0,98	-3,413	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
La Antena Tv Rusia	0,33	1,395	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,10)	N	N	N
Sena	-0,91	-2,890	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Surbata Bonza	1,84	6,703	A(0,1)	A(0,1)	A(0,01)	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Belencito	-0,08	-0,444	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Tunguavita	0,67	3,147	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,10)	N	N	N
San Cristobal	2,15	5,279	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,1)	N	N	N	A(0,05)	N	N
A.P.T.O A Lleras. C	1,04	2,958	N	N	N	N	A(0,1)	N	N	N	N	N	N	N
El Tunel	1,53	3,332	N	N	A(0,1)	N	A(0,1)	A(0,1)	N	N	N	N	N	A(0,1)

En la Figura 68 se pueden observar y comparar los resultados de p en la prueba estadística de Mann-Kendall para todas las estaciones a nivel anual, con un nivel de confianza del 90% o una significancia del 0,1. Las estaciones que mostraron tendencia con un nivel de significancia de 0,05 fueron: El Garrocho, Nobsa y San Cristóbal con valores p de 0,015, 0,029 y 0,031, respectivamente. Se evidencia de igual forma la existencia de saltos en la media y cambios en la media, en la mayoría de estaciones que poseen tendencias.

Las estaciones que cumplieron con los rangos de aceptación de la hipótesis alternativa (H_a) a un nivel de significancia del 0,1 son presentadas en la Tabla 23, las cuales fueron San Antonio y Surbata Bonza. Dichas estaciones se tuvieron en cuenta debido a que su nivel de confianza es del 90%, lo cual sigue siendo significativo para el análisis del presente estudio.

En la Tabla 24 se presentan todas las estaciones con tendencias estadísticamente significativas de incremento en la precipitación. Se puede observar que la estación con mayor incremento anual es la estación Nobsa (8,37 mm) y la de menor incremento es la estación San Cristóbal (5,28 mm) ubicada en el municipio de Toca.

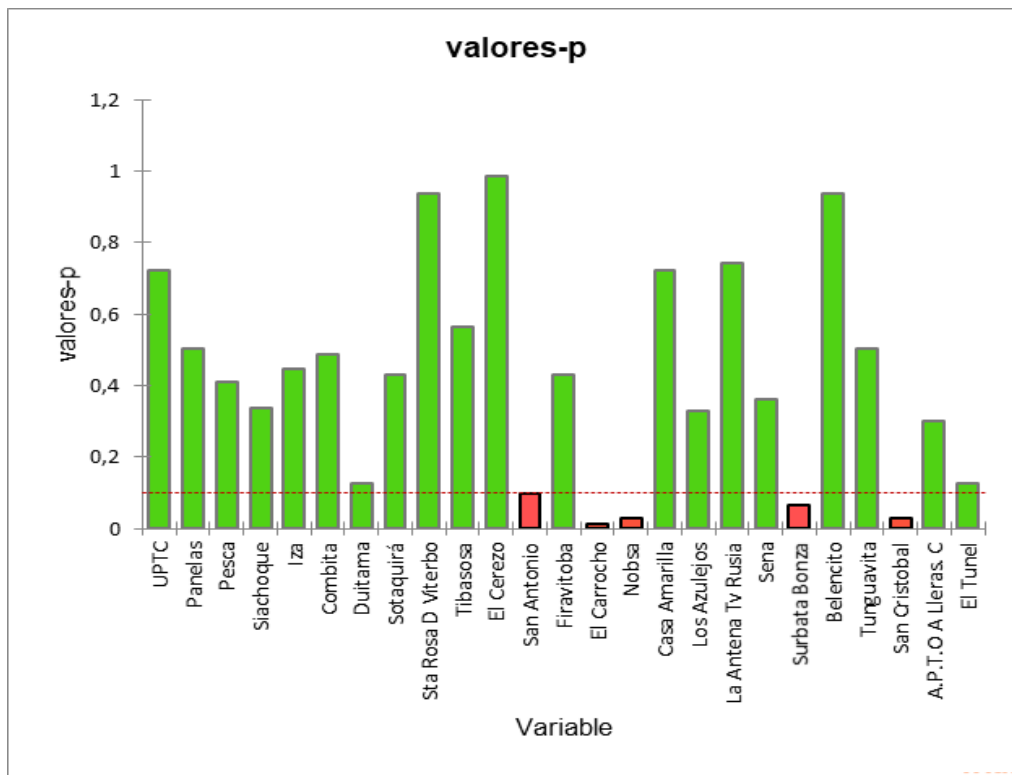


Figura 68. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de precipitación anual.

Tabla 24. Resumen de estaciones de precipitación con tendencias estadísticamente significativas.

Estación	Nivel de Significancia	Tendencia (mm/año)	Altitud (m.s.n.m)	Corriente principal	Municipio
El Garrocho	0,05	7,873	2836	Quebrada Alizal	Toca
Nobsa	0,05	8,375	2500	Chicamocha	Nobsa
San Cristobal	0,05	5,279	2700	Quebrada Raiba	Toca
San Antonio	0,1	5,286	2580	Tuta	Tuta
Surbata Bonza	0,1	6,703	2485	Surba	Duitama

4.6.2 Caudal

Los resultados de las diferentes pruebas estadísticas para las estaciones de caudal máximo, medio y mínimo, que rechazaron la hipótesis nula, evidenciando tendencias estadísticamente significativas son mostradas en la Tablas 26 a la 28. Se observó que el caudal medio no presenta tendencias estadísticamente significativas a nivel de significancia $\alpha = 0,1$. Caso contrario sucede con las variables de caudal máximo y mínimo anual, que para el caso de la primera variable presenta una estación con aceptación de la hipótesis alternativa (estación La Reforma) ubicada en el municipio de Sotaquirá con una tendencia de disminución ($-0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ al año) y un nivel de confianza del 90%. Para el caudal mínimo anual en dos estaciones se presentaron tendencias estadísticamente significativas: El Palo, con una tendencia positiva ($\alpha = 0,1$) ubicada en el municipio de Tuta; y la estación San Rafael (LM) ($\alpha = 0,05$), también en el municipio de Tuta (ver Tabla 28). En las figuras 69 a la 71 se pueden observar (a manera de ejemplo) algunas gráficas de tendencias en los caudales.

En las Figuras 72 a la 74, se muestran los valores de p obtenidos de las pruebas de tendencia para las estaciones de caudal máximo, medio y mínimo, con una significancia de 0,1. En la Tabla 25 se presentan de forma resumida los resultados de p en la prueba estadística de Mann-Kendall para todas las estaciones. La única estación que mostró tendencia con un nivel de significancia de 0,05 fue San Rafael (LM), correspondiente al caudal mínimo anual con una tendencia de incremento. Se evidencia de igual forma la existencia de saltos en la media y cambios en la media en dicha estación con tendencia estadísticamente significativa.

Tabla 25. Resumen de estaciones hidrométricas con tendencias estadísticamente significativas.

Variable	Estación	Nivel de Significancia	Tendencia ($\text{m}^3/\text{s. año}$)	Altitud (m.s.n.m)	Corriente principal	Municipio
Caudal Máximo	La Reforma	0,1	- 0,16	2523	Chicamocha	Sotaquirá
Caudal Mínimo	El Palo	0,1	0,012	2600	Tuta	Tuta
	San Rafael LM	0,05	0,009	2500	Chulo	Tuta

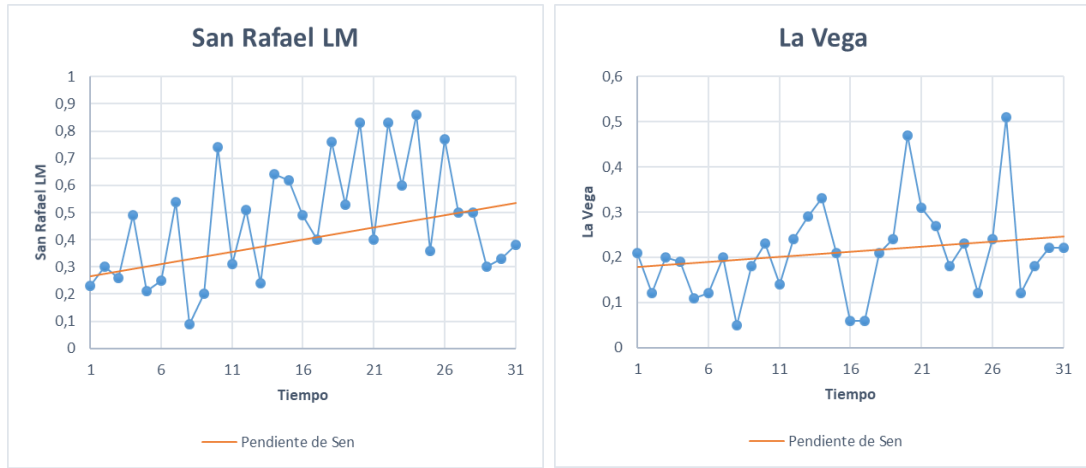


Figura 69. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal mínimo anual.

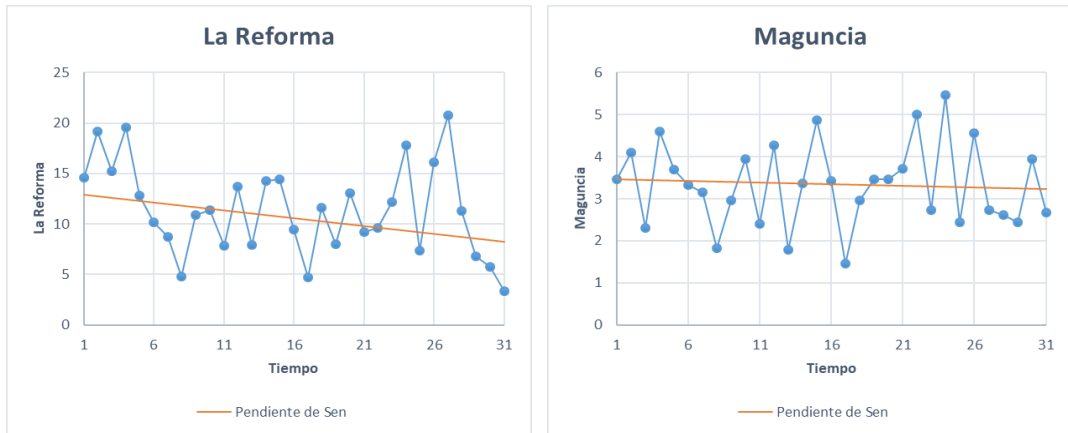


Figura 70. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal máximo anual.

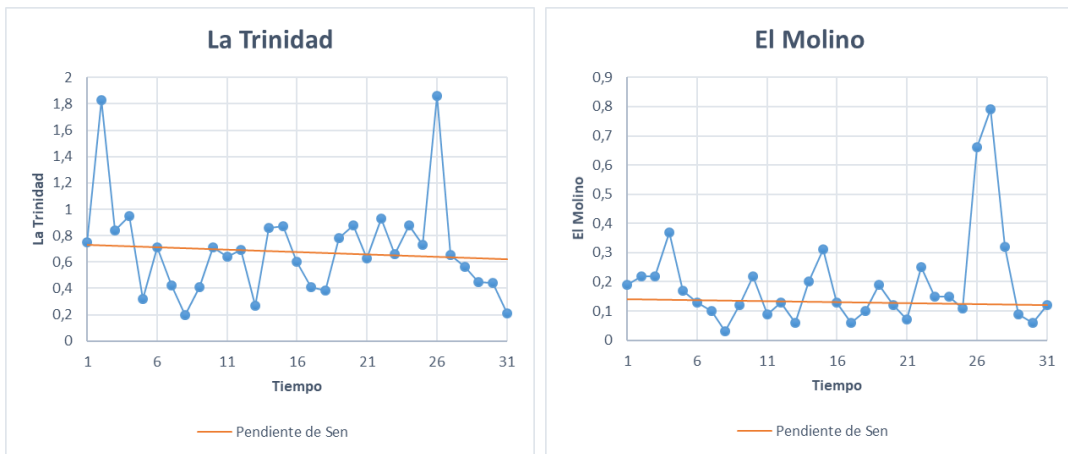


Figura 71. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para caudal medio anual.

Estacion	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
La Vega	1,22480394	0,00461538	N	N	N	N	A(0,1)	N	N	N	N	N	N	N
La Reforma	-0,74805848	-0,02	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,01)
San Rafael LG	-1,00293347	-0,04944444	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Pt. Chameza	-0,06798567	-0,00764706	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
El Molino	-0,44310315	-0,00071429	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,01)	N	A(0,05)
La Trinidad	-0,59513253	-0,00375	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Tabla 28. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal mínimo anual.

Estacion	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
Maguncia	-0,71515914	-0,002	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
El Palo	1,90543438	0,01176471	A(0,1)	A(0,1)	A(0,05)	N	A(0,1)	N	N	N	N	N	N	A(0,05)
La Gruta	0,58209735	0,00103448	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,1)	N	N
San Rafael LM	2,0240359	0,009	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	N	A(0,05)	A(0,05)	N	N	N	N	N	N
La Resaca	1,31093506	0,005	N	N	N	N	A(0,05)	A(0,1)	N	N	N	N	N	N
La Vega	1,58609798	0,00222222	N	N	N	A(0,01)	N	N	N	N	N	A(0,01)	N	N
La Reforma	0,93529841	0,01423077	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,1)	N	A(0,1)	A(0,01)
San Rafael LG	-0,47589968	-0,017	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Pt. Chameza	0,08499436	0,004	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
El Molino	0,55158752	0	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
La Trinidad	1,17484753	0,00333333	N	N	N	N	N	N	N	N	A(0,1)	A(0,1)	A(0,05)	A(0,05)

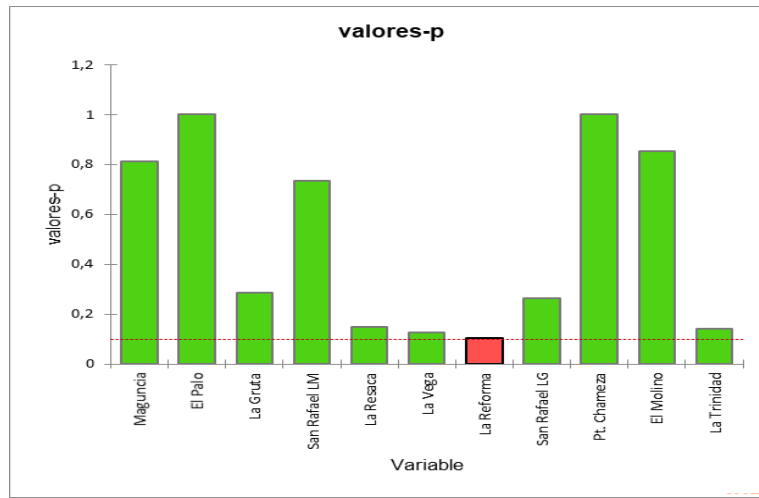


Figura 72. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal máximo anual.

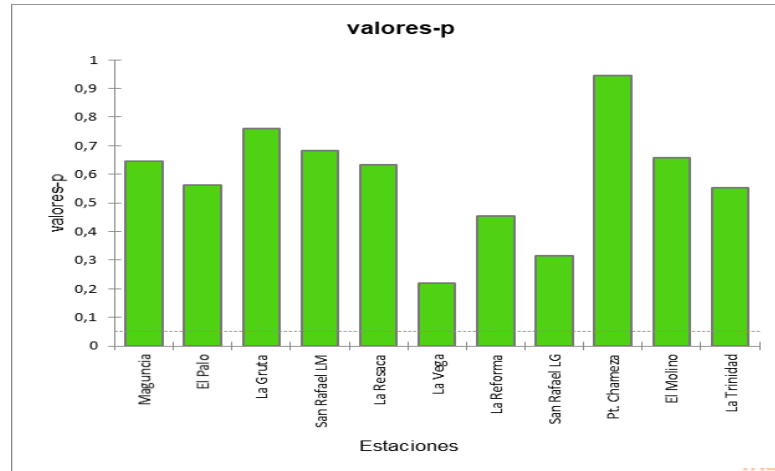


Figura 73. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal medio anual.

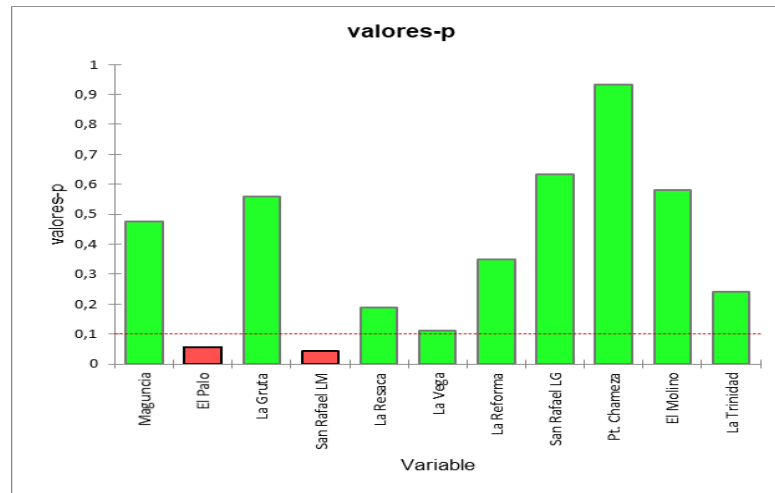


Figura 74. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de caudal mínimo anual.

4.6.3 Temperatura

La temperatura máxima, media y mínima, comparadas con las demás variables, fueron las que presentaron mayor rechazo de la hipótesis nula. Este comportamiento fue evidente en la mayoría de las estaciones (valores de p menores de 0,1), con la consecuente aceptación de tendencias estadísticamente significativas. El 75% de estaciones de temperatura máxima presentaron tendencias estadísticamente significativas, en temperatura media el 83% y en temperatura mínima el 66%.

Par el caso de la temperatura máxima la estaciones que presentaron tendencia fueron las estaciones: Surbata Bonza, Tinguavita y Apto. A Lleras C., con niveles de significancia del 0,001, 0,01 y 0,05, respectivamente (ver Tabla 30).

Las estaciones con tendencias estadísticamente significativas en temperatura media anual fueron: Surbata Bonza, UPTC, Belencito, Tinguavita y El Túnel. Dichas estaciones presentaron tendencias de incremento (ver Tabla 31) con niveles de significancia entre 0,5 y 0,001. La temperatura media fue la variable que más presentó tendencias estadísticamente significativas, convirtiéndose en un indicador muy fuerte de evidencias de cambio climático en la cuenca alta del Río Chicamocha.

La temperatura mínima anual fue la única variable que presentó en una de sus estaciones (El Túnel) tendencias estadísticamente significativas de disminución (-0,066 °C por año) con un nivel de significancia del 0,01. Por otra parte, las estaciones de Surbata Bonza y Belencito, evidenciaron tendencias de incremento con un nivel de significancia de 0.01, de manera similar a la estación Apto. A Lleras C.

En la Tabla 29 se pueden observar las estaciones con registros de temperatura máxima, media y mínima, que presentaron tendencias estadísticamente significativas. Adicionalmente, se muestra el nivel de significancia, la magnitud de la tendencia, la ubicación altitudinal de la estación, la corriente principal y el municipio donde se encuentra la estación.

Tabla 29. Resumen de estaciones de temperatura con tendencias estadísticamente significativas.

Variable	Estación	Nivel de Significancia	Tendencia (°C/año)	Altitud (m.s.n.m)	Corriente principal	Municipio
Temperatura Máxima	Surbata Bonza	0,001	0,0332	2.485	Surba	Duitama
	Tinguavita	0,01	0,0371	2.470	Salitre	Paipa
	APTO A. Lleras C.	0,05	0,0214	2.500	Chicamocha	Sogamoso
Temperatura Media	Surbata Bonza	0,001	0,062	2.485	Surba	Duitama
	UPTC	0,01	0,017	2.690	Chulo	Tunja
	Belencito	0,001	0,072	2.530	Chicamocha	Nobsa
	Tinguavita	0,05	0,024	2.470	Salitre	Paipa

Variable	Estación	Nivel de Significancia	Tendencia (°C/año)	Altitud (m.s.n.m)	Corriente principal	Municipio
	El Túnel	0,01	0,015	3.000	Lago De Tota	Cúitiva
Temperatura Mínima	Surbata Bonza	0,001	0,0685	2.485	Surba	Duitama
	Belencito	0,001	0,1071	2.530	Chicamocha	Nobsa
	APTO A. Lleras C.	0,01	0,042	2.500	Chicamocha	Sogamoso
	El Túnel	0,01	-0,0666	3.000	Lago De Tota	Cúitiva

En la Tabla 29 sobresale la magnitud de la tendencia estimada en la estación Belencito para la temperatura mínima y media. Estas magnitudes obtenidas para el municipio de Nobsa son las más altas encontradas en las tendencias estadísticamente significativas en la temperatura, con un valor aproximado de incremento de 1°C y 0.72°C, respectivamente durante el periodo de estudio. En las Figuras 75 a 77 son presentadas las gráficas de temperatura anual (máxima, media y mínima) con los resultados de la prueba de Mann-Kendall y estimador de pendiente de Sen.

También de forma gráfica (ver Figuras 78 a la 80) se presentan valores *p* de la prueba estadística de Mann- Kendall para todas las estaciones de temperatura anual con niveles de significancia menores de 0,1. Estas gráficas evidencian la presencia de tendencias estadísticamente significativas en la mayor parte de estaciones analizadas.

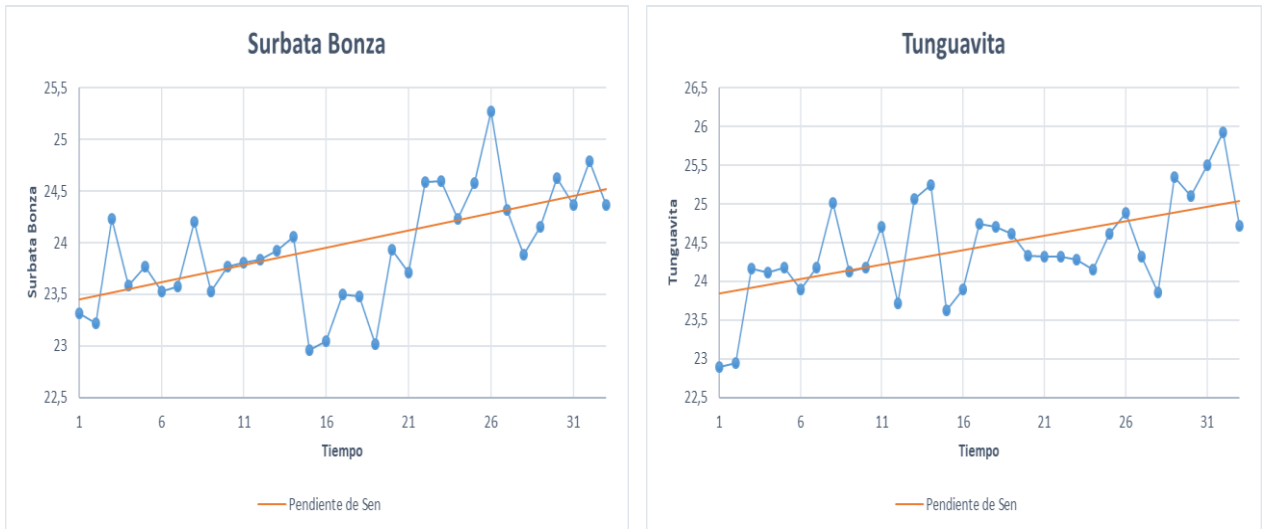


Figura 75. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura máxima anual.

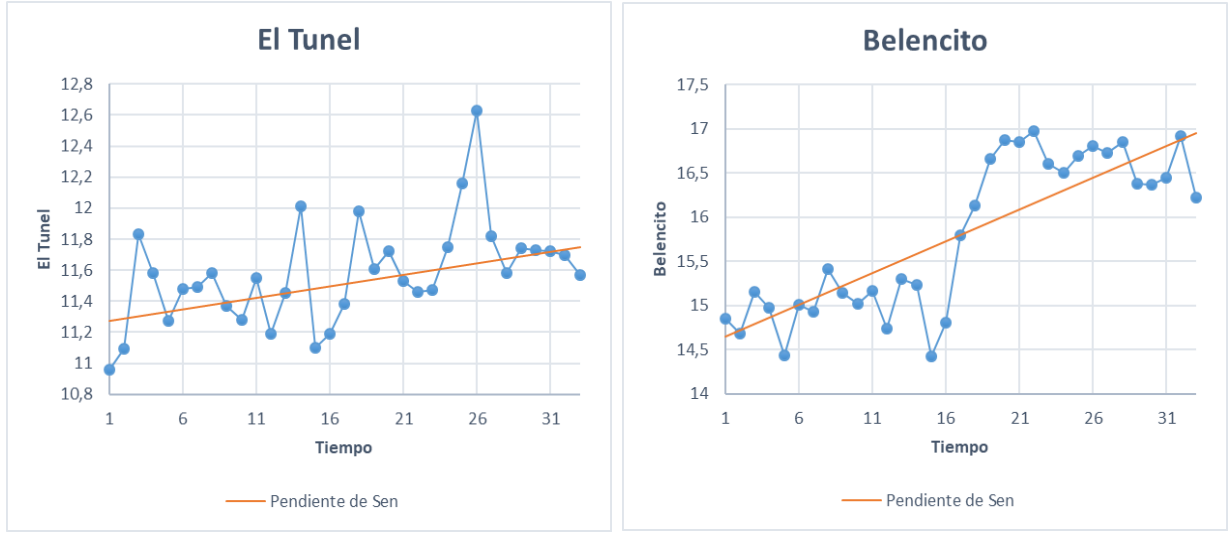


Figura 76. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura media anual.

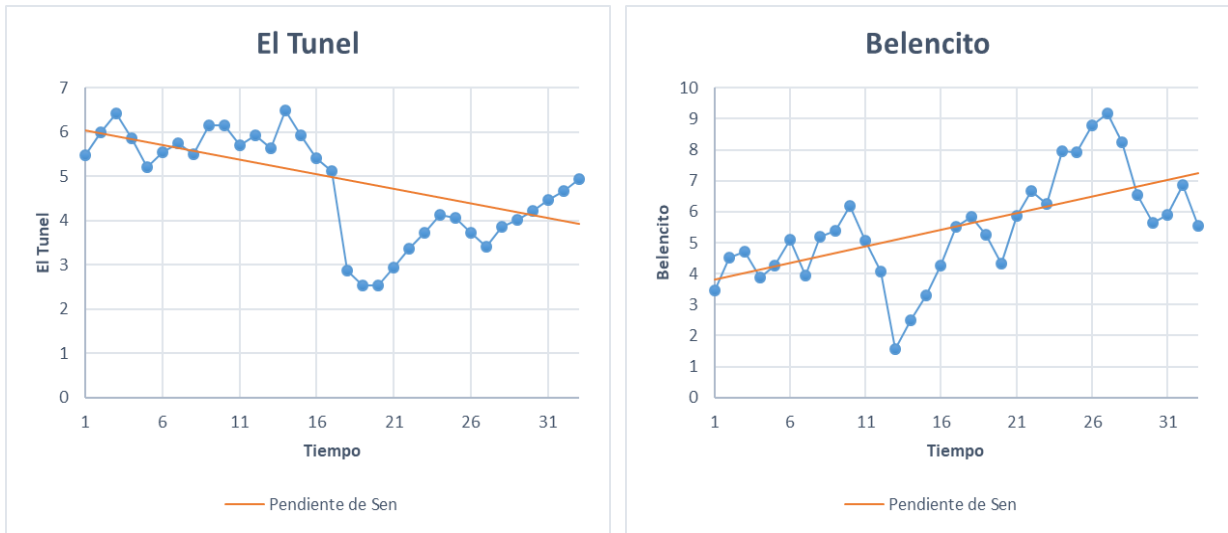


Figura 77. Tendencias obtenidas con la prueba de Mann-Kendall y estimador de la pendiente de Sen para temperatura mínima anual.

Tabla 30. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura máxima anual.

Estacion	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
Surbata Bonza	3,549	0,0333	A(0,001)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,1)	A(0,1)	N	A(0,01)	A(0,01)
UPTC	1,395	0,010	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Tunguavita	3,257	0,0371	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	N	A(0,05)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,1)	N	A(0,01)	A(0,05)
APTO A.Lleras.C	2,3718	0,0208	A(0,05)	A(0,05)	A(0,01)	N	A(0,05)	A(0,05)	N	N	N	N	A(0,01)	A(0,05)

Tabla 31. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura media anual.

Estación	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
Surbata Bonza	5,737	0,062	A(0,001)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,05)	N	N	A(0,01)	A(0,05)
UPTC	3,193	0,017	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	N	A(0,05)	A(0,05)	A(0,1)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)	A(0,1)
Belencito	4,401	0,072	A(0,001)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	N	N	A(0,01)	N	A(0,01)	A(0,01)
Tunguavita	2,170	0,024	A(0,05)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	N	N	A(0,05)	N	A(0,01)	A(0,01)
APTO A.Lleras.C	1,287	0,018	N	N	A(0,05)	N	N	A(0,01)	A(0,05)	A(0,01)	N	A(0,05)	A(0,05)	A(0,05)
El Tunel	2,729	0,015	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,05)	N	N	A(0,05)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,05)

Tabla 32. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura mínima anual.

Estacion	Z	Q	Mann-Kendall	Rho Spearman	Tendencia lineal	CUSUM	Desviación acumulada	Worsley	Suma de rangos	Prueba T Student	Mediana cruzada	Puntos de retorno	Diferencia de rangos	Autocorrelación
Surbata Bonza	3,56	0,0685	A(0,001)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,05)	A(0,01)	A(0,01)	N	N	N	N	A(0,01)	A(0,01)
UPTC	0,06	0,000476	N	N	N	N	N	A(0,1)	N	N	N	N	N	N
Belencito	4,14	0,1071	A(0,001)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	A(0,01)	N	A(0,01)	N	N	A(0,01)
Tunguavita	0,14	0,0025	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
APTO A.Lleras.C	2,63	0,042	A(0,01)	A(0,05)	A(0,01)	N	A(0,05)	A(0,05)	N	N	N	N	N	N

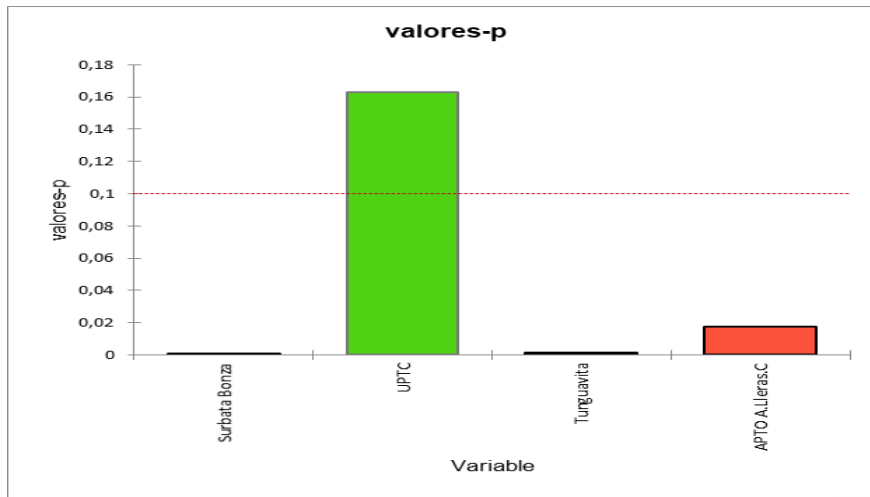


Figura 78. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura máxima anual.

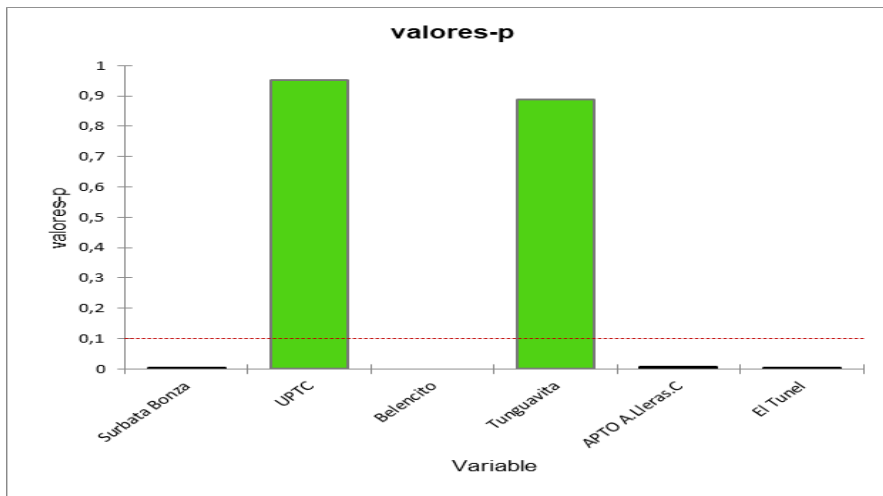


Figura 79. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura mínima anual.

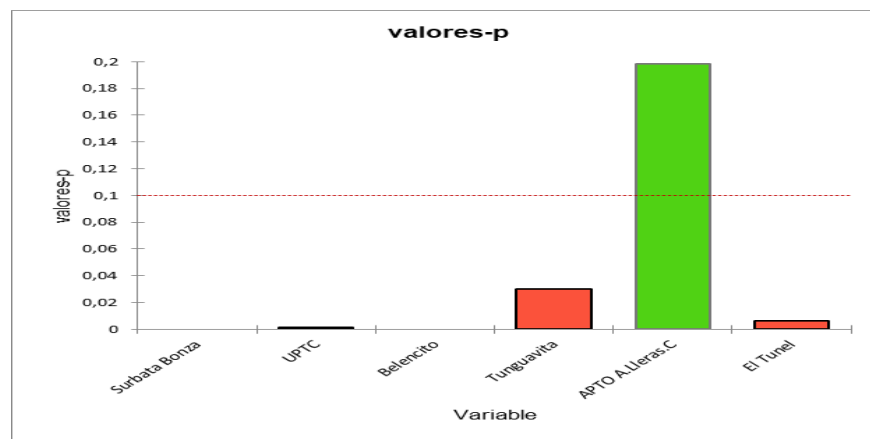


Figura 80. Valores de p de la prueba estadística de Mann- Kendall para las series de temperatura media anual.

4.7 Análisis de Tendencias en las Variables Hidrometeorológicas a Nivel Mensual

El análisis de detección y estimación de tendencias estadísticamente significativas se realizó también a nivel mensual multianual, tanto para precipitación total mensual como para la temperatura y caudal. A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos para los diferentes meses del año.

4.7.1 Precipitación Total Mensual Multianual

Los resultados encontrados en las series de precipitación mensual multianual evidencian la existencia de tendencias estadísticamente significativas durante algunos meses del año. Por otro parte, se identificaron estaciones que no presentan tendencias mensuales como el caso de la estación Surbata Bonza, Belencito, Los Azulejos y Antena TV Rusia.

En la Tabla 33 se pueden observar los resultados de las pruebas estadísticas para la identificación de tendencias mensuales en precipitación total mensual multianual. Las casillas identificadas con (-) identifican los meses sin tendencias estadísticamente significativas y los valores presentados en las casillas son las respectivas magnitudes de las tendencias encontradas en cada estación.

Los resultados evidencian que el 16% de las estaciones no presentan tendencias estadísticamente significativas. Se observan tendencias de incremento durante el mes de enero en tres estaciones y durante marzo en una. Tendencias durante el mes de julio fueron recurrentes, en total cinco estaciones con tendencia de incremento y una con tendencia de disminución.

Coincidente con el segundo periodo de lluvias, sobresale el mes de septiembre con una mayor cantidad de reportes de tendencias de disminución en la precipitación para un total de doce (12) estaciones con tendencias estadísticamente significativas. Los meses de noviembre y diciembre presentan tendencias de incremento y el mes de octubre no presentó tendencias en las estaciones analizadas.

Tabla 33. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la precipitación total mensual multianual.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
UPTC	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,815	-	-	-
Panelas	1,030	-	3,020	-	-1,667	-1,332	-	1,120	-	-	-	1,263
Pesca	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,818	-	-	-
Siachoque	-	-	-	-	-	-	-	-	-1,207	-	-	-
Iza	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,725	-	-	-
Combita	-	-	-	-	-	-	-0,822	-	-1,645	-	-	-
Duitama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,052
Sotaquirá	-	-	-	-	-	-	-	-	-1,086	-	-	-
Sta Rosa de	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,824	-	-	-

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Viterbo												
Tibasosa	0,744	-	-	-	-	-	-	-	-1,385	-	-	-
El Cerezo	-	-	-	1,832	-	-	-	-	-1,447	-	-	-
San Antonio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,085	0,855
Firavitoba	-	-	-	-	-	-	0,818	-	-1,035	-	-	-
El Carrocho	0,796	-	-	1,812	-	-	0,690	0,781	-	-	-	-
Nobsa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,589	-
Casa Amarilla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,589	-
Los Azulejos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Antena Tv Rusia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sena	-	-	-	-	-	-	-	-	-1,262	-	-	-
Surbata Bonza	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Belencito	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tunguavita	-	-	-	2,158	-	-	-	-	-	-	-	-
San Cristobal	-	-	-	1,661	0,786	-	0,707	-	-	-	-	-
A.P.T.O A Lleras. C	-	-	-	-	-	-	0,450	0,501	-0,788	-	-	-
El Tunel	-	-	-	-	-	-	0,579	-	-	-	-	-

4.7.2 Temperatura Mensual Multianual (máxima, media y mínima)

Los resultados obtenidos con las series de temperatura máxima, media y mínima (ver Tablas 34 a 36) indican que la mayoría de estaciones presentan tendencias mensuales estadísticamente significativas ($\alpha=0,01$ y $\alpha=0,001$).

En la variable de temperatura media y máxima mensual el 100% de las estaciones presentan tendencias mensuales. En la variable de temperatura mínima es 16% de las estaciones no presentan tendencias, es el caso de la estación Tunguavita.

En la temperatura media máxima mensual (ver Tabla 34) se observa tendencia de incremento durante todos los meses del año, con mayores magnitudes durante los meses de enero y abril. Meses como marzo y diciembre solo presentan tendencia en la estación de Surbata Bonza. Sobresale el comportamiento del mes de octubre con tendencias estadísticamente significativas en todas las estaciones analizadas, seguido por los meses de mayo, junio, agosto y septiembre, con tendencias en tres de las cuatro estaciones. La estación que presenta mayores tendencias estadísticamente significativas de incremento mensual es Surbata Bonza, con tendencias durante 10 meses; seguida por la estación Tunguavita, con tendencias de incremento durante 8 meses.

En cuanto a la temperatura media (ver Tabla 36), es evidente la tendencia de incremento durante todos los meses del año. Resaltan meses como junio, julio agosto y diciembre, donde se observan tendencias en aumento estadísticamente significativas en todas las estaciones analizadas. Meses como enero, febrero, marzo, mayo y septiembre, presentan tendencias en cuatro de las cinco estaciones estudiadas. Las estaciones

Surbata Bonza y Belencito, fueron las únicas que presentaron durante todos los meses tendencias en aumento estadísticamente significativas.

La temperatura mínima mensual presentó menor cantidad de tendencias estadísticamente significativas de incremento (ver Tabla 36). Los meses de abril y diciembre presentan mayor cantidad de tendencias, en tres de las estaciones. Se observa que la estación Belencito presenta durante todos los meses tendencias de incremento, caso contrario se evidenció en la estación Tunguavita, siendo la única que no presentó tendencia. La estación el Túnel al igual que la estación de Belencito, presentó tendencias, pero en este caso de disminución durante todos los meses, lo que indicaría que las temperaturas mínimas han venido siendo cada vez más bajas. Este comportamiento es consistente con el análisis de tendencias a nivel anual, en el cual la estación el Túnel fue la única que presentó tendencias negativas.

Tabla 34. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura máxima mensual multianual.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Surbata Bonza	-	0,042	0,035	-	0,039	0,032	0,040	0,031	0,048	0,023	0,0434	0,0203
UPTC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,017	-	-
Tunguavita	-	0,036	-	-	0,037	0,075	0,041	0,043	0,044	0,038	0,0470	-
APTO A.Lleras.C	-	-	-	-	0,037	0,016	-	0,032	0,031	0,031	-	-

Tabla 35. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura media mensual multianual.

Estación.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Surbata Bonza	0,069	0,067	0,058	0,050	0,060	0,070	0,073	0,061	0,061	0,064	0,058	0,080
UPTC	-	-	0,020	-	0,017	0,014	0,022	0,018	0,009	-	0,014	0,014
Belencito	0,080	0,074	0,067	0,053	0,060	0,070	0,078	0,077	0,069	0,082	0,082	0,091
Tunguavita	0,040	0,033	0,024	-	0,028	0,025	0,027	0,020	-	-	-	0,043
El Tunel	0,018	0,028	-	-	-	0,023	0,044	0,034	0,024	0,014	-	0,019

Tabla 36. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para la temperatura mínima mensual multianual.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Surbata Bonza	-	-	0,086	0,064	-	-	0,067	0,059	0,050	0,065	0,076	0,151
UPTC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,050
Belencito	0,086	0,101	0,100	0,120	0,107	0,112	0,117	0,119	0,104	0,099	0,091	0,155
Tunguavita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
APTO A.Lleras.C	-	-	-	0,080	0,075	-	-	-	-	-	-	0,127
El Tunel	-0,067	-0,042	-0,082	-0,090	-0,091	-0,091	-0,080	-0,059	-0,046	-0,062	-0,076	-0,057

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
San Rafael LM	-	-	-	0,0479	-	-	-	-	-	-	-	-
La Resaca	0,0128	-	-	-	-0,1761	-	-	-	-	-	-	-
La Vega	-	-	-	-	-	-0,1293	-	-	-	-	-	-0,0537
La Reforma	-	-	0,1162	-	-	-0,3270	-	-	-	-0,3985	-0,3638	-
San Rafael LG	-	-	-	-	-	-	-0,2860	-	-	-0,5045	-	-
Pt. Chameza	-	-	-	-	-	-	-0,2860	-	-	-0,5045	-	-
El Molino	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Trinidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 38. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal medio mensual multianual.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Maguncia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
El Palo	0,0506	0,0487	0,0699	0,0433	-	-	-	-	-	-	-	-
La Gruta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
San Rafael LM	0,0162	0,0063	-	0,0214	-	0,0301	-	-	-	-	-	-
La Resaca	0,0057	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Vega	0,0126	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Reforma	0,0628	0,0558	0,0673	-	-	-	-0,0796	-	-	-0,1391	-	-
San Rafael LG	-	-	-	-	-	-	-0,0831	-	-0,0663	-0,2290	-	-
Pt. Chameza	0,0774	0,0544	0,0675	0,1215	-	-	-	-	-	-	-	-
El Molino	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Trinidad	-	0,0056	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 39. Resumen de resultados de pruebas estadísticas para el caudal mínimo mensual multianual.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Maguncia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
El Palo	0,036	0,039	0,034	0,018	-	-	-	-	-	-	-	0,023
La Gruta	0,004	0,003	0,004	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-
San Rafael LM	0,008	-	0,006	0,009	0,010	0,018	0,015	-	0,008	-	-	0,017
La Resaca	0,003	0,003	0,007	0,008	0,012	-0,011	-	-	-	-	-	-
La Vega	0,003	-	0,002	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-
La Reforma	0,070	0,060	0,062	0,048	-	-	-	-	-	-	-	-
San Rafael LG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,081	-	-
Pt. Chameza	0,040	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,089	-	-
El Molino	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Trinidad	0,007	0,007	-	-	0,011	0,013	0,012	0,007	-	-	0,011	0,011

4.8 Espacialización de Tendencias

En este numeral son presentados espacialmente los resultados obtenidos con el análisis de tendencias a nivel anual para las diferentes variables estudiadas. De esta manera se generaron mapas con la georreferenciación de las tendencias detectadas y estimadas. La herramienta computacional de Sistemas de Información Geográfica empleada fue el software ArcGIS 10.3.

En los mapas realizados se identificó de forma puntual la información obtenida y se generó la cartografía para cada una de las variables, indicando la magnitud de la tendencia de incremento o disminución para las diferentes estaciones presentes en la Cuenca Alta del Río Chicamocha (ver Figuras 81 a 86).

La Figura 81 presenta el mapa de tendencias de precipitación anual, en el cual se representan las magnitudes obtenidas para las cinco estaciones (El Garrocho, Nobsa, San Cristobal, San Antonio y Surbata Bonza) que presentaron tendencias de incremento estadísticamente significativas.

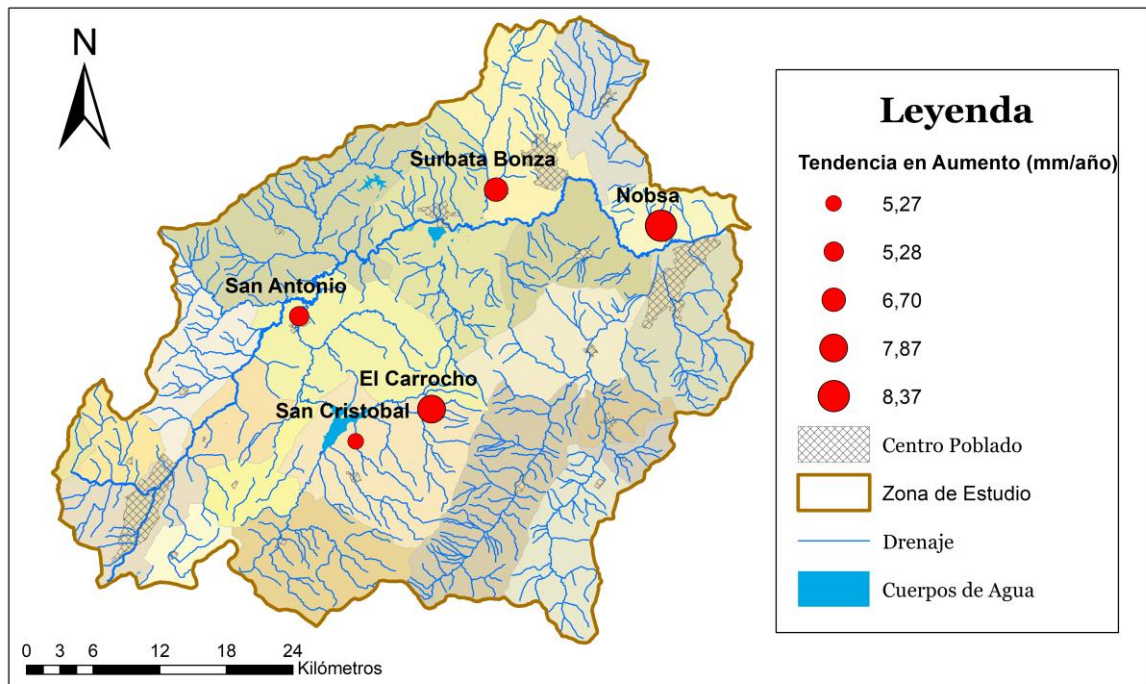


Figura 81. Mapa de tendencias de precipitación anual.

La estación que presenta mayor magnitud en la tendencia de precipitación anual fue la estación de Nobsa con aproximadamente 8,37 mm/año. Dicha estación se encuentra en el municipio de Nobsa a una elevación de 2500 m.s.n.m. A nivel de municipios, aquellos que poseen estaciones con tendencias en la precipitación fueron: Toca, Nobsa, Tuta y Duitama. Los municipios mencionados anteriormente se encuentran ubicados a una elevación entre 2485 y 2836 m.s.n.m.

El caudal (máximo y mínimo) presentó tres estaciones con tendencias estadísticamente significativas (La Reforma, El Palo y San Rafael), ubicadas en los municipios de Sotaquirá y Tuta. El caudal máximo con $-0,16 \text{ m}^3/\text{s.año}$, en el municipio de Sotaquirá (ver Figura 82), mientras que el caudal mínimo presentó dos estaciones con tendencias de incremento (ver Figura 83) en el municipio de Tuta (San Rafael LM y El Palo). Este comportamiento del caudal mínimo tiene relación con el incremento en la precipitación evidenciado anteriormente para el municipio de Tuta.

El análisis de tendencias a nivel anual y la espacialización de las mismas (ver Figuras 81 a 86), evidencian que la variable con mayor número de estaciones que presentan tendencias estadísticamente significativas es la temperatura, con un total de doce (12) estaciones. La temperatura máxima presentó tres estaciones con tendencias estadísticamente significativas (Surbata Bonza, Tunguavita y APTO. A. Lleras C.) en los municipios de Duitama, Paipa y Sogamoso, respectivamente. La temperatura media presentó cinco estaciones con tendencias de incremento estadísticamente significativas en los municipios de Duitama, Tunja, Nobsa, Paipa y Cuítiva, ubicadas a una elevación entre 2470 y 3000 m.s.n.m. La estación que presentó mayor magnitud en la temperatura media fue Belencito con $0,072^\circ\text{C}$ en el municipio de Nobsa. Por último, se analizó la temperatura mínima encontrando en total cuatro estaciones con tendencias estadísticamente significativas, de las cuales tres son positivas y una negativa como se puede observar en la Figura 86. Las estaciones con tendencias de incremento fueron Surbata Bonza, Belencito y APTO A. Lleras C. en los municipios de Duitama, Nobsa y Sogamoso. La estación que presentó tendencia negativa en la temperatura mínima fue el Túnel en el municipio de Cuítiva con una magnitud de $-0,066^\circ\text{C/año}$.

A partir del análisis de la espacialización de tendencias en temperatura (máxima, media y mínima) se identificó que el municipio de Duitama presentó una mayor cantidad de tendencias. Este municipio es seguido por el municipio de Paipa (con dos tendencias en aumento de la temperatura máxima y media), el municipio de Nobsa (temperatura media y mínima) y por último Sogamoso (temperatura máxima y mínima).

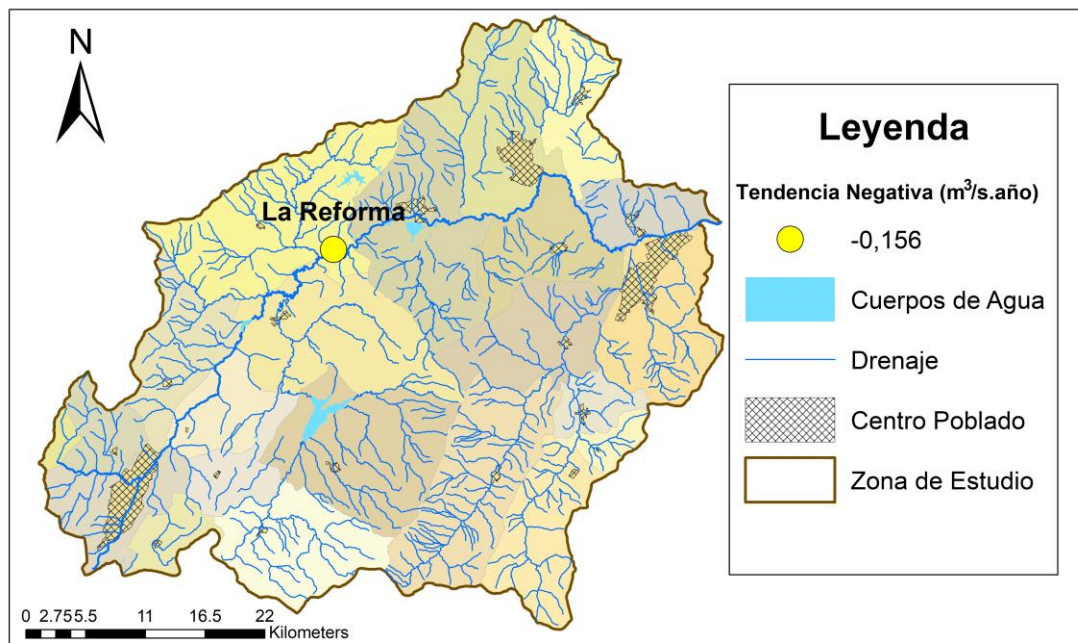


Figura 82. Mapa de tendencias de caudal máximo anual.

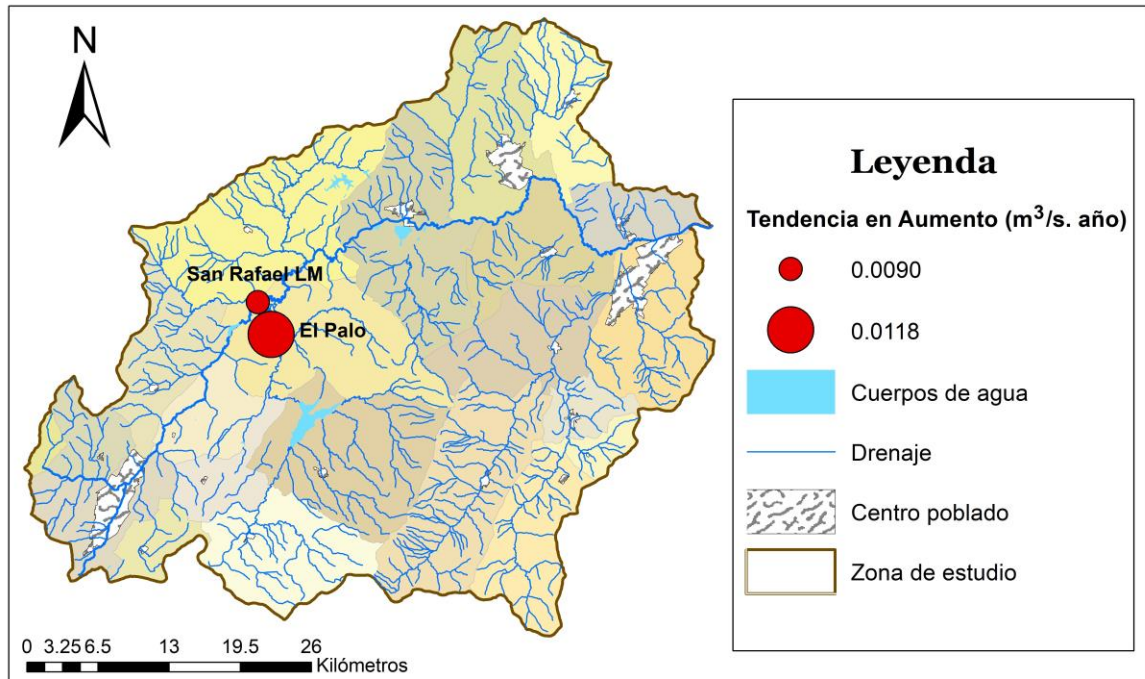


Figura 83. Mapa de tendencias de caudal mínimo anual.

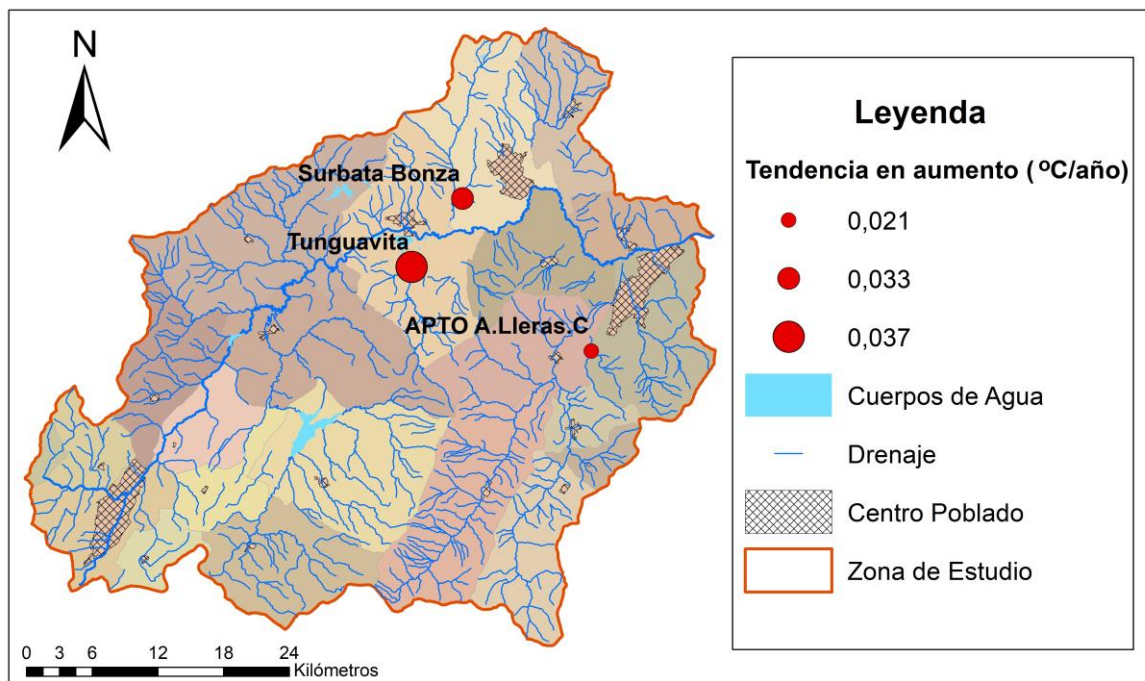


Figura 84. Mapa de tendencias de temperatura máxima anual.

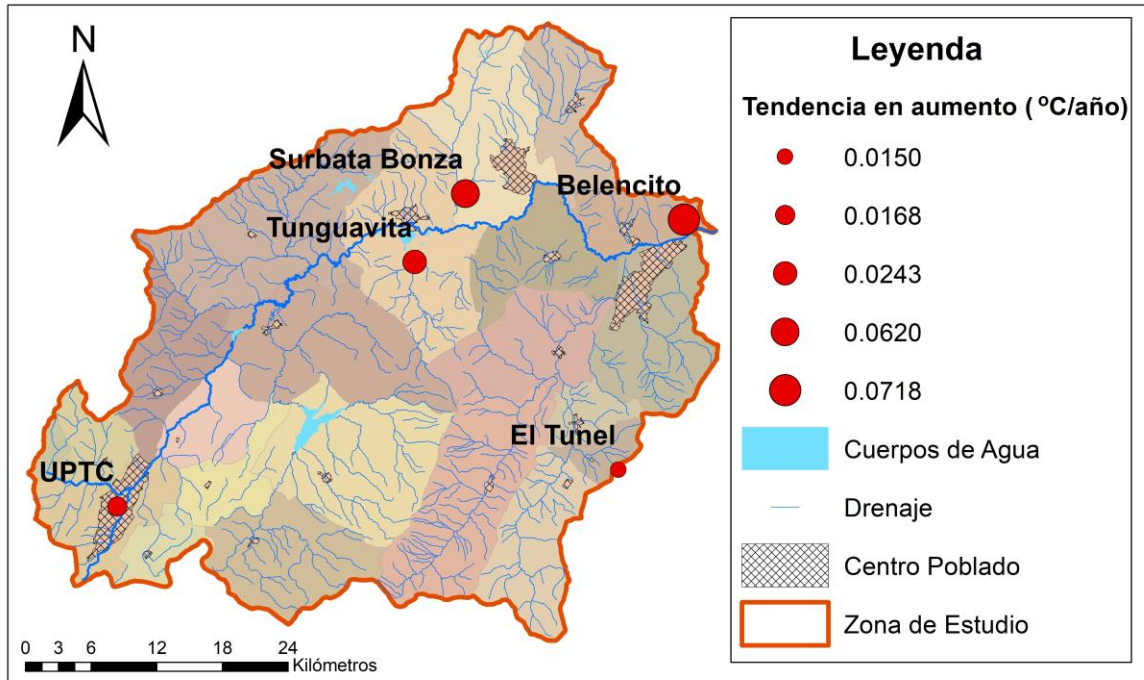


Figura 85. Mapa de tendencias de temperatura media anual.

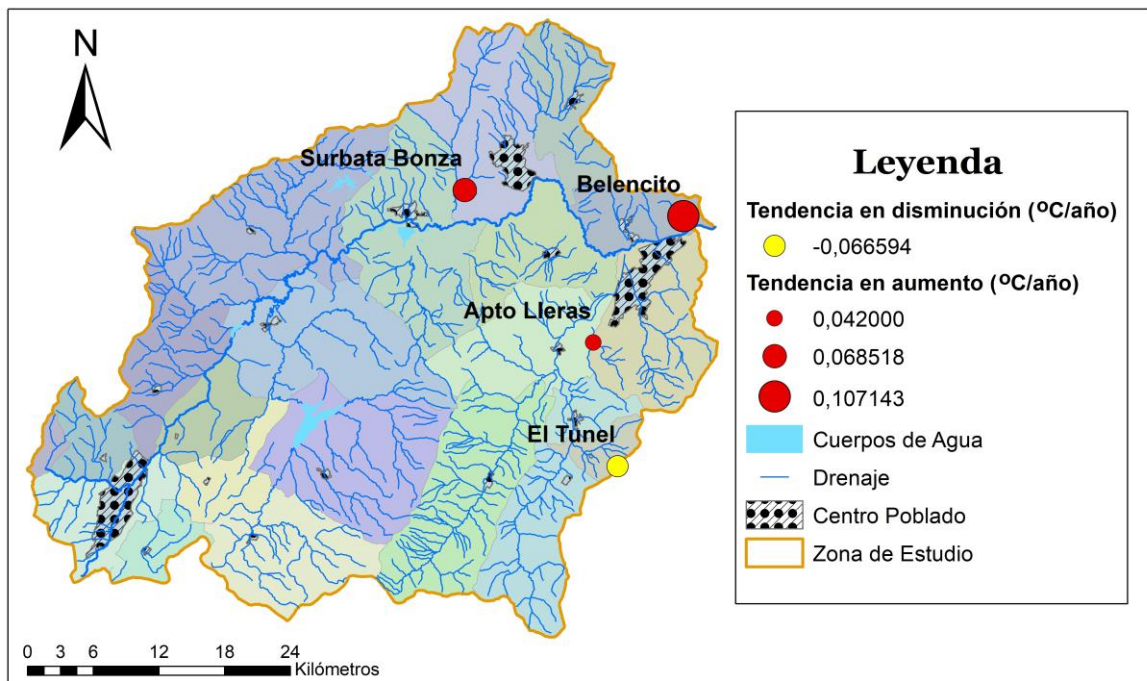


Figura 86. Mapa de tendencias de temperatura mínima anual.

Precisamente con el objetivo de identificar las zonas o municipios que presentan mayor tendencias estadísticamente significativas (de incremento o disminución), se realizó un análisis a nivel espacial con las variables estudiadas. De esta manera se presenta la información a manera de resumen en la Tabla 40, en la cual se identifican los municipios en donde se encontraron las tendencias en precipitación (Prec), caudal máximo (Cmax), caudal medio (Cmed), caudal mínimo (Cmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura media (Tmed) y temperatura (Tmin). En la tabla también se indica si la tendencia es de incremento (+) o disminución (-), por ejemplo, en los municipios de Toca y Tuta presentan doble tendencia (++) ya que en estos municipios se encontraron en la misma variable tendencias de incremento en dos estaciones.

Tabla 40. Municipios con presencia de tendencias.

Municipio	Prec.	Cmax.	Cmed.	Cmin.	Tmax.	Tmed.	Tmin.
Duitama	+				+	+	+
Nobsa	+					+	+
Tuta	+			++			
Cuítiva						+	-
Paipa					+	+	
Toca	++						
Sogamoso					+		+
Sotaquirá		-					
Tunja						+	

Por último, se realizó una comparación entre la cantidad de tendencias obtenidas en los municipios (ver Figura 87). Este análisis permitió identificar que el municipio de Duitama, ubicado al nororiente de la Cuenca Alta del Río Chicamocha, registra la mayor cantidad de tendencias en aumento estadísticamente significativas (con un total de cuatro), seguida por Nobsa y Tuta (con tres tendencias), Cuítiva, Paipa, Toca y Sogamoso (con dos), finalizando con Sotaquirá y Tunja (registran una sola tendencia).

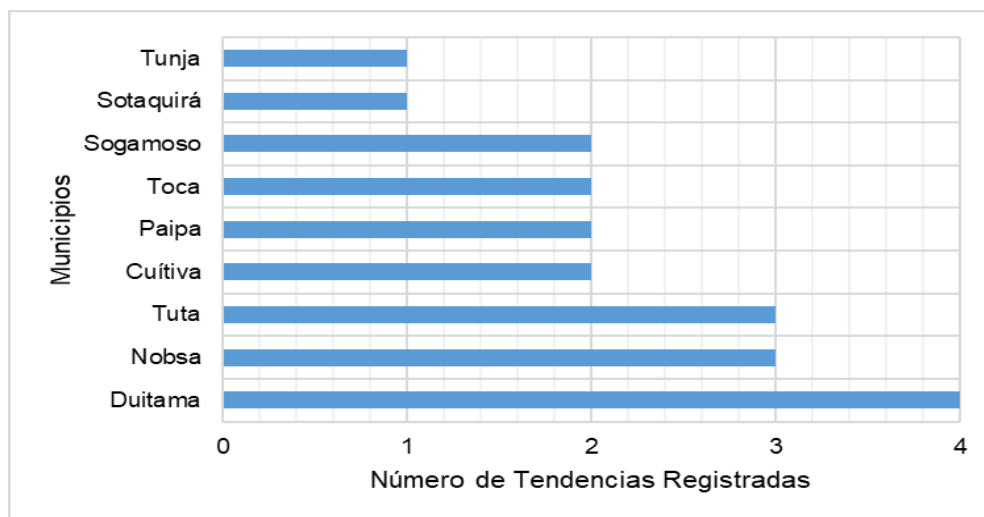


Figura 87. Numero de tendencias encontradas por municipio.

4.9 Base de Datos Georreferenciada de las Tendencias

Como se mencionó en la metodología, con el fin de estructurar en formato SIG la información espacial de las tendencias junto con la información alfanumérica recopilada y generada en las demás actividades del proyecto de investigación, se creó una *geodatabase* en el software ArcGIS 10.3. Dicha actividad permitió estructurar de forma ordenada la información obtenida para su análisis, procesamiento, consulta y presentación.

La base de datos georreferenciada se encuentra conformada por cartografía base (zona de estudio, drenaje, municipios y centros poblados) utilizada en la investigación y las respectivas tendencias de cada una de las variables analizadas y su información espacial (ver Figura 88).

En la Figura 89 se puede observar un ejemplo de la información básica y principal (metadato) de cada elemento que conforma la base de datos georreferenciada, como son: la descripción, sus respectivas coordenadas y los autores.

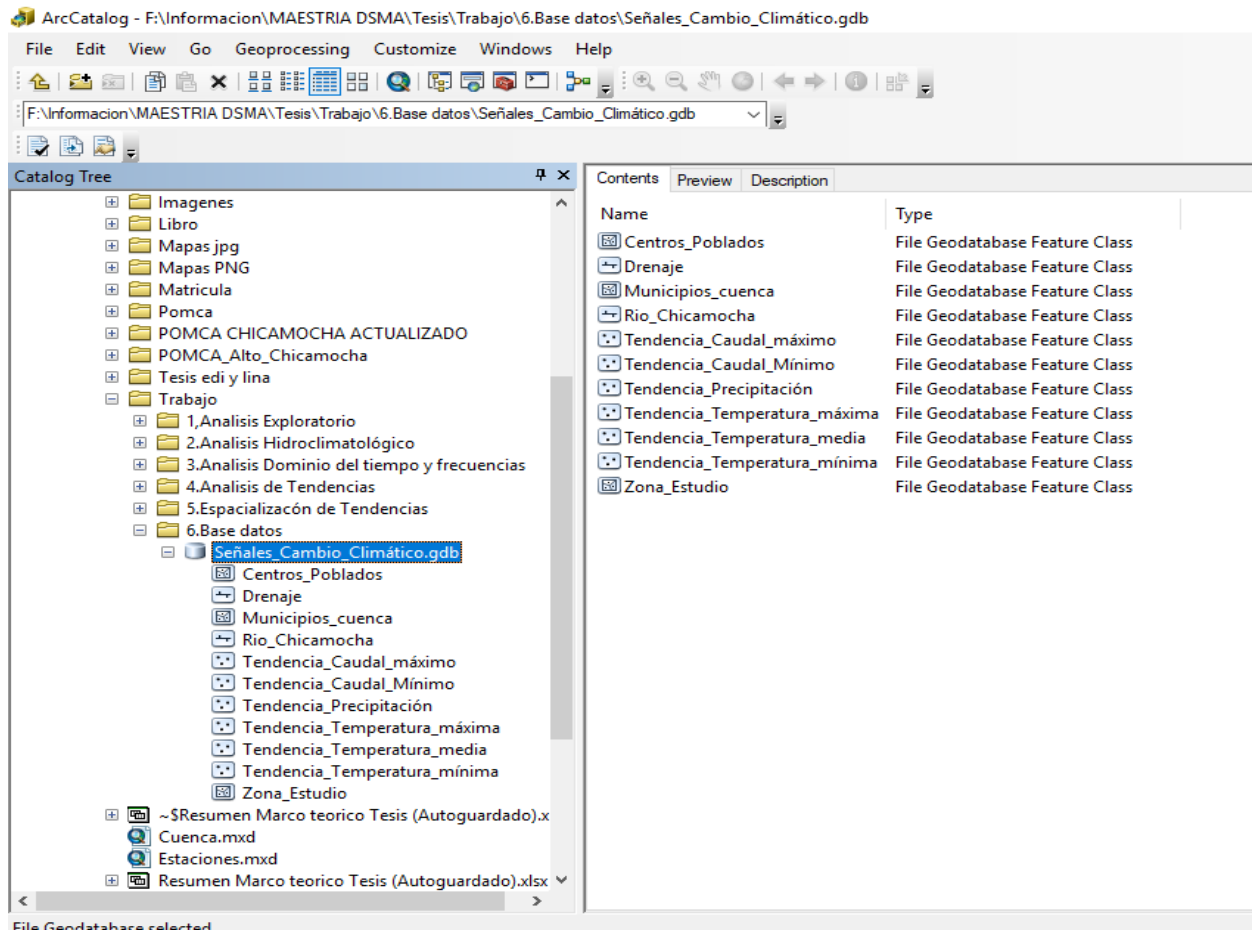


Figura 88. Estructura de la base de datos georreferenciada.

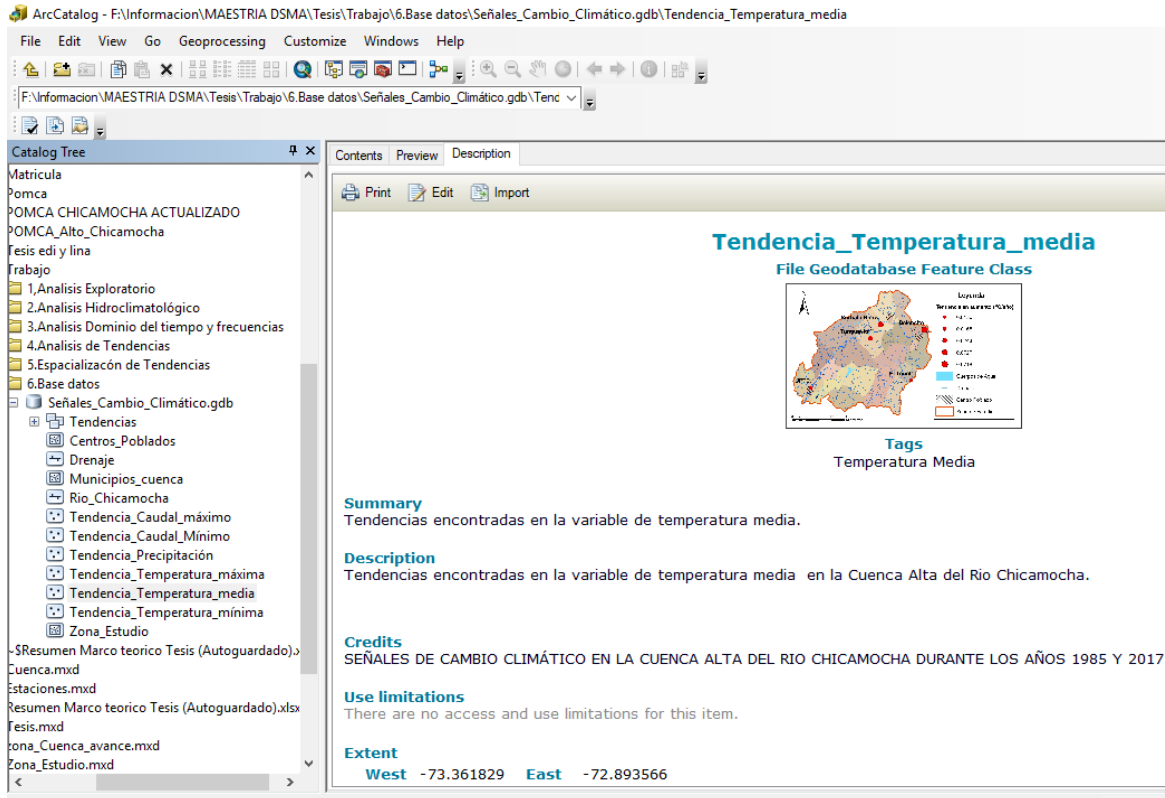


Figura 89. Interfaz de visualización de metadatos de la base de datos georreferenciada.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación se logró identificar señales existentes muy notorias de cambio climático en la Cuenca Alta del Río Chicamocha, mediante la detección de tendencias estadísticamente significativas en las variables de precipitación, caudal y temperatura. Al mismo tiempo se identificaron comportamientos asociados a variabilidad climática, logrando así el cumplimiento de los objetivos por medio de las diferentes actividades desarrolladas.

El comportamiento anual de la precipitación media, el caudal (medio, máximo y mínimo) y la temperatura (media, máxima y mínima) permitió identificar señales claras y reconocibles de fenómenos atribuidos a variabilidad climática a escala interanual en la zona de estudio. Los años con mayores y menores magnitudes de precipitación coinciden con los períodos de incidencia directa del fenómeno del ENSO - Oscilación del sur en sus dos fases: La Niña (épocas de lluvias) y El Niño (épocas de sequías). Esta coincidencia temporal fue analizada a partir de la variabilidad interanual observada en las series anuales de precipitación y caudal contrastadas con la ocurrencia del ENSO y las intensidades reportadas por la *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), basadas en el índice oceánico de El Niño (ONI).

Cabe resaltar que en la variable de temperatura media en el análisis hidroclimatológico se logró identificar un comportamiento asociado al cambio climático y que se corroboró en el análisis de tendencias, donde la temperatura media registró la mayor cantidad de tendencias estadísticamente significativas encontradas en la presente investigación.

En el análisis de tendencias de las variables hidrometeorológicas a nivel anual durante el periodo de tiempo comprendido entre 1985 y 2017, fue crucial para identificar la existencia de señales de cambio climático en la zona de estudio, específicamente tendencias en las variables de precipitación, caudal y temperatura. Se evidencia también la pertinencia de implementar pruebas no paramétricas como las de Mann-Kendall y Rho Spearman para determinar dichas tendencias.

La existencia de señales de cambio climático en la zona de estudio es evidente al identificar y estimar tendencias estadísticamente significativas. En el caso de la precipitación se encontraron cinco estaciones con tendencias de incremento con una magnitud entre 5,27 y 8,37 mm/año. Dichas estaciones fueron: El Garrocho, Nobsa, San Cristobal, San Antonio y Surbata Bonza. La estación que presenta mayor magnitud en la tendencia de precipitación anual fue la estación de Nobsa con aproximadamente 8,37 mm/año. Dicha estación se encuentra en el municipio de Nobsa a una elevación de 2500 m.s.n.m. En cuanto a municipios, aquellos que presentan tendencias en la precipitación fueron: Toca, Nobsa, Tuta y Duitama.

En las estaciones La Reforma, El Palo y San Rafael, ubicadas en los municipios de Sotaquirá y Tuta, el caudal evidencia tendencias estadísticamente significativas. El caudal máximo presentó una estación con tendencia de disminución (-0,16 m³/s.año) ubicada en el municipio de Sotaquirá. Para el caudal mínimo se identificaron dos estaciones con tendencias de incremento en el municipio de Tuta, las estaciones San Rafael (LM) y El Palo. Este comportamiento tiene relación con el identificado en la precipitación, debido a que se encontró un aumento en esta variable en el municipio de Tuta, con el consiguiente incremento del caudal mínimo.

La temperatura máxima permitió identificar tres estaciones con tendencias estadísticamente significativas, Surbata Bonza, Tunguavita y Aeropuerto A. Lleras C. Las mencionadas estaciones se encuentran ubicadas en los municipios de Duitama, Paipa y Sogamoso, con un aumento cercano a 1°C durante el periodo de estudio. La temperatura media presentó cinco estaciones con tendencias estadísticamente significativas de incremento en los municipios de Duitama, Tunja, Nobsa, Paipa y Cúitiva, con una magnitud aproximada de entre 0.5°C y 2°C , durante los últimos 32 años. La estación que presentó mayor magnitud en la temperatura media fue Belencito con $0,072^{\circ}\text{C}$ en el municipio de Nobsa.

La temperatura mínima evidenció cuatro estaciones con tendencias estadísticamente significativas, tres positivas y una negativa. Las estaciones con tendencias de incremento fueron: Surbata Bonza, Belencito y Aeropuerto A. Lleras C., localizadas en los municipios de Duitama, Nobsa y Sogamoso. Sobresale el comportamiento de la estación Nobsa, la cual presenta la mayor magnitud de tendencia en la temperatura mínima con un valor de $0,107^{\circ}\text{C}$ por año, equivalente a un incremento de 3°C en 32 años, tres veces mayor con respecto a la magnitud de las demás tendencias de temperatura analizadas. Debe resaltarse que los resultados obtenidos para la estación pueden tener una estrecha relación con el hecho de que el municipio de Nobsa durante muchos años fue considerado una de las zonas con mayor contaminación atmosférica en Colombia, debido a la extracción y transformación de roca caliza en la zona.

La estación con tendencia negativa en temperatura mínima corresponde a la estación El Túnel, ubicada en el municipio de Cúitiva y a la mayor elevación (3000 m.s.n.m) con respecto a las demás estaciones. La magnitud de tendencia estimada corresponde a $-0,066^{\circ}\text{C/año}$. El comportamiento temporal de esta variable, generalmente registrada en horas de la madrugada y asociada con fuertes "heladas" históricamente registradas en la zona, indica una tendencia de disminución durante el período de tiempo analizado.

El análisis de las tendencias a nivel mensual evidencia para la precipitación un aumento en el mes de enero en tres (3) estaciones y en marzo una (1). Fueron encontradas tendencias de incremento para el mes de julio y de disminución para septiembre (con mayores ocurrencias). El caudal máximo registró tendencias estadísticamente significativas durante los meses de enero, junio y julio, en su gran mayoría tendencias negativas. Estos resultados son consistentes con los detectados en el análisis de tendencias a nivel anual, en los cuales para el caudal máximo se encontró solamente una tendencia de disminución en el municipio de Sotaquirá. El caudal medio registró tendencias de incremento durante los meses de enero, febrero y abril. Por otra parte, el caudal mínimo permitió detectar la mayor cantidad de tendencias mensuales, muy marcadas durante los meses de enero, febrero, marzo y abril.

Para temperatura (máxima, media y mínima) se identificó tendencia de incremento durante todos los meses, con mayor magnitud en los meses de enero, abril y octubre, seguidos por los meses de mayo, junio, agosto y septiembre. En general la temperatura media presentó mayores tendencias mensuales comparadas con las demás variables. La temperatura mínima en la estación El Túnel y en la estación Belencito, presentó tendencias de disminución durante todos los meses, lo que pone de presente que las temperaturas mínimas han sido más bajas. Este comportamiento es consistente con los resultados del análisis de tendencias a nivel anual, en el cual la estación el Túnel fue la única que evidenció tendencias negativas en dicha variable.

Es evidente la relación entre la existencia de señales de cambio climático y las actividades antropogénicas desarrolladas durante muchos años en los municipios en los cuales se identificaron las tendencias estadísticamente significativas. Estas tendencias se detectaron en los tres municipios más importantes (Tunja, Duitama y Sogamoso) en términos de gran desarrollo económico, explotación de recursos y actividades industriales. Esto reafirma la hipótesis de que las causas antropogénicas tienen gran relación con el cambio climático regional y local.

Las señales de cambio climático detectadas y estimadas en la Cuenca Alta del Río Chicamocha, así como su ubicación espacial, se convierten en una fuente de información y una herramienta para comprender las dinámicas climáticas históricas de la región a escala de cuenca. Estos resultados son una contribución al conocimiento y servirán de gran ayuda y como punto de partida para analizar el comportamiento futuro de variables asociadas a cambio climático en la zona de estudio.

La mitigación y adaptabilidad a los fenómenos propios de la variabilidad climática y el cambio climático, serán fortalecidas considerando que el Departamento de Boyacá no contaba con estudios que incluyeran variables hidroclimatológicas de manera simultánea. La toma de decisiones en pro del desarrollo sostenible por parte de las instituciones encargadas de la administración de los recursos naturales, podrá apoyarse en los resultados obtenidos con este proyecto de investigación y así contribuir a la disminución de afectaciones a las poblaciones más vulnerables en el ámbito social, cultural y ambiental.

Para futuras investigaciones será importante estudiar a profundidad la relación hidrológica entre las variables de precipitación y caudal, considerando las tendencias identificadas. Adicionalmente, puede ser objeto de profundización la posible influencia en las actividades agrícolas, industriales, de abastecimiento de agua para consumo humano y del medio ambiente, como aspectos clave en la seguridad hídrica de la región.

Se evidenció también la falta de instrumentación para la medición de las diferentes variables hidroclimatológicas en la zona de estudio, en especial para temperatura y caudal. Por tal motivo es de suma importancia fortalecer o ampliar la red de monitoreo hidrometeorológico en la Cuenca Alta del Río Chicamocha con el objeto de tener una mejor cobertura espacial de estaciones en la zona de estudio.

Bibliografía

- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J., & Ramón, J. (2015). Cambio Climático Y Variabilidad Climática Para El Periodo 1981-2010 En Las Cuencas De Los Ríos Zulia Y Pamplonita, Norte De Santander - Colombia. *Climate Change and Climate Variability for the Period 1981-2010 in the Basins of the Zulia and Pamplonit. Luna Azul*, 40, 127–153. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.10>
- Arnone, E., Pumo, D., Viola, F., Noto, L. V., & La Loggia, G. (2013). Rainfall statistics changes in Sicily. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2449–2458. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2449-2013>
- Atmosféricos, O. Y., Gran, D. E. M. Y., Edgar, J., & Bocanegra, M. (2009). *PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS*.
- Attention, M. (2017). *¿ Esto es por el cambio climático ? Los fenómenos meteorológicos extremos en la prensa española (2000-2010) : Ocurrencia y atención*. 79–103.
- Aydin, F. (2010). Secondary school students' perceptions towards global warming: A phenomenographic analysis. *Scientific Research and Essays*, 5(12), 1566–1570. <casual%5CAydin2010.pdf>
- Berg, N., & Hall, A. (2015). Increased interannual precipitation extremes over California under climate change. *Journal of Climate*, 28(16), 6324–6334. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00624.1>
- Blahut, R. E. (2002). Radio Frequency Spectrum Management and Time and Frequency Standards. In W. M. M. y M. E. Van Valkenburg (Ed.), *Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computer, and Communications* (Ninth Edit). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7291-7.50003-0>
- Bocheva, L., Marinova, T., Simeonov, P., & Gospodinov, I. (2009). Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961 – 2005). *Atmospheric Research*, 93(1–3), 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.025>
- Cepeda, E. R. . (2010). *Recopilación Histórica Y Análisis Climatológico De Eventos De Granizada Ocurridos Sobre Bogotá Y Su Relación Con El Cambio Climático Global*. Universidad Nacional de Colombia.
- Charles, G. F. A. S. P. C., & Liu, J. Y. A. C. L. (2009). *Decadal Climatic Variability , Trends , and Future Scenarios for the North China Plain*. 2111–2123. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2605.1>
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). *TREND – User Guide*.
- Corporación Autónoma de Boyacá. (2018). “ *Sostenibilidad y Vida para Tener en Cuenca* ” *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ALTO CHICAMOCHA – NSS (2403-01) FASE DIAGNOSTICO*.

- Cortes Zambrano, M. (2008). Análisis de variables de caudal y precipitación de sectores en los departamentos de Boyacá y Casanare y su alteración por fenómenos macroclimáticos y de cambio global. *L'esprit Ingénieux*, 114–132.
- Costa Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería. Universidad de Los Andes.*, 26(2), 75. <https://doi.org/10.1029/TR032i002p00231>
- Ding, Z., Wang, Y., & Lu, R. (2018). An analysis of changes in temperature extremes in the Three River Headwaters region of the Tibetan Plateau during 1961 – 2016. *Atmospheric Research*, 209(19), 103–114. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.003>
- Freije, A. M., Hussain, T., & Salman, E. A. (2017). Global warming awareness among the University of Bahrain science students. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 22, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2016.02.002>
- Funatsu, B. M., Dubreuil, V., Racapé, A., Debortoli, N. S., Nasuti, S., & Le Tourneau, F. M. (2019). Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Global Environmental Change*, 57(May), 101923. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.007>
- Gao, L., Huang, J., Chen, X., Chen, Y., & Liu, M. (2018). Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation. *Atmospheric Research*, 205(February), 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.006>
- García, M., & Botero, a P. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería.*, ene-jun201(36), 60–64. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-49932012000100012&script=sci_abstract
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen ' s slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2016). *Conocer:el primer paso para adaptarse .Guía básica de conceptos sobre el cambio climático.*
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In *Nature* (Vol. 446, Issue 7137). <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Krishnakumar, K. N., Prasada Rao, G. S. L. H. V, & Gopakumar, C. S. (2009). Rainfall trends in twentieth century over Kerala, India. *Atmospheric Environment*, 43(11), 1940–1944. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.053>
- Livada, I., Synnefa, A., Haddad, S., Paolini, R., Garshasbi, S., Ulpiani, G., Fiorito, F., Vassilakopoulou, K., Osmond, P., & Santamouris, M. (2019). Science of the Total Environment Time series analysis of ambient air-temperature during the period 1970

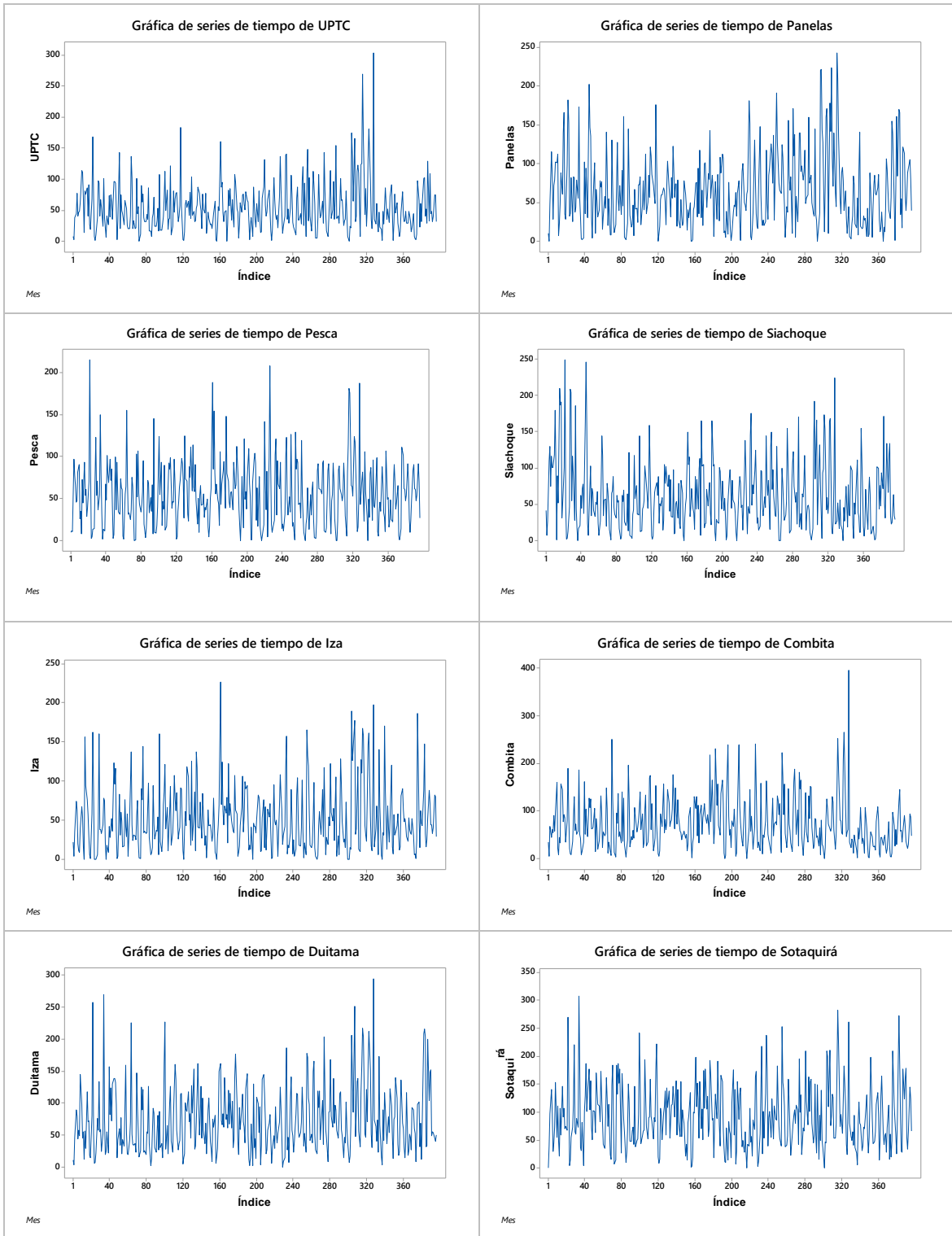
- 2016 over Sydney , Australia. *Science of the Total Environment*, 648, 1627–1638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.144>
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634–3650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>
- Mayorga, R., Hurtado, G., & Benavides, H. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. *Nota Técnica Del IDEAM*, 47. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Climático+en+Colombia+con+base+en+información+estadística.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- Návar, J. (2015). Hydro-climatic variability and perturbations in Mexico's north-western temperate forests. *Ecohydrology*, 8(6), 1065–1072. <https://doi.org/10.1002/eco.1564>
- Ochoa, a, & Poveda, G. (2008). Distribución Espacial de Señales de Cambio Climático en Colombia. *Advances in Water Resources*.
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2009. In *Tiempo - Clima - Agua* (Vol. 1119, p. 40). http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1119_es.pdf
- Oria, M. D., Ferraresi, M., & Tanda, M. G. (2017). Historical trends and high-resolution future climate projections in northern Tuscany (Italy). *Journal of Hydrology*, 555, 708–723. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.054>
- Pabón, J. D. (2009). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 12, 111–119. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/10277>
- Pal, I., & Al-Tabbaa, A. (2009). Trends in seasonal precipitation extremes - An indicator of “climate change” in Kerala, India. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.025>
- Parzen, E. (1962). On estimation of a probability density function and mode. *Ann. Math. Statistic*, 33(3), 1065–1076.
- Pérez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L., & Ochoa, A. (1998). Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. In *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* (Vol. 27, Issue 3, pp. 537–546). [http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/27\(3\)/537.pdf](http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/27(3)/537.pdf)
- Petrow, T., & Merz, B. (2009). Trends in flood magnitude , frequency and seasonality in Germany in the period 1951 – 2002. *Journal of Hydrology*, 371(1–4), 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.024>
- Poleo, D. (2016). ¿ Cambio climático o variabilidad climática ? *Historia , ciencia y política en el clima mesoamericano*. 50(1), 25–39.
- Retana, J. A. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Ambientales*, 44(2), 5–

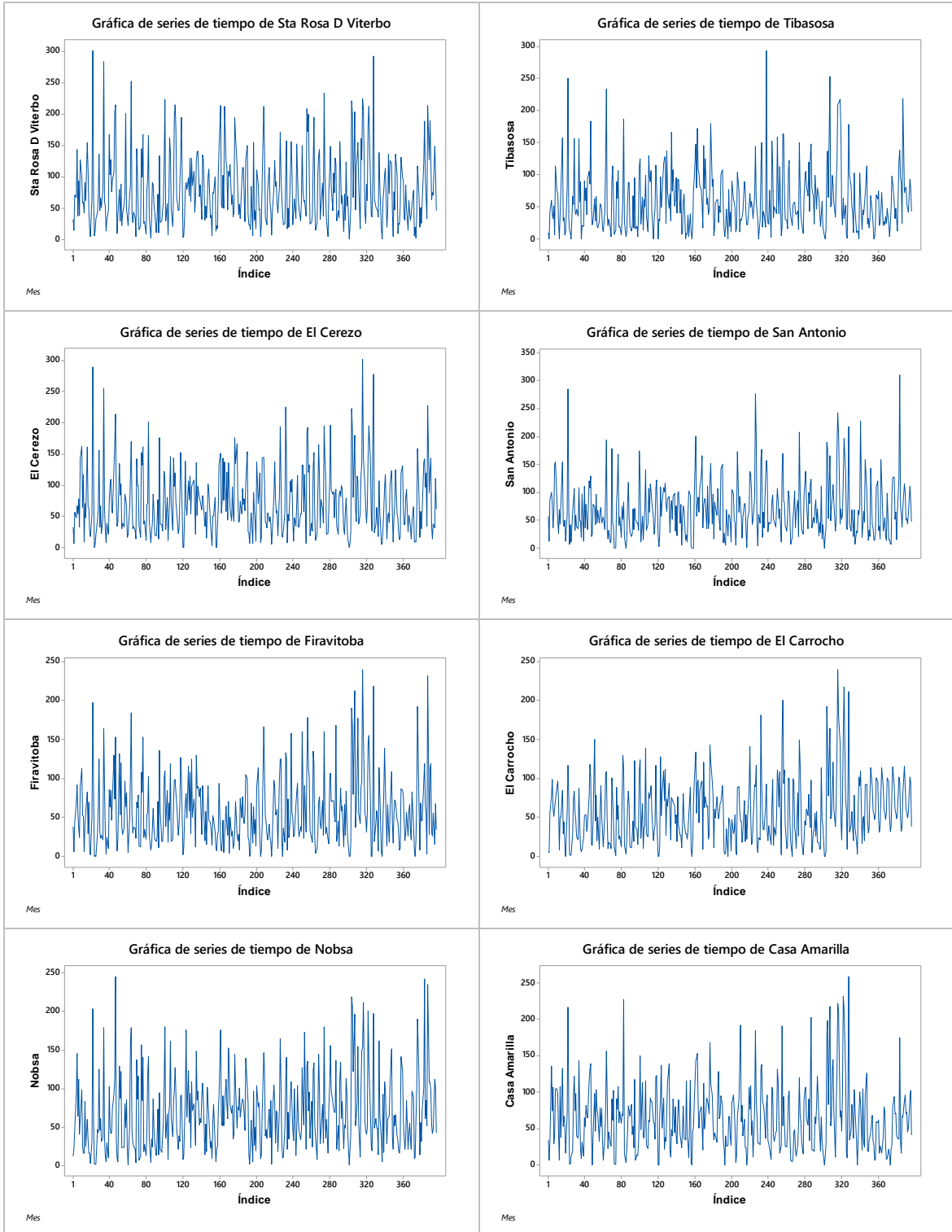
16.

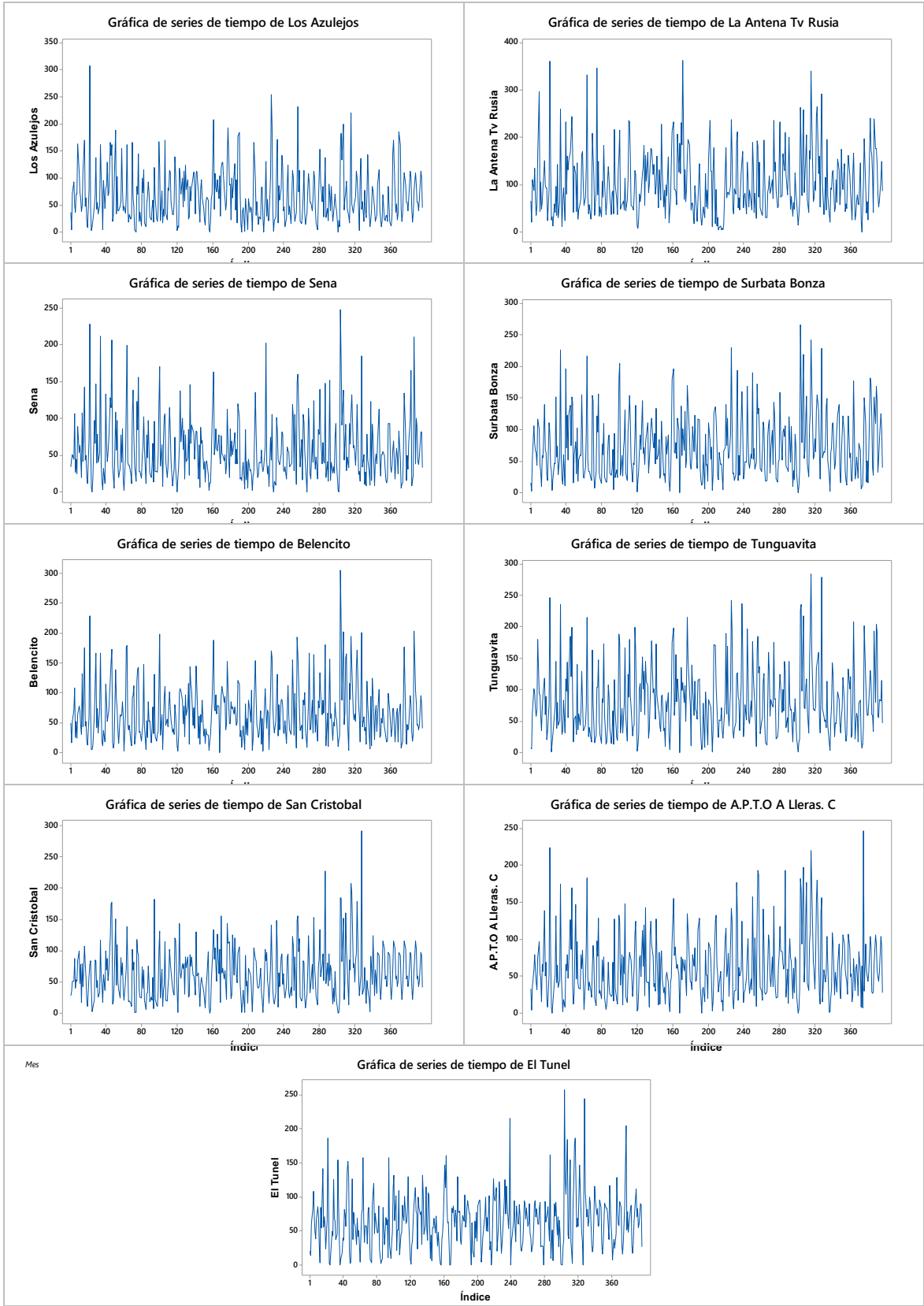
- Rincón, L. M. S. (2001). *Análisis Tendencial De La Variación Climática “Temperatura Y Precipitación” Espacio-Temporal Del Departamento De Boyacá (Colombia)*. 1–29.
- Rojas, E., Arce, B., Peña, A., Boshell, F., & Ayarza, M. (2010). Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 173–182.
- Ruiz, D., Moreno, H. A., Gutiérrez, M. E., & Zapata, P. A. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1–3), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>
- Salmi, Maatta, Anttila, Airola, & Amnell. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen’s slope estimates –the Excel template application MAKESENS. *Finnish Meteorological Institute*, 2002.
- Tabari, H., Shifteh, B., & Rezaeian, M. (2011). Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmospheric Research*, 100(1), 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.01.005>
- Tian, Q., & Yang, S. (2017). Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow , Yangtze and Pearl River basins since the 1950s. *Quaternary International*, 440, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.02.066>
- Tiscornia, G., Cal, A., & Giménez, A. (2016). Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(1), 66–71.
- Wang, H., Pan, Y., Chen, Y., & Ye, Z. (2017). Linear trend and abrupt changes of climate indices in the arid region of northwestern China. *Atmospheric Research*, 196(April), 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.008>
- Xu, Z., Liu, Z., Fu, G., & Chen, Y. (2010). Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years. *Journal of Arid Environments*, 74(2), 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.014>
- Yumul, G. P., Cruz, N. A., Servando, N. T., & Dimalanta, C. B. (2011). Extreme weather events and related disasters in the Philippines, 2004-08: A sign of what climate change will mean? *Disasters*, 35(2), 362–382. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2010.01216.x>
- Zheng, X., Streimikiene, D., Balezentis, T., Mardani, A., Cavallaro, F., & Liao, H. (2019). A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1113–1133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.140>

ANEXOS

Anexo A. Series de precipitación total mensual completas.







Anexo B. Series de temperaturas medias mensuales (máxima, mínima, media) completas.

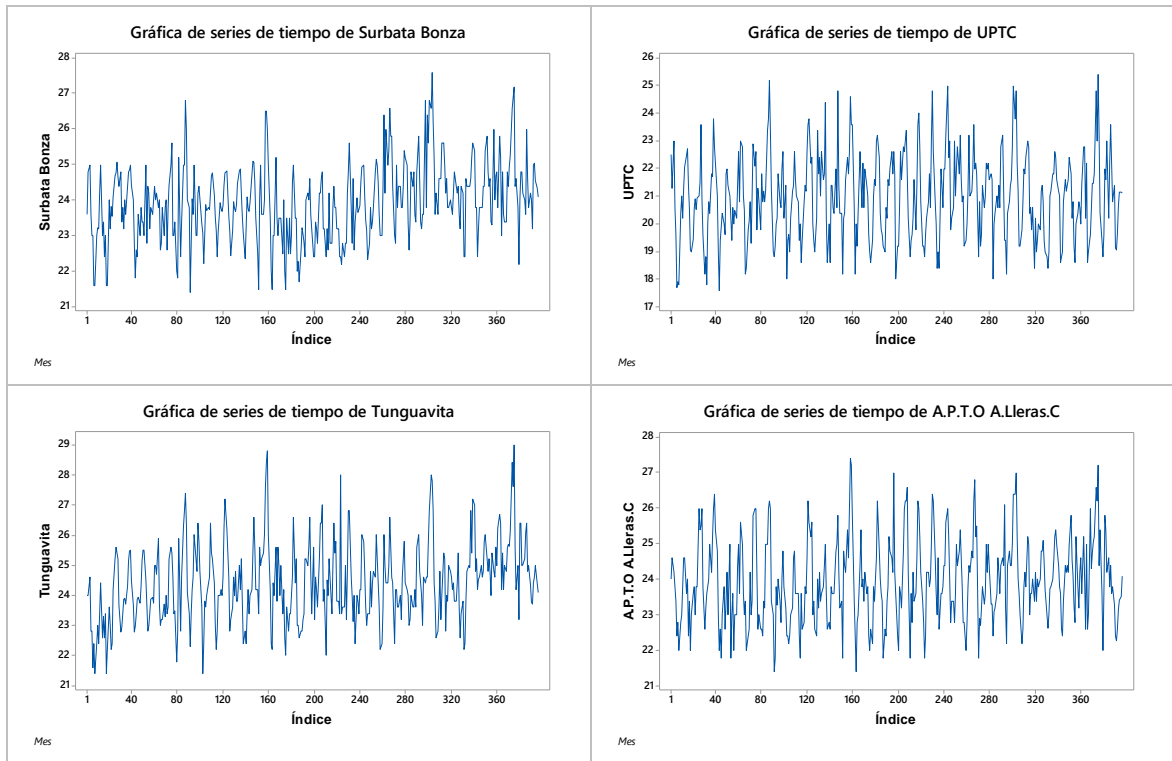


Figura Anexo 1. Series de temperaturas máximas mensuales.

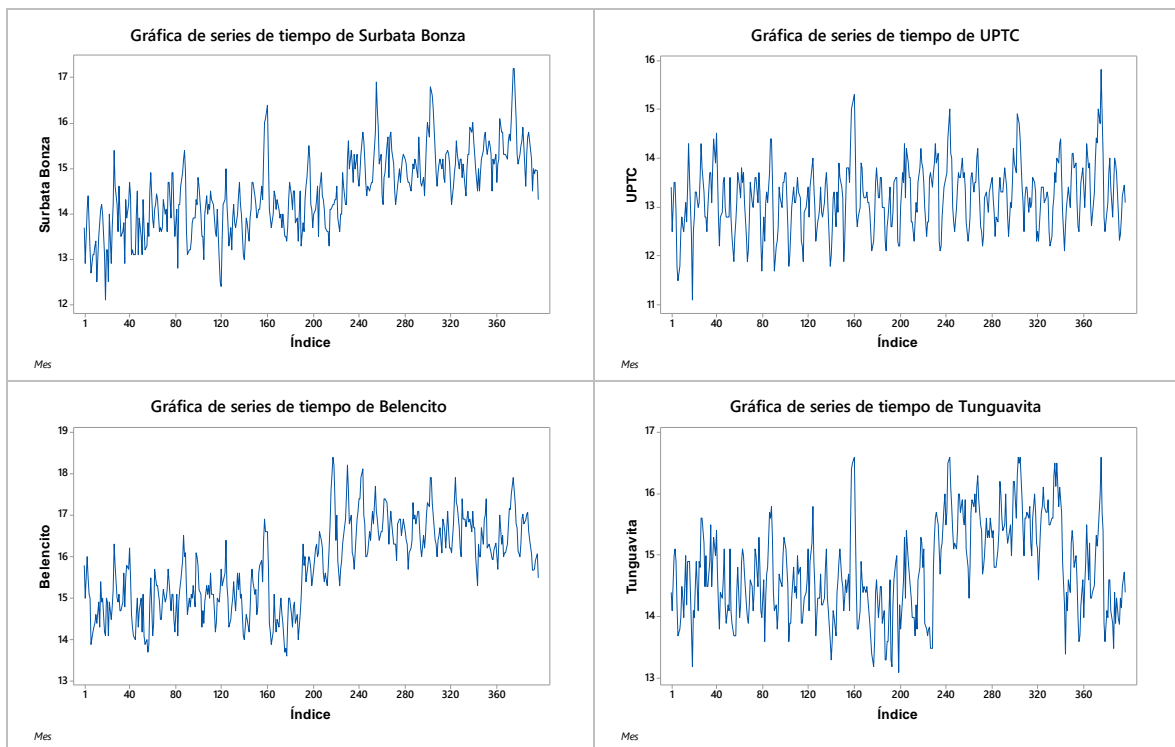


Figura Anexo 2. Series de temperaturas medias mensuales.

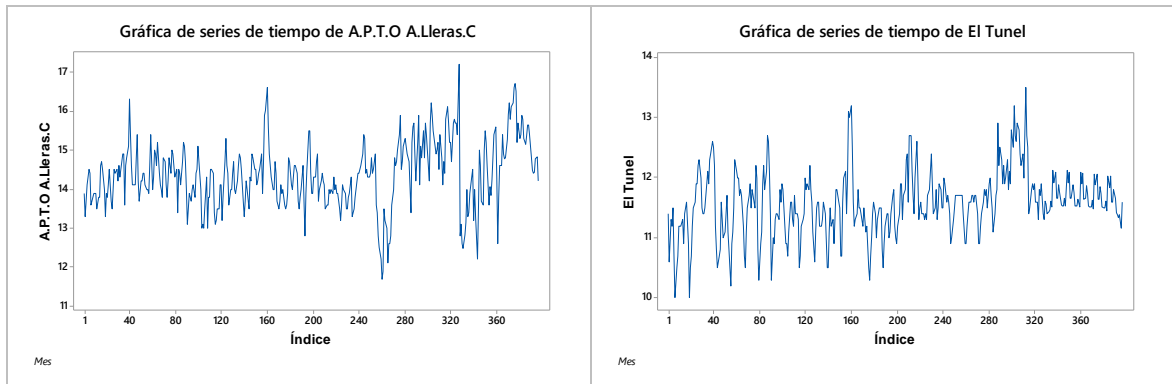


Figura Anexo 3. Series de temperaturas medias mensuales (continuación).

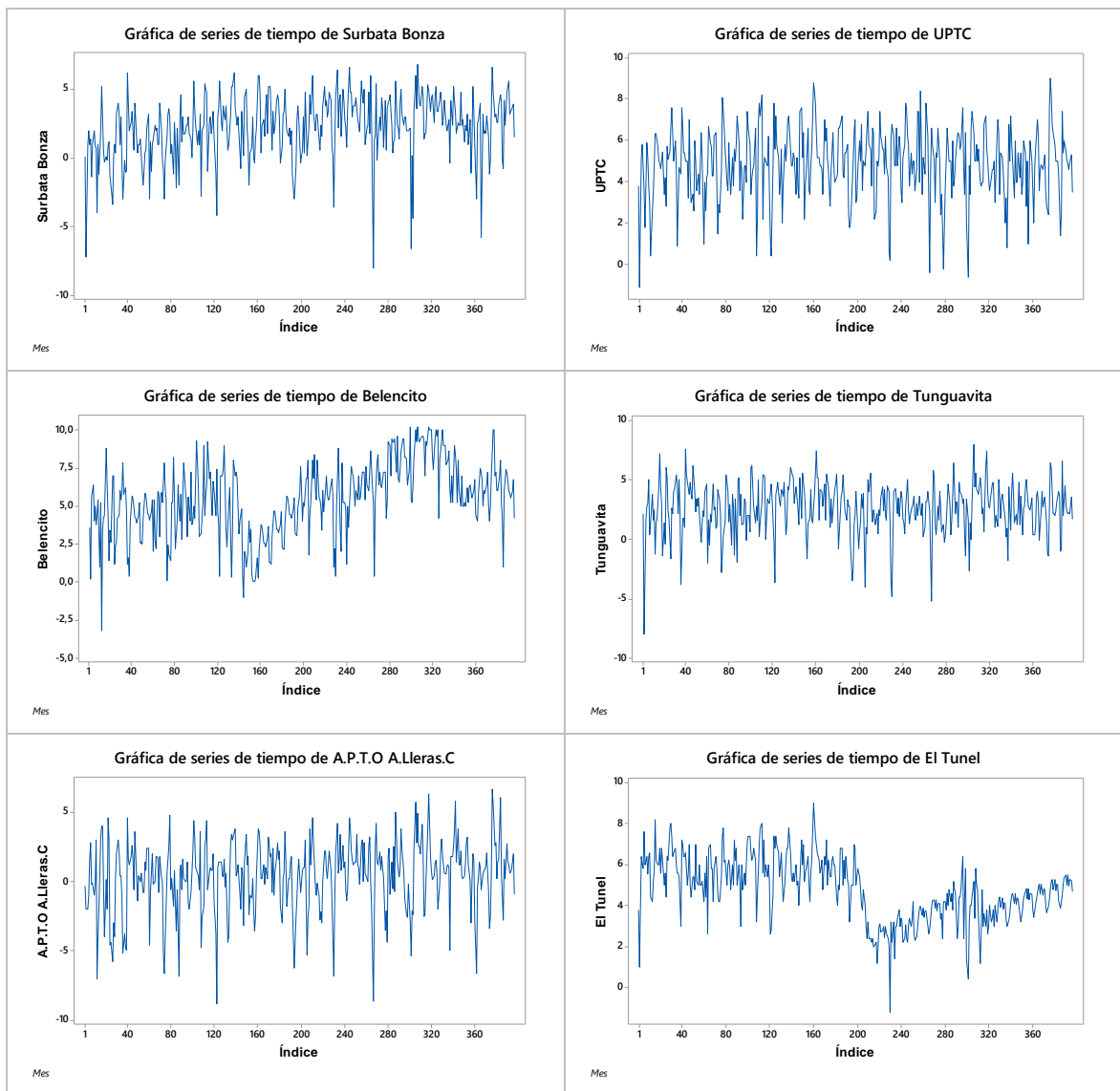


Figura Anexo 4. Series de temperaturas mínimas mensuales.

Anexo C. Series de caudal medios mensuales (máximo, mínimo, medio) completas.

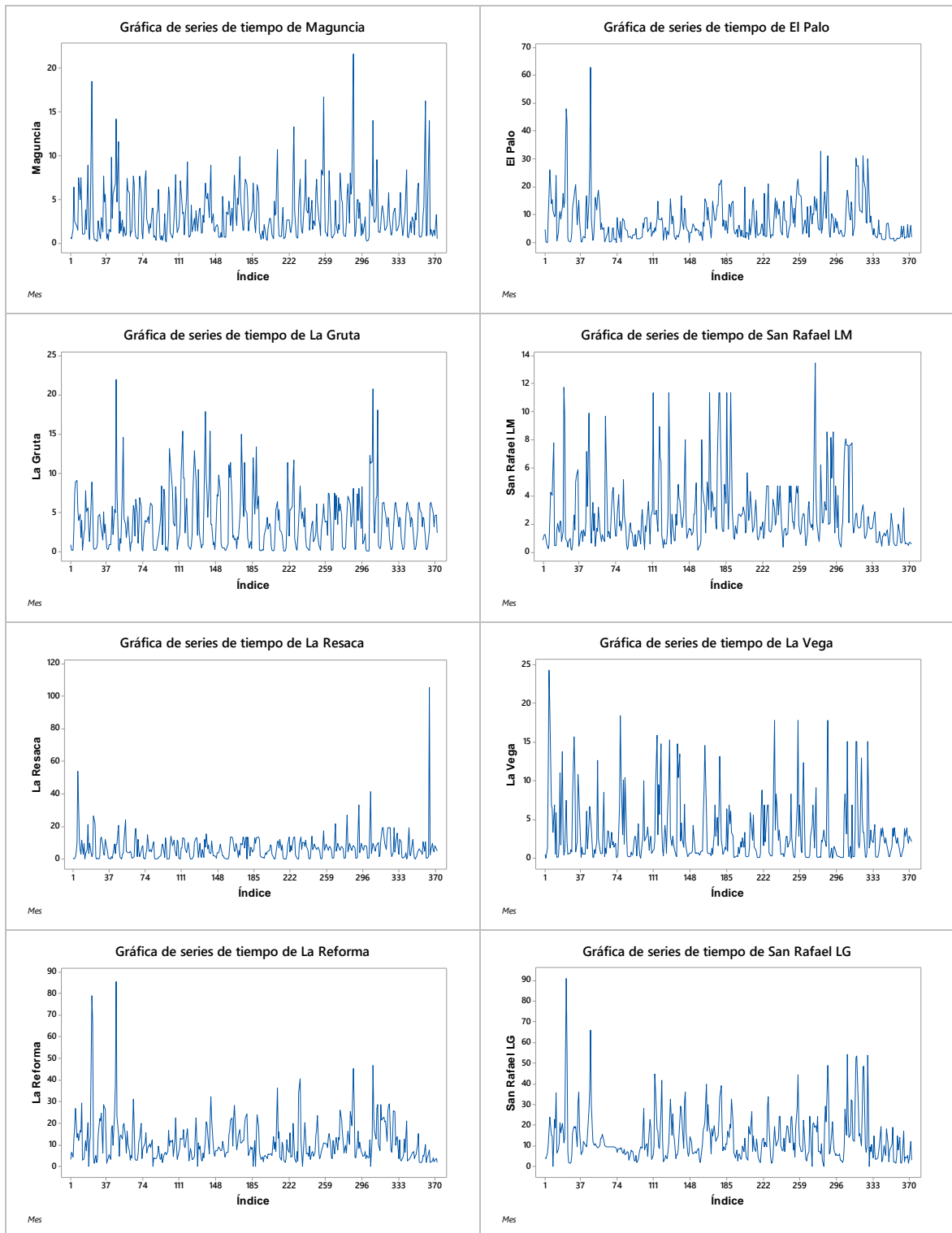


Figura Anexo 5. Series completas de caudal máximos mensuales.

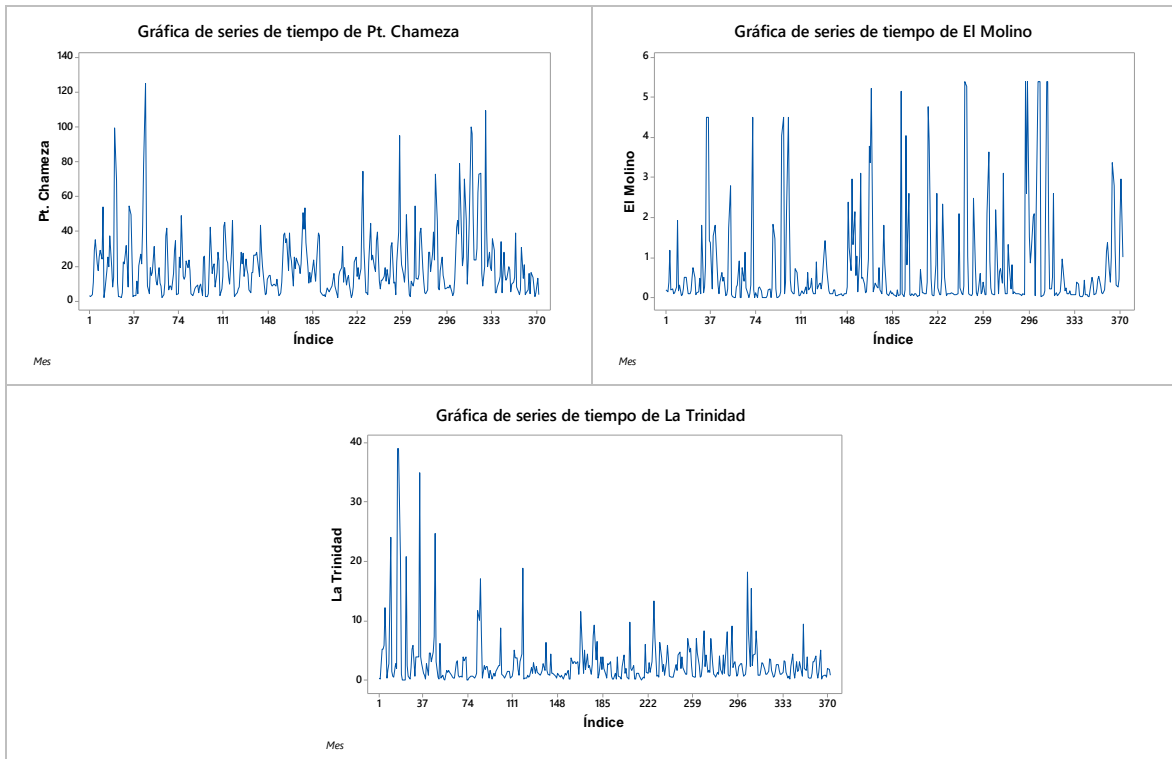


Figura Anexo 6. Series completas de caudal máximos mensuales (continuación).

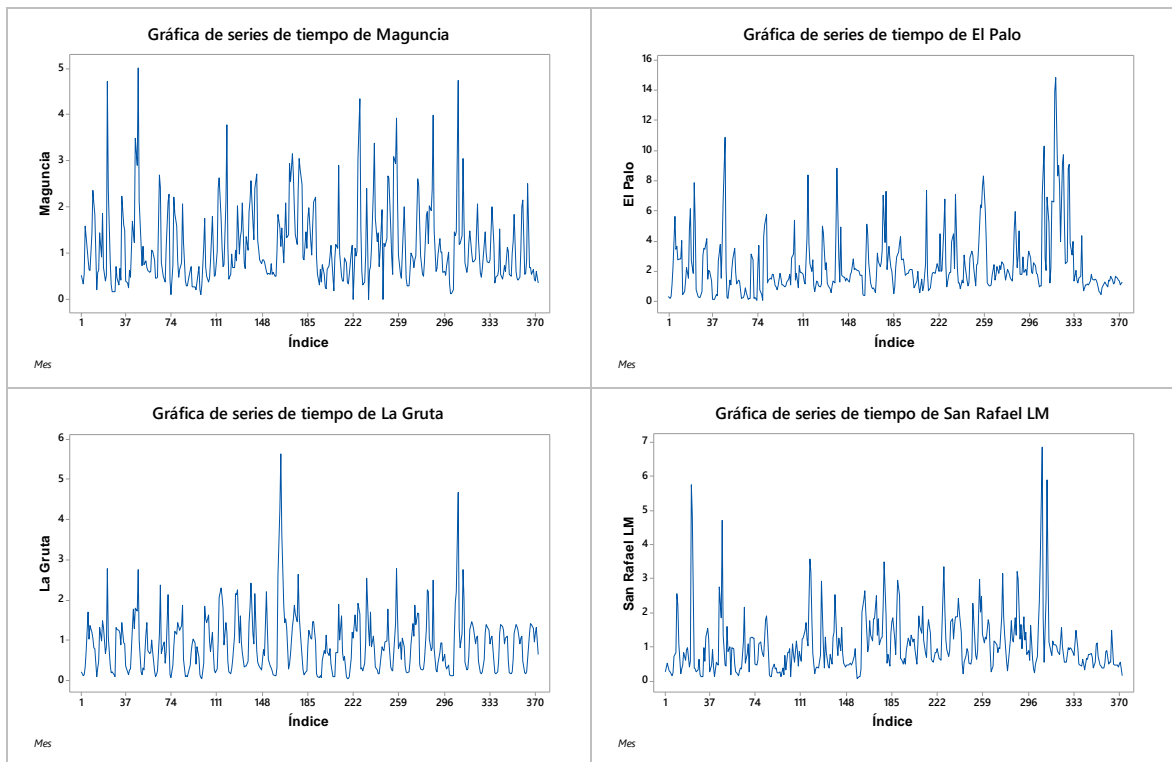


Figura Anexo 7. Series completas de caudal medio mensuales.

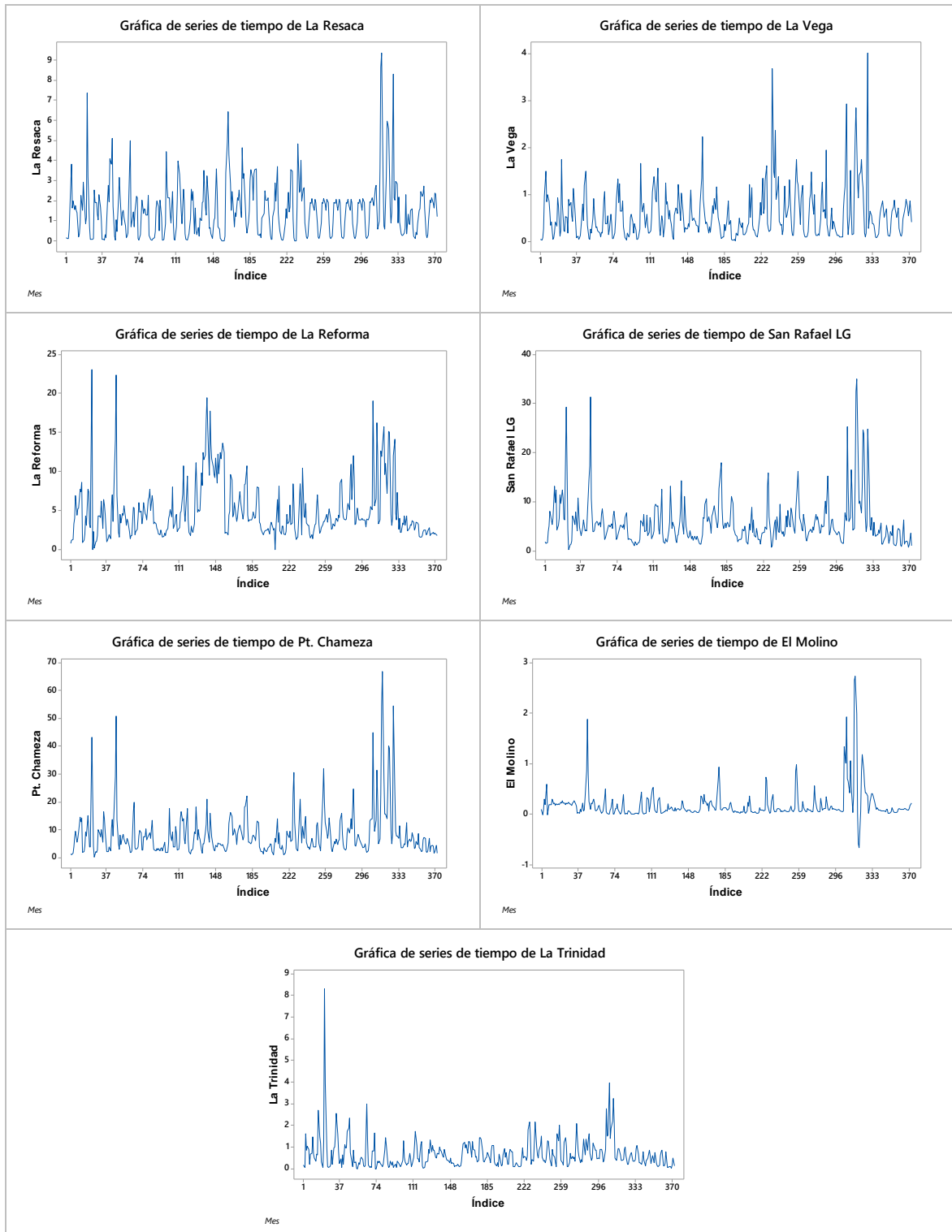


Figura Anexo 8. Series completas de caudal medio mensuales (continuación).

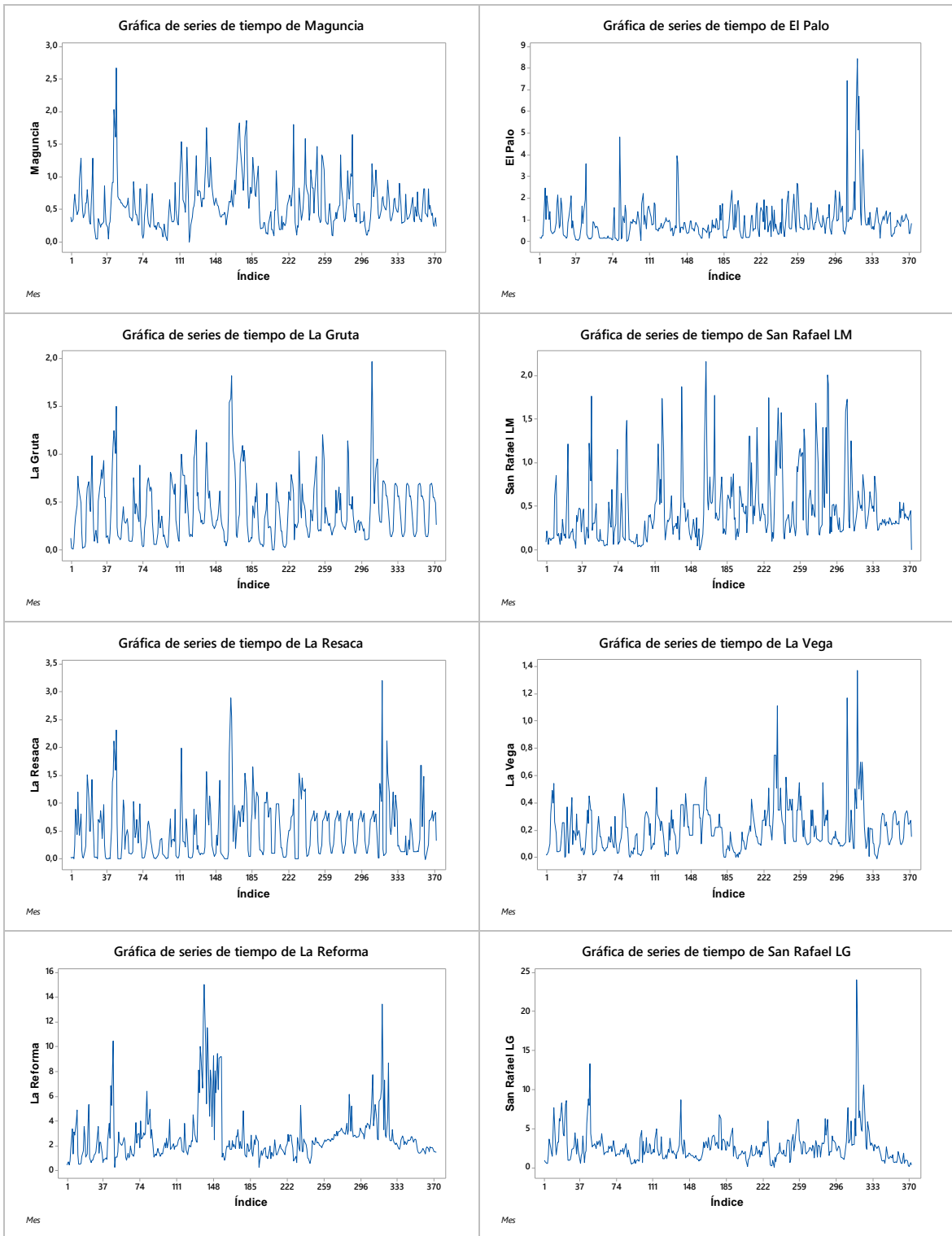


Figura Anexo 9. Series completas de caudal mínimo mensuales.

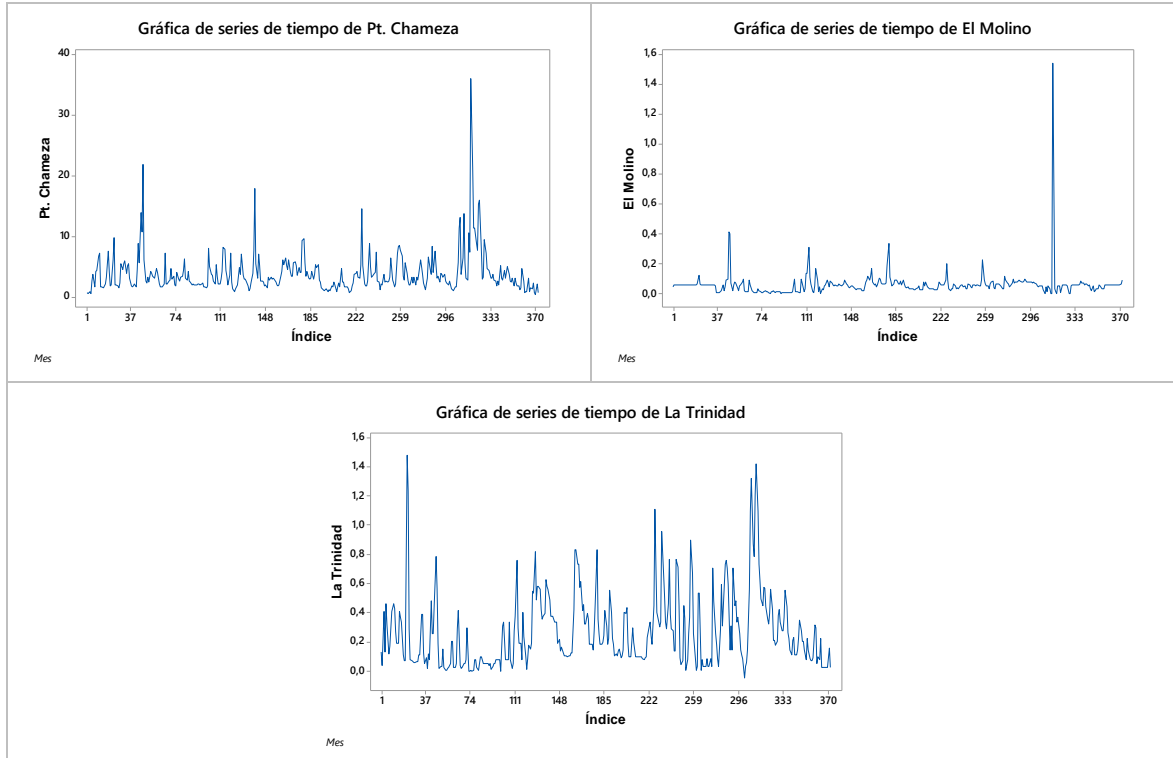


Figura Anexo 10. Series completas de caudal mínimo mensuales (continuación).

Anexo D. Estadísticos básicos de las series de precipitación, caudal medio, máximo y mínimo y temperatura media, máxima y mínima.

Tabla Anexo 1. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de caudal medio mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Maguncia	1,1673	0,047	0,8716	0,7596	74,66	0,0004	0,904	5,011	1,51	2,69
El Palo	2,467	0,113	2,161	4,67	87,6	0,102	1,847	14,83	2,23	6,44
La Gruta	0,9368	0,0442	0,7794	0,6075	83,21	0,039	0,801	5,642	1,82	6,12
San Rafael LM	1,0979	0,0496	0,9123	0,8324	83,1	0,073	0,866	6,851	2,44	9,25
La Resaca	1,631	0,089	1,5079	2,2739	92,45	0,004	1,381	9,348	1,83	5,18
La Vega	0,5861	0,0303	0,5488	0,3011	93,62	0,012	0,419	4,011	2,29	8,56
La Reforma	5,02	0,197	3,712	13,781	73,95	0,003	3,852	23,07	1,85	4,06
San Rafael LG	5,968	0,28	5,045	25,455	84,54	0,206	4,582	35,11	2,67	9,67
Pt. Chameza	8,621	0,439	8,388	70,357	97,3	0,206	6,296	66,83	3,21	14,04
El Molino	0,1876	0,0184	0,3271	0,107	174,33	0	0,088	2,733	4,86	28,73
La Trinidad	0,7073	0,0404	0,7424	0,5512	104,96	0,008	0,519	8,316	4,27	34,3

Tabla Anexo 2. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de caudal mínimo mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Maguncia	0,5904	0,0208	0,3861	0,1491	65,4	0	0,5	2,68	1,52	3,43
El Palo	0,9732	0,0498	0,9578	0,9173	98,41	0	0,78	8,459	3,77	20,92
La Gruta	0,4169	0,0189	0,3345	0,1119	80,24	0	0,3135	1,964	1,39	2,46
San Rafael LM	0,4678	0,0227	0,4176	0,1744	89,25	0	0,346	2,157	1,71	2,63
La Resaca	0,513	0,0325	0,5509	0,3034	107,38	0	0,315	3,2	1,59	3,24
La Vega	0,20972	0,00984	0,17871	0,03194	85,21	0	0,1615	1,37	2,19	8,89
La Reforma	2,77	0,113	2,135	4,559	77,08	0,256	2,3	15,06	2,61	8,18
San Rafael LG	2,78	0,127	2,295	5,267	82,55	0,08	2,21	23,98	3,71	24,98
Pt. Chameza	3,936	0,176	3,376	11,397	85,78	0,405	3,053	35,99	4,04	26,84
El Molino	0,06004	0,00564	0,09837	0,00968	163,85	0	0,05	1,537	11,68	169,47
La Trinidad	0,2696	0,0142	0,2615	0,0684	96,98	0	0,189	1,48	1,74	3,71

Tabla Anexo 3. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de temperatura máxima mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var.	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Surbata Bonza	23,952	0,0653	1,147	1,315	4,79	21,4	23,8	27,6	0,38	0,23
UPTC	21,005	0,081	1,557	2,426	7,41	17,6	21	25,4	0,21	-0,24
Belencito	24,958	0,0963	1,556	2,42	6,23	21,6	25	32	0,66	1,3
Tunguavita	24,425	0,0724	1,347	1,814	5,51	21,4	24,4	29	0,49	0,46
A.P.T.O A.Lleras.C	23,961	0,0631	1,208	1,459	5,04	21,4	23,8	27,4	0,39	-0,24
El Tunel	18,176	0,0898	1,385	1,918	7,62	14,8	18	22,2	0,32	0,11

Tabla Anexo 4. Resumen de estadísticos básicos de las series temporales de temperatura mínima mensual.

Estación	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Coef.Var.	Mínimo	Mediana	Máximo	Asimetría	Curtosis
Surbata Bonza	5,0228	0,0966	1,6429	2,6993	32,71	-1,2	5,2	9	-0,48	0,04
UPTC	4,8768	0,0894	1,7219	2,9649	35,31	-1,1	5	9	-0,54	0,57
Belencito	5,661	0,15	2,563	6,568	45,27	-3,2	5,8	10,2	-0,43	-0,08
Tunguavita	2,595	0,112	2,176	4,734	83,83	-8	2,8	8	-0,86	2,06
A.P.T.O A.Lleras.C	0,332	0,134	2,567	6,587	773,55	-8,8	0,6	6,6	-0,65	0,79
El Tunel	5,0228	0,0966	1,6429	2,6993	32,71	-1,2	5,2	9	-0,48	0,04

Anexo E. Resultados de prueba de correlación serial para series temporales de precipitación total, temperatura y caudal mensual.

Tabla Anexo 5. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de caudal mensual medio.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Maguncia	372	1,15487	232	140	99	175,62	0
El Palo	372	2,46322	251	121	87	164,28	0
La Gruta	372	0,92243	204	168	99	185,26	0
San Rafael LM	372	1,07703	231	141	89	176,11	0
La Resaca	372	1,56632	201	171	109	185,79	0
La Vega	372	0,57655	228	144	95	177,52	0
La Reforma	372	5,03398	251	121	83	164,28	0
San Rafael LG	372	5,79852	243	129	97	169,53	0
Pt. Chámeza	372	8,55165	247	125	101	166,99	0
El Molino	372	0,19103	259	113	72	158,35	0
La Trinidad	372	0,69399	227	145	103	177,96	0

K= media de la muestra

Tabla Anexo 6. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de caudal mensual mínimo.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Maguncia	372	0,5842	223	149	87	179,64	0
El Palo	372	0,97435	237	135	111	173,02	0
La Gruta	372	0,42038	213	159	79	183,08	0
San Rafael LM	372	0,46682	242	130	89	170,14	0
La Resaca	372	0,51562	208	164	85	184,4	0
La Vega	372	0,20886	207	165	77	184,63	0
La Reforma	372	2,77424	255	117	69	161,4	0

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
San Rafael LG	372	2,73428	226	146	97	178,4	0
Pt. Chameza	372	3,90498	249	123	91	165,66	0
El Molino	372	0,05992	206	166	72	184,85	0
La Trinidad	372	0,27455	219	153	71	181,15	0

K= media de la muestra

Tabla Anexo 7. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de temperatura mensual máxima.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Surbata Bonza	396	23,9333	209	187	120	198,39	0
UPTC	396	20,981	197	199	109	198,99	0
Belencito	396	24,9237	202	194	94	198,92	0
Tunguavita	396	24,4141	217	179	107	197,18	0
A.P.T.O A.Lleras.C	396	23,9469	214	182	109	197,71	0
El Tunel	396	18,2101	203	193	91	198,87	0

K= media de la muestra

Tabla Anexo 8. Resultados prueba de correlación serial para series temporales de temperatura mensual mínima.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
Surbata Bonza	396	4,5338	202	194	57	198,92	0
UPTC	396	4,87	182	214	149	197,71	0
Belencito	396	5,44615	197	199	109	198,99	0
Tunguavita	396	2,59394	182	214	157	197,71	0
A.P.T.O A.Lleras.C	396	0,39335	167	229	131	194,15	0
El Tunel	396	4,78122	186	210	69	198,27	0

K= media de la muestra

Tabla Anexo 9. Resultados de prueba de correlación serial para series temporales de precipitación total mensual.

Estación	N	K	Número de observaciones		Número de corridas		Valor p
			≤ K	> K	Observado	Esperado	
UPTC	396	54,688	238	158	167	190,92	0,012
Panelas	396	15,689	224	172	159	195,59	0
Pesca	396	56,102	214	182	157	197,71	0
Siachoque	396	62,186	225	171	155	195,32	0
Iza	396	52,224	238	158	159	190,92	0,001
Combita	396	73,806	235	161	151	192,09	0
Duitama	396	74,596	234	162	161	192,45	0,001
Sotaquirá	396	93,436	225	171	165	195,32	0,002
Sta. Rosa D Viterbo	396	80,13	233	163	157	192,81	0
Tibasosa	396	60,049	234	162	151	192,45	0
El Cerezo	396	73,601	233	163	153	192,81	0
San Antonio	396	70,472	232	164	163	193,16	0,002
Firavitoba	396	57,77	236	160	165	191,71	0,005
El Carrocho	396	58,109	232	164	141	193,16	0
Nobsa	396	68,82	227	169	165	194,75	0,002
Casa Amarilla	396	64,559	215	181	159	197,54	0
Los Azulejos	396	67,406	229	167	149	194,15	0
La Antena Tv Rusia	396	104,054	230	166	155	193,83	0
Sena	396	57,891	241	155	171	189,66	0,049
Surbata Bonza	396	73,777	233	163	161	192,81	0,001
Belencito	396	67,741	229	167	163	194,15	0,001
Tunguavita	396	81,836	232	164	157	193,16	0
San Cristóbal	396	62,993	225	171	169	195,32	0,007
A.P.T.O A Lleras. C	396	62,662	233	163	169	192,81	0,013
El Tunel	396	64,665	215	181	161	197,54	0

K= media de la muestra

Anexo F. Función de autocorrelación de las series de precipitación, caudal y temperatura a nivel mensual.

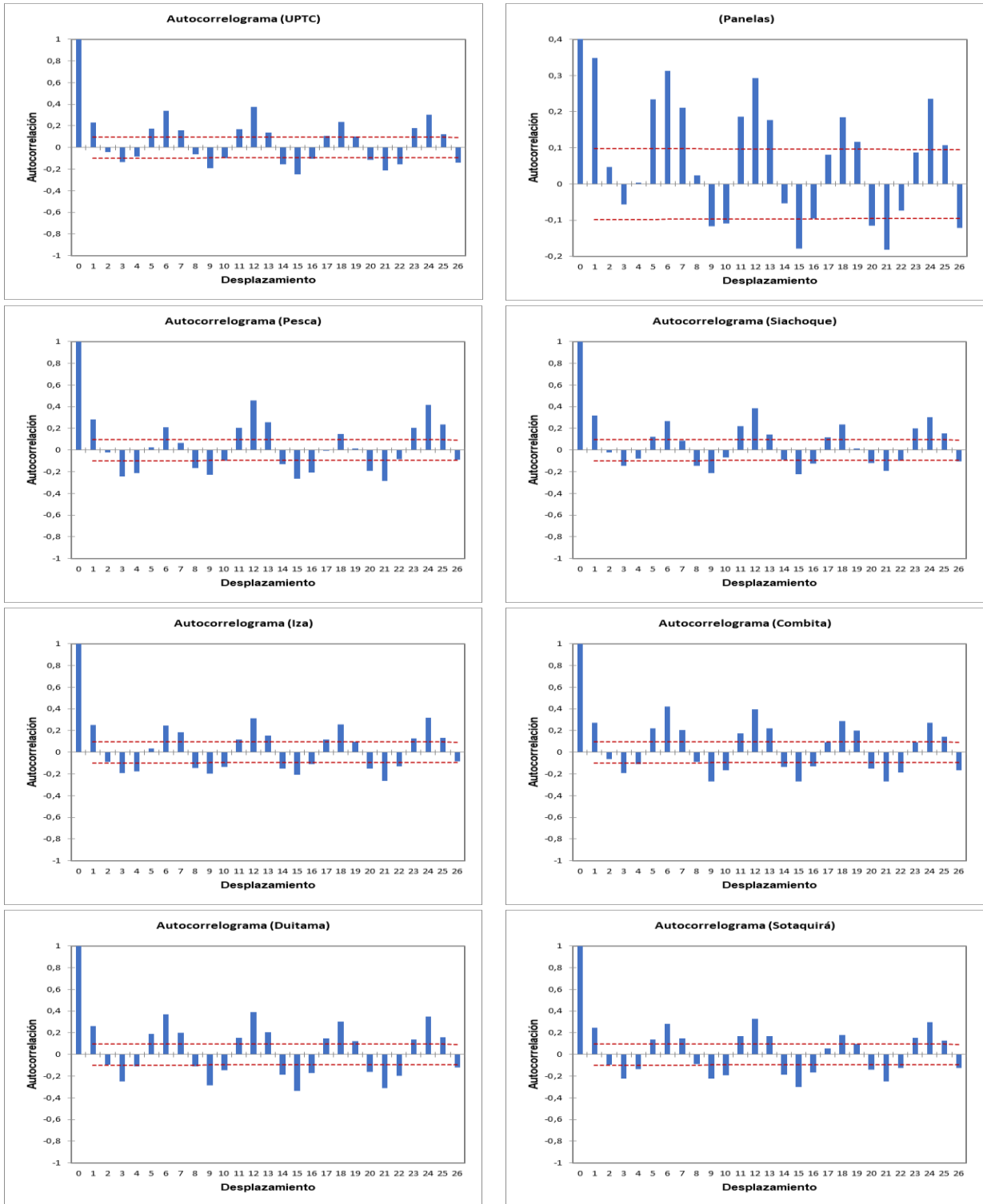


Figura Anexo 11. Función de autocorrelación de las series de precipitación a nivel mensual.

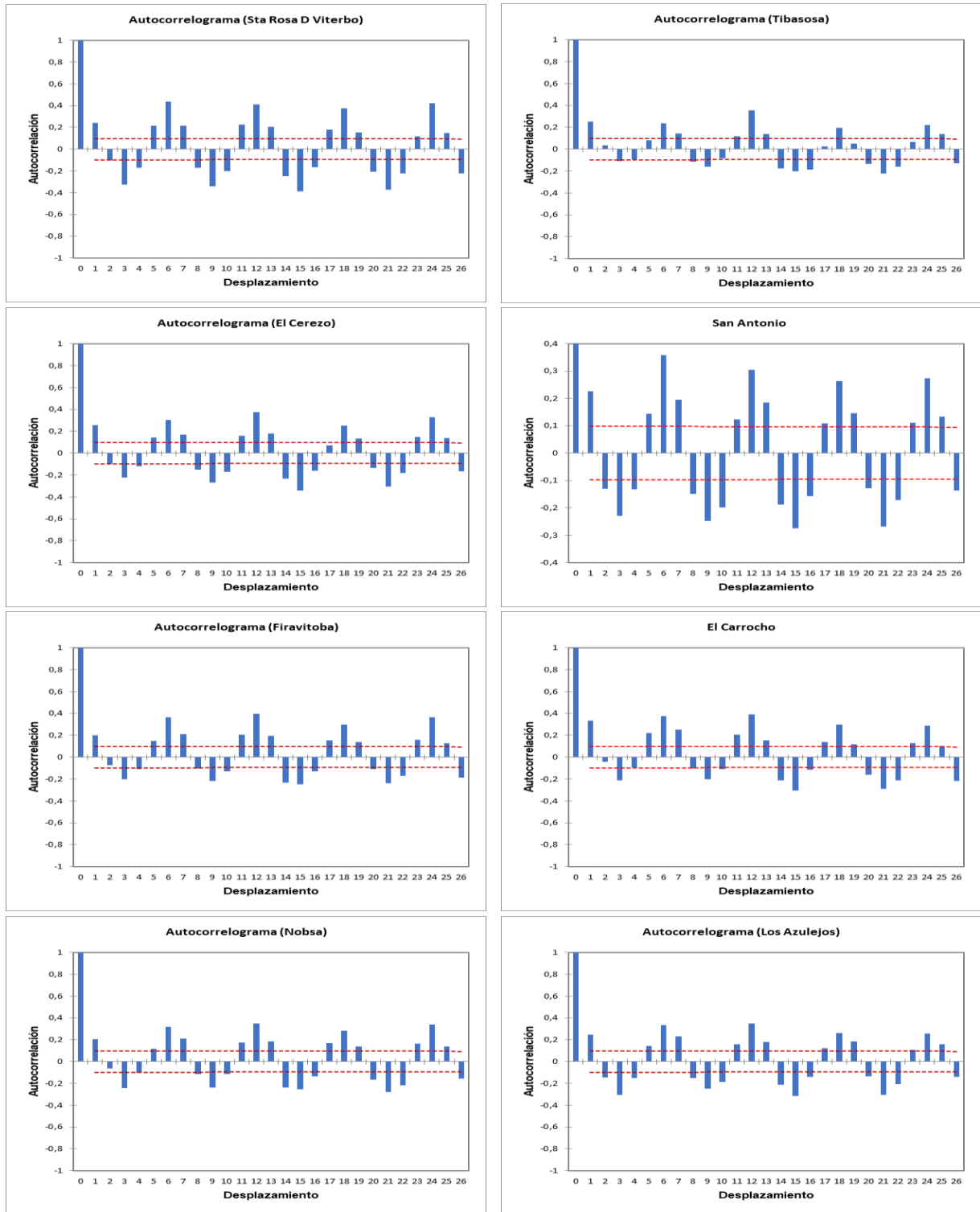


Figura Anexo 12. Función de autocorrelación de las series de precipitación a nivel mensual (continuación).

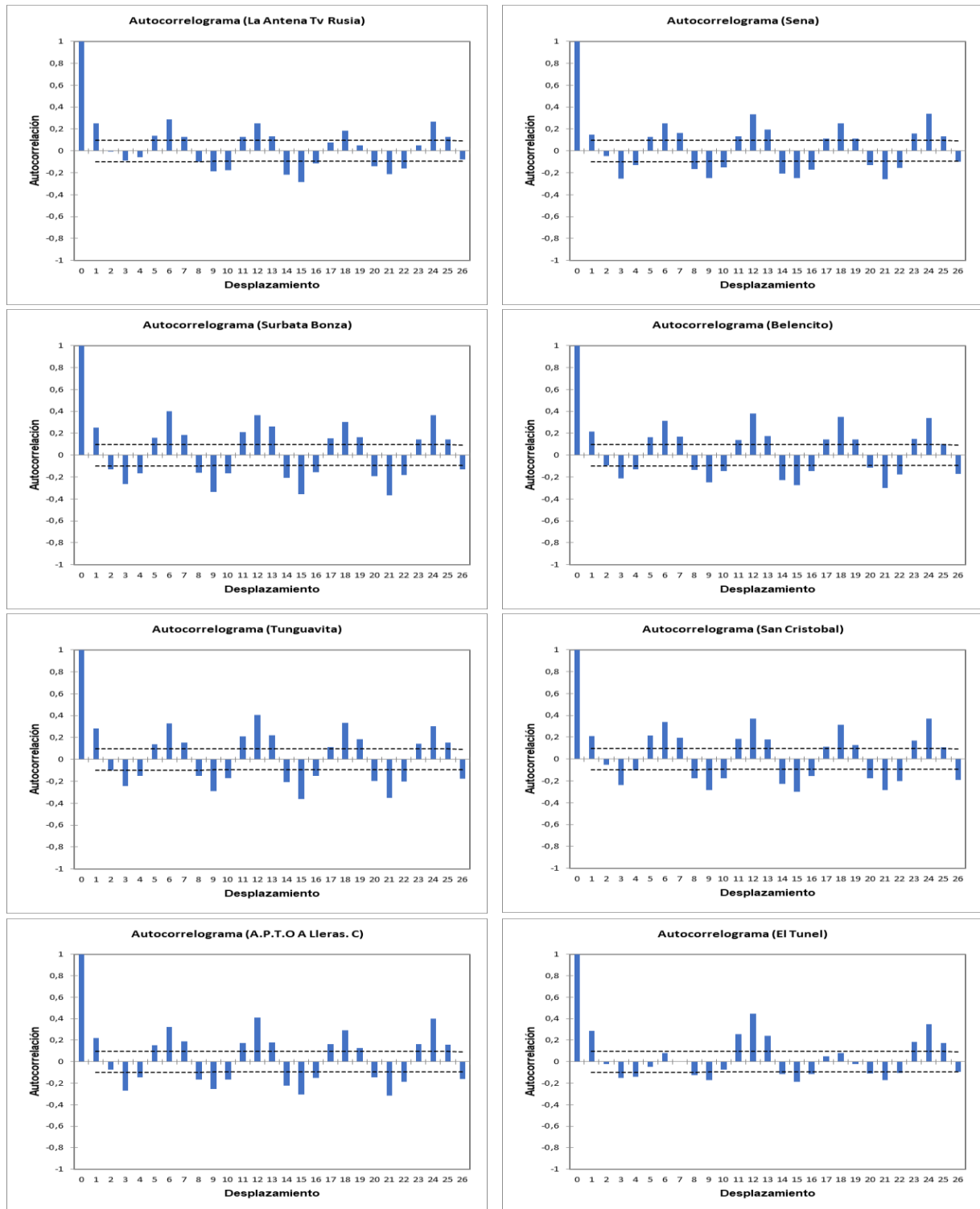


Figura Anexo 13. Función de autocorrelación de las series de precipitación a nivel mensual (continuación).

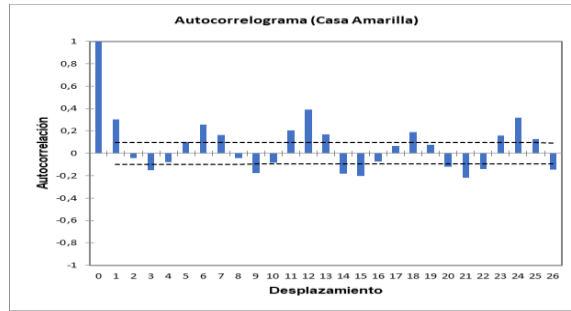


Figura Anexo 14. Función de autocorrelación de las series de precipitación a nivel mensual (continuación).

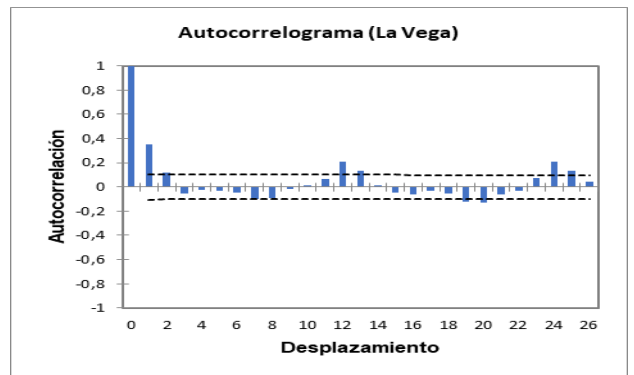
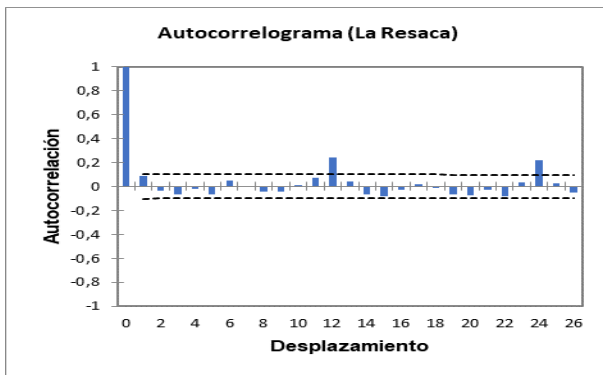
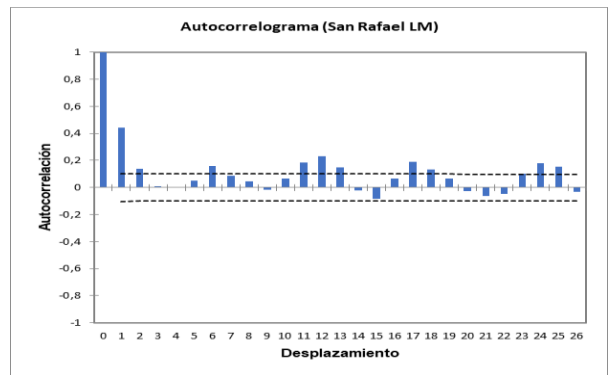
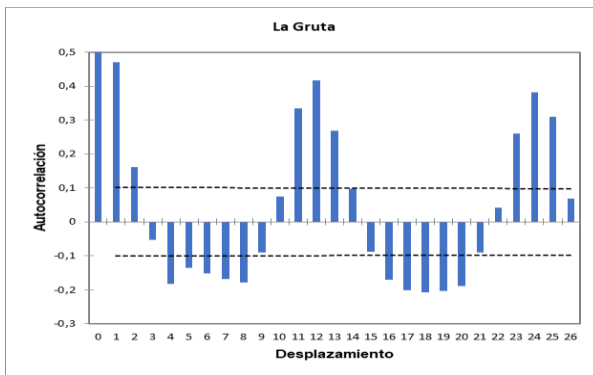
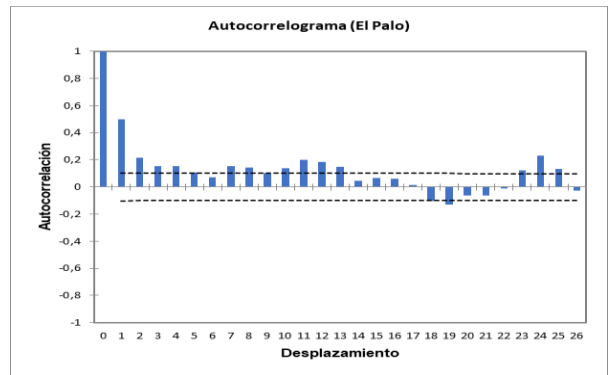
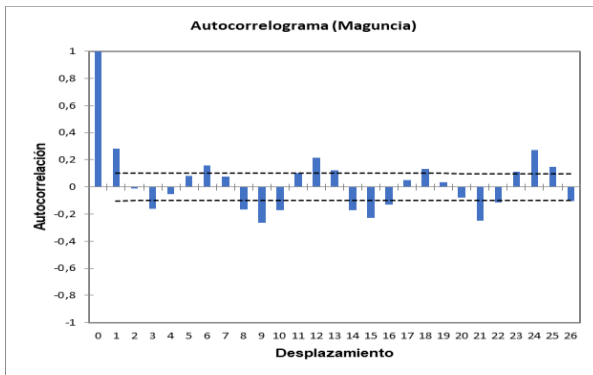


Figura Anexo 15. Función de autocorrelación de las series de caudal máximo a nivel mensual.

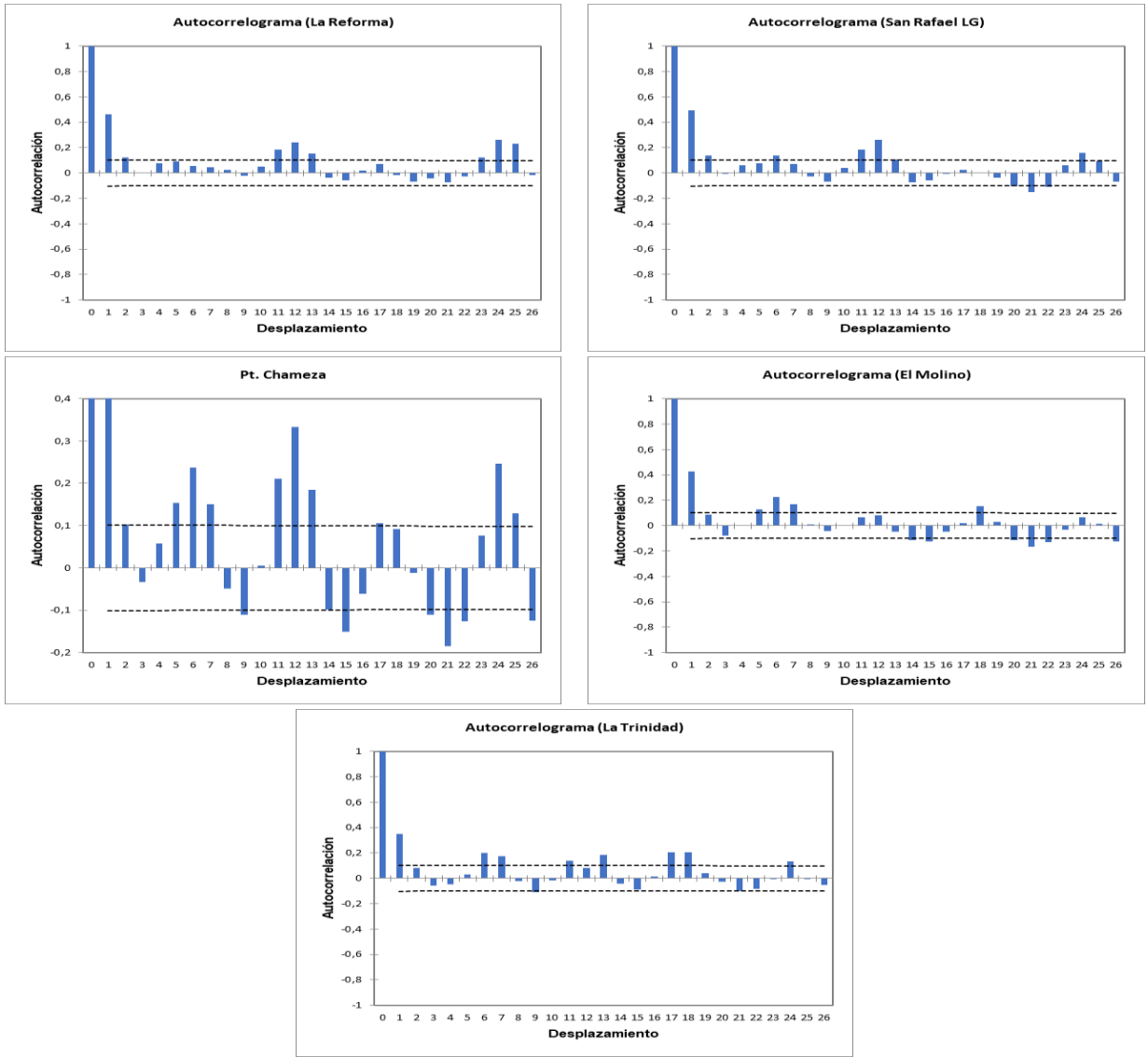


Figura Anexo 16. Función de autocorrelación de las series de caudal máximo a nivel mensual (continuación).

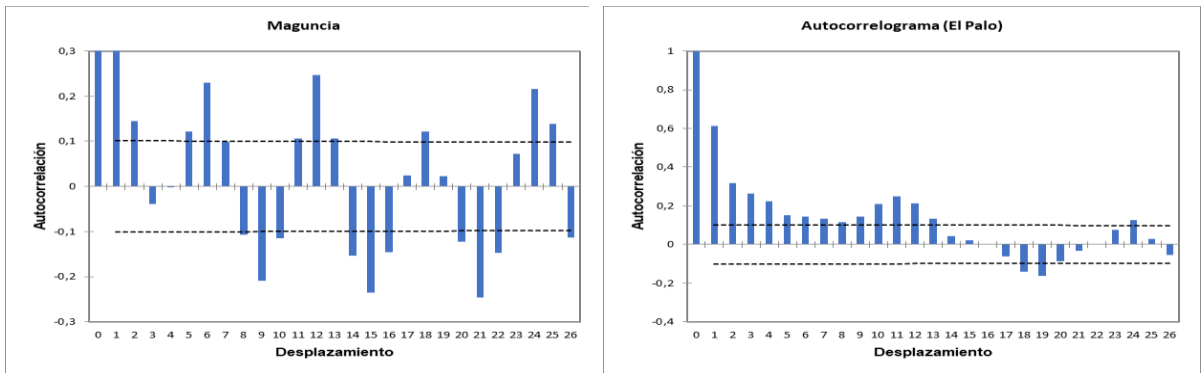


Figura Anexo 17. Función de autocorrelación de las series de caudal medio a nivel mensual.

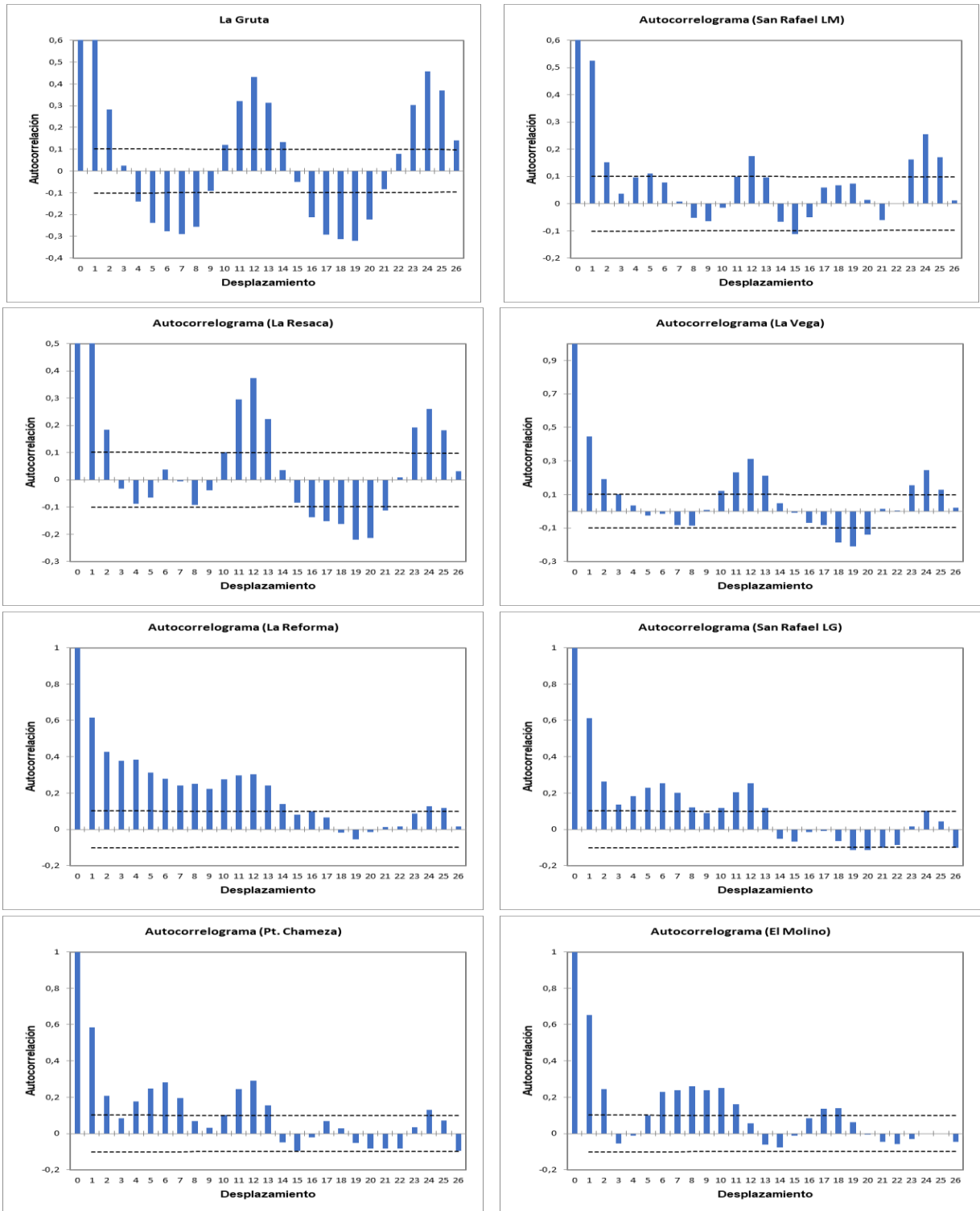


Figura Anexo 18. Función de autocorrelación de las series de caudal medio a nivel mensual (continuación).

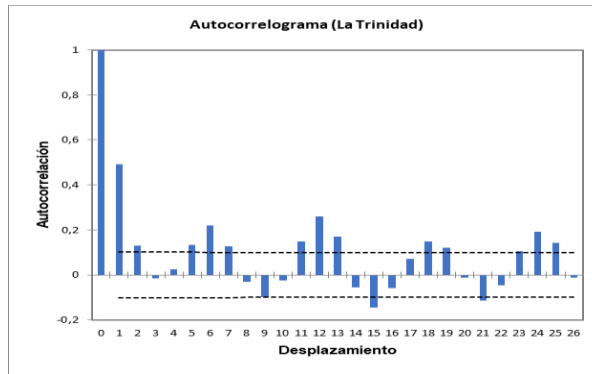


Figura Anexo 19. Función de autocorrelación de las series de caudal medio a nivel mensual (continuación).

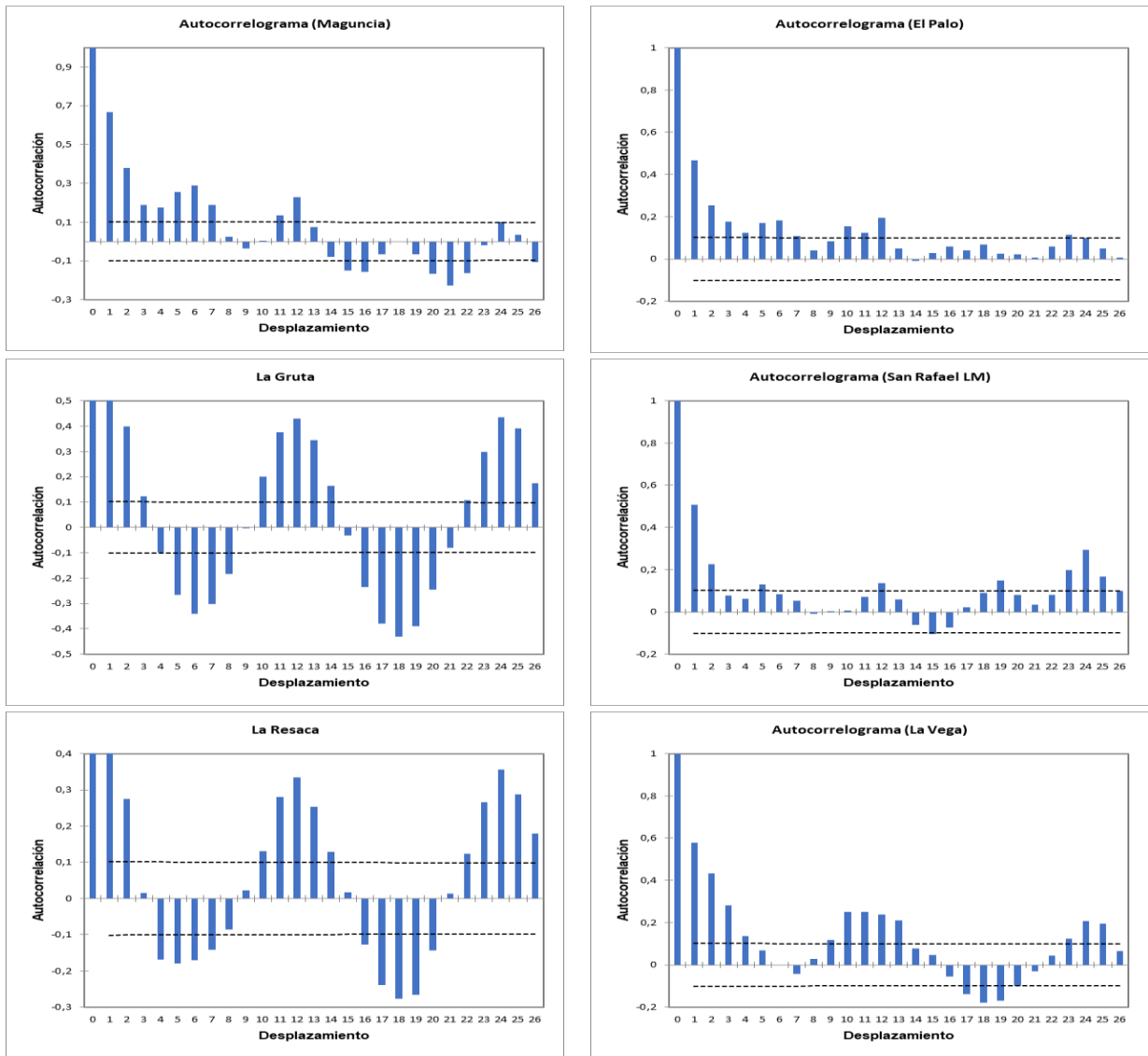


Figura Anexo 20. Función de autocorrelación de las series de caudal mínimo a nivel mensual.

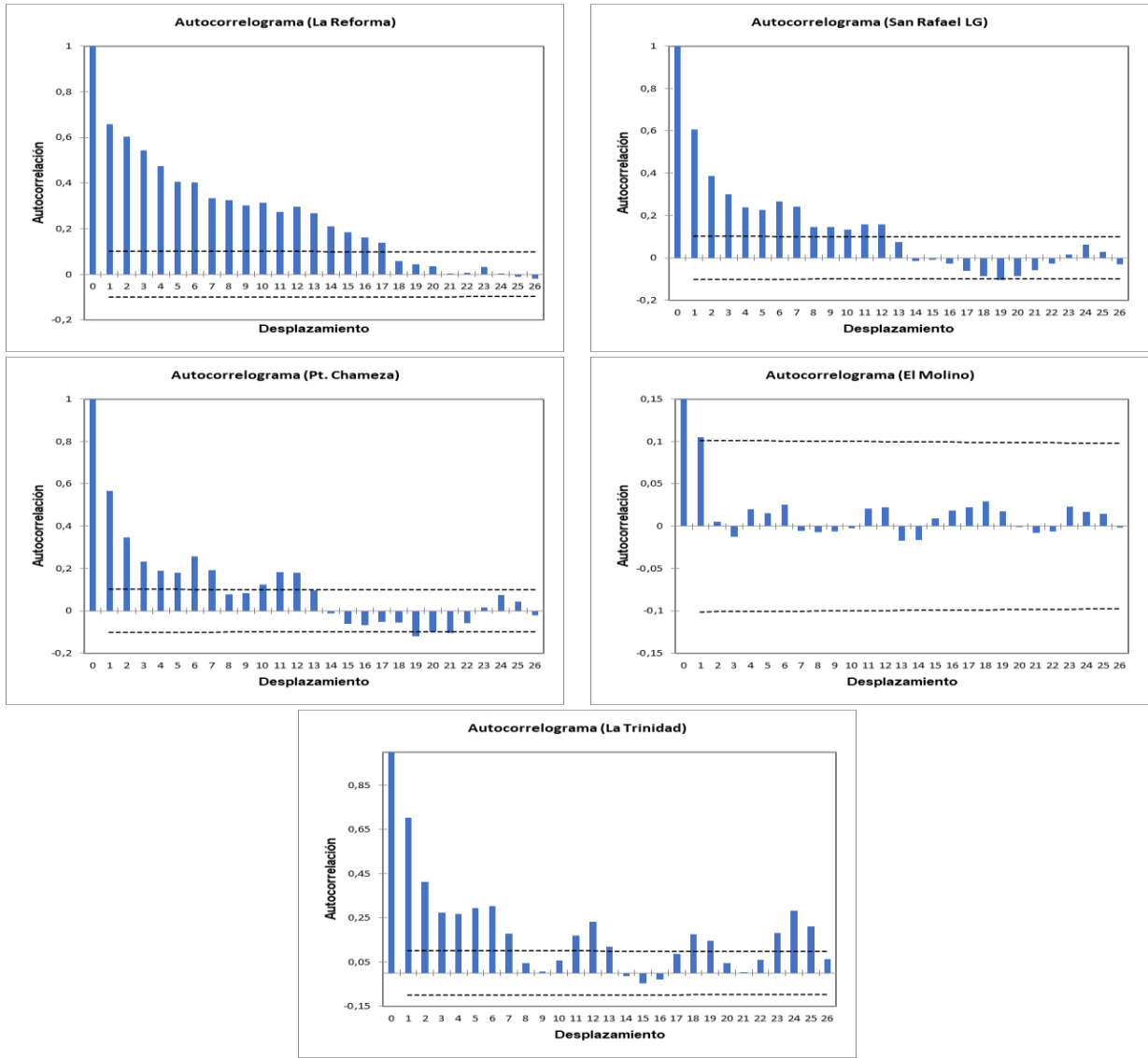


Figura Anexo 21. Función de autocorrelación de las series de caudal mínimo a nivel mensual (continuación).

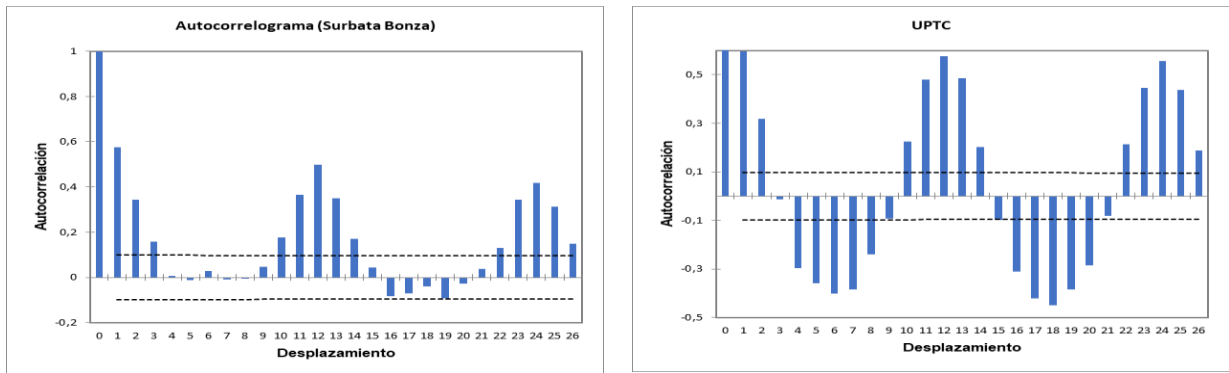


Figura Anexo 22. Función de autocorrelación de las series de temperatura máxima a nivel mensual.

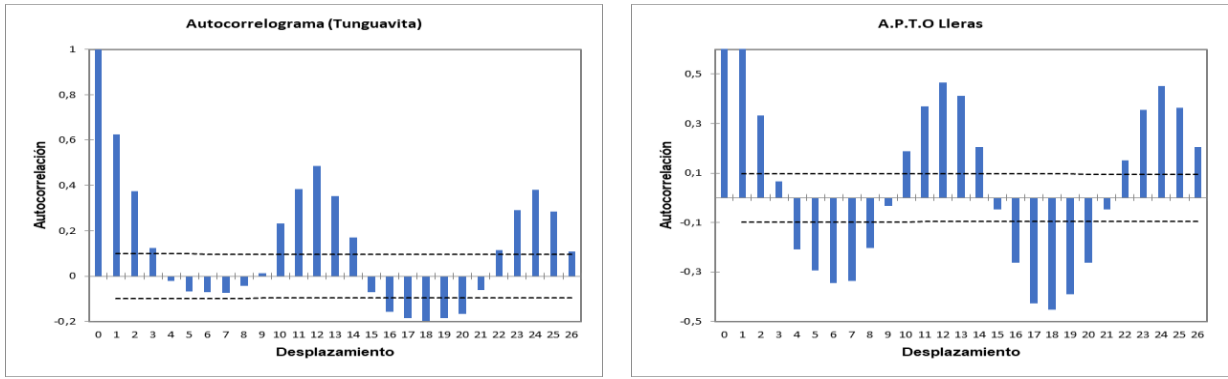


Figura Anexo 23. Función de autocorrelación de las series de temperatura máxima a nivel mensual (continuación).

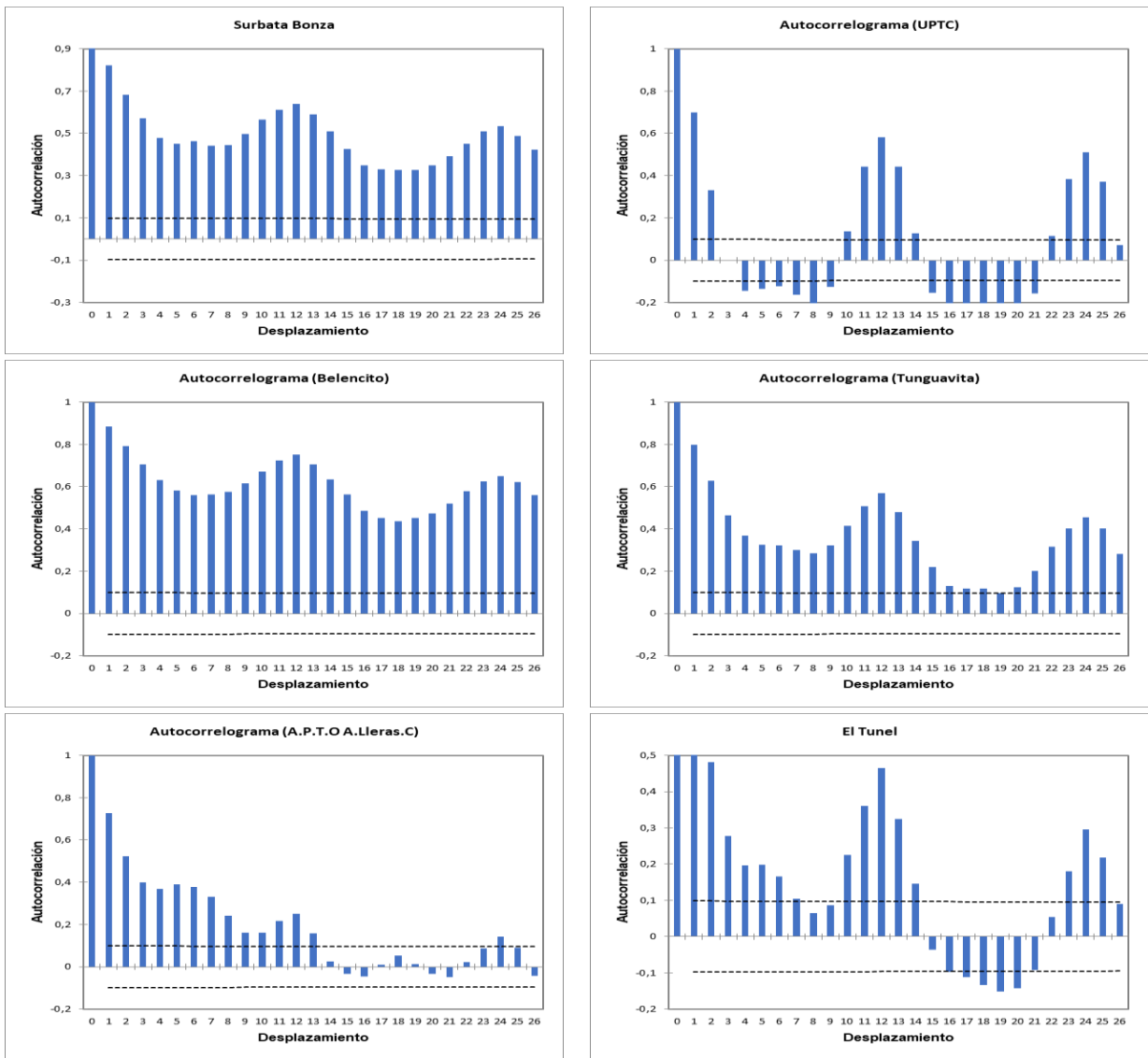


Figura Anexo 24. Función de autocorrelación de las series de temperatura media a nivel mensual.

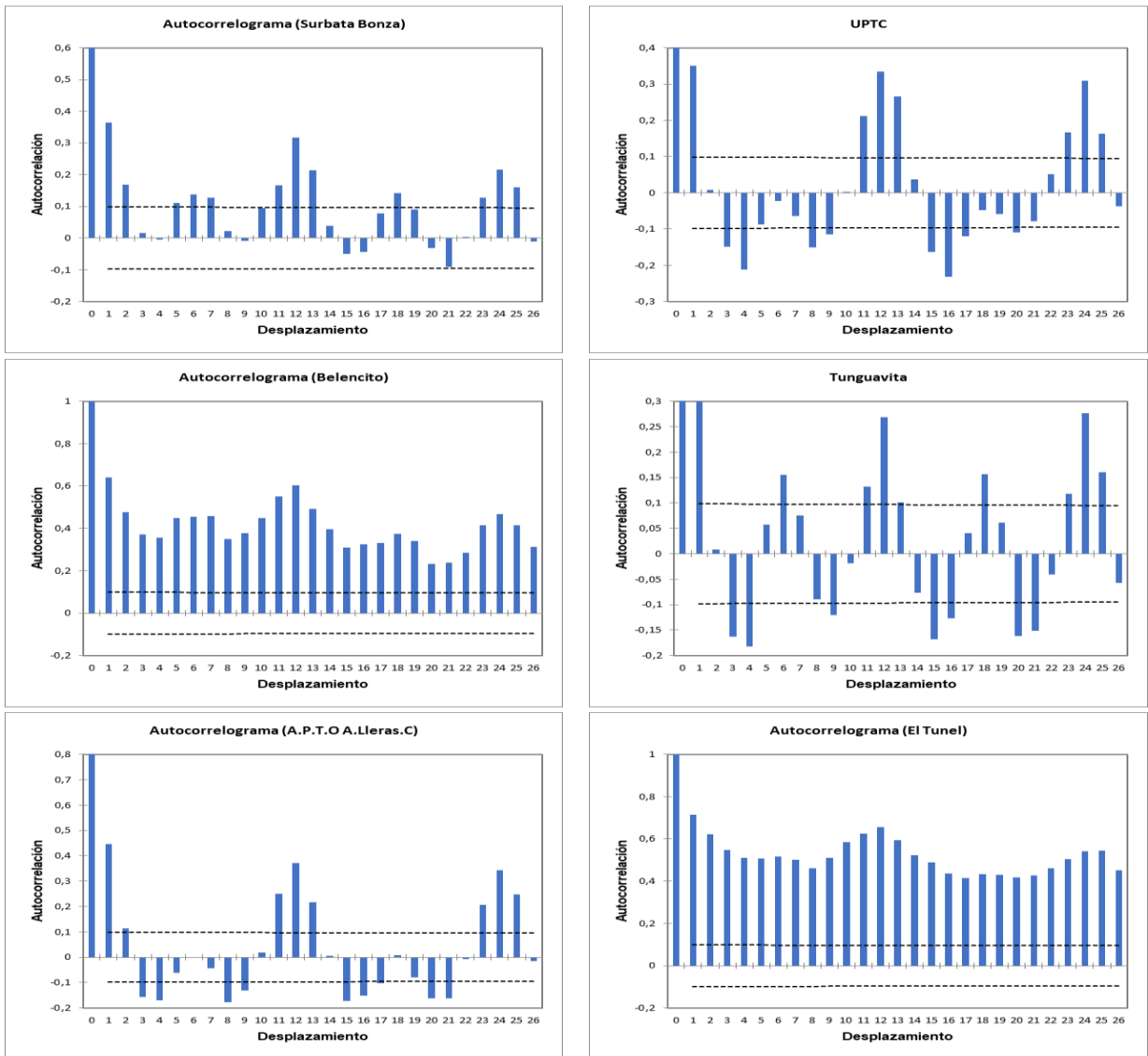


Figura Anexo 25. Función de autocorrelación de las series de temperatura mínima a nivel mensual.

Anexo G. Función de densidad espectral de las series de precipitación, caudal y temperatura a nivel mensual.

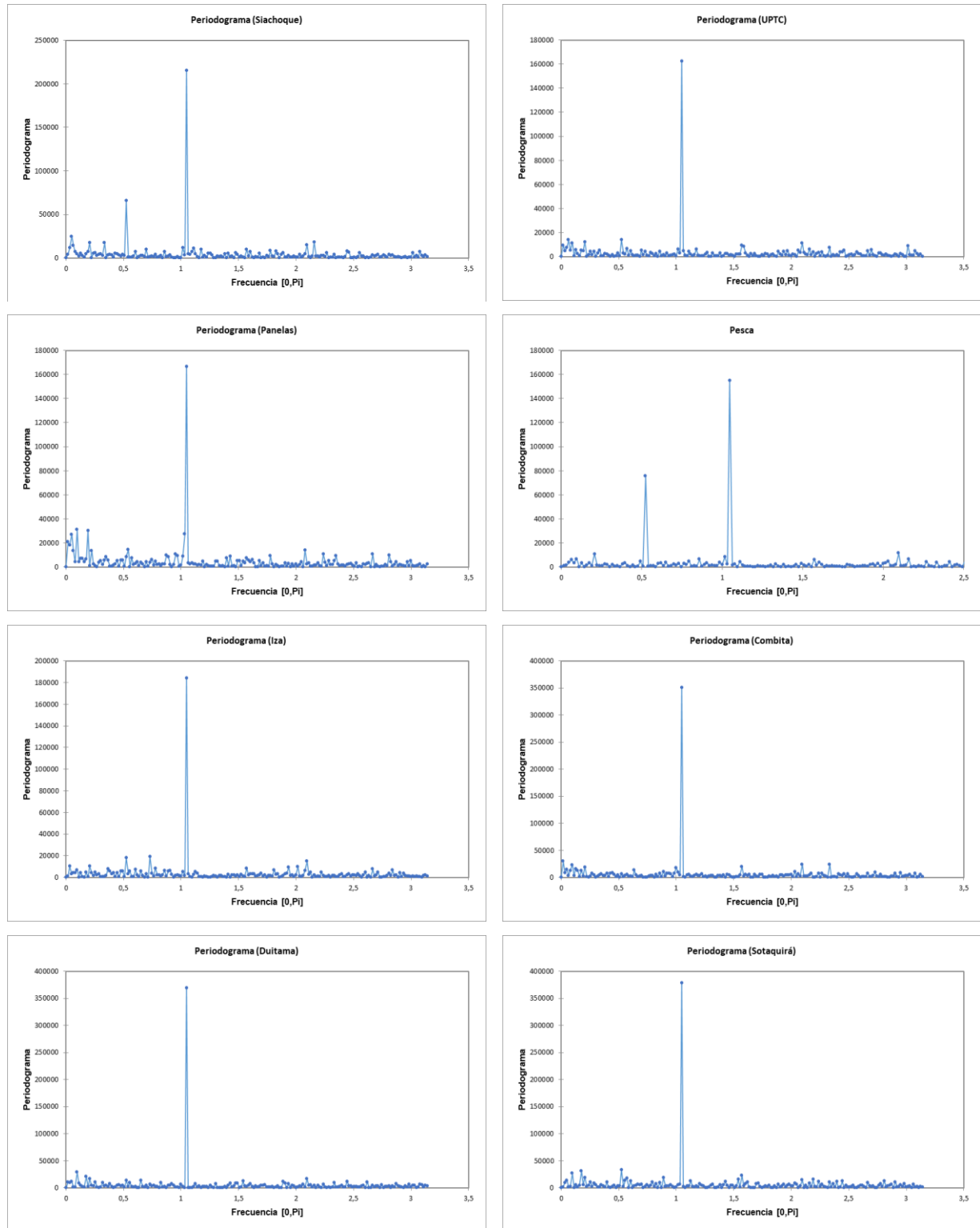


Figura Anexo 26. Función de densidad espectral de la precipitación a nivel mensual.

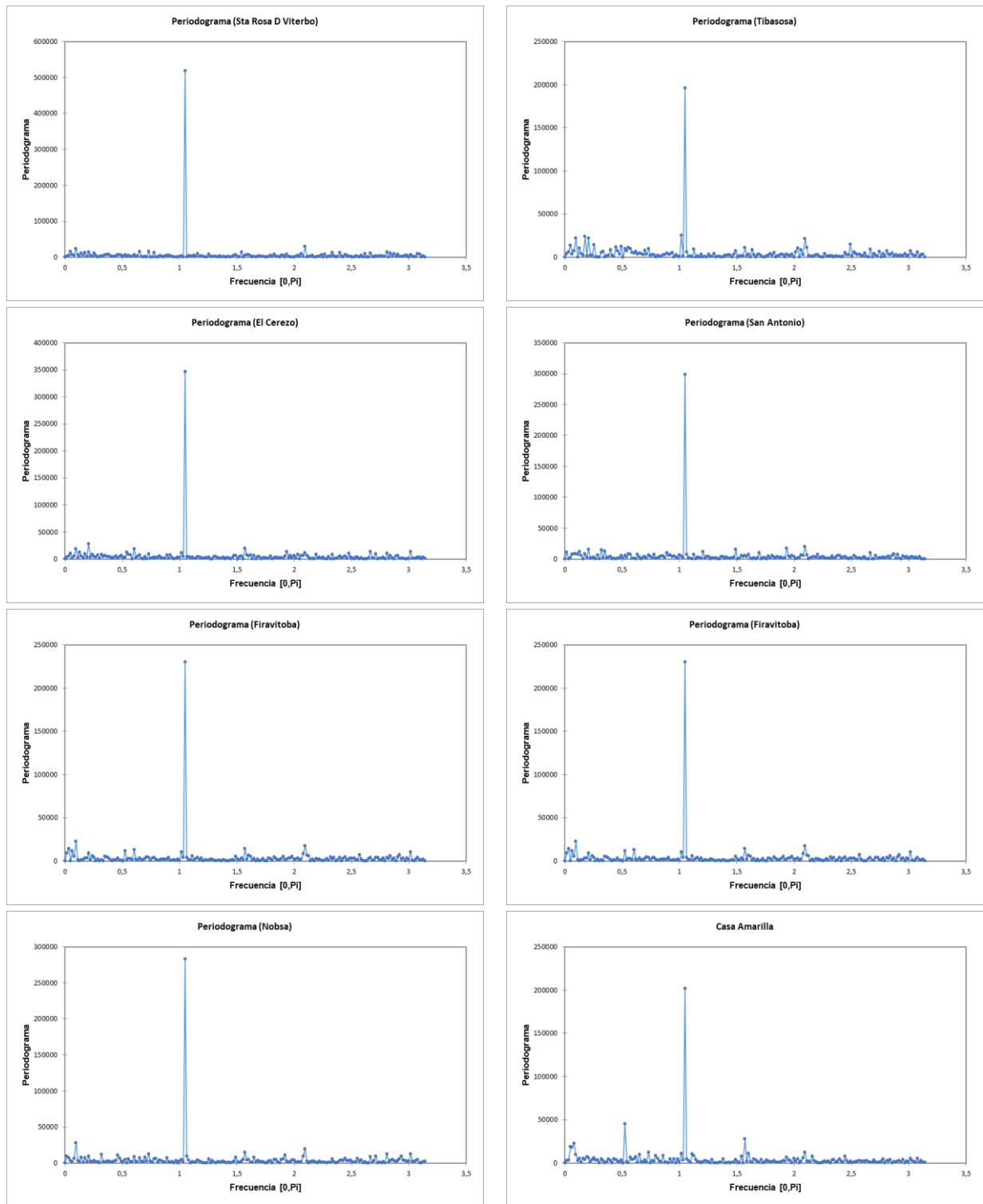


Figura Anexo 27. Función de densidad espectral de la precipitación a nivel mensual (continuación).

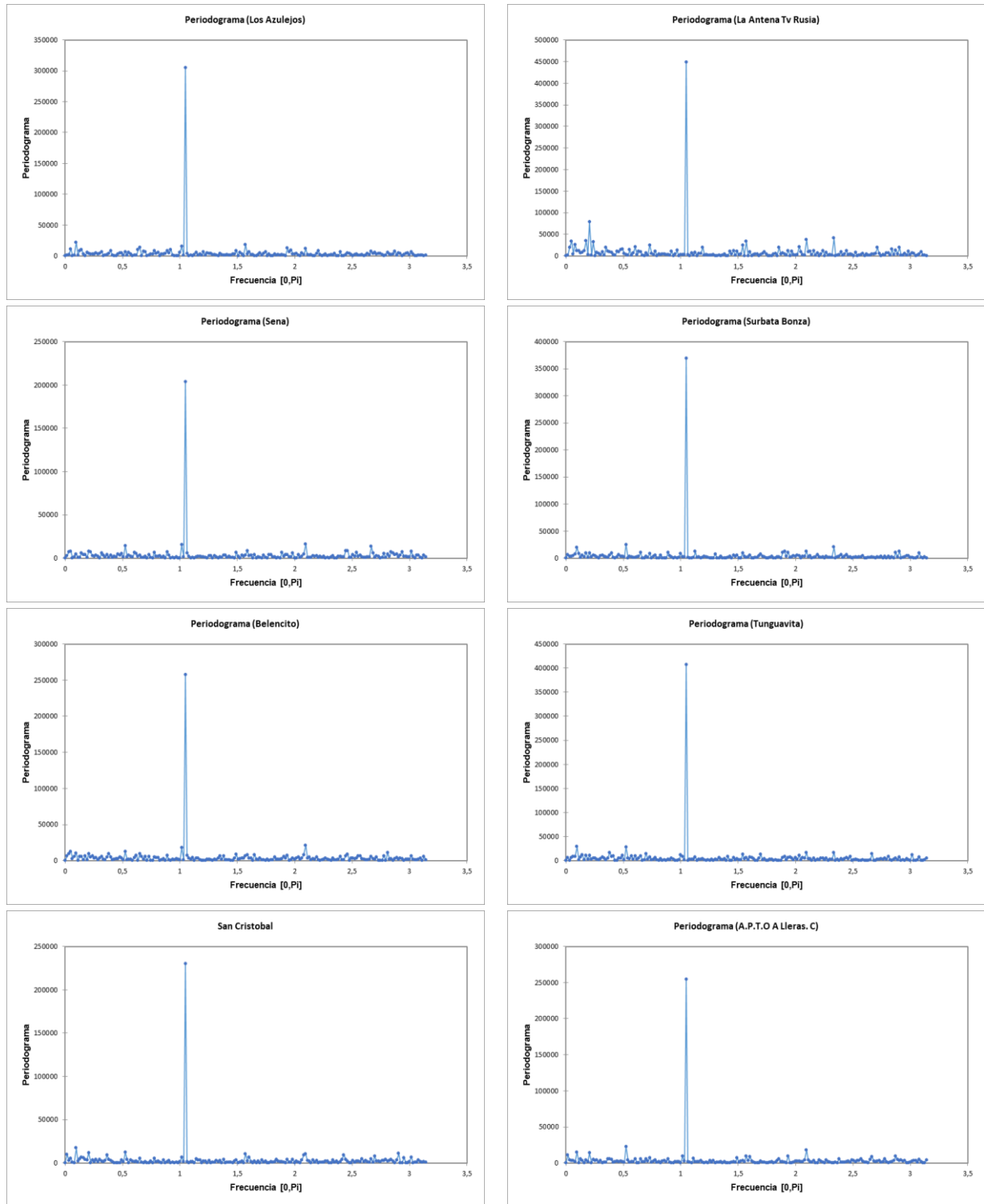


Figura Anexo 28. Función de densidad espectral de la precipitación a nivel mensual (continuación).

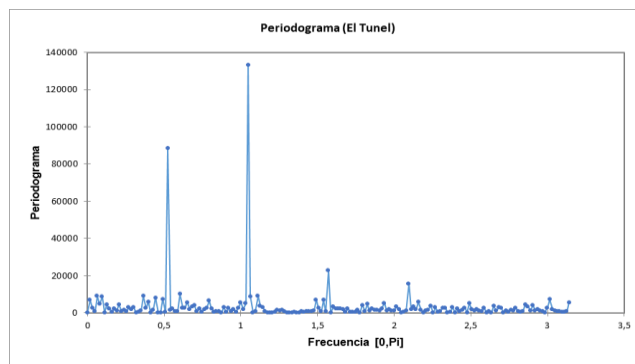


Figura Anexo 29. Función de densidad espectral de la precipitación a nivel mensual (continuación).

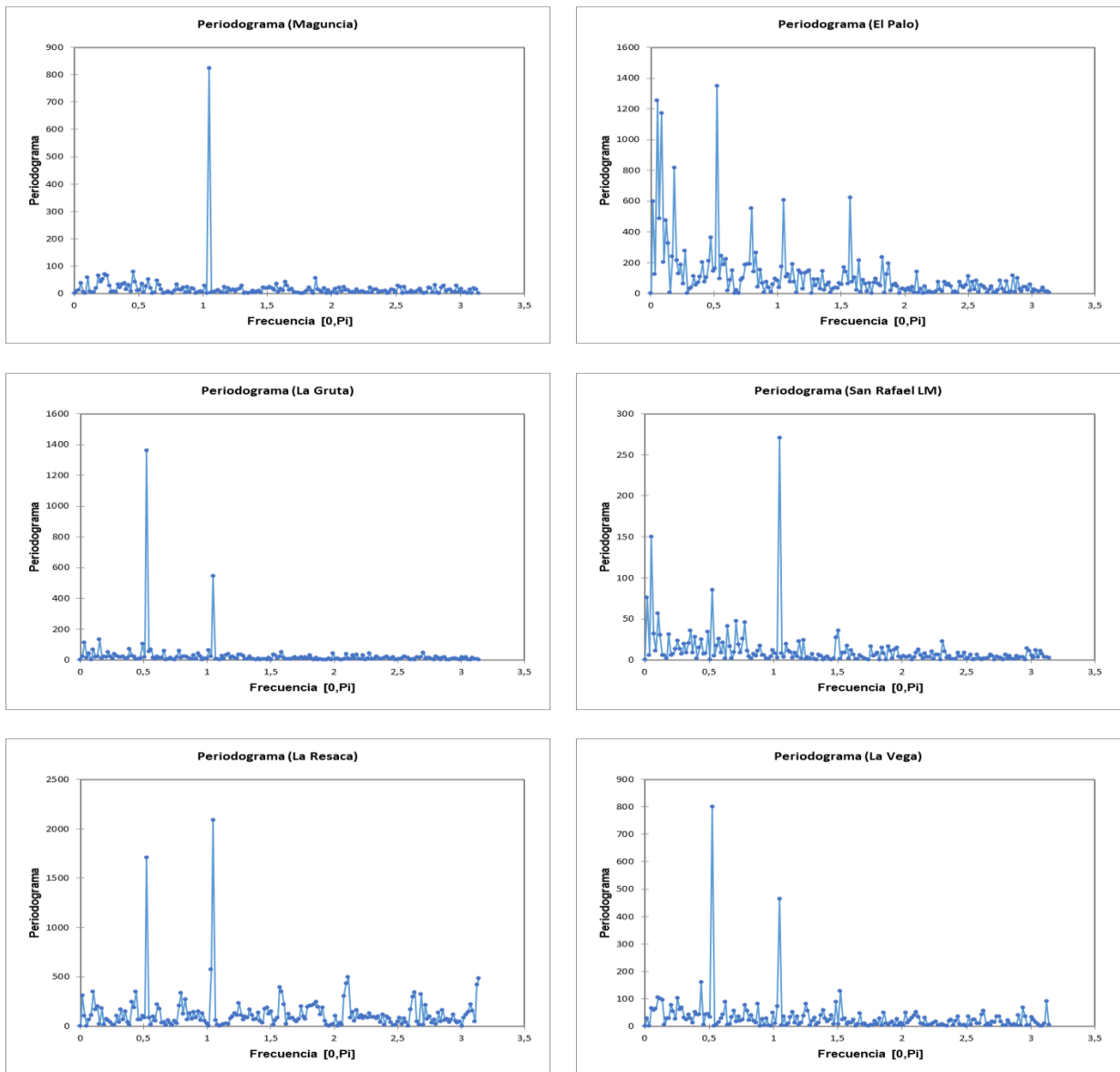


Figura Anexo 30. Función de densidad espectral de caudal máximo a nivel mensual.

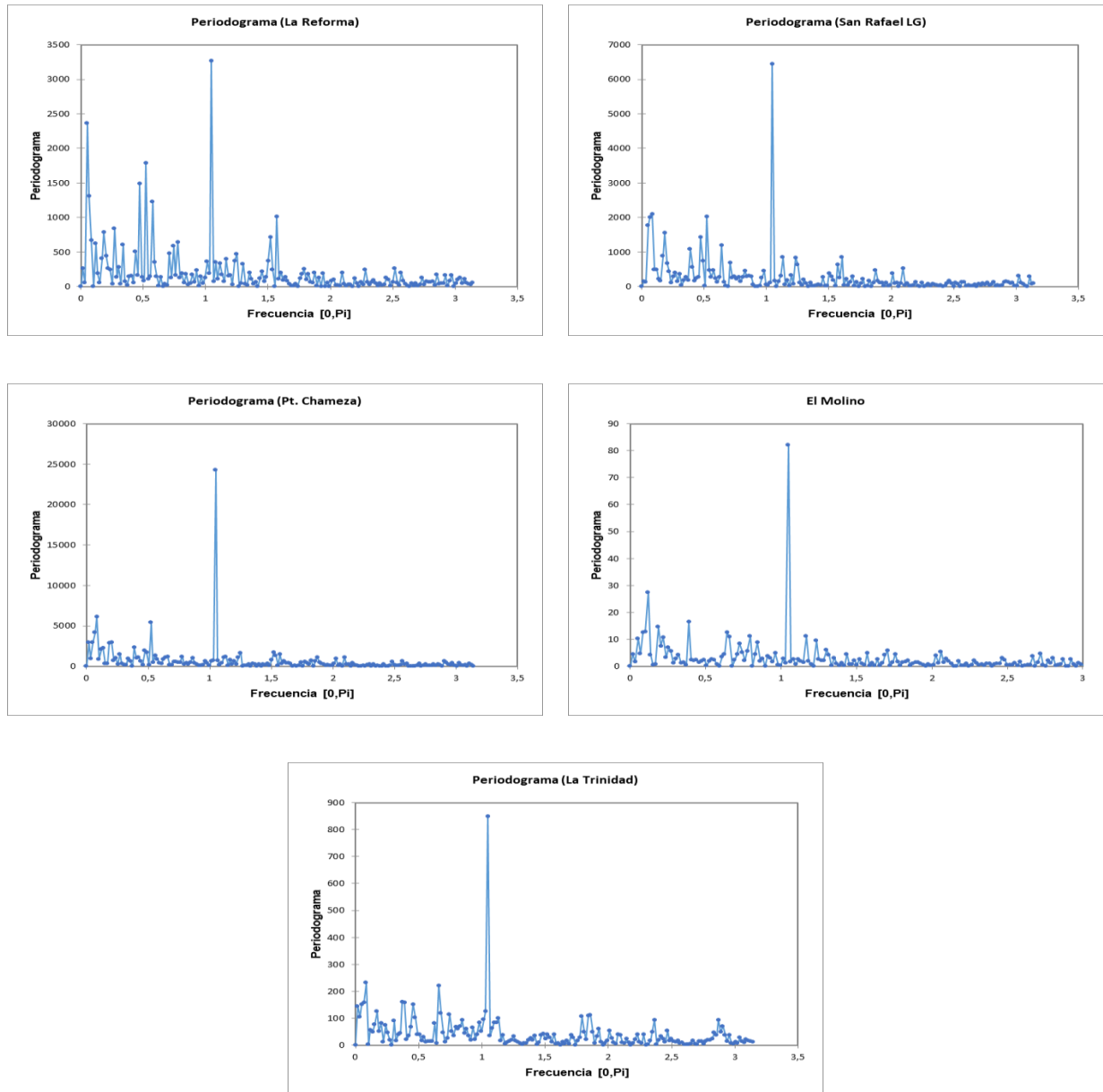


Figura Anexo 31. Función de densidad espectral de caudal máximo a nivel mensual (continuación).

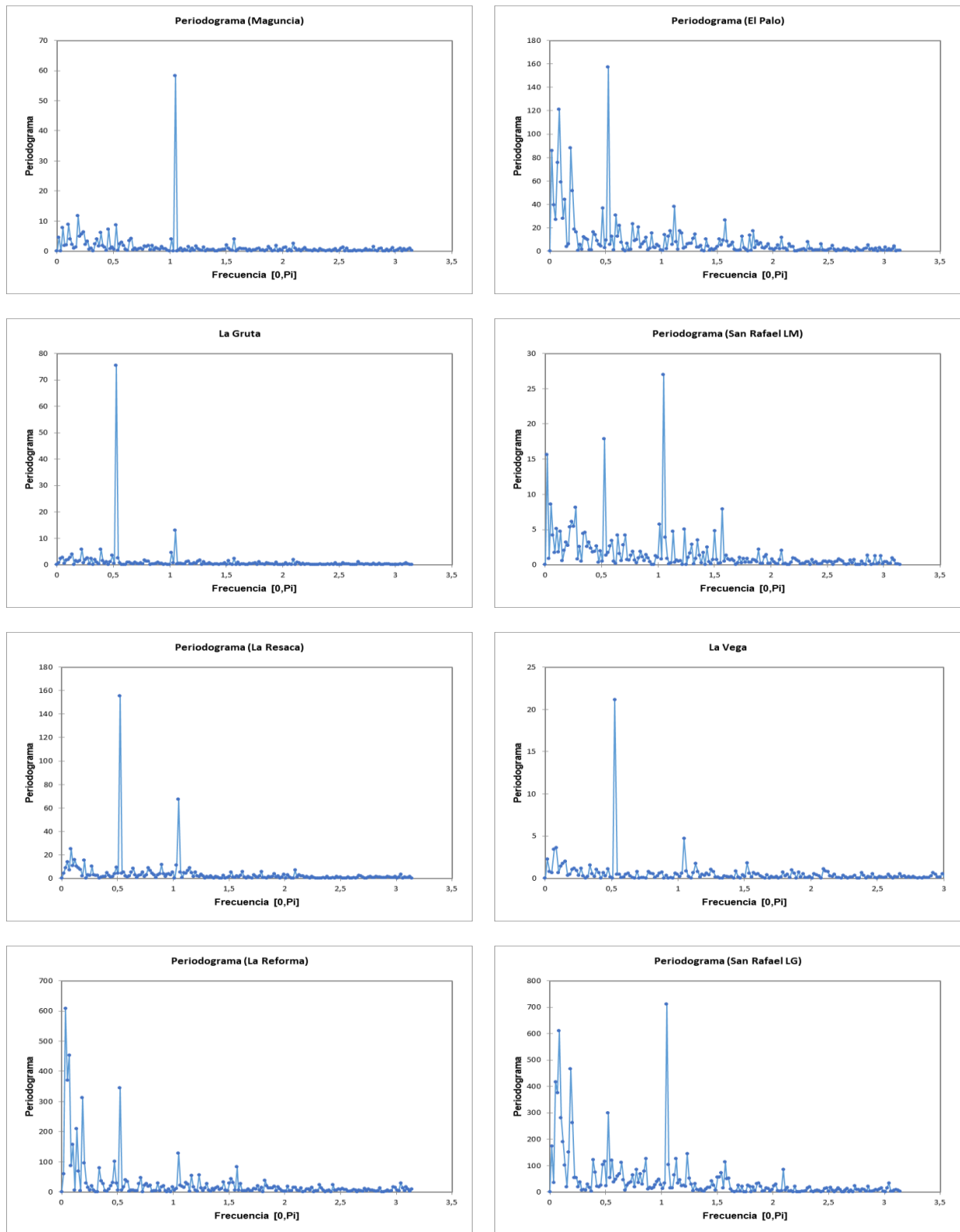


Figura Anexo 32. Función de densidad espectral de caudal medio a nivel mensual.

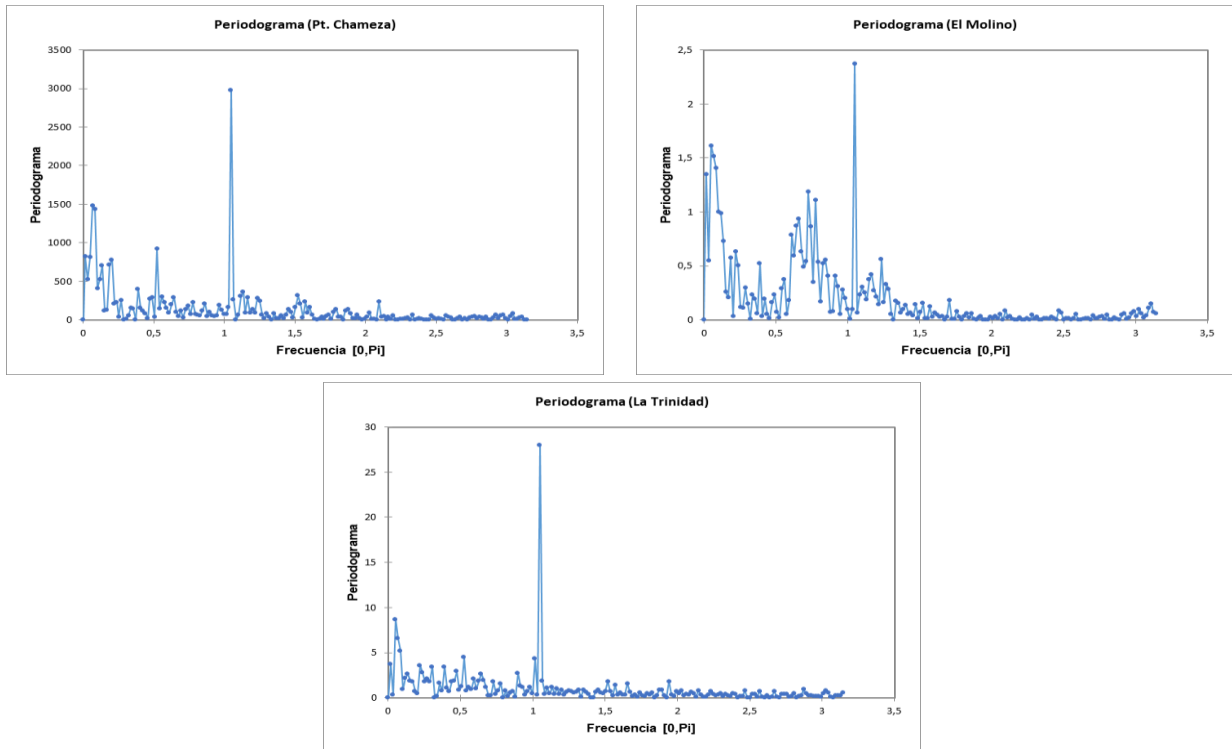


Figura Anexo 33. Función de densidad espectral de caudal medio a nivel mensual (continuación).

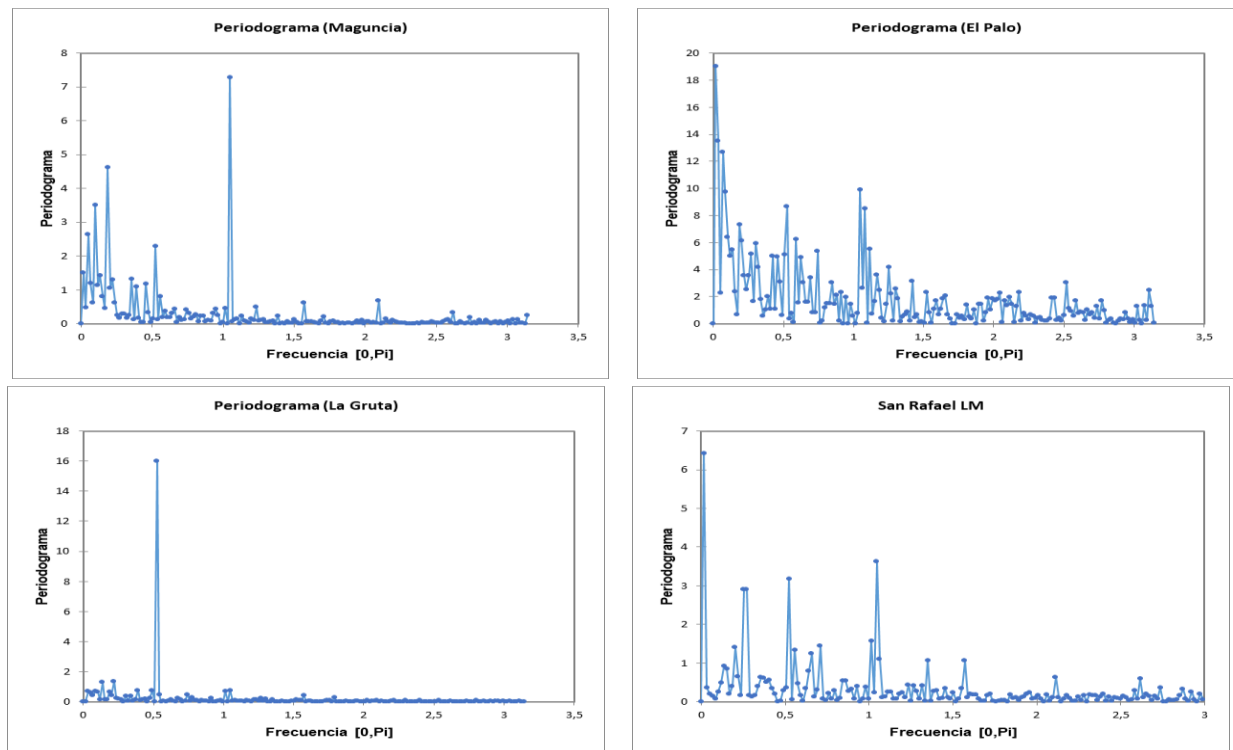


Figura Anexo 34. Función de densidad espectral de caudal mínimo a nivel mensual.

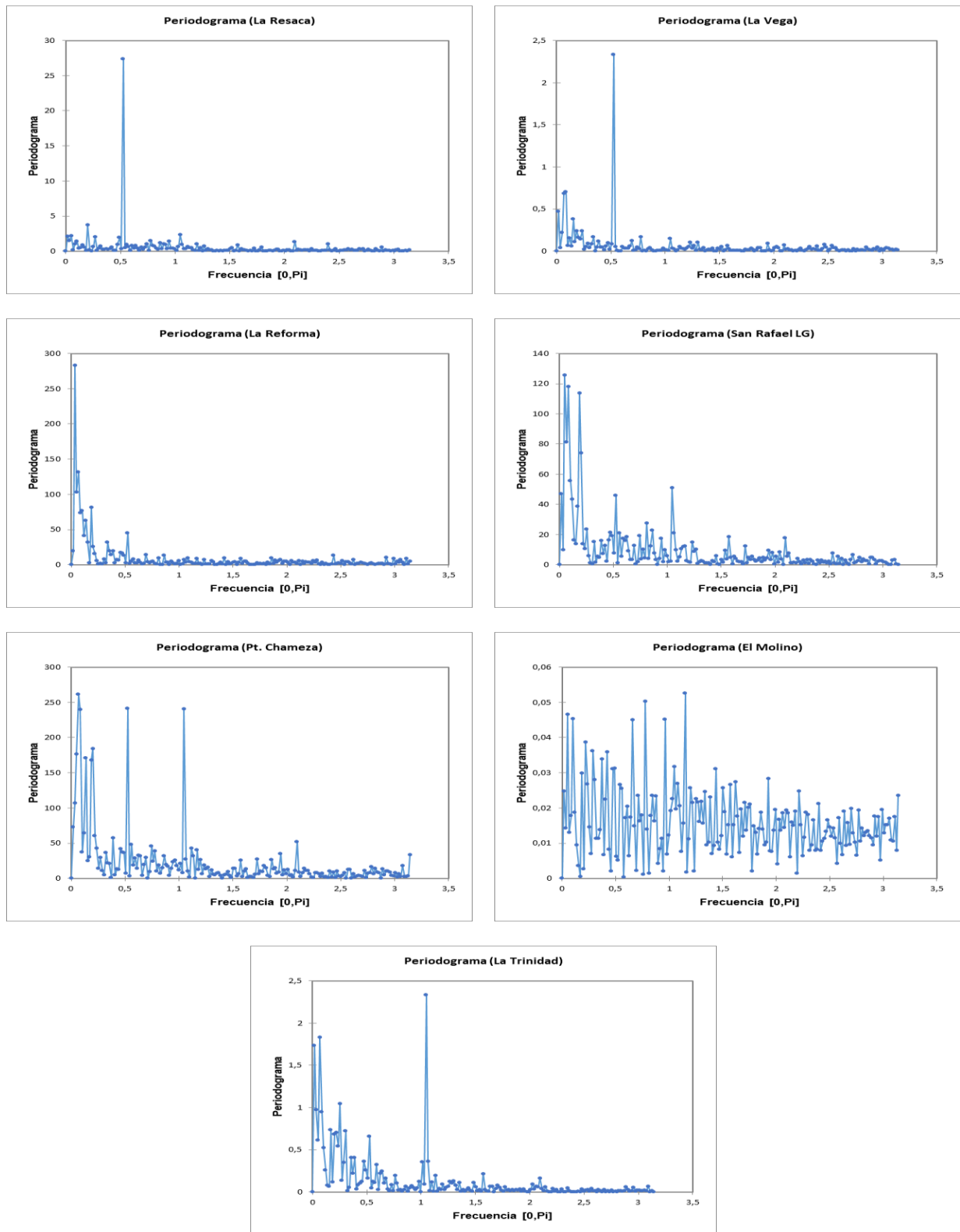


Figura Anexo 35. Función de densidad espectral de caudal mínimo a nivel mensual (continuación).

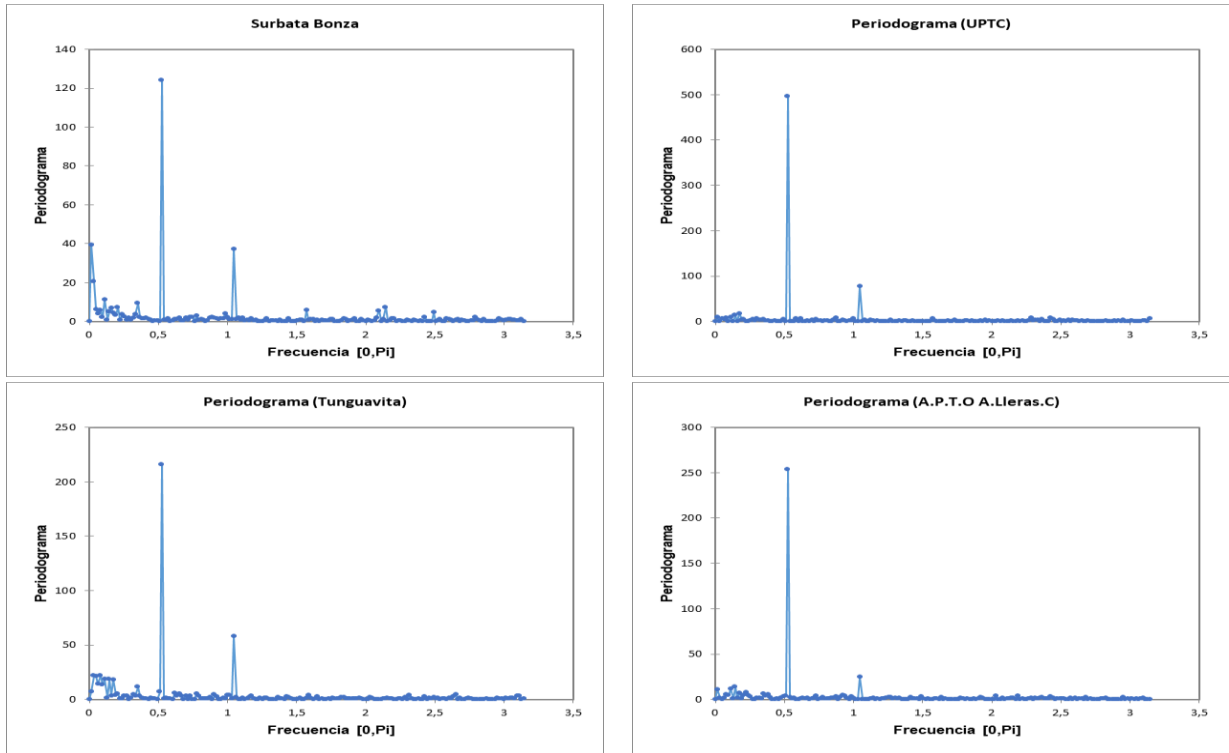


Figura Anexo 36. Función de densidad espectral de temperatura máxima a nivel mensual.

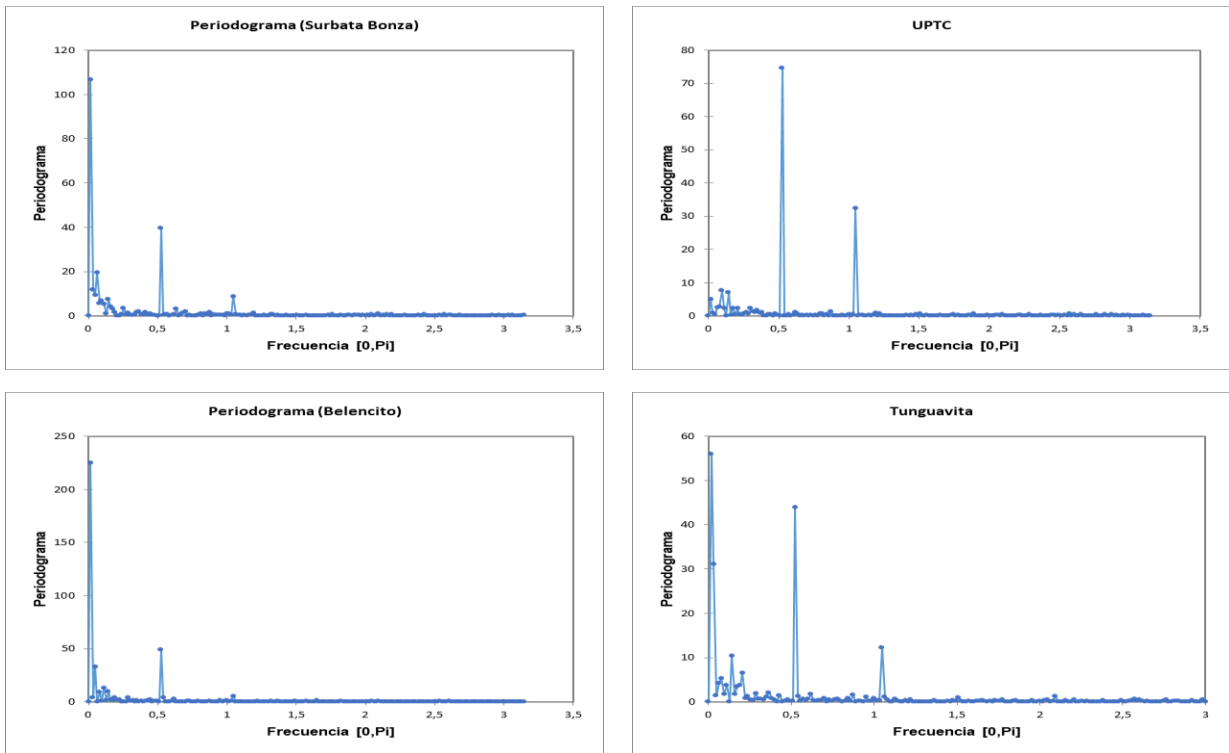


Figura Anexo 37. Función de densidad espectral de temperatura media a nivel mensual.

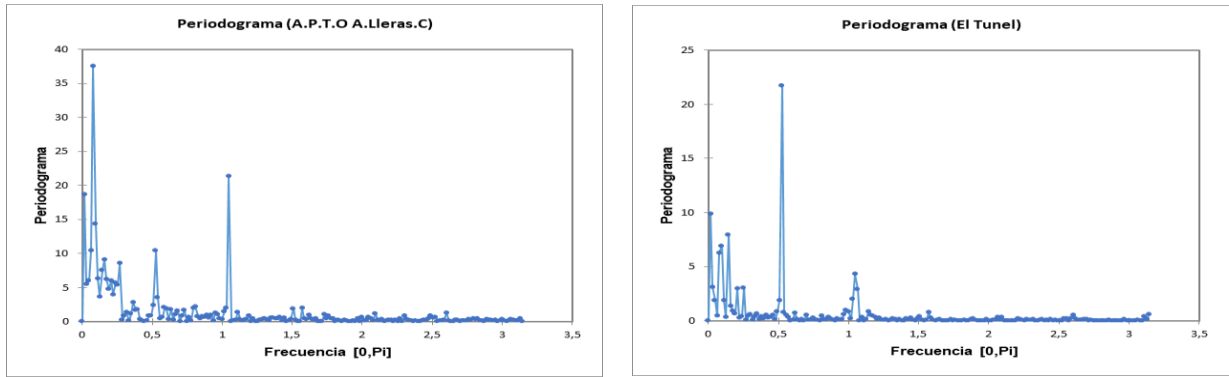


Figura Anexo 38. Función de densidad espectral de temperatura media a nivel mensual (continuación).

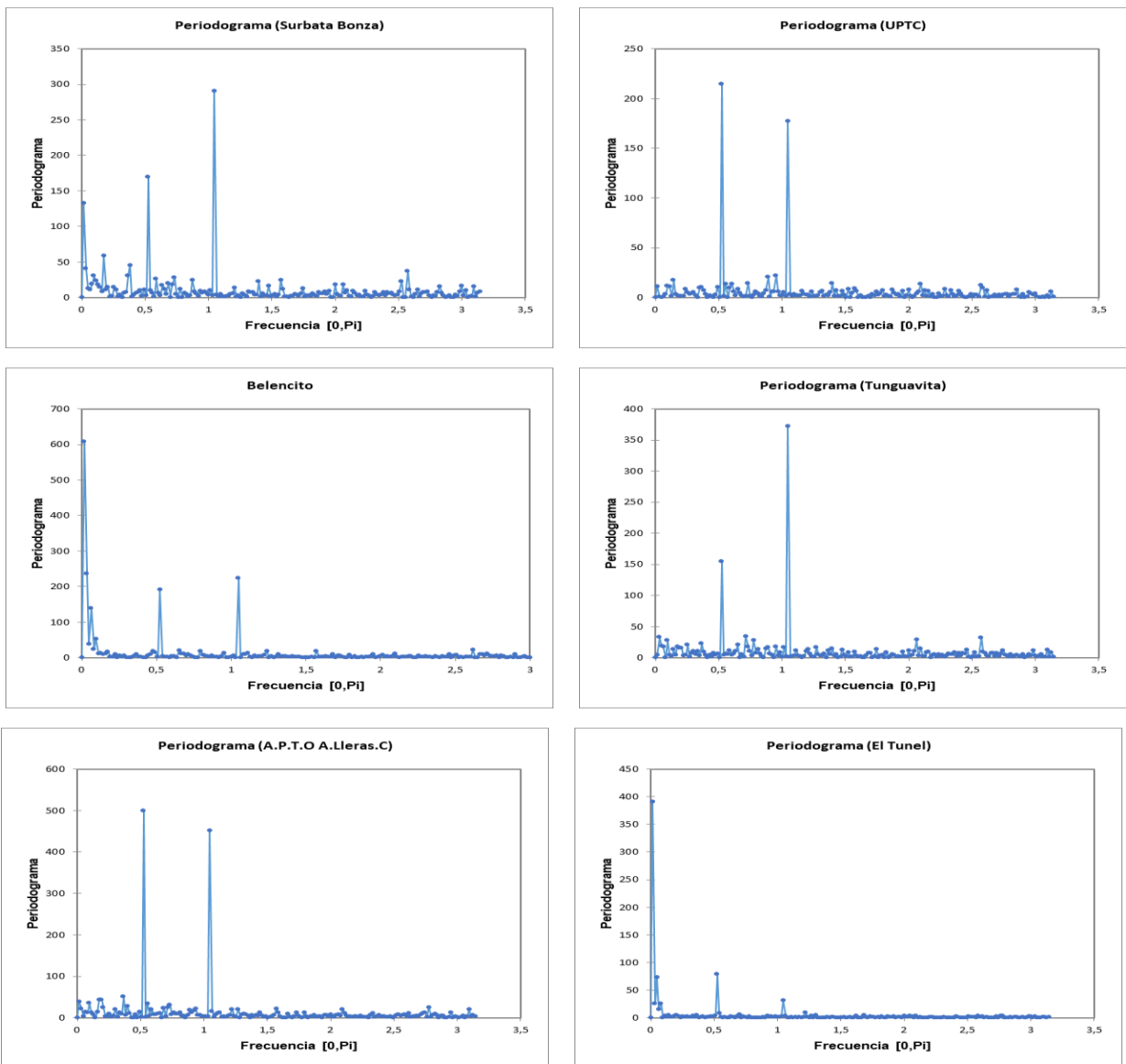


Figura Anexo 39. Función de densidad espectral de temperatura mínima a nivel mensual.