



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático

Olga Lucía Ocampo López

Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Manizales, Colombia
2012



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático

Olga Lucía Ocampo López

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

Director:

Ph.D., Jorge Julián Vélez Upegui

Codirectora:

Especialista Adela Londoño Carvajal

Línea de Investigación:

Ingeniería Ambiental

Grupo de Investigación:

Hidráulica e Ingeniería Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química
Manizales, Colombia
2012

A mis hijos: Daniel y Valeria

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a las siguientes instituciones que colaboraron con la información o facilitaron las herramientas de software para la realización del trabajo:

Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC. Ing. Luis Miguel Alzate, Hidrometeorología

Centro Nacional de Investigaciones del Café, CENICAFE. Dr. Álvaro Jaramillo Robledo, Investigador científico III, Agroclimatología.

Corporación Autónoma Regional de Caldas, CORPOCALDAS. Ing. Mariela Londoño. Subdirectora de Recursos Naturales y Medio Ambiente.

Laboratorio de Hidráulica y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Ing. Mauricio Aristizábal, profesor de Sistemas de Información Geográfica - SIG

Universidad de Caldas. Centro de Sistemas de Información Geográfica SIG. Geólogo Alejandro Arenas

Universidad Autónoma de Manizales, UAM. Dr. Carlos Barco, por su asesoría en el manejo estadístico de la información.

Resumen

El análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná es un estudio técnico de diagnóstico que aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico. Incluye la caracterización física y climática y el balance hidrológico. La investigación estima las alteraciones en las variables climatológicas, en el régimen hidrológico y en la oferta hídrica por variabilidad climática; evalúa los cambios en la temperatura, la precipitación y la escorrentía por los eventos cálidos- El Niño- y fríos-La Niña- del fenómeno ENSO- Oscilación del Sur. Empleando indicadores del régimen hidrológico, identifica y confirma aspectos críticos como la baja capacidad de retención y regulación hídrica, el stress hídrico por disponibilidad per-cápita de agua; la presión por el uso y la alteración muy alta de la calidad del agua; indicadores que se traducen en una alta vulnerabilidad hídrica de la cuenca. A partir del análisis estadístico de las series históricas se evidencian las señales de cambio climático, reflejadas en aumento de las temperaturas medias en 0,5°C, mínimas en 0,45°C y máximas en 0,25°C, en promedio, para el período 1981-2010, con respecto al registro histórico-1951-1980 y el incremento en la frecuencia de las precipitaciones extremas-percentil 95 y 99-. En relación a la oferta, el balance hídrico reporta reducciones, en algunas estaciones hidrológicas. Las cuencas de alta montaña andinas como el río Chinchiná son vulnerables a los cambios climáticos; la vulnerabilidad por desabastecimiento se ha incrementado de moderada a alta por la muy baja capacidad de regulación y retención hídrica y el uso moderado del recurso; sin embargo, dicha vulnerabilidad podría acentuarse con el cambio climático, por efecto de la posible reducción en la oferta y por una mayor demanda de agua por el crecimiento de la población y de las actividades económicas.

Palabras clave: Vulnerabilidad

Multidisciplinarias: Balance Hídrico, Cambio Climático, Impacto, Variabilidad Climática.

Chinchina River Basin Vulnerability analysis for stationary conditions and Climate Change

Abstract

Chinchina River Basin vulnerability analysis is a diagnostic technical study which provides basic and strategic information for integrated water resource management. It includes physical and climatic watershed characterization and hydrological balance. The research estimates changes in climatic variables, hydrological regime and water supply due to natural climate variability. Effects on temperature, rainfall and runoff produced by “El Niño” and “La Niña” are also evaluated. Using hydrological indicators, critical issues such as low retention and water regulation capacity, water stress by per capita water availability, pressure for water use, water pollution and high vulnerability have been confirmed. Statistics analysis of historical series has shown signs of climate change by increasing in average temperatures of 0,50°C; 0,45°C in minimum temperatures and 0,25° in maximum temperatures for the period 1981-2010 in relation to the historical record-1951-1980. In addition, increasing frequency of extreme rainfall events over the 95 and 99 percentile has been detected. Regarding water balance, hydrological simulation of rainfall-runoff phenomenon has projected reduction in water supply. The Andean mountain Chinchina River Basin is vulnerable to climate change; however, the potential water availability reduction and the increasing demand from a population growth and economic activities would accentuate the water resources vulnerability.

Keywords: Vulnerability, Climate Change, Water Balance, Impacts, climate variability.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de Figuras	14
Lista de Tablas	18
Introducción	21
1. Estado del Arte	22
1.1 Vulnerabilidad del Recurso hídrico	22
1.2 Variabilidad climática	23
1.3 Cambio Climático	28
1.3.1 Cambio climático y efectos en los recursos hídricos a escala global	28
1.3.2 Efectos en los recursos hídricos en América Latina	34
1.3.3 Efectos en los recursos hídricos en Colombia	35
1.4 Modelos hidrológicos y análisis de vulnerabilidad	40
1.4.1 Modelación Hidrológica	40
1.4.2 Modelación Hidrológica y cambio climático	42
1.4.3 SIG para la caracterización de cuencas hidrográficas	45
2. Metodología.....	47
2.1 Objetivos	47
2.2 Metodología	47
2.2.1 Caracterización de la cuenca – Metodología	49
2.2.2 Balance hidrológico - Metodología	52
2.2.3 Señales de cambio climático - Metodología	61
2.2.4 Alteraciones por variabilidad climática – Metodología	62
2.2.5 Análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico - Metodología	62
2.2.6 Posibles indicadores futuros - Metodología	68
3. Caracterización física de la cuenca.....	70
3.1 Localización de la cuenca	70
3.2 Características físicas de la cuenca	71
3.2.1 Características del relieve	71
3.2.2 Sistema de drenaje.....	73
3.2.3 Características morfométricas	82
3.2.4 Geología	84
3.2.5 Textura de suelos	86

3.2.6	Usos y cobertura del suelo.....	88
4.	Caracterización Climática	93
4.1	Brillo solar	93
4.2	Humedad relativa.....	97
4.3	Radiación solar.....	99
4.4	Temperatura	102
4.4.1	Temperatura media	103
4.4.2	Temperaturas máximas.....	106
4.4.3	Temperaturas mínimas	108
4.5	Precipitación	108
4.6	Clasificación Climática.....	117
5.	Balance hidrológico	119
5.1	Modelos de balance a escala diaria	119
5.2	Modelación hidrológica a escala mensual	131
5.3	Evapotranspiración	142
5.4	Escorrentía superficial.....	146
6.	Señales de cambio climático	151
6.1	Brillo solar	151
6.2	Humedad Relativa.....	155
6.3	Radiación solar.....	158
6.4	Temperaturas.....	160
6.4.1	Temperatura media	160
6.4.2	Temperaturas máximas.....	166
6.4.3	Temperaturas mínimas	168
6.5	Precipitación	168
6.5.1	Precipitación media	168
6.5.2	Eventos extremos.....	176
6.6	Escorrentía Superficial	182
6.7	Evapotranspiración	187
7.	Alteraciones por variabilidad climática.....	188
7.1	Temperatura media	188
7.2	Precipitación	190
7.3	Escorrentía superficial.....	200
8.	Análisis de Vulnerabilidad.....	206
8.1	Indicadores del régimen hidrológico actual promedio	206
8.1.1	Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH).....	206
8.1.2	Caudales ambientales	207
8.1.3	Índice de Aridez.....	207
8.1.4	Indicadores de calidad del agua.....	208
8.1.5	Índice de disponibilidad per cápita de agua	210
8.1.6	Índice de stress hídrico relativo y uso de agua	211
8.1.6.1	Oferta hídrica disponible.....	211

8.1.6.2	Demanda hídrica	213
8.1.7	Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento	215
8.2	Alteraciones por efecto de variabilidad climática.....	215
9.	Posibles indicadores futuros	218
9.1	Bajo condiciones estacionarias	218
9.1.1	Temperatura Media	218
9.1.2	Precipitación Media	221
9.1.3	Brillo Solar	222
9.1.4	Esorrentía superficial.....	224
9.1.5	Indicadores del régimen hidrológico.....	225
9.2	Escenarios de cambio climático	226
9.2.1	Temperatura media	227
9.2.2	Precipitación media.....	232
9.2.3	Esorrentía superficial.....	240
9.2.4	Indicadores del régimen hidrológico.....	242
10.	Conclusiones	244
11.	Líneas de Investigación futuras	247
	Bibliografía	248

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.1: Variación del índice Oceánico El Niño- ONI	25
Figura 1.2: Duración de los episodios cálidos ENSO- El Niño.....	26
Figura 1.3: Duración de los eventos fríos ENSO- La Niña.....	26
Figura 1.4: Escenarios de emisiones de GEI y proyección de calentamiento global	29
Figura 1.5: Emisiones globales de CO ₂	30
Figura 1.6: Retroalimentación positiva del vapor de agua	30
Figura 1.7: Efecto de la reducción del hielo y la nieve.....	31
Figura 1.8: Variaciones en la precipitación por el cambio climático	32
Figura 1.9: Efectos e impactos del cambio climático en los recursos hídricos	33
Figura 1.10: Efectos del cambio climático en la transformación lluvia- escorrentía	34
Figura 1.11: Cambios en la temperatura media del aire y en la precipitación anual	37
Figura 1.12: Cambios en la temperatura media del aire, escenarios A2- B2.....	37
Figura 1.13: Cambios en la precipitación, escenarios A2 - B2	38
Figura 1.14: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2011-2040.....	39
Figura 1.15: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2071 a 2100	39
Figura 1.16: Tipos de modelos bajo situación climática estacionaria.....	41
Figura 1.17: Modelos hidrológicos para la evaluación de respuestas al cambio climático	43
Figura 2.1: Esquema metodológico	48
Figura 2.2: Ubicación de estaciones meteorológicas y pluviométricas	51
Figura 2.3: Esquema de tanques modelo Tetis.....	53
Figura 2.4: Descripción esquemática del balance hídrico modelo Témez.....	54
Figura 2.5: Procedimiento de cálculo del modelo Témez.....	55
Figura 2.6: Descripción esquemática del balance hídrico modelo de Thomas abcd	56
Figura 3.1: Localización de la cuenca del río Chinchiná.....	70
Figura 3.2: Modelo de Elevación Digital -MED- de la cuenca del río Chinchiná.	72
Figura 3.3: Perfil longitudinal del río Chinchiná.....	73
Figura 3.4: Mapa de pendientes de la cuenca del río Chinchiná	74
Figura 3.5: Clasificación de la cuenca según el perfil transversal del río.....	75
Figura 3.6: Mapa de direcciones de flujo de la cuenca del río Chinchiná.....	76

Figura 3.7: Mapa de áreas acumuladas de la cuenca del río Chinchiná	77
Figura 3.8: Mapa de longitudes de flujo de la cuenca del río chinchiná.....	78
Figura 3.9: Mapa de tiempos de concentración – Método de Clark	80
Figura 3.10: Mapa de tiempos de flujo –valores mínimos.....	81
Figura 3.11: Mapa de tiempos de flujo –valores máximos	82
Figura 3.12: Red de drenaje cuenca del río Chinchiná.....	83
Figura 3.13: Orden de corriente cuenca del río Chinchiná	84
Figura 3.14: Subcuencas del río Chinchiná.....	85
Figura 3.15: Descripción de las subcuencas del río Chinchiná.....	86
Figura 3.16: Subcuencas del río Chinchiná para el estudio.....	87
Figura 3.17: Mapa geológico cuenca del río Chinchiná	88
Figura 3.18: Tipos de coberturas para la cuenca del río Chinchiná.	89
Figura 3.19: Mapa de textura de suelos cuenca del río Chinchiná	90
Figura 3.20: Mapa de uso de suelos clasificación general	91
Figura 3.21: Mapa de uso de suelos y coberturas cuenca del río Chinchiná	92
Figura 4.1: Brillo solar- horas de sol al día - en las estaciones climáticas- 1981-2010	94
Figura 4.2: Distribución del brillo solar mensual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010.....	94
Figura 4.3: Brillo solar anual promedio subcuencas del río Chinchiná. 1981-2010.....	94
Figura 4.4: Mapa de brillo solar diario cuenca del río Chinchiná- 1981-2010.	95
Figura 4.5: Mapa de brillo solar anual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010.....	96
Figura 4.6: Humedad relativa promedio en las estaciones climáticas 1981-2010	97
Figura 4.7: Mapa de humedad relativa cuenca del río Chinchiná 1981-2010	98
Figura 4.8: Distribución humedad relativa estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010.....	99
Figura 4.9: Comparación radiación solar estimada vs mediciones- 2002-2010	100
Figura 4.10: Mapa de radiación solar cuenca del río Chinchiná 1981-2010	101
Figura 4.11: Radiación solar promedio en las estaciones de la cuenca-1981-2010	102
Figura 4.12: Distribución de la radiación solar cuenca del río Chinchiná	102
Figura 4.13: Distribución de temperaturas medias estaciones de páramo 2003-2010.....	103
Figura 4.14: Temperatura media cuenca del río Chinchiná 1981-2010.....	104
Figura 4.15: Relación temperatura media con la altitud cuenca del río Chinchiná	104
Figura 4.16: Mapa de temperaturas medias cuenca del río Chinchiná 1981-2010	105
Figura 4.17: Temperaturas máximas estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010.....	106
Figura 4.18: Mapa de temperaturas máximas promedio 1981-2010.....	107
Figura 4.19: Temperaturas mínimas cuenca del río Chinchiná 1981-2010.....	108
Figura 4.20: Mapa de temperaturas mínimas promedio 1981-2010.....	109
Figura 4.21: Distribución de la precipitación mensual promedio en la cuenca 1981-2010.....	111
Figura 4.22: Precipitación anual promedio en las estaciones de la cuenca 1981-2010	111
Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010	112
Figura 4.24: Mapa de precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010.....	116
Figura 4.25: Clasificación climática de Lang cuenca del río Chinchiná 1981-2010	118

Figura 5.1: Hidrogramas de calibración del modelo TETIS estación El Retiro	121
Figura 5.2: Hidrogramas de validación temporal del modelo TETIS estación El Retiro	122
Figura 5.3: Validación espacial del modelo TETIS	123
Figura 5.4: Curva de duración de caudales -2002-2009	124
Figura 5.5: Curva de duración de caudales- factores de calibración Tabla 5.1.....	126
Figura 5.6: Calibración del modelo hidrológico – 2006-2007	128
Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual – El Retiro 1981-2009	135
Figura 5.8: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Chupaderos 1988-2009..	139
Figura 5.9: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Sancancio 1981-2009	140
Figura 5.10: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Montevideo 1981-2009	141
Figura 5.11: Mapa de Evapotranspiración real anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010	143
Figura 5.12: Comparación Evapotranspiración cuenca del río Chinchiná modelo Cenicafé	144
Figura 5.13: Comparación evapotranspiración Posgrados vs estimada en Sancancio 2002-2010	144
Figura 5.14: Balance hídrico Lluvia- Evapotranspiración 1981-2010.....	145
Figura 5.15: Evapotranspiración promedio anual 1981-2010	146
Figura 5.16: Variación de caudales medios con el área de la cuenca.....	148
Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca	148
Figura 5.18: Caudales promedio mensual	150
Figura 5.19: Escorrentía superficial promedio mensual	150
Figura 5.20: Escorrentía superficial promedio anual	150
Figura 6.1: Análisis interdecadal brillo solar diario promedio	152
Figura 6.2: Distribución de brillo solar diario promedio tridecadal.....	153
Figura 6.3: Comportamiento de la humedad relativa media estaciones El Cisne y Letras.....	155
Figura 6.4: Humedad relativa promedio interdecadal.....	156
Figura 6.5: Distribución de humedad relativa promedio tridecadal.....	157
Figura 6.6: Radiación solar promedio kW-h/m ² estaciones cuenca alta	159
Figura 6.7: Promedio de la radiación solar estimada tridecadal	159
Figura 6.8: Comportamiento de las temperaturas en las estaciones de páramo.....	161
Figura 6.9: Comportamiento de las temperaturas estaciones cuenca alta	163
Figura 6.10: Temperatura media diaria promedio interdecadal	164
Figura 6.11: Distribución de temperatura media análisis tridecadal.....	165
Figura 6.12: Distribución de temperaturas máximas análisis tridecadal.....	167
Figura 6.13: Distribución de temperaturas mínimas promedio tridecadal	169
Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal	173
Figura 6.15: Anomalías en la precipitación anual	175
Figura 6.16: Precipitación máxima estaciones cuenca del río Chinchiná	176
Figura 6.17: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 95	177
Figura 6.18: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 99	177
Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV	178
Figura 6.20: Curvas de Precipitación-Área-Duración (24 horas)-Frecuencia	182

Figura 6.21: Caudales promedio interdecadales.....	183
Figura 6.22: Caudales promedio tridecadales.....	183
Figura 6.23: Distribución de caudales promedio tridecadales.....	184
Figura 6.24: Caudales promedio tridecadales – Agosto.....	184
Figura 6.25: Caudales promedio tridecadales- Noviembre	185
Figura 6.26: Comportamiento evapotranspiración potencial y real.....	187
Figura 7.1: Evolución de la anomalía estandarizada en la temperatura media y el ONI	189
Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI.....	190
Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña	195
Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña.....	196
Figura 7.5: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos El Niño	198
Figura 7.6: Comportamiento precipitación mensual máxima	199
Figura 7.7: Comportamiento de la precipitación mensual mínima 1981-2010.....	200
Figura 7.8: Escorrentía superficial mensual río Chinchiná 1981-2010.....	200
Figura 7.9: Comportamiento del caudal en las estaciones del río Chinchiná	201
Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI	202
Figura 7.11: Alteración del caudal medio por eventos fríos La Niña	204
Figura 7.12: Alteración del caudal medio por eventos cálidos El Niño.....	205
Figura 8.1: Variación mensual del Índice de Aridez 1981-2009.....	208
Figura 8.2: Índice de Calidad ICA.....	208
Figura 8.3: Concentración de contaminantes	209
Figura 8.4: Índice de Contaminación ICOMO.....	210
Figura 8.5: Evolución de la población cuenca del Río Chinchiná	211
Figura 8.6: Participación sectorial de la demanda potencial de agua en Colombia-2008.....	213
Figura 9.1: Tendencias en temperatura media promedio anual y curvas suavizadas	219
Figura 9.2: Tendencias en brillo solar promedio anual y curvas suavizadas.....	222
Figura 9.3: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020].....	228
Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020].....	229
Figura 9.5: Temperatura media 2010-2039 [2020] vs normal climatológica.....	231
Figura 9.6: Precipitación media mensual HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]	233
Figura 9.7: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca alta.....	235
Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja..	235
Figura 9.9: Caudal promedio mensual estación El Retiro Escenario A2	241
Figura 9.10: Posibles cambios climáticos 2011-2040 (IDEAM, 2010)	241
Figura 9.11: Sensibilidad y Vulnerabilidad al Cambio climático (IDEAM, 2010)	243

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1.1: Modelos hidrológicos empleados en estudios de impacto del cambio climático.....	44
Tabla 2.1: Estaciones meteorológicas y pluviométricas	50
Tabla 2.2: Expresiones para el cálculo de la radiación solar a partir del brillo solar	52
Tabla 2.3: Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación	60
Tabla 2.4: Calificación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	63
Tabla 2.5: Calificación del Índice de aridez	63
Tabla 2.6: Umbrales del índice de stress hídrico	64
Tabla 2.7: Categorías para la evaluación del índice de uso de agua.....	65
Tabla 2.8: Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica	66
Tabla 2.9: Categorías del índice de disponibilidad per cápita de agua.....	67
Tabla 2.10: Categorías del índice de alteración de calidad del agua	67
Tabla 2.11: Matriz de relación para categorizar el índice de vulnerabilidad	68
Tabla 3.1: Cálculo del tiempo de concentración, tc.....	79
Tabla 3.2: Estaciones de caudal cuenca del río Chinchiná.....	81
Tabla 3.3: Características morfométricas cuenca del río Chinchiná	83
Tabla 3.4: Formaciones superficiales.....	89
Tabla 4.1: Modelo de regresión lineal humedad relativa- altitud	99
Tabla 4.2: Modelo de regresión lineal temperatura media- altitud	106
Tabla 4.3: Clasificación Climática- Caldas	117
Tabla 4.4: Clasificación de Lang	117
Tabla 5.1: Factores de calibración modelo TETIS estación El Retiro.....	120
Tabla 5.2: Resultados de calibración del modelo TETIS.....	121
Tabla 5.3: Resultados de validación temporal del modelo TETIS	122
Tabla 5.4: Resultados de la validación espacial del Modelo TETIS	125
Tabla 5.5: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en El Retiro	125
Tabla 5.6: Factores de calibración modelo TETIS estación Montevideo	127
Tabla 5.7: Funciones objetivo para la calibración estación Montevideo 2006-2007	127
Tabla 5.8: Validación de factores obtenidos en la calibración en la estación Montevideo	129
Tabla 5.9: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Montevideo	129
Tabla 5.10: Factores de calibración modelo TETIS en la estación Sancancio	130
Tabla 5.11: Funciones objetivo para la calibración en la estación Sancancio	130
Tabla 5.12: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Sancancio.....	131
Tabla 5.13: Resultados comparativos de calibración modelos hidrológicos escala mensual	133

Tabla 5.14: Resultados comparativos de validación modelos hidrológicos escala mensual	134
Tabla 5.15: Simulación modelos hidrológicos estación El Retiro 1981-2009.....	137
Tabla 5.16: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 1988-1997.....	138
Tabla 5.17: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 2003-2009.....	138
Tabla 5.18: Simulación modelos hidrológicos estación Sancancio 1981-2009	139
Tabla 5.19: Simulación modelos hidrológicos estación Montevideo 1996-2008	141
Tabla 5.20: Modelos para el cálculo de la Evapotranspiración.....	142
Tabla 5.21: Caudales medios 1981-2009	147
Tabla 5.22: Rendimiento hídrico.....	147
Tabla 6.1: Anomalías en el brillo solar anual promedio 1981-2010	154
Tabla 6.2: Anomalías promedio en el brillo solar anual	154
Tabla 6.3: Cambios en la humedad relativa.....	158
Tabla 6.4: Anomalías en el humedad relativa promedio	158
Tabla 6.5: Cambios en la radiación solar estimada.....	160
Tabla 6.6: Temperatura media anual por década.....	164
Tabla 6.7: Temperatura media anual tridecadal.....	166
Tabla 6.8: Anomalía en la temperatura media 1981-2010	166
Tabla 6.9: Temperatura máxima promedio anual tridecadal	167
Tabla 6.10: Temperatura mínima promedio anual tridecadal.....	168
Tabla 6.11: Distribución de probabilidad de lluvia diaria	170
Tabla 6.12: Significancia estadística análisis de varianza precipitación interdecadal.....	171
Tabla 6.13: Significancia estadística análisis de varianza precipitación tridecadal.....	172
Tabla 6.14: Significancia estadística análisis de varianza series de precipitación tridecadal	172
Tabla 6.15: Anomalías en la precipitación anual	176
Tabla 6.16: Análisis de verosimilitud o probabilidad conjunta	181
Tabla 6.17: Anomalías en los caudales observados	185
Tabla 6.18: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala diaria	186
Tabla 6.19: Anomalías estimadas en los caudales promedio –escala diaria	186
Tabla 6.20: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala mensual	186
Tabla 7.1: Coeficientes de correlación Anomalía en la precipitación-índice ONI	194
Tabla 7.2: Anomalía estandarizadas en la precipitación promedio 1981-2010 ENSO.....	199
Tabla 8.1: Índice de retención y regulación hídrica- IRH. 1981-2009	206
Tabla 8.2: Caudales ambientales 1981-2009	207
Tabla 8.3: Índice de Aridez 1981-2009	207
Tabla 8.4: Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua- IACAL.....	210
Tabla 8.5: Población de la cuenca del río Chinchiná	211
Tabla 8.6: Oferta hídrica total promedio 1981-2009.....	212
Tabla 8.7: Oferta hídrica neta	212
Tabla 8.8: Demanda de agua municipios de la cuenca del río Chinchiná- Mm ³ /año	213
Tabla 8.9: Demanda de agua agrícola.....	214
Tabla 8.10: Demanda de agua sin considerar sector eléctrico	214
Tabla 8.11: Indicadores del régimen hidrológico medio 1981-2010	215
Tabla 8.12: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año seco	216
Tabla 8.13: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año húmedo	217

Tabla 9.1: Modelos de tendencias de la temperatura media anual promedio	220
Tabla 9.2: Proyecciones de aumento en la temperatura media anual.....	220
Tabla 9.3: Modelos de tendencias de la precipitación media anual promedio.....	221
Tabla 9.4: Proyecciones de cambio en la precipitación anual promedio	222
Tabla 9.5: Modelos de tendencias del brillo solar anual promedio.....	224
Tabla 9.6: Proyecciones del brillo solar por análisis de tendencias.....	224
Tabla 9.7: Estimación de caudal para el período 2011-2040 condiciones estacionarias.....	225
Tabla 9.8: Indicadores del régimen hidrológico proyección de tendencias	225
Tabla 9.9: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario A2.....	232
Tabla 9.10: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario B2.....	232
Tabla 9.11: Anomalía en la precipitación modelo HADCHM3-A2 2010-2039 [2020]	238
Tabla 9.12: Anomalía en la precipitación modelo CSIRO-A2 2010-2039 [2020].....	238
Tabla 9.13: Precipitación media observada y estimaciones escenario A2	239
Tabla 9.14: Anomalías en la precipitación anual promedio	240
Tabla 9.15: Caudal y anomalías promedio estimadas 2010-2039	240
Tabla 9.16: Indicadores del régimen hidrológico proyecciones futuras.....	242

Introducción

Colombia, aunque sólo contribuye con el 0,37% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero-GEI (2004), es vulnerable al cambio climático. Profundizar en el conocimiento de los impactos permitirá el diseño e implementación de medidas efectivas de adaptación. Las cuencas de alta montaña son especialmente vulnerables y por tanto, son requeridos estudios locales que estimen los impactos presentes y potenciales del cambio climático y la variabilidad climática.

El caso de estudio comprende la cuenca del río Chinchiná, localizada en la región centro sur del departamento de Caldas (Colombia), cuenca de alta montaña, que nace en el Parque Natural de Los Nevados a una altura de 5400 m.s.n.m.; ecosistema estratégico y biodiverso que concentra el 55% de la población del departamento de Caldas y la producción industrial y agropecuaria, principalmente cafetera, de los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná, Neira y Palestina, generando el 80% del PIB de Caldas.

La investigación incluye el análisis del comportamiento histórico, desde mediados del siglo pasado hasta el período actual, de las variables climatológicas: temperaturas-máximas, medias y mínimas-, brillo solar, humedad relativa, radiación solar y precipitación; calcula las anomalías y las tendencias en las variables climáticas; evalúa la influencia de dichas variables en el balance hidrológico y en la oferta hídrica; determina los indicadores del régimen hidrológico como los índices de retención y regulación hídrica, el de “stress” hídrico, el uso de agua y su posible variación en el tiempo. Incluye el análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico a la variabilidad climática, las alteraciones en la precipitación y la escorrentía por El Niño y La Niña y finalmente, estima los posibles efectos en el régimen hidrológico y en la oferta hídrica bajo condiciones de cambio climático.

El análisis de las variables climatológicas fue realizado a partir de los registros diarios de las estaciones meteorológicas (12) y pluviométricas (12) ubicadas en la cuenca, información suministrada por el IDEAM, La CHEC, CENICAFE y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Los Sistemas de Información Geográfica, SIG, fueron empleados para generar los mapas requeridos en el estudio hidrológico. Los modelos conceptuales y físicamente basados TETIS y Thomas fueron utilizados en el balance hidrológico, al igual que el modelo estadístico ARMA. El análisis gráfico fue realizado con las herramientas de Microsoft Excel; el análisis estadístico fue efectuado con el software SSPS y las distribuciones de probabilidad con AFINS 2.0.

1. Estado del Arte

1.1 Vulnerabilidad del Recurso hídrico

El cambio climático ha generado un nivel de atención sin precedentes en los últimos años; no sólo es prioridad de los países desarrollados, quienes están pactando medidas para mitigarlo, sino que es una creciente preocupación, en especial en los países en vías de desarrollo, por los posibles impactos negativos y la imperante necesidad de acciones de adaptación¹ (Comisión Económica para el América Latina y el Caribe [CEPAL], 2009).

Lamentablemente, la adaptación al cambio climático aún es espontánea y reactiva y se enfoca en la atención de desastres (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2006). Para responder al cambio climático se requiere un proceso gestión del riesgo, entendido como el producto de la probabilidad de un suceso por sus consecuencias. La capacidad de gestionar dichos riesgos sin sufrir pérdidas de bienestar, potencialmente irreversibles a largo plazo, es la vulnerabilidad, la cual revela el grado de desarrollo de una determinada región o la capacidad de afrontar los desastres ocasionados por las variaciones climáticas (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2008). La vulnerabilidad depende de la capacidad de adaptación y de la sensibilidad del sistema² (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007).

Hay evidencia que los recursos hídricos son vulnerables al cambio climático y que las consecuencias sobre la sociedad y los ecosistemas dependen de las medidas de adaptación (IPCC, 2008; IPCC, 2007). El estrés hídrico y los problemas de calidad del agua son los eventos adversos más probables a escala global (IPCC, 2007). Se estima además, una mayor demanda de agua para el riego en los climas cálidos, lo cual puede generar un incremento de la competencia por el uso entre los distintos sectores (Magrin et.al., 2007; Rosenzweig et.al., 2004).

¹ La adaptación es el grado en que es posible efectuar ajustes en las prácticas, procesos y estructuras de los sistemas, en función de los cambios previstos o reales del clima (IPCC, 2007).

² La sensibilidad es el nivel de reacción a un cambio en las condiciones climáticas (IPCC, 2007).

Es necesario, por tanto, analizar la vulnerabilidad de los recursos hídricos, para cualificar el grado de fragilidad de la fuente con respecto al abastecimiento y a la amenaza de sequía cuando se presentan períodos con condiciones climáticas extremas (Vincent, 2007; IPCC, 2007; Sharma, 2009). La vulnerabilidad se puede abordar evaluando la susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hidrológico actual y determinando la vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico (Salazar, 2008).

Por su ubicación geográfica y las características topográficas, los países de América Latina son vulnerables al cambio climático (PNUMA, 2006; Magrin et.al., 2007). En la región se evidencia un aumento de los eventos meteorológicos extremos, los cuales han causado inundaciones, sequías y deslizamientos (IPCC, 2007); sin embargo, algunos son atribuibles a los fenómenos del Niño y la Niña que a su vez, pueden estar influidos por el cambio climático (CEPAL, 2009).

Colombia es vulnerable al cambio climático y los posibles efectos han sido descritos en las comunicaciones Nacionales a la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (Instituto de Meteorología, Hidrología y Asuntos Ambientales, [IDEAM], 2001; 2010), dichos informes presentan las evaluaciones de vulnerabilidad y los posibles efectos futuros basados en los escenarios de emisión; muestran variaciones en las precipitaciones y la temperatura y reducción de las reservas de agua de las zonas de páramo y humedales.

1.2 Variabilidad climática

En Colombia, el clima está determinado por la ubicación del país en la zona tropical y por factores geográficos y atmosféricos como la precipitación, la intensidad de radiación solar, la temperatura, los sistemas de vientos, la altitud, la continentalidad y la humedad atmosférica. Estos aspectos crean un amplio espectro de climas y microclimas que van desde los más calurosos hasta lo más fríos en los picos de las montañas de las Cordilleras de los Andes (IDEAM, 2010; IDEAM, 2005; Jaramillo, 2005).

Las variables climatológicas incluyen la temperatura, la humedad, la presión, el viento y la precipitación, entre otras. Las temperaturas medias mensuales y los regímenes de precipitación son las más importantes, porque las demás variables están relacionadas entre sí. En climatología se utilizan los valores promedios para definir y comparar el clima. La normal climática es una medida utilizada con este propósito y representa el valor promedio de una serie continua de observaciones de una variable climática, durante un periodo de por lo menos 30 años (IDEAM, 2005).

En diferentes años, los valores de las variables climatológicas fluctúan por encima o por debajo de la normal climatológica³. La secuencia de estas oscilaciones, alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce como Anomalía (IDEAM, 2005).

El clima varía naturalmente en diferentes escalas de tiempo y espacio; dentro de sus fluctuaciones temporales se tiene (IDEAM, 2005; Montealegre, 2005):

- **Intraestacional:** oscilaciones que determinan las condiciones de tiempo durante semanas. Se destaca una señal de tipo ondulatorio de 30-60 días.
- **Estacional:** corresponde a la fluctuación del clima a nivel mensual. La migración de la Zona de Confluencia Intertropical- ZCIT-, es considerada como una de las más importantes fluctuaciones climáticas de la escala estacional y su dinámica explica, en un alto grado, la variabilidad de la precipitación en Colombia.
- **Interanual:** A esta escala corresponden las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año. La variabilidad climática, enmarcada dentro de esta escala, podría estar relacionada con alteraciones en el balance global de radiación. Un ejemplo típico de la variabilidad climática interanual corresponde a los fenómenos El Niño - La Niña - Oscilación del Sur.
- **Interdecadal:** En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. Comparativamente con la variabilidad interanual, la amplitud de estas oscilaciones es menor. Sin embargo, estas fluctuaciones de largo plazo influyen notablemente en las actividades humanas y resultan muy importantes en la determinación de posibles tendencias en las variables climáticas.

La variabilidad climática natural depende de las condiciones atmosféricas que presentan anomalías frente a la normal climatológica (IDEAM, 2005). Los fenómenos naturales que producen eventos extremos son frentes fríos, estacionarios, secos, huracanes, perturbaciones tropicales y células con una humedad desproporcionada, los cuales pueden provocar precipitación excesiva o sequías prolongadas. En Colombia (IDEAM, 2005), al igual que en muchas partes del mundo (CEPAL, 2009; IPCC, 2007; Trenberth & Thomas, 2003; Adger et. al, 2007), se considera que tales fenómenos están relacionados con la Oscilación del Sur-El Niño.

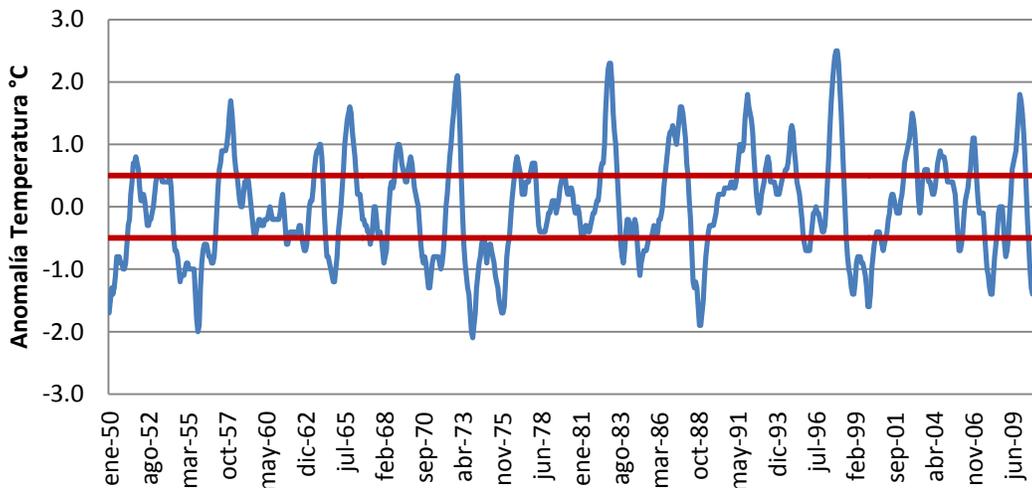
El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es el modo dominante de variabilidad climática en Latinoamérica y es el evento natural de mayor impacto socioeconómico (IPCC, 2008). Es un fenómeno global de interacción entre el océano y la atmósfera, que origina fluctuaciones de la temperatura superficial y de la presión del aire en el océano Pacífico, en cuyo transcurso se alternan episodios cálidos y fríos, más conocidos como El Niño y La Niña, respectivamente (PNUD,

³ La normal climatológica es la información (promedios multianuales, amplitud, valores máximo y mínimo, varianza) de las variables climatológicas para el periodo de referencia; representa el clima presente; sobre este período se cuantifican los cambios al compararlo con las variables en otro periodo (IDEAM, 2010).

2000; The National Oceanic and Atmospheric Administration [NOOA], 2011). Este evento está asociado con un dramático cambio en el régimen de precipitaciones (Randall, 1998) y es el principal modo global de variabilidad del clima en un plazo de 2 a 7 años (Dore, 2004). La antítesis del Niño es la Niña (Phinlander, 1990).

Cada fenómeno ENSO tiene particularidades específicas (IDEAM, 2005). La Figura 1.1 presenta la variación del Índice Oceánico El Niño (ONI), medido como la media móvil de 3 meses consecutivos, de las anomalías de la temperatura superficial en la región central del Océano Pacífico (5°N-5°S, 120°-170°W), para el período de referencia 1971-2000. En los episodios fríos las anomalías son inferiores a -0,5°C y en los cálidos superiores a 0,5°C (NOOA, 2011).

Figura 1.1: Variación del índice Oceánico El Niño- ONI



Fuente datos: (NOOA, 2011)

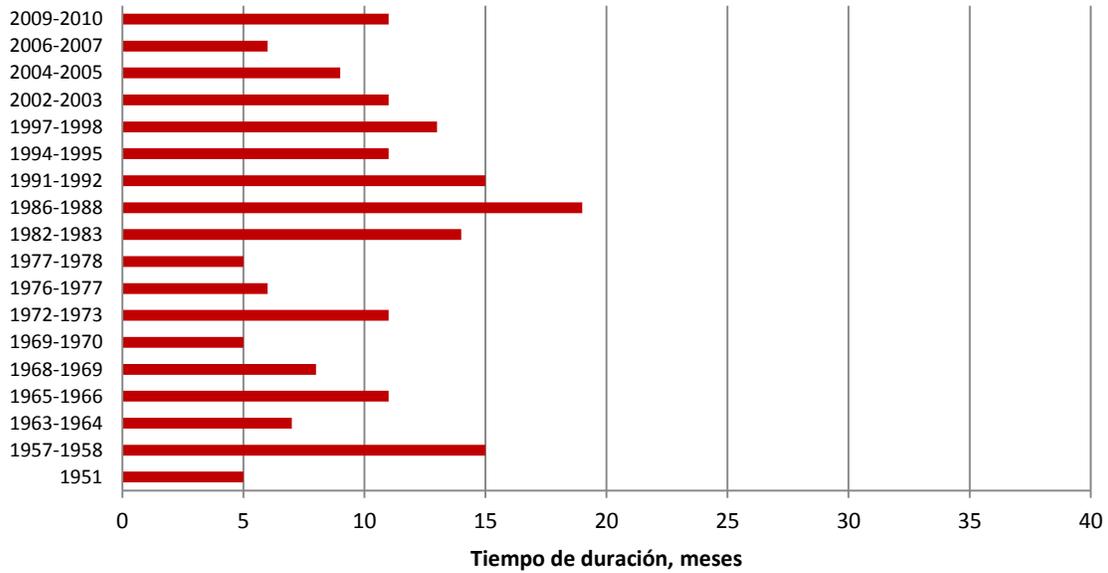
Los registros históricos (NOOA, 2011) contienen información sobre la duración e intensidad de los episodios cálidos, los cuales se compilan en la Figura 1.2. Los eventos más intensos, según el índice Oceánico Niño, se presentaron en los períodos:

- Mayo 1972 a Marzo 1973, $ONI_{media} = 1,32$.
- Mayo 1982 a Junio 1983, $ONI_{media} = 1,39$.
- Mayo 1997 a Mayo 1998, $ONI_{media} = 1,74$.
- Junio 2009 a junio 2010, $ONI_{media} = 1,15$.

Con respecto a los episodios fríos (Figura 1.3); los más marcados se registraron durante:

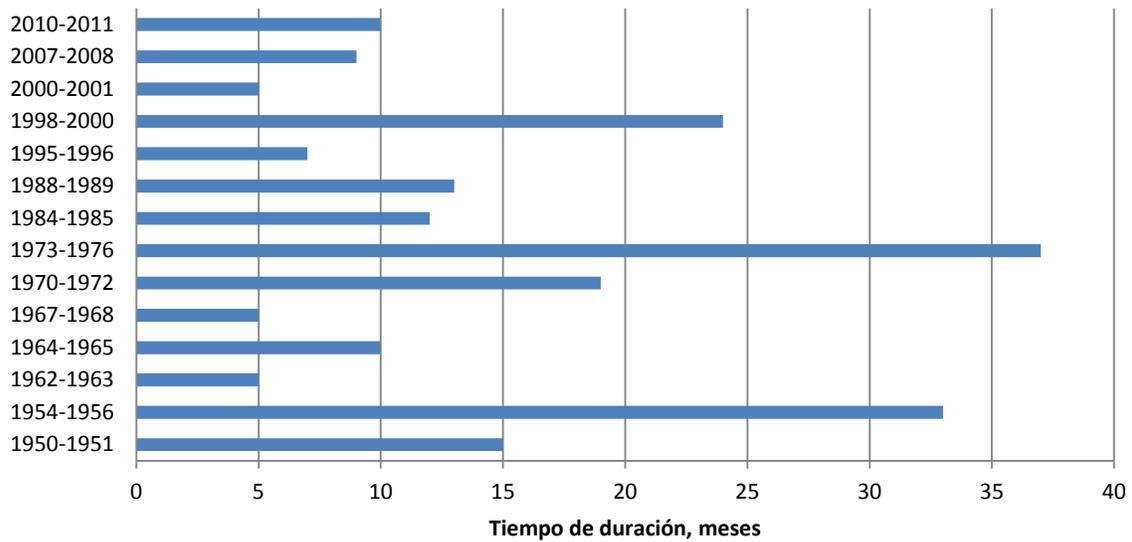
- Mayo 1973 a Mayo 1976, $ONI_{media} = -1,11$
- Mayo 1988 a Mayo 1989, $ONI_{media} = -1,29$
- Julio 2010 a Abril 2011, $ONI_{media} = -1,11$

Figura 1.2: Duración de los episodios cálidos ENSO- El Niño



Fuente datos: (NOOA, 2011)

Figura 1.3: Duración de los eventos fríos ENSO- La Niña



Fuente datos: (NOOA, 2011)

En Colombia, los cambios en el régimen de lluvias tienen efectos muy diversos influenciados por el Niño y La Niña (IDEAM, 2010); es posible observar comportamientos diferenciados de los

desastres por fenómenos hidrometeorológicos: incremento durante La Niña y disminución en episodios del Niño (Velásquez & Rosales, 2002).

Los principales efectos del Niño en Colombia son (IDEAM, 2009; Velásquez & Rosales, 2002): el incremento de la temperatura atmosférica, durante las horas del día, en las regiones Pacífica, Andina y valles interandinos; disminución de la temperatura atmosférica en horas de la madrugada, especialmente en los altiplanos andinos; déficit de precipitación en las regiones Andina, Caribe y en la porción norte de la Pacífica; incremento de la radiación ultravioleta que alcanza la superficie de la tierra; disminución del caudal de los ríos en el centro, occidente y norte de Colombia (Poveda et al., 2004; 2006; 2011); perturbación significativa de las precipitaciones, la humedad del suelo y la evapo-transpiración (Poveda & Mesa, 1997; Poveda et al. 2011).

El Niño genera impactos en la vegetación y el suelo por pérdida de humedad y de aglutinantes, lo cual facilita la propagación de incendios y los movimientos de masa cuando llega la temporada de lluvias (IDEAM, 2009; Velásquez & Rosales, 2002). Se han detectado efectos sobre la pesca marítima; en el transporte fluvial por la reducción entre 10% y 25% de los volúmenes de carga transportada por ríos; en el sector hidroeléctrico, por la disminución de los niveles de embalses y represas, con incrementos tarifarios; y en la salud por aumento de enfermedades tropicales como malaria, dengue y cólera (Banco de la República, 2007).

La región Andina es una de las más afectadas por el fenómeno del Niño. Los períodos con sequías más extendidas se han registrado en los años 64-65, 72-73, 76-77 y 91-92, con más de un semestre consecutivo; se presentaron además sequías en semestres aislados en más del 50% del territorio, en los años 67 B, 83 B, 85 A, 87 A y 97 B (IDEAM, 2005).

El Niño afecta considerablemente los recursos hídricos (Randall, 1998; Poveda et al. 2011). En Colombia, los caudales mínimos en épocas del Niño, se reducen en promedio en un 20% (Fondo para la Reconstrucción y desarrollo del Eje Cafetero, [FOREC] et al., 2000); en la cuenca del río Cauca, provoca una disminución del flujo medio del 30% con pérdidas hasta del 80% en algunos tributarios (Carvajal et al., 1998), mientras que en la cuenca del río Magdalena se registran pérdidas en el caudal del 55% (IDEAM, 2004).

En el fenómeno opuesto, La Niña, los vientos alisios del sur se intensifican frente a las costas suramericanas y provocan una reducción de la temperatura del océano Pacífico (NOOA, 2011; IDEAM, 2009). Influye en el clima nacional y produce disminución en la temperatura ambiente; incremento de las lluvias en las regiones Caribe y Andina; reducción de la radiación solar y efectos en la frecuencia de los ciclones tropicales del Caribe. Los impactos incluyen aumento significativo de los niveles de los ríos y con ellos la probabilidad de inundaciones, crecientes súbitas en las zonas de alta pendiente, y una mayor probabilidad de deslizamientos de tierra (Velásquez & Rosales, 2002; IDEAM, 2009).

En Colombia, los períodos de exceso de lluvias se presentaron principalmente en los años 1971, 1973, 1975, 1988 y 1998; se extendieron en más del 50% del territorio colombiano. La Niña produce mayores precipitaciones, por lo que los caudales máximos se incrementan entre el 70 al 170%. (FOREC et al., 2000; IDEAM, 2010). Durante el evento 2010-2011 se generaron graves inundaciones en el territorio Colombiano; la magnitud de la tragedia desbordó las facultades

ordinarias del Estado para atender la situación de desastre nacional, por el deterioro y destrucción de la infraestructura vial y urbana, derrumbes de diques y obras de contención, daños en vías, pérdidas de zonas agrícolas, de viviendas y daños en la infraestructura de los servicios públicos (Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2010).

1.3 Cambio Climático

1.3.1 Cambio climático y efectos en los recursos hídricos a escala global

El cambio climático según la CMNUCC, se refiere a un cambio en el clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global; se da además de la variabilidad natural del clima observada a lo largo de períodos de tiempo comparables (Adger et. al., 2007).

Los informes del IPCC son los principales documentos de referencia para la elaboración de estudios y políticas alrededor del tema del cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente, 2007). El cuarto informe de evaluación (IPCC, 2007), revela las siguientes cifras sobre el calentamiento global y sus efectos: “De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74°C [entre 0,56°C y 0,92°C]”.

Las estimaciones del incremento de temperatura están relacionadas con la concentración de Gases de Efecto Invernadero- GEI. Los expertos (IPCC, 2007; Stern, 2006) advierten sobre la necesidad de control y mitigación, de modo, que a finales de siglo, el aumento oscile entre 1,5°C a 2,5°C. Las proyecciones de emisión son muy utilizadas para conjeturar el cambio climático futuro y son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad al cambio climático y las evaluaciones de impacto (McCarthy et. al., 2001; IPCC, 2007).

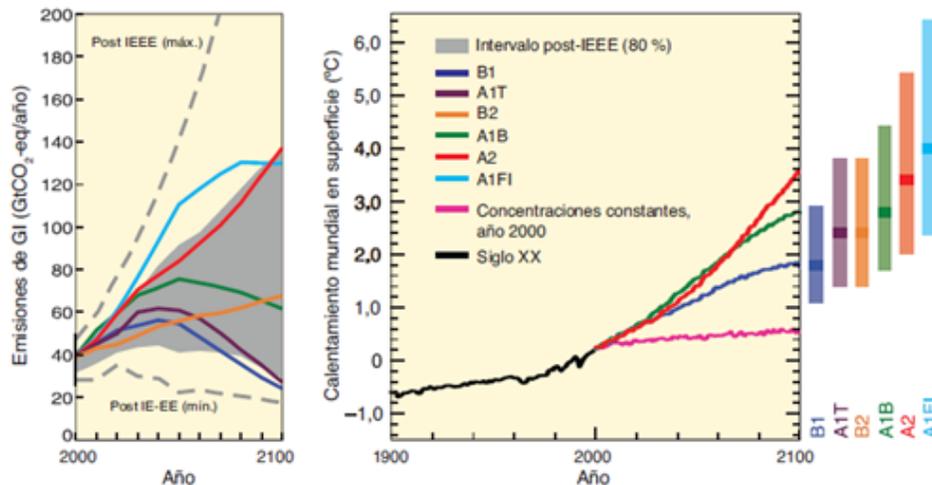
Los escenarios de emisión desarrollados por el IPCC reflejan diferentes caminos en los que el mundo se podría desarrollar y las consecuencias que conllevarían. Un escenario de emisión, es un resultado plausible y consistente, construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las actividades humanas sobre el clima (IPCC, 2007). Están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas, incorporando una serie de factores demográficos, económicos y tecnológicos, junto con las emisiones de GEI resultantes. No contemplan otras políticas climáticas además de las existentes (IPCC, 2007):

- **Escenario A1:** presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan direcciones alternativas de cambio tecnológico: A1FI: intensiva en combustibles fósiles; A1T: energías de origen no fósil; A1B: equilibrio entre las distintas fuentes.

- **Escenario B1:** describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas, hacia una economía de servicios y de información.
- **Escenario B2:** supone un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico medio, más orientado a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
- **Escenario A2:** describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, y desarrollo económico y cambio tecnológico lento.

Las proyecciones de los escenarios, desarrolladas por el IPCC (2007) se esquematizan en la Figura 1.4. En la cumbre de Copenhague, se compararon con los valores históricos registrados, llegando a las siguientes conclusiones (Allison et.al., 2009):

Figura 1.4: Escenarios de emisiones de GEI y proyección de calentamiento global

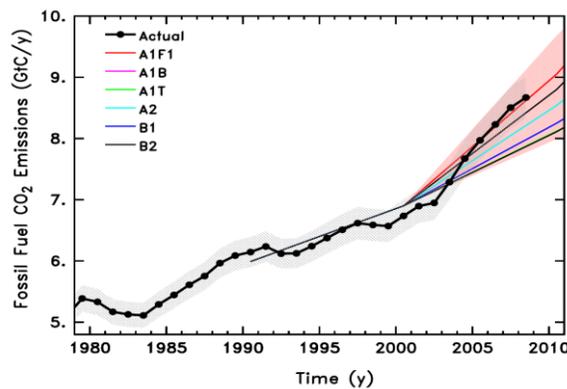


Fuente: (IPCC, 2007)

- Las emisiones globales de CO₂ de combustibles fósiles están cercanas a los escenarios más altos considerados por el IPCC (Figura 1.5).
- Se proyecta un calentamiento de la temperatura media global entre 2° a 7°C; con gran incertidumbre por las emisiones futuras.
- Hay una probabilidad muy alta que el calentamiento supere los 2°C, a menos que las emisiones globales comiencen a declinar rápidamente en el 2020.
- La tasa de calentamiento se acelerará si la retroalimentación positiva de carbono disminuye significativamente la eficiencia de la tierra y los océanos para absorber las emisiones de CO₂.
- Son muchos los indicadores que evidencian estar cercanos o por encima de los peores escenarios proyectados por el IPCC.

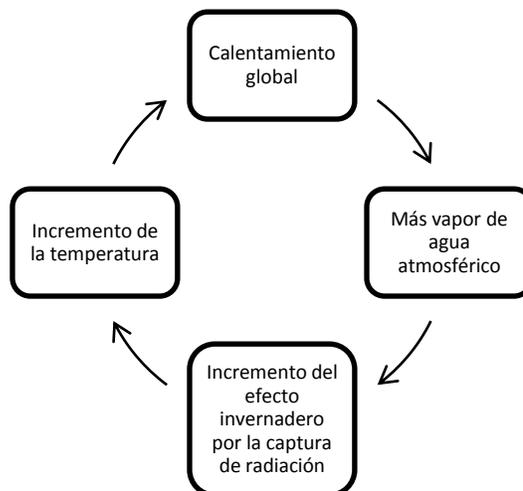
Entre las retroalimentaciones positivas al cambio climático figuran la del vapor de agua (Figura 1.6); en la medida en que el clima se calienta, se incrementa de forma exponencial la capacidad de retención del vapor de agua atmosférico; éste es un poderoso mecanismo de retroalimentación positiva que actúa amplificando el calentamiento producido por los niveles de CO₂ (Malham, 2000; Ruddiman, 2008). En efecto, los modelos y observaciones realizadas en la actualidad indican que a medida que el clima se calienta o enfría, la humedad relativa promedio global del vapor de agua calculada y observada permanece casi constante, en tanto, no sucede lo mismo con sus proporciones mezcladas (IPCC, 2007).

Figura 1.5: Emisiones globales de CO₂



Fuente: (Allison et.al., 2009)

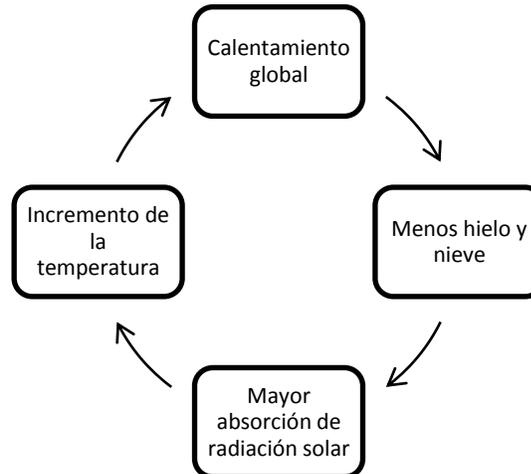
Figura 1.6: Retroalimentación positiva del vapor de agua



Un efecto adicional de retroalimentación positiva es la interrelación entre el hielo en la superficie terrestre y su capacidad de reflejar la radiación solar (albedo). Según la Figura 1.7, si la cubierta

de hielo o nieve se derrite, la superficie de la Tierra queda expuesta y por tanto, refleja menos la radiación solar incidente; por tanto, se produce más absorción de la radiación solar, y mayor calentamiento (IPCC, 2007).

Figura 1.7: Efecto de la reducción del hielo y la nieve



El ciclo hidrológico está estrechamente vinculado al balance de radiación; en respuesta a dicho balance, el sistema climático mantiene el equilibrio entre la energía entrante y saliente, mediante el ajuste de sus procesos: precipitación, temperatura, evaporación, etc. Por efecto del calentamiento, el forzamiento radiativo del clima es positivo y ha sido estimado en $1,6 \text{ W/m}^2$ (IPCC, 2007).

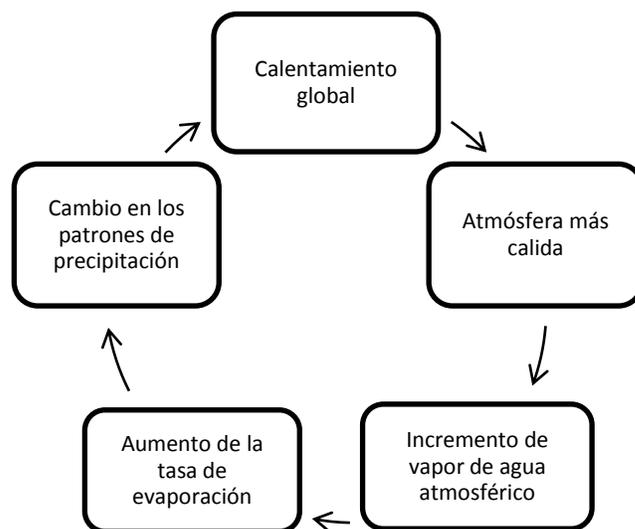
Las investigaciones recientes (IPCC, 2008) presentan correlaciones entre la temperatura y la precipitación, las cuales permiten evidenciar que los procesos que controlan el ciclo hidrológico y la temperatura están acoplados. Con respecto a la temperatura, la tendencia lineal de aumento, a escala global, es de $0,74^\circ\text{C}$ - período comprendido entre 1906 - 2005- (IPCC, 2007), que equivale a $0,13^\circ\text{C}$ por década.

Existe la probabilidad de cambio de la cantidad, la intensidad y la distribución temporal de las precipitaciones; según el IPCC (2007), la alteración de patrones de precipitación será provocada por los cambios en la circulación atmosférica y oceánica. Una atmósfera más cálida puede contener más humedad y las temperaturas más altas elevan la tasa de la evaporación, la cual a su vez afecta la precipitación (Figura 1.8). Se estima el incremento en la precipitación (Stott et. al., 2004), por la mayor evaporación de agua de los océanos (Lofgren, 2004); se predicen aumentos del 10 al 20% en latitudes por encima de 45° del Ecuador y decrementos entre el 5 al 20% en latitudes entre 5 a 40° (IPCC, 2007).

En promedio, los modelos climáticos actuales sugieren un aumento aproximado de 1 a 2 % por grado centígrado de calentamiento forzado por el CO_2 (Allen et. al., 2002). Sin embargo, dichos modelos muestran patrones complejos de cambio en la precipitación, con algunas regiones que podría recibir menos y otras más precipitación de lo actual (IPCC, 2007). La precipitación a su vez,

podría mostrar una tendencia hacia la menor frecuencia, pero mayor intensidad cuando ocurre, lo cual proyecta un aumento de la frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos (Stott et. al, 2004); en consecuencia, una mayor incidencia de inundaciones y sequías (Trenberth & Thomas, 2003). Por tanto, un ciclo hidrológico intensificado, producido por el calentamiento global, es un desafío para el manejo de las cuencas, por los posibles períodos de sequía y las temporadas de inundación.

Figura 1.8: Variaciones en la precipitación por el cambio climático



La alteración del ciclo hidrológico por el cambio climático, podría causar impactos sustanciales en la disponibilidad de los recursos hídricos (Figura 1.9); además de la probabilidad de cambio de la cantidad, la intensidad y la distribución temporal de las precipitaciones; podrían presentarse modificaciones en la escorrentía superficial y en la cantidad de agua evapotranspirada por las plantas (IPCC, 2007).

Los cambios en la temperatura y en la precipitación afectan los fenómenos de escorrentía superficial. El incremento de la precipitación no implica una mayor disponibilidad de agua superficial y subterránea. Arnell (2003) utilizó varios modelos climáticos para simular el clima del futuro y encontró un aumento en el promedio global de precipitación, pero disminuciones en la escorrentía superficial en grandes áreas. No está claro si los incrementos de la precipitación continental serán lo suficientemente grandes como para mantener los niveles actuales de escorrentía media anual (Gardner, 2009). La Figura 1.10 resume los principales factores involucrados en la transformación lluvia en escorrentía y su relación con el cambio climático.

Cualquier disminución de la escorrentía implica no solo la reducción de la oferta de agua superficial, sino también una menor humedad del suelo, por lo tanto, podría tener consecuencias adversas para la agricultura. Por tal razón, existe un gran interés en el desarrollo de métodos

para predecir el efecto del cambio climático en la descarga de los ríos (Tucker & Slingerland, 1997; Blumm & Tornqvist, 2000; Verhaar et. al, 2007).

Figura 1.9: Efectos e impactos del cambio climático en los recursos hídricos



Adaptada: (IPCC, 2008)

El cambio climático afecta el ciclo del agua y pone en riesgo varios sectores económicos, extremadamente sensibles a los cambios en el clima (IPCC, 2007). Para responder al cambio climático, se requiere un proceso de gestión de riesgos que involucra un conjunto de acciones que permiten identificar y evaluar los riesgos, con el fin de emprender en forma efectiva las medidas necesarias para enfrentarlos. Abarca la identificación, la calificación y la evaluación de los riesgos, el diseño e implementación de medidas para la adaptación, el monitoreo y la evaluación (Ocampo, 2011).

Para la gestión del riesgo climático se han empleado herramientas tecnológicas (Balaghia et.a., 2010) que permiten el monitoreo y la evaluación: desarrollo de indicadores de vulnerabilidad, establecimiento de sistemas de alerta temprana, información satelital, modelación y simulación, sistemas de información geográfica (SIG), métodos geoestadísticos, recolección y transmisión automática de datos, entre otros.

El proceso adaptativo supone ajustes para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la capacidad de recuperación tras los cambios observados y esperados en el clima (Adger et. al., 2007). Algunas estrategias de adaptación como el uso de agua de lluvia, las técnicas de almacenamiento y conservación del agua, la reutilización, la desalinización, el uso eficiente y la irrigación han sido implementadas (IPCC, 2007; Kundzewicz et. al., 2007) . Sin embargo, es necesario tener presente que dichas medidas deben centrarse en mejorar el uso sostenible de los recursos naturales (International Institute for Sustainable Development, [IISD], 2003).

Figura 1.10: Efectos del cambio climático en la transformación lluvia- escorrentía

CARACTERÍSTICAS	IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO
Área y forma	•Prácticamente nulo
Pendiente de la cuenca	•Nulo a bajo
Drenaje de la cuenca	•Bajo a medio
Cobertura vegetal y vegetación	•Medio a alto
Tipo y uso de suelo	•Bajo a medio
Infraestructura existente	•Nulo a bajo
Condiciones de humedad	•Moderado a alto
Cantidad de lluvia	•Alto
Distribución espacial y temporal de las precipitaciones	•Alto

Adaptada (Ramírez, 2008)

1.3.2 Efectos en los recursos hídricos en América Latina

El clima en Latinoamérica es heterogéneo y está influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y del Atlántico Sur (SACZ) y el sistema monzón de Norte América. La variabilidad climática afecta la región, evidenciado por el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, en especial en los episodios del ENSO y la llegada del huracán Catarina al Brasil (2004), nunca antes visto en la zona (CEPAL, 2009).

Entre los impactos de los recursos hídricos relacionados con el clima, vinculados con el fenómeno ENSO, figuran: cambios en las precipitaciones, disminución en el sur de Chile, el sureste de Argentina y sur del Perú y aumento en el sur del Brasil, Paraguay, Uruguay, Noreste de la Argentina y Noreste del Perú y el Ecuador; aumento del nivel del mar (2-3 mm/año); retroceso de glaciales de Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia; aumento de la frecuencia de eventos extremos como crecidas, sequías o deslizamiento de tierra y stress hídrico en algunas zonas (Magrin et. al., 2007; IPCC, 2008; CEPAL, 2009).

Aunque las regiones son muy heterogéneas, los valores promedio de precipitación anual están alrededor de 1600 mm, y para la escorrentía 21 L/s/km² (IDEAM, 2010), lo cual es reflejado en la gran cantidad de recursos hídricos, que ascienden al 26% de los recursos del mundo (UN World Water Assessment Programme [WWAP], 2003). Sin embargo, las irregularidades en la distribución espacial y temporal afectan tanto la disponibilidad como la calidad en diferentes regiones, notoria por las altas estadísticas de población sin acceso al agua potable, equivalentes al 13,9% de la población-71,5 millones- (Magrin et. al., 2007). Por otra parte, la región presenta

zonas con elevado estrés hídrico- que impactan a una población de 22,2 millones-, como consecuencia de la concentración de la población en territorios donde el agua no es abundante, la expansión de la agricultura, el crecimiento demográfico, la urbanización, el desarrollo industrial y la reducción de la disponibilidad de agua subterránea, debido a la impermeabilización de las zonas de captación, provocada por la infraestructura urbana y la deforestación (CEPAL, 2009).

Hay evidencia de la alteración de los sistemas naturales por los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe. Las proyecciones indican que para el año 2020 serían leves, pero que se incrementarían en el 2050 y podrían ser mayores con un aumento de 1,5° a 2°C de la temperatura actual (IPCC, 2007). El cambio climático podría afectar de manera notable al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficie y del flujo base, produciendo diversos impactos sobre ecosistemas naturales y actividades humanas; los cambios en la precipitación y el retroceso o desaparición de los glaciares afectarían la disponibilidad de agua (IPCC, 2007).

La región es vulnerable al cambio climático y es posible que se acentúe dicha vulnerabilidad, en algunas regiones, por el efecto negativo de una mayor demanda de agua de consumo y riego, como consecuencia del incremento en la tasa demográfica y los impactos del cambio climático (IPCC, 2008).

Las pocas estrategias de adaptación de los países para hacer frente a los peligros y riesgos de inundaciones y sequías han sido relacionadas con el bajo producto Interno bruto, el aumento de la población en zonas vulnerables y las debilidades en el marco político, institucional y tecnológico (Solanes & Jouravlev, 2006). Sin embargo, la adaptación es necesaria para reducir los efectos negativos. Se requieren mejores sistemas de vigilancia y pronóstico del tiempo para facilitar la toma de decisiones; acciones para sostener ecosistemas altamente vulnerables; inversiones en infraestructura para el almacenamiento de agua, alcantarillado y control de inundaciones, entre otros (Banco Mundial, 2008).

1.3.3 Efectos en los recursos hídricos en Colombia

La ubicación geográfica en Colombia, circundada por el mar Caribe, el Océano Pacífico y la cuenca amazónica y la alta variabilidad en el relieve, hacen que el clima tenga un alto nivel de complejidad (Poveda, 2004). En promedio, la precipitación es de 3000 mm, la evapotranspiración asciende a 1180 mm y la escorrentía a 1830 mm (IDEAM, 2010). Estos factores han contribuido a la oferta hídrica del territorio; sin embargo, no está distribuida de manera uniforme en las diferentes regiones del país, por lo cual se presentan zonas con déficit de agua y otras con grandes excesos, que se traducen en inundaciones periódicas de duración considerable (IDEAM, 2001). Lamentablemente, la visualización del recurso hídrico como abundante e inagotable generó una gran despreocupación por el mismo. En las últimas décadas han surgido conflictos hídricos a escala local y regional, los cuales han puesto en crisis los mecanismos de asignación y han permitido comprender la realidad colombiana (IDEAM, 2008).

En materia de cambio climático, varias investigaciones evidencian sus señales: Temperaturas mínimas con tendencias de calentamiento del orden de 1°C en 20 años (Ochoa & Poveda, 2008); tendencias positivas en la temperatura y humedad relativa en Bogotá (Hense et. al, 1988); disminución en las precipitaciones en Bogotá y corrimiento en las fases de los ciclos anual y semianual de algunas variables climatológicas (Smith, et. al., 1996). Para el centro de Colombia, las temporadas de lluvias se han anticipado en los últimos años (Mesa, et. al., 1997); las principales cuencas hidrográficas, como el Cauca y el Magdalena exhiben decremento en los caudales (Poveda & Mesa, 1997; Ochoa & Poveda, 2008).

La primera comunicación Nacional ante la CMNUCC, concluye que Colombia es un país altamente vulnerable, pese a su bajo nivel de emisiones de CO₂. A partir de las proyecciones para el año 2050, un aumento en la temperatura media anual del aire entre 1°C y 2°C, produciría una variación en la precipitación de ± 15%, la desaparición del 78% de los nevados y del 56% de los páramos y de un ascenso estimado en el nivel del mar de 40 cm en la costa Caribe y de 60 cm en la costa Pacífica (IDEAM, 2001).

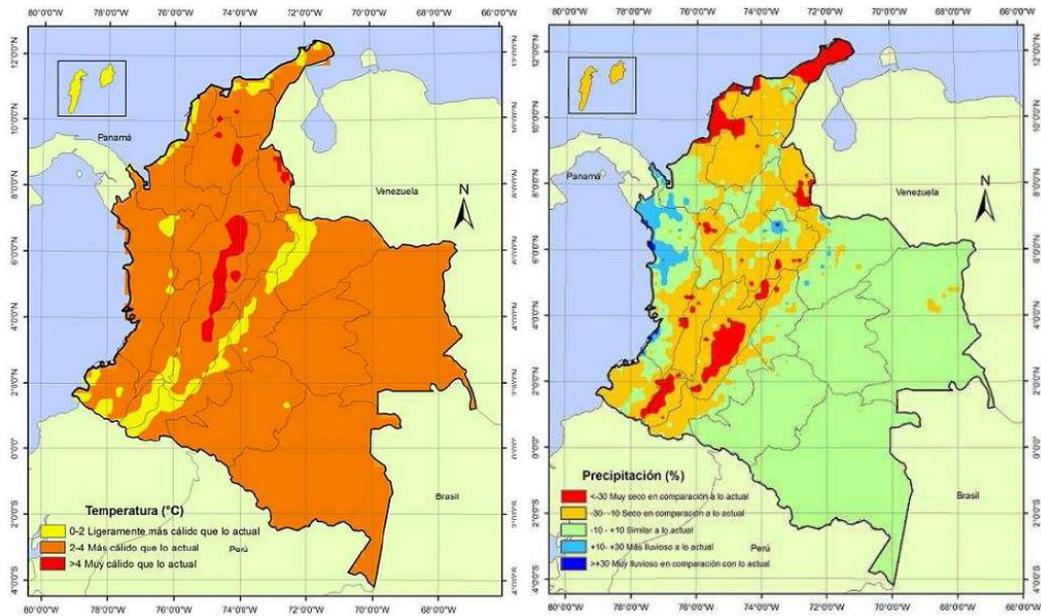
Los estudios de Pabón (2008), empleando el escenario A2, estiman que para finales del siglo XXI (2071-2100), la temperatura media del aire, podría incrementarse en 4°C- por encima del promedio 1961-1990-, en algunas regiones del país y que los volúmenes anuales de precipitación se podrían reducir hasta en un 30% en la región Andina y el Caribe (Figura 1.11).

Las proyecciones del IDEAM (2008) para el período 2071-2100, empleando el modelo climático PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) se presentan en las Figuras 1.12 y 1.13. En la zona Andina se estiman aumentos de temperatura entre 2 y 4°C y una reducción de las lluvias. Sin embargo, para el departamento de Caldas se observan zonas con incremento de precipitación hasta del 10%.

La Segunda Comunicación Nacional ante la CMNUCC presenta las siguientes evidencias del cambio climático en Colombia (IDEAM, 2010):

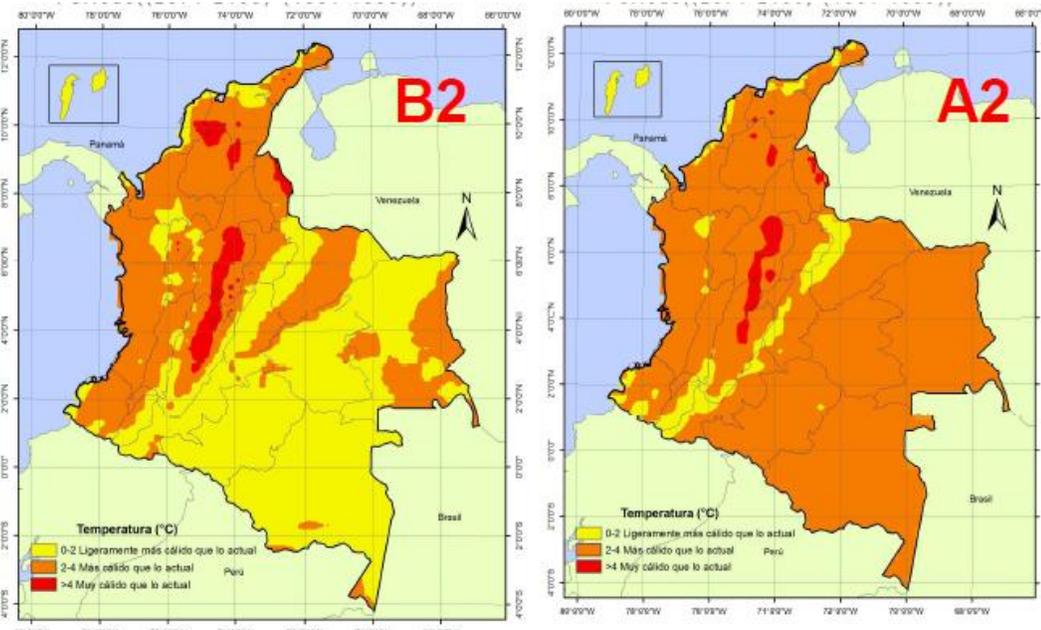
- Reducción en la precipitación en los páramos, amplios sectores de la región Andina, el sur del Pacífico y el piedemonte llanero.
- Aumento de las precipitaciones en la región Caribe y la Amazonía Colombiana.
- Incremento de las precipitaciones de alta intensidad en los pisos térmicos cálido, templado y frío y disminución en los páramos.
- Elevación de temperatura máxima, media y mínima en las estaciones de piso térmico frío y páramo.
- Tasa lineal de calentamiento promedio de 0,13°C por década
- Cambio de ±0,1%/año (±1%/década) en los registros de humedad relativa.
- Ascenso del nivel del mar en el Caribe de aproximadamente 3,5 mm/año y de 2,2 mm/año en el Pacífico, en Buenaventura..
- Pérdidas de 3 a 5% de cobertura glaciar por año y retroceso del frente glaciar de 20 a 25 m por año.

Figura 1.11: Cambios en la temperatura media del aire y en la precipitación anual

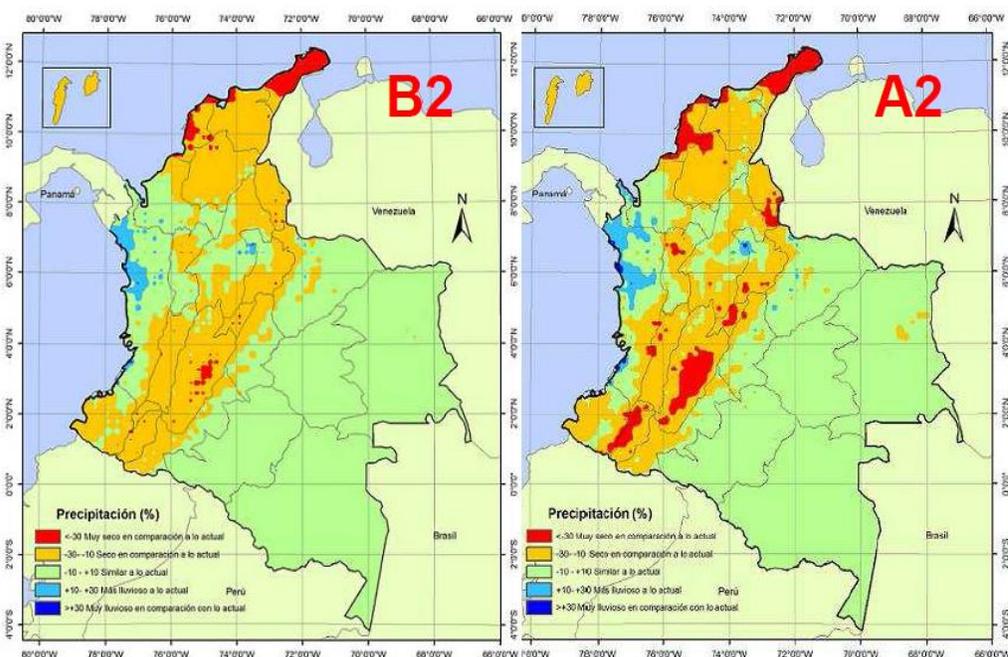


Fuente: (Pabón, 2008)

Figura 1.12: Cambios en la temperatura media del aire, escenarios A2- B2



Fuente: (IDEAM, 2008)

Figura 1.13: Cambios en la precipitación, escenarios A2 - B2

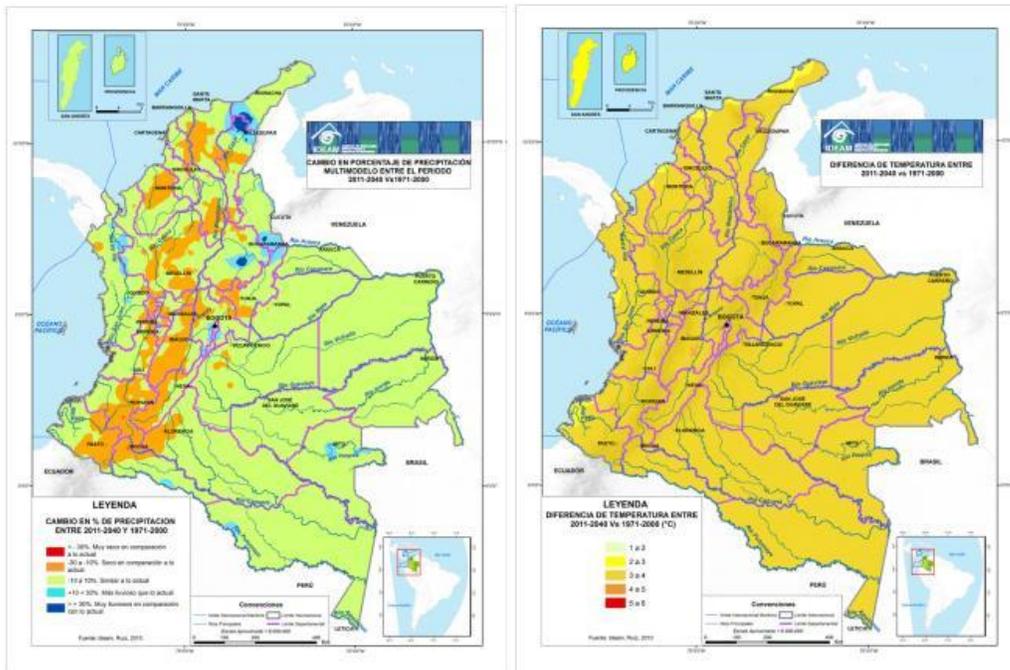
Fuente: (IDEAM, 2008)

El segundo informe a la CMNUCC (IDEAM, 2010), basado en los resultados de los Modelos ERA40 y GSM-MRI, estima:

- Un posible aumento de temperatura de 1,4°C para el periodo 2011-2040; 2,4°C para el periodo 2041-2070 y 3,2°C para el lapso comprendido entre los años 2071 a 2100, tomando como Normal Climatológica el periodo 1971-2000.
- Los resultados promedio de los escenarios para el lapso 2011 a 2040 (Figura 1.14), proyectan una posible reducción en la precipitación, mayor o igual al 10%, en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Córdoba, Huila, Nariño, Putumayo, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.
- Para el fin de siglo, 2071-2100, se tendrían posibles aumentos de la temperatura media en gran parte de la región Caribe y Andina, con valores que oscilan entre 3°C y 4°C.
- Las reducciones más significativas de lluvia, entre el 20 al 30%, para fin del siglo XXI, se presentarían en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda (Figura 1.15)

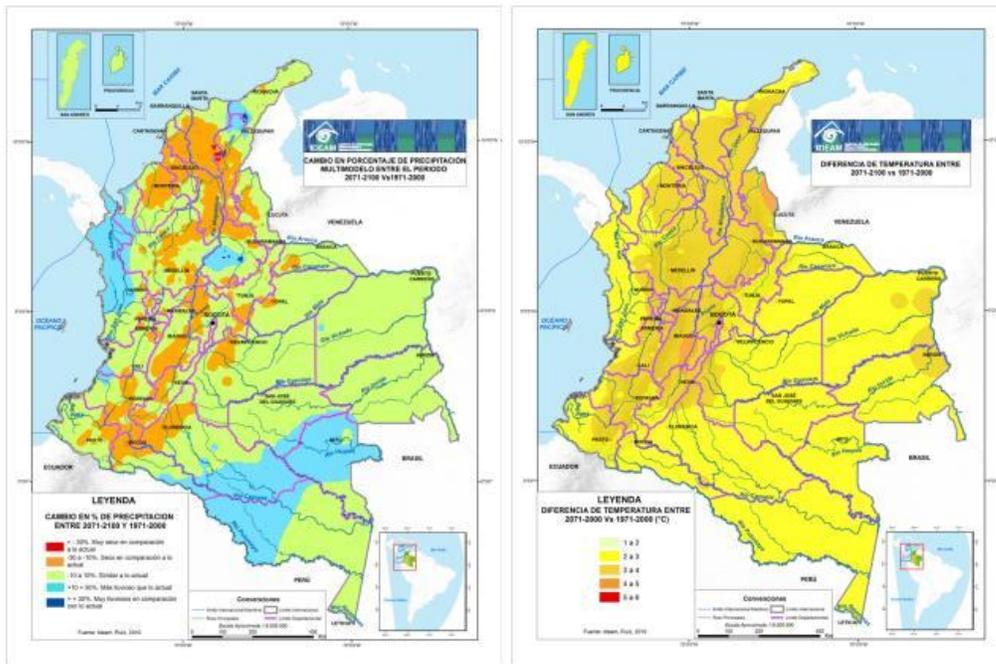
Los resultados de estas modelaciones están basados en las condiciones medias actuales y en el ciclo estacional (IDEAM, 2010); tienen incertidumbres generadas por algunas variables como la nubosidad, la humedad atmosférica y la evaporación (Mesa, 2007); no pueden tener en cuenta todas las posibilidades de adaptación ni todos los factores no climáticos dinamizantes de cambio; por tanto, deben ser tomados como indicadores de la necesidad de profundizar en la investigación y conocimiento de los impactos potenciales (Ocampo, 2011).

Figura 1.14: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2011-2040



Fuente: (IDEAM, 2010)

Figura 1.15: Cambios en la temperatura y en la precipitación anual 2071 a 2100



Fuente: (IDEAM, 2010)

El análisis de vulnerabilidad de los cuerpos de aguas continentales realizado por el IDEAM (2010), concluye que los humedales son los ecosistemas más vulnerables al cambio climático y que para el período 2011 a 2040, el 63% de la superficie nacional tendría impactos potenciales altos y muy altos, donde los cuerpos de agua continentales de los departamentos de Bolívar, Magdalena, Cesar, Santander, Tolima y Amazonas serían los más afectados. Las cuencas de alta montaña son especialmente vulnerables al cambio climático y por tanto, son requeridos estudios locales que permitan estimar su vulnerabilidad.

La evaluación de la vulnerabilidad regional debe ser una herramienta que permita definir acciones efectivas de adaptación, de tal manera que se reduzcan los efectos e impactos del cambio climático y de la variabilidad climática.

En materia de adaptación, las líneas estratégicas planteadas por el IDEAM (2010) incluyen el fortalecimiento de la gestión del riesgo, de la investigación y la transferencia del conocimiento; el mejoramiento del uso del territorio como estrategia para disminuir la vulnerabilidad; la reducción de los impactos ambientales, económicos y sociales; el diseño e implementación de un arreglo institucional adecuado para la adaptación; la valoración y protección de la base productiva a partir de los bienes y servicios de la biodiversidad; el mejoramiento de la capacidad de adaptación de las comunidades vulnerables; el fortalecimiento de la gestión de la cooperación y de los recursos para la adaptación.

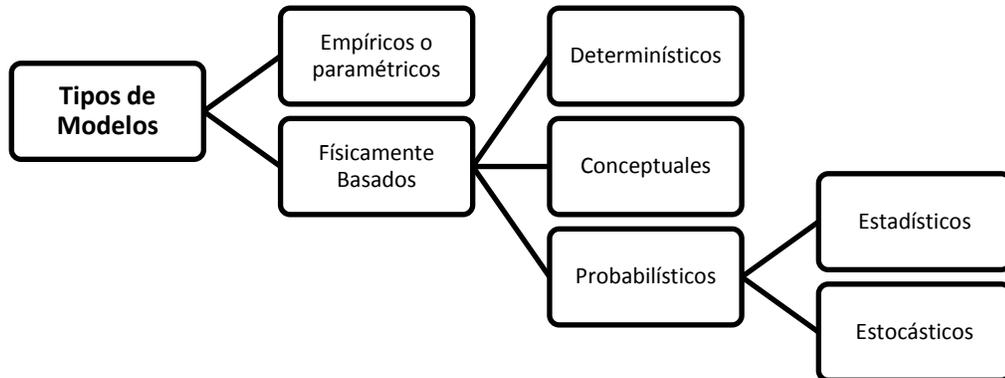
1.4 Modelos hidrológicos y análisis de vulnerabilidad

1.4.1 Modelación Hidrológica

La vulnerabilidad del recurso hídrico al cambio climático se puede abordar desde dos puntos de vista: mediante el análisis de susceptibilidad de los sistemas hídricos para conservar y mantener su régimen hidrológico actual ante las posibles alteraciones climáticas y por el análisis de vulnerabilidad de los sectores usuarios del recurso, ante la amenaza de cambios sustanciales en el régimen hidrológico (Salazar, 2008; IDEAM, 2010)

La estimación de las demandas se basa en métodos como los análisis de tendencias, de regresión, de series de tiempo y conocimiento de expertos (Barthel et al., 2008). Sin embargo, estos métodos deberían considerar la posibilidad de retroalimentación que existe entre oferta y demanda y las diversas opciones de adaptación influenciadas por el cambio climático (Sharma, 2009, Barthel et. al. 2008, Guan 2008).

La predicción de flujos de agua en una cuenca requiere el uso de modelos, los cuales deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal). Existen diferentes modelos que pueden emplearse como hidráulicos, hidrológicos, de planificación y de prevención (Xu & Singh, 2004; Debels & Escurra, 2010; Ponce, 1989; Sharma, 2009). La Figura 1.16 esquematiza los modelos para la simulación de los recursos hídricos bajo condiciones climáticas estacionarias.

Figura 1.16: Tipos de modelos bajo situación climática estacionaria

Adaptada: (Ponce, 1989; Debels & Ecurra, 2010; Xu, 1999; Sharma, 2009)

Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial, caracterizando la precipitación sobre la superficie de la tierra y la fracción de agua que es evapotranspirada, el escurrimiento hacia cuencas hídricas y la recarga a los acuíferos subterráneos. La humedad del suelo y la escorrentía son procesos claves para una simulación precisa de la descarga, con modelos hidrológicos. Los datos históricos se utilizan para elaborar regresiones multivariadas entre la escorrentía y los parámetros climáticos (Vogell et al., 1999; Revelle and Waggoner, 1983).

Los modelos físicamente basados siguen las leyes de la física y/o procesos químicos y están descritos por ecuaciones diferenciales, se emplean cuando pueden medirse los parámetros a pequeña escala (Bormann, 2007). Los modelos conceptuales son representaciones simplificadas de los procesos físicos, en términos matemáticos, simulan procesos complejos basándose en parámetros claves conceptuales (Ponce, 1989). El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias (Nash & Sutcliffe, 1970).

Elegir el modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas hidrográficas (Clark et al., 2008). Para un estudio de caso en particular depende de muchos factores (Gleick, 1986); el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores dominantes de la selección (Xu, 1999). Por ejemplo, para evaluar la gestión de recursos hídricos a escala regional, modelos de precipitación-escorrentía (modelos de balance) han sido empleados (Gleick, 1986; Schaake & Liu, 1989; Mimikou et al., 1991; Arnell, 1992; Xu 1999). Para la evaluación detallada de flujo superficial, modelos conceptuales de parámetro globalizado han sido utilizados (Xu, 1999). Para la simulación de los patrones espaciales de respuesta hidrológica dentro de una cuenca, los modelos distribuidos son necesarios (Beven, 1989; Bathurst & O'Connell, 1992).

La modelación del proceso precipitación-escorrentía se fundamenta en la obtención de caudales a la salida de una cuenca, en un rango de tiempo determinado. Se calcula la precipitación neta

como la diferencia entre la precipitación y las pérdidas por infiltración o evaporación; se genera un hietograma de precipitación efectiva que debe ser transformado en un hidrograma unitario - respuesta de la cuenca ante los excesos de precipitación-(Chow et.al., 1988; Ponce, 1989). Para la transformación pueden seguirse diferentes metodologías: concentrada, fundamentada en la convolución del hidrograma unitario con un hietograma efectivo de tormenta, o distribuida, basada en el flujo terrestre que utiliza técnicas de ondas de difusión o cinemáticas (Bendient & Huber, 1988). La variabilidad espacial en estos modelos se tiene en cuenta al dividir la cuenca en subcuencas. Los hidrogramas obtenidos en cada subcuenca se agregan y se transportan hidráulicamente, aguas abajo hasta la confluencia de salida, empleando diferentes métodos como: Muskingum (Cunge, 1969), Muskingum-Cunge (Ponce & Yevjevich, 1978), Puls Modificado (Strelkoff; 1980) y Onda cinemática (Ponce & Simmons, 1978; Henderson & Wooding, 1964).

1.4.2 Modelación Hidrológica y cambio climático

La modelización hidrológica es una herramienta valiosa para el estudio de los procesos que rigen los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Dourojeanni et. al, 2002; GIRS Center, 2011). En escenarios de cambio climático, muchas cuencas son propensas a experimentar modificaciones no sólo en su hidrología media, sino también en la frecuencia y magnitud de los fenómenos hidrológicos extremos (IPCC, 2008; PNUMA, 2006; Allen et. al, 2002).

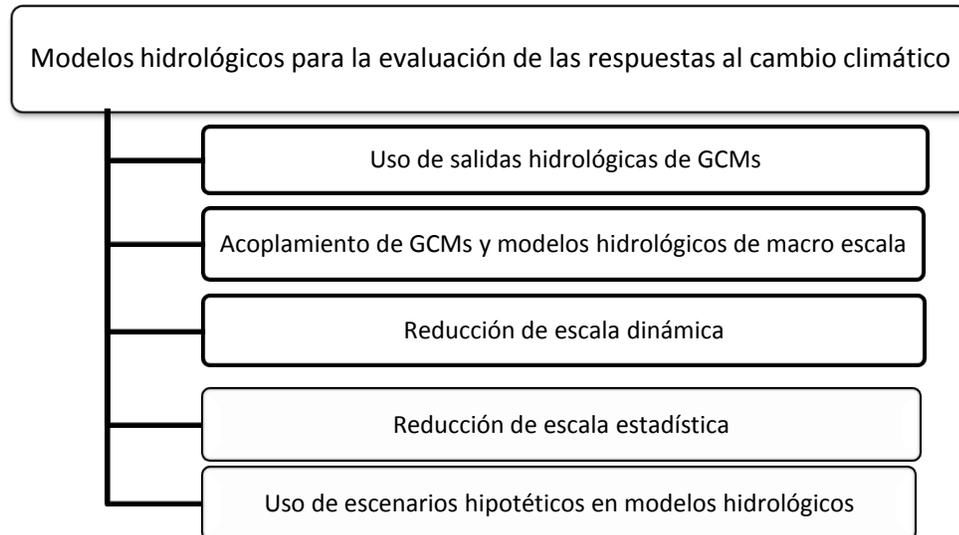
Actualmente, no hay alternativa viable, diferente a los modelos para realizar proyecciones que involucren el calentamiento global (IPCC, 2007). El uso de los modelos permite un enfoque sistemático con el objetivo de cerrar la brecha existente entre la teoría y las observaciones (Yang et al, 2005). Sin embargo, los modelos basados en estadísticas que utilizan datos históricos, son alternativas posibles (Malham, 2000). Los resultados pueden no ser exactos cuando se aplican a los escenarios climáticos futuros que se encuentran fuera del rango de las condiciones climáticas capturadas en el registro histórico (Gardner, 2009)

La simulación de los efectos hidrológicos del cambio climático requiere el uso de modelos climáticos, que incluyen los efectos climáticos de la concentración atmosférica creciente de gases de efecto invernadero; los modelos hidrológicos, que simulan los impactos hidrológicos del cambio climático y las técnicas de reducción de escala para vincular los modelos (Xu, 2004). La Figura 1.17 esquematiza los modelos para la evaluación de las respuestas hidrológicas al cambio climático.

Los tipos generales de estudios de impacto del cambio climático difieren en la forma en que las hipótesis acerca de la dirección y la magnitud del cambio climático pueden ocurrir en el área de estudio (Adger & al, 2007). Un enfoque consiste en utilizar los escenarios hipotéticos, en los cuales la temperatura y la precipitación se cambian por valores fijos con carácter anual, estacional o escalas mensuales (IPPC, 2007). Varios escenarios han adaptado las predicciones climáticas para el doble de CO₂, el cual se ha convertido en un estándar (Loaiciga et al., 1996). Este enfoque evita la incertidumbre asociada con modelos de circulación general y permite una estimación de la cantidad de cambio en una variable hidrológica como resultado de una serie de cambios incrementales en una variable climática; este tipo de análisis de impacto es de gran utilidad con el propósito de determinar que tanto el clima debe cambiar para que los impactos

significativos se produzcan. Los cambio se seleccionan no de manera arbitraria, sino basando en algunos datos, tales como anomalías en el registro histórico o cambios predichos por los modelos climáticos para la región (Praskiewicz & Chang, 2009)

Figura 1.17: Modelos hidrológicos para la evaluación de respuestas al cambio climático



Adaptado: (Xu et.al, 2004)

Los métodos de modificación de las condiciones presentes son ampliamente utilizados por los hidrólogos (Xu et.al, 1999; Xu & Singh, 2004; Yaoling et. al., 2009; Praskiewicz & Chang, 2009). Se efectúan pronósticos de los efectos del cambio climático en el caudal, basados únicamente en los registros históricos de la descarga y las condiciones climáticas en cuencas hidrográficas (Xu, and Singh 2004; Praskiewicz & Chang, 2009). El procedimiento general para la estimación de los impactos del cambio climático hipotético sobre el comportamiento hidrológico propuesto por Xu et.al. (1999, 2004) es el siguiente:

- Determinar los parámetros de un modelo hidrológico en la cuenca de estudio con entradas actuales climáticas y flujos observados de un río para validación del modelo.
- Perturbar las series históricas de los datos climáticos, de acuerdo a algunos escenarios de cambio climático (por lo general, para la temperatura por la adición de $\Delta T = +1, +2, +4$, y para la precipitación multiplicar los valores por $(1 + \Delta P / 100)$).
- Simular las características hidrológicas de la cuenca bajo el clima perturbado utilizando el modelo hidrológico calibrado.
- Comparar las simulaciones del modelo actual y el futuro hidrológico posible.

Varias herramientas de software se encuentran disponibles para la evaluar los impactos y las adaptaciones de los recursos hídricos al cambio climático, enfocados en el análisis del abastecimiento y demanda regional de agua. Incluyen modelos físicos de hidrología de cuencas como el SWAT y el HEC-HMS, modelos hidrodinámicos que pueden simular dinámicas de cauces

de ríos tales como la extensión de la elevación del agua y de inundación; y modelos de planificación. Para la simulación hidráulica se tienen algunos modelos como (IPCC, 2007): HEC-RAS, MIKE21, Delft3d. Entre los modelos de Planificación hidrológica se encuentran (IPCC 2007, Vicuña 2006): WEAP21, Aquarius, SWAT, IRAS (Interactive River and Aquifer Simulation), RIBASIM, MIKE 21 and BASIN, HEC-ResSim. La Tabla 1.1 presenta algunos modelos empleados para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos.

Tabla 1.1: Modelos hidrológicos empleados en estudios de impacto del cambio climático

Autor	Área/ cuenca	Área km ²	Modelo climático	Proyección	Modelo Hidrológico
Frei et. al., 2002	New York	1180	HadCM2; CGCMal	2080	Thornthwaite Modelo conceptual de balance de agua
Loukas et. al., 2002	British Columbia	1150 -1194	CGCMal	2080-2100	Modelo de cuenca UBC
Eckhardt and Ulbrich, 2003	Europa Central	693		2090	SWAT = Soil and Water Assessment Tool
Christensen et. al., 2004	Rio Colorado	113.5	PCM	2070-2098	VIC = Variable Infiltration Capacity
Andréasson et.al., 2004	Suecia	1100 - 6000	HadCM2 ACHAM4 OPYC3 HasAM3H	2030	HBV = Hydrologiska Byråns Vatten- balansavdelning
Jiang et. al., 2007	China				Thornthwaite–Mather (TM), Vrije Universitet Brussel (VUB), Xinanjiang (XAJ), Guo (GM), WatBal (WM), and Schaake models (SM)
Andersen et. al., 2006	Dinamarca		ECHAM4/O PYC HIRHAM	2071–2100	Mike 11–TRANS
Thodsen, 2007	Dinamarca	23 – 814	HIRHAM RCM	2071-2100	NAM
Bae, 2008	Korea	43- 2293	ECHO-G NCAR/MM5	1960-2100	PRMS
Verhaar, et. al. 2007	Canadá	Longitud 15- 17 km		2010-2100	SEDROUT

La mayoría de los estudios sobre recursos hídricos y cambio climático emplean un enfoque top-down (Yaoling et. al., 2009; IPCC, 2007), en el cual se desarrollan escenarios climáticos futuros para ser utilizados a nivel regional y luego, imponen esos cambios potenciales en sistemas de recursos hídricos para evaluar la confiabilidad del sistema. El enfoque bottom-up identifica las vulnerabilidades más críticas de un sector hídrico; articula las causas de esas vulnerabilidades; sugiere cómo el cambio climático, la variabilidad climática y los extremos del clima pueden o no afectar esas vulnerabilidades y finalmente, diseña un proceso analítico para dirigir mejor y resolver la vulnerabilidad ante la incertidumbre climática, con un enfoque preventivo (Brekke et al 2009; IPCC, 2007).

1.4.3 SIG para la caracterización de cuencas hidrográficas

Los Sistemas de Información Geográfica –SIG- son la evolución de los archivos cartográficos CAD, con la particularidad de que cada archivo (que puede incluir un polígono, una línea, un punto o una imagen), tiene asociada una base de datos con variables o características georreferenciadas, lo cual permite espacializar la información. En la actualidad, existen softwares de SIG como ArcGis, Mapwindow, Grass, GvSIG, Quatum GIS, entre otros. La extracción de las características hidrológicas a partir de un Modelo de Elevación Digital- MED se ha convertido en uno de los principales procedimientos de estos software (GIRS Center, 2010).

Los estudios hidrológicos que utilizan SIG requieren de MED, término general utilizado para describir la representación cartográfica digital de la tierra en cualquier forma, rejillas rectangulares o redes, redes triangulares, etc. Un MED consiste de una matriz bidimensional de números que representan la distribución espacial de las elevaciones en una cuadrícula regular; un conjunto de coordenadas x, y, z de una red irregular de puntos, o cadenas de contorno almacenadas en forma de pares de coordenadas x, y, a lo largo de las líneas de contorno, de los intervalos de elevación especificada. Los MED 1 x 1m, 30 x 30 m, 1 x 1 km son las estructuras de datos más utilizadas debido a su eficiencia computacional y bajos requerimientos de almacenamiento. (GIRS Center, 2010).

Un MED de muy alta resolución puede tener más detalle, pero requiere mayores necesidades de computo. La elección de la resolución del MED depende de la relación costo-efectividad y está limitada por la densidad de la fuente de datos, la complejidad del terreno y la aplicación requerida (Liu, 2008); dicha resolución se limita por la densidad de datos de entrada del terreno. El número de celdas (S) debe ser más o menos equivalente a la cantidad de puntos de datos sobre el terreno (n) dentro del área (A) a cubrir por el MED. El tamaño de la cuadrícula (S) del MED se puede estimar mediante la siguiente ecuación (GIRS Center, 2010):

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad \text{Ec. (1-35)}$$

Los MED disponibles en la red, pueden producir redes de corriente que son incompatibles con representaciones vectoriales generalmente aceptadas (GIRS Center, 2011). Estas inconsistencias se deben a problemas de escala del mapa y a la inadecuada resolución vertical del MED, en especial en áreas de bajo relieve (Zhu, Tian, & Zhao, 2006). Deben emplearse métodos de corrección, que utilizan diferentes algoritmos como el “stream burning” (Sanders, 1999) y el reacondicionamiento de la superficie o “Agree” (Hellweger, 1997).

Otros problemas que han sido detectados en los MED incluyen la introducción errónea de redes paralelas a la red de drenaje (Hellweger, 1997) y la distorsión de los límites de la cuenca (GIRS Center, 2011). Por tanto, para llevar a cabo la delimitación de la línea de drenaje en un MED, la superficie debe estar hidrológicamente conectada; es decir, cada celda debe fluir a la celda aguas abajo. Esta conectividad puede estar interrumpida por depresiones cerradas (pozos o sumideros) y zonas planas (Martz & Garbrecht, 1999), las cuales truncan la longitud del flujo y alteran su dirección (GIRS Center, 2011). Estos problemas pueden ser causados por la limitada resolución

vertical y espacial de los datos o por errores en la recolección o entrada de los datos de elevación o resultantes de la interpolación de los datos generados por el MED (Garbrecht & Martz, 1999; Lindsay & Creed, 2005).

Las depresiones deben ser llenadas como un primer paso para el análisis del drenaje (GIRS Center, 2011; Grimaldi et.al., 2007). Una serie de algoritmos han sido propuestos para esta corrección (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988; Martz & Jong, 1988). Sin embargo, los software SIG como Arcinfo (ESRI, 1999), TAUDEM (Tarboton, 1997) y GRASS-GIS tienen implementado el algoritmo de Jenso & Domingue (1988), el cual consiste en llenar los sumideros mediante el incremento de los valores de las celdas de cada depresión con el valor más bajo en el límite de la depresión; por tanto, se asumen que todas las depresiones son causadas por subestimación de la elevación (Bartak, 2009).

Una vez se dispone de un MED corregido, es posible hacer uso de la información secundaria, la cual se extrae de forma automática en los SIG. Software modernos como ArcGis, Mapwindow, Grass, etc, permiten no sólo realizar la corrección hidrológica del MED, sino generar los mapas necesarios para los estudios hidrológicos e hidráulicos como: áreas acumuladas, direcciones de flujo, longitudes del flujo, clasificación de los cauces y red de drenaje, entre otros. La delimitación de la red de drenaje y de las cuencas requiere información sobre el paisaje y las propiedades hidrológicas como la elevación, la dirección de flujo y los flujos acumulados. Los algoritmos que se han desarrollado para obtener las características básicas de topografía o del MED incluyen la delimitación de las cuencas hidrográficas (Wu, Li, & Huang, 2008).

La incertidumbre del MED se traduce directamente en la precisión y la incertidumbre de cualquier característica hidrológica (Kenward et.al., 2000; GIRS Center, 2011). Se recomienda el uso de datos topográficos recientes y de alta precisión, a escalas apropiadas, que capturan la variabilidad del terreno (Sanders, 2007).

La posición de la red fluvial se puede estimar por medio de un MED, cuando se conoce la posición real a partir de un mapa topográfico. Las corrientes pueden ser definidas usando el mapa de flujo acumulado y mediante la aplicación de un valor umbral para la red; por ejemplo para un MED 30 m x 30 m es de 3 arc-segundos (GIRS Center, 2011). La precisión de las características del drenaje obtenidas del MED, es función de la calidad y resolución y de los algoritmos empleados en el procesamiento. Para muchas aplicaciones, el MED USGS 30 m x 30 m ha cumplido con los estándares de precisión; en cuanto a su precisión vertical es ± 7 m, lo cual puede generar errores en pendiente, comparables con los asociados a la agregación espacial (GIRS Center, 2011).

2. Metodología

2.1 Objetivos

Objetivo General

Analizar la vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de Cambio Climático

Objetivos Específicos

- Calcular el balance hídrico para condiciones hidrológicas medias y secas y las distribuciones mensuales correspondientes.
- Determinar el índice de escasez o uso de agua para condiciones hidrológicas con comportamiento hidroclimático medio como seco.
- Proyectar la vulnerabilidad del recurso hídrico para condiciones estacionarias a través de la relación demanda-oferta, para el período 2011-2040.
- Estimar la vulnerabilidad del recurso hídrico bajo los escenarios de cambio climático para el período 2011-2040

2.2 Metodología

La metodología empleada en el estudio para la caracterización de la cuenca del río Chinchiná y el análisis de vulnerabilidad se presenta en la Figura 2.1.

Figura 2.1: Esquema metodológico



2.2.1 Caracterización de la cuenca – Metodología.

Caracterización física- Metodología

Las características físicas de la cuenca del río Chinchiná fueron compiladas a partir de la revisión de fuentes primarias y secundarias, en especial, los estudios de ordenamiento de la subcuenca del río Chinchiná reportados por la Corporación Autónoma Regional de Caldas- CORPOCALDAS (2005).

Los Sistemas de Información Geográfica, SIG, se emplearon para generar los mapas requeridos en el estudio hidrológico, partiendo del Modelo de Elevación Digital- DEM, el cual fue tomado de la USGS “United States Geological Survey”, con una resolución de tamaño de celda de 30 m x 30 m. El DEM fue corregido con las herramientas disponibles en el ArcGis; este software fue utilizado para generar los mapas de pendientes, áreas acumuladas, direcciones de flujo, longitudes del flujo, número de orden o clasificación de los cauces, red de drenaje y subcuencas.

Para la delimitación de las cuencas, se tomó como referencia las estaciones de Caudal, 4 en total, cuya información fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM)-Estaciones Chupaderos y El Retiro- y por la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC- Estaciones Sancancio y Montevideo-.

La red de drenaje fue obtenida del mapa de direcciones de flujo, mediante el Software ArcGis. No se detectaron errores, en virtud del buen desempeño de las herramientas SIG en zonas montañosas. Se efectuó la revisión de las áreas de drenaje estimadas por SIG, con las reportadas en la cartografía disponible, sin encontrar diferencias sustanciales.

Los mapas geológicos y de textura de suelos fueron digitalizados, usando el ArcGis, tomando como referente la información reportada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y CORPOCALDAS. El mapa de cobertura y usos de suelos fue digitalizado en ArcGis basado en la información suministrada por CORPOCALDAS.

Caracterización climática- Metodología

El análisis de las variables climatológicas fue realizado a partir de los registros diarios de las estaciones meteorológicas (12) y pluviométricas (12) ubicadas en la cuenca, administradas por El IDEAM, La CHEC, El Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE) y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Fueron seleccionadas las estaciones con registros como mínimo desde la década del 80, para la caracterización climática del periodo 1981-2010; se consideraron además, otras estaciones con menor tiempo de registro, para una mejor caracterización del área de estudio, como las ubicadas en la parte alta de la cuenca y las del Parque Natural de los Nevados. En la Tabla 2.1 se muestra

el listado de las estaciones, cuya información fue analizada en el estudio y en la Figura 2.2 su localización en la cuenca.

Tabla 2.1: Estaciones meteorológicas y pluviométricas

No	Estación	Fuente	Altitud	Latitud N	Longitud W	X	Y
1	El Cisne	UNAL	4830	4° 49' 14,22"	75° 21' 35,87"	1190938,348	1024742,915
2	Nereidas	UNAL	4470	4° 52' 50,81"	75° 21' 25,15"	1191251,941	1031399,722
3	Molinos	UNAL	4260	4° 54' 35,27"	75° 21' 48,16"	1190534,453	1034608,195
4	Río Claro	UNAL	4183	4° 50' 43,38"	75° 22' 21,24"	1189533,0	1027479,278
5	Las Brisas	IDEAM	4150	4° 55' 59,99"	75° 21'	1192012,2	1037215,532
6	Letras	CENICAFE	3684	5° 3'	75° 20'	1193827	1050128
7	La Esperanza	IDEAM	3420	5° 1'	75° 21'	1191988,086	1046435,39
8	Papayal	IDEAM	2245	4° 57'	75° 29'	1177213,06	1039022,7
9	Posgrados	UNAL	2162	5° 3' 22,2"	75° 29' 32,3"	1176198,4	1050759,0
10	Agronomía	CENICAFÉ	2088	5° 3'	75° 30'	1175337,2	1050080,85
11	Alta Suiza	CHEC	2055	5° 3' 9"	75° 29'	1177185,49	1050361,93
12	Neira	CHEC	1902	5° 10' 47,11"	75° 31' 45,40"	1172054,6	1064427
13	Marmato	CHEC	2000	5° 3' 58,8"	75° 3' 54"	1173317,53	1051882,85
14	Planta Sancancio	CHEC	1850	5° 2' 17"	75° 28' 59"	1177220,22	1048764,06
15	Estación Uribe	CHEC	1842	5° 2' 54,25"	75° 32' 1,58"	1171591	1049895
16	Java	CENICAFÉ	1778	5° 1'	75° 32'	1171648,1	1046384,49
17	El Recreo	CENICAFÉ	1430	5° 2'	75° 39'	1158701,37	1048198,7
18	Naranjal	CENICAFÉ	1381	4° 58'	75° 39'	1158717,43	1040824,16
19	Montevideo	CHEC	1370	4° 59' 46,8"	75° 34' 31,8"	1166975,32	1044124,28
20	La Selva	CENICAFE	1312	5 05	75 36	1164235,41	1053742,1
21	Cenicafé	CENICAFE	1310	4° 59'	75° 36'	1164256,35	1044523,71
22	Granja Luker	CENICAFÉ	1031	5° 4'	75° 41'	1154995,76	1051877,92
23	Santágueda	CENICAFÉ	1026	5° 4'	75° 40'	1156844,5	1051881,93
24	Arauca	IDEAM	890	5° 4'	75° 40'	1158717	1057446

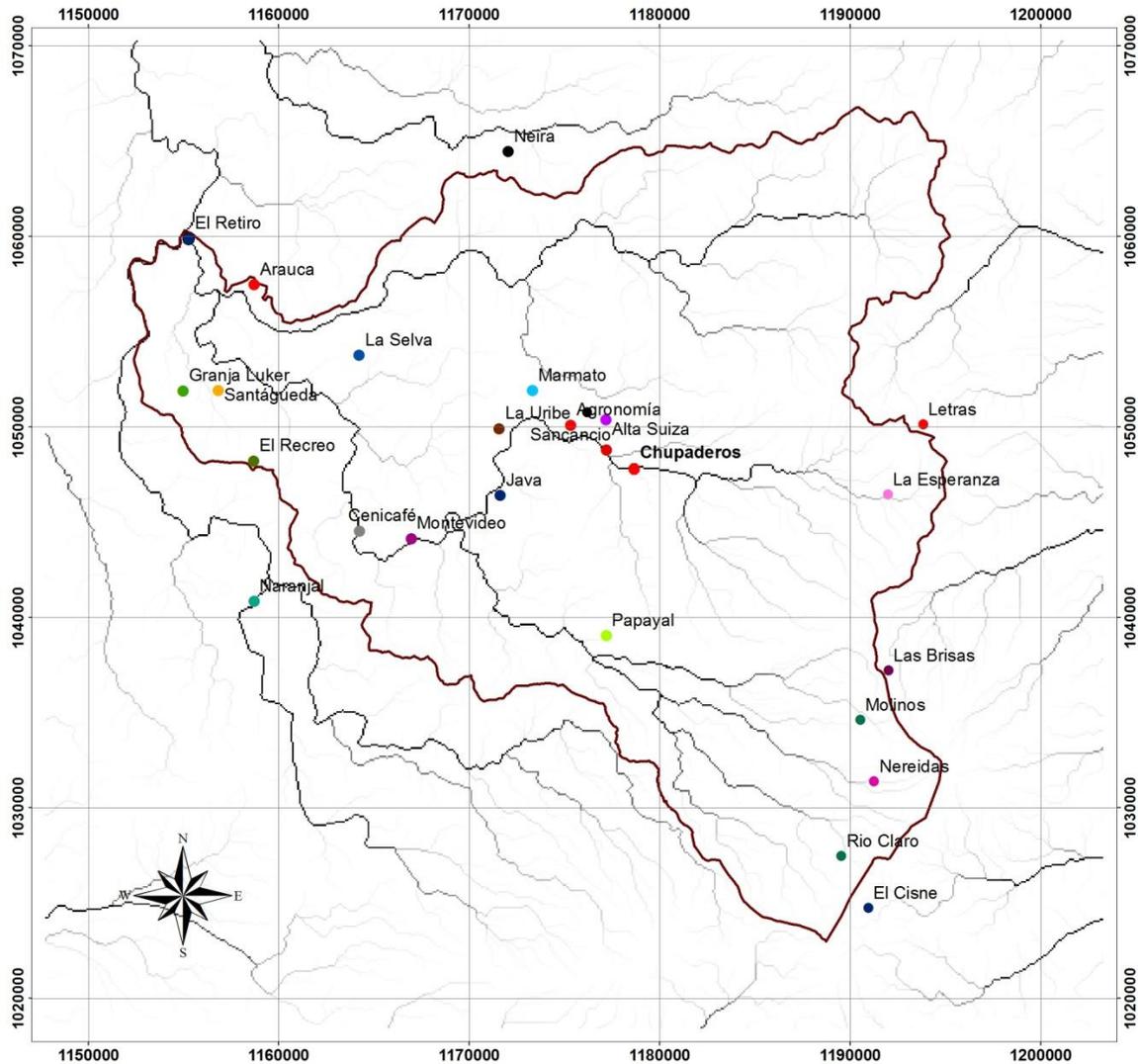
Las estaciones Letras, Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santagueda cuentan con registros de temperatura, humedad relativa, brillo solar y precipitación; las estaciones El Cisne y Posgrados poseen información de temperatura, humedad relativa, radiación solar y precipitación; las estaciones de páramo: Nereidas, Molinos, Las Brisas y Río Claro disponen de registros de temperatura y precipitación; las demás estaciones solo tienen mediciones de lluvia.

Las variables climáticas analizadas fueron brillo solar, humedad relativa, precipitación y temperaturas (máximas, mínimas y promedio), para las cuales se realizaron los análisis de estadística descriptiva, considerando el período 1981-2010, a escala diaria, mensual y anual, empleando el software SSPS.

La radiación solar fue calculada a escala diaria, en cada una de las estaciones, partiendo de los registros de brillo solar y humedad relativa, empleando los modelos matemáticos que se presentan en la Tabla 2.2. Para efectos de selección del modelo, se tuvo en cuenta las mediciones de radiación solar de la estación Posgrados, los cuales por su cercanía, fueron

comparados con la estación Agronomía. Fue realizado el análisis de estadística descriptiva a escala diaria, mensual y anual.

Figura 2.2: Ubicación de estaciones meteorológicas y pluviométricas



La distribución espacial de las variables climáticas fue efectuada aplicando la técnica de interpolación por método del inverso de la distancia al cuadrado; si bien pueden aplicarse métodos de interpolación lineal hasta interpolación óptima o Métodos de Gadin (1965), los cuales se encuentran bien desarrollados y hacen parte de las herramientas de los SIG; el método del inverso de la distancia al cuadrado ha sido validado para el área de estudio (Cortes, 2010) y recomendado por bibliografía especializada (Tabios & Salas, 1985).

Tabla 2.2: Expresiones para el cálculo de la radiación solar a partir del brillo solar

Ec.	Ecuación	Unidades	Referencia
2.1	$H = 490 D^{0,357} R^{0,262}$	H: Radiación solar <langleys/min> (cal/cm ² .min) D: Número de horas de brillo solar/12 R: Humedad Relativa	(Swartman y Ogulande, 1966)
2.2	$H = 464 + 265 D - 248 R$	H: Radiación solar <langleys/min> (cal/cm ² .min) D: Número de horas de brillo solar/12 R: Humedad Relativa	(Swartman y Ogulande, 1966)
2.3	$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6 n)^{1/2}$	H: langleys/día n: número de horas de brillo solar	(Masson, 1966)
2.4	$\frac{R_o}{R_A} = a + b \frac{BS_o}{BS_A}$	R_o : Radiación global diaria observada en la superficie terrestre (MJ/m ² .día, cal/cm ² .d) R_A : Radiación global diaria astronómicamente posible (MJ/m ² .día, cal/cm ² .d) BS_o : Brillo solar diario observado, h BS_A : Brillo solar diario astronómicamente posible, h a, b: coeficientes de regresión. a=0,26; b=0,51 (Gómez y Guzmán, 1995)	(Ansgtrom, 1924)

Para el área de estudio, se determinaron los modelos de regresión de lineal de la humedad relativa y la temperatura media con la altitud; los cuales fueron validados teniendo en cuenta el análisis de significancia de los β individuales ($\alpha < 0,05$), la prueba global del modelo ($\alpha < 0,05$) y la verificación de los supuestos de distribución normal de los errores (Shapiro-Wilk, significancia de 0,05), homocedasticidad (Prueba de White) y la no correlación en los errores (Durbin Watson); para tal efecto se empleó el software estadístico SSPS.

Para la clasificación climática, aunque la literatura reporta diferentes métodos entre los cuales figuran las clasificaciones de Caldas (1802), Lang (1915), Martonne (1937), Köppen (1923), Thornthwaite (1948) y Holdridge (1947); se emplearon los métodos tradicionales de Caldas y Lang, basados en el comportamiento medio de parámetros como la precipitación y la temperatura.

2.2.2 Balance hidrológico - Metodología

El Balance hídrico fue empleado para el cálculo de la oferta hídrica superficial, que equivale al volumen de agua continental de los sistemas de drenaje superficial, en un período determinado de tiempo. La ecuación para el balance de agua se representa por la siguiente expresión (Poveda et al., 2007):

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t) \quad \text{Ec (2.5)}$$

Donde:

$S(t)$: representa el almacenamiento de agua en el suelo como una función del tiempo

$P(t)$: Precipitación en mm por unidad de tiempo

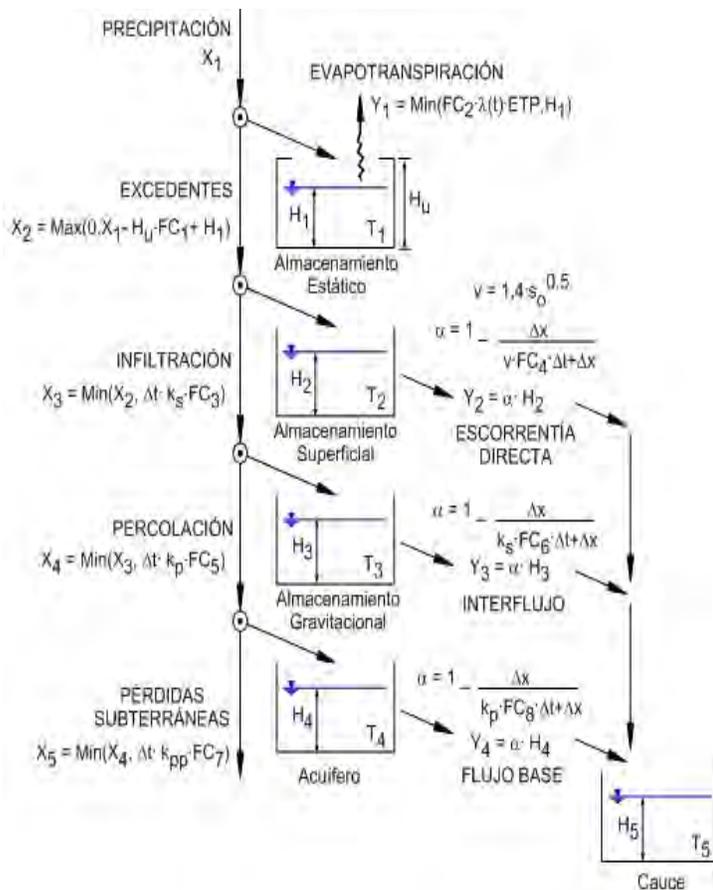
$E(t)$: Evapotranspiración real o efectiva en mm por unidad de tiempo

$R(t)$: Escorrentía incluyendo el flujo base en mm por unidad de tiempo

Para efectuar el balance hidrológico fueron empleados modelos conceptuales y físicamente basados: TETIS, Témez, Thomas o abc, Modelo T y Modelo P; se incluyeron los modelos clásicos recomendados por Alley (1984). También fueron evaluados modelos autorregresivos ARMA. En la versión agregada del TETIS se realizó la modelación a escala diaria y mensual para efectos de comparación; mientras que en los otros modelos se realizó el balance a escala mensual.

TETIS es un modelo de cinco tanques (Figura 2.3), conectados entre sí, cada uno corresponde (Francés et. al; 2007):

Figura 2.3: Esquema de tanques modelo Tetis

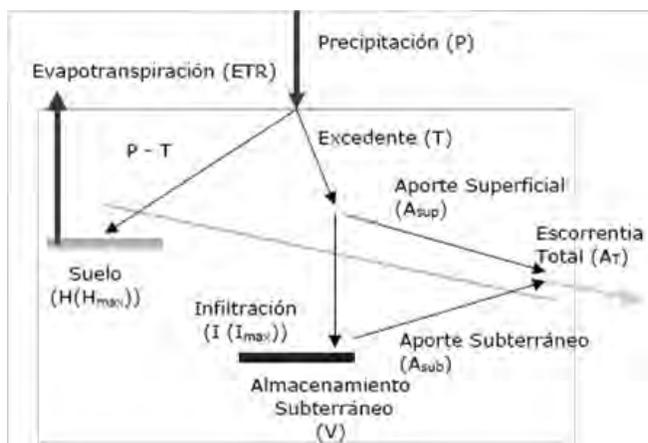


Fuente: Francés et. al. (2007).

- Tanque 1- almacenamiento estático: las salidas son las producidas por la evapotranspiración.
- Tanque 2- almacenamiento superficial: el agua que no es infiltrada está disponible para ser escurrida superficialmente.
- Tanque 3- almacenamiento gravitacional: dentro del cual se percola la cantidad que el subsuelo, en estado de saturación, es capaz de trasportar en sentido vertical; el resto queda disponible para conformar el flujo subsuperficial.
- Tanque 4: corresponde al acuífero, el agua que ingresa en profundidad representa las pérdidas del sistema y el flujo horizontal es el flujo base.
- Tanque 5: es el cauce.

La conceptualización del modelo Témez (1977) se presenta en la Figura 2.4; es un modelo de reservorios en el cual se reproducen los procesos esenciales del transporte de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico. En este modelo el sistema se divide en dos zonas, en la primera, la lluvia se almacena en forma de humedad y en ella, dependiendo del estado de humedad, de la capacidad máxima de almacenamiento y de la evapotranspiración potencial se origina un excedente que pasa a la segunda zona. Este excedente consta de dos componentes: la escorrentía superficial y la infiltración que se almacena en el acuífero (Estrela, 1997). El procedimiento de cálculo del modelo Témez se presenta en la Figura 2.5. Las variables del modelo (datos mensuales) son las siguientes:

Figura 2.4: Descripción esquemática del balance hídrico modelo Témez

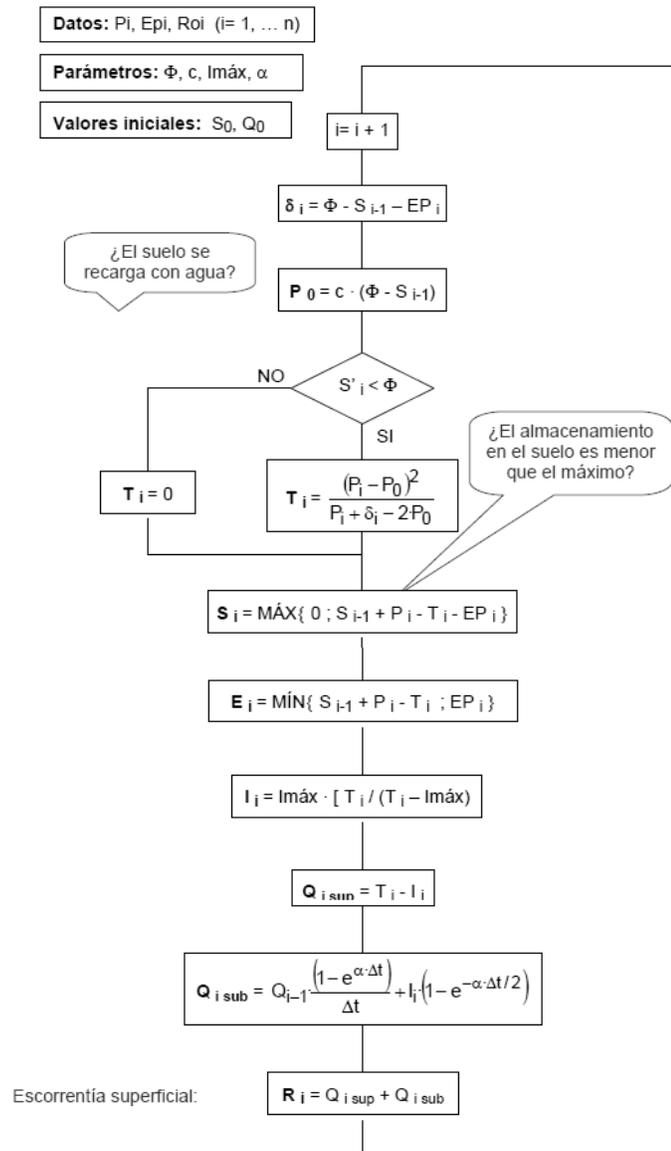


(Genta, 2008)

- P: Precipitación total observada (mm)
- EP: Evapotranspiración potencial (mm)
- δ : Déficit máximo de humedad del suelo (mm)
- Po: Déficit de humedad del suelo modificado (mm)
- S: Humedad del suelo (mm)
- T: Excedente de agua (mm)
- E: Evapotranspiración real (mm)
- I: Infiltración- recarga del acuífero
- Q_{sup}: escorrentía superficial calculada (m³/s)

- Q_{sub} : escorrentía subterránea calculada (m^3/s)
- R : Escorrentía total calculada (m^3/s)

Figura 2.5: Procedimiento de cálculo del modelo Témez



(Collazos, 2009)

Los parámetros del modelo que deben estimarse son los siguientes:

- ϕ : Capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo (mm)

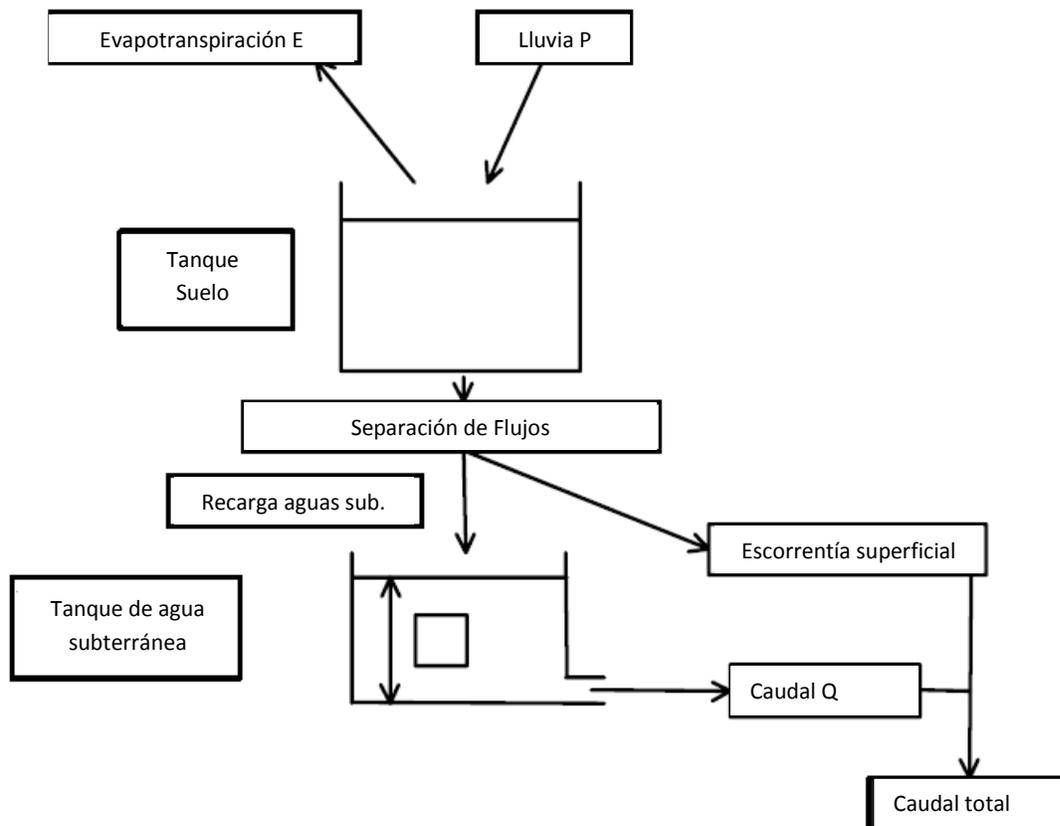
- c : coeficiente de excedente
- I_{max} : capacidad máxima de infiltración (mm)
- α : coeficiente de recesión del acuífero (l/día)

Los valores iniciales que se establecen, cuyo efecto se reduce en el tiempo, son:

- S_0 : humedad inicial del suelo (mm)
- Q_0 : almacenamiento inicial en el acuífero (mm)

El modelo abcd o Thomas (1981) es un modelo hídrico de balance, agregado, para la gestión de los recursos hídricos y el estudio de la evolución de los regímenes hidrológicos en el largo plazo. La conceptualización del modelo se representa en la Figura 2.6; el modelo está dividido en tres zonas o tanques: el primero corresponde al almacenamiento superficial; el segundo es la zona no saturada, en este tanque se puede asimilar la recarga que experimenta el acuífero, a la infiltración debido a que el caudal subsuperficial es despreciable por ser muy pequeño en comparación con la precipitación; el último es la zona saturada donde se presenta el almacenamiento (Correa 2005; Romano, 2007). En este modelo los parámetros de calibración son (Alley, 1984; Perrin, 2000):

Figura 2.6: Descripción esquemática del balance hídrico modelo de Thomas abcd



Adaptada (Perrin, 2000)

- Parámetro a: ($0 < a \leq 1$), expresa la capacidad del suelo para inducir la escorrentía antes de la saturación.
- Parámetro b: límite superior de la suma de la cantidad de humedad del suelo y la evapotranspiración.
- Parámetro c: fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo que se incluye en la escorrentía.
- Parámetro d: constante de drenaje del tanque de aguas subterráneas. Es el recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea.

El Modelo T (Thornthwaite & Mather, 1955) asume que el suelo presenta una determinada capacidad de almacenamiento en términos de humedad ϕ . El almacenamiento del suelo del mes i se encuentra representado por S_i . Dependiendo de la precipitación en el mes i , la humedad (P_i) y la evapotranspiración potencial (ETP_i) varían. Para cuando se presente el caso de $P_i > ETP_i$, resultará que $S_i = \min(P_i - ETP_i) + S_{i-1}, \phi$. Para el caso contrario $P_i < ETP_i$, la humedad presente del suelo experimentará un déficit (Romano, 2007; Correa 2005).

El Modelo P (Palmer, 1965) divide en dos zonas el suelo según el almacenamiento de humedad. La capa superior e inferior corresponden a la capacidad de humedad, representada por ϕ_q y ϕ_b , respectivamente. La humedad de la capa inferior no puede modificarse hasta que la humedad superior cambie. La evapotranspiración que se pierde en la capa superior es E_i^a y la de la capa inferior es E_i^b , la cual ocurre si $[(ETP_i - P_i) - E_i^a] > 0$. Al momento que se presente en el límite inferior de las dos capas, una capacidad máxima de almacenamiento, se origina la escorrentía (Romano, 2007; Correa, 2005)

El modelo autorregresivo de medias móviles –ARMA- (Autoregressive Moving Average) se utilizan para la descripción y pronóstico de las series temporales. Es un modelo matemático-estadístico escrito con ecuaciones de diferencias para una serie de tiempo, que sintetiza en una sola expresión las componentes auto-regresiva y de promedio móvil. Con la primera componente, auto-regresiva se determina cada observación como una combinación lineal de las observaciones anteriores y con la segunda componente, de promedio móvil, se incluye una parte aleatoria que completa la descripción del fenómeno a través del tiempo. Por tanto, se considera que la serie temporal tiene señal-parte determinística del fenómeno dinámico- y ruido -perturbaciones aleatorias que sufre por causas exógenas- (Box & Jenkins, 1976).

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones de una variable aleatoria y continua X_t . La serie es estacionaria cuando es estable en media, varianza y covarianza. Una serie no-estacionaria puede transformarse en estacionaria mediante la transformación denominada diferenciación de orden d (Box & Jenkins, 1976):

$$Y_t = (1 - B)^d X_t \quad \text{Ec (2.6)}$$

$$B^d X_t = X_{t-d}$$

En el modelo ARMA (Box & Jenkins, 1976), la componente auto-regresiva de orden p es AR(p), expresa cada observación como una combinación lineal de las observaciones en p etapas anteriores:

$$AR(p): (1 - \phi_1 B \dots - \phi_p B^p) Y_t = a_t \quad \text{Ec (2.7)}$$

La componente de promedio móvil de orden q , es $MA(q)$, expresa cada observación como una combinación lineal de las perturbaciones o errores aleatorios en q etapas anteriores:

$$MA(q): Y_t = (1 - \theta_1 B \dots - \theta_q B^q) a_t \quad \text{Ec (2.8)}$$

Los polinomios en B de grados p y q suelen escribirse: $\phi(B)$ y $\theta(B)$, por tanto las ecuaciones anteriores quedan:

$$AR(p): \phi(B) Y_t = a_t \quad \text{Ec (2.9)}$$

$$MA(q): Y_t = \theta(B) a_t$$

La estimación de los coeficientes ϕ y θ consiste en hallar los valores que minimicen la suma de cuadrados de los residuales; previa verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las variables transformadas.

Los modelos ARMA se han aplicado a procesos hidrológicos estacionales univariados (Salas et al., 1980; 1982; Obeysekera & Salas, 1986; Haltiner & Salas, 1988; Padilla et al., 1996), con el objetivo de pronosticar, completar datos y generar series sintéticas que conserven los principales estadísticos y la función de autocorrelación de la serie original.

La principal desventaja de estos modelos estriba en el concepto de equifinalidad (Beven, 1993), es decir, la existencia de diferentes valores de los parámetros del modelo con los que se obtienen similares medidas de ajuste. Por tanto, si los valores de los parámetros no pueden ser definidos de manera única, los parámetros no pueden asociarse directamente a las características de la cuenca, y por tanto, el modelo no puede aplicarse después de haberse producido cambios en la misma. Sin embargo, las actuales técnicas de calibración y validación y un análisis detallado de la estructura del modelo y de la incertidumbre de los parámetros, permite resolver este problema. Por tanto, para cada uno de los modelos se efectuó el proceso de calibración, validación y el análisis de sensibilidad. Se empleó la técnica Split sample para el proceso de calibración y validación (Singh et al, 2004; Moriasi et al, 2007).

La calibración es el proceso de estimación de los parámetros del modelo mediante la comparación de las predicciones del modelo para un conjunto determinado de condiciones con los datos observados para las mismas condiciones (Ma et al, 2000; Moriasi et al, 2007); busca mejorar el ajuste entre los valores observados y los valores modelados de la variable de salida de interés, al variar reiterativamente los parámetros del modelo; proporciona confianza en que el modelo pueda reproducir, para el periodo calibrado, el registro histórico.

Una vez logrado una adecuada calibración, se evalúa nuevamente el ajuste del modelo, para un nuevo set de variables de entrada y salida, sin ajustar los parámetros previamente calibrados, es decir se valida el modelo (Refsgaard, 1997; Moriasi et al, 2007)

El análisis de sensibilidad permite evaluar el potencial de impacto de errores en los valores de los parámetros, porque no todos los parámetros influyen de igual manera en los resultados, el

modelo es más sensible a un parámetro que a otro. Cuando un modelo cuenta con muchos parámetros (todos con incertidumbre sobre sus valores), puede ser difícil saber qué parámetros considerar prioritariamente en la calibración; un análisis de sensibilidad puede ayudar a determinar los parámetros más influyentes en los resultados del modelo, para así poner mayor énfasis en la determinación de valores realistas (Debels & Ecurra, 2010)

Los métodos gráficos y estadísticos son herramientas que permiten evaluar si el modelo es una representación simplificada de la realidad. Las técnicas gráficas proporcionan una comparación visual de los datos simulados y observados y una primera visión general de los resultados del modelo (ASCE, 1993); por tanto, son esenciales durante la calibración (Legates & McCabe, 1999). Para el estudio, se emplearon hidrogramas o gráficos de series de tiempo del flujo simulado y medidos a lo largo de los períodos de calibración y validación; estos hidrogramas ayudan a identificar el sesgo del modelo (ASCE, 1993), las diferencias en el tiempo, la magnitud de los caudales máximos y la forma de las curvas de recesión (Moriasi et al, 2007).

Además del análisis gráfico, los parámetros estadísticos empleados para evaluar los resultados de la calibración y validación, recomendados por (Moriasi et al, 2007; Debels, 2010), se describen a continuación:

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe-NSE (1970) es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos de medición ("información"), representado en la Ecuación 2.10; este índice fue empleado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico (Debels, 2010), adoptando la interpretación recomendada por la literatura (Moriasi et. al, 2007), según la Tabla 2.3.

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{observado}} - Q_i^{\text{simulado}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{observado}} - Q^{\text{promedio}})^2} \right] \quad \text{Ec (2.10)}$$

Varios índices de error son comúnmente utilizados en la evaluación del modelo (Moriasi et al, 2007; Debels, 2010); los empleados se describen a continuación:

El promedio de los errores absolutos (Mean Absolute Error-MAE) y **la raíz cuadrada del error medio** (Root Mean Square Error –RMSE). RMSE, MAE de 0 indican un ajuste perfecto. Los valores de RMSE y MAE menos de la mitad de la desviación estándar de los datos medidos pueden ser considerados bajos y apropiados para la evaluación del modelo (Singh et al.; 2004).

Razón RMSE- desviación estándar de las observaciones (RSR) es una versión estandarizada del RMSE (Legates & McCabe, 1999); se calcula como el cociente entre el RMSE y la desviación estándar de los datos observados, como se muestra en la siguiente ecuación y se interpreta basados en los criterios establecidos por Moriasi et. al. (2007), que se resumen en la Tabla 2.3.

$$RSR = \frac{RMSE}{DESVEST_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{observado} - Q_i^{simulado})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{observado} - Q^{promedio})^2}} \right] \quad \text{Ec (2.11)}$$

Sesgo porcentual (Percent bias-PBIAS) es la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados (Gupta et al., 1999). Se adoptan los criterios recomendados por Moriasi et. al. (2007) para su interpretación (Tabla 2.3). La expresión para el cálculo es la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{observado} - Q_i^{simulado})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{observado})} \right] * 100 \quad \text{Ec (2.12)}$$

Tabla 2.3: Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación

PBIAS	NSE	RSR	Interpretación Modelo
PBIAS < ±10	0,75 < NSE ≤ 1,0	0.00 < RSR ≤ 0.50	Muy Bueno
±10 ≤ PBIAS < ±15	0,65 < NSE ≤ 0,75	0.50 < RSR ≤ 0.60	Bueno
±15 ≤ PBIAS < ±25	0,50 ≤ NSE ≤ 0,65	0.60 < RSR ≤ 0.70	Satisfactorio
PBIAS ≥ ±25	NSE < 0,50	RSR > 0.70	No satisfactorio

(Moriasi et.al., 2007)

Para la calibración y validación se emplearon los registros históricos de las estaciones administradas por el IDEAM- Chupaderos y El Retiro y por la CHEC-Sancancio y Montevideo, cuya ubicación se visualiza en la Figura 2.2. La interpolación de las variables climáticas para cada una de las subcuencas y en la cuenca global fue realizada empleando el método de los polígonos de Thiessen.

En general, el procedimiento empleado para la calibración, validación y simulación se describe a continuación:

- Estimar los parámetros del modelo manualmente a la salida de la cuenca
- Correr el modelo y realizar el análisis gráfico
- Calcular los estadísticos: NSE, PBIAS, MAE, RSME, RSR
- Realizar el análisis de sensibilidad
- Ajustar los parámetros del modelo automáticamente empleando el método de mínimos cuadrados basados en la interpretación de los estadísticos según la Tabla 2.3.
- Evaluar los parámetros del modelo obtenidos, teniendo en cuenta su interpretación física y los resultados de cada uno de los tanques para determinar si son consistentes con la realidad.
- Elegir los mejores parámetros de calibración basados en el análisis gráfico, los parámetros estadísticos y la interpretación física.
- Realizar la validación temporal del modelo, evaluando los parámetros en la misma estación en diferentes períodos de tiempo.
- Efectuar la validación temporal y espacial del modelo, evaluando los parámetros obtenidos en diferentes períodos de tiempo y en otras estaciones.

- Realizar el análisis de simulación para el período más reciente 1981-2010 y evaluar los resultados a partir del análisis gráfico y estadístico.
- Estimar la oferta hídrica
- Realizar el análisis de simulación para el período histórico 1961-1990 o 1971-2000, según la disponibilidad de caudales observados en las estaciones, evaluar los resultados a partir del análisis gráfico y estadístico.
- Estimar los cambios en la oferta hídrica

2.2.3 Señales de cambio climático - Metodología

Este análisis fue realizado para las variables brillo solar, humedad relativa, temperaturas (media, máximas, mínimas), precipitación (media) y caudal basados en los registros históricos de las estaciones hidroclimatológicas localizadas en la cuenca (Tabla 2.1, Figura 2.2). Los resultados de la modelación hidrológica fueron empleados para el análisis de la escorrentía superficial, la evapotranspiración potencial y real.

La normal climatológica fue calculada para el período 1981-2010 tomando el promedio multianual de las series, para cada una de las variables climatológicas.

Para el análisis de variabilidad climática, las series históricas fueron analizadas en diferentes escalas temporales (diaria, mensual y anual); se evaluó la variabilidad interanual, multianual e interdecadal de las series, que incluyó análisis de estadística descriptiva y de varianza; se emplearon las herramientas de IBM SSPS statistics y Microsoft office Excel 2007.

Para encontrar las señales del cambio climático fueron analizados períodos de 30 años, con los cuales se calcularon las anomalías promedio, de igual manera se realizó tanto el análisis de estadística descriptiva como el de varianza.

El análisis de varianza permitió establecer si las diferencias eran estadísticamente significativas ($\alpha = 0,05$). Se realizó análisis de varianza ANOVA y la prueba post hoc de Duncan en las series con distribución Normal, previa verificación de los estadísticos de Kolmogorov - Smirnov o Shapiro Wilk (significancia 0,05%) - según el número de datos - y la homocedasticidad de las series - prueba de Levene (significancia del 0,05%). Se utilizaron test no paramétricos de Kruskal Wallis y la prueba U de Man-Whitney (significancia 0,05%), en las series heterocedásticas o que no se ajustaban a la función de distribución normal.

Para la precipitación fue realizado el análisis de eventos extremos por décadas, aplicando el análisis de frecuencias para identificar el número de eventos que superaban los percentiles 95 y 99 de la serie histórica. Para establecer la distribución de probabilidad que más se ajusta a las lluvias máximas, se empleó el programa AFINS, en ambiente IDL. Se graficaron además las curvas PADF (Precipitación- Área- Duración (24 horas)- Frecuencia), tomando como base los registros históricos de las estaciones ubicadas en la cuenca y el límite de la cuenca en formato shape; se

utilizó el software PADF Curve Generation empleado en el modelo CAPRA para la generación de datos y Excel para la elaboración de los gráficos (GIRS Center and FIU, 2010).

2.2.4 Alteraciones por variabilidad climática – Metodología

El análisis de la alteración de las variables por efecto de la Oscilación del Sur – ENSO, fue realizado evaluando en cada una de las estaciones, la diferencia con respecto a la normal mensual climatológica 1981-2010 y el valor histórico registrado para los eventos del Niño y la Niña, teniendo cuenta el índice Oceánico el Niño; en el cual los valores superiores a $0,5^{\circ}\text{C}$ corresponden a eventos cálidos -el Niño- mientras que los inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ a los episodios fríos- la Niña-.

Las variables temperatura media, precipitación y caudal fueron analizadas. Basados en el análisis de estadística descriptiva, se realizó el cálculo de las anomalías estandarizadas, restándole a cada valor de la media mensual y dividiendo por la desviación estándar mensual. Se calcularon los promedios trimensuales acumulados de la misma manera, que se computan para el índice oceánico El Niño y finalmente, se evaluaron los coeficientes de correlación entre las anomalías estandarizadas y el índice ONI. Se tuvo en cuenta las metodologías empleadas por Poveda et.al (2011).

2.2.5 Análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico - Metodología

La vulnerabilidad del recurso hídrico fue analizada considerando la susceptibilidad de la cuenca para conservar y mantener el régimen hidrológico actual ante posibles alteraciones por variabilidad climática (IDEAM, 2010).

Si bien existen diferentes metodologías para el análisis de vulnerabilidad y teniendo como base que el propósito de este estudio no es definir metodologías, se emplearon los indicadores del régimen hidrológico, sugeridos por el IDEAM (2010), para efectos de comparación.

Se calcularon los indicadores del régimen hidrológico medio para el período 1981-2010 basados en los registros históricos de caudales para cada una de las estaciones: El Retiro, Montevideo, Sancancio y Chupaderos y el análisis de información secundaria que incluyó información de estadísticas del DANE y reportes de CORPOCALDAS. Para evaluar los efectos de la variabilidad climática fueron calculados los indicadores para condiciones hidroclimáticas de años húmedo (máximo medios) y seco (mínimos medios).

Los indicadores evaluados fueron el índice de retención y regulación hídrica, los caudales ambientales, el índice de aridez, los indicadores de calidad y contaminación del agua, el índice de disponibilidad per cápita de agua, el índice de stress hídrico relativo y uso de agua, la oferta hídrica disponible, la demanda hídrica y el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento. La metodología para el cálculo de cada uno de los índices se describe a continuación:

Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH): mide la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales; la interpretación se presenta en la Tabla 2.4. Se calcula a partir de la curva de duración de caudales medios diarios, según la ecuación (IDEAM, 2010):

$$IRH = VP/V_t \quad \text{Ec (2.13)}$$

Donde:

VP: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio

V_t : Volumen total representado por el área bajo la curva

Tabla 2.4: Calificación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

IRH	Calificación cualitativa	Descripción
>0,85	Muy alta	Muy Alta retención y regulación de Humedad
0,75-0,85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0,65-0,75	Moderada	Media retención y regulación de humedad
0,50-0,65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
<0,5	Muy Baja	Muy baja retención y regulación de humedad

(IDEAM, 2010)

Índice de Aridez: representa la dinámica superficial del suelo y evidencia los lugares con déficit o excedentes de agua; es determinado a partir de la evapotranspiración potencial y real, empleando la ecuación (2.12); la interpretación se presenta en la Tabla 2.5 (IDEAM, 2010):

$$I_a = \frac{ETP-ETR}{ETP} \quad \text{Ec (2.14)}$$

Donde:

I_a : Índice de aridez

ETP: Evaporación potencial (mm)

ETR: Evaporación real (mm)

Tabla 2.5: Calificación del Índice de aridez

Índice de Aridez	Calificación cualitativa	Descripción
< 0,15	Altos excedentes	Altos excedentes de agua
0,15- 0,19	Excedentes	Excedentes de agua
0,20 – 0,29	Moderado y excedentes	Moderado y excedentes de agua
0,30 – 0,39	Moderado	Moderado
0,40 – 0,49	Bajo	Moderado y deficitario de agua
0,50-0,59	Deficitario	Deficitario de agua
>0,60	Altamente deficitario	Altamente deficitario de agua

(IDEAM, 2010)

Índice de stress hídrico relativo: El programa mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO, ha definido una serie de indicadores para medir el nivel de estrés sobre el recurso que incluye el índice de stress hídrico relativo también conocido como demanda de agua relativa (RWSI)- Tabla 2.6, establece la demanda disponible para uso industrial, doméstico y de agricultura. Se calcula a partir de la siguiente expresión (UNESCO, 2009):

$$RWSI = \frac{D + I + A}{Q} \quad \text{Ec (2.15)}$$

Donde:

Q: suministro de agua- $\text{km}^3/\text{año}$

D: Demanda de agua para uso doméstico- $\text{km}^3/\text{año}$

I: Demanda de agua para uso industrial- $\text{km}^3/\text{año}$

A: Demanda de agua para la agricultura - $\text{km}^3/\text{año}$

Tabla 2.6: Umbrales del índice de stress hídrico

Índice de Escasez	Calificación cualitativa	Observaciones
> 0,4	Alto	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la alta demanda de agua por los sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requieren fuertes inversiones para mejorar la eficiencia de utilización en los sectores productivos
0,2 – 0,4	Medio	La oferta hídrica llega al límite máximo para atender la demanda. Es necesario el ordenamiento de la cuenca y asignar prioridades a los distintos usos.
0,10- 0,2	Moderado	La disponibilidad de agua se puede convertir en factor limitante del desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo y seguimiento a largo plazo
<0,1	Bajo	No se experimental presiones sobre el recurso hídrico en términos de cantidad de agua

(UNESCO, 2009; IDEAM, 2008)

Índice de uso de agua o índice de escasez: Es la relación porcentual entre la demanda de agua con la oferta hídrica disponible; la interpretación se presenta en la Tabla 2.7 y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$I_{ua} = \frac{D_h}{O_h} \times 100\% \quad \text{Ec (2.16)}$$

Donde:

I_{ua} : Índice de uso de agua

D_h : Demanda hídrica sectorial

O_h : Oferta hídrica superficial neta m^3

Tabla 2.7: Categorías para la evaluación del índice de uso de agua

Índice de Escasez o uso de agua	Calificación cualitativa	Observaciones
>50%	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20 – 50%	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10-20%	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1-10%	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1%	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

(IDEAM, 2010)

La oferta neta hídrica (On): define la cantidad de agua que ofrece la fuente luego de haber tomado una cantidad para efectos de mantener la dinámica de las aguas (caudal ecológico) y para proteger las fuentes frágiles; se calcula a partir de la siguiente ecuación (IDEAM, 2008):

$$O_n = O_t - (O_t \times R_e + O_t \times R_{it}) \quad \text{Ec (2.17)}$$

Donde:

O_t : oferta hídrica superficial en $m^3/año$

R_e : Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje

R_{it} : Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

El factor de reducción para mantener el estiaje se calcula a partir de la curva de duración de caudales de cada año, de la cual se extrae el caudal mínimo, calculado como el promedio aritmético de los caudales que son superados el 75% del tiempo durante el año. Con estos caudales se conforma el estadístico que caracteriza el régimen de estiaje de la fuente. De la función de distribución de probabilidad se extrae el caudal de estiaje con probabilidad de excedencia del 97,5%. Utilizando este caudal se determina la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente aplicando la ecuación (IDEAM, 2008):

$$R_e = \frac{Q_{\min 97,5\%}}{\bar{Q}} \quad \text{Ec (2.18)}$$

Donde:

\bar{Q} : Caudal medio de la esorrentía para el período de agregación seleccionado.

La reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica se debe estimar a través de una relación a partir del coeficiente de variación de los caudales promedio diarios anuales, aplicando la escala que se presenta en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica

Cv	R _{it} , %
0 – 0,2	15
0,2 – 0,3	25
0,3 – 0,4	35
0,4 – 0,6	40
>0,6	50

(Dominguez et.al, 2008)

La oferta neta puede ser calculada como la oferta total menos el caudal ambiental (IDEAM, 2010). **El caudal ambiental** es definido como el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas debajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Se tiene diferentes metodologías basadas en métodos hidrológicos, hidráulicos, de hábitat y holísticos (Tharme, 2003); sin embargo, la metodología propuesta por el IDEAM (2010), se basa en el régimen hidrológico, calculado a partir de la curva de duración de caudales diarios:

$$\text{Si } IRH \geq 0,7; \quad Q_{\text{ambiental}} = Q_{85-\text{Cuva de duración de caudal}}$$

$$\text{Si } IRH < 0,7; \quad Q_{\text{ambiental}} = Q_{75-\text{Cuva de duración de caudal}} \quad \text{Ec (2.19)}$$

La Demanda Hídrica (D_T): representa el volumen utilizado por las actividades económicas en un espacio y tiempo determinado y corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004):

$$D_T = D_{ud} + D_{ui} + D_{us} + D_{ua} + D_{up} \quad \text{Ec (2.20)}$$

Donde:

D_{ud} : Demanda de agua para consumo doméstico;

D_{ui} : Demanda de agua para uso industrial;

D_{us} : Demanda de agua para el sector de servicios;

D_{ua} : Demanda de agua para uso agrícola;

D_{up} : Demanda para uso pecuario.

La demanda para uso doméstico se expresa como el número de habitantes por un volumen de uso de agua expresado en valor de dotación neta (L/hab-día), basados en la metodología del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004), deben incluirse las pérdidas técnicas.

Índice de disponibilidad per cápita de agua: expresado en m³/habitante-año, establece la relación entre la población y la cantidad de agua disponible en las principales fuentes de agua, medida en términos de escorrentía superficial. Es uno de los indicadores más empleados (Lvovitch, 1970; Korzun et al., 1978; UNESCO, 1979; UNESCO, 2009). Las categorías del índice de disponibilidad per capita (Falkenmark, 1999) se resumen en la Tabla 2.9. Este índice no tiene en

cuenta los usos del agua, por lo cual no puede exhibir los conflictos por uso a escala Local o regional.

Tabla 2.9: Categorías del índice de disponibilidad per cápita de agua

Índice de disponibilidad per cápita de agua m ³ /hab-año	Categoría	Observación
1700 - 1001	Estrés Hídrico	Ampliar las medidas de adaptación y adecuar dispositivos para el aprovechamiento de aguas lluvias y subterráneas
1000 – 501	Escasez de agua	Implementar medidas de ahorro y uso eficiente del agua.
< 500	Escasez severa de agua	Se presentan problemas imposibles de superar; el desarrollo económico se restringe fuertemente

Adaptada (IDEAM, 2008)

Los Índices de Calidad del Agua (ICA) y los Índices de Contaminación (ICO): son usados para cuantificar la calidad de una fuente de agua mediante la valoración de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales son convertidos en un sólo número, que se encuentra para el ICA entre 0 (muy mala calidad) y 100 (excelente calidad) y para el ICO entre 0 (muy bajo nivel de contaminación) y 1 (muy alto nivel contaminación) y por tanto, permiten definir el grado de calidad o de contaminación del agua.

El Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL): Tiene en cuenta la DBO, la diferencia entre la DQO y la DBO, los Sólidos Suspendidos Totales-SST-, El Nitrógeno Total-NT- y el Fósforo Total-PT-, las categorías y descriptores de presión se describen en la Tabla 2.10 (IDEAM, 2010).

Tabla 2.10: Categorías del índice de alteración de calidad del agua

Categoría	Descriptor	Carga en (Ton/año)/Mm ³				
		DBO	DQO-DBO	SST	NT	PT
1	Baja	< 0,13	< 0,13	< 0,3	< 0,02	< 0,004
2	Moderada	0,14 – 0,39	0,14 – 0,35	0,40 – 0,70	0,03 – 0,05	0,005 – 0,013
3	Media	0,40 – 1,20	0,36 – 1,16	0,80 – 1,80	0,06-0,13	0,014-0,035
4	Alta	1,21 - 4,85	1,17-6,77	1,90-7,60	0,14-0,55	0,036-0,0134
5	Muy Alta	>4,86	>6,78	>7,70	>0,56	>0,135

(IDEAM, 2010)

El Índice de Vulnerabilidad por desabastecimiento: Mide el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas por periodos largos de estiaje o eventos como el fenómeno cálido del Pacífico (El Niño), podría

generar riesgos de abastecimiento (IDEAM, 2010). Se determinará a través de la matriz de relación entre el IRH y el IUA como se presenta en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11: Matriz de relación para categorizar el índice de vulnerabilidad

Categorías	Índice de Vulnerabilidad - IV			
	IRH-Alto	IRH- Moderado	IRH- Bajo	IRH- Muy bajo
IUA - Muy alto	Medio	Alto	Alto	Muy Alto
IUA - Alto	Medio	Alto	Alto	Muy Alto
IUA- Moderado/Medio	Medio	Medio	Alto	Alto
IUA- Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
IUA - Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio

Adaptado: (IDEAM, 2010)

2.2.6 Posibles indicadores futuros - Metodología

Posibles indicadores futuros bajo condiciones estacionarias.

La hipótesis de estacionariedad en los procesos hidrológicos colapsa ante el cambio climático (Acevedo & Poveda, 2010). Sin embargo, como efectos de un ejercicio académico, el cual no tiene pretensiones de prospectiva, se plantea la proyección de tendencias para estimar como podría ser el cambio en las variables climáticas temperatura y precipitación en caso de que se presentaran condiciones estacionarias.

La proyección de tendencias permite estimar el comportamiento futuro de acuerdo con la tendencia observada en el pasado. Los métodos de proyección de tendencias buscan determinar la forma que debe asumir una ecuación para que se ajuste de la mejor manera posible a la relación observada entre las variables dependientes e independientes. Las variables climáticas poseen una variabilidad cíclica, para la cual la estimación empleando métodos no lineales sería lo más recomendado; sin embargo, dado el alcance del ejercicio, se emplearon técnicas de métodos de mínimos cuadrados ampliamente usadas en los estudios econométricos.

Para utilizar los modelos de regresión lineal y teniendo en cuenta que son proyecciones de largo plazo, se suavizaron las curvas anuales, con promedios multianuales por décadas, dos décadas y tres décadas. Se establecieron los modelos de regresión lineal a partir del promedio multianual, los cuales fueron validados teniendo en cuenta el análisis de significancia de los β individuales ($\alpha < 0,05$), la prueba global del modelo ($\alpha < 0,05$) y la verificación de los supuestos de distribución normal de los errores (Shapiro-Wilk, significancia de 0,05), homocedasticidad (Prueba de White) y la no correlación en los errores (Durbin Watson). Los modelos con el mayor coeficiente de determinación corregido fueron seleccionados.

Con las estimaciones de cambio en las variables temperatura y precipitación y el empleando el modelo hidrológico, se siguió la misma metodología (Xu 1999; 2004) empleada para el análisis del cambio climático para estimar la oferta hídrica y el cálculo posterior de los indicadores hidrológicos.

Posibles indicadores futuros bajo escenarios de cambio climático.

Actualmente, los modelos y los escenarios de cambio climático son empleados para realizar proyecciones que involucren el calentamiento global (IPCC, 2007).

En este estudio se toman como punto de partida las proyecciones del IDEAM, (2010) presentadas en la Segunda Comunicación Nacional, para el período 2011-2040 y de estudios similares, previamente expuestos en el capítulo 1. Sin embargo, estas simulaciones de escenarios regionales de cambio climático se caracterizan por la presencia de distintas fuentes de incertidumbre, desde el establecimiento de escenarios de emisión, hasta los modelos globales y la simulación a escala regional (Mitchell y Hulme, 1999), el análisis de incertidumbres no se encuentra disponible en dicha comunicación.

Los impactos del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico fueron evaluados adoptando la metodología propuesta por Xu (1999; 2004):

- Determinación de los parámetros del modelo hidrológico, en la cuenca de estudio, con entradas actuales climáticas y flujos observados en el río para validación del modelo;
- Perturbación de las series históricas de los datos climáticos, de acuerdo con los escenarios de cambio climático (ΔT y ΔP). Para tal efecto se tienen en cuenta las estimaciones del IDEAM (2010).
- Simulación de las características hidrológicas de la cuenca bajo el clima perturbado utilizando el modelo hidrológico calibrado;
- Comparación de las simulaciones del modelo actual y futuro hidrológico posible.

Con los resultados de la modelación hidrológica se estimó la posible oferta hídrica y de esta manera se calcularon los diferentes indicadores del régimen hidrológico. Para la demanda hídrica se tuvieron en cuenta las proyecciones de crecimiento de la población establecidas por el DANE y los indicadores de crecimiento económico para los diferentes sectores.

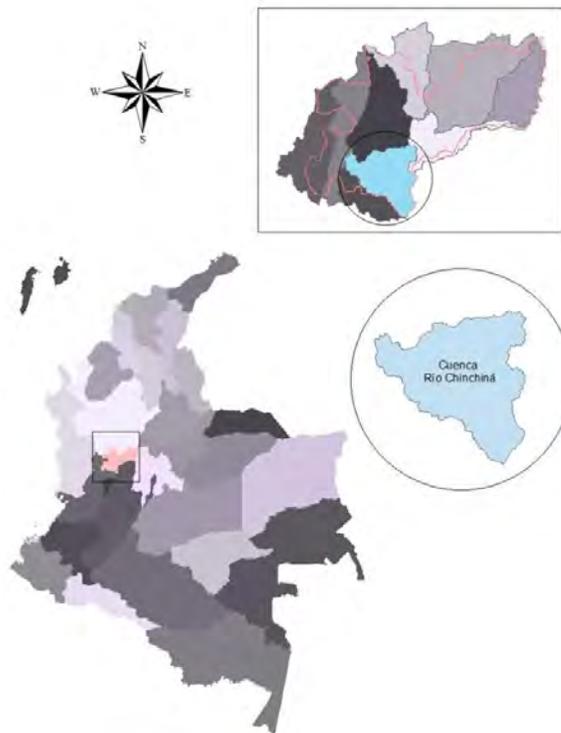
Se incluye además el análisis de la información disponible en la base de datos de WorldClim (Hijmans et al., 2005), para los escenarios A2 y B2 con los modelos HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3), CSIRO-Mk2 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) y CCCMA (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis), empleando la reducción de escala por el método Delta (Villegas & Jarvis, 2010), para el período 2010-2039 [2020]. Se analizan los posibles cambios en la temperatura y precipitación estimados por los modelos. La información mensual proyectada por los modelos climáticos, fue empleada en los modelos hidrológicos, para estimar la oferta hídrica y calcular posteriormente los indicadores del régimen hidrológico.

3. Caracterización física de la cuenca

3.1 Localización de la cuenca

El caso de estudio comprende la cuenca del río Chinchiná, localizada en la región centro sur del departamento de Caldas, Colombia (Figura 3.1). Latitud (N) $4^{\circ}48'12,9''$ a $5^{\circ}12'9,7''$ y Longitud (E) $75^{\circ}19'11,5''$ a $75^{\circ}42'33,6''$. Se extiende desde el Nevado del Ruiz, donde nacen los ríos Claro, Chinchiná y Guacaica, a 5400 m.s.n.m., hasta la desembocadura en el río Cauca a 780 m.s.n.m, con una extensión total de 1050 km²; en este trayecto, recorre una longitud de 68.25 km, con un tiempo medio de recorrido de flujo de 30 horas.

Figura 3.1: Localización de la cuenca del río Chinchiná



En la zona más alta del Parque Nacional Natural Los Nevados, hay ecosistemas estratégicos afectados por el cambio climático: los glaciares tropicales del nevado del Ruiz y Santa Isabel, que están perdiendo progresivamente su capa de hielo debido al calentamiento global; los páramos de alta montaña que están reduciendo su capacidad de regular el ciclo del agua y la reserva forestal de río Blanco, que forma parte de la zona de amortiguamiento del Parque, protege los recursos hídricos y es un hábitat de varias especies amenazadas de flora y la fauna. Esta reserva suministra alrededor del 35% del agua del municipio de Manizales (PROCUENCA, 2010). En la cuenca media y baja prevalece el paisaje cafetero, declarado en 2011, patrimonio mundial por la UNESCO.

Aunque sólo ocupa el 14.1% del territorio de Caldas, concentra el 55% de la población (540.000 habitantes) y la producción industrial y agropecuaria, principalmente cafetera, generando el 80% del PIB del departamento de Caldas (Universidad del Rosario, 2012). La distribución del total del área de la cuenca por municipios es: 37.5% Manizales, 41.8% Villamaría, 1.7% Neira, 7.3% Chinchiná y 11.7% Palestina (CORPOCALDAS, 2005).

3.2 Características físicas de la cuenca

Las características principales de la cuenca se refieren a aspectos morfológicos y fisiográficos y la capacidad para almacenar agua en forma superficial o subterránea (Silva, 1998). Estas características dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje), los tipos de suelos, la capa vegetal, la geología y las prácticas agrícolas (Monsalve, 2008).

3.2.1 Características del relieve

El modelo de elevación digital -MED- de la zona de estudio se presenta en la Figura 3.2. Las características topográficas del terreno como las pendientes de la cuenca (Figura 3.4) se obtienen a partir del MED. La pendiente controla la velocidad de la escorrentía superficial y afecta el tiempo que tarda la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales, que constituyen la red de drenaje de la cuenca. La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente y es directamente proporcional (Monsalve, 2008). Pendientes marcadas, como las que se presentan en la cuenca alta, ayudan a la escorrentía superficial, mientras que bajos valores, menores a 6,5%, como los de la cuenca baja, favorecen la infiltración o zonas de encharcamiento. Se pueden identificar tres zonas o tramos de pendientes diferentes a lo largo del río, que se esquematizan en el perfil longitudinal del río (Figura 3.3.)

Cuenca Alta: con fuerte pendiente, 63,7- 35,7%.

Cuenca Media: con una pendiente media, 35,7% - 21%.

Cuenca Baja: con pendientes bajas < 16,5%.

La pendiente media de la cuenca es 42%; para los principales aferentes río Claro y río Guacaica es del 48% y 55%, respectivamente (CORPOCALDAS, 2005). Para las microcuencas, el valor menor de pendiente es 20.85% (quebrada Carminales) y el mayor es 66.83% (quebrada San Juan). La elevación media es de 2135 m.s.n.m. Por tanto, la cuenca presenta riesgo de desplazamiento de las capas del suelo o deslizamientos de tierras por la marcada pendiente (CORPOCALDAS, 2005).

Figura 3.2: Modelo de Elevación Digital -MED- de la cuenca del río Chinchiná.

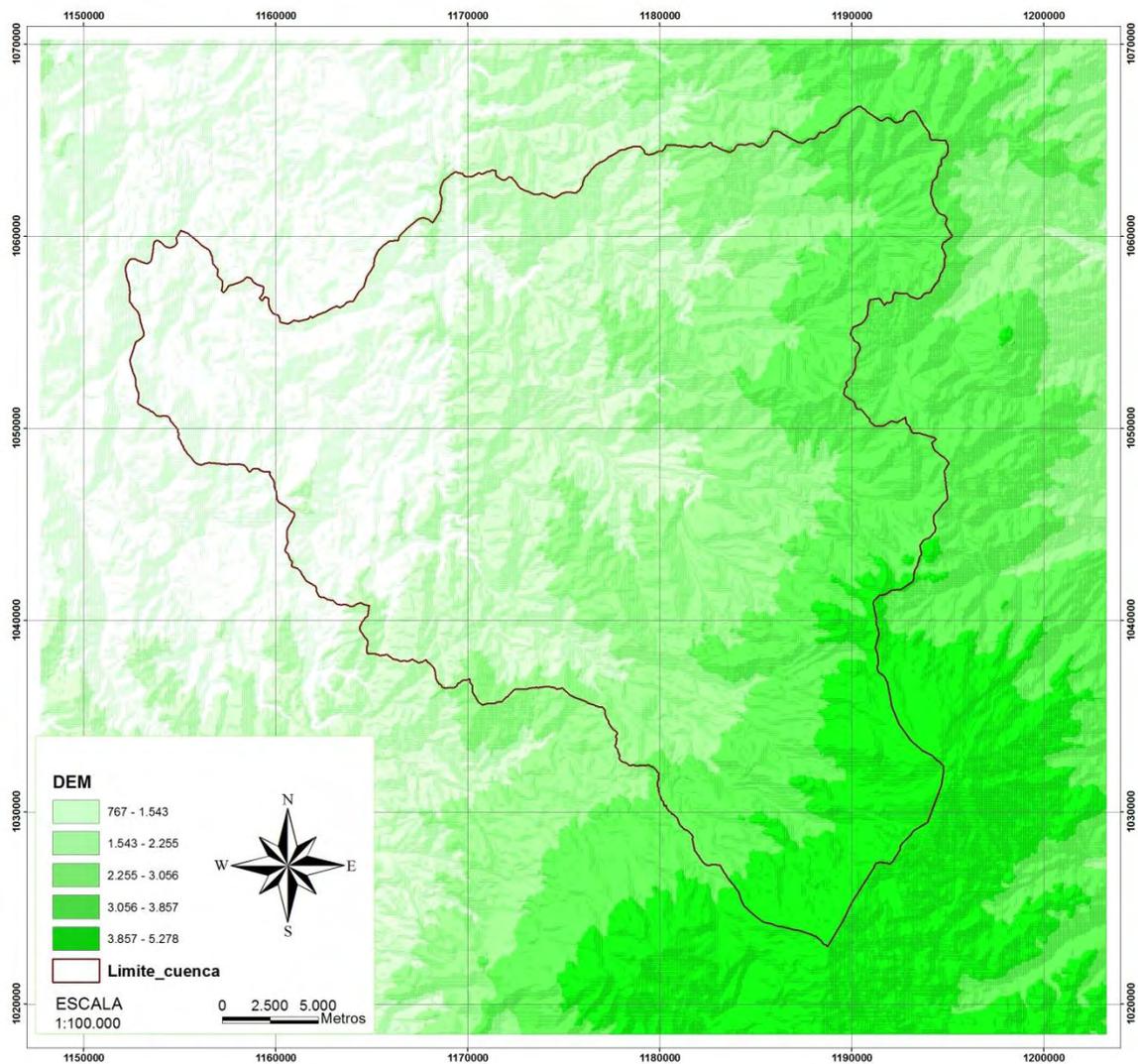
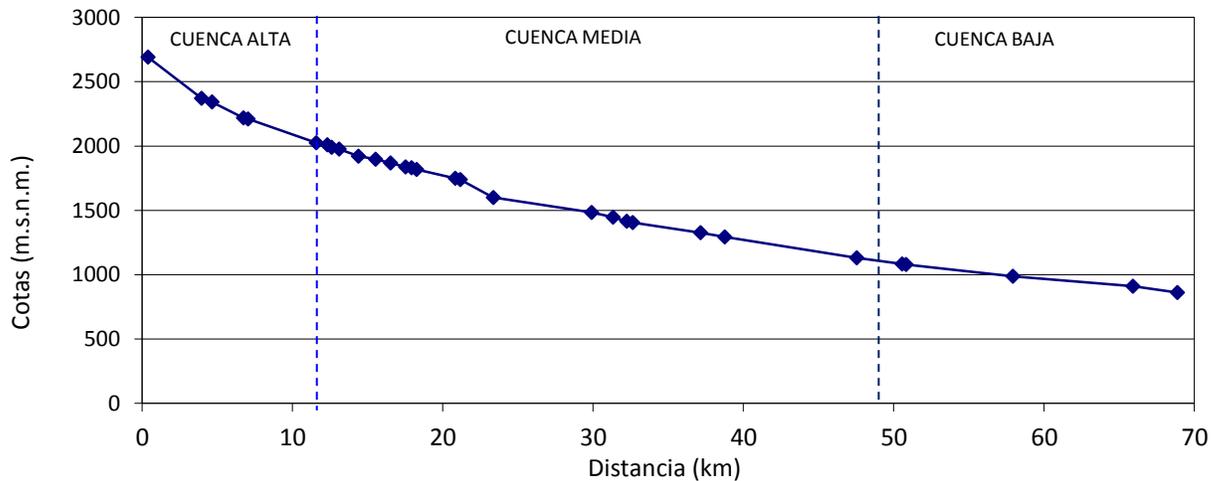


Figura 3.3: Perfil longitudinal del río Chinchiná

Fuente: (CORPOCALDAS, 2005)

La cuenca puede ser clasificada según el perfil transversal del río (Figura 3.5) empleando la clasificación de Rosgen (1994), la cual se basa en parámetros como la pendiente, la sinuosidad, los materiales del cauce, la relación ancho/profundidad y el encajamiento. La característica de valle en forma de “V” con ladera de pendientes muy pronunciadas y muy estrecho en el fondo, da lugar a la formación de quebradas de gran pendiente y escasa longitud, en donde se pueden presentar un gran caudal máximo instantáneo de poca duración y un volumen que genere arrastre de material sólido (CORPOCALDAS, 2005).

3.2.2 Sistema de drenaje

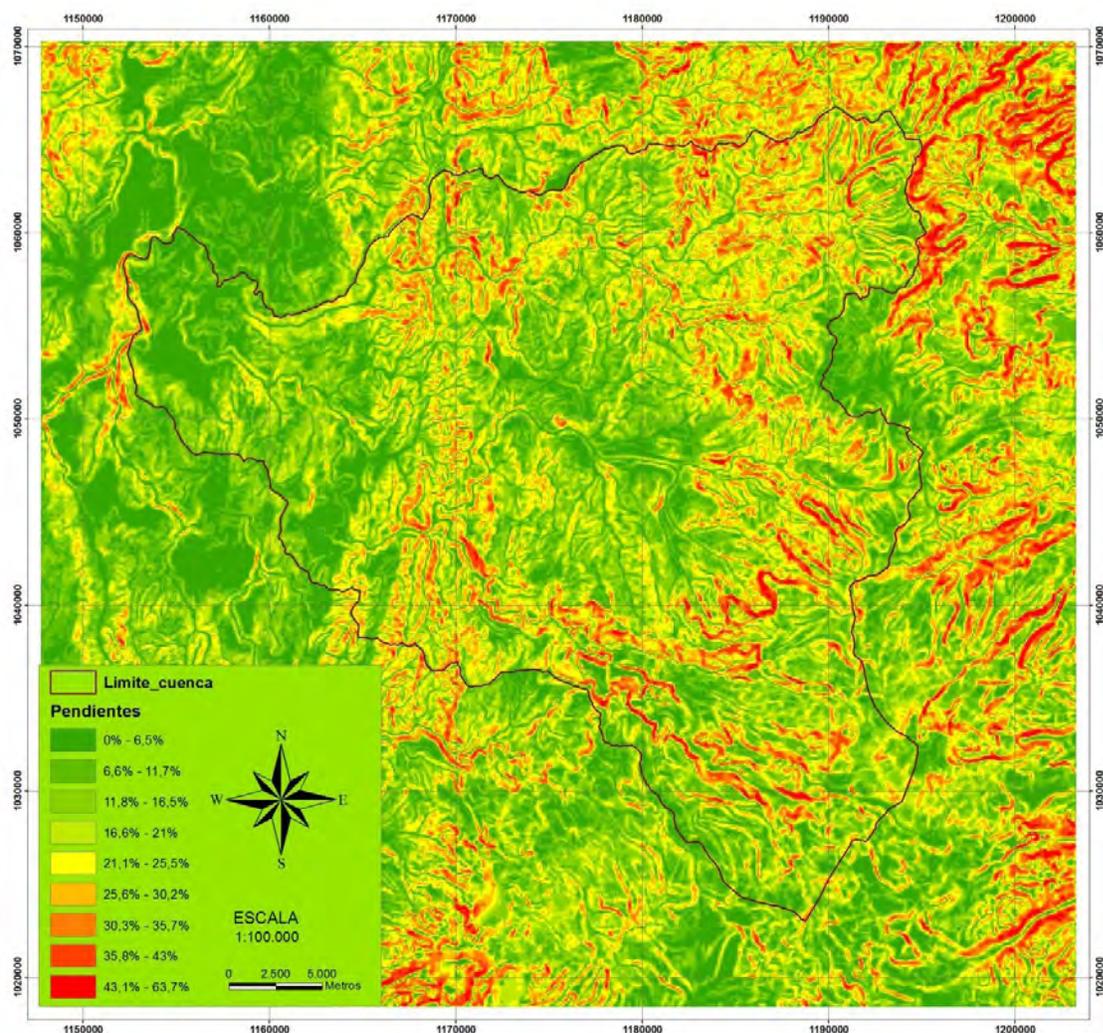
El sistema de drenaje comprende el río principal y sus afluentes o tributarios. Los aspectos a considerar incluyen el orden de las corrientes de agua, la densidad del drenaje, la extensión media de la escorrentía superficial, la sinuosidad de las corrientes de agua y el coeficiente de torrencialidad, entre otros.

Los mapas para el estudio hidrológico, se obtienen a partir del MED corregido e incluyen: el mapa de direcciones de flujo (Figura 3.6), el cual representa las direcciones de movimiento mediante líneas de ancho variable, proporcionales a su importancia y esquematizadas de acuerdo con el trazado. El cauce principal del río Chinchiná, fluye a lo largo de su trayectoria en sentido oriente – occidente, desde su nacimiento hasta la desembocadura en el río Cauca.

El mapa de áreas acumuladas (Figura 3.7), representa la acumulación del flujo a través de los cauces, con los mayores valores a la salida de la cuenca. El mapa de longitudes de flujo (Figura 3.8) expresa las distancias que recorre el flujo antes de salir de la cuenca, es empleado para el cálculo de los mapas de tiempos de flujo.

- **Tiempo de concentración (tc):** es el tiempo de viaje de una gota de agua para fluir, desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de interés. En la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tc en cuencas hidrográficas (Vélez & Botero, 2010); se considera apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes (Chow, Maidment, & Mays, 1988). La Tabla 3.1 presenta las ecuaciones empleadas para el cálculo y los valores obtenidos, que arrojan un promedio de 30 h; por tanto se considera que la ecuación de Clark es apropiada para el cálculo del tiempo de concentración medio (Figura 3.9). Los mapas de tiempo de flujo, se presenta en las Figuras 3.10 y 3.11 y representan el rango de variación de este parámetro.

Figura 3.4: Mapa de pendientes de la cuenca del río Chinchiná



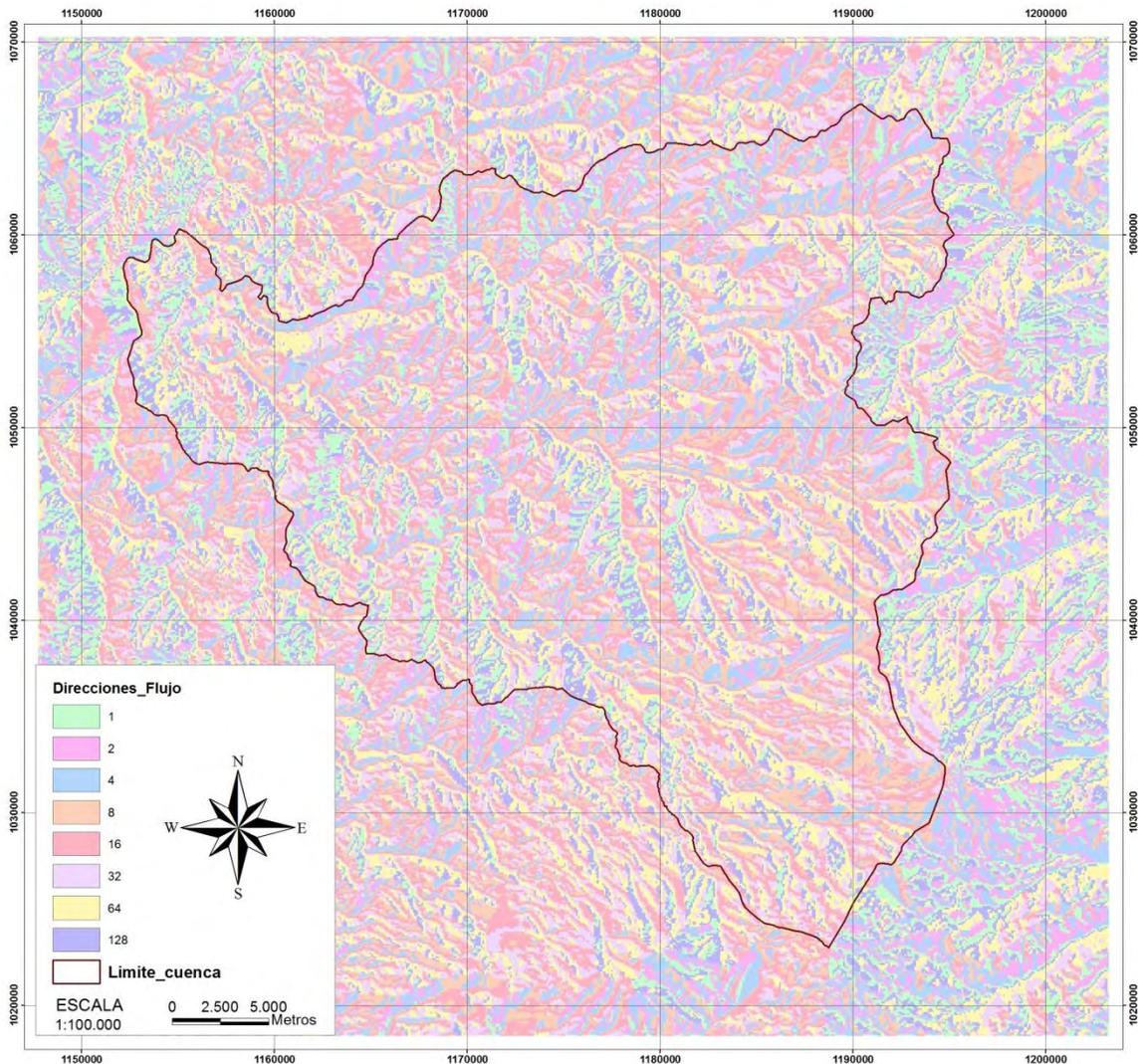
- **Red de drenaje:** obtenida a partir del MED se muestra en la Figura 3.12 esta distribución se comparó con lo observado en campo y con la información de CORPOCALDAS y representa las condiciones hidrológicas de la cuenca. Los principales tributarios del Chinchiná son los ríos Claro y Guacaica; entre otros afluentes, se destacan:
 - Cuenca Alta: quebradas San Eugenio, La Negra, El Diamante, La Zulia, La Rochela, La Olivia, Tolda Fría y Palmichal.
 - Cuenca Media-Alta: quebradas chupaderos, Manizales, el perro.
 - Cuenca Media-baja: quebradas El Molino, La Monina, Cuba, La Camelia, Palogrande, Versalles, Marmato, La Diana, El Chifón, La Floresta, El Arroyo, San Miguel y San Juan
 - Cuenca Baja: quebradas los Cuervos, Cameguadua, El Rosario, Manzanares, El Purgatorio, Cartagena, Carminales.

Figura 3.5: Clasificación de la cuenca según el perfil transversal del río.



Adaptado (CORPOCALDAS, 2005)

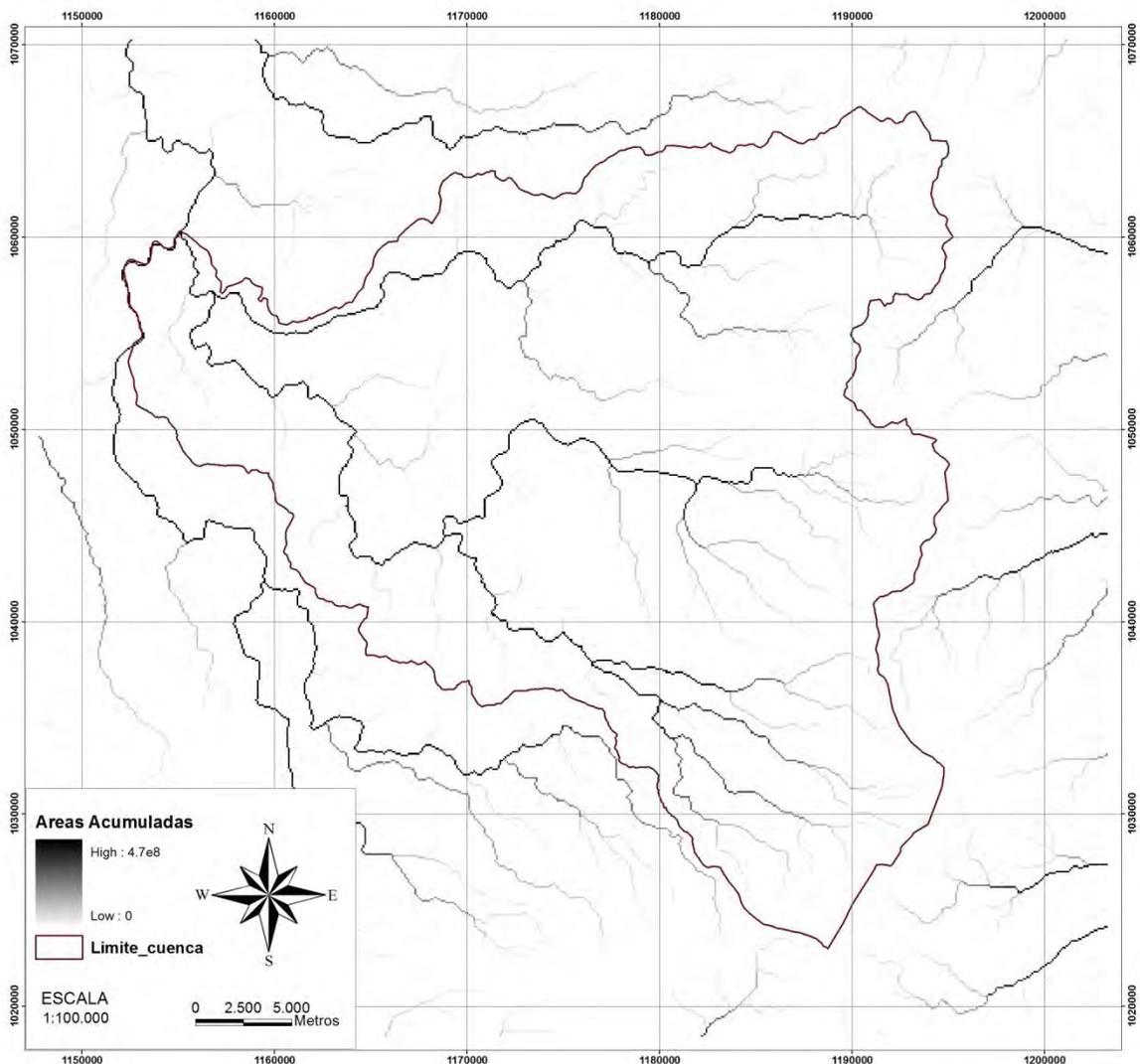
Figura 3.6: Mapa de direcciones de flujo de la cuenca del río Chinchiná.



- **Orden de las corrientes:** refleja el grado de ramificación o bifurcación en una cuenca hidrográfica. Existen diferentes métodos Gravellius (1914), Horton (1945); Panov (1948), Strahler (1952), Scheidegger (1965) y Shreve (1966). El método de Horton-Strahler clasifica las cuencas por un control gravitatorio y excluye las cuencas menores de determinado rango; se consideran de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes; cuando dos corrientes de orden uno se unen, resulta una corriente de orden dos; de manera general, cuando dos corrientes de orden i se juntan, se genera una corriente de orden $i+1$. Si una corriente llega a otra de diferente orden, se conserva el orden mayor.

A partir de la red de drenaje, empleando las herramientas de los SIG, se realizó la clasificación de las corrientes, con la metodología de Horton-Strahler (Figura 3.13). La red de drenaje está altamente ramificada y se pueden establecer hasta 6 órdenes de corriente en la cuenca, de acuerdo con la clasificación empleada.

Figura 3.7: Mapa de áreas acumuladas de la cuenca del río Chinchiná



- **Densidad de drenaje (Dd):** es un índice que relaciona la longitud de la red de drenaje (L) y el área de la cuenca (A)- ecuación (3.1). Indica la eficiencia de la red de drenaje; las cuencas de pobre drenaje alcanzan densidades cercanas a 0,5 km/km²; mientras que las cuencas bien drenadas tienen valores alrededor de 3,5 km/km² (Monsalve, 2008)

$$D_d = \frac{L(km)}{A(km^2)} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

La densidad de drenaje del río Chinchiná está alrededor de 1 km/km^2 ; para el río Claro es de $0,95 \text{ km/km}^2$ y para el río Guacaica es de $1,45 \text{ km/km}^2$ (CORPOCALDAS, 2005)

Figura 3.8: Mapa de longitudes de flujo de la cuenca del río chinchiná

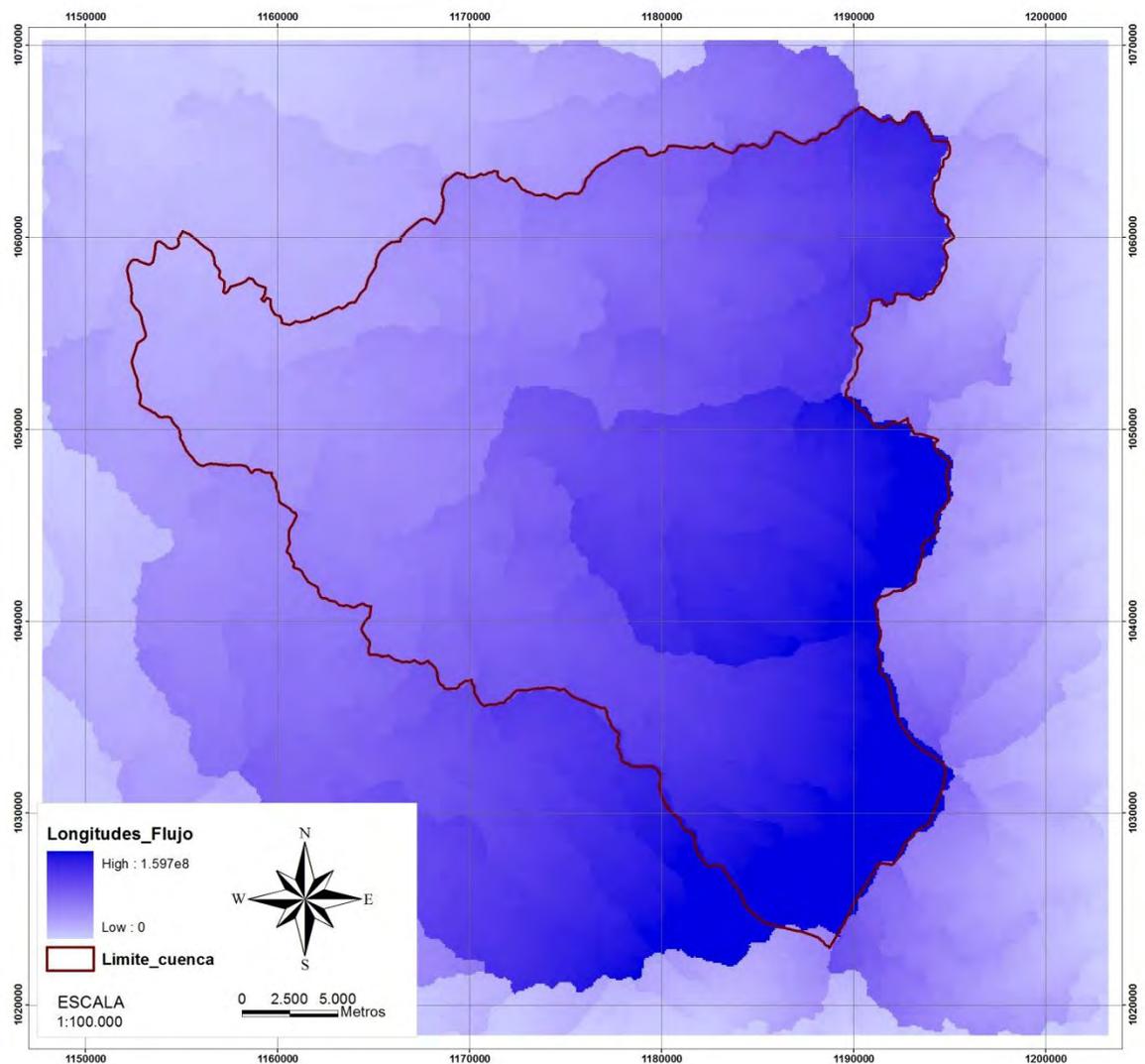


Tabla 3.1: Cálculo del tiempo de concentración, t_c

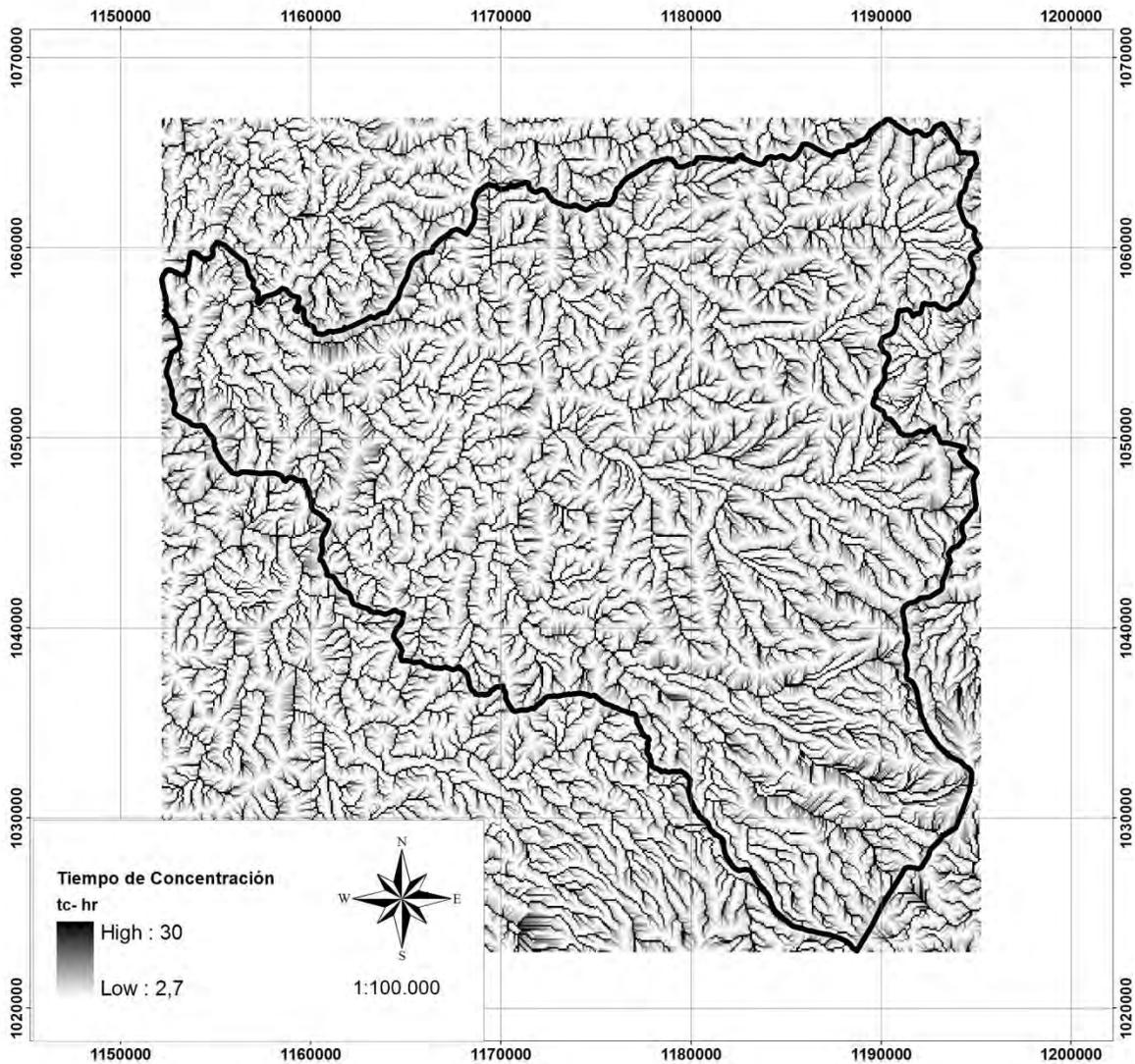
Ec.	Método	Ecuación	tc – h	Unidades
3.2	Bureau of Reclamation	$t_c = \left[0.886 \frac{L_{cauce}^3}{H} \right]^{0.385}$	50.0	tc = tiempo de concentración, (h) L _{cauce} = Longitud del cauce (m). H = Ancho promedio (km)
3.3	Californiana U.S.B.R	$t_c = 0.66 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77}$	26.5	tc: tiempo de concentración (h), L: longitud del cauce principal (km) S: pendiente promedio del cauce principal (m/m)
3.4	Clark (1945)	$t_c = 0.335 \left[\frac{A}{S^{0.5}} \right]^{0.593}$	29.2	tc: tiempo de concentración (h) S: pendiente del cauce (m/m) A: área de la cuenca (km ²)
3.5	Guaire	$t_c = 0.355 \frac{A^{0.595}}{S_{cuenca}^{0.298}}$	31.4	tc: tiempo de concentración (h) S _{cuenca} : Pendiente de la cuenca (m/km) A: Área de la cuenca (km ²)
3.6	Ruiz (1988)	$t_c = 4.94559 A^{0.192} S_{cuenca}^{-0.445} S_{cauce}^{0.192}$	25.1	tc: tiempo de concentración (h) S _{cuenca} : Pendiente de la cuenca (%) S _{cauce} : Pendiente del cauce (m/m) A: Área de la cuenca (km ²)
3.7	Valencia y Zuluaga (1991)	$t_c = 1,7694 A^{0.325} L^{-0.096} S_o^{-0.29}$	15.8	tc: tiempo de concentración (h) A: Área de la cuenca (km ²) L : Longitud del curso de agua (km). So: pendiente (%)

- **El Coeficiente de torrencialidad (C_t)** mide el grado de torrencialidad de la cuenca, mediante la relación del número de cauces de orden uno con respecto al área total de la misma. A mayor magnitud, mayor grado de torrencialidad presenta una cuenca.

$$C_t = \frac{\# \text{Cauces de orden 1}}{\text{Area Cuenca (Km}^2\text{)}} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Los valores alcanzados son de 2 para el río Chinchiná, 1,2 para el río Claro y 2,5 para el río Guacaica, por tanto, son ríos de tipo torrencial con gran capacidad de transporte de material de fondo y lateral, lo cual puede provocar formación local de depósitos aluviales sobre el cauce y aguas abajo (CORPOCALDAS, 2005).

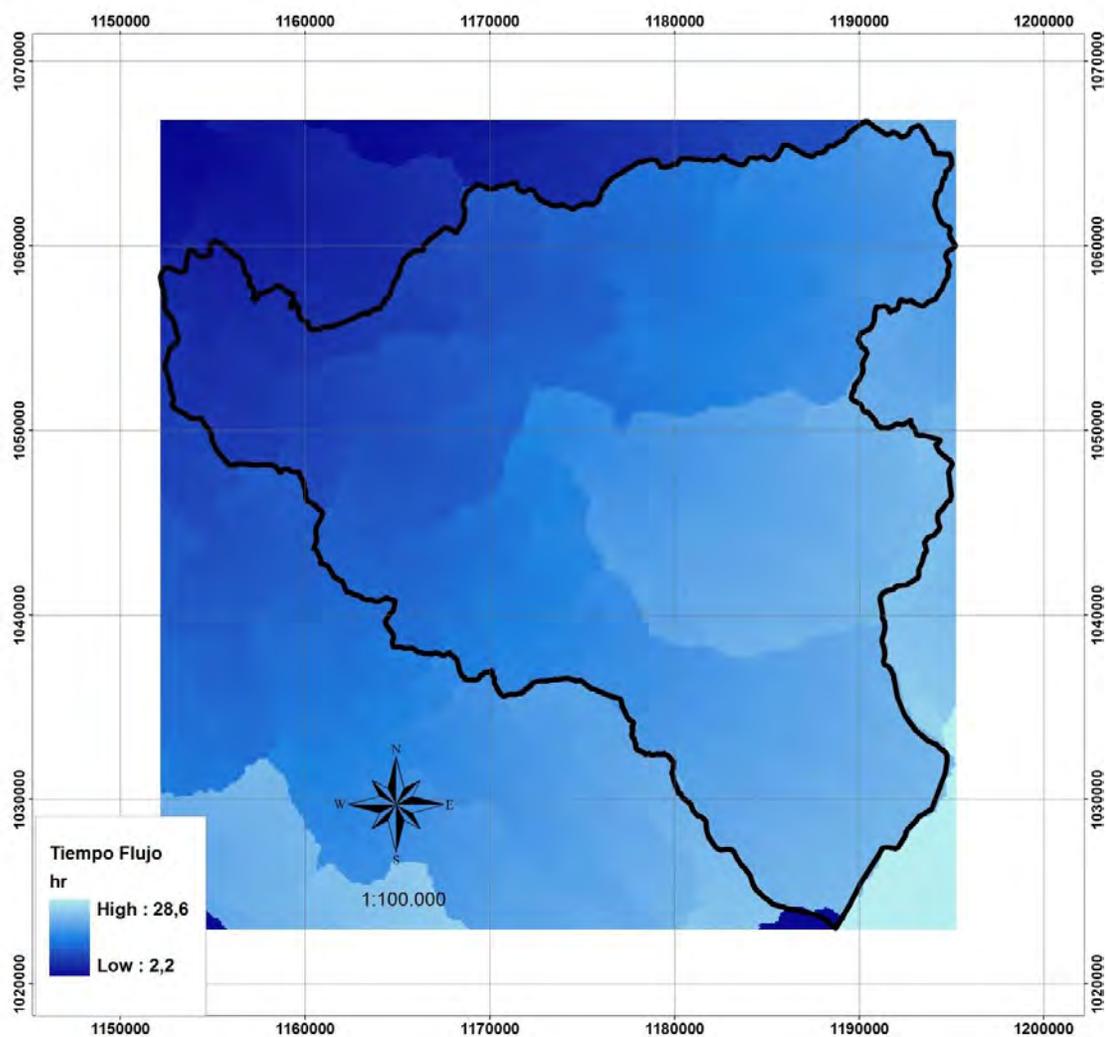
- **Subcuencas del río Chinchiná:** CORPOCALDAS divide la cuenca en cuatro subcuencas: río Chinchiná, río Claro, Guacaica y Campo Alegre como se presenta en la Figura 3.14. En el estudio de ordenamiento de la subcuenca del río Chinchiná, (CORPOCALDAS, 2005), a su vez la subdivide en cuatro zonas: alta, media-alta, media-baja, baja, cuyas características se resumen en la Figura 3.15

Figura 3.9: Mapa de tiempos de concentración – Método de Clark

Para la investigación, la delimitación de las cuencas se realizó empleando los mapas de áreas acumuladas y de direcciones de flujo, usando herramientas SIG. Se tomaron como base las estaciones de caudal: Chupaderos, Sancancio, Montevideo y El Retiro, cuyas características se describen en la Tabla 3.2. La cuenca se dividió en cuatro subcuencas: alta, media-alta, media y baja, como se esquematiza en la Figura 3.16. De acuerdo con la delimitación, la subcuenca del río Campo Alegre, no está incluida en el área de estudio, porque drena directamente al río Cauca.

Tabla 3.2: Estaciones de caudal cuenca del río Chinchiná

No	Nombre Estación	Fuente	Altitud	Latitud N	Longitud W	Localización	
			msnm			X	Y
1	Chupaderos	IDEAM	2032	5° 1′	75° 28′	1179044,25	1046402,34
2	Planta Sancancio	CHEC	2000	5° 3′	75° 28′	1177220,22	1048764,06
3	Montevideo	CHEC	1370	5°	75° 39′	1166975,32	1044124,28
4	El Retiro	IDEAM	838	5° 7′	75° 40′	1156832,38	1057412,8

Figura 3.10: Mapa de tiempos de flujo –valores mínimos

3.2.3 Características morfométricas

Las áreas de las subcuencas establecidas para el estudio son 150 km² para la cuenca alta, 213 km² para la cuenca media-alta, 512 km² para la cuenca media y 1055 km² para toda la cuenca. Un resumen de las principales características morfométricas se muestran en la Tabla 3.3. Los valores del coeficiente de compacidad, Kc indican que la forma de la cuenca es oval oblonga. El índice de alargamiento permiten concluir que la cuenca tiene la capacidad de dispersar el escurrimiento de lluvias intensas y está menos sujeta a crecientes, por el bajo valor del factor de forma.

Figura 3.11: Mapa de tiempos de flujo –valores máximos

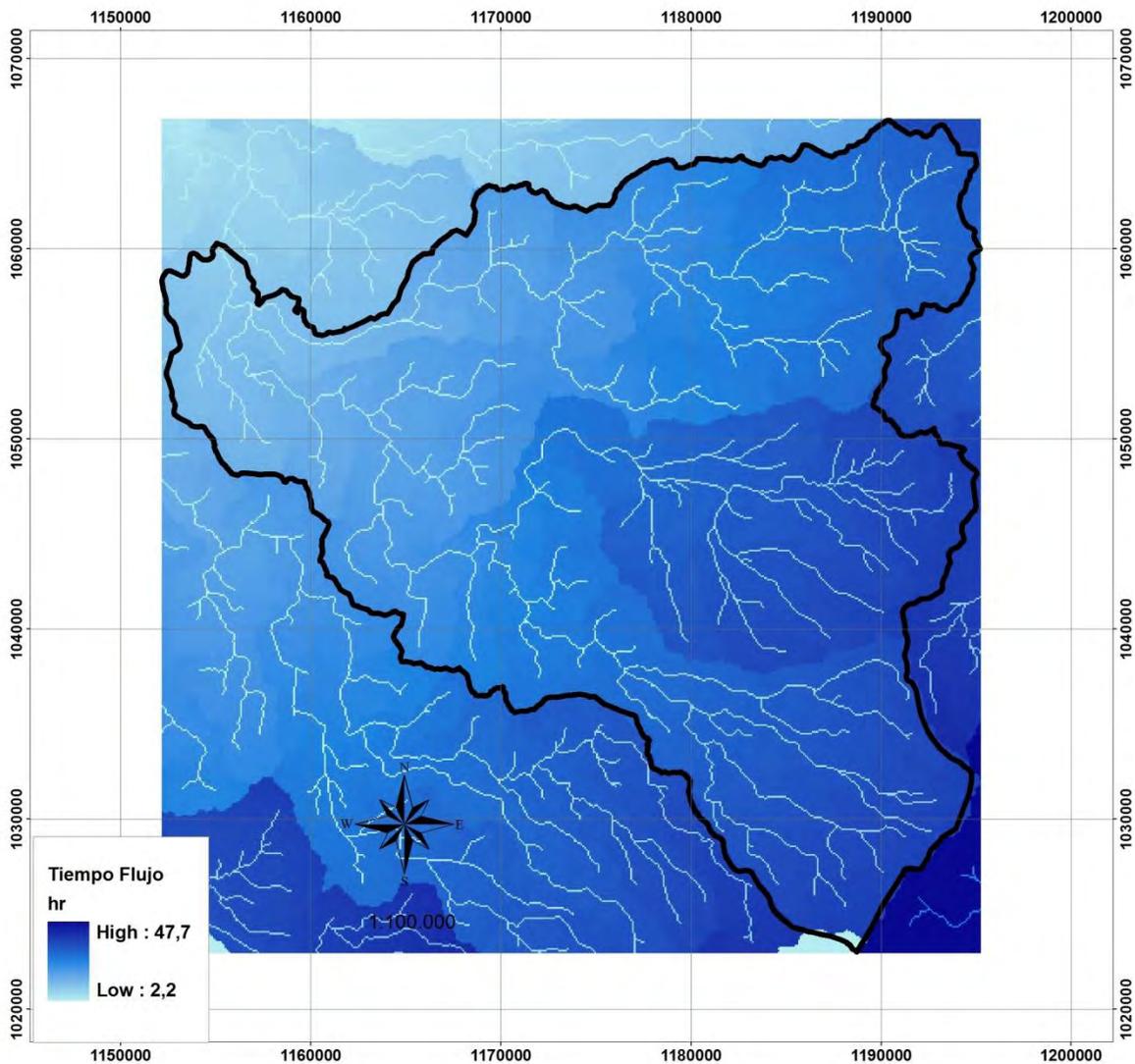


Tabla 3.3: Características morfométricas cuenca del río Chinchiná

Característica	Unidades	Chinchiná	Claro	Guacaica
Ancho promedio de la Cuenca	km	10,9	8,2	8,6
Longitud Axial	km	42,9	29,3	39,0
Factor de Forma, K_f		0,25	0,28	0,22
Coefficiente de compacidad, K_c		1,9	1,6	1,7
Indice de Alargamiento, I_a		2,6	2,0	2,8

Adaptada (CORPOCALDAS, 2005)

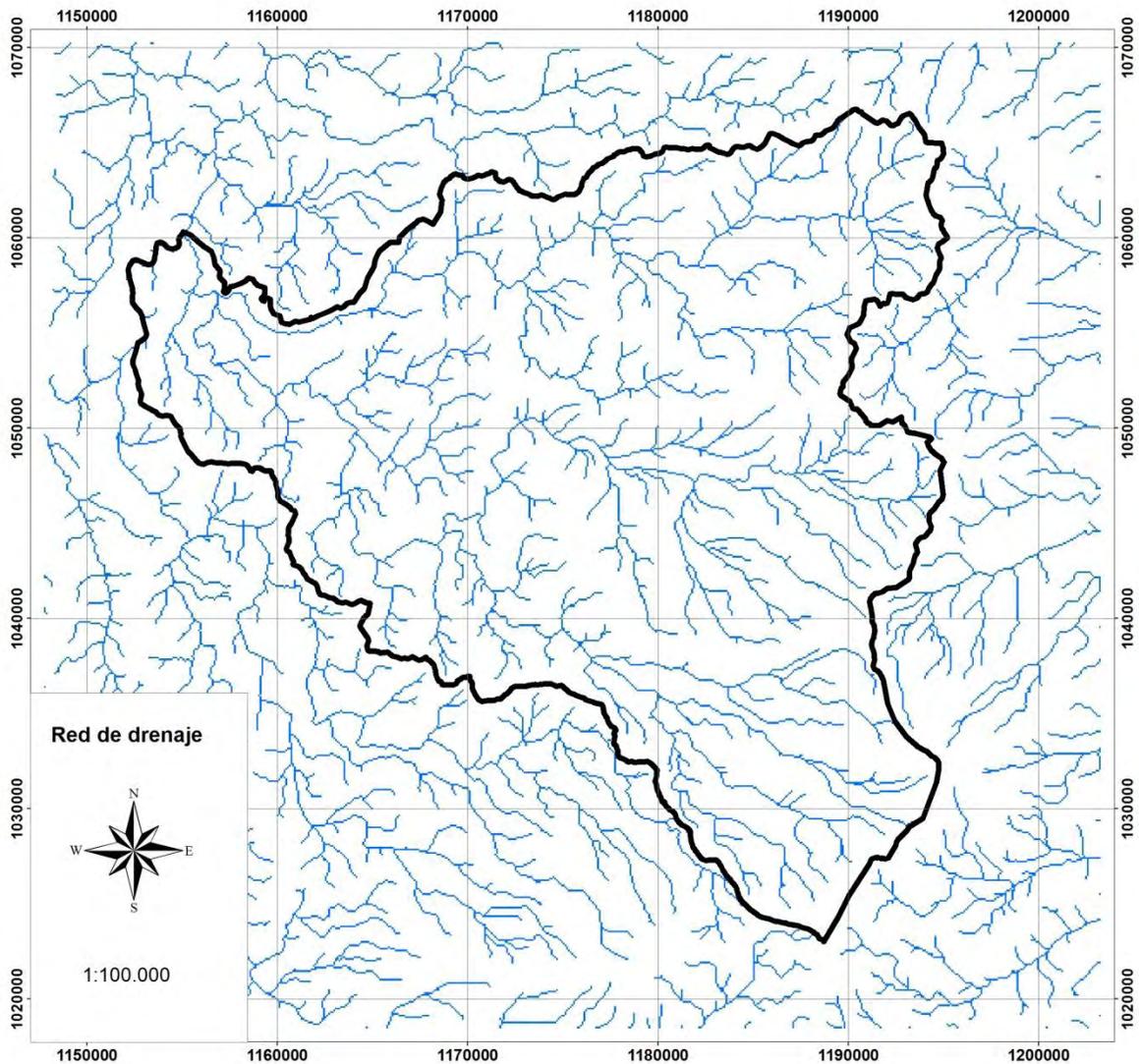
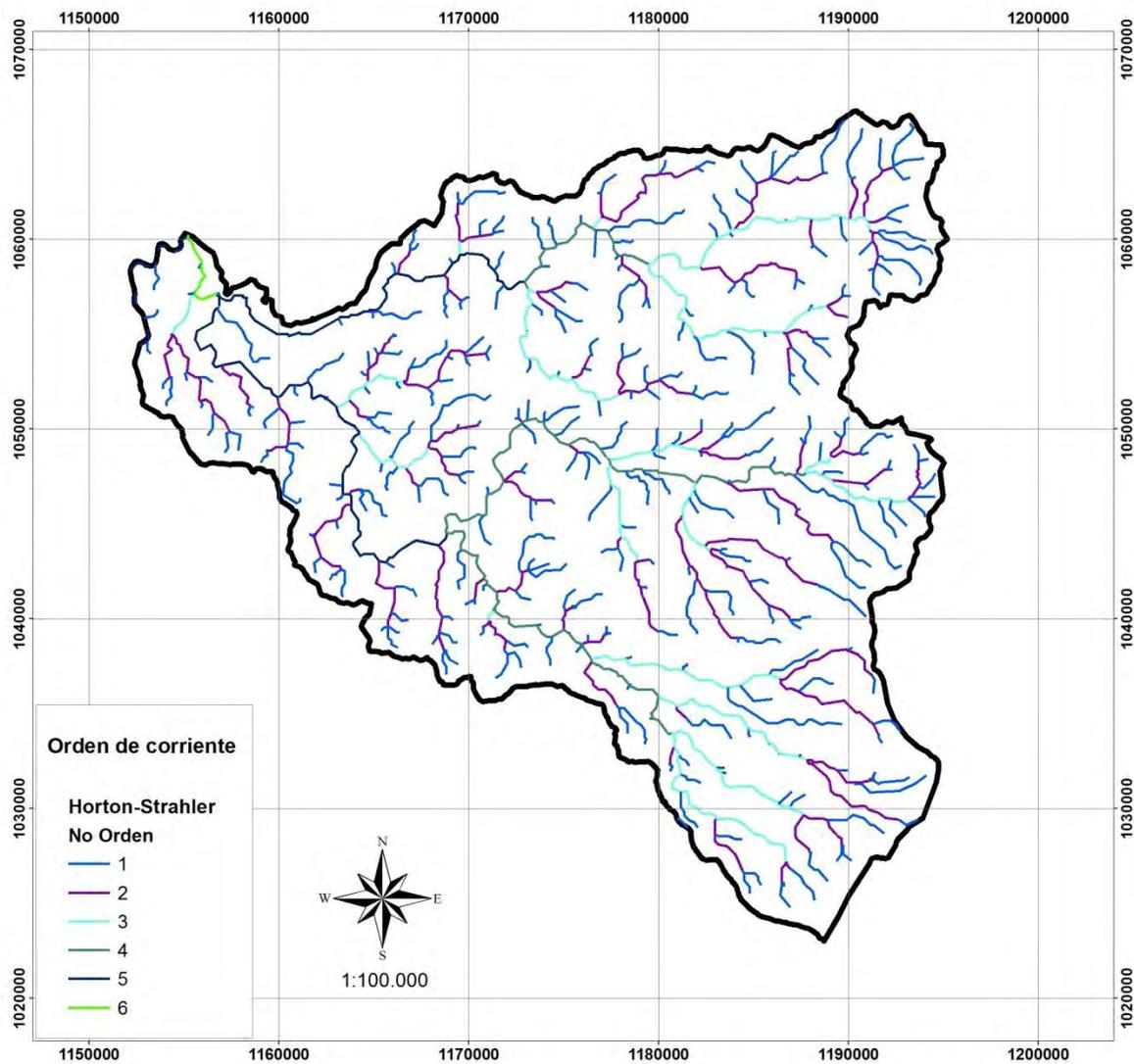
Figura 3.12: Red de drenaje cuenca del río Chinchiná

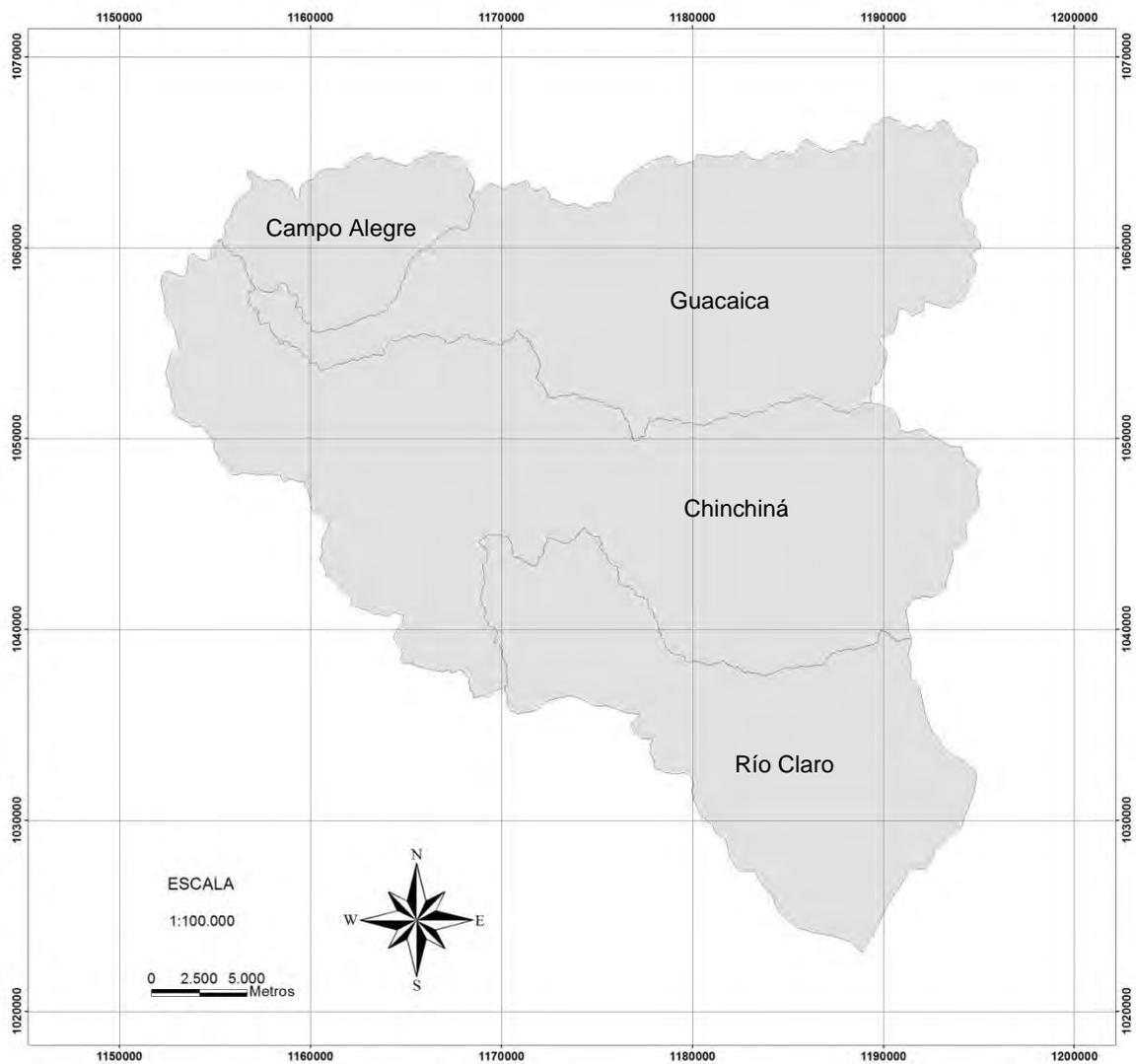
Figura 3.13: Orden de corriente cuenca del río Chinchiná

3.2.4 Geología

El mapa geológico de la zona de estudio (Figura 3.17) fue obtenido a partir del mapa geológico de Caldas. La zona cuenta con una gran variedad de unidades geológicas de diferentes edades y orígenes; presenta diferentes unidades litológicas, que muestran el basamento de la Cordillera Central y su historia volcánica reciente y subreciente e incluyen: Complejo Cajamarca (Pzc); Complejo Arquía (Keslp); Complejo Quebradagrande; Stock de Manizales (Kscm); Intrusivo Gnéisico Sintectónico (Pinm); Gabros de Chinchiná-Santa Rosa (Kdg); Secuencia Volcano-

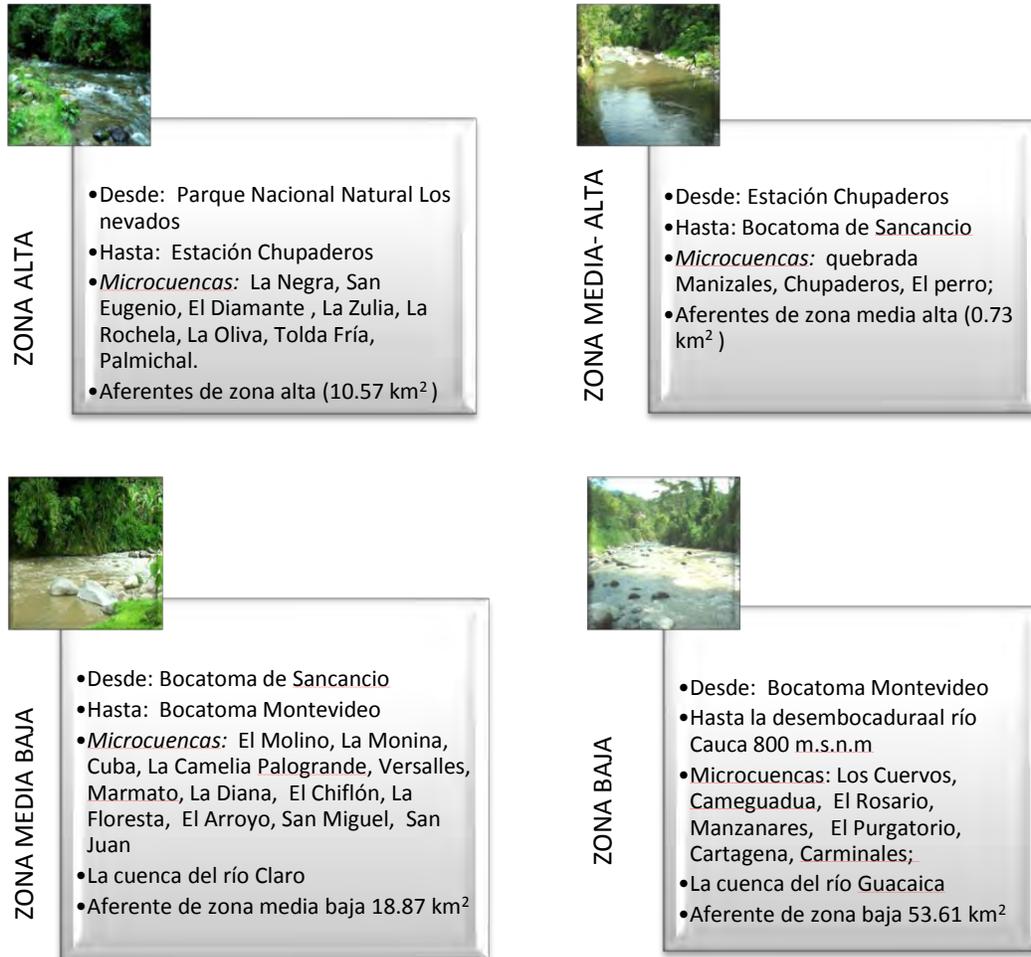
Sedimentaria Irra-Tres Puertas (Tsic - Tsv); unidad de flujos volcániclasticos (Tsmc); lavas indiferenciadas (Tqa); Ignimbrita del Guacaica (Tsig); depósitos de caída Piroclástica (Qto); depósitos recientes (Qr). (INGEOMINAS, 1993)

Figura 3.14: Subcuencas del río Chinchiná



(CORPOCALDAS, 2011)

Figura 3.15: Descripción de las subcuencas del río Chinchiná.



Adaptado (CORPOCALDAS, 2005)

3.2.5 Textura de suelos

La cuenca del río Chinchiná tiene una gran variabilidad de suelos debido a la diversidad de materiales de origen y a las zonas de ladera donde los factores climáticos registran cambios marcados en distancias relativamente cortas. El mapa de formaciones superficiales se presenta en la Figura 3.19 y se describen en la Tabla 3.4.

En general, los suelos son jóvenes, por lo cual en áreas extensas de terrenos no se encuentra un perfil bien desarrollado que indique los procesos de pedogénesis hasta la maduración; por tanto, en transeptos cortos se encuentran perfiles disímiles (Grisales, 1979).

Se presentan depósitos de origen fluvial y fluvio-volcánico a lo largo de la red de drenaje de la subcuenca del río Chinchiná. La formación superficial predominante hacia la zona central de Manizales, corresponde a suelos residuales derivados de cenizas volcánicas. En la zona de falla de Romeral, los suelos residuales son derivados de cenizas volcánicas y de rocas metamórficas. En el sector del km 41 se presentan suelos residuales derivados de areniscas y arcillolitas. Hacia el sector oriental, el material parental predominante corresponde a depósitos espesos de arenas y cenizas volcánicas (Alcaldía de Manizales, 2003)

Figura 3.16: Subcuencas del río Chinchiná para el estudio

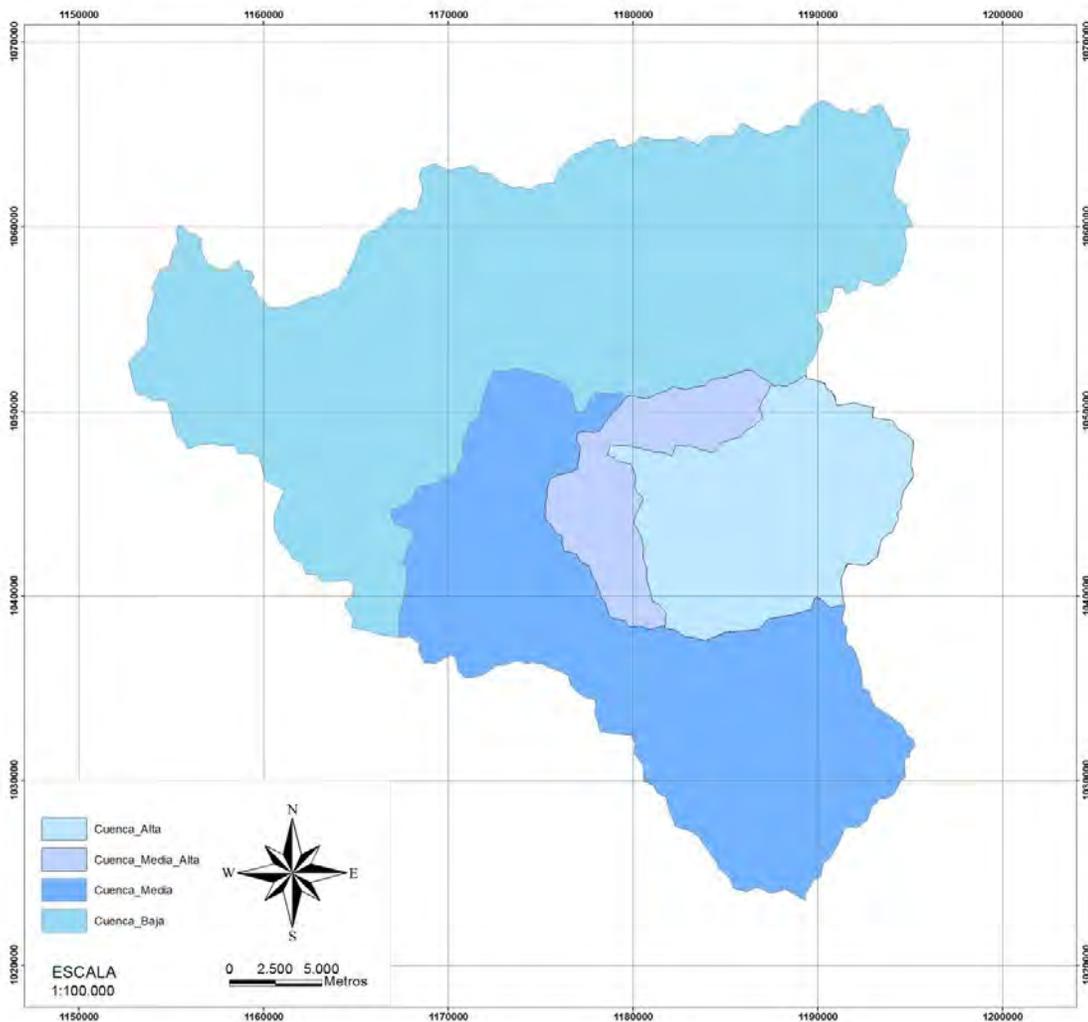
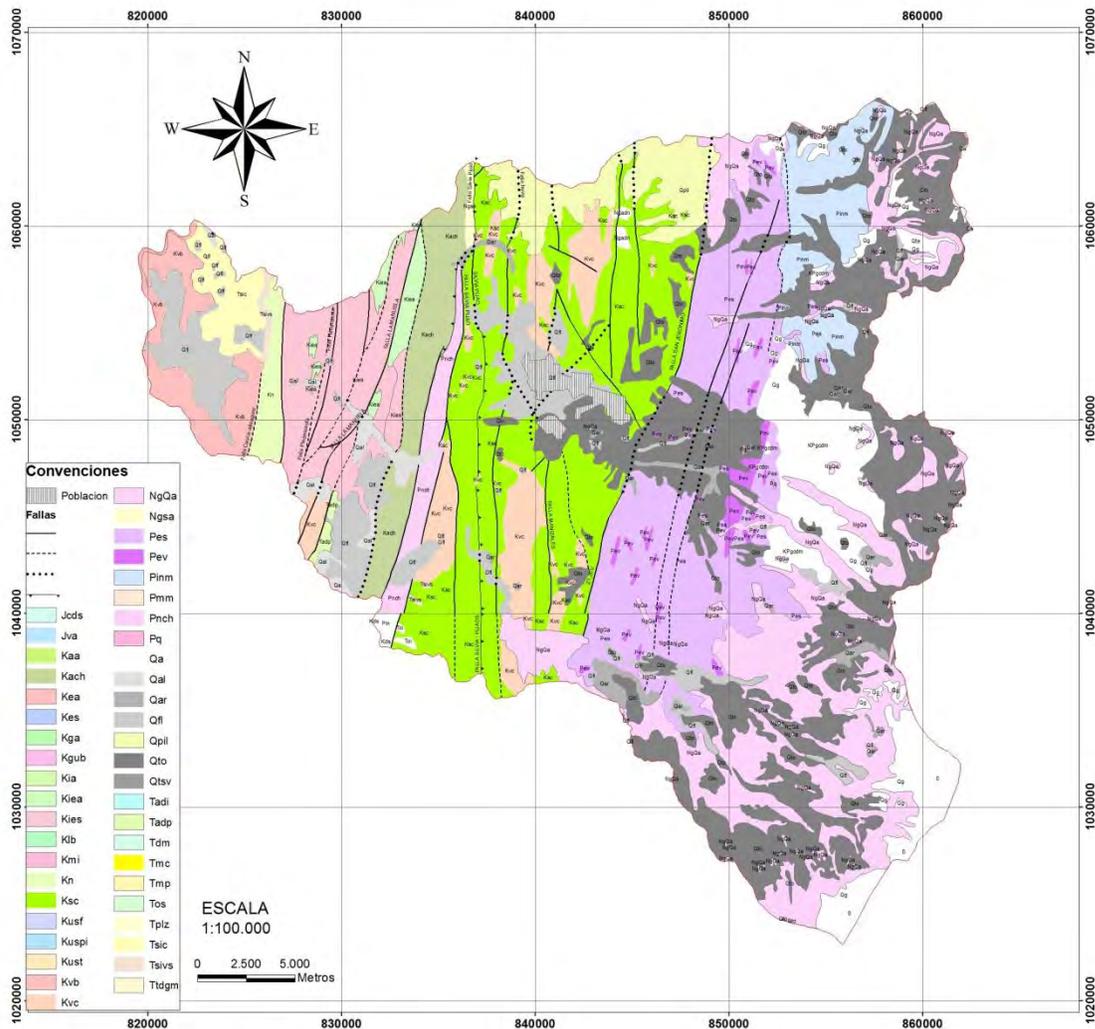


Figura 3.17: Mapa geológico cuenca del río Chinchiná



3.2.6 Usos y cobertura del suelo

En la cuenca se tienen diferentes usos del suelo (Figura 3.18) debido a la diversidad de pisos térmicos, el relieve quebrado escarpado predominante y a las condiciones geológicas y antrópicas. Las actividades agrícolas, forestales y pecuarias ocupan la mayor extensión con un área de 425 km². En el primer renglón corresponde a los potreros herbáceos y arbustivos (144 km²), donde se desarrolla la ganadería. El segundo lugar comprende el cultivo del café (143 km²). Se destaca el desarrollo de actividades forestales que son incorporadas dentro de la cobertura de bosque natural, bosque plantado y rastrojo con un total de 125 km².

Tabla 3.4: Formaciones superficiales

Materia parental	Características Suelo Residual				
	Profundidad	Drenaje	Textura	pH	Materia orgánica
Arcillotitas y Arenisca (QR1)	Profundos	Bien drenados	Arcillosa a arenosa	ácidos	Medio a bajo
Depósitos superficiales de arenas y cenizas volcánicas (QR2)	Superficiales	Bien drenados	Gruesa	ácidos	Medio
Cenizas volcánicas y arcillas (QR3)	Profundos	Bien drenados	Franco arcillosa	Neutro	Bajo
Depósitos profundos de arenas y cenizas volcánicas (QR4)	Profundos	Bien drenados	Variable	Ligeramente ácidos	Medio a alto
Depósitos profundos de ceniza volcánica (QR5)	Muy profundos	Bien drenados	Franco arenosa	Ligeramente ácidos	Alto
Depósitos profundos de ceniza volcánica y roca metamórfica (QR6)	Profundos	Excesivamente drenados	Variable	Ligeramente ácidos	Alto
Rocas Ígneas y capas de ceniza volcánica (QR7)	Muy profundos	Bien drenados	Variable	Ligeramente ácidos	Alto
Rocas ígneas intrusivas (QR8)	Poco profundos	Bien drenados	Variable	Ligeramente ácidos	-
Rocas ígneas sedimentaria (QR9)	Superficiales	Bien drenados	Finas	Ligeramente ácidos	Bajos
Rocas sedimentarias e ígneas. Inclusión de roca metamórfica (QR10)	Superficiales	Excesivamente drenados	Finas	Ligeramente ácidos	Bajos
Depósitos fluviales y fluviovolcánicos (Qfv)	Moderada	Moderadamente drenados	Variable	Ligeramente ácidos	Bajo
Sedimentos Coluviones, aluviales (Qcv)	Moderada	Moderadamente drenados	Franco arcillosa a arenosa	Ligeramente ácidos	Bajo

Adaptada (Alcaldía de Manizales, 2003)

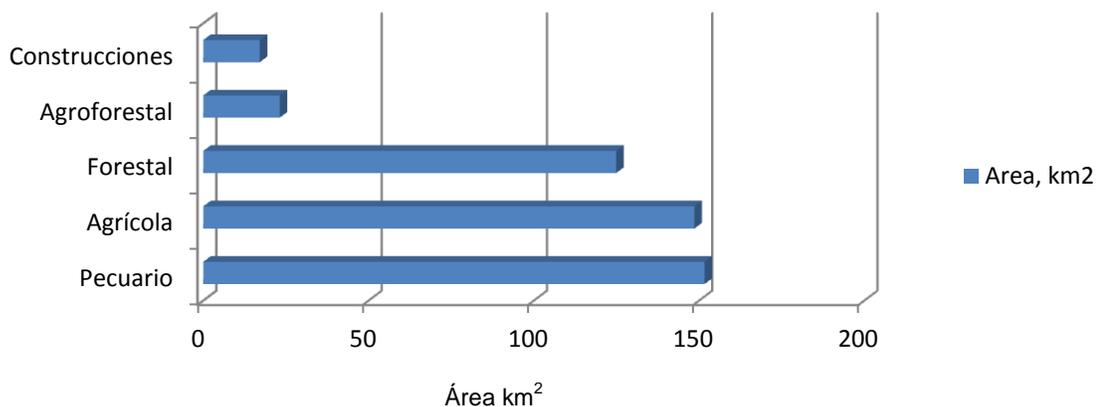
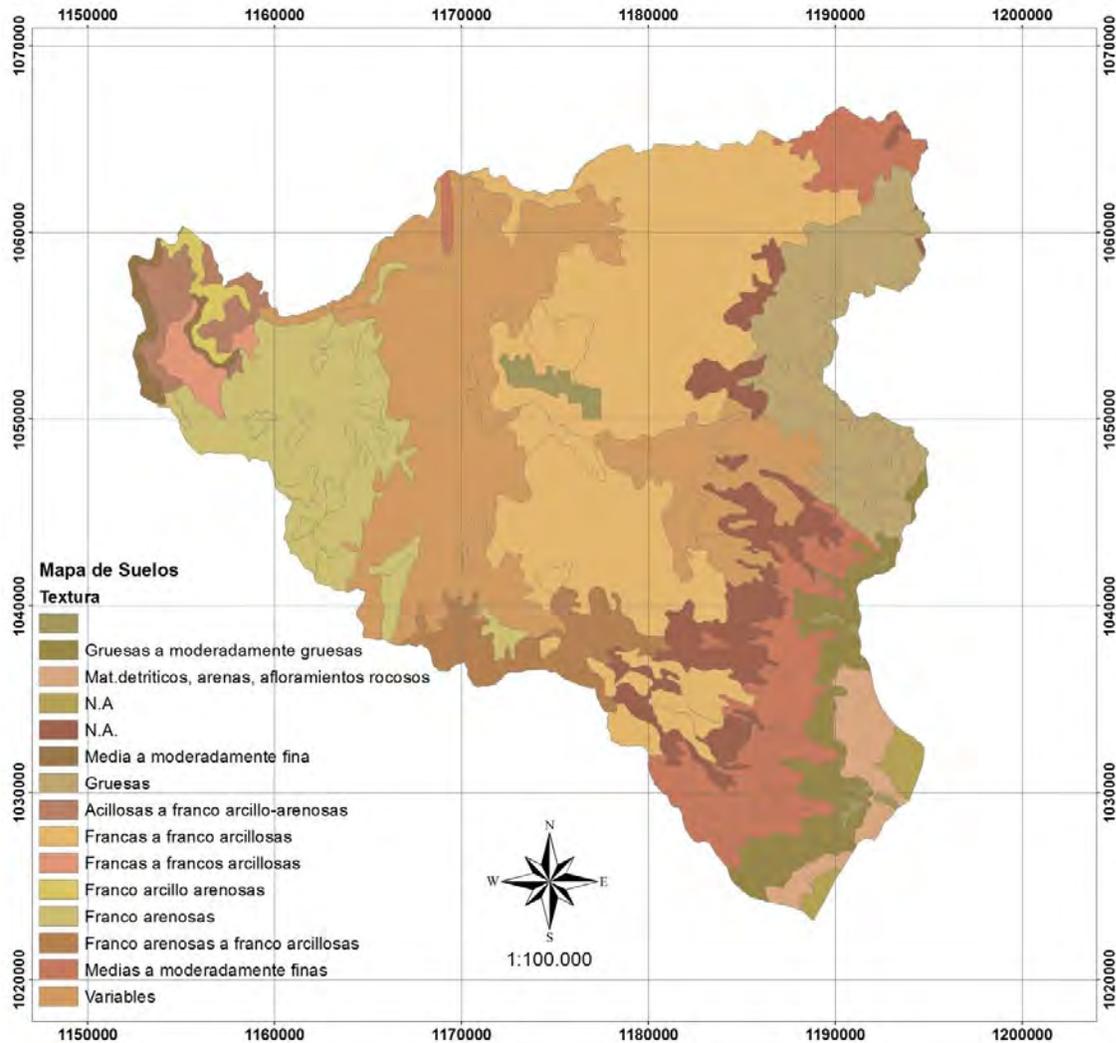
Figura 3.18: Tipos de coberturas para la cuenca del río Chinchiná.

Figura 3.19: Mapa de textura de suelos cuenca del río Chinchiná



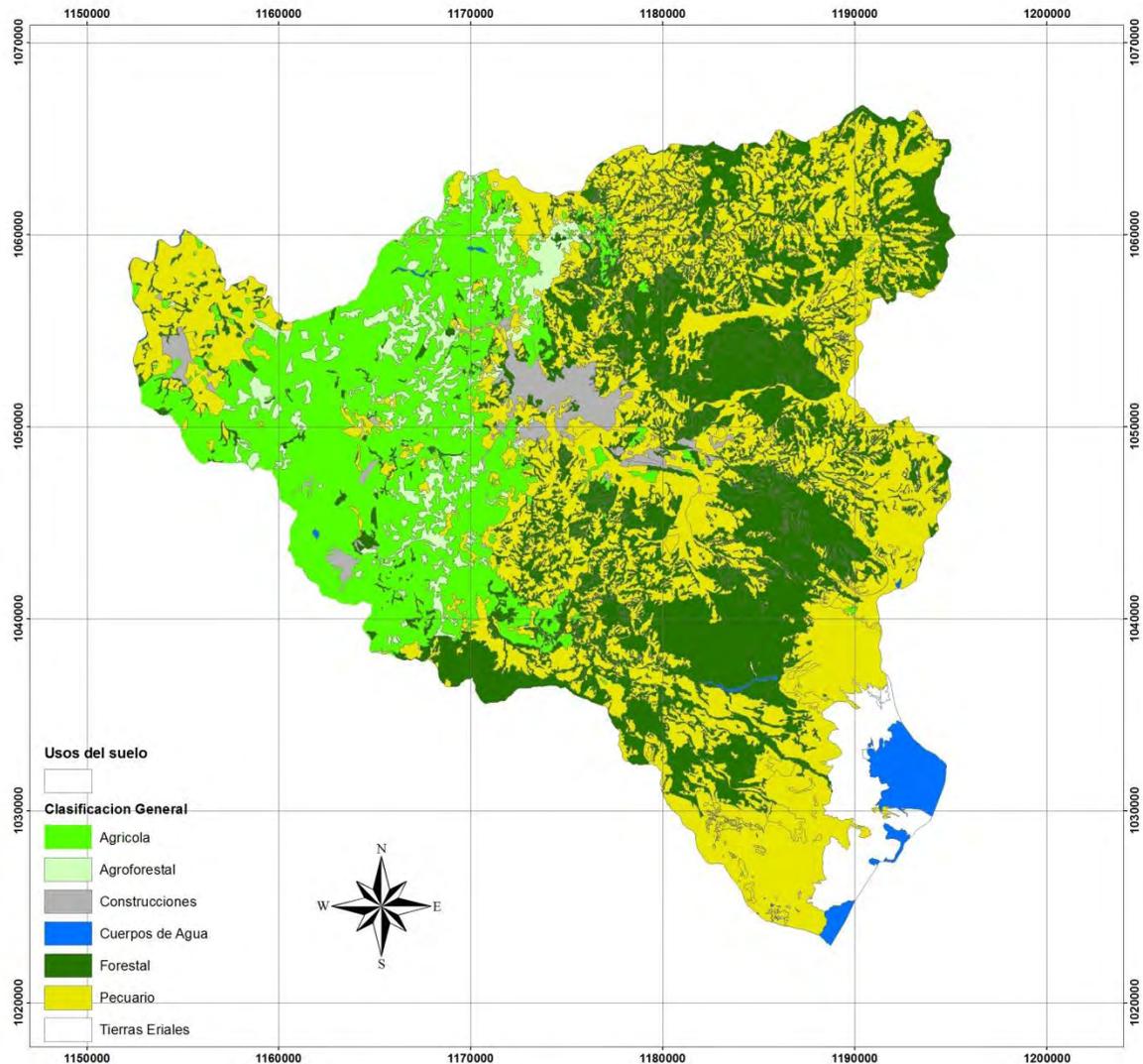
Adaptado (CORPOCALDAS, 2011)

El mapa de clasificación general del uso de suelos se presenta en la Figura 3.20 y el de coberturas con la clasificación detallada, en la Figura 3.21; se puede observar los diferentes cultivos agrícolas, entre los cuales sobresale el área cultivada de café en la cuenca media y baja. En la zona de estudio durante los últimos años se han presentado cambios importantes en el uso del suelo, especialmente hacia pasturas, lo que ha implicado efectos negativos asociados con la compactación y la erosión del suelo (CARDER, 2007; PROCUENCA, 2010).

Se espera el incremento en el área forestal a raíz del proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpia-MDL aprobado a PROCUENCA (2010), el cual consiste en el establecimiento de actividades

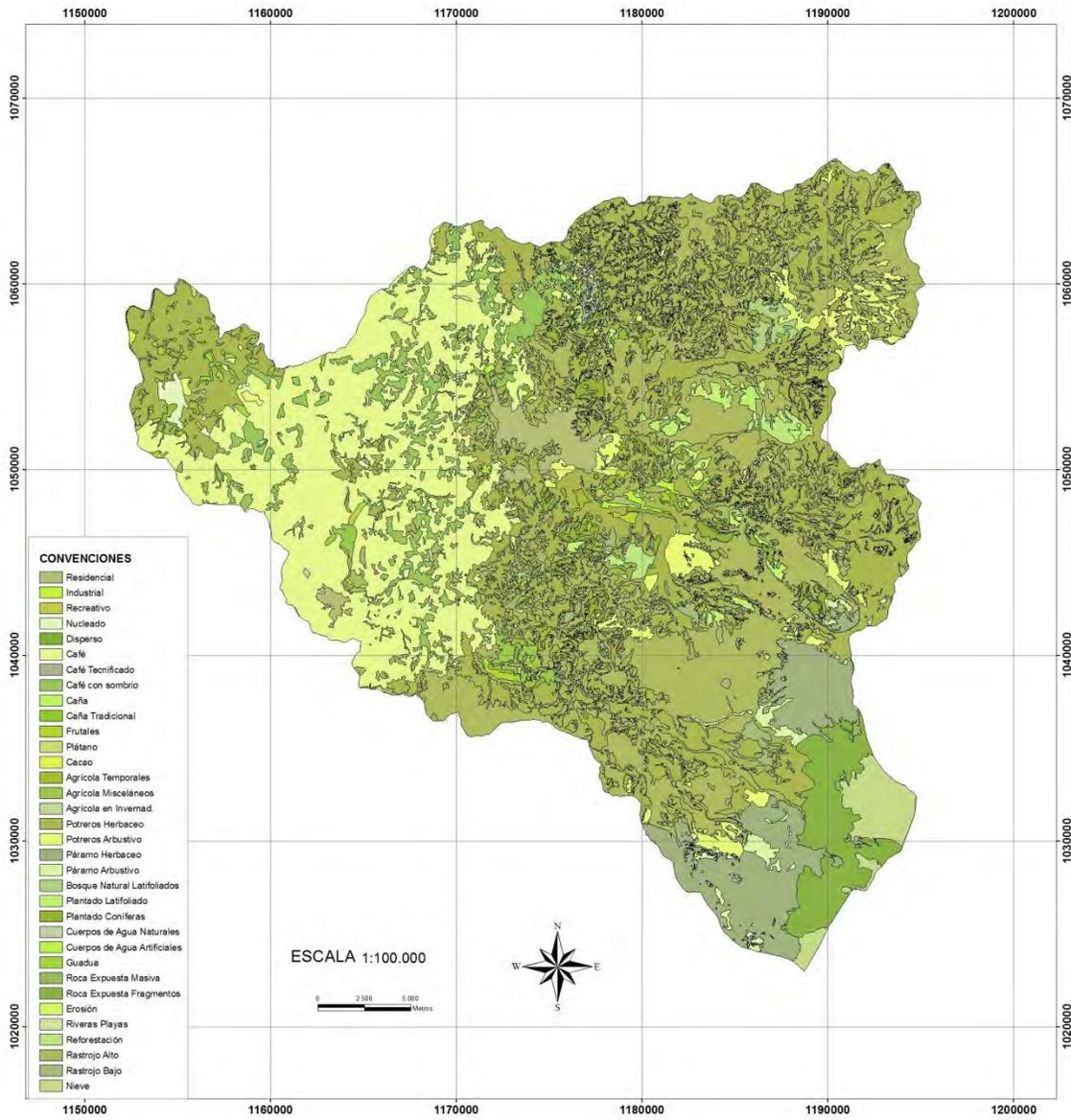
forestales en toda la cuenca del río Chichiná, con varios modelos que incluyen: agro-silvicultura, sistemas silvo-pastoral, regeneración natural asistida, entre otros; en un área de 4.538,7 hectáreas en su primera fase.

Figura 3.20: Mapa de uso de suelos clasificación general



Adaptado (CORPOCALDAS, 2011)

Figura 3.21: Mapa de uso de suelos y coberturas cuenca del río Chinchiná



Adaptado (CORPOCALDAS, 2011)

4. Caracterización Climática

4.1 Brillo solar

El brillo solar, también conocido como insolación, es el número de horas de brillo o de radiación directa. El valor máximo de brillo solar, para Colombia, varía entre 11,3-12,6 h/d. Estos valores se reducen por la nubosidad, la orientación y la exposición de las laderas y la amplitud del horizonte. En la zona Andina, el brillo solar promedio es de 1550 horas/año; con extremos superiores de 2050 h/año y mínimos de 1050 h/año. Para la cuenca del río Chinchiná, el máximo representa un valor anual de 1980 horas a 1000 m.s.n.m. en la estación Santágueda y disminuye progresivamente hasta 1000 h a 4200 m.s.n.m. en la estación Gualí (Jaramillo, 2005). Para la región centro sur de Caldas el brillo solar diario fluctúa entre 2-3 h para la cuenca alta; 4-5 h para la cuenca media y 6-7 h para la cuenca baja (IDEAM, 2005).

Para el período 1981-2010, el valor promedio del brillo solar diario para las diferentes estaciones ubicadas en la cuenca: Letras (cuenca alta), Agronomía (cuenca media-alta), Cenicafé (cuenca media), Granja Lúker y Santágueda (cuenca baja) se observa en la Figura 4.1, oscila entre 3,6 a 5,3 h/d. Los niveles de confianza para la media al 95% son 0,10 h/d en Letras, 0,05 h/d en Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda. Para la estación Letras, el tiempo de registro solo comprende 2002-2010. Con respecto a los valores extremos, se reportan máximos de 11,5 h/d en la estación Granja Lúker. El mapa de brillo solar diario obtenido por el método de interpolación del inverso de la distancia al cuadrado, se presenta en la Figura 4.4; se incluyeron los registros de la estación Naranjal para la espacialización de la información. Comparando la información obtenida con la reportada por IDEAM (2005) se encuentran diferencias en la cuenca alta donde son mayores las horas de sol- en 0,5 a 1,5 h- y en la cuenca baja donde son menores las horas de sol-en 0,7 a 1,7 h-, frente a las indicadas en la literatura.

Mensualmente (1981-2010), los valores de brillo solar promedio fluctúan entre 110 h/mes en la cuenca alta y 162 h/mes para la cuenca baja, con un valor promedio de 127 h/mes. Los extremos máximos se registran en la cuenca baja -266 h/mes- y los mínimos en la cuenca alta- 55 h/mes-. La distribución de brillo solar mensual se representa en la Figura 4.2, comportamiento típico bimodal, con mayores valores en los períodos diciembre-enero y julio-agosto.

La cuenca recibe anualmente (1981-2010) desde 30% del brillo solar máximo-BSM- en la zona alta, hasta el 44% del BSM en la cuenca baja, con un valor promedio de 35% BSM, equivalente a 1523 h/año. Los registros históricos evidencian valores mínimos de sólo 1110 h/año en letras y máximos de 2374 h/año en Santágueda. El brillo solar promedio anual se resume en la Figura 4.3 y la distribución en la cuenca en la Figura 4.6. Los niveles de confianza para la media al 95% son 105 h/año en la cuenca alta; 58 h/año en las cuencas media y media-alta y 39 h/año en la cuenca baja. Se observa reducción en las horas de brillo solar anual, con respecto a lo reportado por Jaramillo (2005).

Figura 4.1: Brillo solar- horas de sol al día - en las estaciones climáticas- 1981-2010

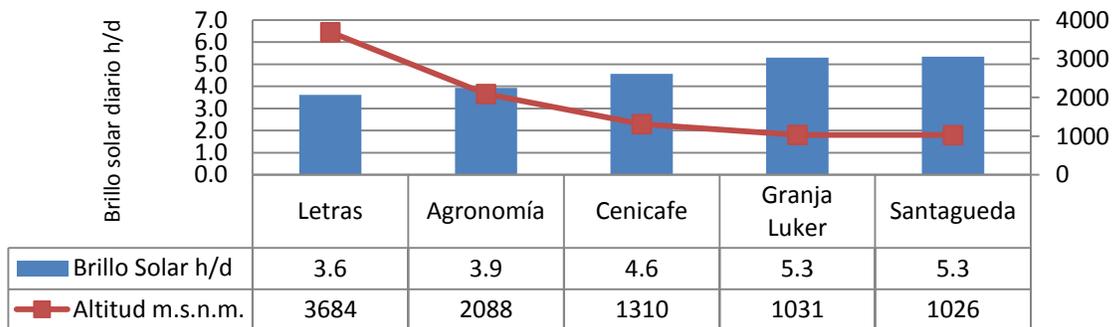


Figura 4.2: Distribución del brillo solar mensual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010

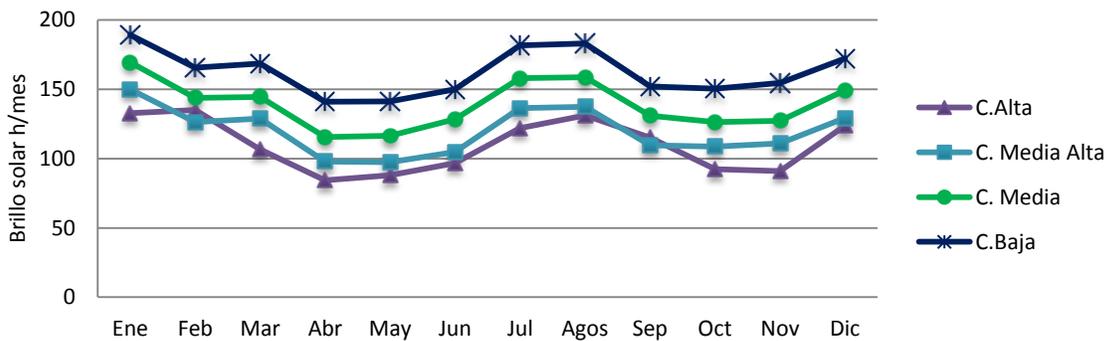


Figura 4.3: Brillo solar anual promedio subcuencas del río Chinchiná. 1981-2010

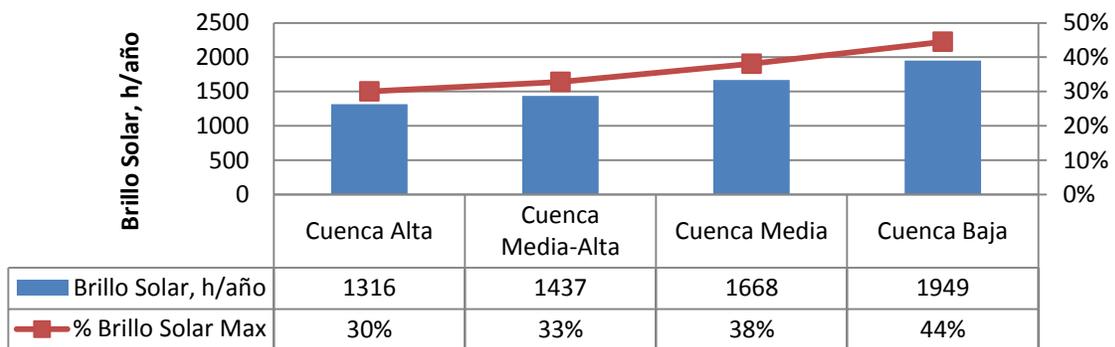


Figura 4.4: Mapa de brillo solar diario cuenca del río Chinchiná- 1981-2010.

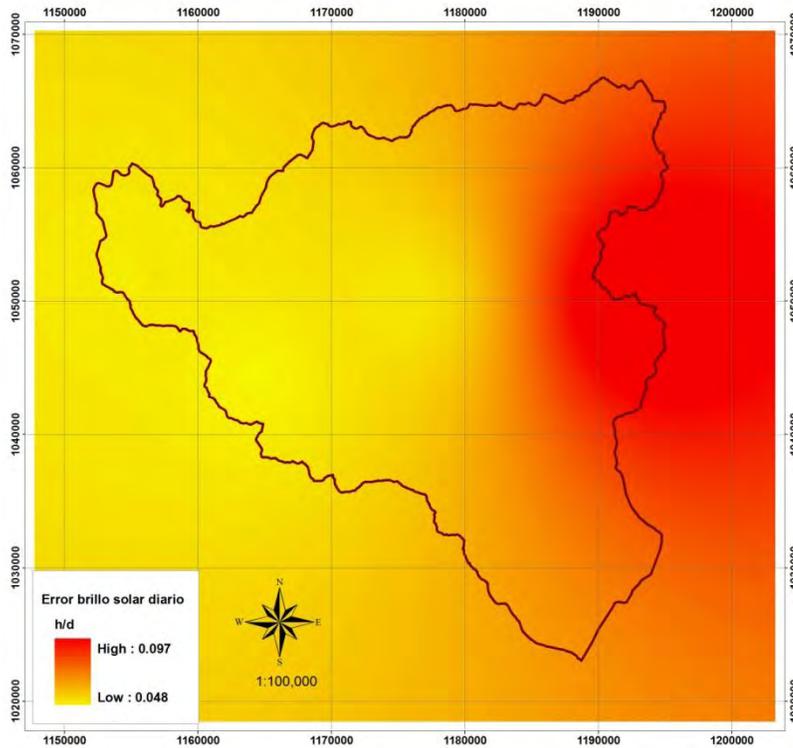
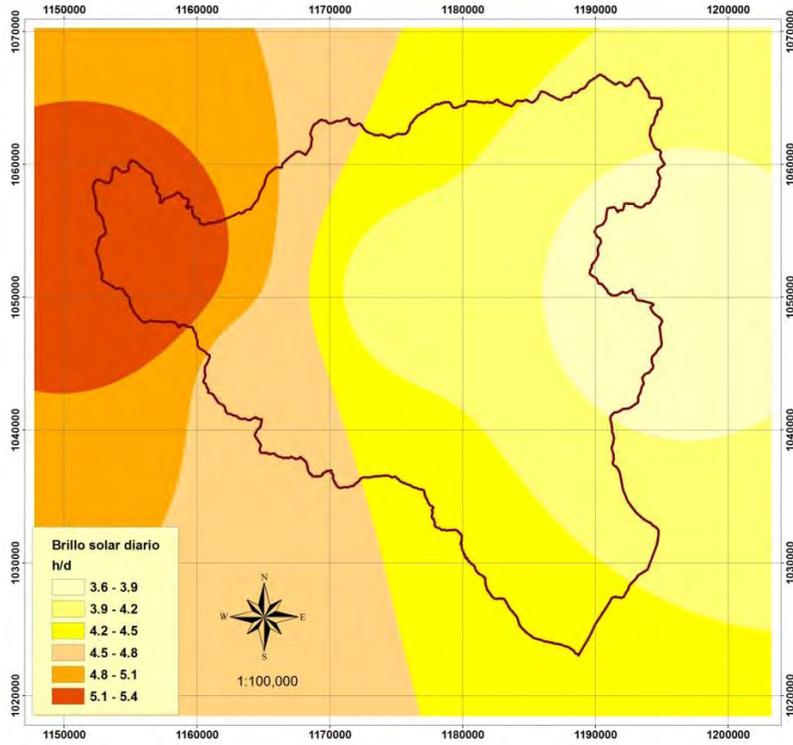
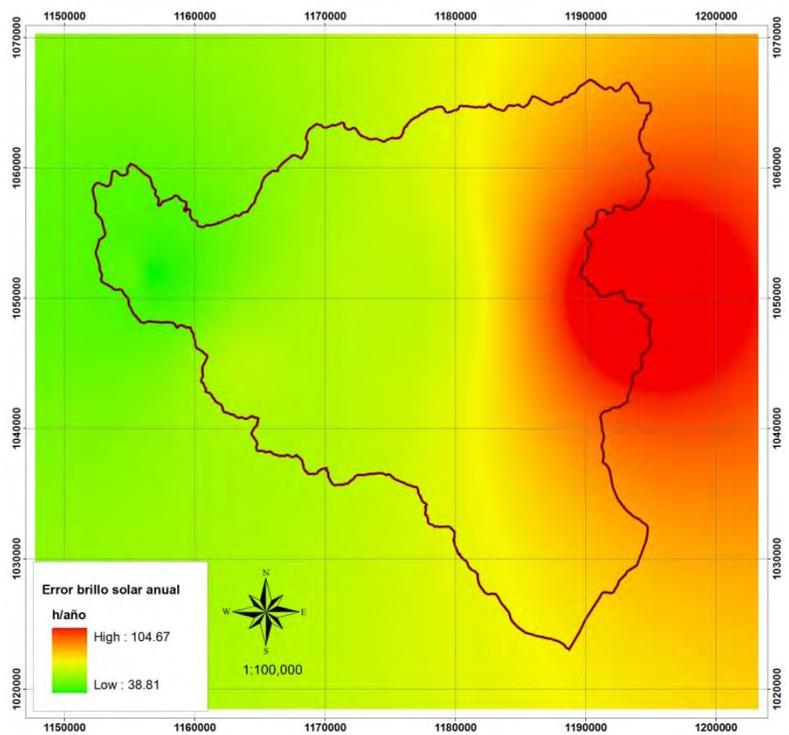
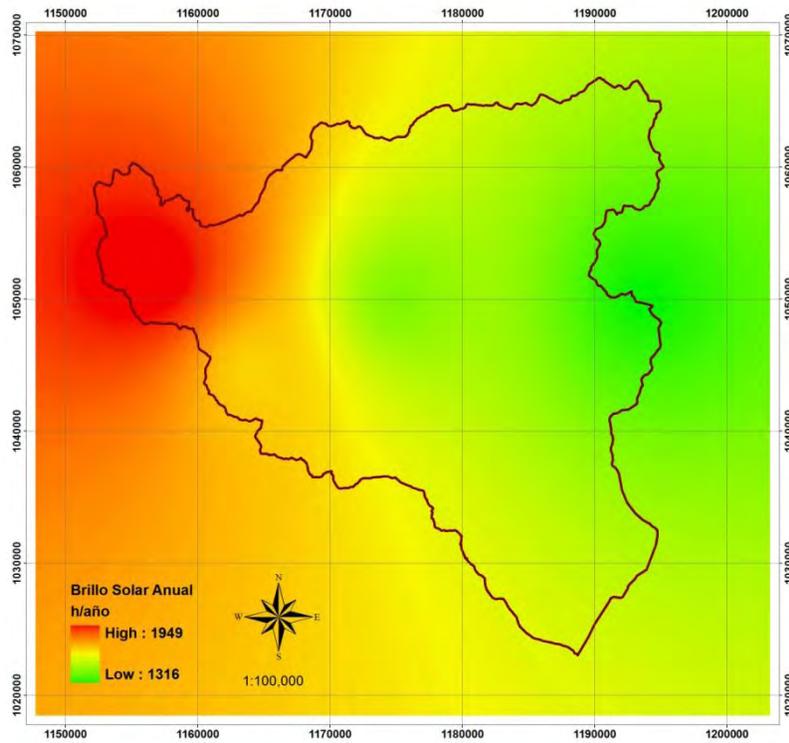


Figura 4.5: Mapa de brillo solar anual cuenca del río Chinchiná- 1981-2010



4.2 Humedad relativa

La humedad atmosférica se define como el contenido de vapor de agua en la atmósfera (Silva, 1998); puede expresarse de diferentes formas: Presión de saturación, déficit de saturación, humedad absoluta, humedad específica y humedad relativa (Linacre, 1992). La humedad relativa es la relación porcentual entre la humedad en un espacio y la cantidad que ese volumen podría contener si estuviera saturado.

En las zonas tropicales, donde las variaciones de la temperatura durante el día son generalmente grandes, la humedad relativa cambia considerablemente en el transcurso del día; es máxima en la noche y mínima en el día; los valores más altos se presentan desde las 20 horas hasta las 6 horas; los intermedios en las primeras horas de la mañana y de la noche y los más bajos al mediodía y al comienzo de la tarde (Eslava et.al., 1986). Es afectada por el relieve, el cual se comporta como una barrera que frena el paso de masas húmedas o aumenta su presencia. En la región andina colombiana se presenta esta influencia. En esta zona se registran humedades relativas anuales entre 66 y 87% (IDEAM, 2005). El comportamiento a través del año es similar en toda la región andina, de tipo bimodal con dos picos máximos entre abril y mayo y en los meses de noviembre y diciembre y los mínimos entre febrero y marzo y entre julio y septiembre (IDEAM, 2005). Para la cuenca del río Chinchiná, según el mapa de humedad relativa media anual (IDEAM, 2005) fluctúa entre 85-90% para la cuenca alta y 75-85% para la cuenca media y baja.

Tomando como base el período 1981-2010, la humedad relativa promedio en las estaciones climáticas se observa en la Figura 4.6; en general, es alta en toda la cuenca. Los niveles de confianza para la media al 95% son 0,26% en Letras, 0,16% en Agronomía, 0,14% en Cenicafe y Santagueda y 0,12% en Granja Luker. Para la estación El Cisne, los registros son incompletos y comprenden los períodos 2003-2004 y 2008-2010. Fueron empleados los datos de la estación Posgrados para completar los registros de Agronomía en el año 2006. Para Letras abarcan el período de registro 2002-2010. El rango de variación de la humedad relativa-73,5 a 87,1% HR- está acorde con lo reportado por el IDEAM (2005)-75-90%-. La distribución de la variable en la zona de estudio, se esquematiza en la Figura 4.7, los mayores valores se reportan en la cuenca alta y los menores en la baja.

Figura 4.6: Humedad relativa promedio en las estaciones climáticas 1981-2010

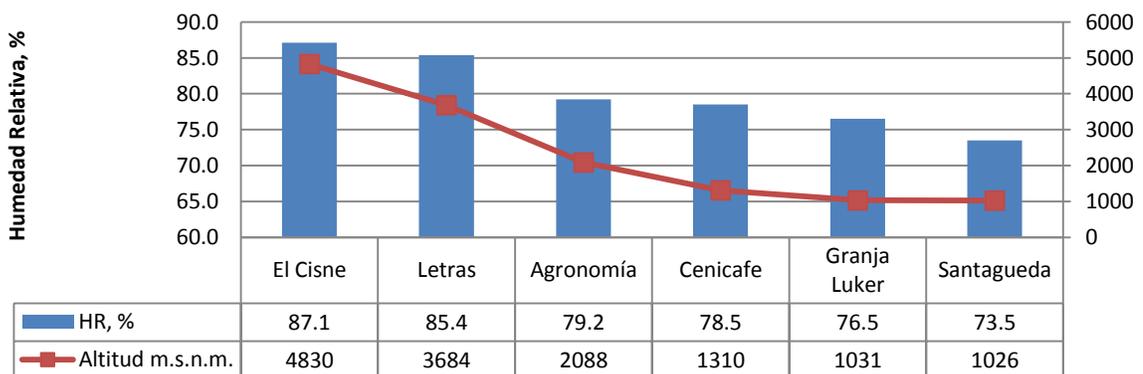
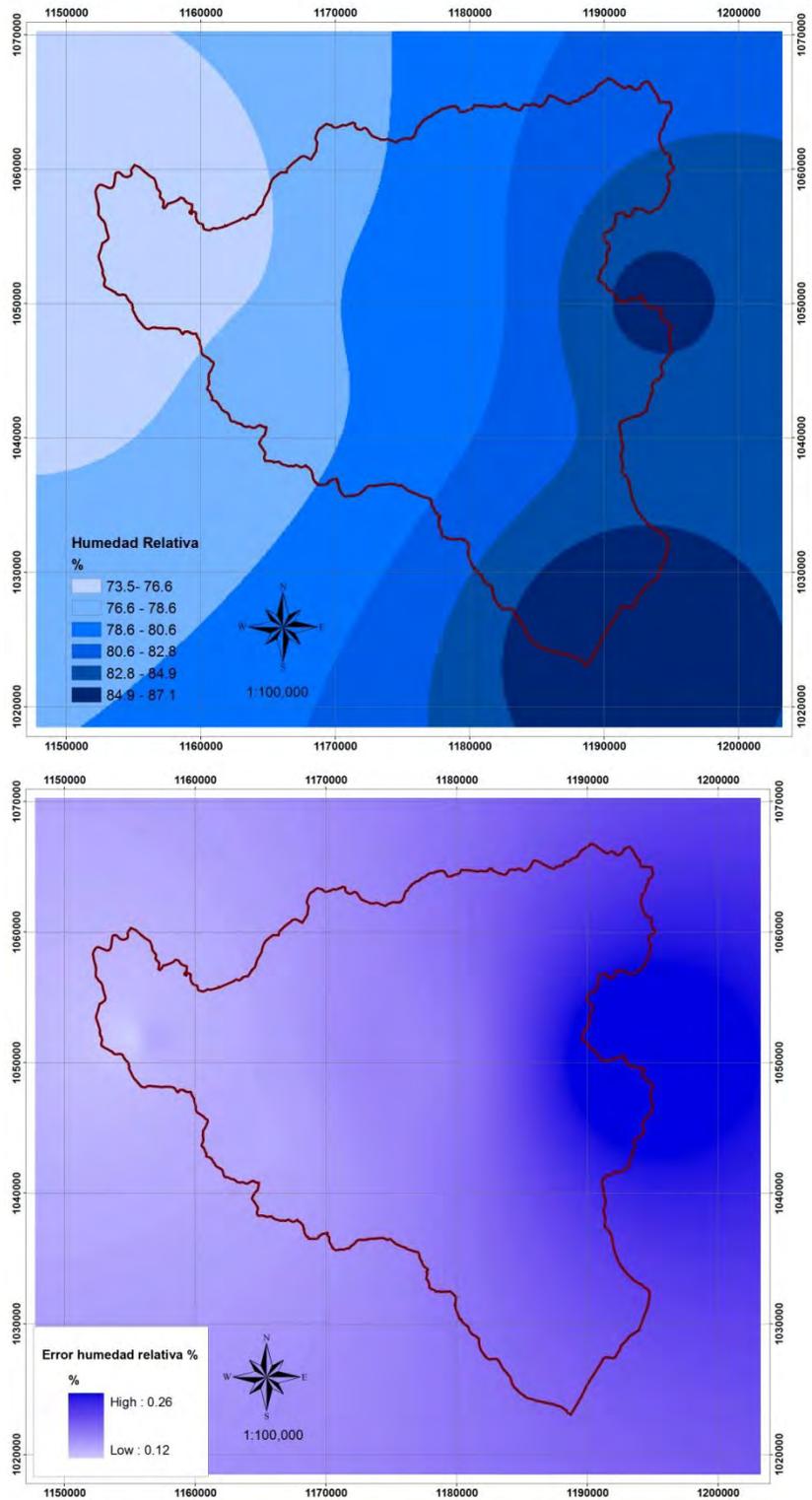
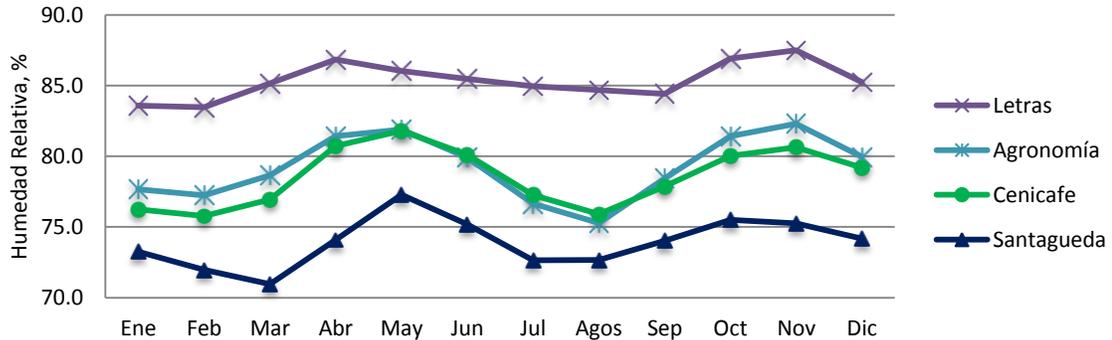


Figura 4.7: Mapa de humedad relativa cuenca del río Chinchiná 1981-2010



El comportamiento de la humedad relativa promedio, mes a mes, para las diferentes estaciones se presenta Figura 4.8; la distribución es bimodal, con mayores valores en la temporada de lluvias marzo-abril y octubre-noviembre.

Figura 4.8: Distribución humedad relativa estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010



En la cuenca del río Chinchiná se observa la relación directamente proporcional de la humedad relativa con la altitud. Con la información de las estaciones se obtiene un modelo de regresión lineal el cual es validado con una probabilidad del 95% y cumple con los supuestos de distribución normal (Shapiro Wilk) y homocedasticidad de los errores (Prueba de White); los parámetros se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Modelo de regresión lineal humedad relativa- altitud

Parámetros Modelo		
Variable dependiente, Y		Humedad Relativa, %
Variable independiente, X		Altitud, m.s.n.m.
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$
β_0	Valor	72,634
	Error típico	1,264
	Significancia	0,0
β_1	Valor	0,003
	Error típico	0
	Significancia	0,002
Anova Modelo significancia		0,002
R^2		0,922
Error típico de estimación		1,635

4.3 Radiación solar

La radiación solar es la energía emitida por el sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio, mediante ondas electromagnéticas y partículas. De la radiación que llega a la superficie terrestre, una parte es reflejada, de acuerdo con el albedo de la superficie y la otra es almacenada; parte de la energía almacenada es irradiada en forma de ondas electromagnéticas;

por tanto, la energía neta es la diferencia entre la energía que almacena la tierra y la que irradia (IDEAM, 2005). La cantidad de radiación solar absorbida por la superficie es afectada por la posición del sol, la altitud, la latitud, la exposición de la ladera, la nubosidad y la neblina (Jaramillo, 2005).

Colombia se encuentra en la zona ecuatorial y recibe abundante radiación solar durante todo el año (Jaramillo, 2005). Basados en los mapas de radiación solar para Colombia (IDEAM, 2005), para la región centro sur de Caldas, donde se ubica la cuenca del río Chinchiná, la radiación solar fluctúa entre 4 – 5 kW-h/m²

Las estaciones que disponen de medición de radiación solar son El Cisne (2003-2004 y 2008-2010) ubicada en el parque Nacional Natural Los Nevados y Posgrados (2002-2010). Para las demás estaciones, la radiación solar diaria fue calculada a partir de los registros diarios de brillo solar y de la humedad relativa por los modelos descritos en la metodología. Para la selección del modelo se realizó la comparación entre los valores medidos en la estación Posgrados (2002-2010) y los calculados en Agronomía (2002-2010); con la ecuación 2.2 se obtuvo el menor error. En la estación posgrados el promedio multianual es 3,9 kW-h/m², con un coeficiente de variación del 32%; la distribución promedio de la radiación solar mes a mes se muestra en la Figura 4.9, en la gráfica se incluye la distribución promedio de radiación solar calculada para el mismo período de la estación Agronomía, cercana a la estación posgrados. Se puede concluir que los valores estimados se ajustan a las mediciones, con un error promedio de 0,17 kW-h/m².

Para el período 1981-2010, el mapa de distribución de la radiación solar en la cuenca se visualiza en la Figura 4.10 y los valores promedio de radiación solar para las diferentes zonas de la cuenca, se sintetizan en la Figura 4.11. Los niveles de confianza para la media al 95% son 0,03 kW-h/m² en las estaciones Cisne y Letras, 0,016 kW-h/m² en Agronomía y Cenicafé y 0,015 kW-h/m² en Granja Luker y Santagueda. El rango de variación promedio es 2,7 a 4,7 kW-h/m², más amplio que el reportado por IDEAM (2005) de 4,0 a 5,0 kW-h/m². Para la estación letras el valor calculado corresponde al período 2002-2010, en el cual se tiene información de brillo solar y humedad relativa. Se evidencia relación inversa de la radiación solar con la altitud. La distribución promedio de la radiación solar (Figura 4.12) es bimodal, con menores valores en los períodos de lluvias- abril-mayo y octubre-noviembre- y mayores en los períodos secos- enero-febrero y julio-agosto-.

Figura 4.9: Comparación radiación solar estimada vs mediciones- 2002-2010

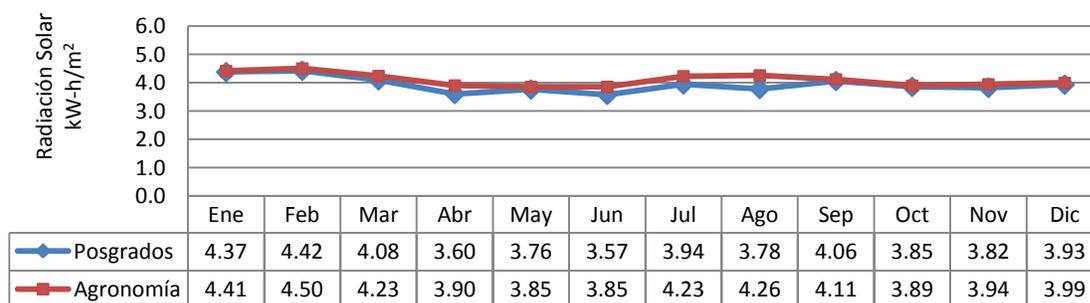


Figura 4.10: Mapa de radiación solar cuenca del río Chinchiná 1981-2010

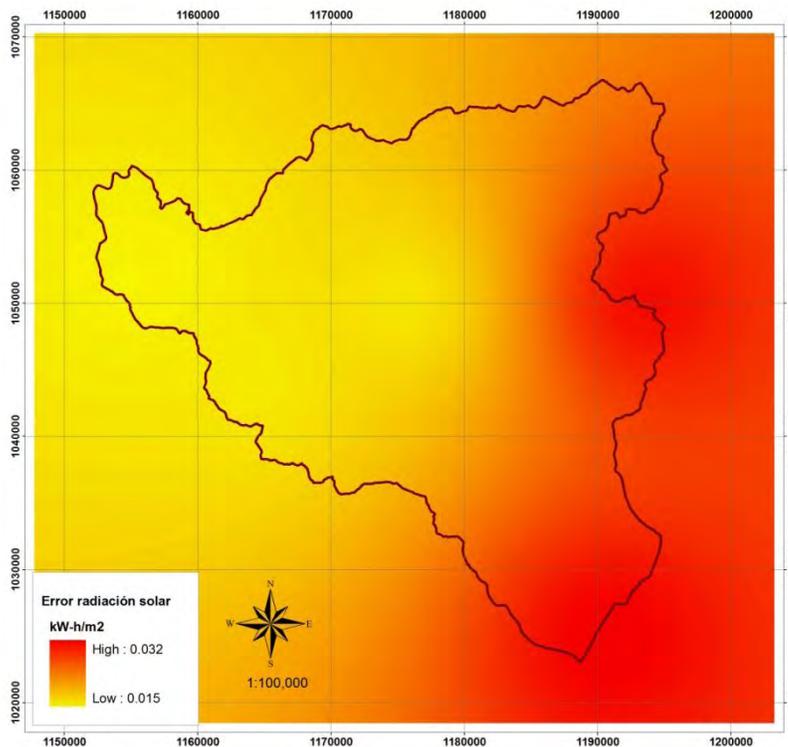
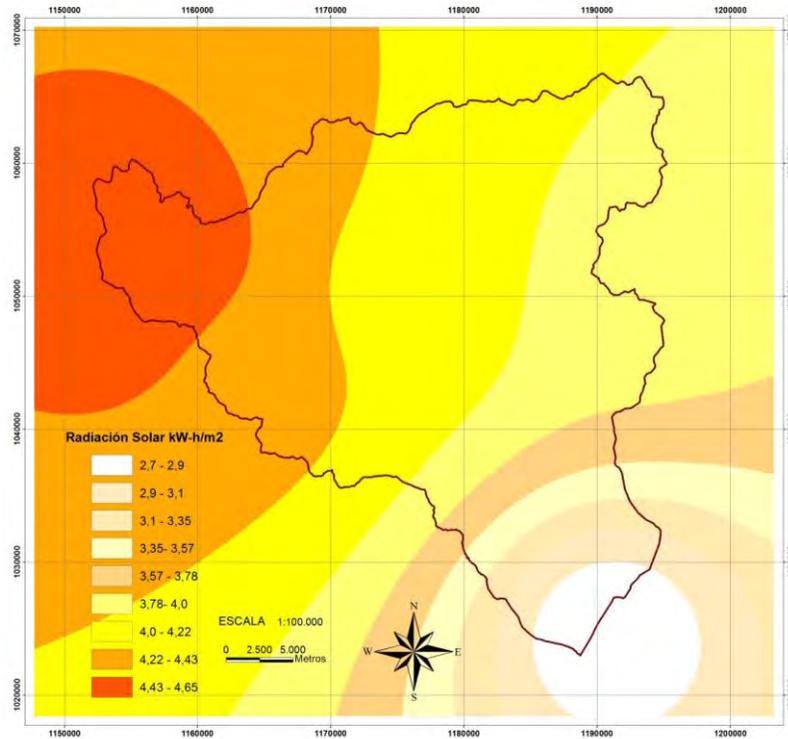
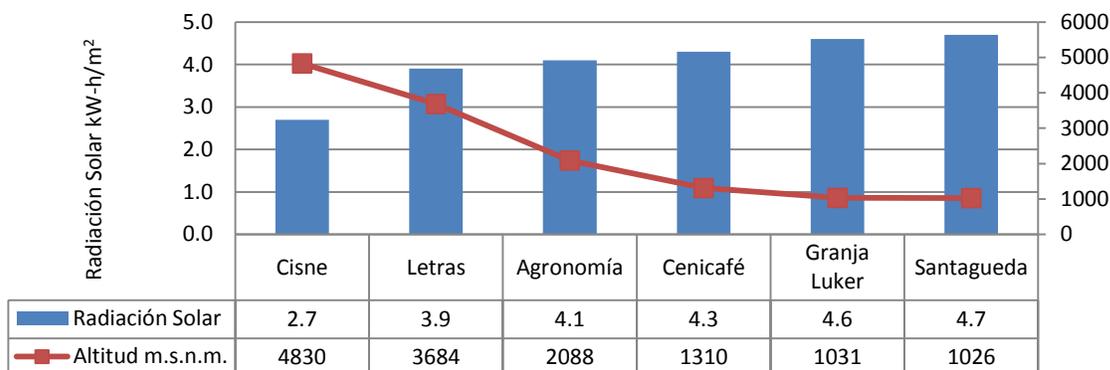
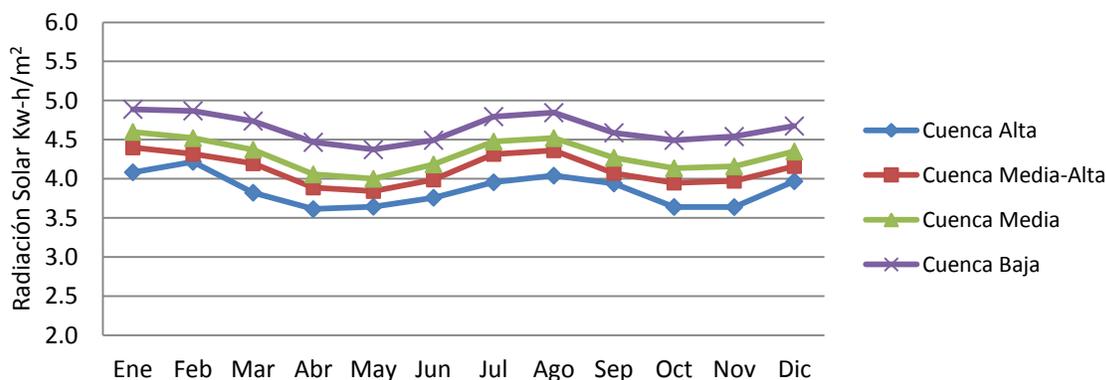


Figura 4.11: Radiación solar promedio en las estaciones de la cuenca-1981-2010**Figura 4.12:** Distribución de la radiación solar cuenca del río Chinchiná

4.4 Temperatura

La temperatura es proporcional a la fluctuación de la radiación total incidente; sin embargo, existe un desfase según las condiciones atmosféricas del día; la temperatura máxima se registra después del medio día y la mínima un poco antes de la salida del sol (Jaramillo, 2005). La latitud, la altitud, las corrientes marinas, los vientos, la nubosidad, el relieve, la convección y la turbulencia del aire son algunos de los factores que la afectan (Murthy, 2002). La tasa de variación de la temperatura con la altitud, es el gradiente vertical de la atmósfera, el cual es función del contenido de vapor de agua (Monsalve, 2008). En la troposfera el decrecimiento de temperatura es de 6,5°C por cada km; en Colombia, la variación es 5,53°C/km, en promedio; sin embargo, no es homogénea en el territorio; en la región Andina es 6,13°C/km (IDEAM, 2010).

Las temperaturas medias anuales en Colombia están por encima de 24°C. En la región Andina, se presentan los pisos térmicos, causados por la disminución de la temperatura con el aumento de la altura sobre el nivel del mar. En los valles de los principales ríos como el Magdalena y el Cauca, se registran temperaturas entre 24 y 28°C, mientras que en los altiplanos se presentan valores bajos, alrededor de 12 a 16°C. En la alta montaña se alcanzan temperaturas inferiores a 8°C

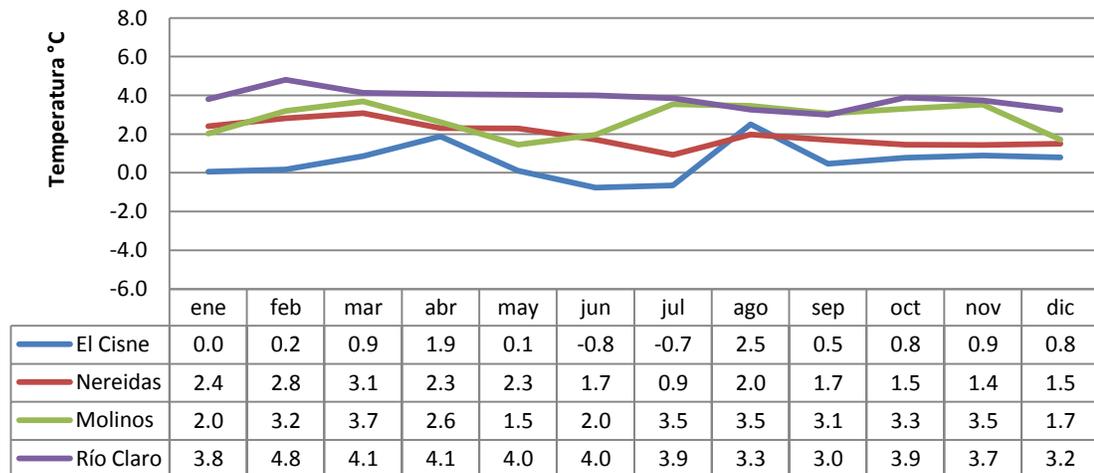
(IDEAM, 2005). En la cuenca del río Chinchiná se presentan todos los pisos térmicos lo cual favorece la biodiversidad en términos de flora y fauna, ecosistemas y unidades geomorfológicas de interés paisajístico. Se tiene un piso térmico cálido en la frontera occidental, que es la parte más baja de la cuenca, con temperaturas medias que oscilan entre el 22 y 28 °C; un piso térmico templado en la zona cafetera, localizada en la subcuenca media, con temperaturas medias entre 18 y 22° C y un piso térmico frío en la parte alta de la cuenca, que va desde los 17°C hasta temperaturas por debajo de cero en el Nevado del Ruíz (PROCUENCA, 2010).

4.4.1 Temperatura media

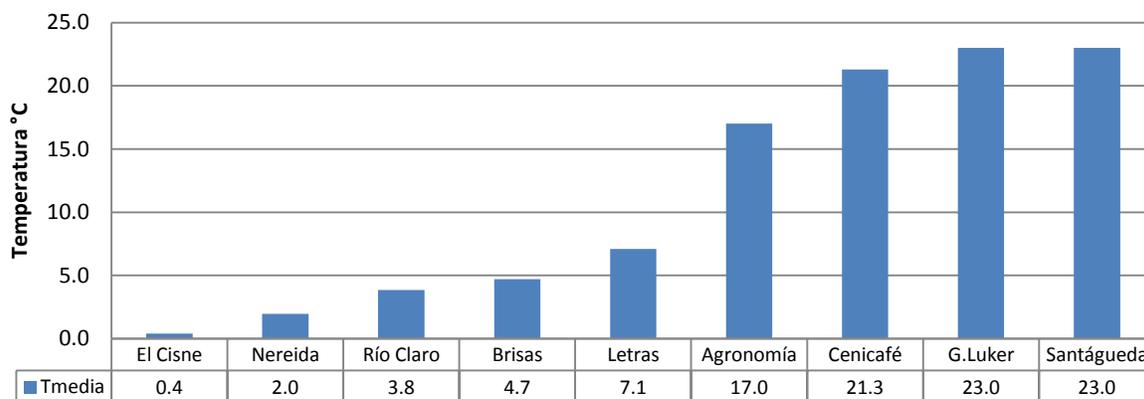
Para el estudio se analizaron los registros de temperatura de las estaciones climatológicas: Letras, Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda. Se incluyó además, la información de las estaciones del parque Nacional Natural Los Nevados: El Cisne, Nereidas, Río Claro, Las Brisas y Molinos que comprende el período 2003-2010.

Los registros son incompletos en la estación de páramo; para Letras incluyen el período 2002-2010 y para Las Brisas 1982-2005; la información de la estación Posgrados fue empleada para completar los registros de Agronomía para los años 2006-2007. La distribución de la temperatura promedio multianual para las estaciones de páramo se sintetiza en la Figura 4.13; varía entre -0,8°C y 4,8°C.

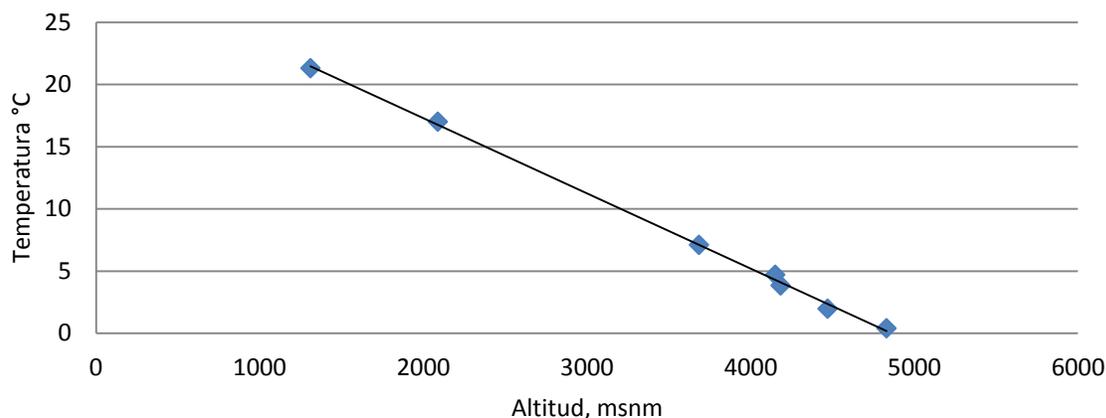
Figura 4.13: Distribución de temperaturas medias estaciones de páramo 2003-2010



Para el período 1981-2010, la temperatura promedio se resume en la Figura 4.14, fluctúa desde 0,4°C para las áreas de páramo, hasta 23°C en la cuenca baja, en promedio. Los niveles de confianza para la media al 95% son 0,02°C en las estaciones Nereidas, Río Claro, Las Brisas, Agronomía, Cenicafé, Naranjal, Granja Luker y Santagueda; 0,03°C en la estación Letras y 0,07°C en la estación Molinos.

Figura 4.14: Temperatura media cuenca del río Chinchiná 1981-2010

La relación de la temperatura con la altitud es lineal e inversamente proporcional (Figura 4.15); con la información de las estaciones se obtiene un modelo de regresión lineal, validado con una probabilidad del 95%, que cumple con los supuestos de distribución normal (Shapiro Wilk) y homocedasticidad de los errores (Prueba de White); los parámetros se exponen en Tabla 4.2. Para la cuenca, la tasa de variación de la temperatura con la altitud en la cuenca es de $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$, valor consistente con lo reportado en la literatura.

Figura 4.15: Relación temperatura media con la altitud cuenca del río Chinchiná

La Figura 4.16 presenta el mapa de distribución de temperatura media en la cuenca del río Chinchiná; comparado con el mapa reportado por la literatura (PROCUENCA, 2010) se observan diferencias en especial en la cuenca baja; donde las temperaturas promedio fluctúan entre $20,6$ a $23,1^{\circ}\text{C}$ y no entre $23,0$ a $26,0^{\circ}\text{C}$.

Figura 4.16: Mapa de temperaturas medias cuenca del río Chinchiná 1981-2010

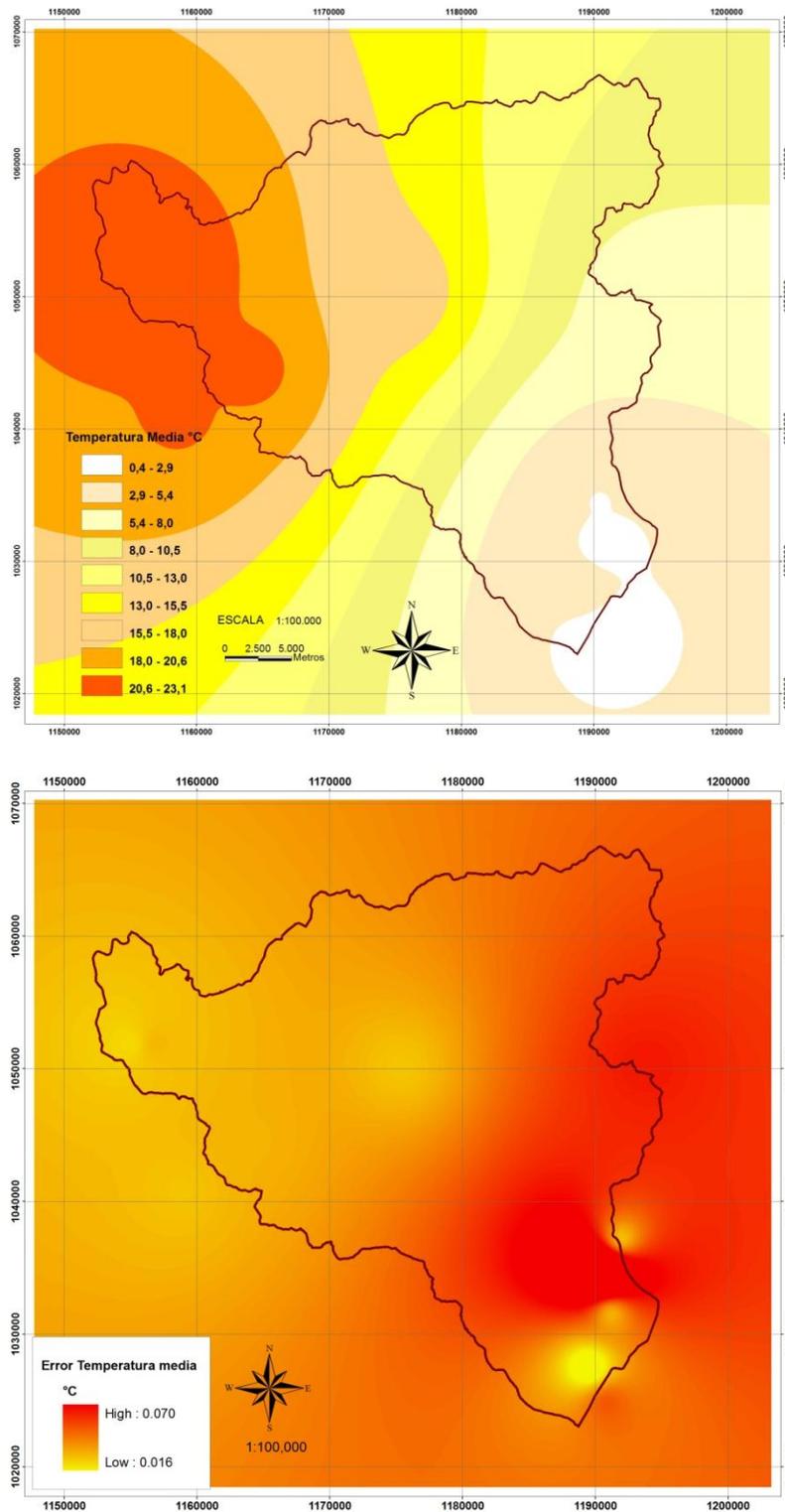


Tabla 4.2: Modelo de regresión lineal temperatura media- altitud

Parámetros Modelo		
Variable dependiente, Y		Temperatura, K
Variable independiente, X		Altitud, m.s.n.m.
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$
β_0	Valor	72,634
	Error típico	1,264
	Significancia	0,0
β_1	Valor	0,003
	Error típico	0
	Significancia	0,002
Anova Modelo significancia		0,002
R^2		0,922
Error típico de Estimación		1,635

4.4.2 Temperaturas máximas

Para el período 1981-2010, las temperaturas máximas promedio y el valor máximo registrado, para cada una de las estaciones se consolida en la Figura 4.17; el mapa de distribución de temperaturas máximas promedio se representa en la Figura 4.18. Los niveles de confianza al 95% para las temperaturas máximas promedio son 0,03°C en la estación el Cisne (Páramo), 0,05°C en Letras (cuenca Alta), 0,04°C en Agronomía (cuenca media-alta), en Cenicafé (cuenca media) y en Santaguada (cuenca baja). La diferencia entre la temperatura máxima y la media es de 6°C, en promedio; mientras que entre las temperaturas máximas promedio y las extremas es de 7°C.

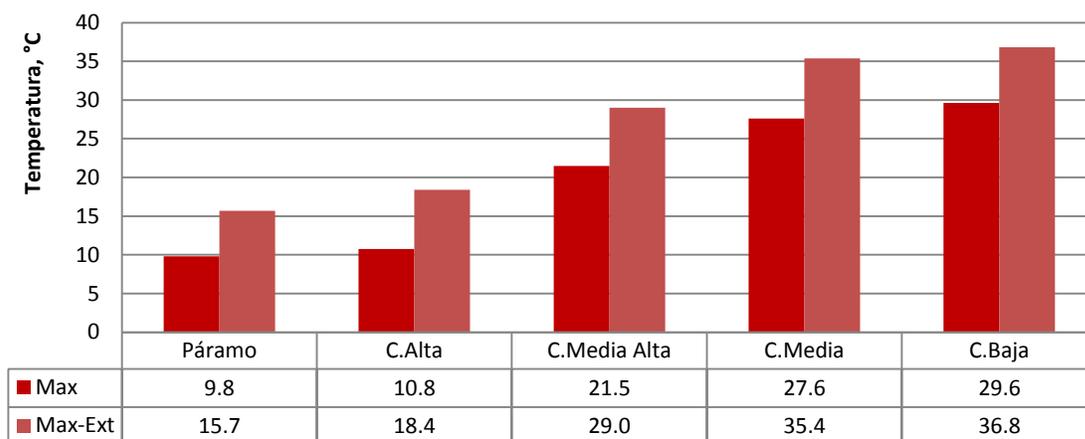
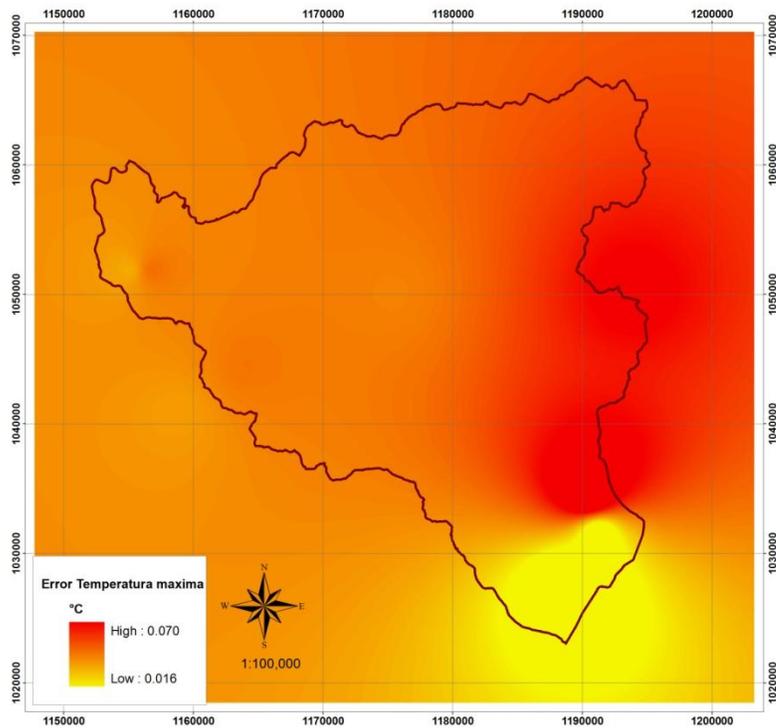
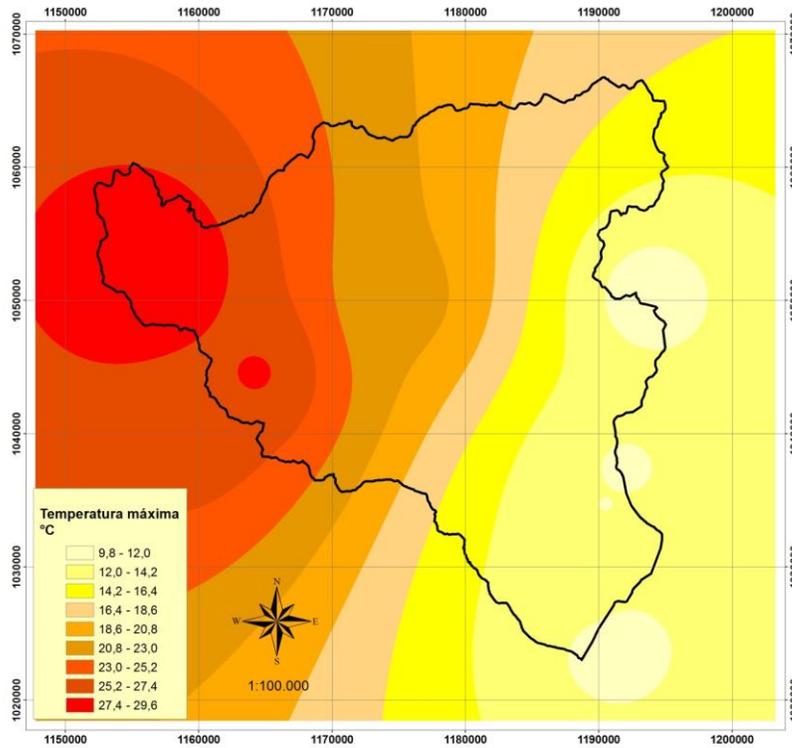
Figura 4.17: Temperaturas máximas estaciones cuenca del río Chinchiná 1981-2010

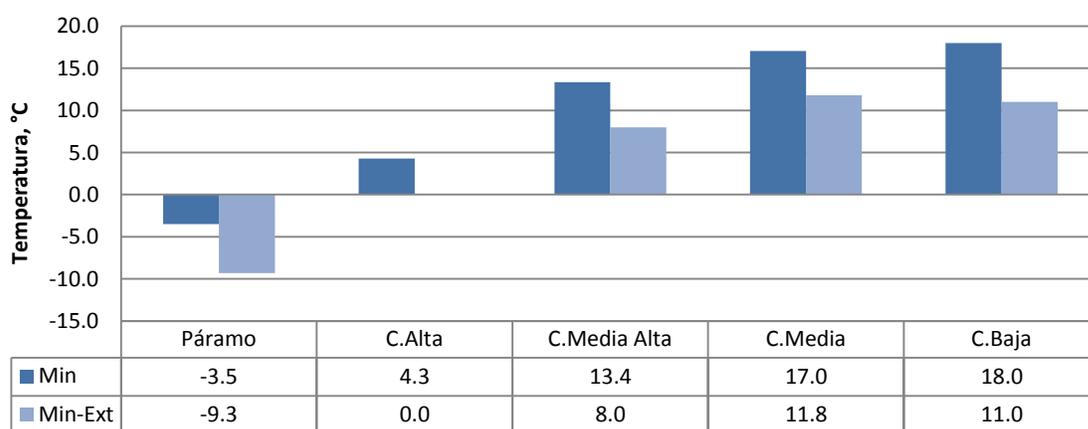
Figura 4.18: Mapa de temperaturas máximas promedio 1981-2010



4.4.3 Temperaturas mínimas

Las temperaturas mínimas promedio y los valores extremos, en el período 1981-2010, para las estaciones de la cuenca se consolidan en la Figura 4.19, fluctúan entre $-3,5^{\circ}\text{C}$ en las estaciones de páramo a 18°C en la cuenca alta. El mapa de distribución de las temperaturas mínimas se expone en la Figura 4.20. Los niveles de confianza para la temperatura mínima promedio al 95% son $0,02^{\circ}\text{C}$ en las estaciones el Cisne (Páramo), Agronomía (cuenca media-alta), Cenicafé (cuenca media) y Santagueda (cuenca baja) y $0,04^{\circ}\text{C}$ en la estación Letras (cuenca alta). La diferencia entre la temperatura media y la mínima es de 4°C , en promedio y entre los valores mínimos y extremos $5,5^{\circ}\text{C}$

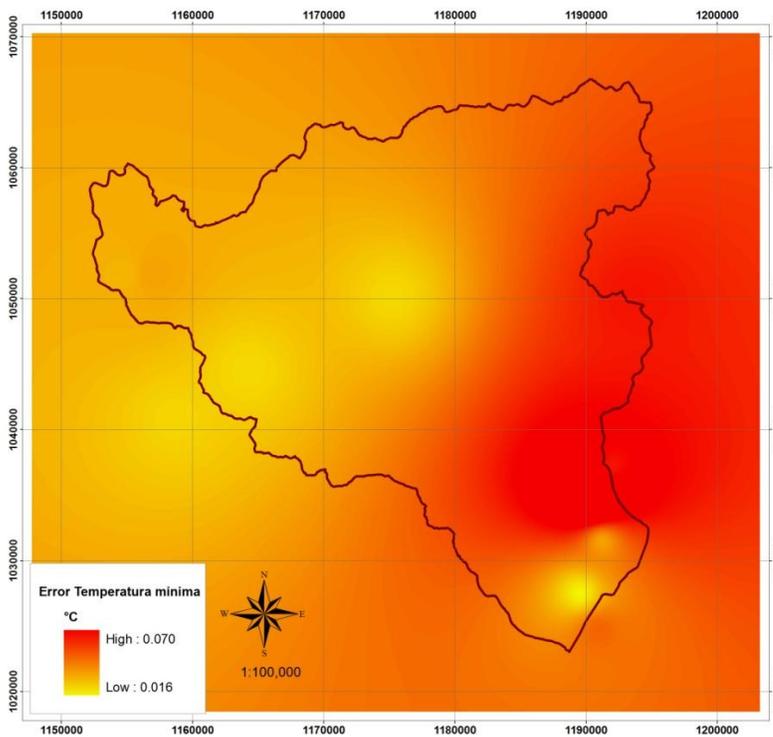
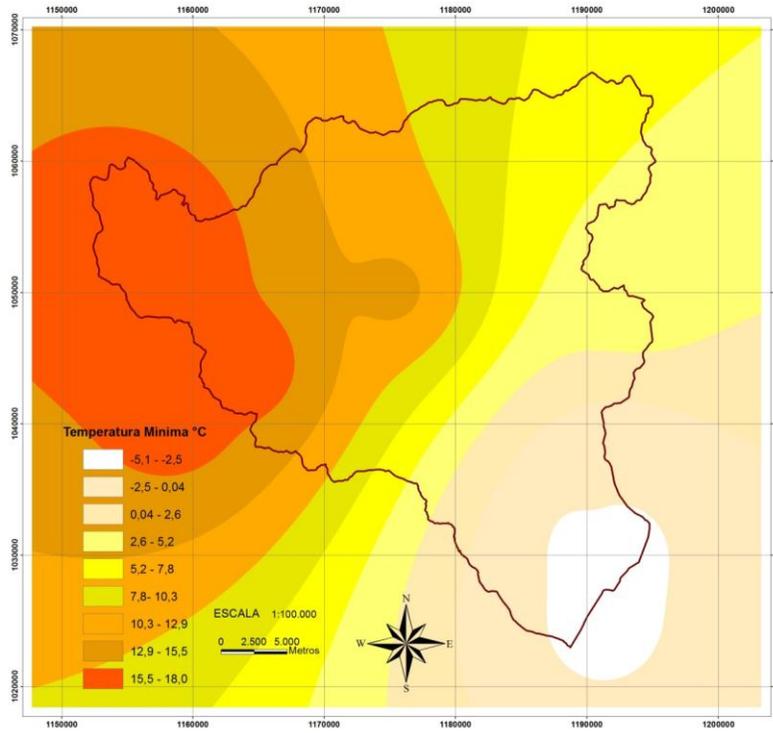
Figura 4.19: Temperaturas mínimas cuenca del río Chinchiná 1981-2010



4.5 Precipitación

La precipitación guía el modelado de una cuenca y puede ser descrita en los términos: intensidad, duración, profundidad, frecuencia, distribución temporal y espacial (Ponce, 1989). Comprender el comportamiento y los patrones es esencial para el estudio hidrológico. La precipitación abarca todas las formas de humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada. Los elementos necesarios para la formación de las precipitaciones involucran la humedad atmosférica, la radiación solar, los mecanismos de enfriamiento del aire, la presencia de núcleos higroscópicos para la condensación y el mecanismo de crecimiento de las partículas (Monsalve, 2008). Localmente, la cantidad de precipitación está determinada por los sistemas de nubosidad, condicionados por la altitud, la orientación de las montañas y la actividad convectiva del lugar (Jaramillo, 2005). La cantidad de lluvia se expresa en mm, que equivalen a $1\text{L}/\text{m}^2$.

Figura 4.20: Mapa de temperaturas mínimas promedio 1981-2010



En Colombia, el promedio de precipitación medial anual es de 3.000 mm. El régimen de lluvias en el eje cafetero está determinado por el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y la acción de factores físico geográficos como la orografía. Los patrones de distribución de la lluvia dependen de las influencias de los vientos Alisios que ingresan por el Atlántico, las masas de aire que vienen del Pacífico, los aportes de humedad procedentes del Amazonas (Jaramillo, 2005) y los vientos del oeste que penetran por la costa Pacífica colombiana los cuales provienen de una corriente de bajo nivel muy superficial en el trópico llamada Chorro del Chocó (Poveda & Mesa, 1999, 2000; Poveda et. al, 2006).

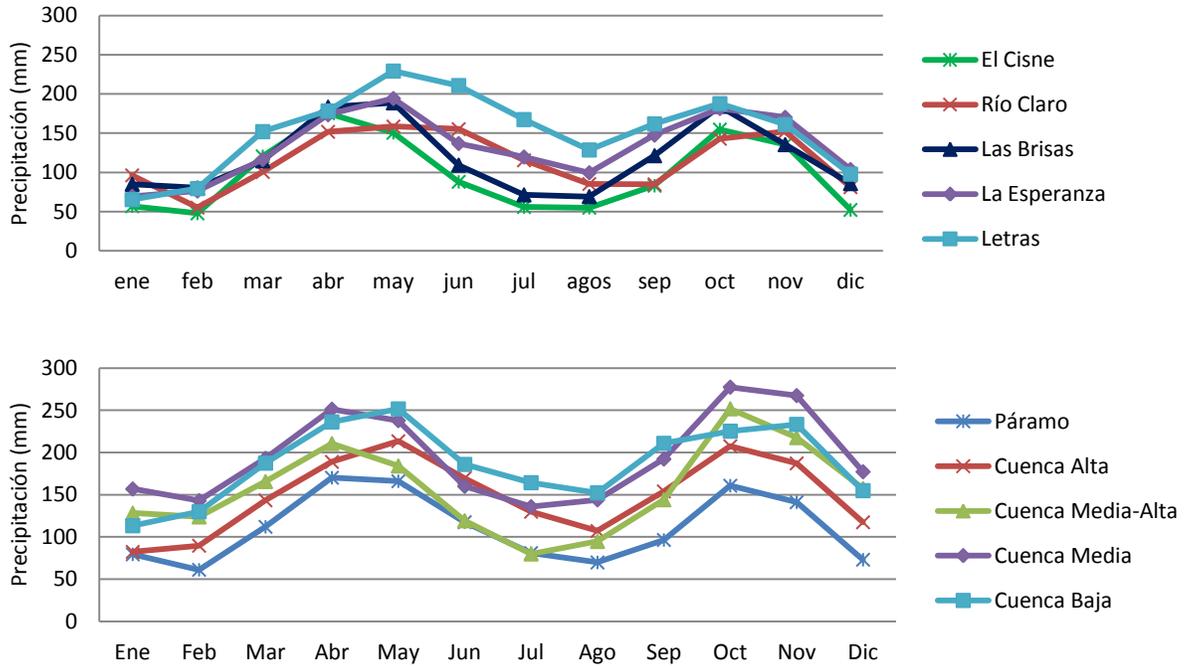
La región posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias -hasta 2.000 mm- a lo largo de la cordillera Oriental y en los valles del alto Magdalena y alto Cauca y núcleos máximos -de 3.000 a 5.000 mm- en las cuencas del Magdalena Medio y Cauca (IDEAM, 2005). La distribución intra-anual de la precipitación es bimodal, con dos temporadas secas, enero - febrero y julio - agosto; los meses de exceso hídrico (con cantidades de precipitación superiores a la evapotranspiración) son abril-mayo y octubre-noviembre (Jaramillo, 2005)

En la cuenca del río Chinchiná la distribución de la precipitación es bimodal, con dos períodos de mayor precipitación entre los meses de marzo a junio y julio a agosto. La lluvia en la región es alta, entre 2.000 y 2.200 mm/año, en promedio, menor que la media nacional (3.000 mm), pero mayor que la media mundial (900 mm) y suramericana (1600 mm). Las áreas menos lluviosas se encuentran en el extremo sur, en la cuenca alta, en las porciones más cercanas a los glaciares, con 600-800 mm/año (FOREC et al., 2000; Jaramillo, 2005; PROCUENCA, 2010). En las zonas de cultivo del café la pluviosidad es de 1.000 a 4.000 mm, con una mayor frecuencia en cantidades superiores a los 2.000 mm (Jaramillo, 2005).

Para el estudio se analizaron los registros de precipitación diaria de las estaciones: Brisas (1982-2005), Letras (2001-2010), El Cisne (2003-2010), río Claro (2003-2010), La Esperanza (1975-2008), Papayal (1981-2008), Agronomía (1956-2010), Alta Suiza (1975-2010), Neira (1976-2010), Marmato (1965-2010), Sancancio (1960-2010), Estación La Uribe (1975 - 2010), Java (1981-2010), El Recreo (1970-2010), Naranjal (1956-2010), Montevideo (1960-2010), La Selva (1985-2010), Cenicafé (1942-2010), Granja Lúker (1964-2010), Santágueda (1964-2010) y Arauca (1975-2008). Se aplicaron análisis de doble masas para evaluar la homogeneidad y consistencia de la información.

La distribución de la precipitación mensual para las estaciones de la cuenca alta y el comportamiento promedio en las diferentes zonas de la cuenca, para el período 1981-2010, se muestra en la Figura 4.21; la precipitación promedio mensual fluctúa entre 286 y 48 mm/mes. En la cuenca alta, los mayores valores se presentan en la estación Letras (3.684 m.s.n.m.) y los menores en El Cisne (4.830 m.s.n.m.). Las curvas siguen comportamiento bimodal típico, con períodos lluviosos en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. Es mayor la precipitación mensual promedio de la segunda temporada de lluvias para las estaciones de la cuenca media-alta; mientras que en la cuenca baja es mayor el promedio de la primera temporada de lluvias; para la cuenca media los valores son similares. Los mapas de precipitación mensual para condiciones hidroclimáticas medias se observan en la Figura 4.23.

Figura 4.21: Distribución de la precipitación mensual promedio en la cuenca 1981-2010



Los valores promedio de la precipitación anual en las diferentes estaciones de la cuenca del río Chinchiná se consolidan en la Figura 4.22. El mapa de distribución de la precipitación anual promedio se observa en la Figura 4.25 comparándolo con los mapas reportados en la literatura (CORPOCALDAS, 2005; PROCUENCA, 2010) son mayores los valores de precipitación en todas las zonas de la cuenca, con una oscilación entre 1170 y 2880 mm; mientras que el rango reportado fluctúa entre 900 a 2500 mm/año.

Figura 4.22: Precipitación anual promedio en las estaciones de la cuenca 1981-2010

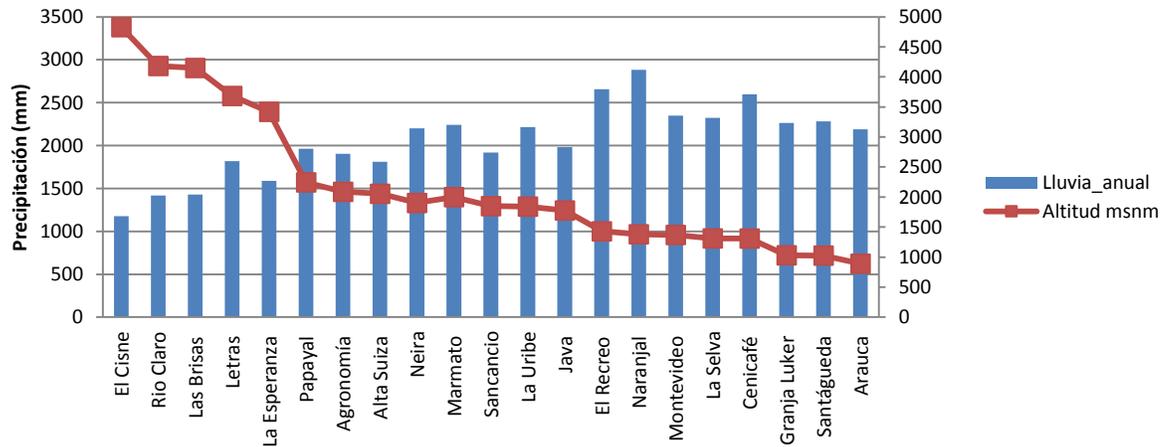


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

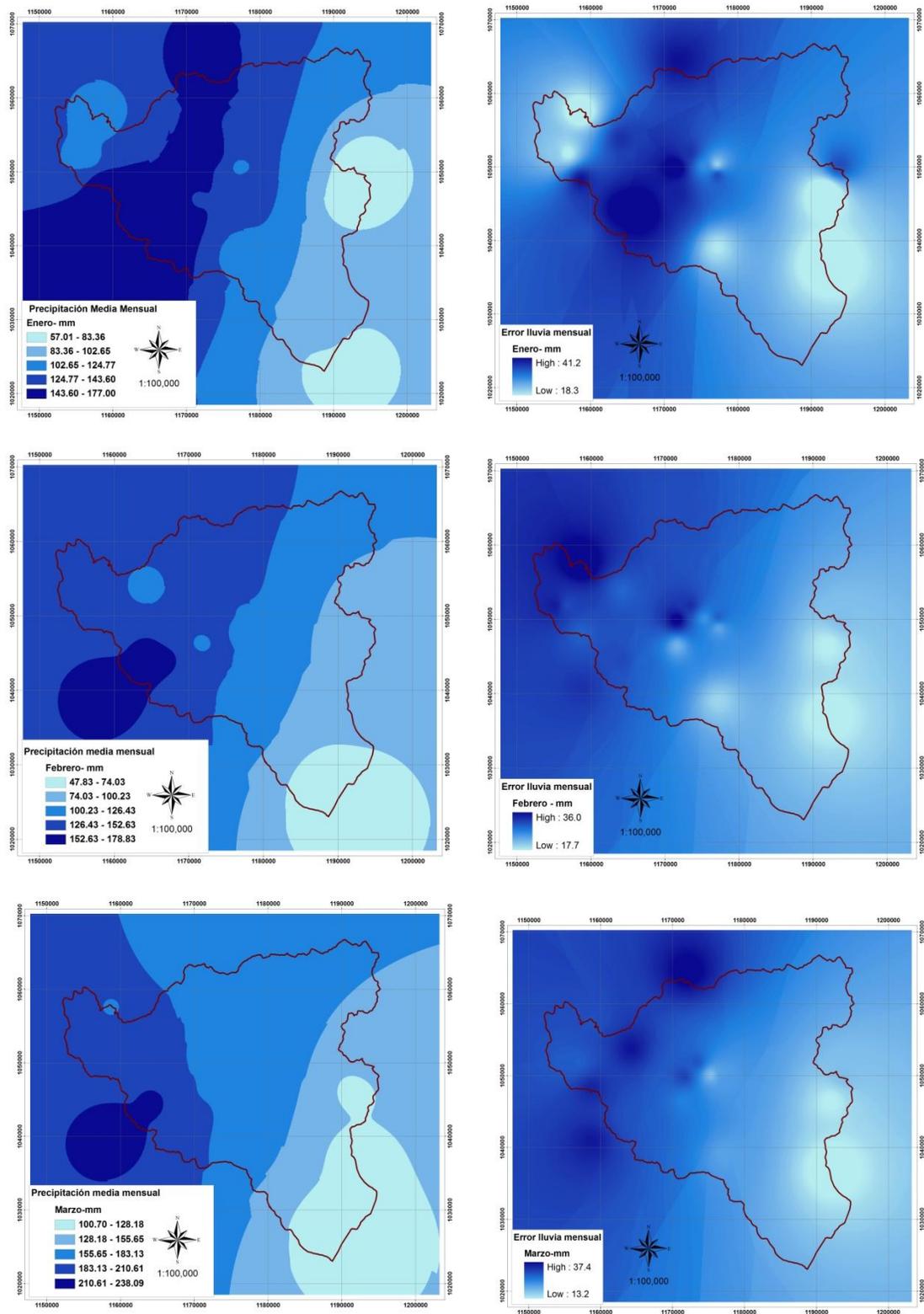


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

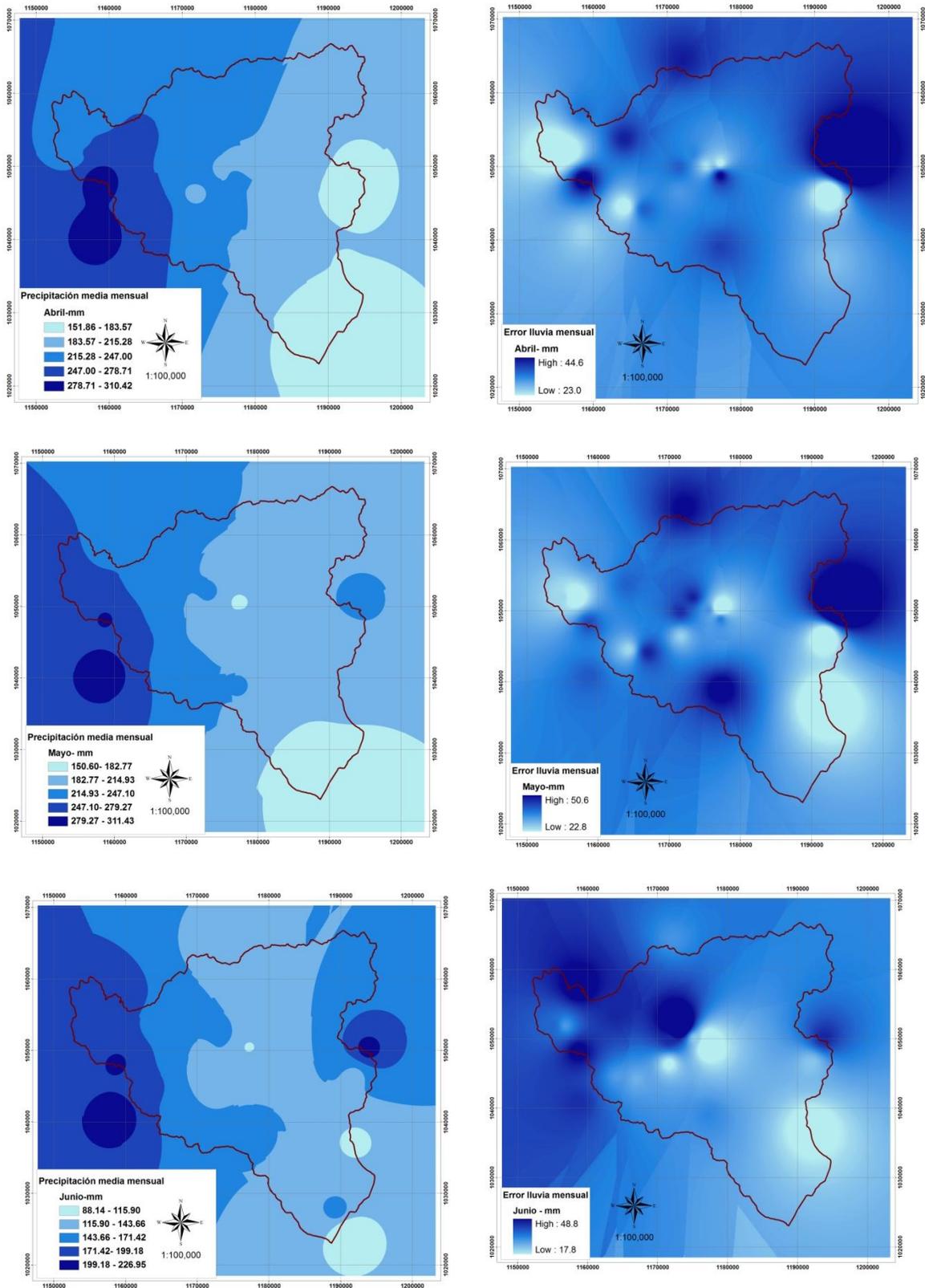


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

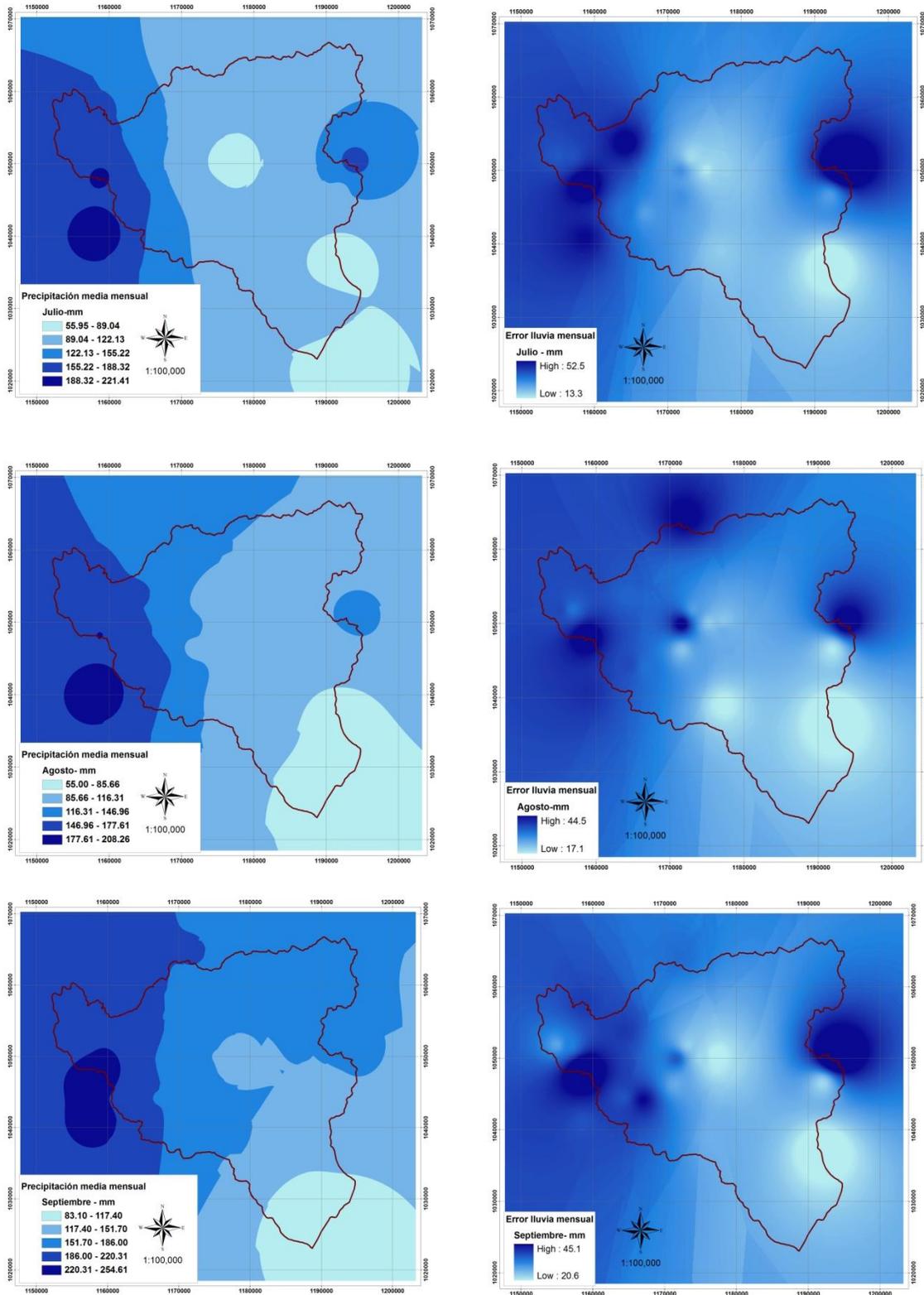


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

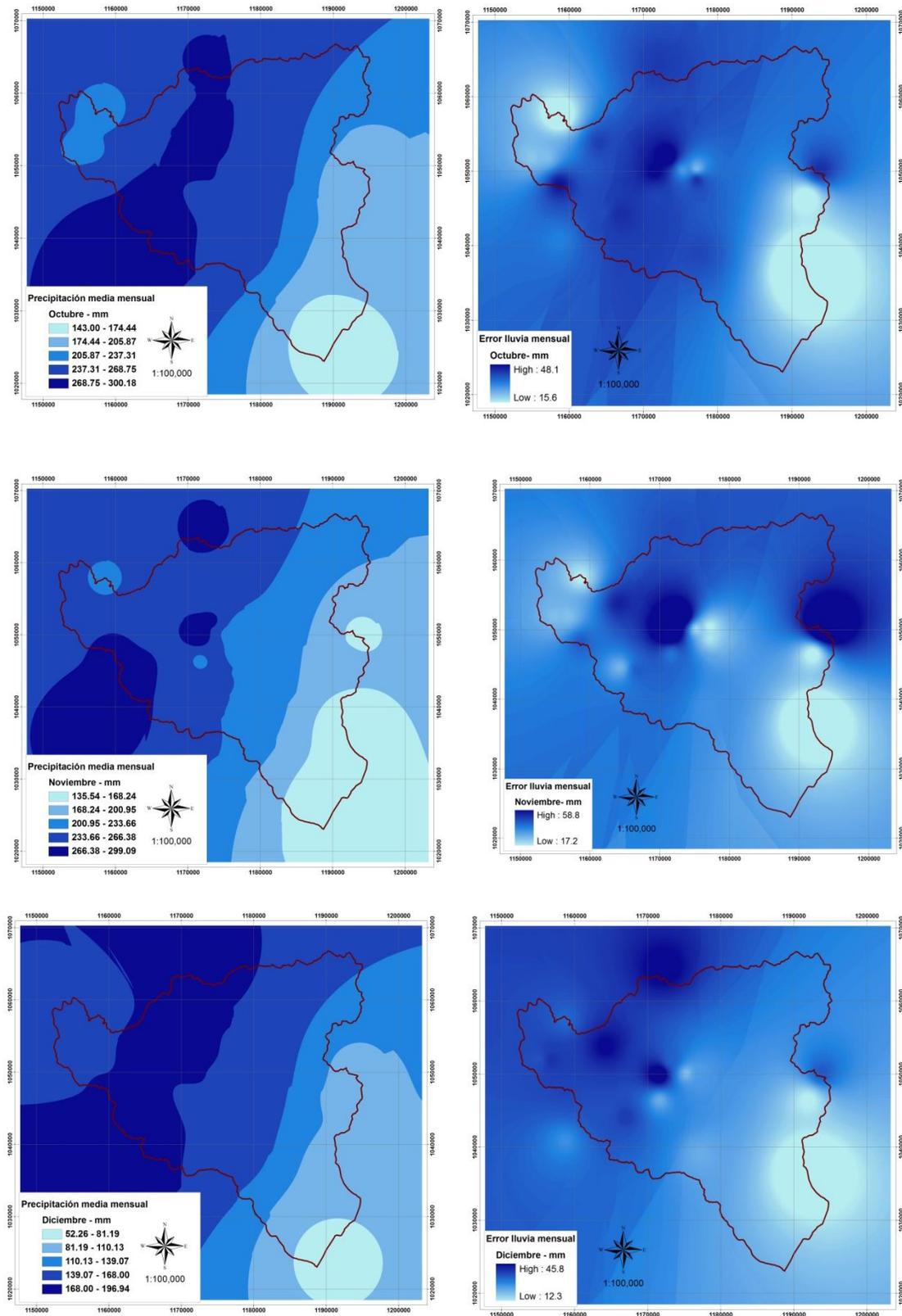
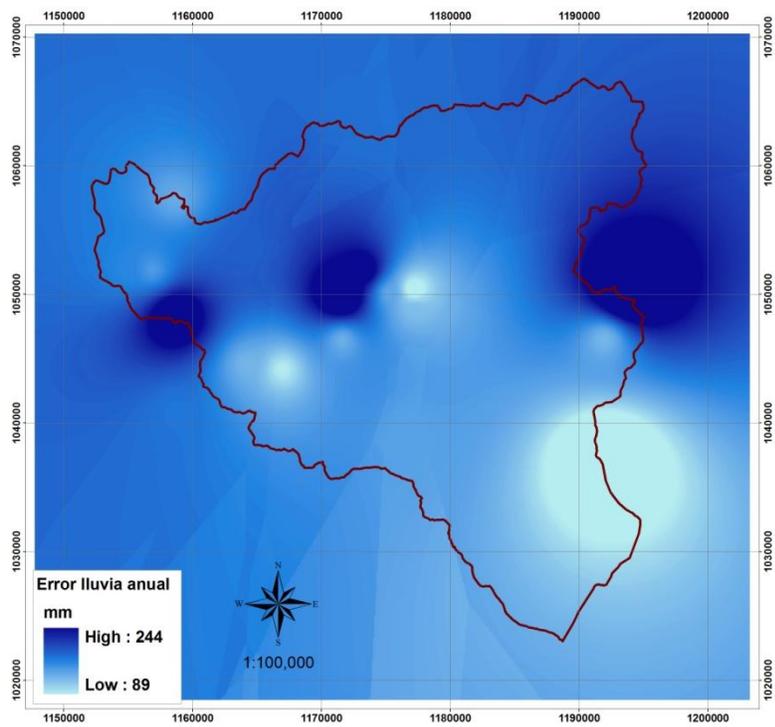
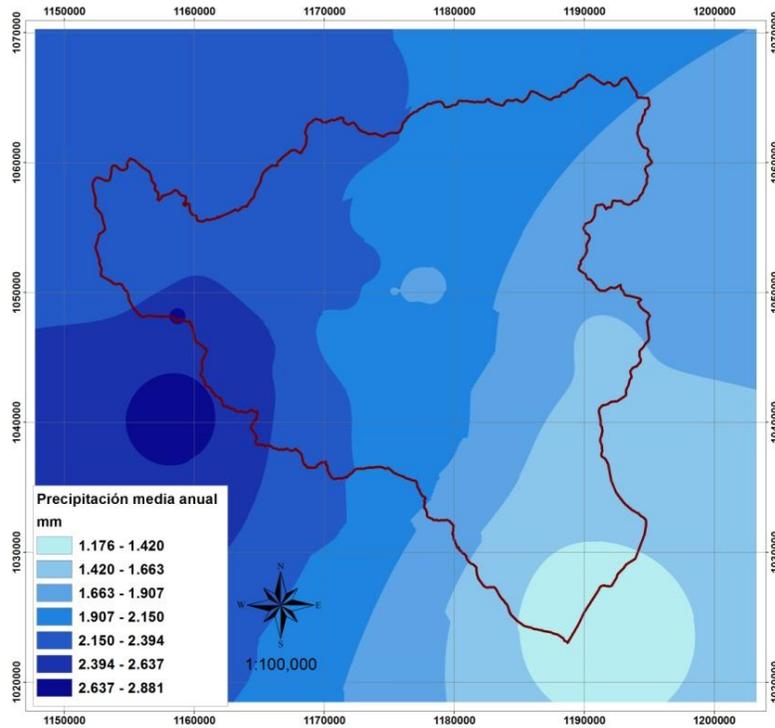


Figura 4.24: Mapa de precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010



4.6 Clasificación Climática

La clasificación climática está basada en el comportamiento medio de parámetros como la precipitación y la temperatura; entre las más conocidas figuran las clasificaciones de Caldas (1802) y Lang (1915) (IDEAM, 2005).

Basados en la clasificación climática de Caldas (1802)- Tabla 4.3-, en la cuenca se presentan cuatro pisos térmicos: páramo alto, páramo bajo, frío y templado.

Tabla 4.3: Clasificación Climática- Caldas

Piso Térmico	Símbolo	Rango Altura, m	Temperatura, °C
Cálido	C	0- 1000	≥ 24
Templado	T	1001-2000	$24 > T \geq 17,5$
Frío	F	2001 a 3000	$17,5 > T \geq 12$
Páramo bajo	Pb	3001 a 3700	$12 > T \geq 7$
Páramo alto	Pa	37001 a 4200	< 7

Adaptada: (IDEAM, 2005)

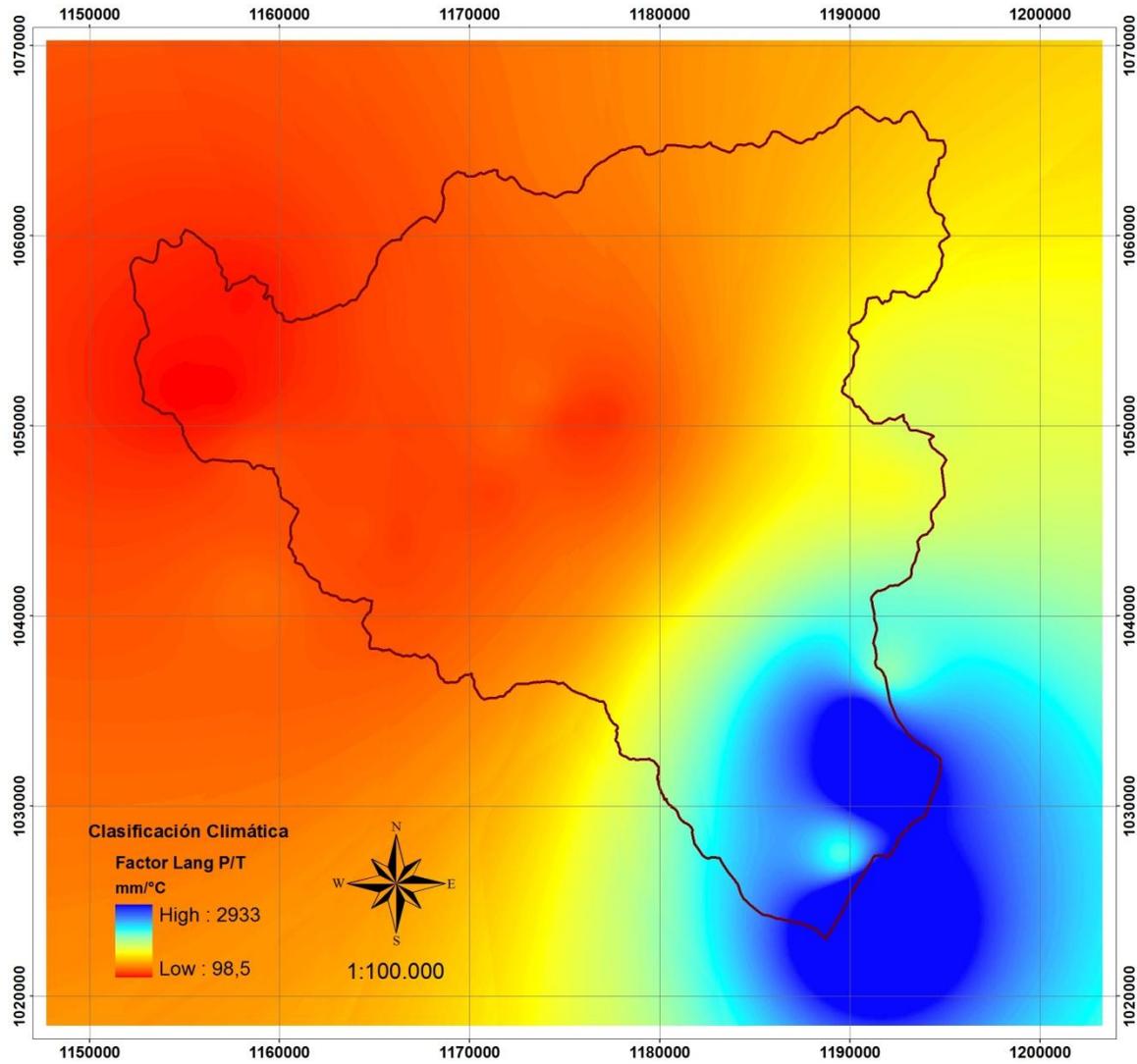
Tomando como referencia la clasificación climática de Lang (1915)- Tabla 4.4- las cuencas alta y media-alta son super-húmedas, con factores de Lang- P/T- mayores de 160; las cuencas media y baja son húmedas con factores entre 100 y 160. Los menores valores alcanzados son de 98 – zona semi-húmeda- en la cuenca baja alrededor de la desembocadura al río Cauca. El mapa de la clasificación climática de Lang se aprecia en la Figura 4.25.

Tabla 4.4: Clasificación de Lang

Tipo de Clima	Símbolo	Factor de Lang, P/T
Desértico	D	0 – 20
Árido	A	20,1 - 40
Semiárido	sa	40,1 – 60
Semihúmedo	sh	60,1 – 100
Húmedo	H	100,1 – 160
Superhúmedo	SH	>160

Adaptada: (IDEAM, 2005)

Figura 4.25: Clasificación climática de Lang cuenca del rio Chinchiná 1981-2010



5. Balance hidrológico

Los componentes del balance hidrológico en una cuenca son la precipitación, las abstracciones hidrológicas y la escorrentía. Para la modelación, generalmente, la precipitación es el dato de entrada al modelo, las abstracciones hidrológicas son determinadas por las propiedades de la cuenca y la escorrentía es la salida del modelo. Las abstracciones hidrológicas son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva, que se traduce en escorrentía superficial. Hay varios procesos por los cuales la precipitación es abstraída como la intercepción, la infiltración, el almacenamiento superficial, la evapotranspiración (Ponce, 1989).

5.1 Modelos de balance a escala diaria

Para el estudio se evaluó el modelo TETIS en su versión agregada a escala diaria. Las funciones objetivo empleadas para la calibración fueron el promedio de los errores absolutos (MAE), el error cuadrático medio (RSME), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la razón RMSE-desviación estándar de las observaciones (RSR) y el sesgo porcentual (PBIAS) o error de balance.

El modelo TETIS desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por el grupo de Hidrología e Hidráulica; es un modelo lluvia-escorrentía, conceptual con parámetros físicamente basados. En la conceptualización vertical del modelo, los tanques de almacenamiento están conectados entre sí y el flujo es función del agua almacenada en cada tanque. Con respecto a la conceptualización horizontal, todas las celdas drenan hacia la celda aguas abajo hasta que alcancen una celda con un cauce definido en que se realiza la traslación del flujo utilizando las características geomorfológicas combinadas con la onda cinemática (Francés et. al; 2007).

Los parámetros del modelo son efectivos, requieren calibración; se componen del valor estimado en cada celda y la función o factor de corrección (FC) y corresponden (Francés et. al; 2000): Almacenamiento estático máximo- FC1 (Hu); factor de vegetación para la evapotranspiración- FC2 (λv); infiltración -FC3 (Ks); escorrentía directa- FC4(Vladera); percolación- FC5(Kp); interflujo- FC6 (Ks); pérdidas subterráneas - FC7 (0,1 Kp); flujo base - FC8 (Kp) y velocidad de Cauces-FC9 (Vcauces). Como resultado de la simulación se obtienen series temporales, hidrogramas en los

puntos seleccionados y los valores medios en todos los almacenamientos al finalizar el período de simulación y su respectiva serie temporal media (Francés et. al; 2007).

Calibración del modelo TETIS: se realizó en la estación el Retiro, a la salida de la cuenca, durante el período 2004-2005; inicialmente los parámetros fueron estimados manualmente y luego ajustados automáticamente empleando la herramienta solver de Excel. Se tuvo en cuenta en el proceso de calibración, la sensibilidad de los parámetros, los cuales en su orden son: las pérdidas subterráneas (mm), el almacenamiento máximo capilar, la conductividad de la capa inferior (mm/d), el almacenamiento gravitacional Z Inferior (acuífero) y el tiempo de residencia del flujo base.

Los hidrogramas se observan en la Figura 5.1, los factores de calibración se presentan en la Tabla 5.1 y las principales características y los resultados de las funciones objetivo en la Tabla 5.2; para su interpretación se siguen los lineamientos establecidos en la metodología descritos en la Tabla 2.3, si bien estas recomendaciones fueron establecidas para escala mensual (Moriasi et. al, 2007), se tomarán para el análisis a escala diaria. El promedio de los valores absolutos y la raíz cuadrada del error medio se evalúan según lo establecido por Singh et al. Como apropiados (A) si son menos de la mitad de la desviación estándar de los caudales observados o no apropiados (NA) en caso contrario.

Para la calibración se tuvo en cuenta los resultados de los factores de calibración dado su sentido físico y la salida de cada uno de los tanques, de tal manera que se representara la respuesta rápida, media y lenta, la cual fue analizada gráficamente al igual que los valores de almacenamiento en cada uno de los tanques. Con esta información se pudo concluir que la calibración se realizó de manera satisfactoria.

Tabla 5.1: Factores de calibración modelo TETIS estación El Retiro

Factores de calibración	Valor
Almacenamiento Máximo Capilar	350,16
Conductividad Capa Sup (mm/día)	7,29
Conductividad Capa Inf (mm/día)	3,40
Pérdidas Subterráneas (mm)	1,36
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	8,28
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	3,79
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	192,58
Condiciones iniciales (mm)	0,00
Almacenamiento Capilar	257,00
Almacenamiento Agua Superficial	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	209,25

Validación temporal del modelo TETIS: se realizó en la estación el Retiro, empleando los mismos parámetros de calibración (Tabla 5.1), en dos períodos de tiempo diferentes al de calibración

2002-2003 y 2006-2007. Los hidrogramas se presentan en la Figura 5.2, las principales características y los resultados de las funciones objetivo en la Tabla 5.3. Los resultados de la validación fueron satisfactorios para el período 2002-2003 y buenos para 2006-2007. Por lo cual se concluye que el proceso de validación temporal es satisfactorio.

Figura 5.1: Hidrogramas de calibración del modelo TETIS estación El Retiro

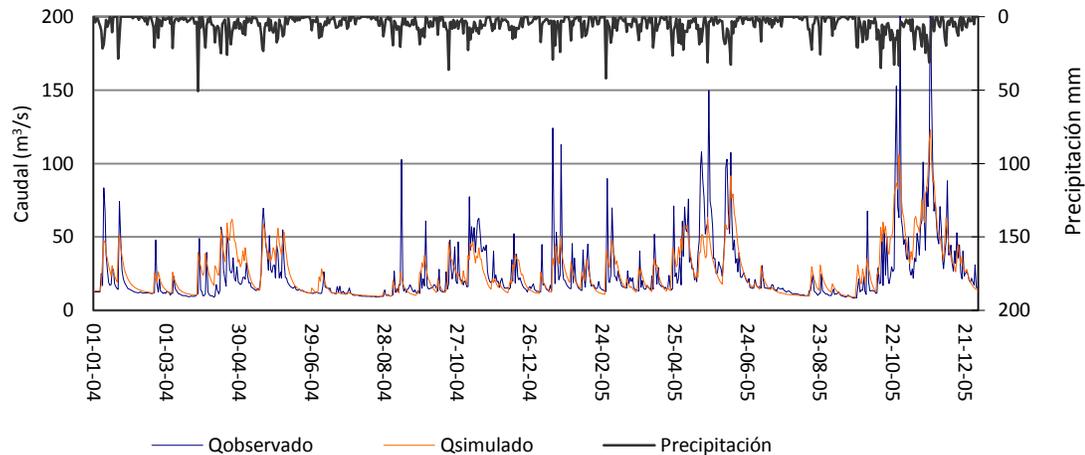
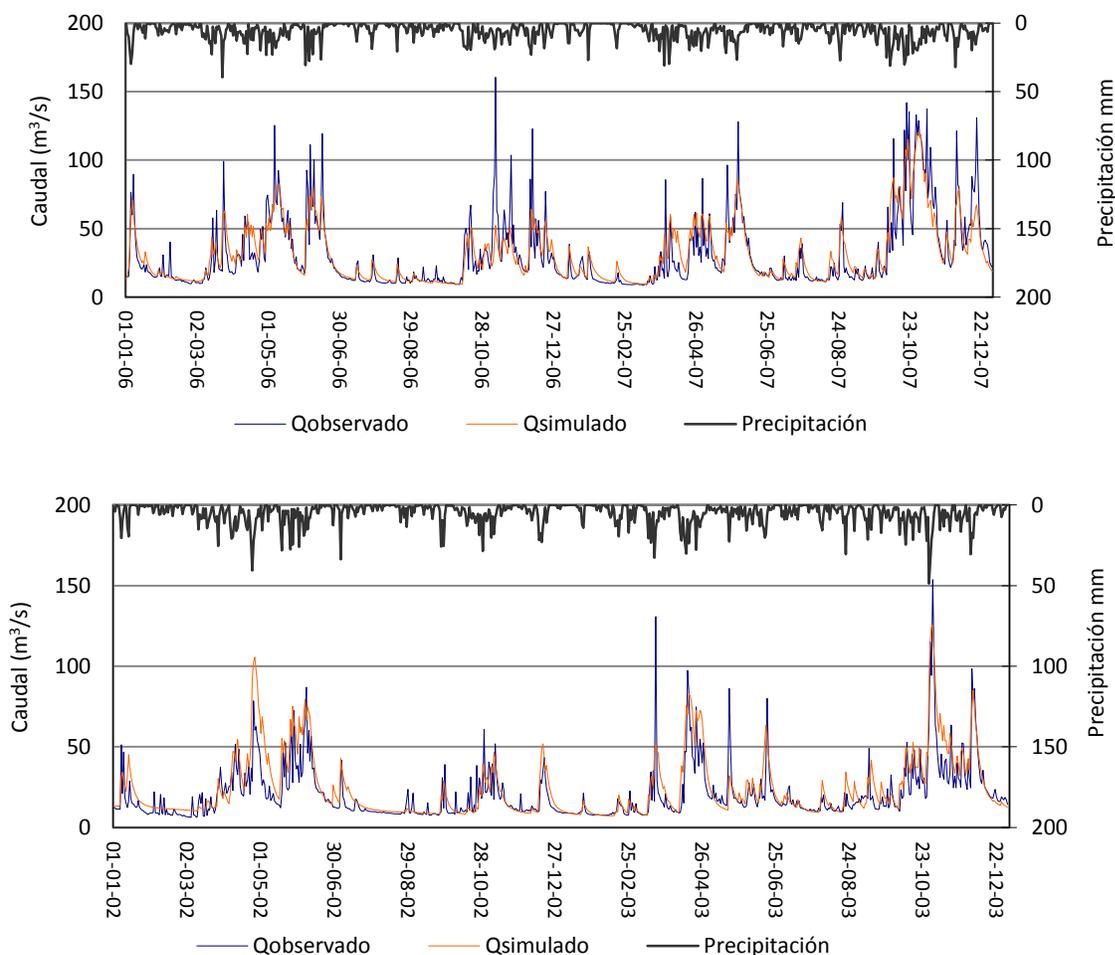


Tabla 5.2: Resultados de calibración del modelo TETIS

Estación	El Retiro	
Período inicio - fin	01/01/2004 - 12/31/2005	
	Resultados	Interpretación
Caudal promedio simulado (m^3/s)	26,03	
Caudal promedio observado (m^3/s)	25,13	
Desviación estándar caudal observado	22,92	
Balance - PBIAS (%)	-3,61	Muy bueno
NASH- NSE	0,57	Satisfactorio
RSR	0,65	Satisfactorio
MAE	8,36	Apropiado
RSME	2,89	Apropiado

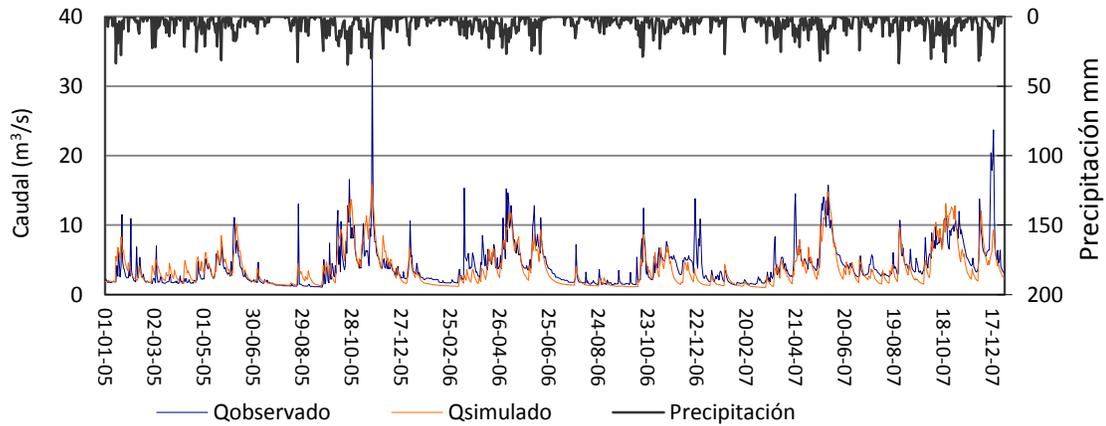
La validación espacial del modelo TETIS: fue realizada en las demás estaciones de la cuenca- Chupaderos, Sancancio, Montevideo-, con los parámetros de calibración encontrados en el Retiro (Tabla 5.1); los resultados obtenidos se representan en la Figura 5.3 y en la Tabla 5.4. Los factores de evaluación del proceso de validación espacial fueron en general satisfactorios; sin embargo, el modelo tiene una mejor representación en la cuenca alta- estación chupaderos. Puede apreciarse que el modelo representa los valores promedio; pero no los máximos, como se observa en los hidrogramas y en la Figura 5.4, la cual representa las curvas de duración de caudales para el período 2002-2009

Figura 5.2: Hidrogramas de validación temporal del modelo TETIS estación El Retiro**Tabla 5.3:** Resultados de validación temporal del modelo TETIS

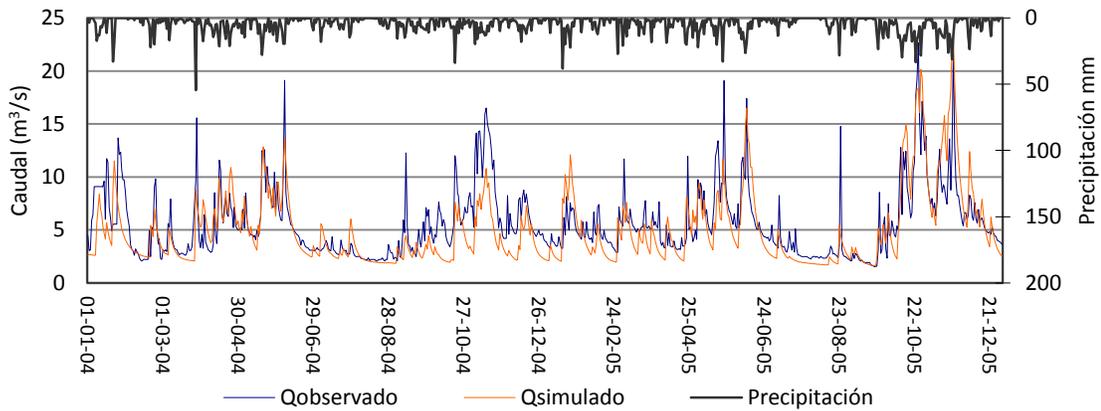
Estación	El Retiro			
	01/01/2002- 12/31/2003		01/01/2006 -12/31/2007	
Período inicio- fin	Resultados	Interpretación	Resultados	Interpretación
Caudal promedio simulado (m ³ /s)	24,45		31,25	
Caudal promedio observado (m ³ /s)	20,64		30,84	
Desviación estándar caudal observado	16,93		26,03	
Balance- PBIAS(%)	-18,48	Satisfactorio	1,34	Muy bueno
NASH- NSE	0,54	Satisfactorio	0,74	Bueno
RSR	0,68	Satisfactorio	0,51	Bueno
MAE	7,09	Apropiado	7,86	Apropiado
RSME	2,66	Apropiado	0,51	Apropiado

Figura 5.3: Validación espacial del modelo TETIS

Estación Chupaderos: 2005-2007



Estación Sancancio 2004-2005



Estación Montevideo: 2006-2007

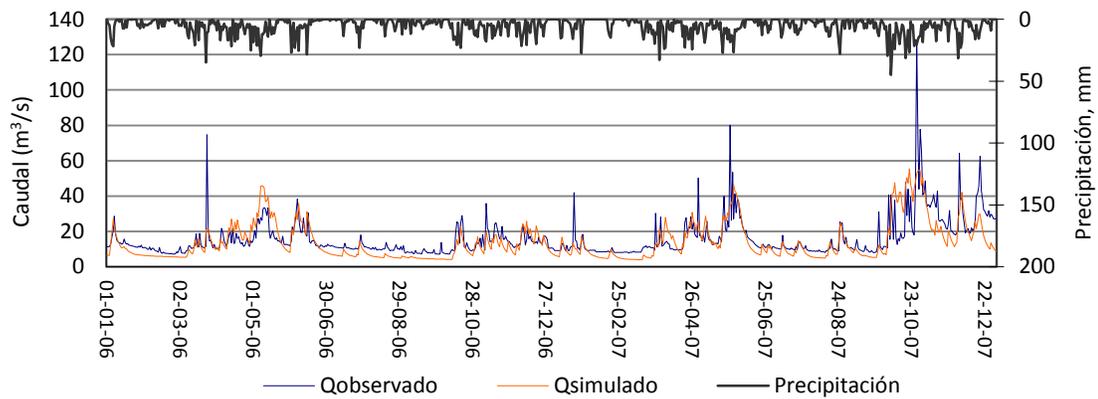


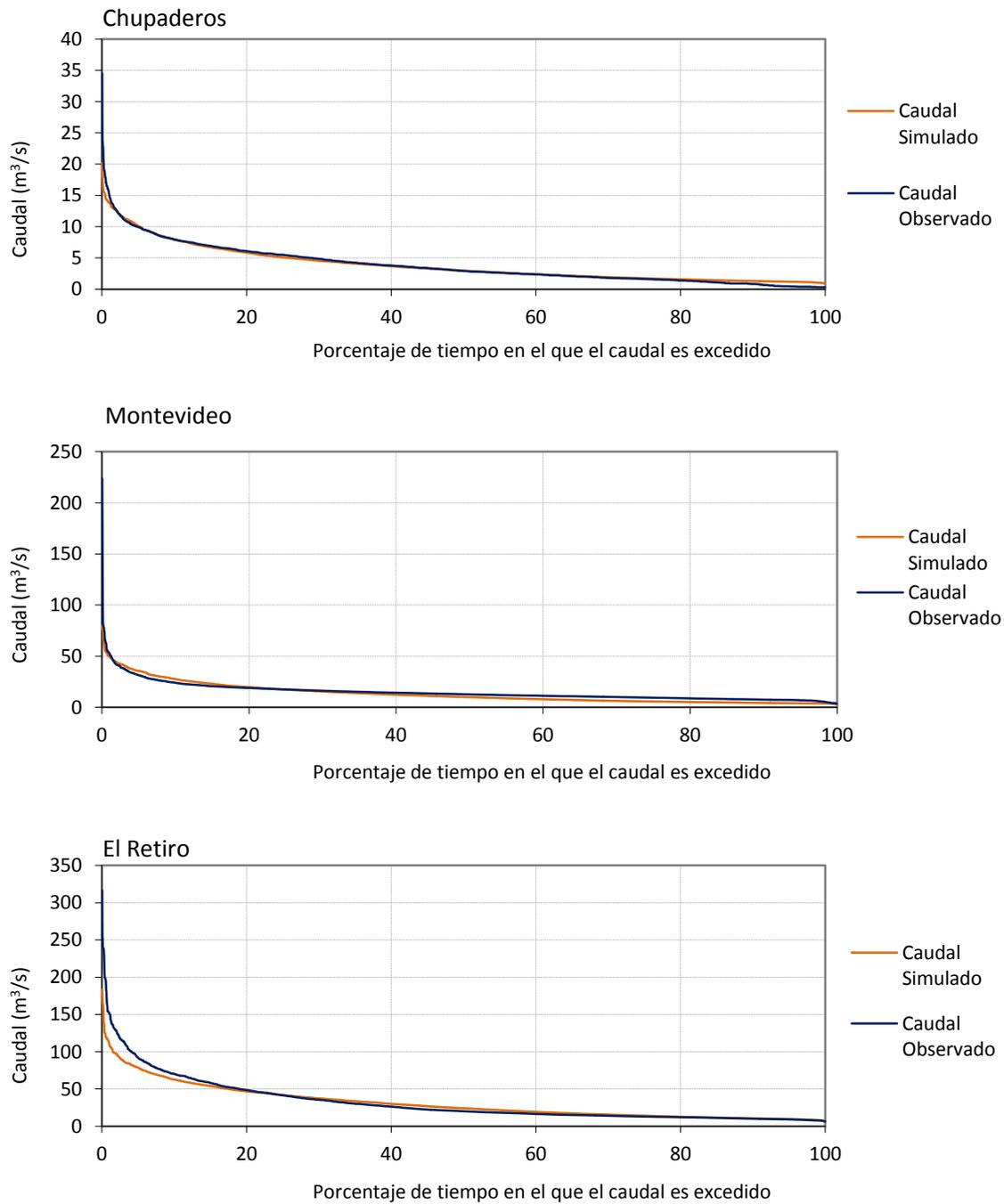
Figura 5.4: Curva de duración de caudales -2002-2009

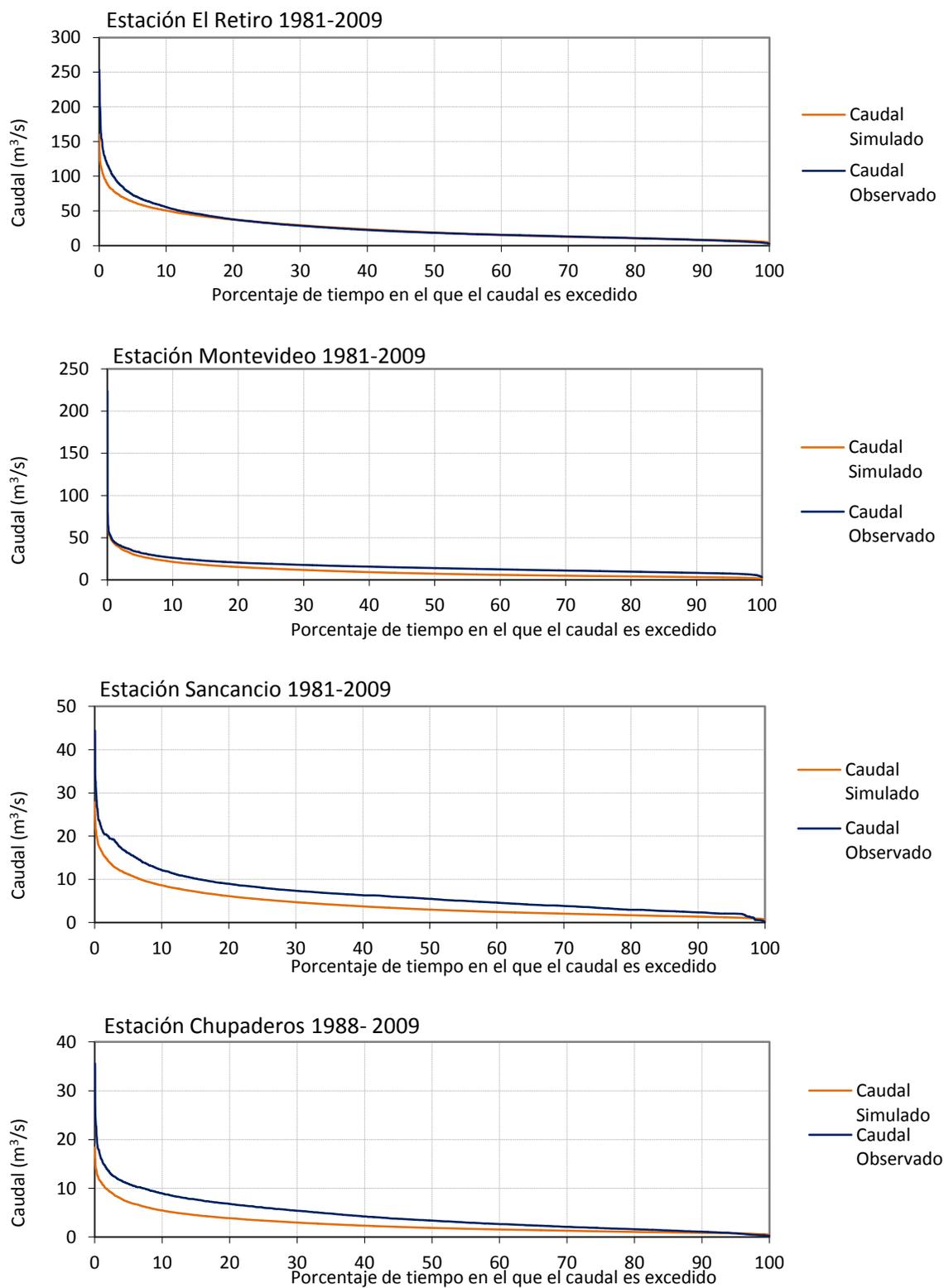
Tabla 5.4: Resultados de la validación espacial del Modelo TETIS

Estación	Chupaderos		Sancancio		Montevideo	
Período inicio	01-01-2005	Interpreta.	01-01-2004	Interpreta.	01-01-2006	Interpreta.
Período fin	12-31-2007		12-31-2007		12-31-2007	
Caudal promedio simulado (m ³ /s)	3,72		4,98		13,89	
Caudal promedio observado (m ³ /s)	4,11		5,60		15,77	
Desviación estándar caudal observado	3,07		3,25		10,13	
Balance- PBIAS(%)	9,69	Muy bueno	11,12	Bueno	11,98	Bueno
NASH- NSE	0,56	Satisfactorio	0,51	Satisfactorio	0,51	Satisfactorio
RSR	0,66	Bueno	0,7	Satisfactorio	0,7	Satisfactorio
MAE	1,24	Apropiado	1,69	Apropiado	5,13	Apropiado
RSME	1,11	Apropiado	1,30	Apropiado	2,27	Apropiado

Simulación Modelo TETIS parámetros de calibración estación El Retiro: con los parámetros obtenidos del proceso de calibración en la estación El Retiro (Tabla 5.1), fue realizada la simulación para el período más reciente 1981-2009. Se graficaron las curvas de duración de caudales (Figura 5.5), las cuales comparadas con los valores observados permiten estimar los errores del modelo. Los flujos medios tanto de las series observadas como simuladas se consolidan en la Tabla 5.5, se incluye el cálculo del caudal medio a partir de la mediana de la curva de duración de caudales. Para la estación El Retiro, el error de balance, en valor absoluto, es 5,7% en el Retiro y por tanto, es muy bueno, los demás parámetros estadísticos alcanzan resultados satisfactorios en esta estación con valores de NSE de 0,51 y RSR de 0,7. Sin embargo, para las demás estaciones, Montevideo, Sancancio, Chupaderos el error de balance es muy alto entre el 35,2 a 38,9%, donde el modelo subestima los caudales, los valores del NSE son inferiores a 0,50 y por tanto se considera que el modelo con los parámetros de la Tabla 5.1 no interpreta la realidad. Es de anotar que en la modelación no se tuvo en cuenta el retroceso glacial, hecho que puede explicar, en parte, las diferencias en el balance en las estaciones de la parte alta de la cuenca.

Tabla 5.5: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en El Retiro

Estación	Período	Caudal medio P ₅₀ m ³ /s			Caudal promedio m ³ /s		
		Observado	Simulado	Balance	Observado	Simulado	Balance
El Retiro	1981-2009	18,20	18,75	3,0	26,60	25,06	5,7
Montevideo	1981-2009	11,07	7,29	34,1	15,98	10,36	35,2
Sancancio	1981-2009	5,47	3,00	45,0	6,52	4,16	36,2
Chupaderos	1988-2009	3,40	2,02	40,0	4,37	2,67	38,9

Figura 5.5: Curva de duración de caudales- factores de calibración Tabla 5.1

Calibración y validación del modelo estación Montevideo: Teniendo en cuenta que los parámetros de calibración no son únicos y con el fin de obtener un error de balance satisfactorio para el período 1981-2009, en todas las estaciones de la cuenca, se procede a evaluar los parámetros del modelo, mediante la obtención de mejores funciones de calibración en la estación Montevideo. Automáticamente empleando la herramienta solver de Excel se maximiza el parámetro Nash para toda la serie. La calibración se realiza para el lapso 2006-2007; los parámetros obtenidos en el proceso se presentan en la Tabla 5.6, las funciones objetivo para la calibración en la Tabla 5.7 y los hidrogramas en la Figura 5.6. La validación fue realizada para el período 2004-2005, los resultados se presentan en la Tabla 5.8. Los factores de evaluación tanto para los procesos de calibración como de validación, en general fueron satisfactorios.

Tabla 5.6: Factores de calibración modelo TETIS estación Montevideo

Factores de calibración	Valor
Almacenamiento Máximo Capilar	350,08
Conductividad Capa Sup (mm/día)	7,12
Conductividad Capa Inf (mm/día)	5,36
Pérdidas Subterráneas (mm)	0,39
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10,00
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	2,49
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	192,49
Condiciones Iniciales (mm)	0,00
Almacenamiento Capilar	257,15
Almacenamiento Agua Superficial	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	209,52

Tabla 5.7: Funciones objetivo para la calibración estación Montevideo 2006-2007

Estación	Chupaderos	Sancancio	Montevideo	El Retiro
Caudal promedio simulado (m ³ /s)	4,16	6,11	15,44	34,91
Caudal promedio observado (m ³ /s)	4,46	6,02	15,77	30,84
Desviación estándar caudal observado	3,03	3,08	10,71	26,03
Balance- PBIAS(%)	6,67	1,55	2,15	-13,20
	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno	Bueno
NASH- NSE	0,58	0,58	0,55	0,64
	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
RSR	0,65	0,65	0,67	0,6
	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Bueno
MAE	1,16	1,43	3,92	11,67
	Apropiado	Apropiado	Apropiado	Apropiado
RSME	1,08	1,19	1,98	3,42
	Apropiado	Apropiado	Apropiado	Apropiado

Figura 5.6: Calibración del modelo hidrológico – 2006-2007

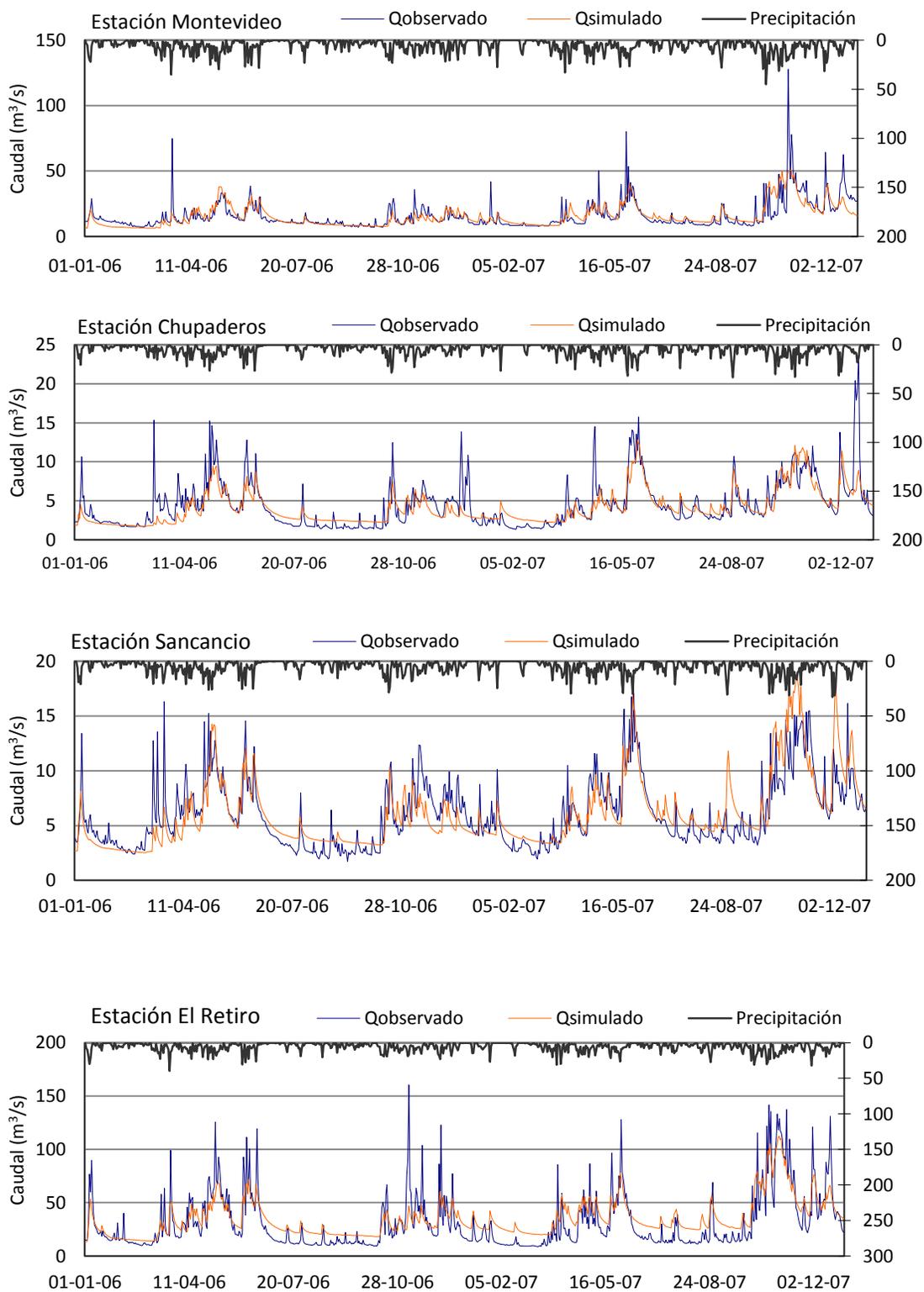


Tabla 5.8: Validación de factores obtenidos en la calibración en la estación Montevideo

Período	2004 - 2005			
	Chupaderos	Sancancio	Montevideo	El Retiro
Caudal promedio simulado (m ³ /s)	4,20	5,65	14,73	34,06
Caudal promedio observado (m ³ /s)	4,25	5,61	14,52	27,98
Desviación estándar caudal observado	3,16	3,25	8,69	24,68
Balance- PBIAS(%)	1,21 Muy bueno	-0,88 Muy bueno	-1,47 Muy bueno	-21,7 Satisfactorio
NSE	0,51 Satisfactorio	0,51 Satisfactorio	0,51 Satisfactorio	0,55 Satisfactorio
RSR	0,7 Satisfactorio	0,7 Satisfactorio	0,7 Satisfactorio	0,67 Satisfactorio
MAE	1,5 Apropiado	1,7 Apropiado	3,9 Apropiado	12,5 Apropiado
RSME	1,2 Apropiado	1,3 Apropiado	2,0 Apropiado	3,5 Apropiado

Simulación Modelo TETIS parámetros de calibración estación Montevideo: Realizando la simulación para el período 1981-2009 empleando los factores de calibración de la Tabla 5.6, se obtienen los caudales simulados, los cuales se comparan con los observados (Tabla 5.9) para calcular los errores de balance; dicho error, en valor absoluto, fluctúa entre el 15 al 21,5% y por tanto, se considera satisfactorio. En la estación El Retiro hay sobre-estimación de caudales mientras que en las demás estaciones se subestiman. Se obtienen las curvas de duración de caudales a partir de ellas se calcula el caudal medio, se observa que por este método el error de balance en la estación El Retiro es no satisfactorio. Si se evalúa para este período las funciones estadísticas, se encuentra que los valores del NSE son inferiores a 0,5; aunque este parámetro ha sido definido por Moriasi et al. (2007) para la calibración a escala mensual, ha sido adoptado para la escala diaria, por tanto se considera que los parámetros de calibración descritos en la Tabla 5.6 no son apropiados para las estaciones evaluadas. Automáticamente se buscan mejores parámetros de correlación para la serie histórica en la estación Montevideo 1981-2009, sin embargo los resultados no son satisfactorios en términos de NASH.

Tabla 5.9: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Montevideo

Estación	Período	Caudal medio P ₅₀ m ³ /s			Caudal promedio m ³ /s		
		Observado	Simulado	Balance	Observado	Simulado	Balance
El Retiro	1981-2009	18,20	28,38	-55,93	26,60	32,32	-21,50
Montevideo	1981-2009	11,07	11,77	-6,32	15,98	13,60	14,9
Sancancio	1981-2009	5,47	4,83	11,7	6,52	5,50	15,6
Chupaderos	1988-2009	3,40	3,09	9,1	4,37	3,54	19,0

Calibración y simulación del modelo estación Sancancio: teniendo en cuenta que los parámetros de calibración no son únicos y que los presentados en la Tabla 5.1 sólo son apropiados para la estación El Retiro y que los de la Tabla 5.6 no representaron adecuadamente el período 1981-2010, se procede a evaluar los parámetros del modelo, mediante la obtención de mejores funciones de calibración en la estación Sancancio. Los parámetros obtenidos en el proceso de calibración se presentan en la Tabla 5.10, las funciones objetivo para la calibración en la Tabla 5.11. En general el modelo es satisfactorio para las estaciones Chupaderos, Sancancio y Montevideo pero no para El Retiro, por el error de balance.

Tabla 5.10: Factores de calibración modelo TETIS en la estación Sancancio

Factores de calibración	Valor
Almacenamiento Máximo Capilar	352,72
Conductividad Capa Sup (mm/día)	3,81
Conductividad Capa Inf (mm/día)	2,74
Pérdidas Subterráneas (mm)	0,00
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10,00
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	2,76
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	200,00
Condiciones Iniciales (mm)	0,00
Almacenamiento Capilar	256,63
Almacenamiento Agua Superficial	1,09
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	2,68
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	208,73

Tabla 5.11: Funciones objetivo para la calibración en la estación Sancancio

Estación	Chupaderos	Sancancio	Montevideo	El Retiro
Período	2004-2007	2002-2007	2006-2007	2002-2009
Caudal promedio simulado (m ³ /s)	4,80	6,90	18,0	42,70
Caudal promedio observado (m ³ /s)	4,25	6,87	15,8	32,47
Desviación estándar caudal observado	3,16	5,09	10,71	30,99
Balance- PBIAS(%)	-12,83	-3,13	-14,10	-31,52
	Bueno	Muy bueno	Bueno	No Satisfactorio
NASH- NSE	0,50	0,50	0,50	0,50
	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
RSR	0,70	0,70	0,70	0,70
	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
MAE	1,50	2,50	4,97	16,88
	Apropiado	Apropiado	Apropiado	No apropiado
RSME	1,2	1,6	2,23	4,11
	Apropiado	Apropiado	Apropiado	Apropiado

Se efectúa la simulación para el período 1981-2009, la comparación de los caudales medios observados y simulados se presenta en la Tabla 5.12, los errores de balance se consideran apropiados y son menores al 10% (muy buenos).

Tabla 5.12: Comparación de caudales medios observados y simulados calibración en Sancancio

Estación	Período	Caudal medio P_{50} m ³ /s			Caudal promedio m ³ /s		
		Observado	Simulado	Balance	Observado	Simulado	Balance
Montevideo	1981-2009	13,84	12,90	7,50	14,52	16,90	3,88
Sancancio	1981-2009	5,47	5,30	3,20	6,52	6,20	4,91
Chupaderos	1988-2009	3,40	3,41	-0,21	4,02	4,37	-7,99

5.2 Modelación hidrológica a escala mensual

Los modelos de balance evaluados a escala mensual fueron Thomas (abcd), Témez, Modelos T y P; también fueron analizados los modelo estadísticos autorregresivos ARMA.

Calibración de modelos: el proceso de calibración, a escala mensual, fue efectuado para el período 2001-2003 y 2004-2007 en la estación El Retiro, a la salida de la cuenca, para todos los modelos. Inicialmente se ajustaron los parámetros de calibración de manera manual y posteriormente, automáticamente empleando la herramienta solver de Microsoft Excel. A continuación se describen los factores de calibración encontrados para cada uno de los modelos.

- **Modelo TETIS:** los resultados obtenidos a escala diaria fueron llevados a valores mensuales para efectos de comparación, se emplearon los parámetros encontrados por la calibración en la estación El Retiro (Tabla 5.1).
- **Modelo Thomas- abcd:** El parámetro más sensible para la calibración fue c. Los mejores parámetros de calibración obtenidos, basados en el análisis gráfico y estadístico, para el período 2001-2007, en la estación el Retiro, fueron:
 - Parámetro a, el cual expresa la capacidad del suelo para inducir la escorrentía antes de la saturación: $a = 0,9377$
 - Parámetro b, que corresponde al límite superior de la cantidad de humedad del suelo y la evapotranspiración: $b = 651,7406$
 - Parámetro c, equivalente a la fracción que se encuentra en el almacenamiento subterráneo: $c = 0,7332$
 - Parámetro d, constante de drenaje del tanque de aguas subterráneas: $d = 0$
- **Modelo Témez:** el parámetro más sensible para la calibración fue α . Para el período 2001-2007, los mejores parámetros encontrados durante la calibración en la estación El Retiro, basados en el análisis gráfico y estadístico fueron:
 - Parámetro ϕ , el cual representa la capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo (mm). $\phi = 382,43$

- Parámetro α , que es el coeficiente de recesión del acuífero (L/día). $\alpha = 0,02151$
 - Parámetro c , coeficiente de excedente: $c = 0$
 - Parámetro l_{max} , que representa la capacidad máxima de infiltración (mm).
 $l_{max} = 50000$
- **Modelo T:** El parámetro más sensible para la calibración fue ϕ . Para el período 2001-2007, en la estación El Retiro, se encontraron los siguientes parámetros durante el proceso de calibración, a partir del análisis gráfico y de las funciones de calibración:
 - Parámetro ϕ , que representa la capacidad de almacenamiento en términos de humedad: $\phi = 147,0136$
 - Parámetro $\lambda = 0,7683$
 - **Modelo P:** el parámetro más sensible para la calibración fue ϕ_a . Los mejores parámetros obtenidos en la calibración del modelo para la estación el Retiro en el período 2001-2007, según el análisis gráfico y estadístico fueron:
 - Parámetro ϕ_a , capa superior del suelo para el almacenamiento de humedad $\phi_a = 1,00$
 - Parámetro ϕ_b , capa inferior del suelo para el almacenamiento de humedad: $\phi_b = 50,257$
 - Parámetro $\lambda = 0,768$
 - **Modelo ARMA (1,1):** El parámetro más sensible para la calibración fue ρ_1 . Para este modelo autoregresivo los parámetros calculados durante la calibración en la estación El Retiro para el período 2001-2007 fueron:
 - $\rho_1 = 0,61132$
 - $\rho_2 = 0,35238$
 - $\phi = 0,5764$
 - $\theta = -0,05579$
 - **Modelo ARMA (1,1) Salas y Smith:** Los parámetros más sensibles de calibración fueron a y d . Para este modelo autoregresivo, los parámetros encontrados en el proceso de calibración en la estación El Retiro para el período 2001-2007 fueron:
 - $a = 0,0697$
 - $c = 0,9915$
 - $d = 0,1007$
 - $b = 0,7459$

Para los modelos de balance es importante anotar que si bien los parámetros tienen sentido físico, no son únicos, por efectos de la equifinalidad. El análisis gráfico y estadístico fue empleado durante el proceso de calibración. La evaluación de las funciones estadísticas objetivo, consolidadas para el período de calibración 2001-2007, se presentan en la Tabla 5.13, al igual que su interpretación, basados en los criterios establecidos por Moriasi et al, (2007) como muy bueno (MB), bueno (B), satisfactorio (S), no satisfactorio (NS). El promedio de los valores absolutos y la raíz cuadrada del error medio se evalúan según lo establecido por Singh et al. (2004) como apropiados (A) si son menos de la mitad de la desviación estándar de los caudales observados o no apropiados (NA), en caso contrario. Para la evaluación global del modelo se adopta el menor

criterio obtenido. Las mejores evaluaciones se obtuvieron para los modelos TETIS con parámetros de calibración en el Retiro, Thomas y ARMA (1,1) Salas y Smith. Para los modelos Témez, T y P, los valores del promedio de los errores absolutos- MAE- sobrepasan ligeramente la mitad de la desviación estándar de los caudales observados; sin embargo, cumplen con el criterio de RSR, por lo cual la calibración se considera satisfactoria.

Tabla 5.13: Resultados comparativos de calibración modelos hidrológicos escala mensual

Comparación criterios de calibración	Período 2001-2007					
	Qobservado	23,71	m ³ /s	Desvest	14,33	
	Qsimulado	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	23,75	-0,16%	0,89	3,39	1,84	0,34
Modelo Thomas abcd	25,85	-9,0%	0,81	5,40	2,32	0,44
Modelo Témez	22,59	4,7%	0,51	7,69	2,77	0,70
Modelo T	21,43	9,6%	0,55	7,98	2,83	0,67
Modelo P	21,70	8,5%	0,56	7,68	2,77	0,66
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	24,11	-1,7%	0,53	5,39	2,32	0,68
ARMA (1,1) Salas y Smith	27,71	-16,9%	0,67	7,36	2,71	0,58

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	MB	MB	MB	A	A	MB
Modelo Thomas abcd	MB	MB	MB	A	A	MB
Modelo Témez	S	MB	S	NA	A	S
Modelo T	S	MB	S	NA	A	S
Modelo P	S	MB	S	NA	A	S
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	S	MB	S	A	A	S
ARMA (1,1) Salas y Smith	B	S	B	NA	A	B

Proceso de validación de los modelos: fue realizada en la estación el Retiro, con los mismos parámetros obtenidos en el proceso de calibración, durante el período 1987-1993. El modelo TETIS sólo se evalúa con los parámetros de calibración en la estación El Retiro (Tabla 5.1). Los resultados comparativos de los factores objetivo obtenidos en el proceso de validación de los modelos se presentan en la Tabla 5.14. Los mejores resultados se lograron con el modelo TETIS con parámetros de calibración en la estación El Retiro y con el modelo Thomas. En los modelos autorregresivo y el modelo Témez los valores del promedio de los errores absolutos-MAE superan ligeramente la mitad de la desviación estándar de los caudales observados; sin embargo, el error RSR cumple con los criterios, por lo cual se considera que la validación es satisfactoria.

Con los modelos T y P los resultados de la validación son no satisfactorios y no es posible encontrar mejores parámetros para incrementar los valores del NSE y reducir el error RSR.

Tabla 5.14: Resultados comparativos de validación modelos hidrológicos escala mensual

Comparación criterios de calibración	Período 1987-1993					
	Qobservado	22,207	m ³ /s	Desvest	12,78	
	Qsimulado	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	21,12	4,9%	0,69	5,48	2,34	0,56
Modelo Thomas abcd	23,71	-6,8%	0,68	5,90	2,43	0,56
Modelo Témez	21,13	4,9%	0,50	7,51	2,74	0,70
Modelo T	19,26	13,3%	0,31	9,24	3,04	0,83
Modelo P	19,55	11,9%	0,33	8,93	2,99	0,82
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	23,13	-4,15%	0,56	7,16	2,68	0,66
ARMA (1,1) Salas y Smith	25,87	-16,5%	0,59	6,73	2,59	0,64

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	B	MB	B	A	A	B
Modelo Thomas abcd	B	MB	B	A	A	B
Modelo Temez	S	MB	S	NA	A	S
Modelo T	NS	B	NS	NA	A	NS
Modelo P	NS	B	NS	NA	A	NS
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	S	MB	S	NA	A	S
ARMA (1,1) Salas y Smith	S	B	S	NA	A	S

Simulación hidrológica período 1981-2010 Estación El Retiro: La simulación fue realizada en la estación El Retiro, empleando todos los modelos, para efectos de comparación. Debe tenerse en cuenta que con los modelos T y P no se obtuvieron resultados satisfactorios en el proceso de validación. Los resultados de los parámetros estadísticos, para el período de simulación 1981-2010 se consolidan en la Tabla 5.15 y los hidrogramas se presentan en la Figura 5.7. Basados en el análisis gráfico y estadístico, son satisfactorios los resultados obtenidos con los modelos Thomas y ARMA en la versión de Salas & Smith y el modelo TETIS calibrado en la estación El Retiro, para el cual se obtienen los mejores resultados. La simulación con los modelos T y P, Témez y Arma (1,1) no se considera satisfactoria.

Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual – El Retiro 1981-2009

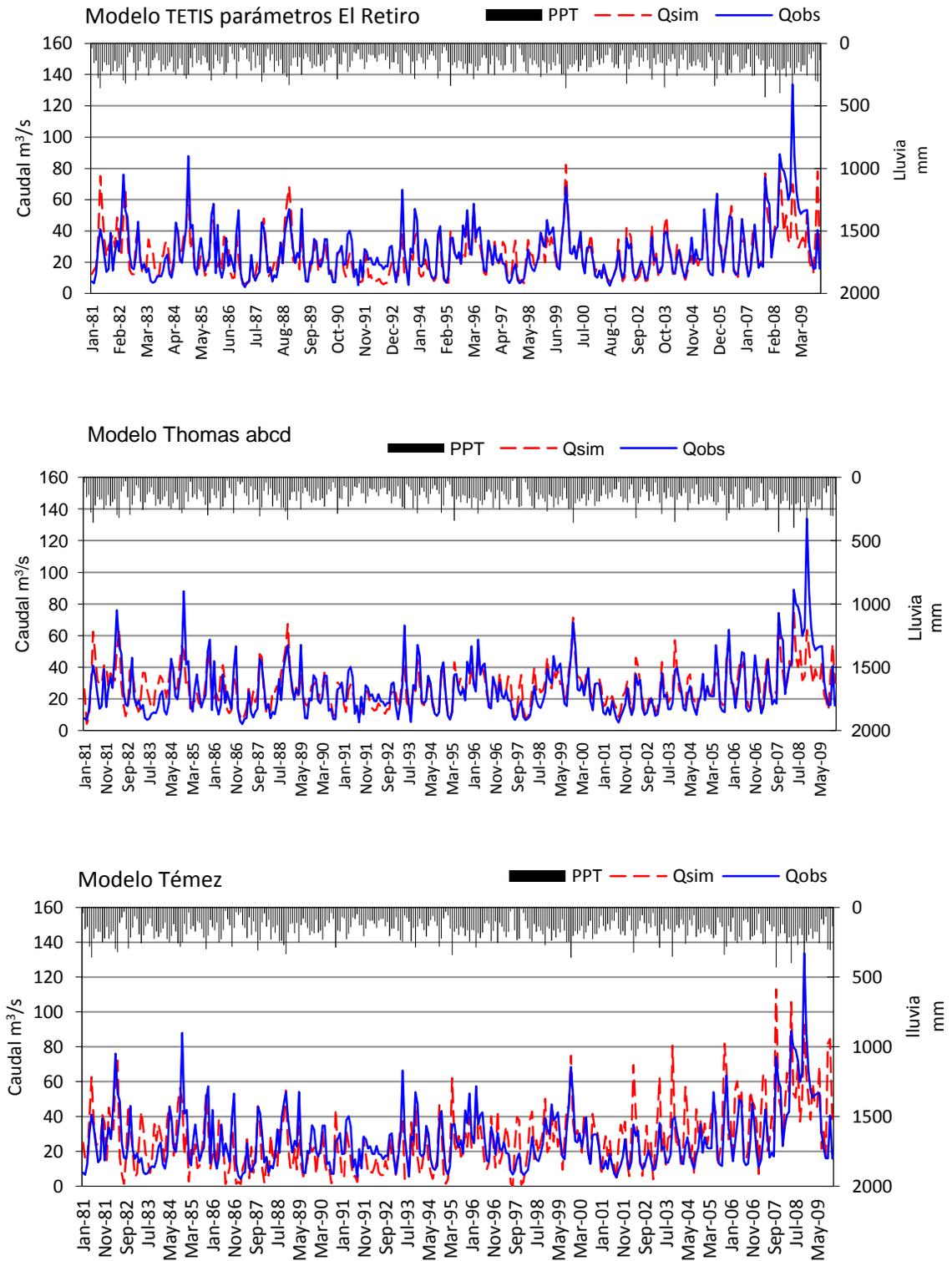


Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual El Retiro 1981-2009

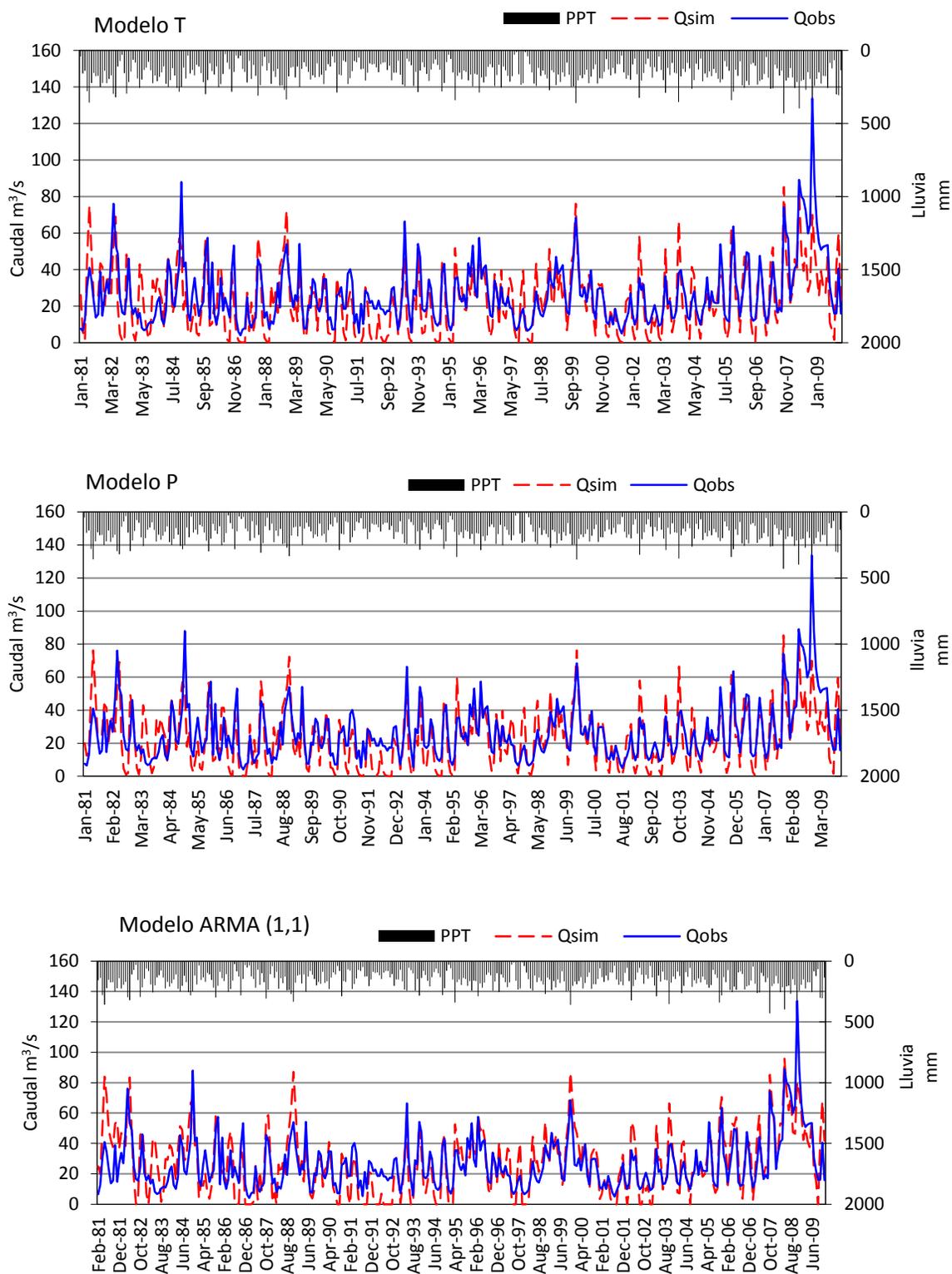


Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual El Retiro 1981-2009

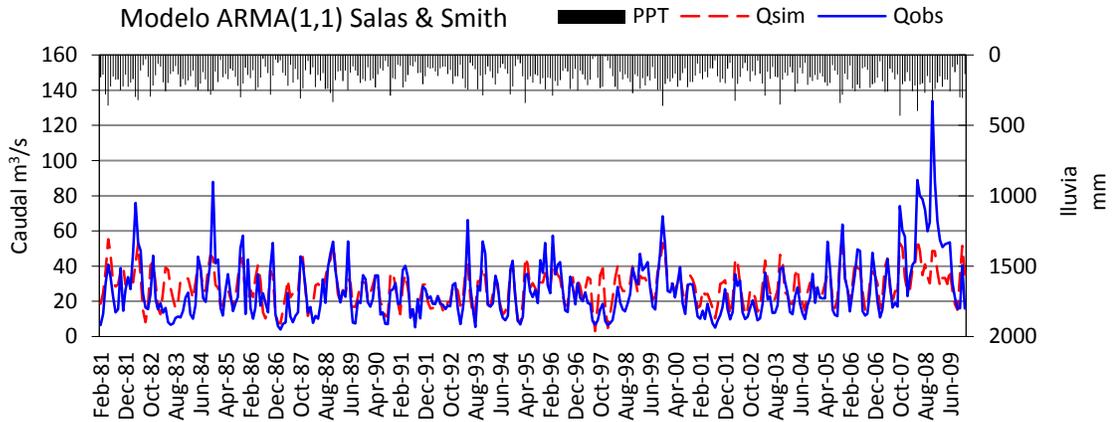


Tabla 5.15: Simulación modelos hidrológicos estación El Retiro 1981-2009

Comparación criterios de validación	Período 1981-2009- Estación El Retiro					
	Qobservado:	26,567	m ³ /s		Desvest	17,11
	Qsimulado	Balance	NASH	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	25,05	5,7%	0,66	6,77	2,60	0,59
Modelo Thomas abcd	27,11	-2,0%	0,62	7,38	2,72	0,61
Modelo Témez	27,28	-2,7%	0,33	10,68	3,27	0,82
Modelo T	22,93	13,7%	0,44	9,97	3,16	0,75
Modelo P	22,76	14,3%	0,43	10,03	3,17	0,76
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	27,61	-3,9%	0,46	9,91	3,15	0,73
ARMA (1,1) Salas y Smith	28,01	-5,4%	0,52	8,40	2,90	0,69

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	B	MB	B	A	A	B
Modelo Thomas abcd	S	MB	S	A	A	S
Modelo Temez	NS	MB	NS	NA	A	NS
Modelo T	NS	B	NS	NA	A	NS
Modelo P	NS	B	NS	NA	A	NS
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1)	NS	MB	NS	NA	A	NS
ARMA (1,1) Salas y Smith	S	MB	S	A	A	A

Simulación hidrológica Estación Chupaderos: La simulación se realiza para los períodos 1988-1997 y 2003-2009 con el modelo TETIS con los parámetros de calibración en la Estación Montevideo (Tabla 5.6) y Sancancio (Tabla 5.10) para efectos de comparación y verificación de las conclusiones obtenidas a escala diaria. Los resultados se presentan en las Tablas 5.16 y 5.17. Para el período 1998-2002, no se ajustan los modelos. El hidrograma de la serie completa 1988-2010 se observa en la Figura 5.8. A escala mensual, se consideran satisfactorios los resultados con los parámetros de calibración en la estación Sancancio (Tabla 5.10), para los períodos indicados.

Tabla 5.16: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 1988-1997

Comparación criterios de validación	Estación Chupaderos					
	Qobservado: 3,91		m ³ /s		Desvest 2,30	
	Qsimulado	Balance	NASH	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	3,61	7,8	0,54	1,0	1,01	0,68
Tetis parámetros calibración Montevideo	3,14	19,7	0,35	1,2	1,11	0,81

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	S	MB	S	A	A	S
Tetis parámetros calibración Montevideo	NS	S	NS	A	A	NS

Tabla 5.17: Simulación modelos hidrológicos estación Chupaderos 2003-2009

Comparación criterios de validación	Estación Chupaderos					
	Qobservado: 4,18		m ³ /s		Desvest 2,32	
	Qsimulado	Balance	NASH	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	4,68	-12,1	0,50	1,2	1,12	0,7
Tetis parámetros calibración Montevideo	4,17	0,2	0,50	1,3	1,14	0,7

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	S	B	S	A	A	S
Tetis parámetros calibración Montevideo	S	MB	S	NA	A	S

Simulación hidrológica Estación Sancancio: La simulación se realiza para el período 1981-2009 con el modelo TETIS con los parámetros de calibración en la Estación Montevideo (Tabla 5.6) y

Sancancio (Tabla 5.10), los resultados de las funciones objetivo se presentan en la Tabla 5.18 y en la Figura 5.9 los hidrogramas. Se consideran satisfactorios las funciones objetivo con los parámetros de calibración en la estación Sancancio (Tabla 5.10).

Figura 5.8: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Chupaderos 1988-2009

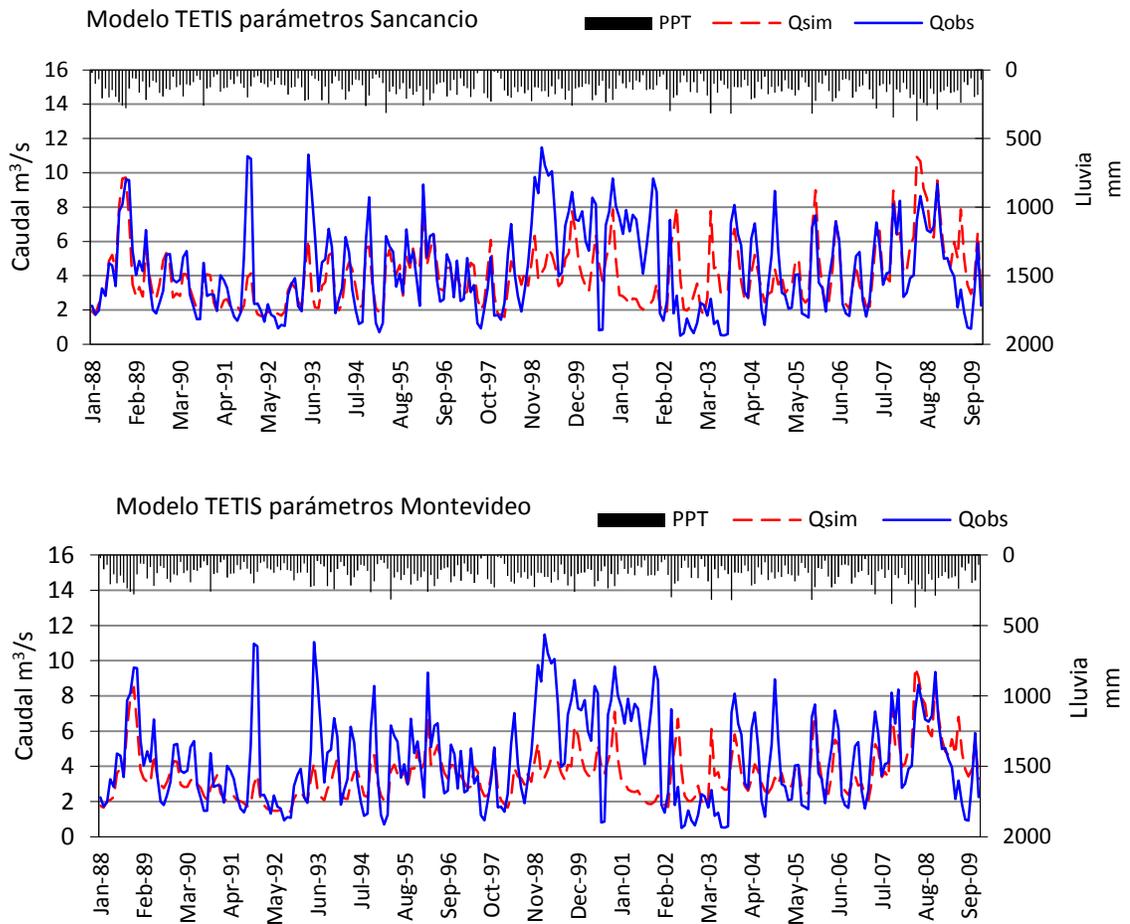


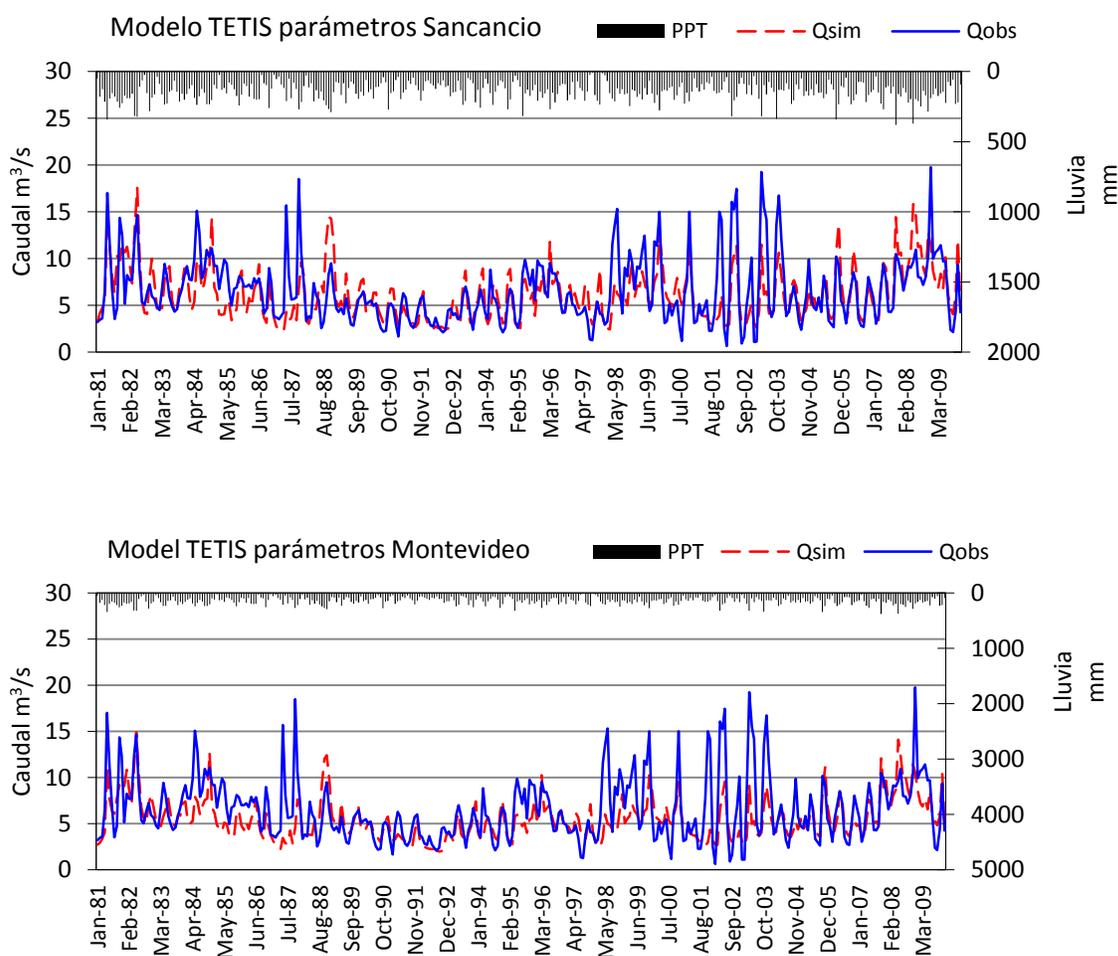
Tabla 5.18: Simulación modelos hidrológicos estación Sancancio 1981-2009

Comparación criterios de validación	Estación Sancancio					
	Qobservado:	6,52	m ³ /s		Desvest	3,5
	Qsimulado	Balance	NASH	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	6,2	4,9	0,50	1,8	1,36	0,7
Tetis parámetros calibración Montevideo	5,5	15,8	0,28	2,0	1,41	0,85

Tabla 5.18: Simulación modelos hidrológicos estación Sancancio 1981-2009

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	S	MB	S	A	A	S
Tetis parámetros calibración Montevideo	NS	S	NS	NA	A	NS

Figura 5.9: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Sancancio 1981-2009



Simulación hidrológica Estación Montevideo: La simulación se realiza para el período 1981-2009 con el modelo TETIS con los parámetros de calibración en la Estación Montevideo (Tabla 5.6) y Sancancio (Tabla 5.10), los hidrogramas se presentan en la Figura 5.10. El modelo se considera satisfactorio para el período 1996-2008, los estadísticos para dicho período se resumen en la Tabla 5.19. los mejores resultados se obtienen con los parámetros de la Tabla 5.10.

Figura 5.10: Simulación modelos hidrológicos escala mensual Estación Montevideo 1981-2009

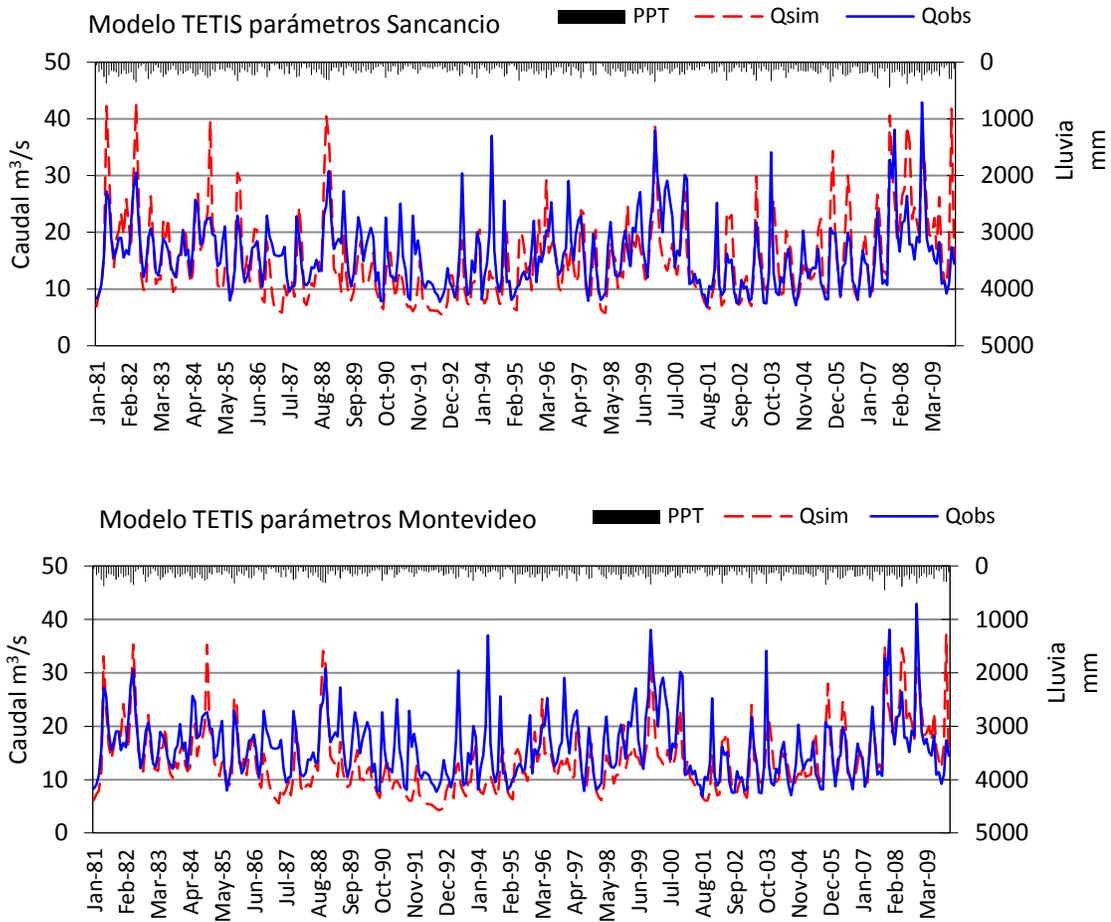


Tabla 5.19: Simulación modelos hidrológicos estación Montevideo 1996-2008

Comparación criterios de validación	Estación Montevideo					
	Qobservado:	16,30 m ³ /s		Desvest	6,96	
	Qsimulado	Balance	NASH	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	16,30	0,50	0,50	3,7	1,94	0,70
Tetis parámetros calibración Montevideo	14,35	12,0	0,50	3,8	1,96	0,70

Comparación criterios de calibración	Interpretación Modelos					
	Global	Balance	NSE	MAE	RSME	RSR
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración Sancancio	S	MB	S	NA	A	S
Tetis parámetros calibración Montevideo	S	B	S	NA	A	S

5.3 Evapotranspiración

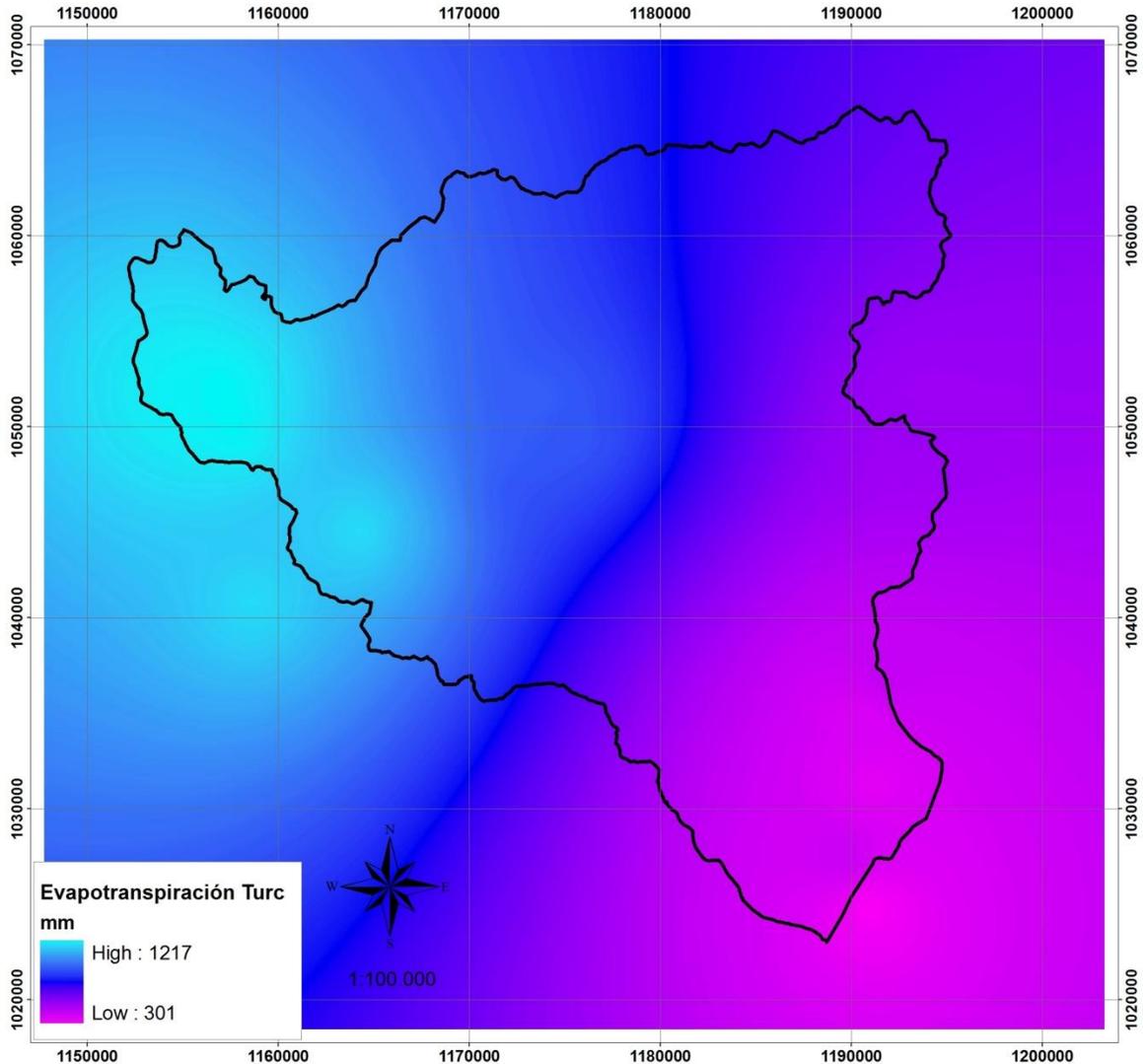
La evapotranspiración es el proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y directamente o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Por tanto, representa el uso consuntivo de agua por los cultivos y es una combinación de la evaporación del agua y la transpiración de la misma (Monsalve, 2008; Ponce, 1989). Está determinada por las características del cultivo, el potencial evaporativo climático y los demás factores que influyen en el crecimiento y el desarrollo de cultivos. Puede ser evapotranspiración potencial (ETP), representada como la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada por evaporación y por transpiración de las plantas, que ocurriría con un adecuado abastecimiento de humedad al suelo; o evapotranspiración real (ETR), es decir con las condiciones del suelo y la atmósfera reales (Ponce, 1989). Para condiciones tropicales usualmente se asume que la ETP = ETR. La evapotranspiración puede ser calculada por balance de agua, balance de energía, transferencia de masa, y métodos de experimentales (Ponce, 1989). La Tabla 5.20 presenta algunos modelos para el cálculo de la evapotranspiración. Los estudios de Poveda (2007) indican que el método de Turc es adecuado para estimaciones en Colombia.

Para la modelación se requiere la ETP, se adoptó el cálculo por el método de Thornwaite, dado la posibilidad de ingresar la información tanto de radiación solar incidente como de temperatura a escala diaria, para la modelación en TETIS. La evapotranspiración real la calcula el modelo TETIS por el balance hídrico y representa las salidas del Tanque 1- almacenamiento estático (Francés et. al; 2007).

Tabla 5.20: Modelos para el cálculo de la Evapotranspiración

No Ec	Método	Ecuación	Unidades
5.1	Thornwaite	$ET_j = \left(\frac{10 t_j}{I} \right)^a \times 1,6$ $I = \sum_{i=1}^{12} i_j$ $i_j = \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1,514}$	<p>ET_j: Evaporación potencial mensual del mes j, no ajustada. cm (Los valores deben ser ajustados según la latitud, la longitud del día y el número de días en el mes)</p> <p>t_j: Temperatura media mensual del mes j, °C</p> <p>I: Índice de calor</p>
5.2	Turc	$\bar{E} = \frac{\bar{P}}{\left(0,9 + \frac{\bar{P}^2}{[L(t)]^2} \right)^{0,5}}$ $L(t) = 300 + 25t + 0,05t^2$	<p>\bar{E}: Evapotranspiración media anual (mm)</p> <p>\bar{P}: Precipitación media anual (mm)</p> <p>T: Temperatura media anual (°C)</p>

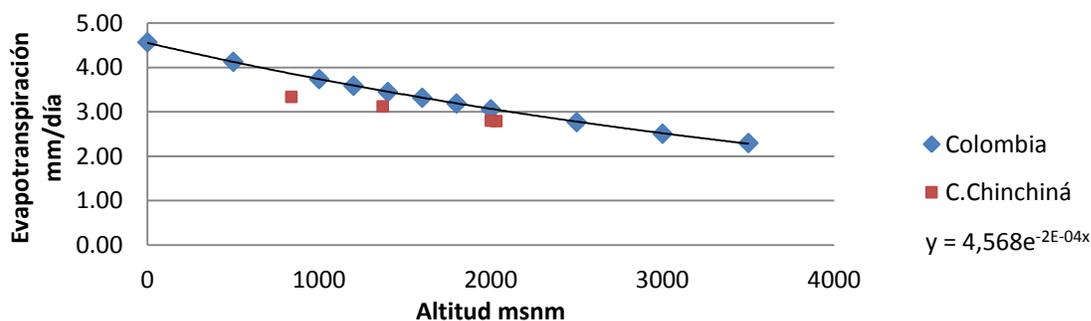
La evapotranspiración media anual en la cuenca fue calculada con el método de Turc usando las herramientas SIG, los resultados se visualizan en la Figura 5.11; fluctúa entre 1217 mm en la cuenca baja hasta 300 mm en la zona de páramo. Evaluando la cuenca media y baja, los resultados son consistentes con los reportados por Jaramillo (2006) para la zona cafetera, 1050 a 1300 mm.

Figura 5.11: Mapa de Evapotranspiración real anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010

Para la zona Andina Colombiana bajo condiciones climáticas de las cuencas del río Cauca y Magdalena (1975-1989), la ETP de referencia varía con la altitud como se muestra en la Figura 5.12 (Jaramillo, 2006); modelo obtenido a partir del método de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Para las estaciones de la cuenca del río Chinchiná, se observa este comportamiento, con valores 13% menores en promedio que los estimados con la ecuación de CENICAFE.

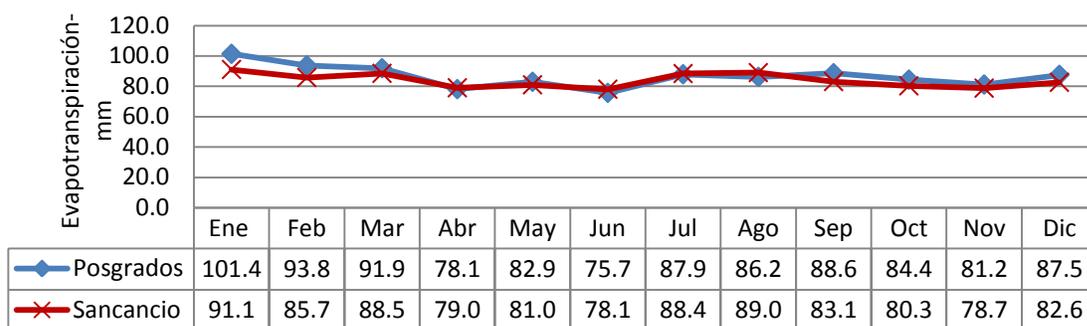
La estación Posgrados cercana a Sancancio, cuenta con registros de evapotranspiración para el período 2002-2010; la Figura 5.13 compara los valores promedio mensual obtenidos en Sancancio con los reportados en Posgrados para el mismo período. Se observa concordancia entre los valores.

Figura 5.12: Comparación Evapotranspiración cuenca del río Chinchiná modelo Cenicafé



Adaptada: (Jaramillo, 2005)

Figura 5.13: Comparación evapotranspiración Posgrados vs estimada en Sancancio 2002-2010



El promedio mensual multianual para el cálculo del balance hídrico lluvia- evapotranspiración potencial se muestra en la Figura 5.14, para cada una de las estaciones de la cuenca. La lluvia promedio se calcula a partir de los polígonos de Thiessen y la evapotranspiración potencial por el método de Thornwaite. Los meses con mayor exceso hídrico son abril-mayo y octubre-noviembre, mientras que el stress hídrico se presenta en los meses de Enero-Febrero y Julio-Agosto. El mayor nivel pluviométrico se tiene en las cuencas media y baja.

Para el período 1981-2010, los valores promedio anuales de la evapotranspiración potencial empleando el método de Thornwaite y de la evapotranspiración real, obtenida por la modelación hidrológica en TETIS (1981-2010) para la estación el Retiro (parámetros Tabla 5.1) y para las estaciones Chupaderos, Montevideo y Sancancio (parámetros Tabla 5.10) se presentan en la Figura 5.15, para cada una de las subcuencas: cuenca Alta (Chupaderos), media-alta (Sancancio), media (Montevideo) y baja (El Retiro). La evapotranspiración potencial promedio oscila entre 1021 a 1141 mm. Los niveles de confianza para la media de la ETP son 19.3, 15.5, 14.8 y 15.4 mm para las estaciones Chupaderos, Sancancio, Montevideo y El Retiro, respectivamente. Mientras que la ETR calculada con por el balance hidrológico fluctúa entre 813 a 907 mm, con niveles de confianza de 10.44, 9.44, 10.93 y 8.00 para Chupaderos, Sancancio, Montevideo y El Retiro, respectivamente. En la Figura 5.15 se incluye el cálculo de la ETR empleando la ecuación de Turc, en promedio es 17% menor que la calculada por balance hídrico.

Figura 5.14: Balance hídrico Lluvia- Evapotranspiración 1981-2010

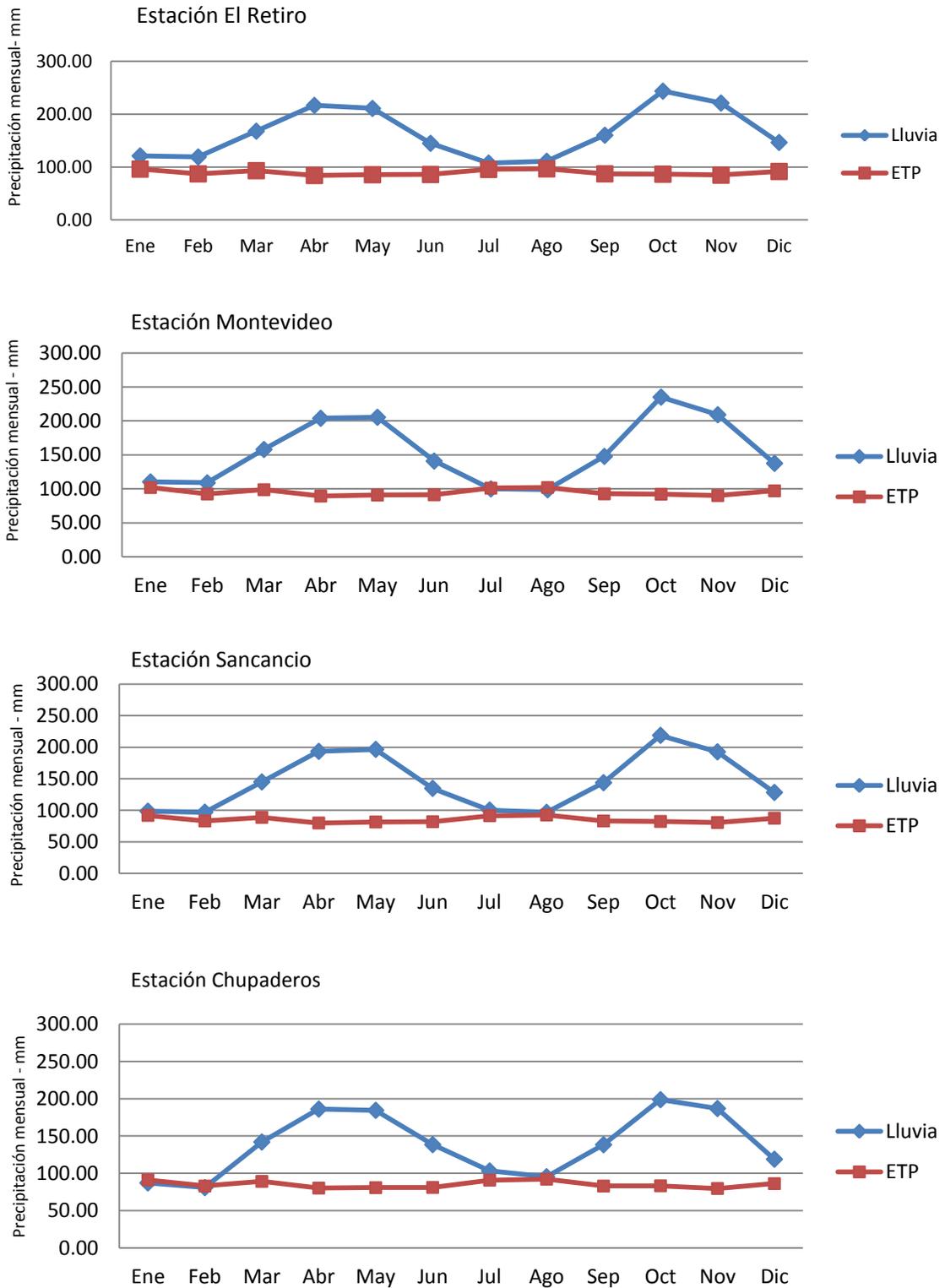
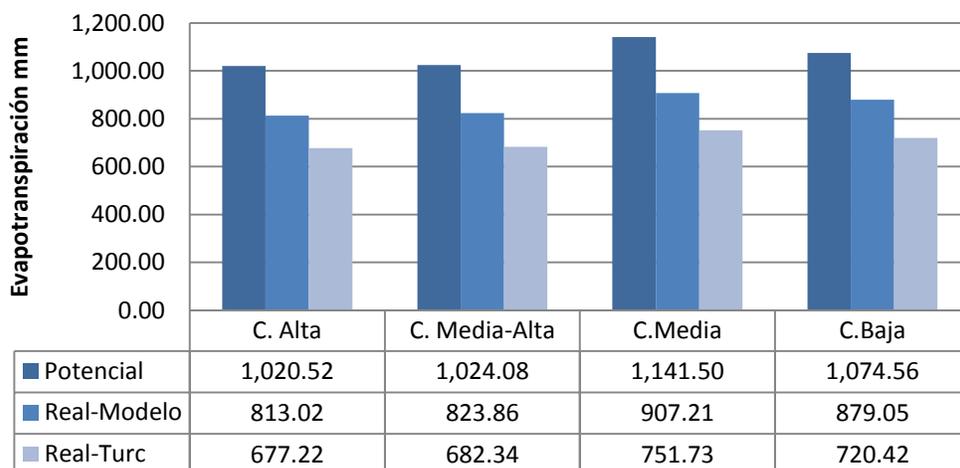


Figura 5.15: Evapotranspiración promedio anual 1981-2010

5.4 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial comprende el exceso de precipitación que ocurre después de la lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno y la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas (Monsalve, 2008). La escorrentía tiene características tridimensionales, pero se concentra a la salida de la cuenca (Ponce, 1989). Entre las variables que la caracterización se encuentran el caudal, el coeficiente de escorrentía superficial, el tiempo de concentración, el período de retorno y el nivel de agua. En el programa TETIS, la escorrentía superficial corresponde a la salida del Tanque 2- Almacenamiento superficial (Francés et. al; 2007).

En la cuenca del río Chinchiná, la literatura reporta rendimientos hídricos, representados por el caudal específico de escorrentía de 29.35 L/s/km², lo cual corresponde al 50% del promedio para Colombia (58 L/s/km²), pero superior al promedio de Suramérica (21 L/s/km²) y al mundial (10 L/s/km²). En los sectores cercanos al municipio de Chinchiná, las quebrada Tolda Fría y Las Palomas se encuentran núcleos de máximos rendimiento, 41-50 L/s km². (FOREC et al., 2000; CORPOCALDAS, 2005; Jaramillo, 2005).

El comportamiento del régimen hidrológico para el período más reciente (1981-2009) se presentan en la Tabla 5.21, los caudales medios son calculados por el caudal promedio de la serie (Q_{promedio}); por la curva de duración de caudales diarios como el caudal que es superado el 50% de las veces (Q_{P50}) y por la ecuación 5.3 (Q_{integral}). El coeficiente de variación (CV) es alto y oscila entre el 56 al 93% para los caudales observados. Se incluyen los valores de las series observadas al igual que los obtenidos por modelación hidrológica.

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \int Q_j dt \quad \text{Ec (5.3)}$$

Donde:

\bar{Q} : es el caudal medio en m³/s

Q_j : es la distribución del caudal en el período de observaciones en m^3/s

Tabla 5.21: Caudales medios 1981-2009

Subcuenca (Estación)	Caudal Modelación hidrológica m^3/s				Caudal Observado m^3/s				
	Q_{P50}	$Q_{promedio}$	Nivel confianza 95% media	$Q_{integral}$	Q_{P50}	$Q_{promedio}$	Nivel confianza 95% media	CV	$Q_{integral}$
Alta (Chupaderos)	3,41	4,02	0,05	5,00	3,40	4,37	0,08	79%	5,44
Media-Alta (Sancancio)	5,30	6,20	0,06	5,85	5,47	6,52	0,08	69%	6,16
Media (Montevideo)	12,89	15,36	0,17	14,50	13,93	15,98	0,17	56%	15,08
Baja (El Retiro)	18,75	25,06	0,36	23,65	18,20	26,59	0,47	93%	25,09

El rendimiento hídrico en cada una de las subcuencas se presenta en la Tabla 5.22, se incluye el cálculo con los diferentes caudales medios presentados en la Tabla 5.21. El rendimiento hídrico para la cuenca calculado con los caudales observados promedio es $25,2 L/s/km^2$, menor en 14% al valor reportado por la literatura $29,35 L/s/km^2$

Tabla 5.22: Rendimiento hídrico

Subcuenca	Rendimiento hídrico- $L/s/km^2$					
	Modelación hidrológica			Caudal observado		
	Q_{P50}	$Q_{promedio}$	$Q_{integral}$	Q_{P50}	$Q_{promedio}$	$Q_{integral}$
Alta	22.7	26.8	33.3	22.7	29.1	36.3
Media-Alta	24.9	29.1	27.5	25.7	30.6	28.9
Media	25.2	30.0	28.3	27.2	31.2	29.4
Baja	17.8	23.8	22.4	17.3	25.2	23.8

La variación de los caudales medios con el área de la cuenca se esquematiza en la Figura 5.16 tanto para los caudales observados como simulados. Se observa una relación logarítmica en las dos gráficas. La tendencia de los caudales máximos, medios y mínimos observados con el área de la cuenca se representan en la Figura 5.17, se observan tendencias lineales con los caudales máximos y logarítmicas con los caudales medios y mínimos.

Figura 5.16: Variación de caudales medios con el área de la cuenca

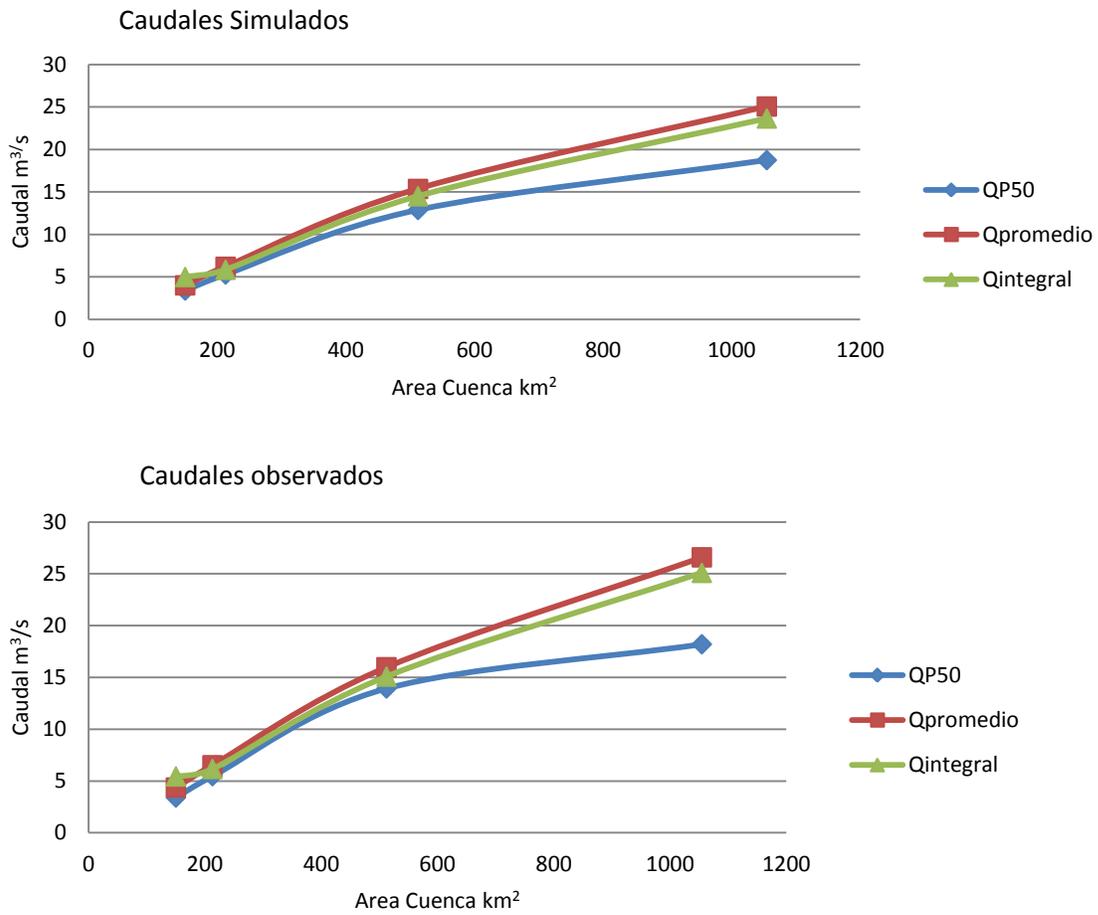


Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca

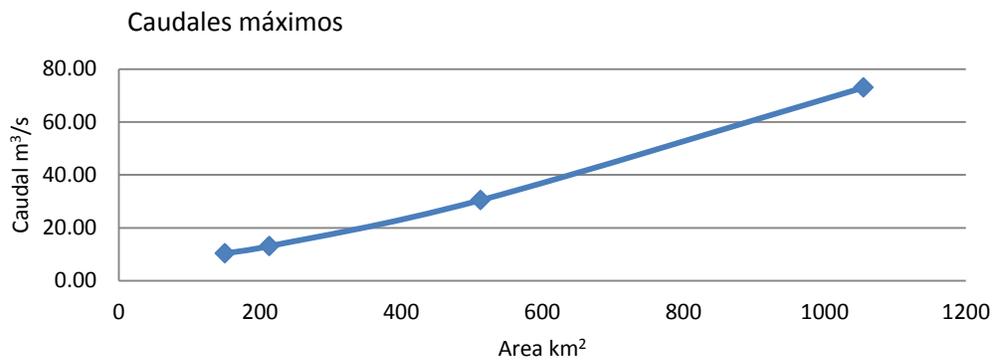
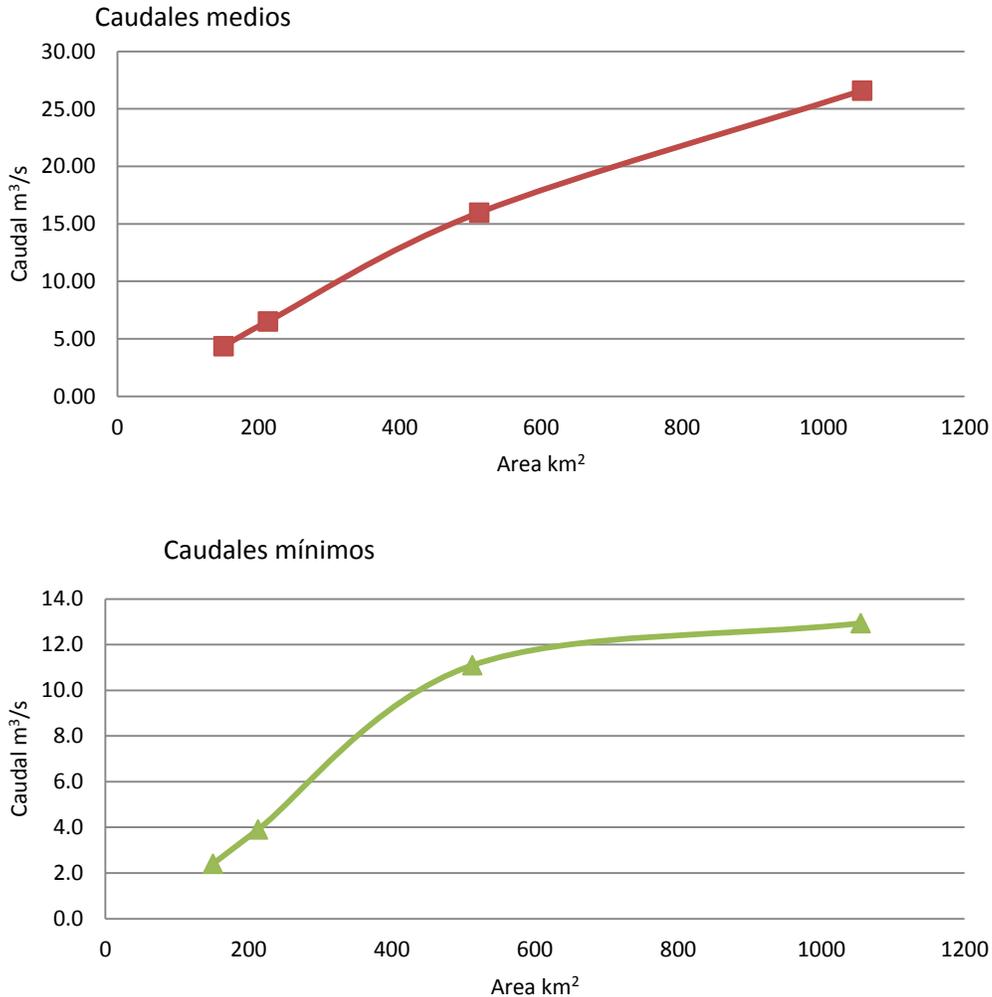


Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca

A escala mensual, el comportamiento de los caudales promedio multianual para el período 1981-2009, tomando como base los caudales observados, se presenta en la Figura 5.18. Con respecto al promedio, el incremento del caudal promedio, en la primera temporada de lluvia, - mayo- es del 30% en la cuenca alta, 42% en la media-alta, 29% en la media y 40% en la baja; mientras que para la segunda temporada-octubre- el aumento alcanza el 50%, 39%, 30% y 64%, respectivamente. Para el período seco-agosto- la reducción del caudal en promedio es del 95% en la cuenca alta, 68% en la media alta, 43% en la media y 73% en la baja. Por tanto, los efectos de las temporadas invernales y secas son más intensos en las cuencas alta y baja.

En unidades de escorrentía superficial-mm-, los valores promedio mensuales multianuales se presentan en la Figura 5.19. En promedio son de 74, 80, 83 y 65 mm para las cuencas alta, media-alta, media y baja, respectivamente. Los valores más bajos se presentan en agosto con 38 mm en las cuencas alta y baja y los más altos en mayo con 113 mm en la cuenca media-alta, en promedio.

Figura 5.18: Caudales promedio mensual

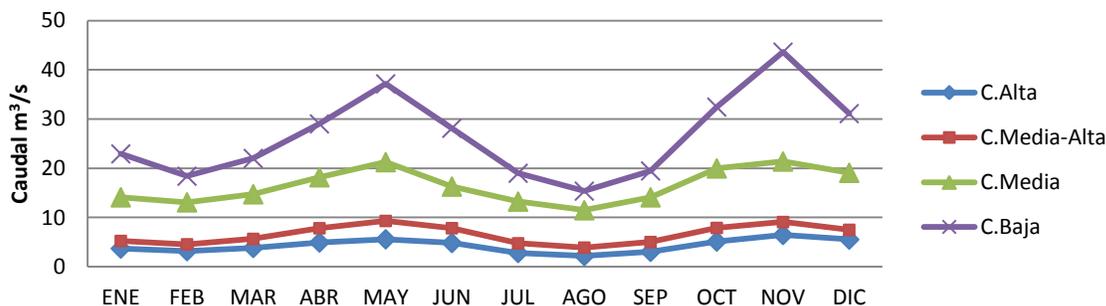
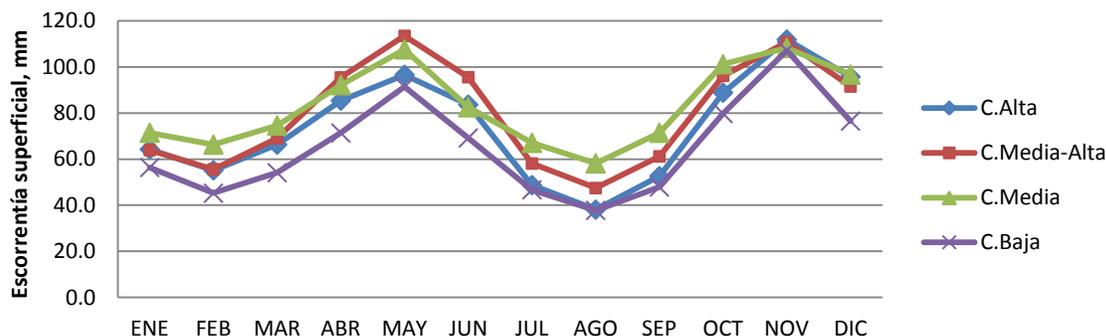
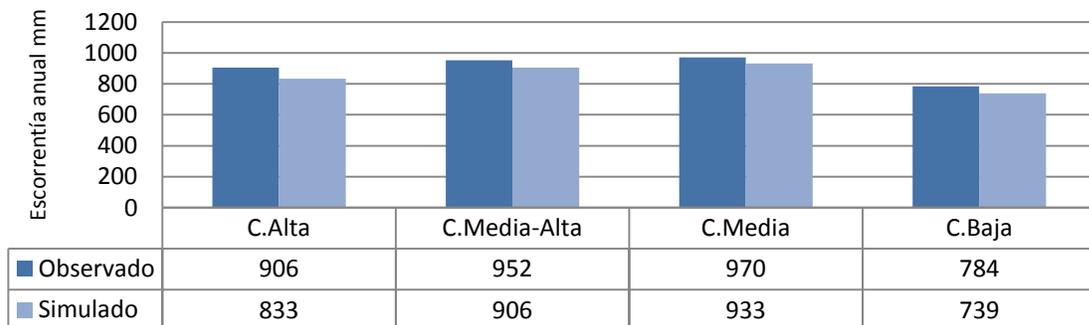


Figura 5.19: Escorrentía superficial promedio mensual



La distribución de la escorrentía promedio anual se observa en la Figura 5.20, se reportan tanto los valores obtenidos por modelación hidrológica como los calculados a partir de los caudales observados.

Figura 5.20: Escorrentía superficial promedio anual



La lluvia neta es del 48% en promedio, en la cuenca, con valores de 50% en la cuenca alta, 54% en la media-alta, 50% en la media y 38% en la baja. Estos valores son consistentes con Jaramillo (2005) quien reporta valores medios para agroecosistemas de café de 48% en promedio.

6. Señales de cambio climático

El análisis de las variables climatológicas: brillo solar, humedad relativa; temperaturas medias, máximas y mínimas, se realizó a partir de los registros de las estaciones provenientes de CENICAFE: Agronomía (1956-2010), Cenicafé (1950-2010), Granja Lúker (1972-2010), y Santágueda (1965-2010). Fueron considerados los registros de la estación Posgrados (2002-2010) para completar las series de Agronomía (año 2006 y los meses faltantes correspondientes a los años 2007, 2008 y 2009); estación Naranjal (1956-2010) para la interpolación de las variables y espacialización de la información; estación letras (2002-2010) y de las estaciones de páramo (2003-2010, registros incompletos): El Cisne, Molinos, Nereidas, Las Brisas.

El análisis de las series históricas fue realizado en diferentes escalas temporales (diaria, mensual y anual) para evaluar la variabilidad multianual e interdecadal de las series. Para encontrar las señales del cambio climático fueron analizados períodos de 30 años (tridecadales); con los cuales se calcularon las anomalías promedio. El análisis de varianza permitió establecer si las diferencias eran estadísticamente significativas ($\alpha = 0,05$), se aplicaron pruebas paramétricas- ANOVA- previa verificación de los supuestos de homocedasticidad y normalidad, en caso contrario pruebas no paramétricas.

6.1 Brillo solar

Las series diarias de brillo solar, en ninguna de las estaciones evaluadas, se ajustan a distribución Normal (K.S. $\text{sig} < 0,05$); tienen un alto coeficiente de variación que fluctúa entre el 48 al 75%. A escala mensual, sólo siguen distribución Normal (K.S. $\text{sig} > 0,05$) los registros de brillo solar de la estación Granja Lúker; el coeficiente de variación disminuye con valores entre 16 al 25%. Las series anuales se distribuyen normalmente (Shapiro Wilk-S.W- $\text{sig} > 0,05$) y son homocedásticas por décadas y períodos de tres décadas (e. Levene); el coeficiente de variación es relativamente bajo entre 5 al 14%.

El análisis del brillo solar diario interdecadal se presenta en la Figura 6.1; se observa reducción hasta la década del 90 y luego, un cambio en la tendencia en la última década. Para evaluar si las

diferencias son significativas ($\alpha = 0,05$), se analizan las series diarias por décadas, aplicando la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, obteniéndose diferencias en por lo menos dos décadas, para todas las estaciones; iguales resultados arroja el análisis de las series mensuales.

Para los períodos tridecadales, las distribuciones de brillo solar diario promedio se presentan en la Figura 6.2, siguen comportamiento bimodal, con máximos en los meses secos y mínimos en la temporada invernal; puede observarse las diferencias entre los períodos, especialmente en las estaciones Agronomía y Cenicafé. El análisis de varianza para las series diarias por períodos de tres décadas se efectúa por pruebas no paramétricas, se encuentran diferencias significativas ($\alpha = 0,05$), en las estaciones Agronomía, Cenicafe, Granja Lúker, pero no en Santágueda. Los mismos resultados se obtienen del análisis de las series mensuales.

Figura 6.1: Análisis interdecadal brillo solar diario promedio

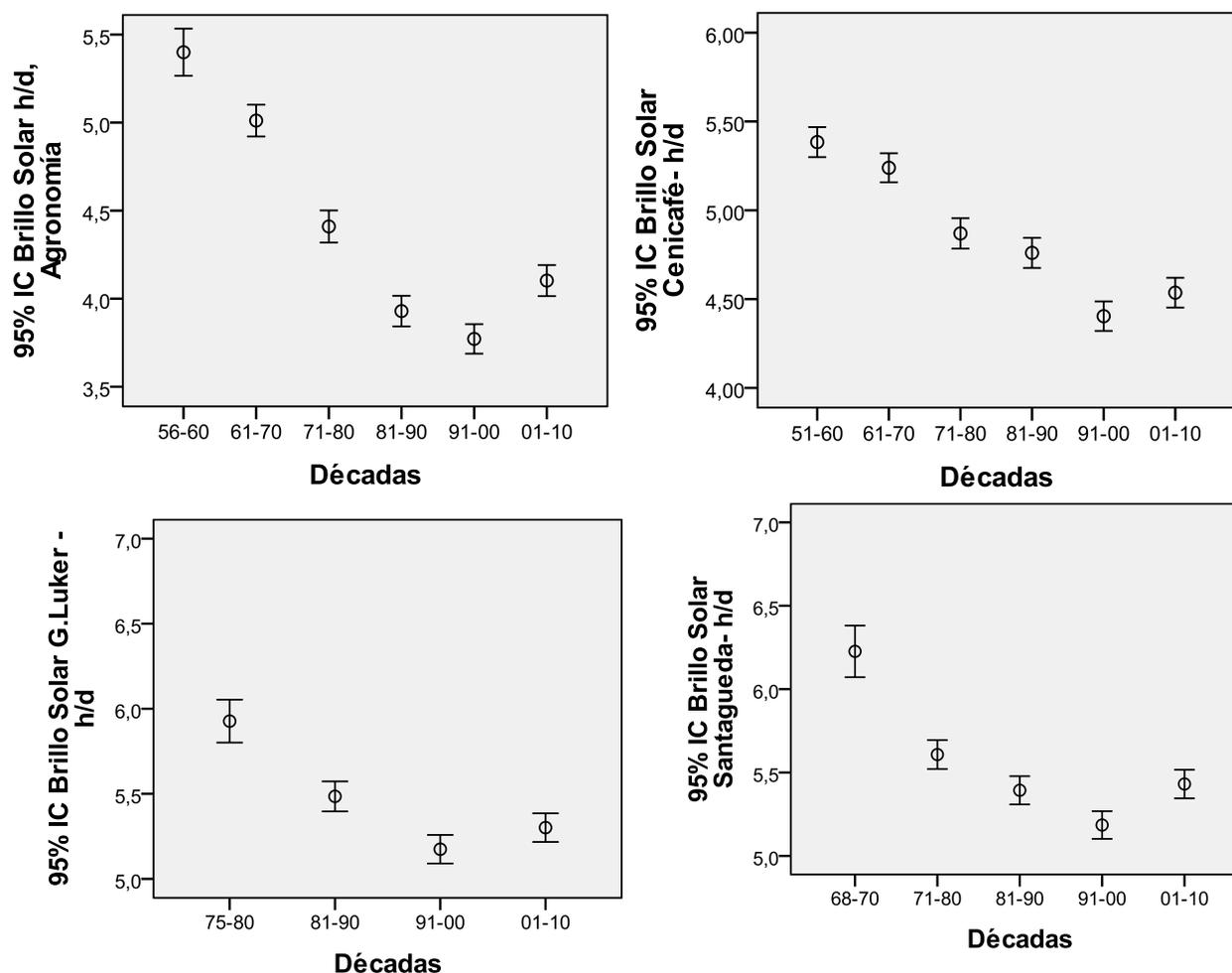
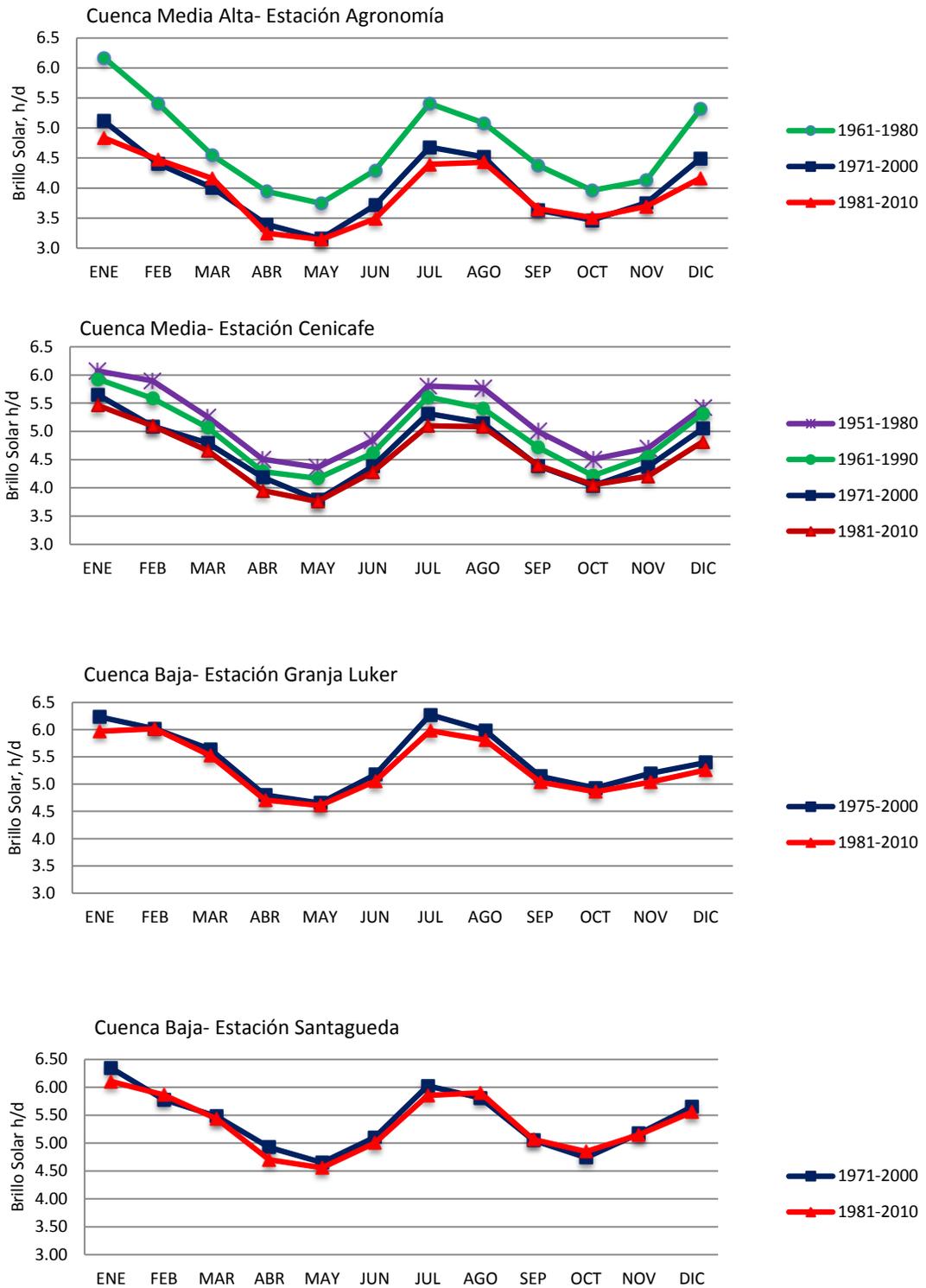


Figura 6.2: Distribución de brillo solar diario promedio tridecadal



Las series de brillo solar promedio anual interdecadal son homocedásticas (prueba Levene), en cada una de las estaciones evaluadas. Con el análisis de varianza, ANOVA, se obtienen diferencias estadísticas entre las décadas -con una significancia del 95% ($\alpha < 0,05$)- en Agronomía, Cenicafe y Granja Lúker; para Santágueda, se encuentran diferencias estadísticas, con una significancia del 94% ($\alpha < 0,06$). La prueba post hoc de Duncan revela diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) en las tres últimas décadas para todas las estaciones.

El análisis de varianza de las series tri-decadales de brillo solar anual promedio (series homocedásticas) indica diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$), para las estaciones de Agronomía, Cenicafe y Granja Lúker; no hay diferencias estadísticas significativas en la estación Santágueda. Aplicando prueba post-hoc de Duncan se confirman las diferencias en el promedio de brillo solar anual del período más reciente 1981-2010, frente al registrado en 1951-1980 en la estación Cenicafé; de igual manera hay diferencias con el período 1961-1990 para las estaciones Agronomía y Cenicafé; sin embargo, no se obtienen diferencias estadísticas significativas con el registro 1971-2000, en ninguna de las estaciones evaluadas.

Tomando como base períodos de tres décadas, se calculan los cambios del brillo solar anual promedio del período actual, 1981-2010 en comparación con los períodos históricos, los resultados se consolidan en la Tabla 6.1. El resumen de anomalías en el brillo solar se presenta en la Tabla 6.2, fueron calculadas frente al período histórico inmediatamente anterior. Se evidencia reducción en el brillo solar anual promedio; el cual, expresado en términos de Brillo Solar Máximo (BSM) alcanza el 6,7% en la cuenca medio alta y 3,9% en la cuenca media, donde se presentan las mayores anomalías.

Tabla 6.1: Anomalías en el brillo solar anual promedio 1981-2010

Estación	Reducción Brillo Solar anual promedio % 1981-2000 frente registros históricos			Reducción equivalente en términos % BSM		
	1951-1980 (1956-1980)	1961-1990	1971-2000	1951-1980 (1956-1980)	1961-1990	1971-2000
Agronomía	-18,9*	-11,6*	-2,5	-7,6	-4,3	-0,9
Cenicafé	-11,2*	-7,9*	-2,4	-4,8	-3,2	-0,9
Granja Lúker	ND	ND	-2,6	ND	ND	-1,2
Santágueda	ND	ND	-1,0	ND	ND	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

Tabla 6.2: Anomalías promedio en el brillo solar anual

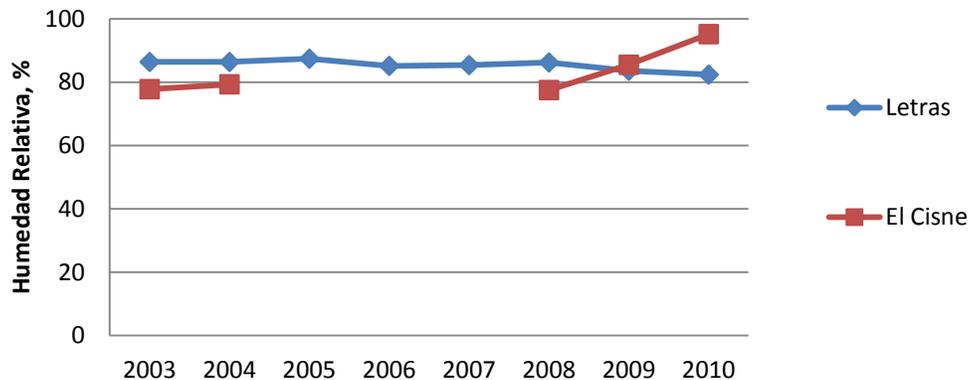
Estación	Reducción Brillo Solar anual promedio %			Reducción, equivalente en términos %BSM		
	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1961-1990	1971-2000	1981-2010
Agronomía	-8,2*	-9,3*	-2,5	-3,3	-3,4	-0,9
Cenicafé	-3,7	-5,6*	-2,4	-1,6	-2,3	-0,9
Granja Lúker	ND	ND	-2,6	ND	ND	-1,2
Santágueda	ND	ND	-1,0	ND	ND	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

6.2 Humedad Relativa

Las estaciones ubicadas en la cuenca alta, El Cisne y Letras, registran humedades relativas promedio diarias altas, como se observa en la Figura 6.3. Para la estación de páramo, durante el año 2010, se alcanzaron valores promedio superiores al 95% en todos los meses del año, con excepción de enero y febrero. En Letras, la humedad relativa promedio diaria es alta y relativamente constante durante todo el año. Sin embargo, los registros son cortos para estimar alguna tendencia.

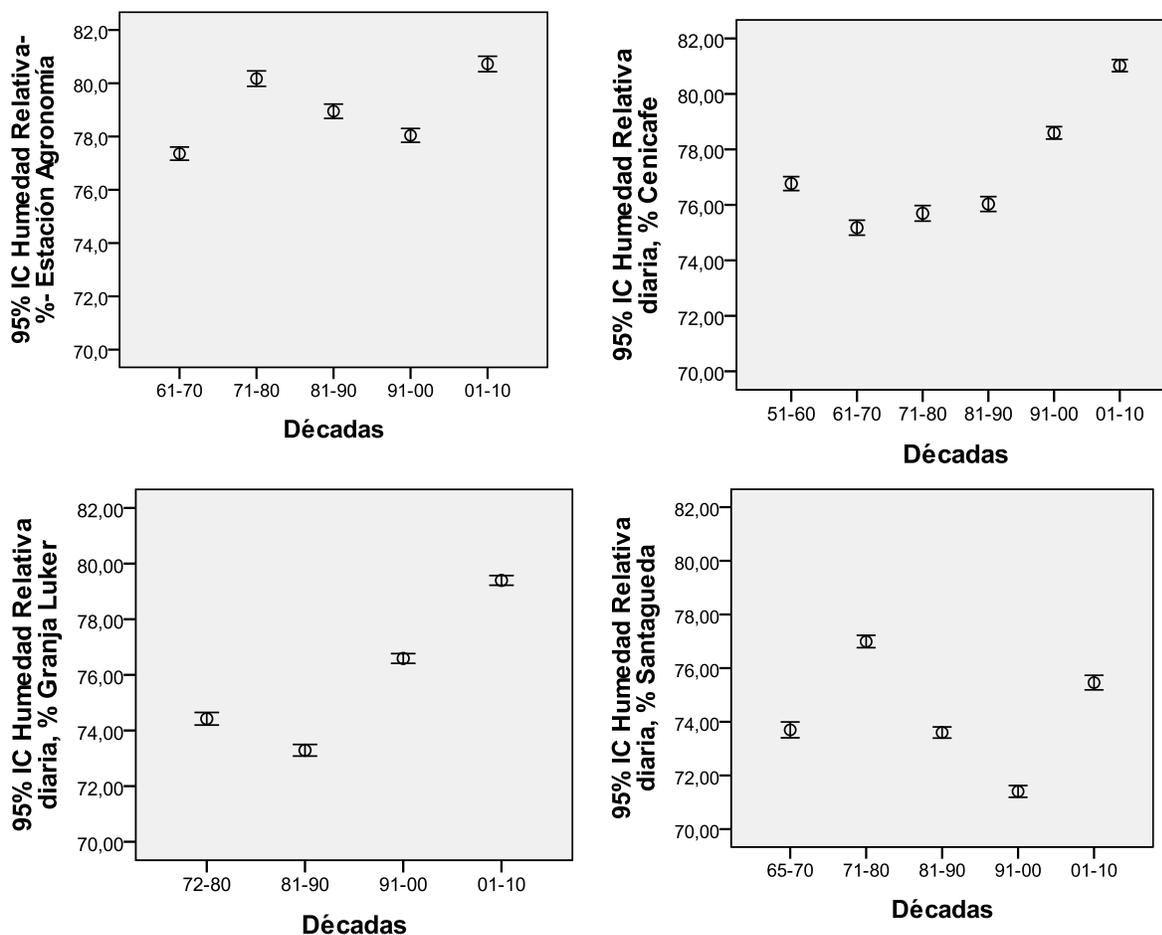
Figura 6.3: Comportamiento de la humedad relativa media estaciones El Cisne y Letras



En las estaciones de la cuenca media-alta a baja, las series diarias de humedad relativa no se ajustan a distribución Normal (K.S. sig<0,05); los coeficientes de variación son bajos y oscilan entre el 8 al 12%. El análisis Interdecadal de la humedad relativa promedio se presenta en la Figura 6.4; se observa aumento en las últimas décadas, en especial en las estaciones de la cuenca media. Aplicando el test no paramétrico de Kruskal Wallis se encuentran diferencias estadísticas significativas ($\alpha<0,05$). La prueba U de Mann Whitney indica que hay diferencias significativas ($\alpha<0,05$) entre la humedad relativa de la última década, 2001-2010 y las anteriores.

La distribución de la humedad relativa diaria promedio tridecadal se observa en la Figura 6.5; el comportamiento es bimodal con mayores valores en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. No se aprecian diferencias sustanciales entre los períodos en las estaciones Agronomía y Santágueda. Sin embargo, si se analizan las series a escala diaria, la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis arroja diferencias significativas ($\alpha<0,05$) en por lo menos dos de los períodos en las estaciones Agronomía, Cenicafé y Santágueda; el test de Mann-Whitney indica iguales resultados en la estación Granja Lúker. Aplicando este último test se encuentran diferencias en la humedad relativa diaria del período más reciente-1981-2010- con los anteriores, para las estaciones Cenicafé y Granja Lúker; mientras que en Agronomía se tienen diferencias significativas de la humedad relativa del período actual (1981-2010) frente a 1961-1990, pero no con 1971-2000.

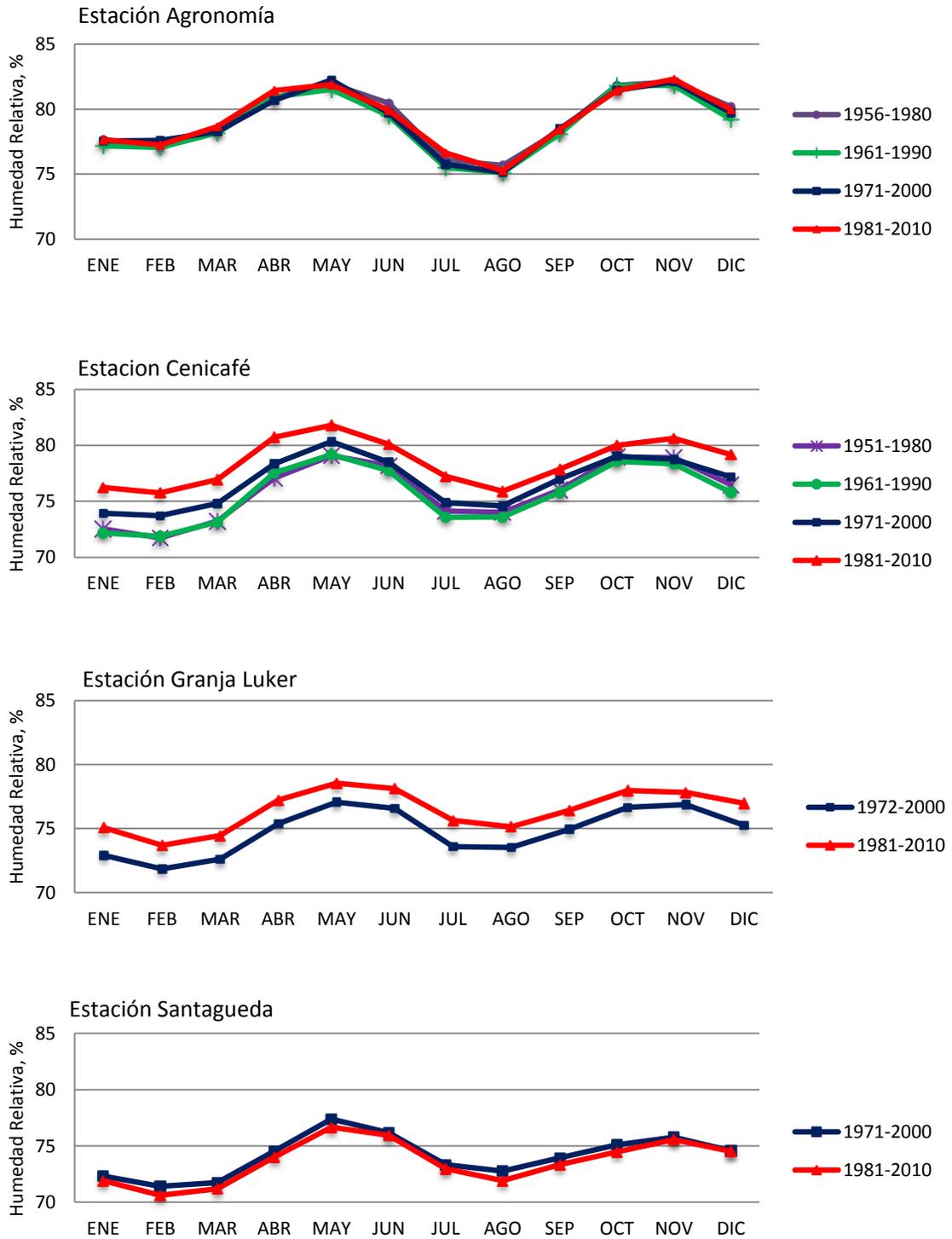
Figura 6.4: Humedad relativa promedio interdecadal



Las series de humedad relativa promedio anual se ajustan a distribución normal (S.W. sig>0,05) y son homocedásticas (e. Levene). El análisis de varianza indica que hay diferencias estadísticas significativas ($\alpha<0,05$) en al menos dos de los periodos interdecadales para todas las estaciones. La prueba post-hoc de Duncan refleja que hay diferencias ($\alpha<0,05$) en la humedad relativa promedio anual de la década más reciente (2001-2010) con los promedios de las décadas anteriores en las estaciones Cenicafé y Granja Lúker.

Para los períodos tridecadales, el análisis de varianza y la prueba post hoc de Duncan muestran que no hay diferencias estadísticas significativas ($\alpha<0,05$) entre los períodos en la estación Agronomía. Para la estación Cenicafé se encuentran diferencias estadísticas significativas ($\alpha<0,05$) entre la humedad relativa del período actual 1981-2010, con respecto a los anteriores. La prueba t-student lleva a iguales resultados para la estación Granja Lúker. Sin embargo, no se obtienen diferencias estadísticas significativas en la estación Santagueda.

Figura 6.5: Distribución de humedad relativa promedio tridecadal



Tomando como base el promedio multianual por períodos de 30 años, se calculan las anomalías de la humedad relativa del período actual, 1981-2010 en comparación con los históricos, los resultados se resumen en la Tabla 6.3. La anomalía media se presenta en la Tabla 6.4; se calcula a partir del promedio de las anomalías para cada uno de los períodos tri-decadales, con respecto al período inmediatamente anterior; se evidencia por tanto un incremento promedio de la humedad relativa en 1,5% por década (unidades de Humedad relativa) en las estaciones de la cuenca media.

Tabla 6.3: Cambios en la humedad relativa

Estación	Anomalía en % humedad relativa 1981-2000 frente registros históricos		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	ND	0,4	0,2
Cenicafé	2,7*	2,9*	1,8*
Granja Lúker	ND	ND	1,6*
Santágueda	ND	-1,5	-0,5

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

Tabla 6.4: Anomalías en el humedad relativa promedio

Estación	Anomalía promedio	Anomalía %HR	
	%HR	1971-2000	1981-2000
Cenicafé	1,5	1,1*	1,8*
Granja Lúker	1,6	ND	1,6*

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

6.3 Radiación solar

La estación el Cisne sólo se dispone de registros de radiación solar desde el año 2003; sin embargo, los registros son incompletos, por lo cual sólo pueden analizarse algunos años, como se observa en la Figura 6.6. El promedio multianual es de 2,7 kW-h/m²; los valores máximos mensuales promedio son 5,2 kW-h/m² y mínimos 1,41 kW-h/m². En la estación Letras, la radiación solar promedio calculada para el período 2003-2010, es 3,86 kW-h/m² (Figura 6.5) Los registros son muy cortos para estimar alguna tendencia.

Para las estaciones Agronomía, Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda, se realizó el cálculo de los promedios multianuales de la radiación solar estimada; los valores promedio tomando periodos de tres décadas, se presentan en la Figura 6.7. Estas series calculadas se distribuyen normalmente (S.W. sig>0,05). El análisis de varianza indica que hay diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) en el último período 1981-2010 frente al anterior (1971-2010) sólo en la estación Granja Lúker. Sin embargo, se encuentran diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) con los períodos históricos en las estaciones Agronomía y Cenicafé.

Figura 6.6: Radiación solar promedio kW-h/m² estaciones cuenca alta

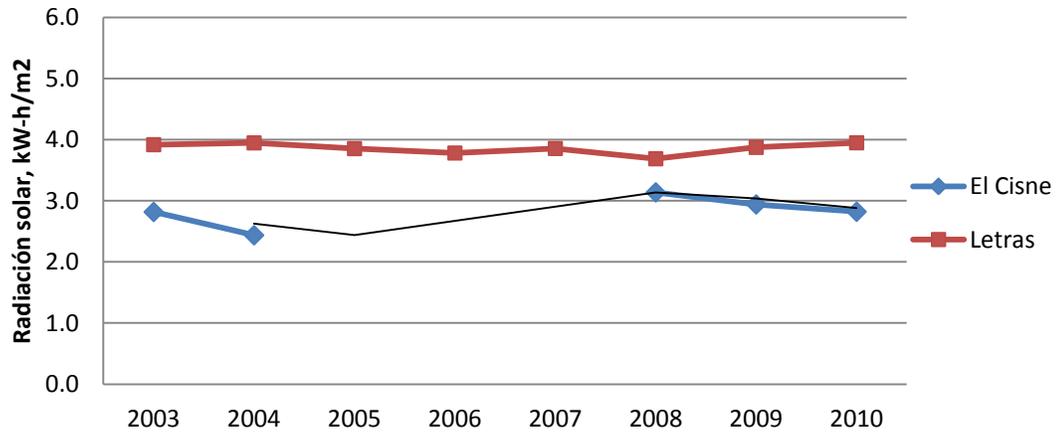
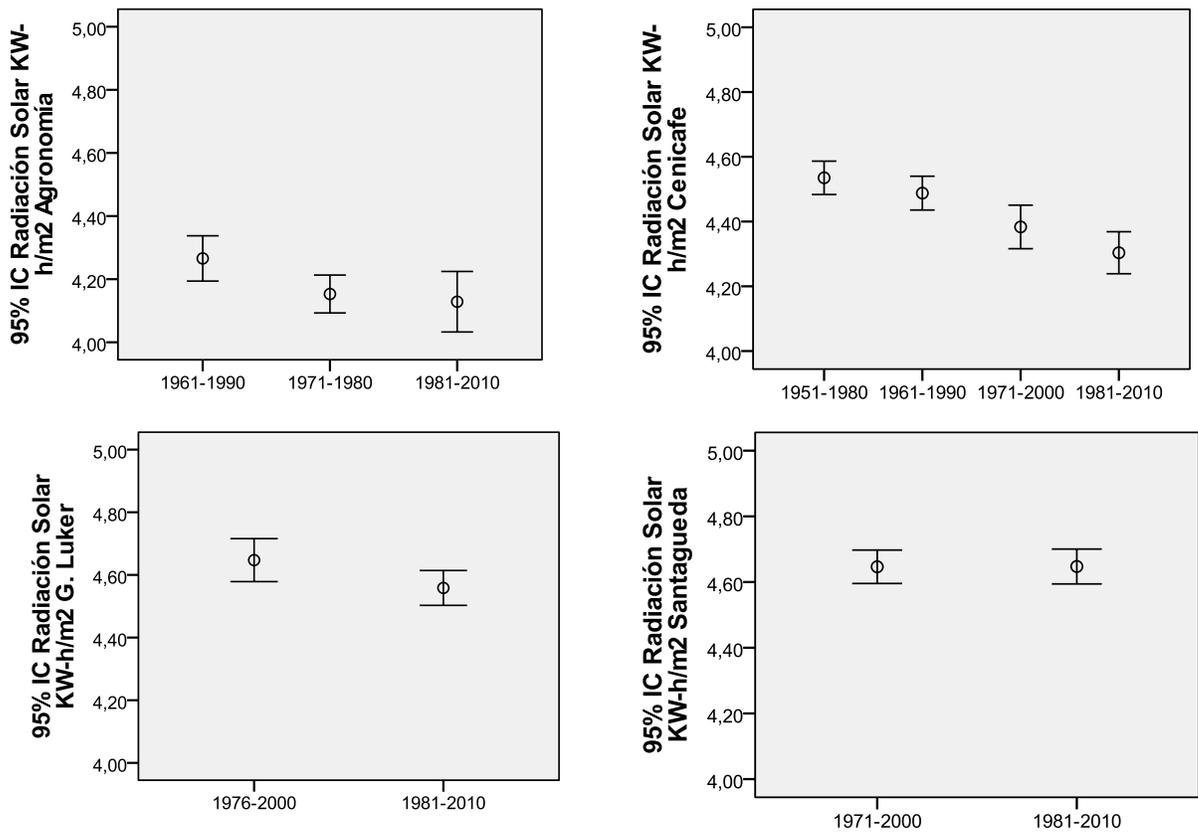


Figura 6.7: Promedio de la radiación solar estimada tridecadal



Para las series de radiación solar estimadas con base en los registros de brillo solar y humedad relativa, se calculan las anomalías del período actual, 1981-2010 en comparación con los históricos, los resultados se resumen en la Tabla 6.5. El error de estimación es $0,17 \text{ Kw-h/m}^2$, por tanto, sólo se tienen diferencias con el período 1951-1980.

Tabla 6.5: Cambios en la radiación solar estimada

Estación	Reducción Radiación solar anual promedio Kw-h/m ² 1981-2000 frente registros históricos		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	-0,24*	-0,15	-0,03
Cenicafé	-0,25*	-0,19	-0,08
Granja Lúker	ND	ND	-0,09
Santágueda	ND	ND	0,00

Convenciones: ND: No disponible * Diferencia significativa

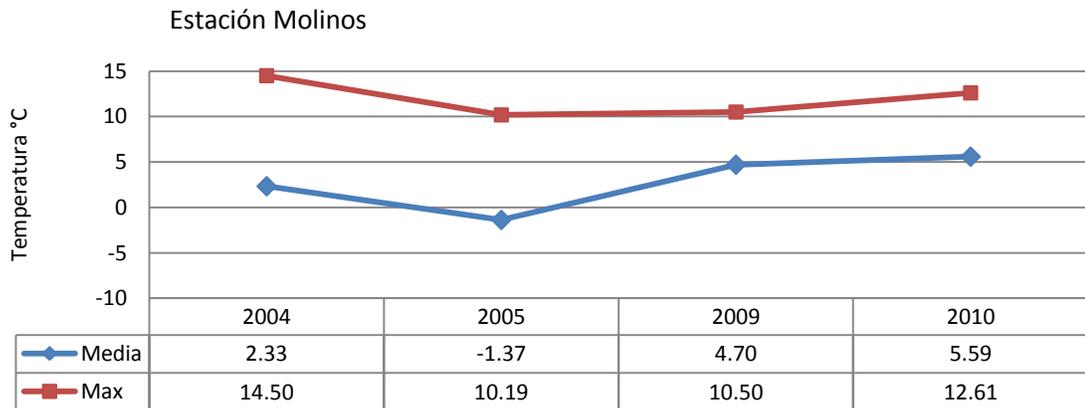
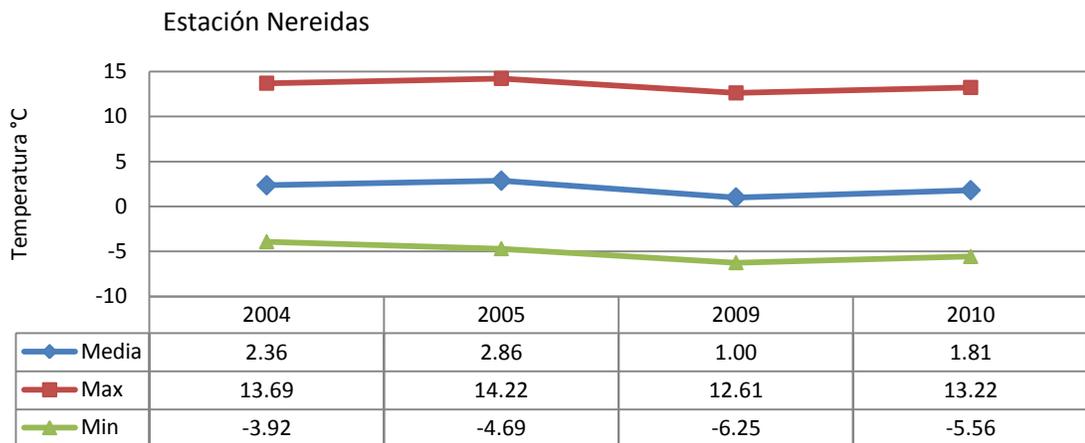
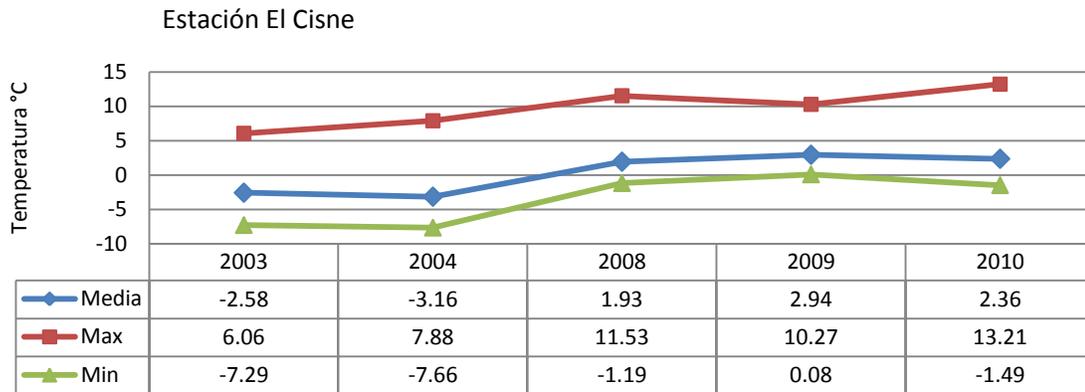
6.4 Temperaturas

6.4.1 Temperatura media

- **Estación El Cisne:** localizada a una altitud de 4830 m.s.n.m., dispone de registros de temperatura desde el año 2003; el comportamiento de las temperaturas medias y extremas se presenta en la Figura 6.8; se observa aumento en todas las temperaturas; sin embargo, los registros son incompletos y cortos lo cual no permite establecer una tendencia de aumento confiable. La temperatura promedio para el tiempo de registro es $0,4^{\circ}\text{C}$; sin embargo, la distribución de frecuencias tiene fuerte asimetría negativa, por lo cual la mediana es más representativa del valor central, alcanzado valores de $1,2^{\circ}\text{C}$.
- **Estación Nereidas:** ubicada a una altura de 4470 m.s.n.m., cuenta con registros de temperatura desde el año 2004; pero, son incompletos y sólo se tiene información de algunos períodos, como se observa en la Figura 6.8. La temperatura promedio para el período de registro es de 2°C .
- **Estación Los Molinos:** se encuentra a una altitud de 4260 m.s.n.m., tiene registros de temperatura desde el año 2003; sin embargo, la serie está incompleta y sólo pueden analizarse algunos años como se muestra en la Figura 6.8. Para el tiempo de registro, la temperatura media es $2,8^{\circ}\text{C}$.
- **Estación río Claro:** ubicada a una altitud de 4183 m.s.n.m. Con registros de temperatura desde el año 2003. A escala anual, el comportamiento de las temperaturas media y extremas

se presenta en la Figura 6.9. Durante el período evaluado se observa aumento de las temperaturas medias y mínimas, sin embargo el registro es muy corto y está incompleto para estimar tendencias. La temperatura promedio es de 4,2°C.

Figura 6.8: Comportamiento de las temperaturas en las estaciones de páramo



- **Estación Las Brisas:** está localizada a una altitud de 4150 m.s.n.m. El comportamiento de la temperatura en esta estación, reportado hasta el 2006, se observa en la Figura 6.9; la temperatura promedio es de 4,7°C. Se observa incremento en todas las temperaturas. La tendencias de aumento reportados por IDEAM (2010) son de 1,17°C/década en las temperaturas máximas, 0,29°C/década en las temperaturas medias y 0,24°C/década en las temperaturas mínimas. Sin embargo, las anomalías se reportan por períodos tri-decadales y no se dispone de registros suficientes para esta estimación.
- **Estación Letras:** cuenta con mediciones de temperatura desde el año 2003. El promedio de las temperaturas media, máxima y mínima se representa en la Figura 6.9. Para la temperatura media, se tiene un comportamiento monótono alrededor del promedio, 7,1°C; el coeficiente de variación es relativamente bajo con valores del 12%. El promedio multianual de la temperatura máxima es 10,8°C, con un coeficiente de variación del 13,5%. Para la temperatura mínima, el promedio es 4,3°C; el coeficiente de variación alcanzan valores del 24%. Los valores extremos reportados en el tiempo de registro oscilan entre 18,4°C y 0°C.

Las series diarias de temperatura de las estaciones ubicadas en la cuenca media-alta a baja-Agronomía (1956-2010), Cenicafé (1950-2010), Granja Lúker (1972-2010) y Santágueda (1965-2010) - no se distribuyen normalmente (K.S sig<0,05). Los coeficientes de variación son bajos y fluctúan entre el 5 al 7%. La temperatura promedio diaria por períodos interdecadales se muestra en la Figura 6.10, se observa incremento en el transcurso del tiempo. Aplicando la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis se obtienen diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) en todas las estaciones.

La distribución de la temperatura promedio por períodos de tres décadas se presenta en la Figura 6.11, se observa incremento de la temperatura entre los períodos, aunque los cambios son menores en las estaciones de la cuenca baja. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis revela diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) en todas las estaciones

Las series de temperatura media promedio anual, para todas las estaciones, se distribuyen normalmente (S.W- sig>0,05). El análisis de varianza y la prueba post hoc de Ducan para los períodos interdecadales, indica que hay diferencias significativas ($\alpha = 0,05$), en especial en la última década (2001-2010). Para las series tridecadales, se obtienen diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$), para el período más reciente (1981-2010); los resultados se resumen en la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7. En esta última tabla se presentan las anomalías medias, calculadas con base en el período inmediatamente anterior, en promedio ascienden a 0,18°C por período década. Para el período 1981-2010, las anomalías, tomando como base los registros históricos, se resumen en la Tabla 6.8; el incremento de la temperatura con respecto al período 1951-1980, ha alcanzado 0,5°C.

Figura 6.9: Comportamiento de las temperaturas estaciones cuenca alta

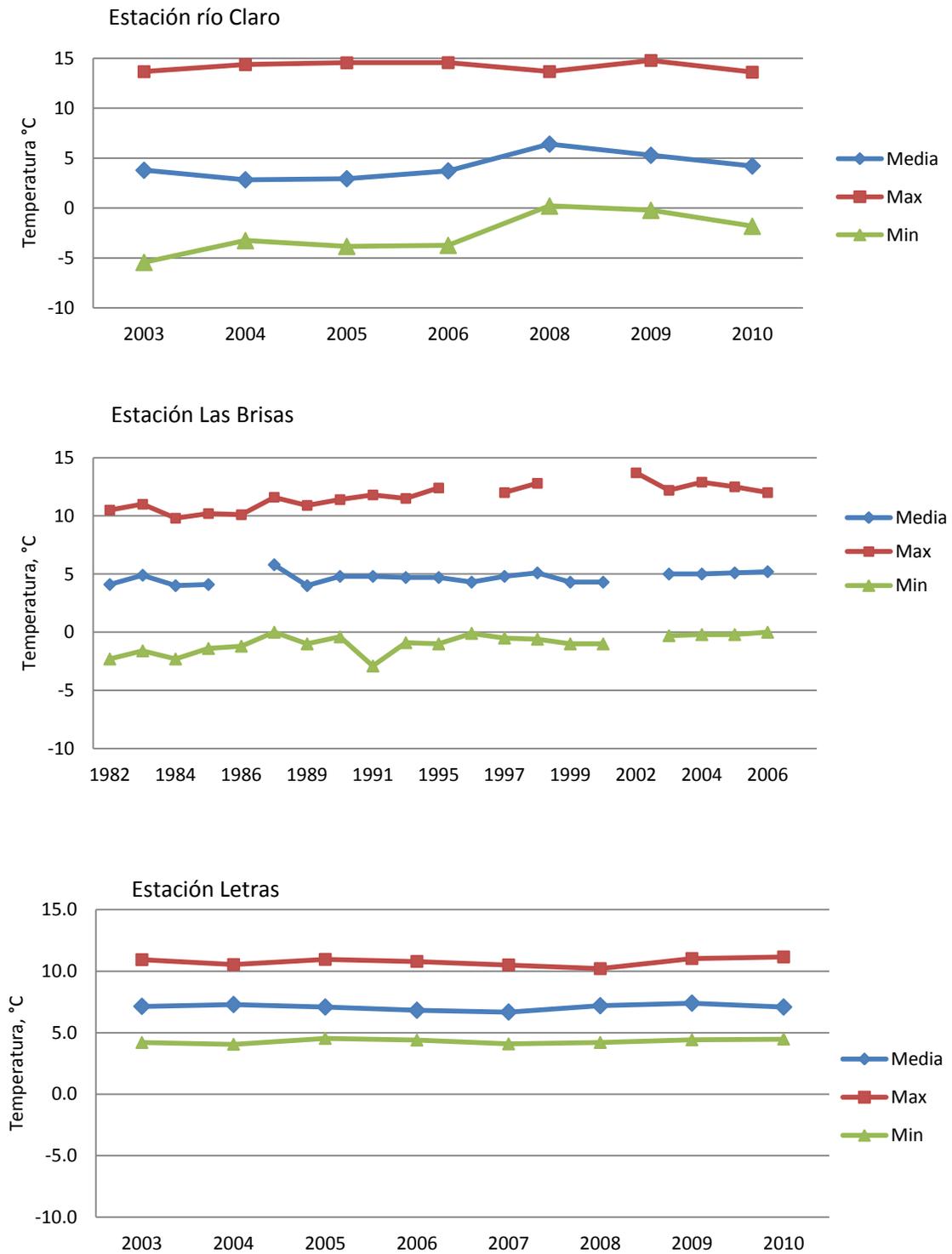


Figura 6.10: Temperatura media diaria promedio interdecadal

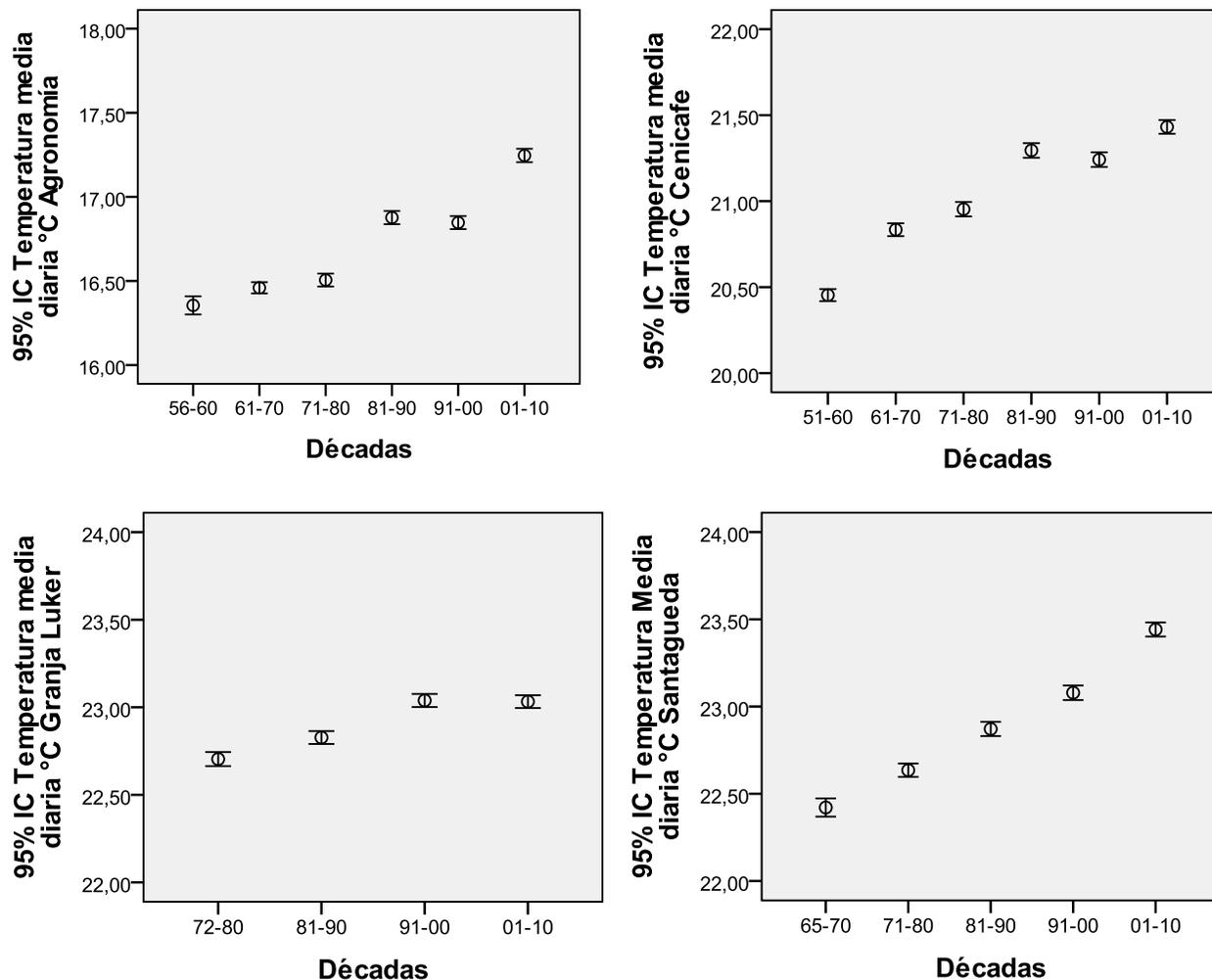


Tabla 6.6: Temperatura media anual por década

Estación	Temperatura media por década, °C					
	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
Agronomía	16,35	16,45	16,50	16,85	16,88	17,24
Cenicafé	20,45	20,83	20,95	21,24	21,29	21,43
Granja Lúker	ND	ND	22,70	22,83	23,03	23,04
Santágueda	ND	22,43	22,63	22,87	23,08	23,42

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos ($\alpha = 0,05$).

Figura 6.11: Distribución de temperatura media análisis tridecadal

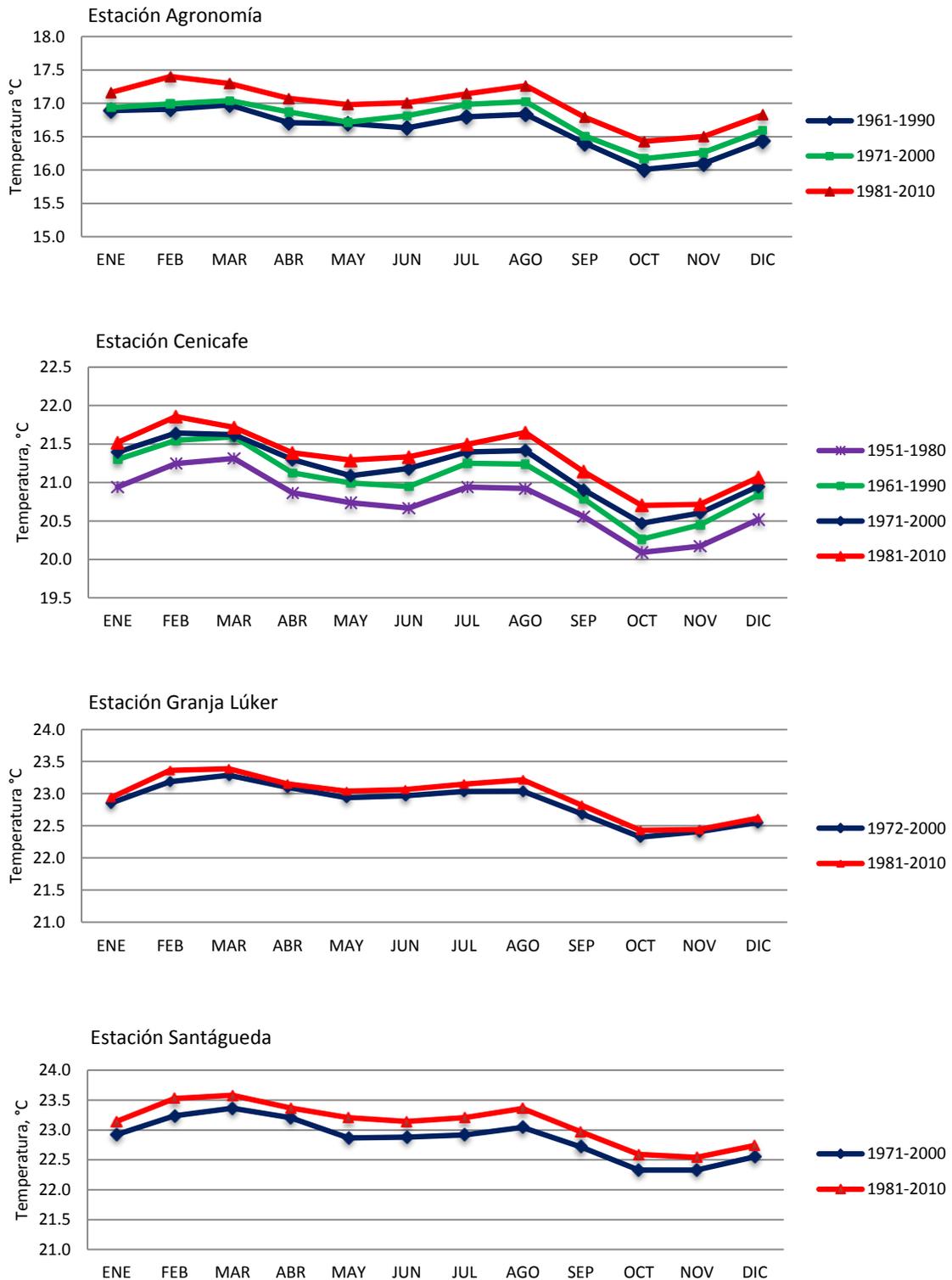


Tabla 6.7: Temperatura media anual tridecadal

Estación	Temperatura media tridecadal °C				Anomalia°C
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	Promedio
Agronomía	16,45	16,61	16,74	16,99	0,18
Cenicafé	20,74	21,02	21,16	21,32	0,19
Granja Lúker	ND	ND	22,86	22,97	0,11
Santágueda	ND	22,68	22,86	23,12	0,22

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos ($\alpha = 0,05$).

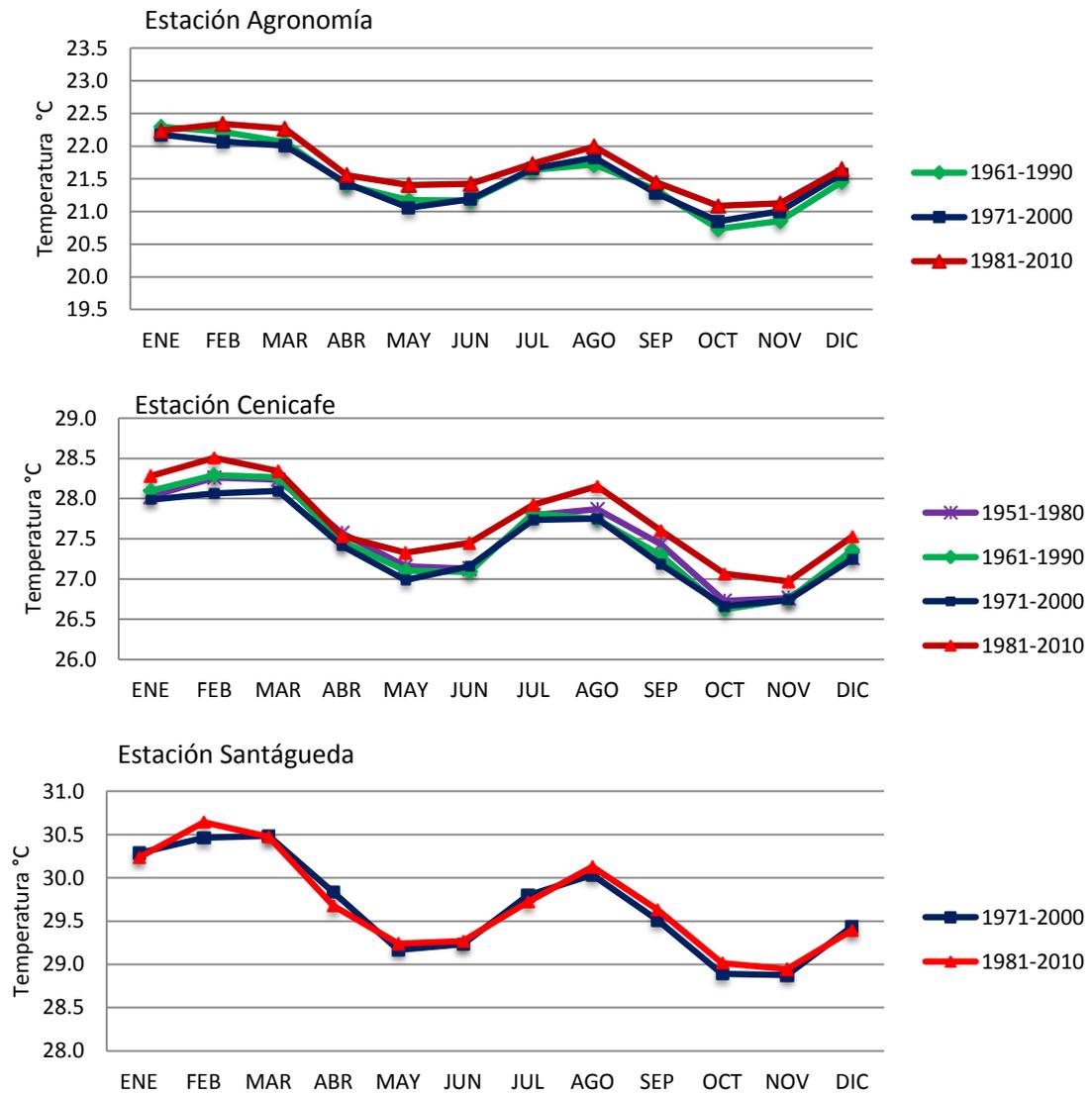
Tabla 6.8: Anomalia en la temperatura media 1981-2010

Estación	Anomalia Temperatura media con respecto al registro histórico, °C		
	1951-1980	1961-1990	1971-2000
Agronomía	0,54*	0,38*	0,25*
Cenicafé	0,58*	0,30*	0,16*
Granja Lúker	ND	ND	0,11
Santágueda	ND	0,44*	0,26*

6.4.2 Temperaturas máximas

En las estaciones analizadas se disponen de registros de temperaturas máximas diarias. Estas series no se distribuyen normalmente (K.S. sig<0,05). Los coeficientes de variación son bajos entre el 9 al 7%. La distribución se observa en la Figura 6.12 sigue el mismo comportamiento bimodal, con mayores valores en el primer trimestre del año. Se observan diferencias en especial en las estaciones de la cuenca media alta y media. Se realiza el análisis por períodos para detectar si hay cambios significativos en las temperaturas máximas. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis indica diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) en por lo menos dos de los períodos tanto para las series de una como de tres décadas.

Las temperaturas máximas promedio anual en todas las estaciones siguen la distribución normal (S.W- $\alpha = 0,05$). Las series de las estaciones Cenicafé, Granja Lúker y Santágueda son homocedásticas (Prueba de Levene- $\alpha = 0,05$) para los períodos de una y tres décadas. El análisis de varianza y la prueba pos-Hoc de Duncan muestra diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) en la temperatura promedio máxima de la última década en las estaciones Granja Lúker y Santágueda. Para los períodos tridecadales sólo se encuentran diferencias significativas ($\alpha = 0,10$) en la estación Cenicafé. En la estación Santágueda no se encuentran diferencias estadísticas significativas. En la estación Agronomía por la heterocedasticidad de las series se aplican pruebas no paramétricas encontrándose que no hay diferencias significativas. Las temperaturas máximas y anomalías del último período frente al anterior, se resumen en la Tabla 6.9.

Figura 6.12: Distribución de temperaturas máximas análisis tridecadal**Tabla 6.9:** Temperatura máxima promedio anual tridecadal

Estación	Temperatura máxima promedio tridecadal °C				Anomalía 1981-2010°C vs 1971-2000
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	
Agronomía	21,42	21,49	21,50	21,66	0,16
Cenicafé	27,51	27,48	27,41	27,72	0,31*
Granja Lúker			29,23	29,35	0,12
Santágueda			29,57	29,61	0,04

Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos ($\alpha = 0,05$).

6.4.3 Temperaturas mínimas

La distribución de las temperaturas mínimas promedio por períodos tridecadales se presenta en la Figura 6.13, se observa incremento en las temperaturas mínimas en el transcurso del tiempo y mayores valores en el primer semestre del año.

Las series de temperatura mínima diaria no se ajustan a distribución normal (S.K sig<0,05). El coeficiente de variación es bajo y oscila entre 6-7%. La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis arroja diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$)- en al menos dos de los períodos-, para las temperaturas mínimas diarias evaluadas tanto por períodos de una como de tres décadas. Las series mensuales se ajustan a distribución normal (K.S.- $\alpha = 0,05$); sin embargo son heterocedásticas, por tanto, aplicando pruebas no paramétricas se llega a iguales resultados.

La temperatura mínima promedio anual sigue distribución normal en todas las estaciones (S.W.- $\alpha = 0,05$). Las series son homocedásticas (Levene) tanto por períodos de una como de tres décadas. El Análisis de varianza muestra diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) en las temperaturas mínimas entre las diferentes décadas; se obtienen iguales resultados por períodos tridecadales; estos últimos se resumen en la Tabla 6.10, donde se presenta la anomalía promedio en la temperatura mínima, la cual fluctúa entre 0,13 y 0,27°C.

Tabla 6.10: Temperatura mínima promedio anual tridecadal

Estación	Temperatura mínima tridecadal °C				Anomalía°C
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	Promedio
Agronomía	12,94	13,00	13,10	13,37	0,14
Cenicafé	16,45	16,73	16,87	16,92	0,13
Granja Lúker	ND	ND	17,79	18,06	0,27
Santágueda	ND	17,53	17,65	18,01	0,24

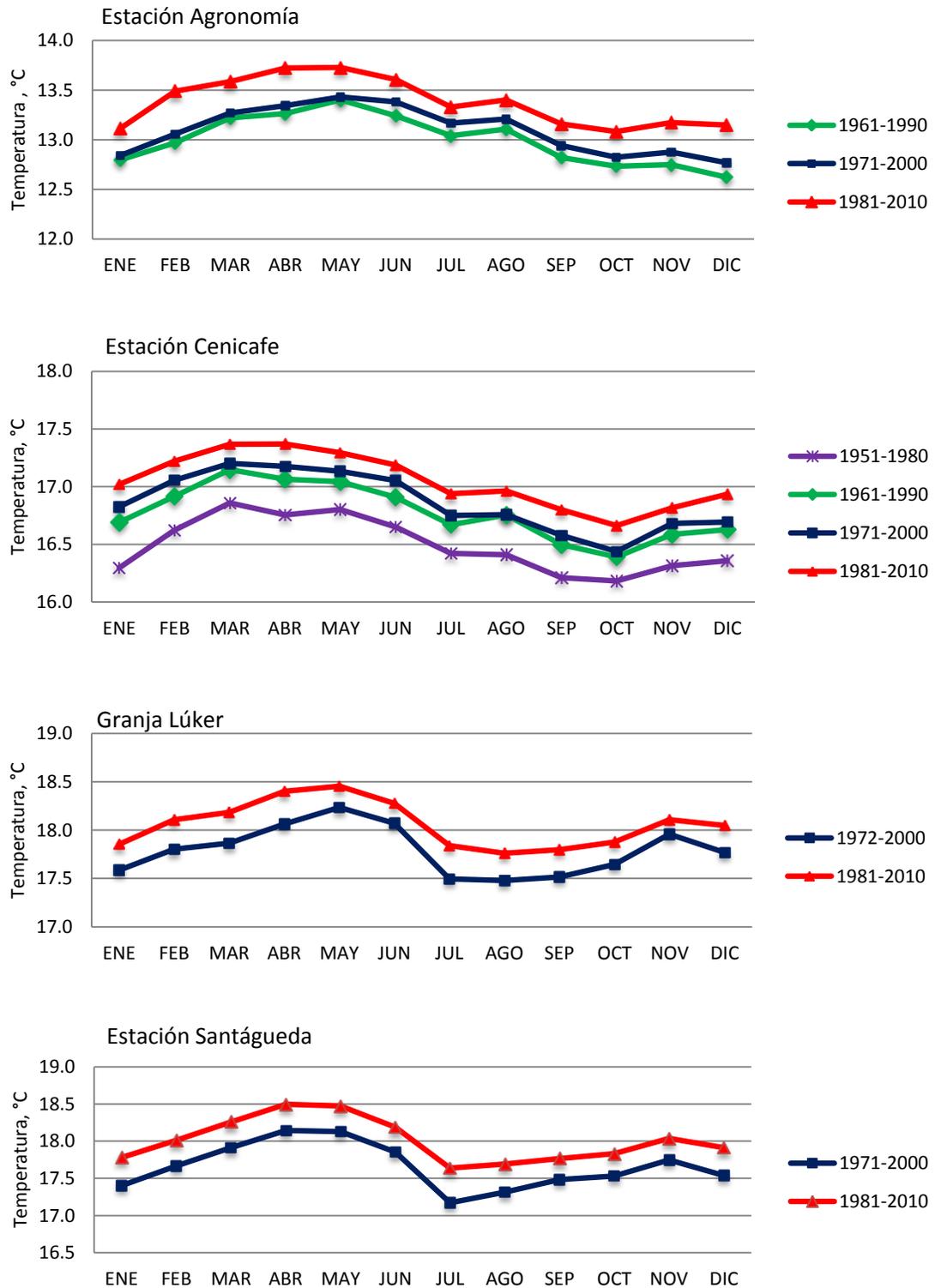
Convenciones: medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos ($\alpha = 0,05$).

6.5 Precipitación

6.5.1 Precipitación media

Para el estudio se analizaron los registros de precipitación diaria de las estaciones: Brisas (1982-2005), La Esperanza (1975-2008), Papayal (1981-2008), Agronomía (1956-2010), Alta Suiza (1975-2010), Neira (1976-2010), Marmato (1965-2010), Sancancio (1960-2010), Estación La Uribe (1975 – 2010), Java (1981-2010), El Recreo (1970-2010), Naranjal (1956-2010), Montevideo (1960-2010), La Selva (1985-2010), Cenicafé (1942-2010), Granja Lúker (1964-2010), Santágueda (1964-2010) y Arauca (1975-2008).

Figura 6.13: Distribución de temperaturas mínimas promedio tridecadal



El análisis de la distribución de probabilidad de la lluvia diaria tomando como base los períodos de tres décadas sólo indica diferencias en los valores máximos de lluvia (Tabla 6.11). El coeficiente de variación es muy alto y oscila entre 140 y 206%.

Tabla 6.11: Distribución de probabilidad de lluvia diaria

Lluvia diaria mm - Estación Agronomía				
Probabilidad	1956-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	1,0	1,0	0,8	0,9
20,0%	8,1	8,2	8,2	8,3
10,0%	16,2	16,3	16,2	16,6
4,0%	28,6	27,8	27,3	27,3
2,0%	37,7	36,8	36,5	37,1
1,0%	46,9	46,5	46,4	46,6
0,2%	70,1	68,4	65,3	69,2
0,1%	79,9	79,9	73,0	84,0
0,0%	102,3	102,3	102,3	133,9

Lluvia diaria mm - Estación Cenicafe					
Probabilidad	1942-1970	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	1,2	1,2	1,1	1,0	1,1
20,0%	12,1	11,7	11,4	11,7	11,9
10,0%	22,6	22,7	22,5	23,0	23,1
4,0%	35,6	36,6	36,2	37,5	37,8
2,0%	45,5	45,7	45,7	46,8	47,9
1,0%	55,2	54,8	55,1	55,4	57,6
0,2%	75,4	76,3	76,0	77,8	82,3
0,1%	90,3	91,0	93,9	93,9	97,7
0,02%	147,7	147,7	147,7	117,5	117,5

Lluvia diaria mm - Estación Santagueda			
Probabilidad	1964-1990	1971-2000	1981-2010
50,0%	0,6	1,0	0,5
20,0%	9,9	9,7	10,0
10,0%	20,7	20,6	21,2
4,0%	34,2	34,2	35,4
2,0%	43,0	43,4	46,0
1,0%	52,4	54,7	55,8
0,2%	74,7	75,0	75,1
0,1%	80,8	81,9	85,3
0,0%	101,7	94,0	108,7

Sin embargo, realizando el análisis de varianza de las series diarias entre los períodos interdecadales, por pruebas no paramétricas (K.W) se encuentran diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,10$) entre los períodos; los resultados de la significancia estadística se resumen en la Tabla 6.12; se omiten los valores, en las estaciones donde no se encontró diferencias significativas. La Tabla 6.13 presenta los resultados del análisis de varianza por prueba no paramétrica de Kruskal Wallis considerando los períodos tridecadales. El cambio en la precipitación se evalúa basado en los medios diarios como aumento en el transcurso del tiempo (+) o disminución (-). En algunos estaciones hay oscilación y por tanto no se evidencia cambio (=).

Tabla 6.12: Significancia estadística análisis de varianza precipitación interdecadal

Estación	Diaria		Mensual		Anual	
	Kruskal Wallis sig	Cambio Lluvia	Kruskal Wallis sig	Cambio LLuvia	Anova sig	Cambio LLuvia
Las Brisas	0,032	-				
La Esperanza	0,000	-	0,065	-		
Papayal	0,000	=				
Agronomía	0,001	+				
Alta Suiza	0,000	+	0,001	+	0,001	+
Neira	0,000	+			0,077	+
Marmato	0,000	+	0,072	-		
Sancancio	0,000	+	0,027	+	0,100	+
La Uribe						
Java	0,000	+	0,026	+	0,058	+
El Recreo	0,000	+	0,003	+	0,057	+
Naranjal	0,002	+	0,025	+	0,008	+
Montevideo	0,000	-	0,004	-	0,005	-
La Selva	0,000	+				
Cenicafé	0,000	+				
Granja Lúker	0,000	+				
Santágueda	0,000	+	0,092	+		
Arauca	0,000	+				

Las series de lluvia mensual no se distribuyen normalmente (S.K) empleando pruebas no paramétricas (K. W), se encuentran diferencias significativas ($\alpha=0,10$) para algunas estaciones cuyos resultados se resumen en la Tabla 6.12 para los períodos interdecadales y en la Tabla 6.13 para los tridecadales. El cambio en la lluvia en el transcurso del tiempo se denota como aumento (+) o disminución (-) tomando como base los valores medios de lluvia mensual, se omiten los valores donde no se encontró diferencia significativa.

El análisis de varianza tomando como factores no sólo el período si no también el mes es realizado; se evalúan los meses más secos y lluviosos aplicado pruebas no paramétricas, el resumen de la significancia obtenida se presenta en la Tabla 6.14, sólo se reportan los valores donde se tienen diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0,10$). Para el mes de octubre por ejemplo en el 50% de las estaciones se encontró diferencia estadística significativa con incrementos en la lluvia.

Tabla 6.13: Significancia estadística análisis de varianza precipitación tridecadal

Estación	Diaria		Mensual		Anual	
	Kruskal Wallis sig	Cambio lluvia	Kruskal Wallis sig	Cambio LLuvia	Anova sig	Cambio LLuvia
La Esperanza						
Papayal						
Agronomía	0,078	=				
Alta Suiza	0,000	+	0,056	+	0,10	+
Neira	0,000	+				
Marmato	0,000	-				
Sancancio						
La Uribe						
El Recreo						
Naranjal			0,060	+		
Montevideo	0,000	-	0,029	-	0,035	-
Cenicafé						
Granja Lúker	0,002	+				
Santágueda	0,016	+				
Arauca	0,001	+				

Tabla 6.14: Significancia estadística análisis de varianza series de precipitación tridecadal

Estación	Significancia estadística pruebas no paramétricas							
	Enero	Mayo	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov.	Dic
La Esperanza								
Papayal								
Agronomía				0,032		0,060		
Alta Suiza	0,080	0,039	0,001	0,014	0,071	0,005	0,017	0,004
Neira	0,068		0,010			0,100		0,019
Marmato	0,046		0,000					0,004
Sancancio	0,074	0,069				0,043		
La Uribe								
El Recreo								
Naranjal			0,090					
Montevideo		0,008			0,003	0,000	0,094	0,389
Cenicafé						0,056		
Granja Lúker			0,003	0,037				
Santágueda		0,024		0,004		0,027		
Arauca							0,073	0,024

El comportamiento de la precipitación promedio anual tridecadal se presenta Figura 6.14. Las series de precipitación anual se distribuyen normalmente (S.W. sig>0,05) y son homocedásticas (Levene) por períodos tanto de una como de tres décadas.

Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal

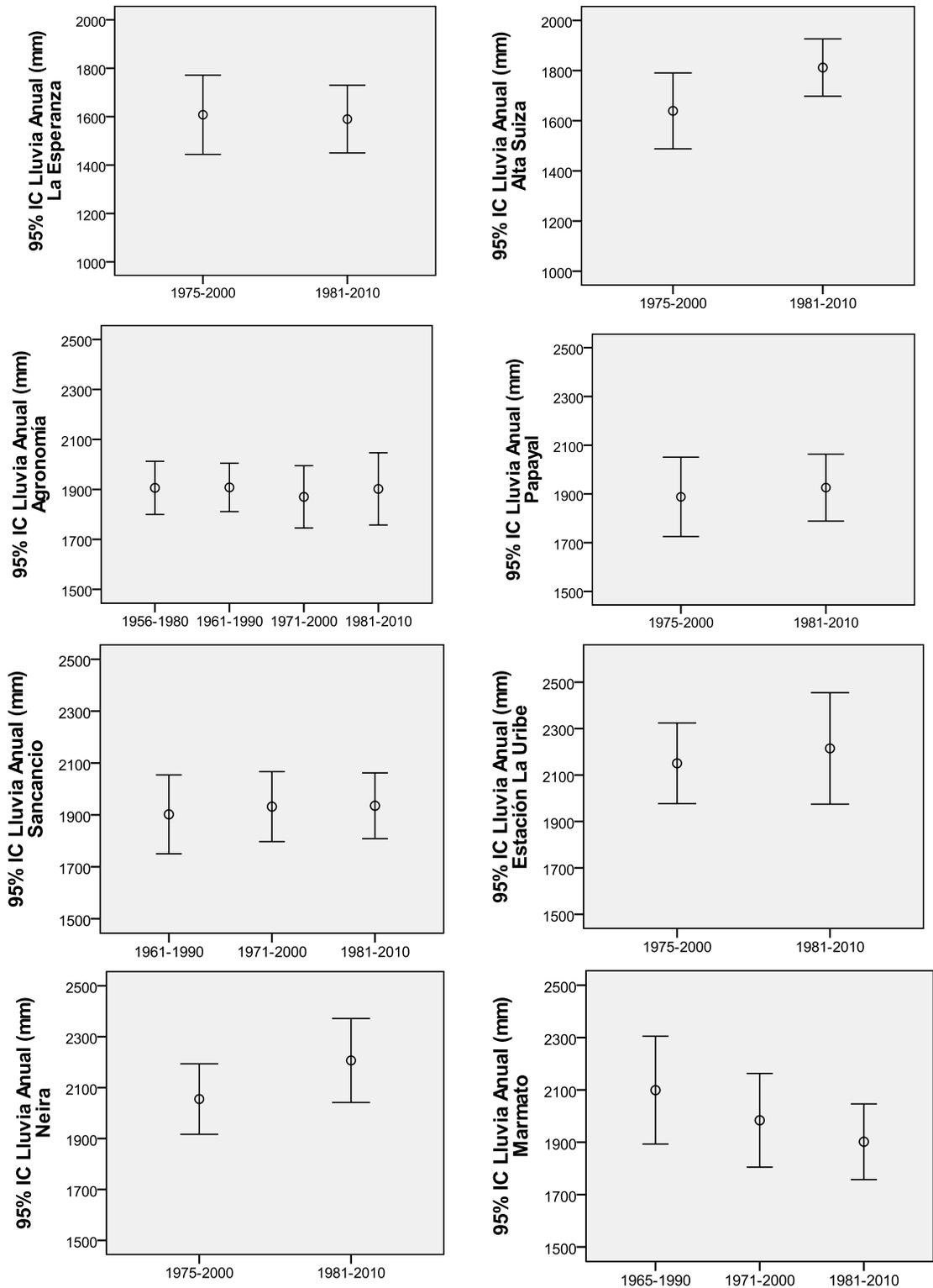
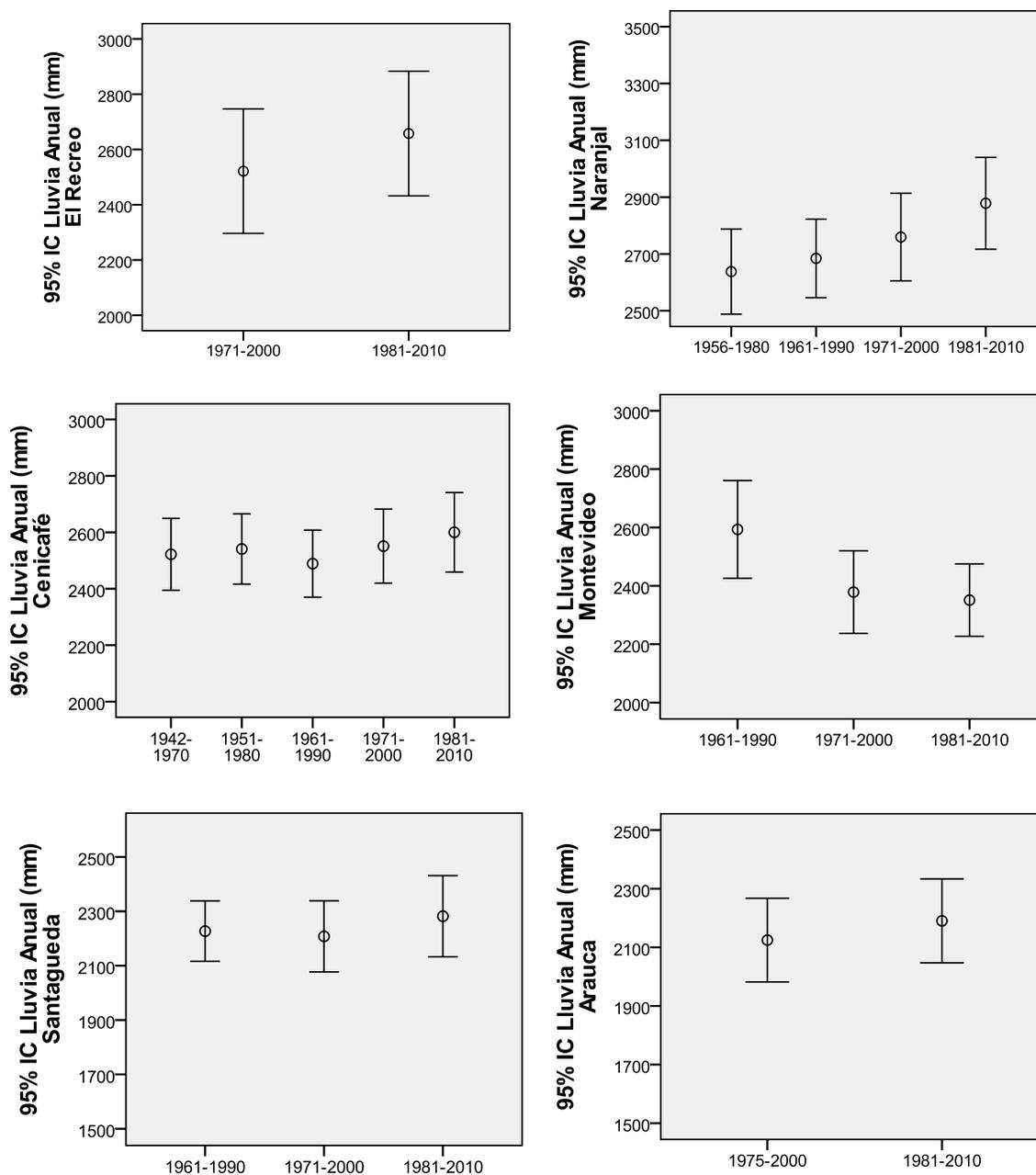


Figura 6.14: Comportamiento de la precipitación media anual tridecadal



El análisis de varianza arroja diferencias significativas ($\alpha=0,10$) en algunas estaciones; el resumen de la significancia obtenida se presenta en las Tabla 6.12 y Tabla 6.13. En la medida que aumenta la escala de tiempo de la serie, se va reduciendo el número de estaciones donde se encuentran diferencias significativas ($\alpha=0,10$), por la alta variabilidad de la precipitación.

Tomando como base los períodos tridecadales, se calculan las anomalías en la precipitación promedio anual, las cuales se resumen en Tabla 6.15; la distribución espacial de dichas anomalías se observa en la Figura 6.15. Se tienen reducciones en la precipitación en las estaciones La Esperanza, Marmato y Montevideo; en las demás estaciones aumentos en la precipitación. De acuerdo con el análisis de varianza estas diferencias son estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$) sólo en las estaciones Alta Suiza con incrementos del 8,64% y Montevideo con reducción del 4,72% en promedio.

Figura 6.15: Anomalías en la precipitación anual

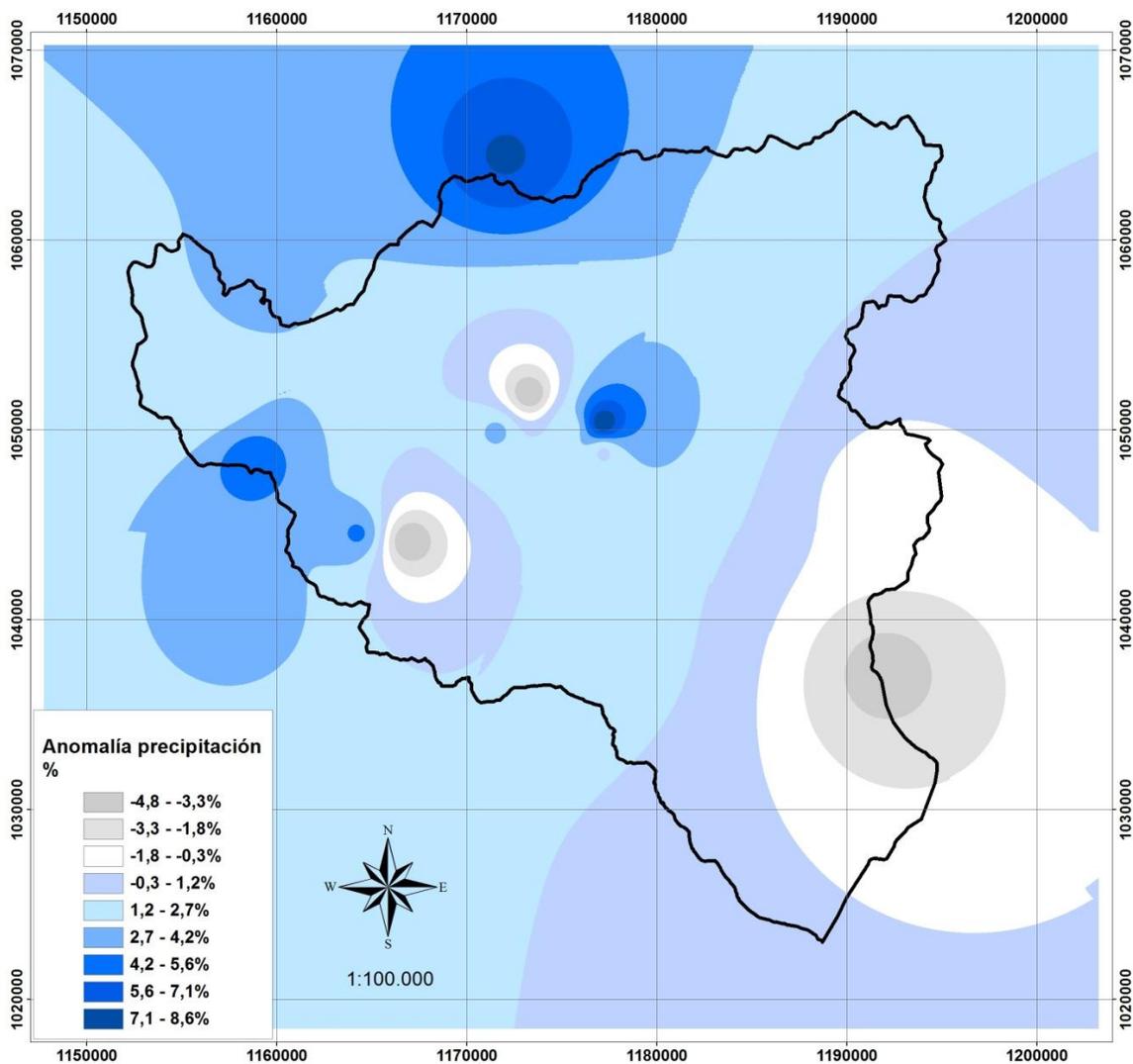


Tabla 6.15: Anomalías en la precipitación anual

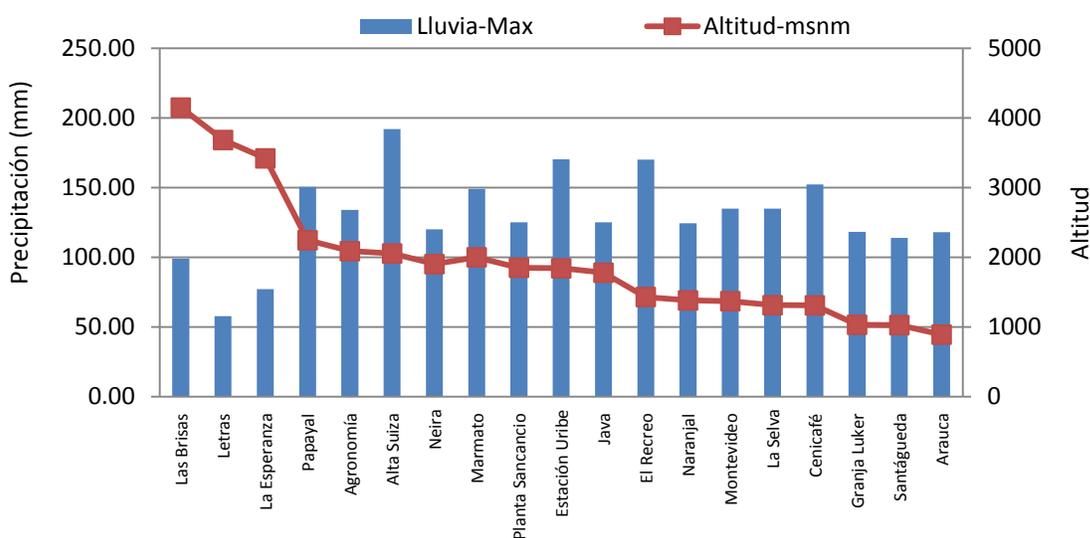
Estación	Anomalía en la precipitación anual, %				Anomalía Promedio %
	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010	
La Esperanza				-1,11	-1,11
Papayal				2,01	2,01
Agronomía		0,09	-1,98	1,70	-0,06
Alta Suiza				8,64*	8,64
Neira				7,37	7,37
Marmato			-5,49	-4,13	-4,81
Sancancio			1,57	0,18	0,87
La Uribe				2,98	2,98
El Recreo				5,4	5,4
Naranjal		0,39	2,80	4,31	2,5
Montevideo			-8,28*	-1,16	-4,72
Cenicafé	0,75	-2,04	2,49	1,92	0,78
Granja Lúker			1,38	1,18	1,28
Santágueda			0,87	2,46	1,67
Arauca				3,09	3,09

*Diferencias significativas

6.5.2 Eventos extremos

La precipitación máxima diaria para las diferentes estaciones de la cuenca se resume en la Figura 6.16. A escala diaria, las lluvias máximas reportadas para el período 1981-2010, ascienden a 99 mm en la zona de páramo, 150 mm en la cuenca alta; 192 mm en la cuenca media-alta; 170 mm en la cuenca media y 118 mm en la baja; las estaciones donde se presentaron los valores máximos fueron Alta Suiza, Estación La Uribe y El Recreo.

Figura 6.16: Precipitación máxima estaciones cuenca del río Chinchiná



Se evidencia el incremento de los eventos de lluvia extremos en las estaciones; se registra un aumento en la frecuencia de las precipitaciones con valores iguales o mayores al percentil 95 y al percentil 99 de la serie histórica, como se observa en las Figura 6.17 y Figura 6.18, respectivamente, las cuales fueron calculadas a partir del análisis de frecuencias de la serie.

Figura 6.17: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 95

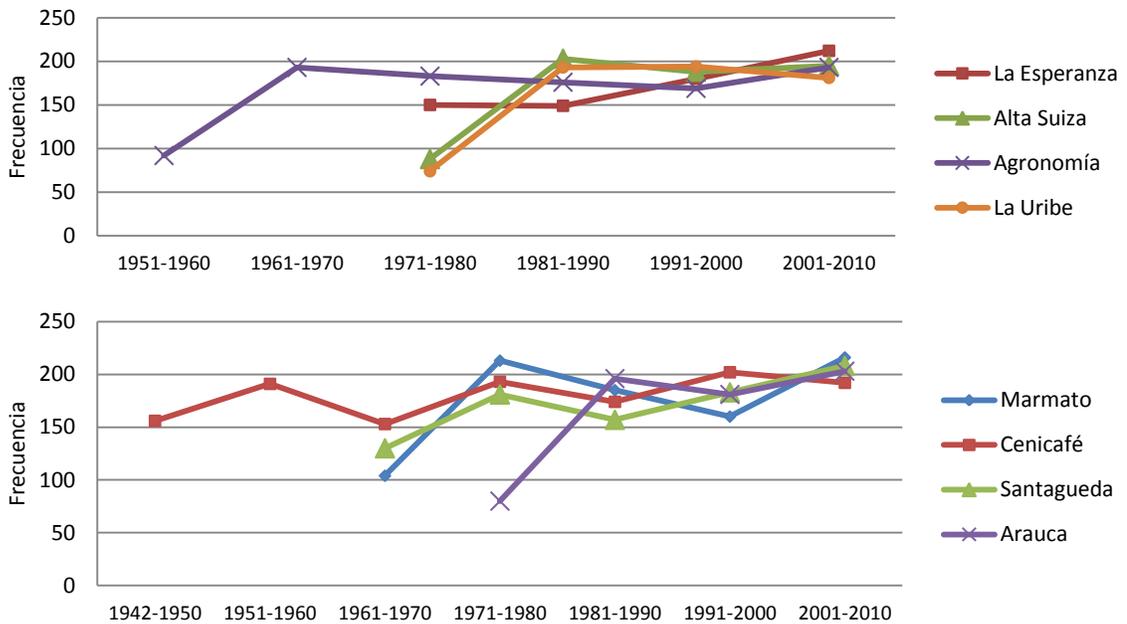
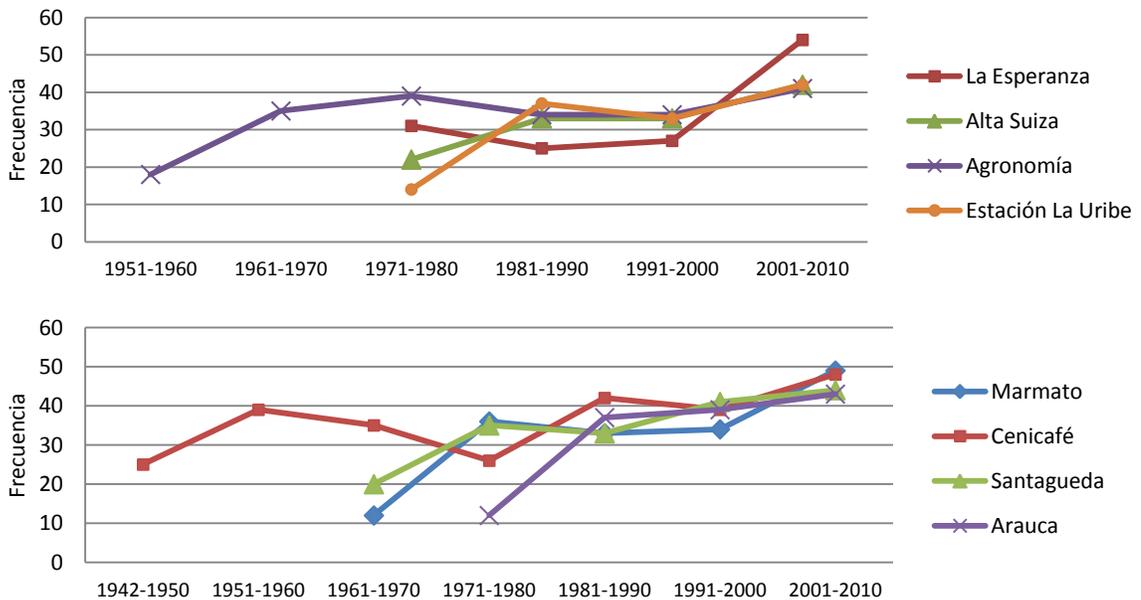


Figura 6.18: Frecuencia de eventos de precipitación diaria máxima superior al percentil 99



Las tormentas de lluvia son comúnmente modeladas utilizando la distribución de Valor Extremo Tipo I (Chow, 1953; Tomlinson, 1980). (Chow, 1994). La función de distribución teórica de probabilidad más usada, en general, para estudiar los valores extremos de las variables meteorológicas, es la función de Gumbel (Silva, 1998). Sin embargo existen otras funciones de distribución que pueden ser empleadas como: TCEV (Two Component Extreme Value), GEV (Generalized Extreme Value), Lognormal 2, Log Gumbel, entre otras. Las lluvias máximas son muy sensibles a la función de distribución de probabilidades asumida. En el Valle del Aburrá por ejemplo, siguen una función de distribución de probabilidades de Pareto Generalizada (Poveda, 2011).

Para establecer la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a los valores máximos de precipitación registrados en la cuenca, se emplea el software AFINS 2.0 desarrollado por el Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología del Departamento de ingeniería Hidráulica y medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Éste software realiza el análisis de frecuencia de extremos utilizando información sistemática y no sistemática. Está desarrollado en un ambiente IDL (Interactive Data Language), y puede ser ejecutado utilizando IDL Virtual Machine 6.1.

El AFINS 2.0 realiza la estimación de parámetros óptimos mediante el método de la Máxima Verosimilitud. Si x_1, x_2, \dots, x_n son los valores observados de una muestra aleatoria de tamaño n , La función de verosimilitud o probabilidad conjunta de la muestra es:

$$L(Y) = f(x_1, Y) * f(x_2, Y) * \dots * f(x_n, Y) \text{ Ec. (6.1.)}$$

La función de verosimilitud es una función del parámetro desconocido Y . El estimador de máxima verosimilitud de Y es el valor que maximiza la función de probabilidad conjunta $L(Y)$.

Los resultados del análisis de verosimilitud para las diferentes estaciones pluviométricas se presentan en la Tabla 6.16. De acuerdo con el análisis gráfico, se presenta buen ajuste con las distribuciones GEV (Generalized Extreme Value), TCEV (Two Component Extreme Value), LOGNORMAL2 y GUMBEL. Sin embargo, en la mayoría de las estaciones la máxima verosimilitud se obtiene con la función de probabilidad GEV. La Figura 6.19 presenta las gráficas de ajuste de distribución de probabilidad GEV, para las lluvias máximas observadas en las estaciones ubicadas en la cuenca del río Chinchiná.

Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

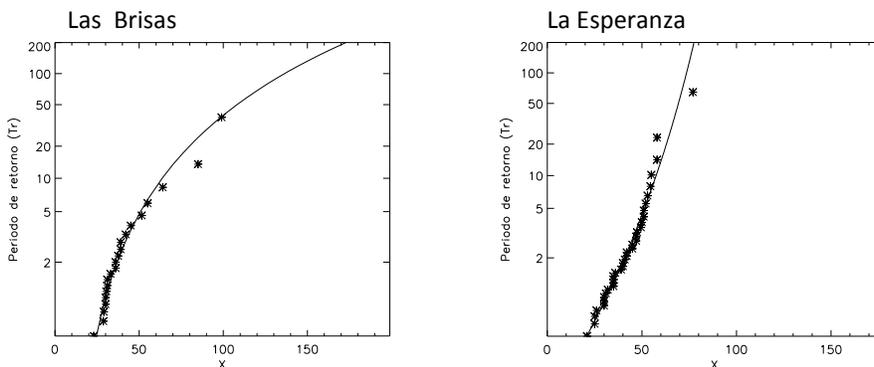


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

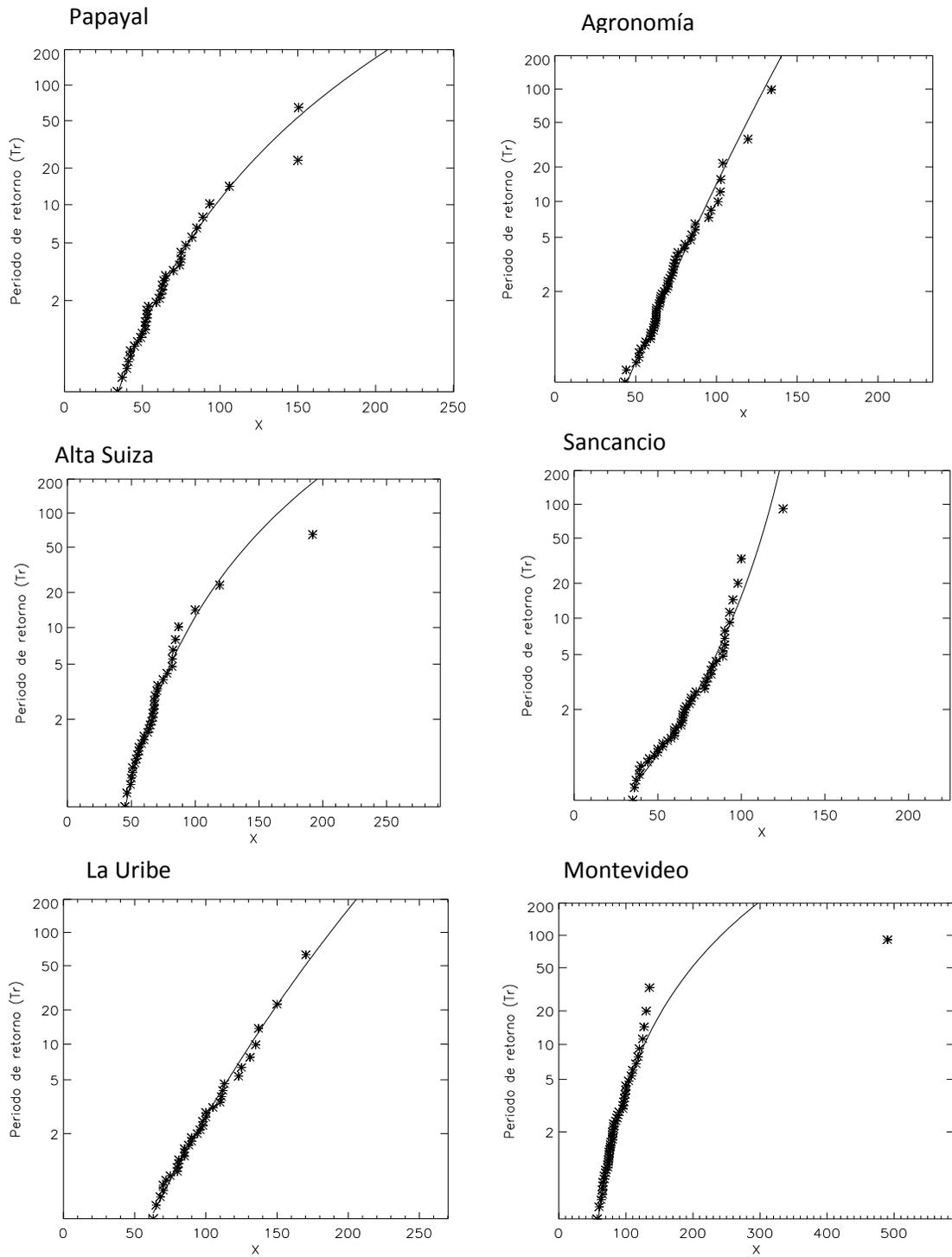


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

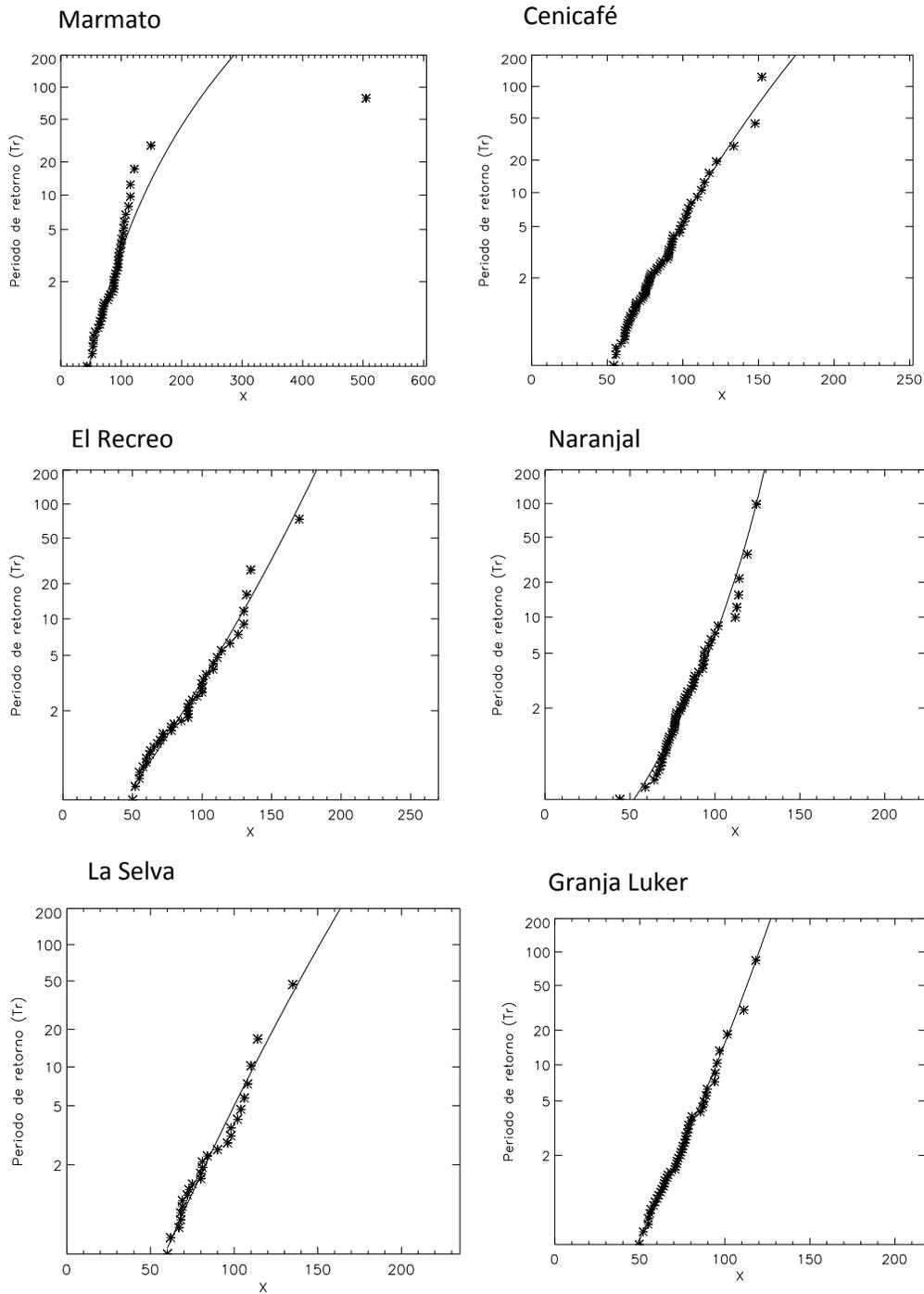


Figura 6.19: Ajuste de distribución de probabilidad GEV

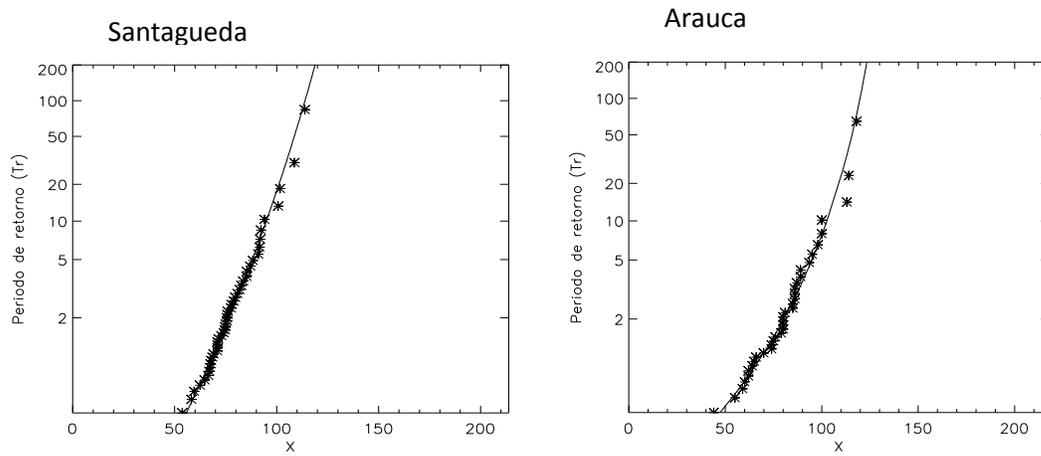


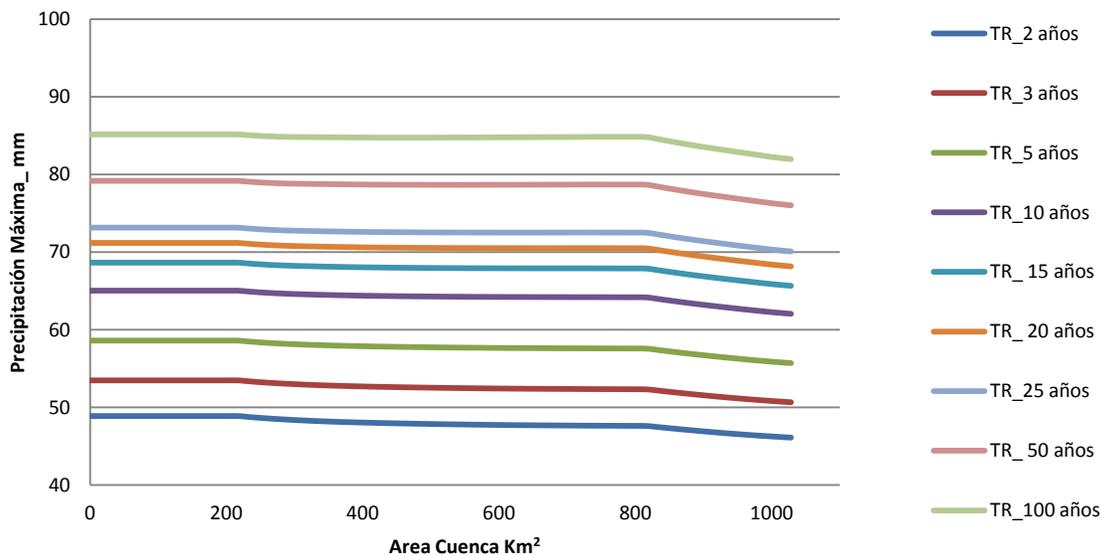
Tabla 6.16: Análisis de verosimilitud o probabilidad conjunta

Estaciones	Verosimilitud						
	Gumbel	TCEV	GEV	LOGNORMAL2	LOGGUMBEL	EXPONENCIAL	MAXIMO
Las Brisas	-85.54	-82.38	-82.84	-85.68	-82.99	-99.30	TCEV
La Esperanza	-139.02	-139.04	-138.53	-138.64	-142.11	-170.52	GEV
Papayal	-160.70	-160.70	-158.99	-160.94	-159.05	-186.05	GEV
Agronomía	-229.46	-229.49	-229.37	-230.67	-230.83	-289.58	GEV
Alta Suiza	-154.35	-154.52	-151.15	-156.39	-151.26	-188.61	GEV
Sancancio	-224.96	-224.97	-223.65	-224.39	-229.85	-265.90	GEV
Uribe	-159.23	-159.20	-159.10	-159.68	-159.42	-195.54	GEV
Marmato	-216.70	-206.19	-210.15	-215.46	-210.56	-244.02	TCEV
Montevideo	-241.69	-227.27	-228.28	-243.08	-229.24	-282.53	TCEV
Cenicafe	-298.60	-298.66	-298.14	-300.24	-298.49	-373.84	GEV
El Recreo	-191.87	-192.40	-191.79	-191.66	-193.50	-225.28	LOGNORMAL2
Java	-127.43	-129.50	-126.99	-126.91	-130.20	-163.99	LOGNORMAL2
La Selva	-111.40	-113.74	-111.38	-111.72	-111.53	-141.67	GEV
Naranjal	-229.84	-232.19	-228.13	-228.33	-236.54	-297.62	GEV
Granja Luker	-192.52	-196.27	-192.42	-192.69	-193.81	-249.18	GEV
Santaguada	-184.20	-186.68	-183.76	-184.10	-185.95	-251.31	GEV
Arauca	-153.67	-155.07	-151.90	-152.48	-157.61	-194.13	GEV

Empleando el programa generador de curvas Precipitación-Área-Duración (24 Horas) -Frecuencia-PADF- del modelo CAPRA, con la información de las estaciones de la cuenca, se elabora la Figura 6.20, la cual representa las probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas según el área de la

cuenca. Para la cuenca alta y media, las lluvias máximas para los diferentes períodos de retorno son prácticamente iguales, mientras que hay una ligera disminución en la cuenca baja.

Figura 6.20: Curvas de Precipitación-Área-Duración (24 horas)-Frecuencia



6.6 Escorrentía Superficial

A escala diaria las series observadas de caudal no se distribuyen normalmente. El comportamiento de los caudales medios interdecadales se presenta en la Figura 6.21. Comparando la última década con las anteriores, la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis indica que hay diferencias estadísticas ($\alpha = 0,05$) en las estaciones. Iguaes resultados se obtienen con los caudales promedio mensual.

El comportamiento de las series promedio tridecadales, obtenidas a partir de los caudales diarios observado, se presenta en la Figura 6.22. Se observa reducción de caudal en Montevideo y aumento de El Retiro. El análisis de varianza empleando pruebas no paramétricas indica que hay diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0,05$) entre los períodos en ambas estaciones. La distribución de los caudales a escala mensual se representa en la Figura 6.23, con mayores caudales en los meses de abril-mayo y octubre-diciembre; lo menores caudales se registran para el mes de agosto (Figura 6.25).

Figura 6.21: Caudales promedio interdecadales

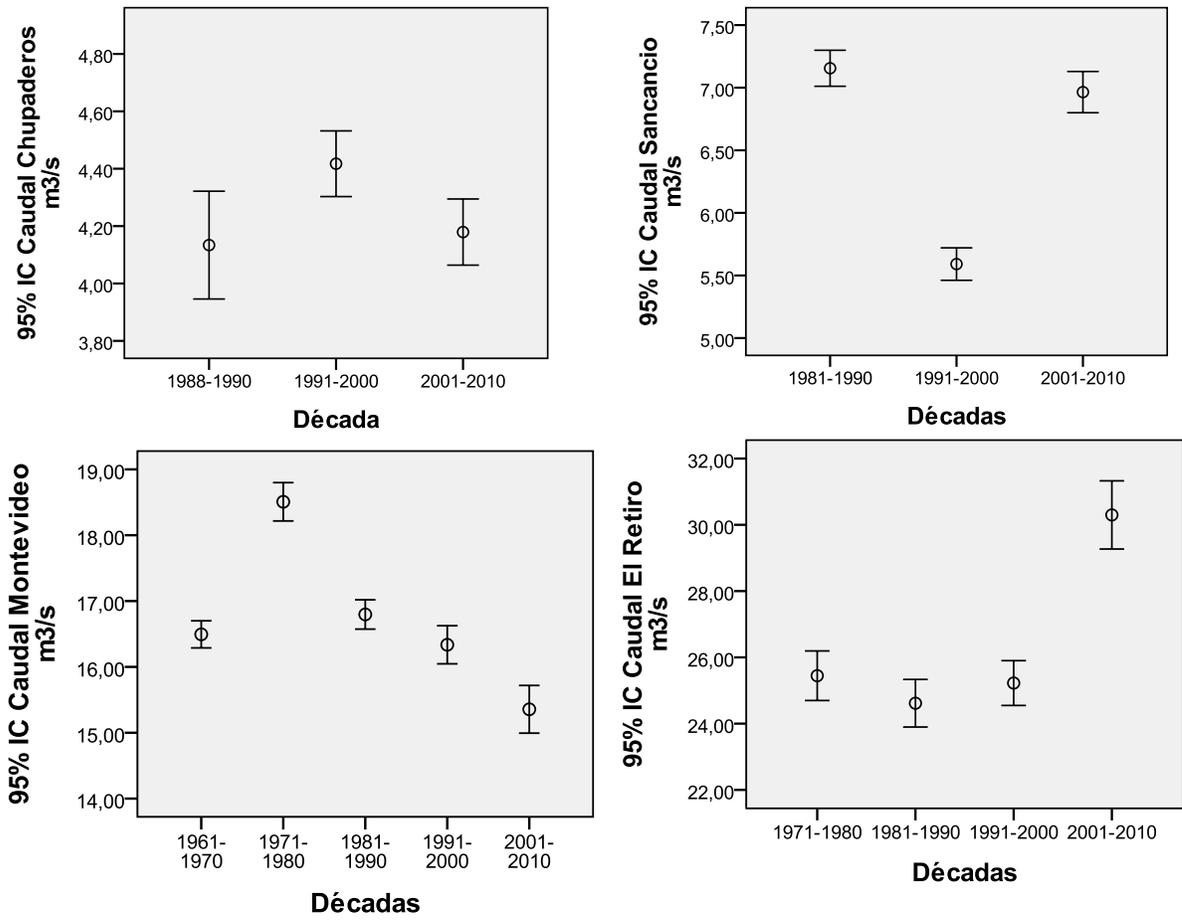


Figura 6.22: Caudales promedio tridecadales

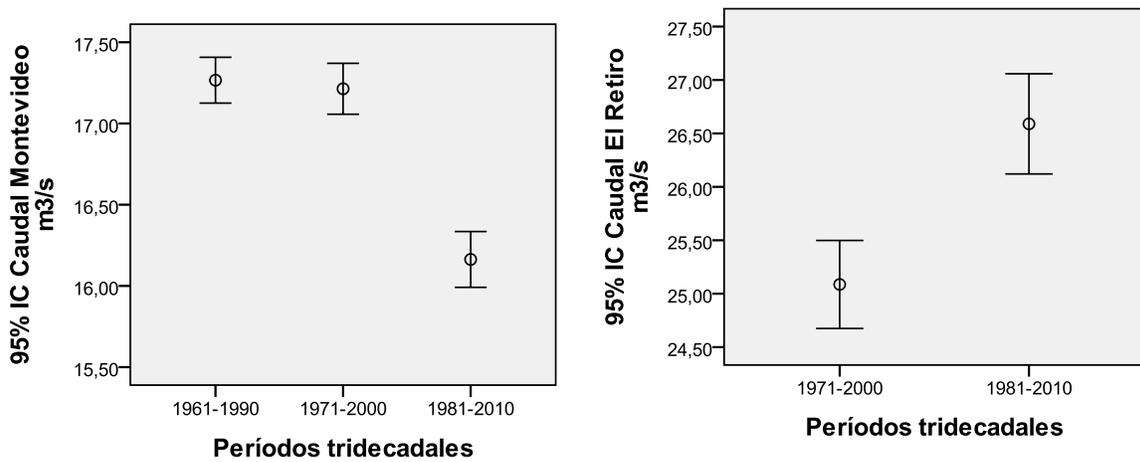
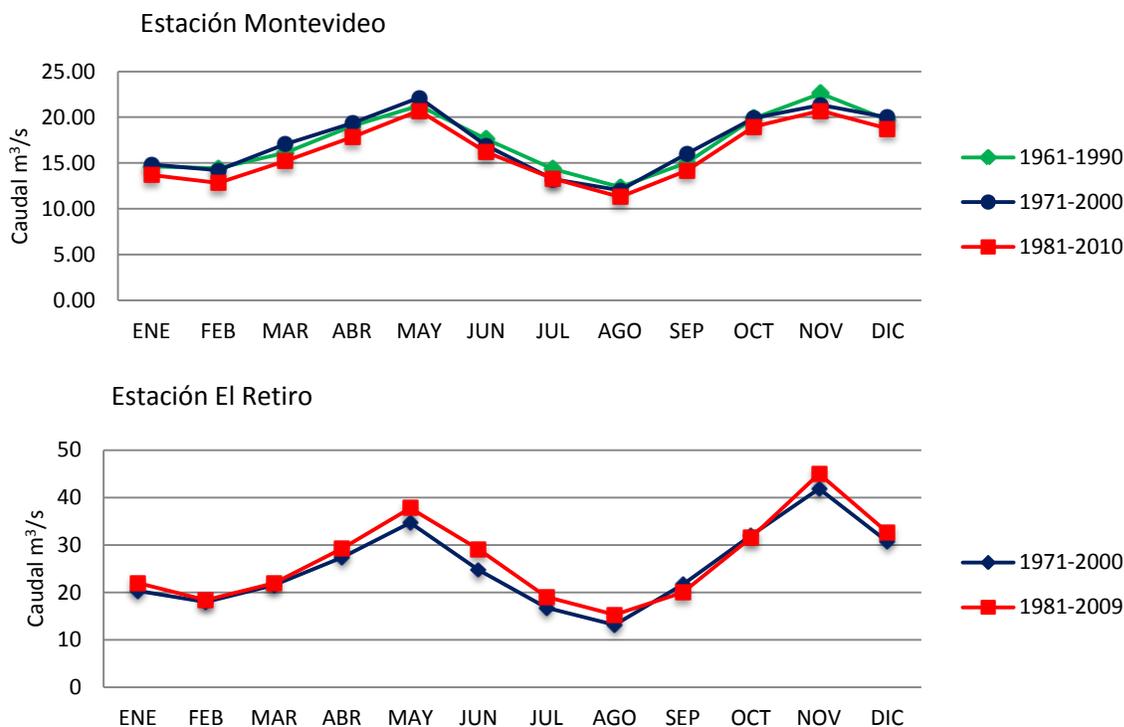
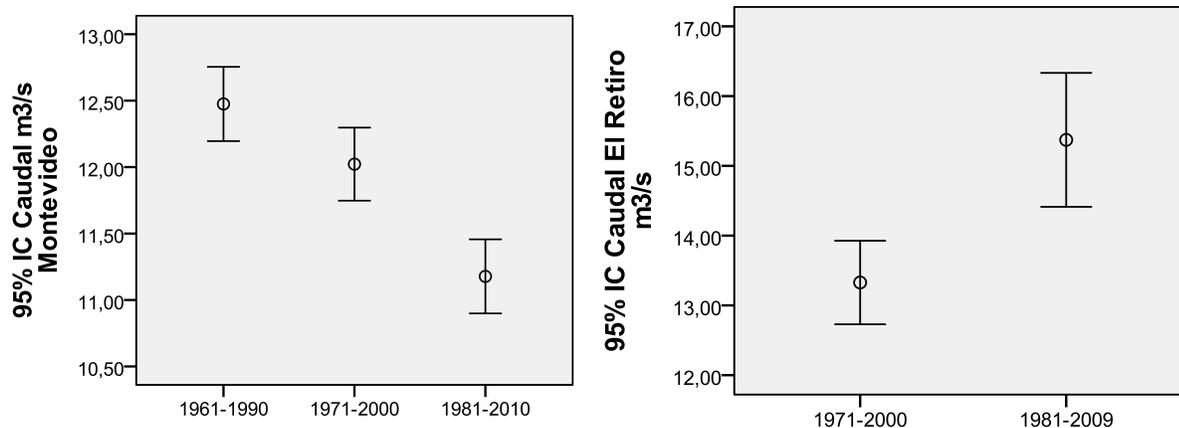


Figura 6.23: Distribución de caudales promedio tridecadales



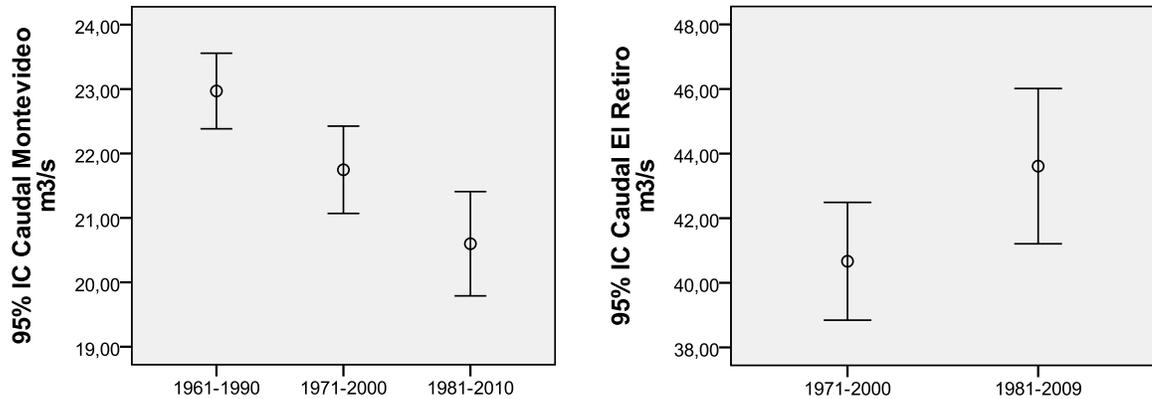
Para el mes más seco- agosto- se realiza el análisis por períodos interdecadales (Figura 6.24), donde se evidencia la reducción significativa de caudal ($\alpha = 0,05$), en la estación Montevideo, alrededor de $1 \text{ m}^3/\text{s}$; mientras que en la estación El Retiro se observa un aumento, estadísticamente significativo ($\alpha = 0,05$), $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio.

Figura 6.24: Caudales promedio tridecadales – Agosto



Para el mes más lluvioso - noviembre, el análisis interdecal indica reducción significativa ($\alpha = 0,05$), en Montevideo; sin embargo en la estación El Retiro si bien se aprecia el aumento en la Figura 6.25, estadísticamente no hay diferencias significativas ($\alpha = 0,05$).

Figura 6.25: Caudales promedio tridecadales- Noviembre



El resumen de los cambios presentados se consolida en la Tabla 6.17; se reporta la anomalía del último período (1981-2010), con respecto al período inmediatamente anterior (1971-2000). En la estación Montevideo se tiene una disminución en el caudal del 6%, mientras que en la estación El Retiro incremento del caudal 6%, de acuerdo con los registros observados en las estaciones.

Tabla 6.17: Anomalías en los caudales observados

Caudales - m ³ /s	Montevideo			El Retiro		
	1971-2000	1981-2010	Anomalía %	1971-2000	1981-2009	Anomalía %
Q _{promedio}	17,21	16,14	-6,2*	25,09	26,60	+6,0*
Q _{medio (P₅₀)}	15,18	14,22	-6,2	18,10	18,20	+0,6
Q _{medioInt.}	15,71	14,99	-4,5	23,46	26,50	+7,0
Q _{max-extremos}	66,69	226,87	240%	289,00	316,60	+9,6
Q _{min-extremos}	3,57	3,07	-14%	2,00	2,40	+20,0
Q _{amb. (P₇₅)}	11,32	10,77	-4,9	11,00	11,85	+7,72

*Diferencias significativas ($\alpha = 0,05$)

Los resultados de la simulación hidrológica, a escala diaria, con el modelo TETIS para las series históricas se resumen en la Tabla 6.18; se emplearon los parámetros de la Tabla 5.1 para la estación El Retiro y de la Tabla 5.10 para las estaciones Chupaderos, Sancancio y Montevideo. Para el período 1961-1990, sólo se tienen registros para el cálculo de los errores de balance en la estación Montevideo, los cuales son muy buenos sólo del -4,5%; dichos errores continúan siendo

bajos para el período 1971-2000, en las estaciones El Retiro y Montevideo en las cuales se tienen registros históricos. De acuerdo con la simulación, se esperaría una reducción en el flujo en el transcurso del tiempo; las anomalías estimadas a partir de los caudales simulados, con respecto al período inmediatamente anterior, se resumen en la Tabla 6.19, en promedio la reducción es del 3,7%.

Tabla 6.18: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala diaria

Estación	Período Histórico- Caudales m ³ /s					
	1961-1990	Balance, %	1971-2000	Balance; %	1981-2010	Balance,%
El Retiro	27,22	ND	26,01	-3,7%	25,53	4,2%*
Montevideo	16,50	4,45%	15,92	7,5%	15,61	3,3%
Sancancio	7,01	ND	6,62	ND	6,32	5,2%
Chupaderos	4,57	ND	4,49	ND	4,23	ND

*Comparación con el período 1981-2009.

Tabla 6.19: Anomalías estimadas en los caudales promedio –escala diaria

Estación	Anomalías en caudales simulados m ³ /s	
	1971-2000	1981-2010
El Retiro	-4,5%	-1,8%
Montevideo	-3,6%	-1,9%
Sancancio	-5,6%	-4,5%
Chupaderos	-1,7%	-5,7%

*Comparación con el período 1981-2009.

Con los modelos de escala mensual, que tuvieron desempeño satisfactorio en la modelación hidrológica de las condiciones presentes (1981-2010), se realiza la simulación para el período 1971-2000, en la estación El Retiro; los resultados comparativos se presentan Tabla 6.20. Con el modelo Thomas se estiman reducciones en el caudal del 10%; mientras que con el modelo ARMA no se encuentran cambios significativos.

Tabla 6.20: Caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica- escala mensual

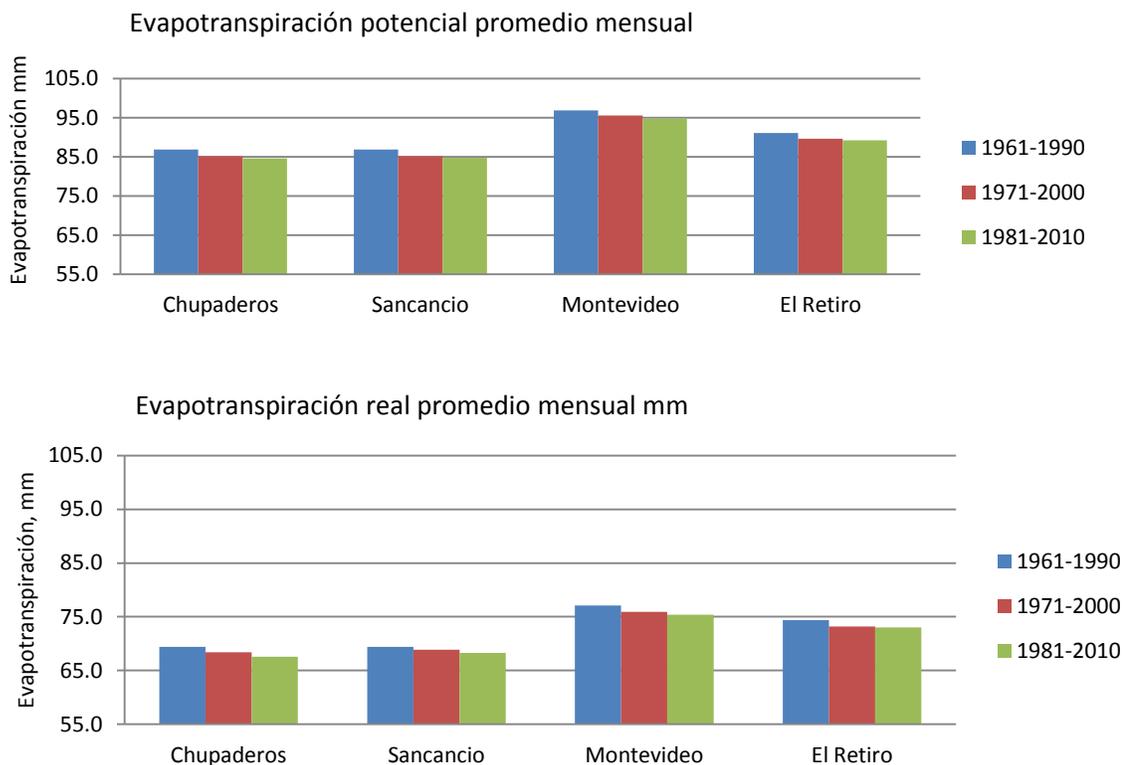
Modelos	1971-2010				1981-2010	
	Caudal m ³ /s	Balance	NASH	Interpretación del Modelo	Caudal m ³ /s	Cambio Caudal, %
Caudal Observado	25,09				26,57	6,0%
Modelos Conceptuales de Balance						
Tetis parámetros calibración El Retiro	25,54	1,8%	0,63	Satisfactorio	25,05	-1,9%
Modelo Thomas abcd	27,04	7,8%	0,62	Satisfactorio	24,27	-10%
Modelos Autorregresivos						
ARMA (1,1) Salas y Smith	27,98	11,5%	0,56	Satisfactorio	28,01	0,1%

En general, las diferencias entre los caudales observados y simulados, se presentan por los errores de balance ($< 5\%$ en El Retiro), o por cambio en el uso del suelo, los cuales no fueron considerados en esta investigación. Sin embargo debe tenerse en cuenta que el río Guacaica, uno de los principales aferentes del Chinchiná, nace en la zona de páramos y desemboca después de la estación Montevideo. Por tanto, podría atribuirse en parte, el incremento del caudal observado en la estación El Retiro (aumento de caudal en agosto), al retroceso de los nevados, el cual no fue considerado en la modelación hidrológica.

6.7 Evapotranspiración

Con base en los resultados de la simulación, el comportamiento de la evapotranspiración potencial y real en el tiempo se observa en la Figura 6.26; se observa disminución en el tiempo, consistente con las tendencias en radiación solar.

Figura 6.26: Comportamiento evapotranspiración potencial y real



7. Alteraciones por variabilidad climática

La identificación de la ocurrencia de fenómenos del Niño y la Niña se realiza con índices océano-atmosféricos desarrollados por diferentes instituciones como la NOAA, las cuales registran las anomalías sobre las temperaturas del Océano Pacífico. Se analizaron las variables temperatura media, precipitación y caudal tomando como el ciclo anual de las anomalías estandarizadas, reportadas en los estudios de Poveda et al (2002, 2011).

7.1 Temperatura media

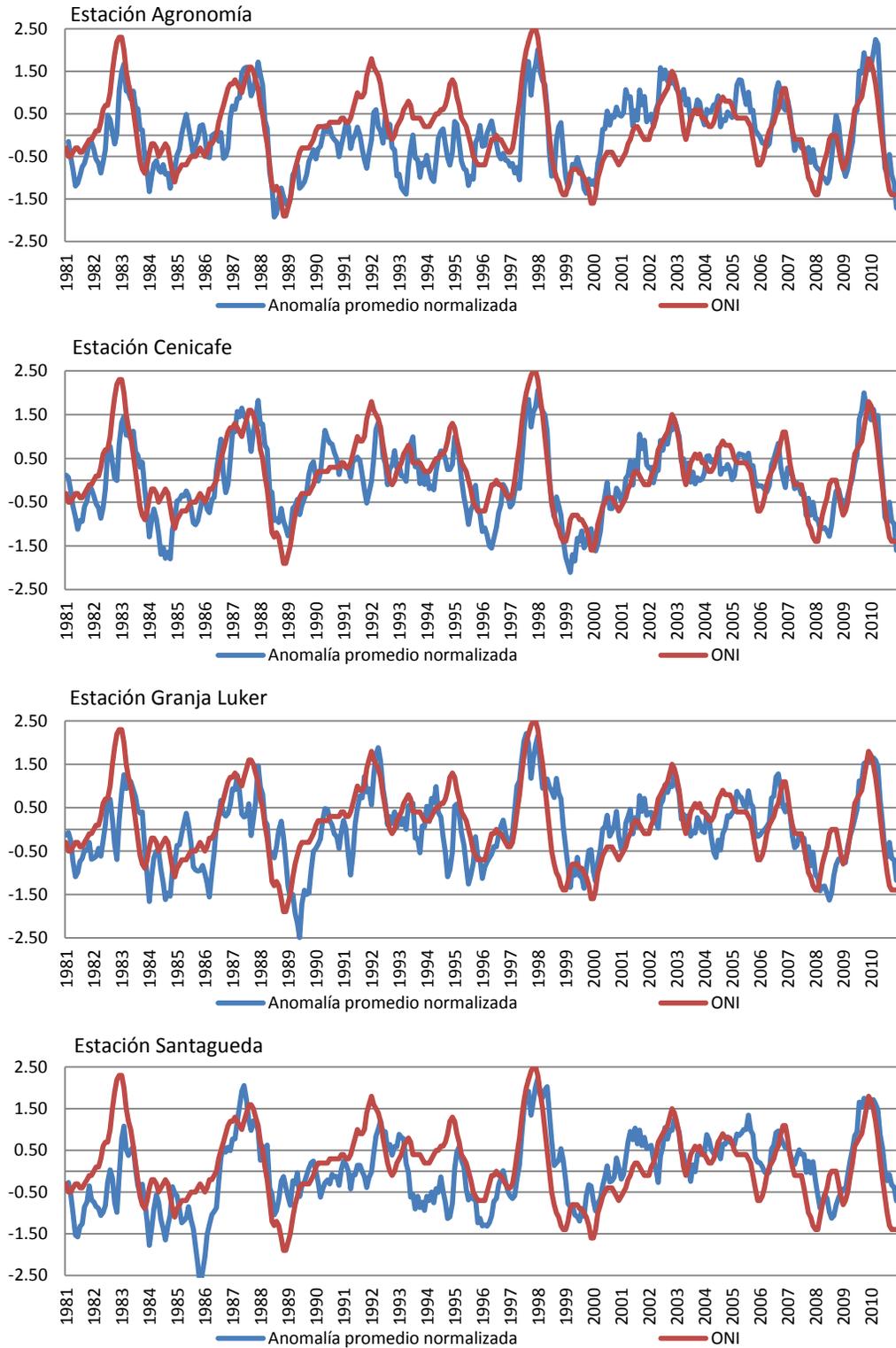
El análisis de la alteración en la temperatura media por efecto de la Oscilación del Sur - ENSO, fue realizado teniendo cuenta el índice Oceánico el Niño-ONI-, donde los valores superiores a $0,5^{\circ}\text{C}$ corresponden a eventos cálidos -el Niño- mientras que los inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ a los episodios fríos-la Niña-. Cada estación se analizó para el período 1981-2010, tomando como base dicho índice y las anomalías estandarizadas.

La Figura 7.1 muestra la evolución de las anomalías estandarizadas en la temperatura promedio acumulado trimestral y el índice oceánico ONI. Se observa un comportamiento similar entre las estaciones con relación directa entre ambas variables. Los coeficientes de correlación son de 0.65, 0.78, 0.66 y 0.58 para las estaciones Agronomía, Cenicafé, Granja Luker y Santaguada, respectivamente.

Aunque cada evento de La Niña, tiene sus particularidades, la anomalía promedio estandarizada es -0.60 en Agronomía, -0.8 en Cenicafé, -0.55 en Granja Luker y -0.53 en Santaguada. Por otra parte para el fenómeno del Niño la anomalía promedio estandarizada es 0.64, 0.73, 0.68 y 0.65 en las mismas estaciones, respectivamente.

Para el período 1981-2010, los eventos más intensos del Niño se presentaron en 1997-1998 y en 2009-2010 con anomalías estandarizadas superiores a 1.5. Para la Niña, por su parte, los fenómenos más fuertes se presentaron en el 1988-1989 y 2010-2011 con anomalías estandarizadas inferiores a -1.5.

Figura 7.1: Evolución de la anomalía estandarizada en la temperatura media y el ONI



7.2 Precipitación

La Figura 7.2 presenta el comportamiento de la anomalía estandarizada en la precipitación promedio trimestral acumulada en comparación con el valor negativo del índice oceánico ONI, para las diferentes estaciones de la cuenca en el período 1981-2010. La correlación es directa con $-ONI$ e inversamente proporcional con ONI ; los coeficientes de correlación entre las variables anomalía y ONI se muestran en la Tabla 7.1; son más altos en las estaciones ubicadas en la cuenca media-alta y media, para el período completo 1981-2010.

Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

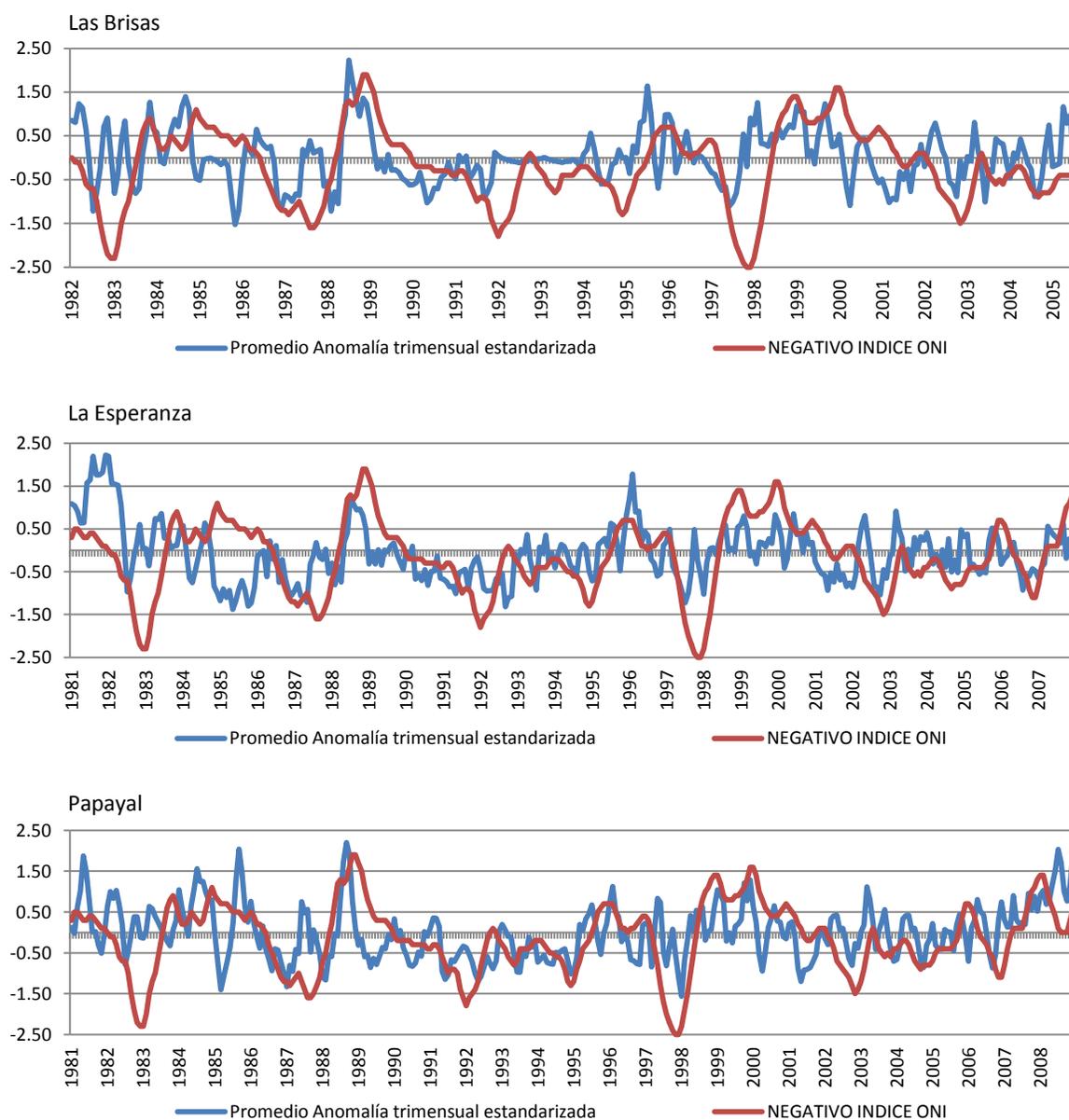


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

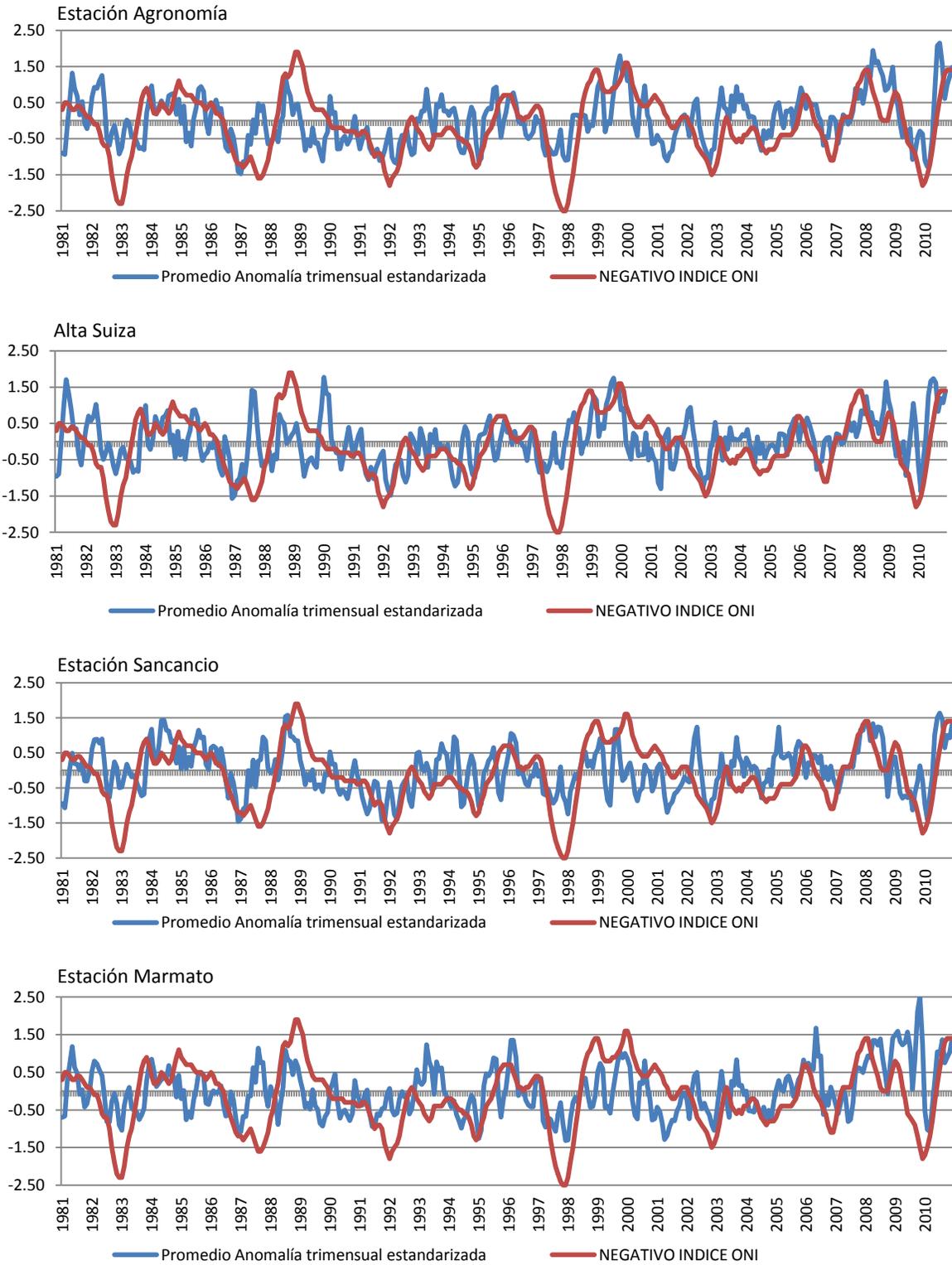


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

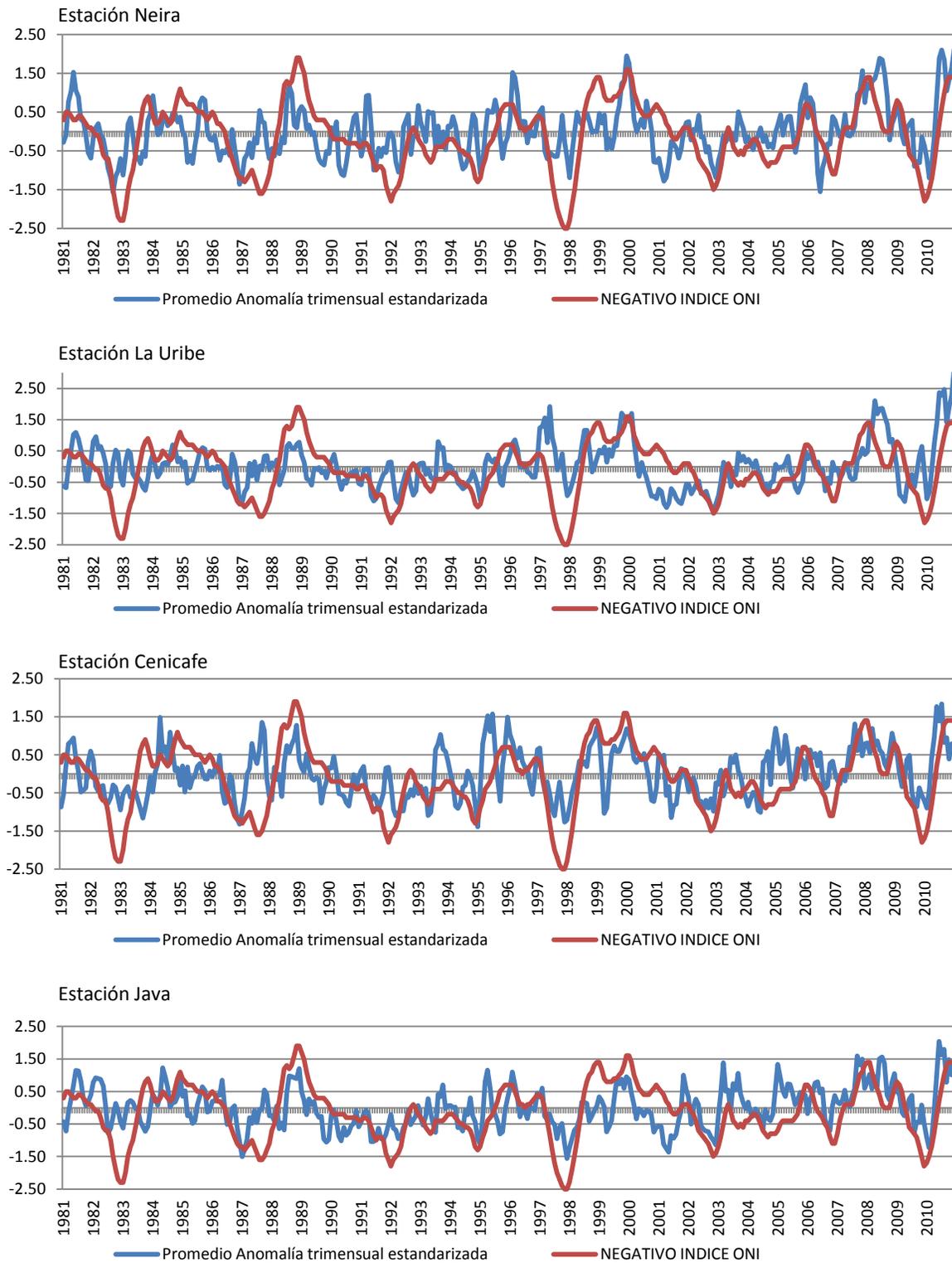


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI

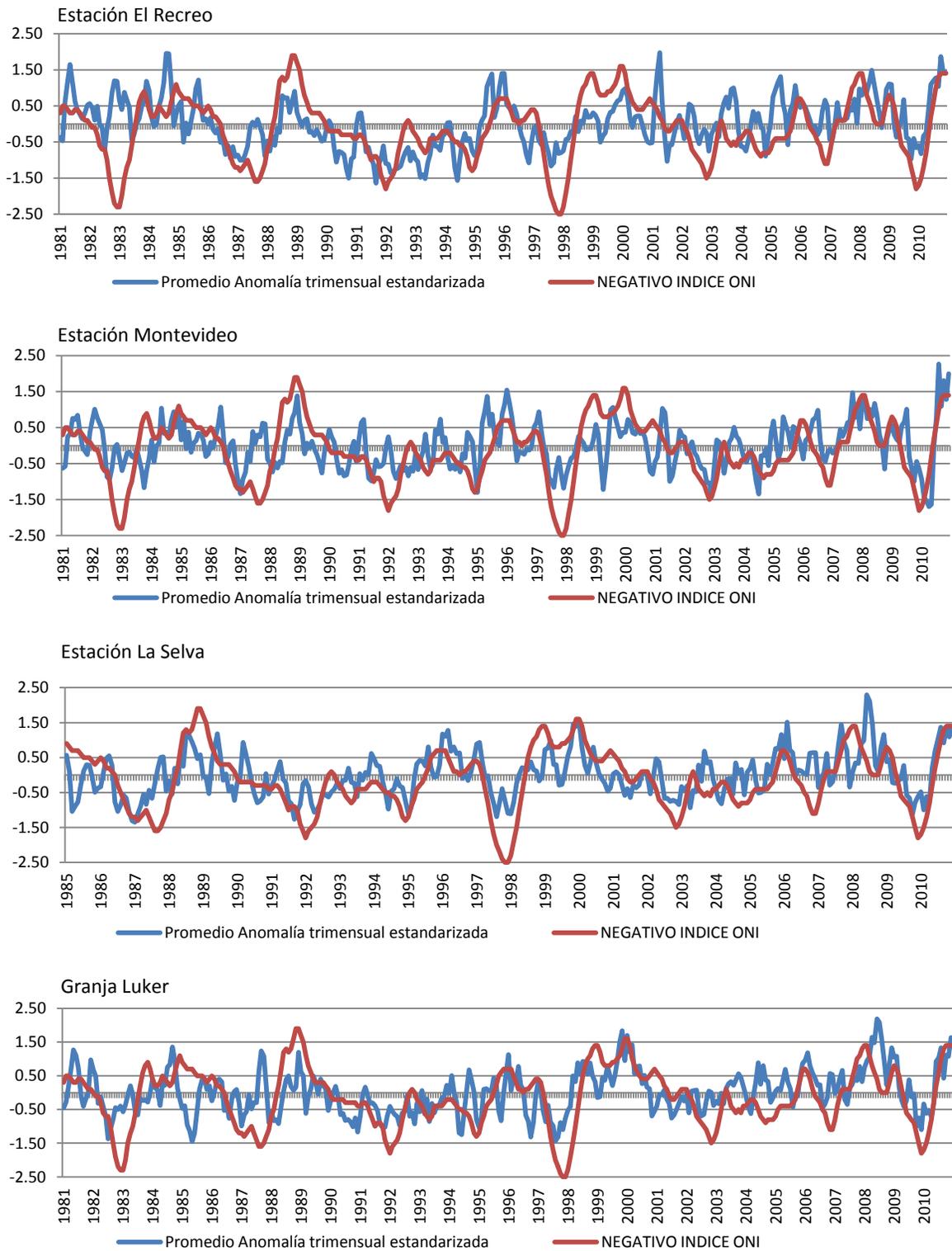
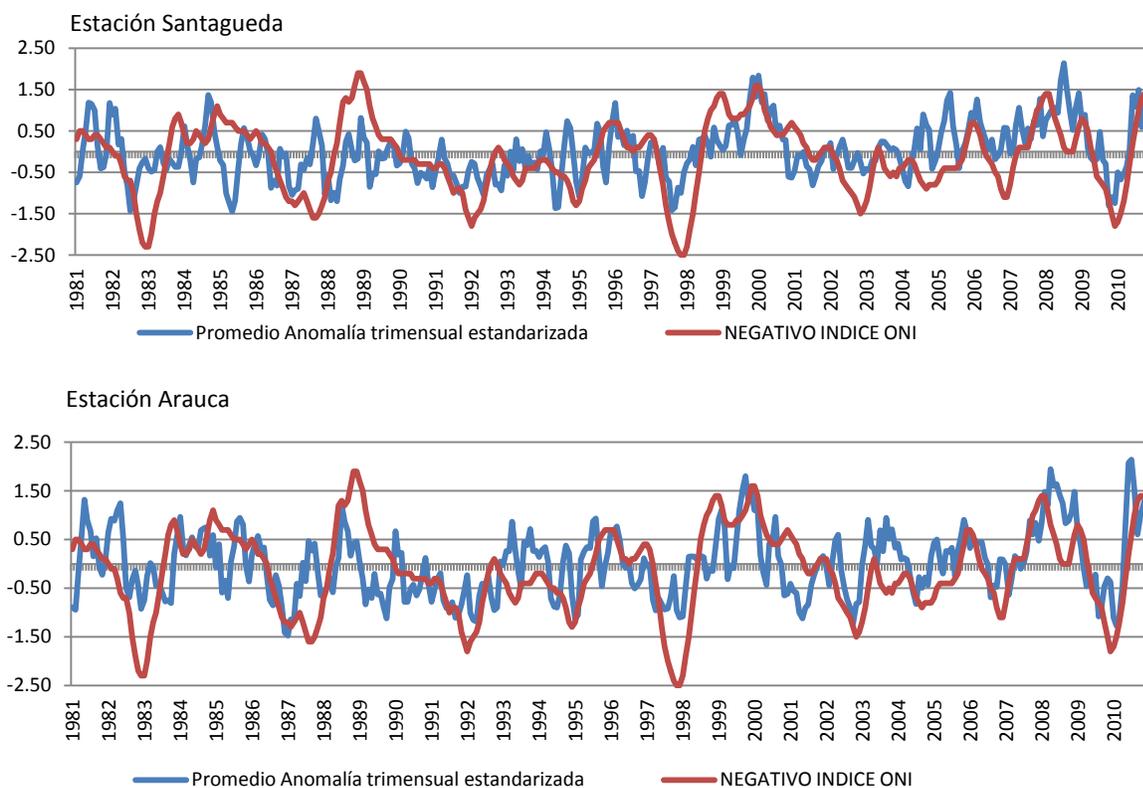


Figura 7.2: Evolución de la anomalía estandarizada en la precipitación media y el ONI**Tabla 7.1:** Coeficientes de correlación Anomalía en la precipitación-índice ONI

Estación	Coefficiente de Correlación	Período
La Selva	0,58	1985-2010
Montevideo	0,51	1981-2010
Agronomía	0,50	1981-2010
Neira	0,50	1981-2010
Cenicafé	0,49	1981-2010
Granja Luker	0,48	1981-2010
Java	0,47	1981-2010
Sancancio	0,46	1981-2010
El Recreo	0,46	1981-2010
Santaguada	0,46	1981-2010
Arauca	0,46	1981-2010
Alta Suiza	0,42	1981-2010
Papayal	0,39	1981-2008
Estación La Uribe	0,38	1981-2010
Marmato	0,36	1981-2010
La Esperanza	0,30	1981-2007
Las Brisas	0,27	1982-2005

Eventos fríos La Niña. Como cada fenómeno ENSO tiene sus particularidades, se analiza el incremento en las lluvias para los distintos episodios fríos de la Niña tomando como base el índice Oceánico El Niño ONI menor que -0,5 (Figura 7.3) y el promedio de las anomalías para dichos períodos. Se calcula el valor medio de las anomalías para cada una de las subcuencas, promediando las estaciones. Se evidencia intensificación del evento por el aumento en la precipitación, en especial durante el episodio 2010-2011, en las cuencas media-alta, media y baja; para la cuenca alta no se tienen registros para este período.

Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña

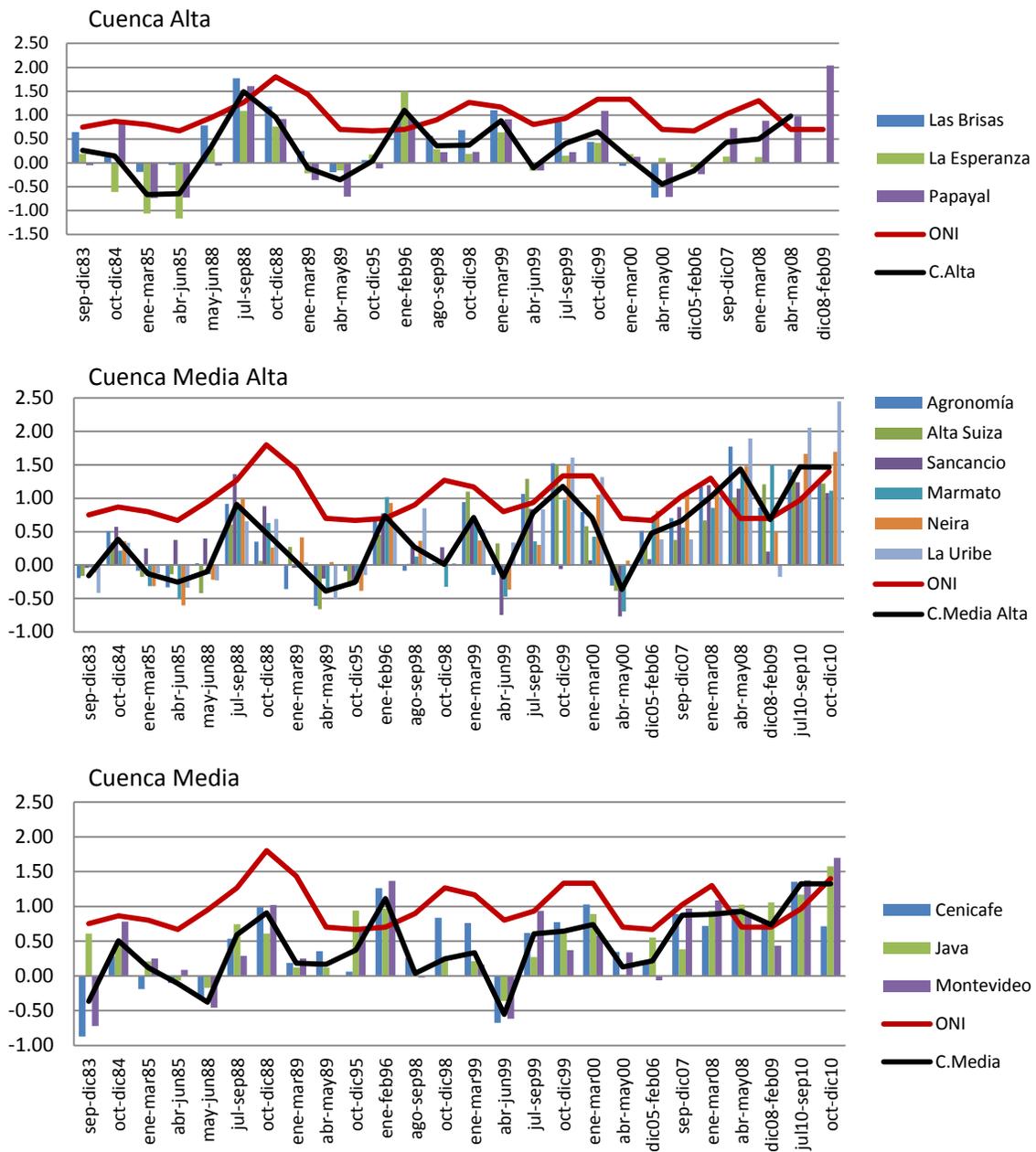
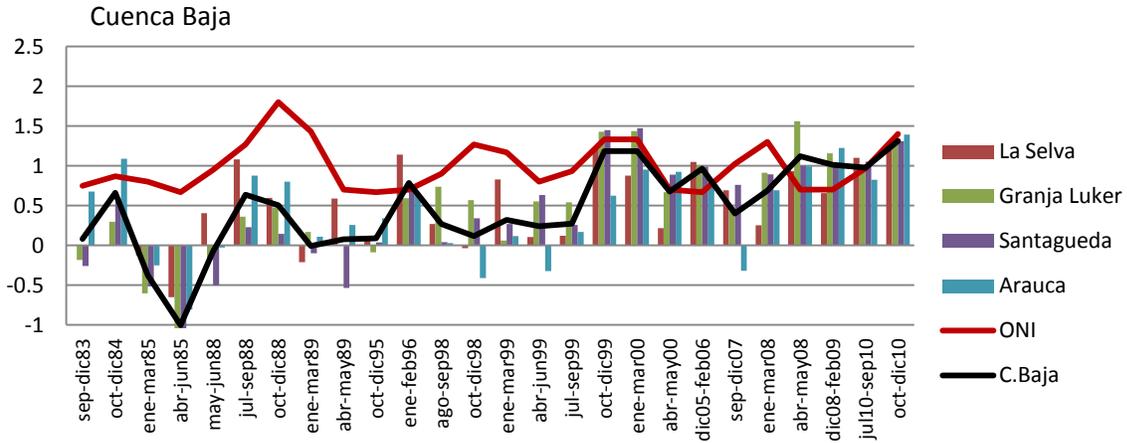


Figura 7.3: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos La Niña



Sin embargo, es más claro observar la intensificación del fenómeno si se toma una sola base de cálculo, por ejemplo el promedio mensual multianual y se evalúa el porcentaje de incremento en la precipitación media en cada uno de los períodos, como se muestra en la Figura 7.4.

Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña

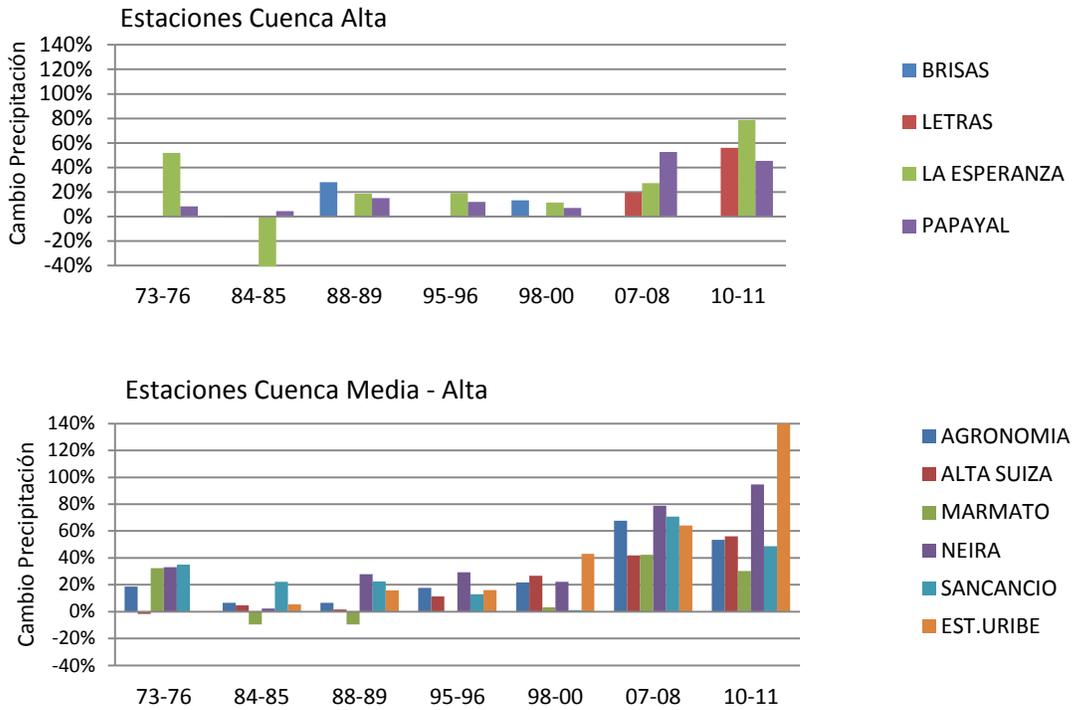
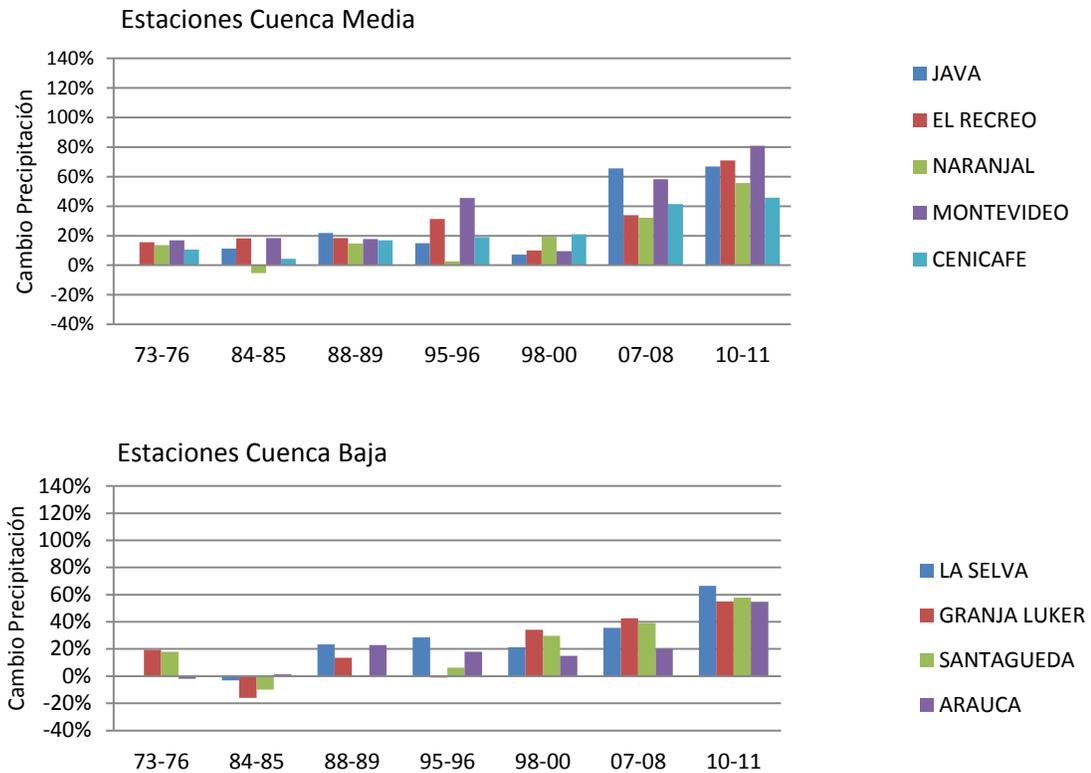


Figura 7.4: Cambios en la precipitación durante eventos fríos La Niña

Eventos cálidos El Niño. El cambio en la precipitación para los distintos episodios cálidos del Niño, se presenta en la Figura 7.5. Los eventos más intensos corresponden a los períodos 2009-2010 y 1991-1992, con reducciones en la lluvia en promedio del 26% y 30%, respectivamente.

Para el período 1981-2010, los valores consolidados de las anomalías estandarizadas promedio durante el fenómeno del Niño y La Niña se resumen en la Tabla 7.2, para las diferentes estaciones de la cuenca. Es importante anotar que para la cuenca alta el período de evaluación es más corto, según lo indicado en la Tabla 7.1. Para los eventos fríos, la anomalía estandarizada en las lluvias es 0.28 ± 0.24 en la Cuenca alta, 0.44 ± 0.24 en la media alta, 0.44 ± 0.20 en la media y 0.46 ± 0.22 en la cuenca baja. Durante los episodios cálidos, la anomalía en las lluvias es -0.30 ± 0.12 en la cuenca alta, -0.39 ± 0.12 en la media alta, -0.41 ± 0.12 en la media y -0.40 ± 0.13 en la baja.

Figura 7.5: Anomalías estandarizadas en la precipitación durante eventos El Niño

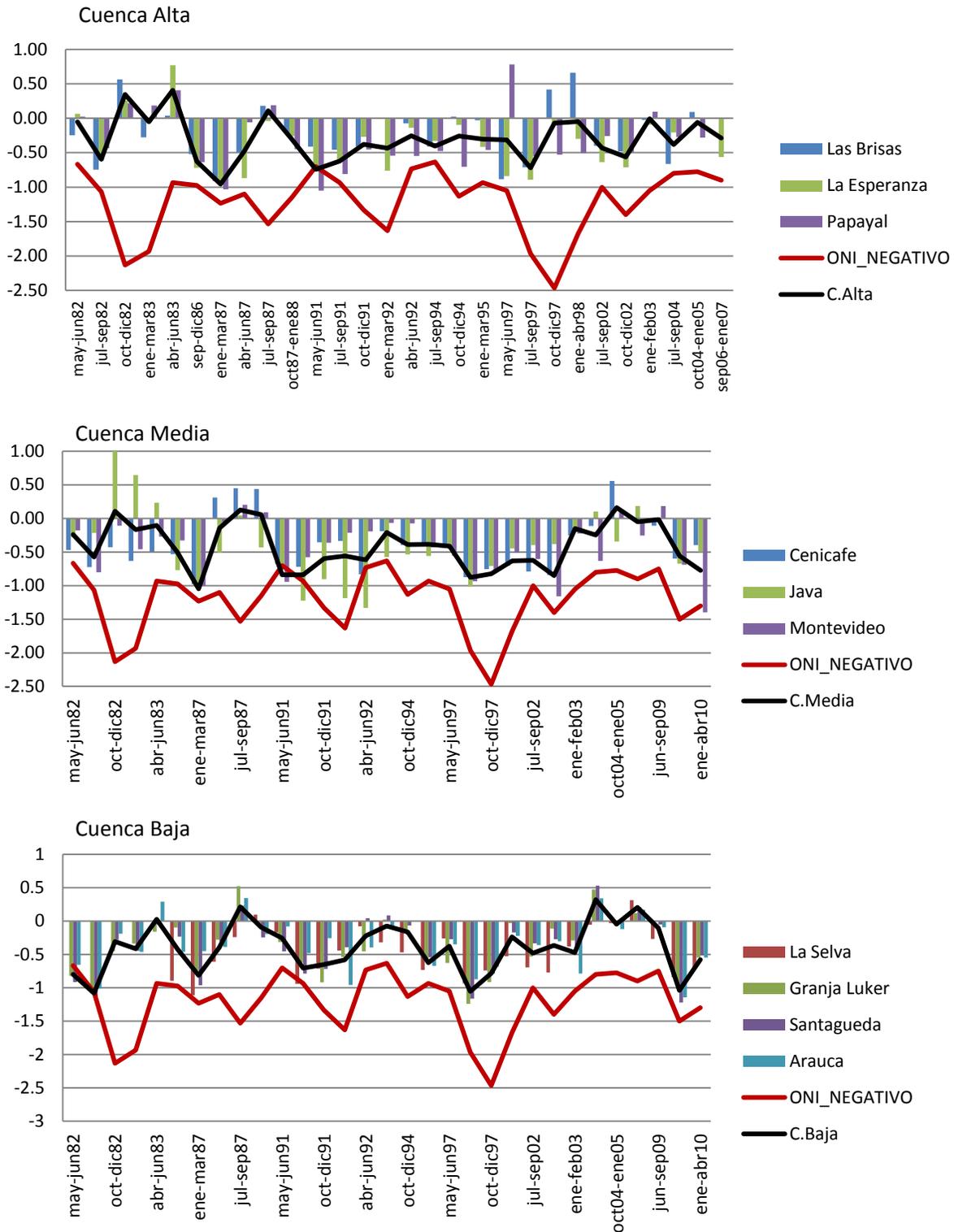
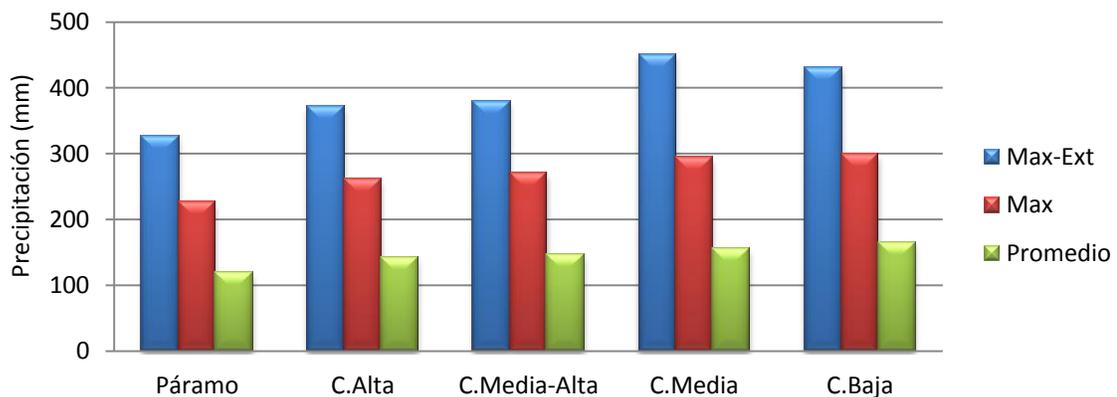


Tabla 7.2: Anomalía estandarizadas en la precipitación promedio 1981-2010 ENSO

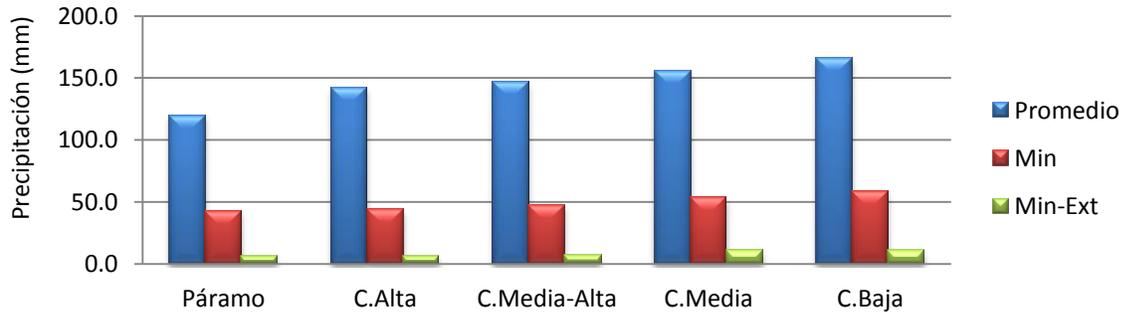
<i>Estación</i>	Niña		Niño	
	Promedio	Intervalo confianza media 95%	Promedio	Intervalo confianza media 95%
Las Brisas	0.43	0.29	-0.24	0.16
La Esperanza	0.12	0.27	-0.36	0.16
Papayal	0.33	0.32	-0.31	0.16
Agronomía	0.47	0.27	-0.48	0.15
Alta Suiza	0.41	0.25	-0.36	0.17
Neira	0.50	0.27	-0.43	0.15
Marmato	0.35	0.26	-0.29	0.23
Planta Sancancio	0.40	0.24	-0.43	0.15
Estación Uribe	0.54	0.32	-0.28	0.18
Java	0.37	0.37	-0.41	0.15
El Recreo	0.51	0.19	-0.42	0.19
Montevideo	0.45	0.25	-0.43	0.15
La Selva	0.52	0.22	-0.48	0.15
Cenicafé	0.45	0.23	-0.39	0.15
Granja Luker	0.50	0.27	-0.38	0.16
Santágueda	0.42	0.28	-0.38	0.16
Arauca	0.44	0.23	-0.36	0.14

Precipitación Máxima. La precipitación mensual máxima, para el período 1981-2010, se consolida en la Figura 7.6. Con respecto a la precipitación media, se presenta un incremento del 85%, con los valores máximos y hasta de 168%, con los extremos.

Figura 7.6: Comportamiento precipitación mensual máxima

Precipitación Mínima. El análisis de la lluvia mensual mínima, para el período 1981-2010, se consolida en la Figura 7.7; comparando la precipitación media con la mínima, la disminución es de 66% y del 94% con los valores extremos.

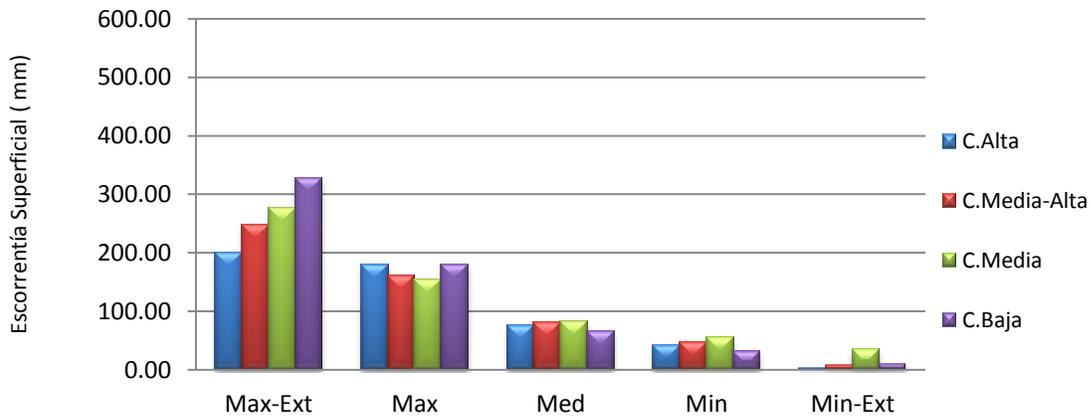
Figura 7.7: Comportamiento de la precipitación mensual mínima 1981-2010



7.3 Escorrentía superficial

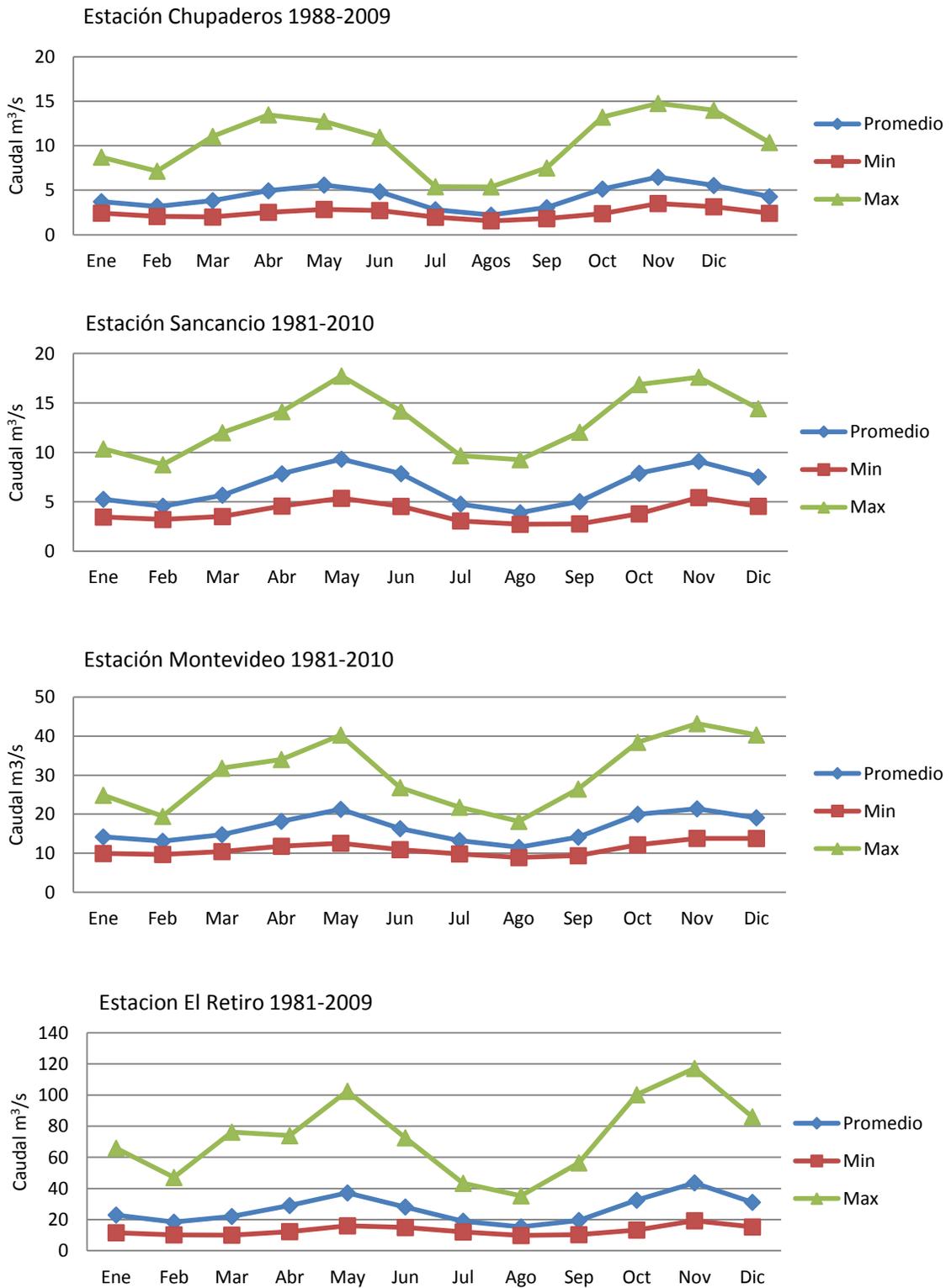
Para el período 1981-2010, el análisis de la escorrentía superficial, tomando como referencia los caudales observados, se presenta en la Figura 7.8. Con relación al promedio, el incremento es 126% con los máximos y 255% con los extremos. Para los mínimos la disminución promedio es 42% y 82% con los valores extremos.

Figura 7.8: Escorrentía superficial mensual río Chinchiná 1981-2010



En las estaciones de la cuenca la distribución del caudal mensual promedio, máximos y mínimos multianuales para el período más reciente se presenta en la Figura 7.9. En relación al caudal promedio, con los máximos el incremento promedio es del 137% en Chupaderos, 101% en Sancancio, 91% en Montevideo y 175% en el Retiro. Con los mínimos, la reducción promedio es del 45% en Chupaderos, 40% en Sancancio, 31% en Montevideo y 51% en el retiro. Por tanto, los efectos son más intensos en las cuencas alta y baja.

Figura 7.9: Comportamiento del caudal en las estaciones del río Chinchiná



Para evaluar el efecto del fenómeno ENSO en los caudales, se evalúan las anomalías estandarizadas de las series de caudales, se calculan los promedios trimestrales acumulados para compararlos con el índice oceánico el Niño, para el cual los valores inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ ocurren en episodios fríos- La Niña y los superiores a $0,5^{\circ}\text{C}$ en eventos cálidos –El Niño. La evolución del comportamiento de las anomalías estandarizadas y el negativo del índice ONI se presenta en la Figura 7.10. Se observa una relación directa entre las variables y por tanto, inversa con ONI, como era de esperarse. Los coeficientes de correlación son 0.54 en la estación Chupaderos, 0.38 en Sancancio, 0.49 en Montevideo y 0.40 en el Retiro.

Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI

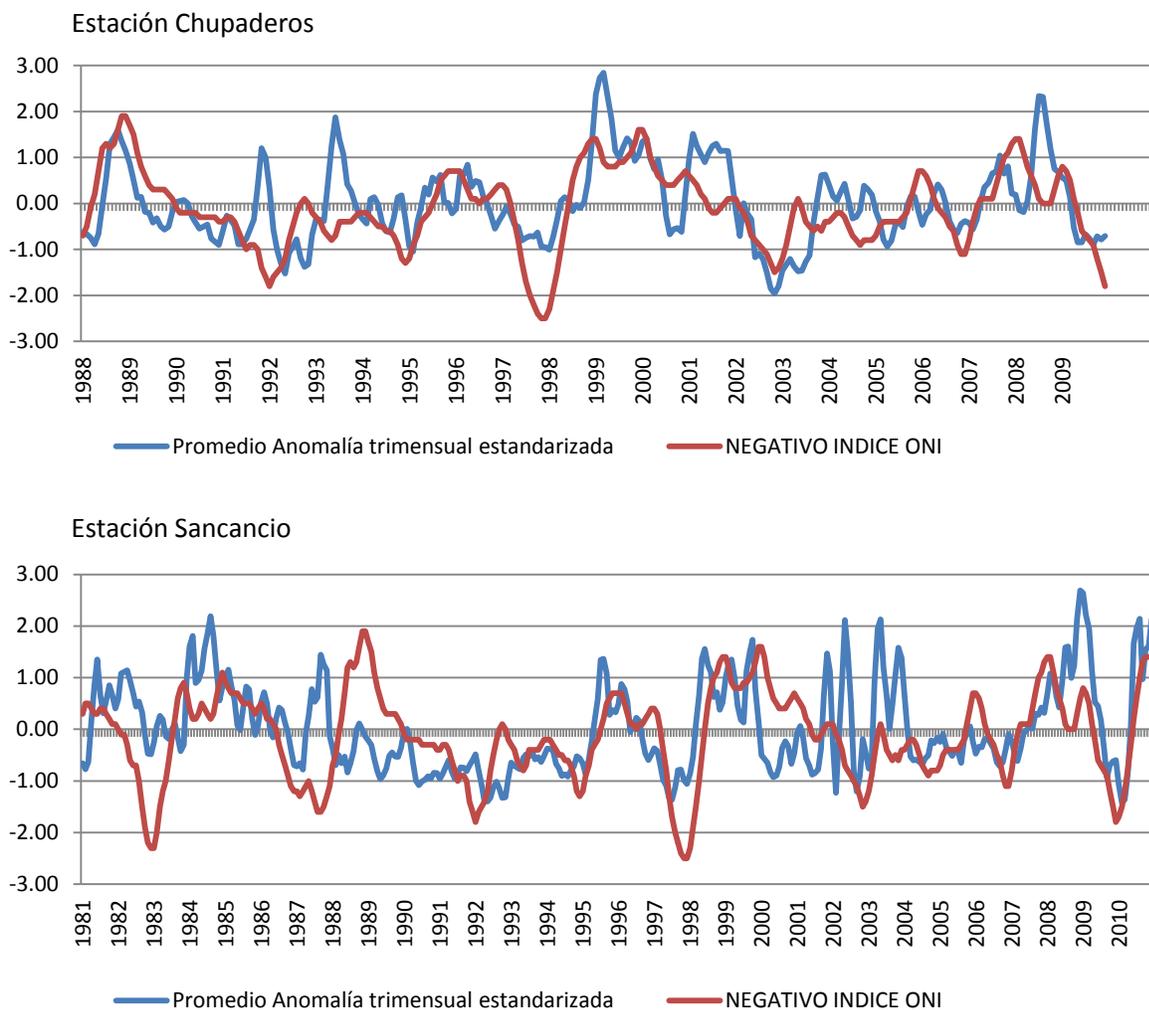
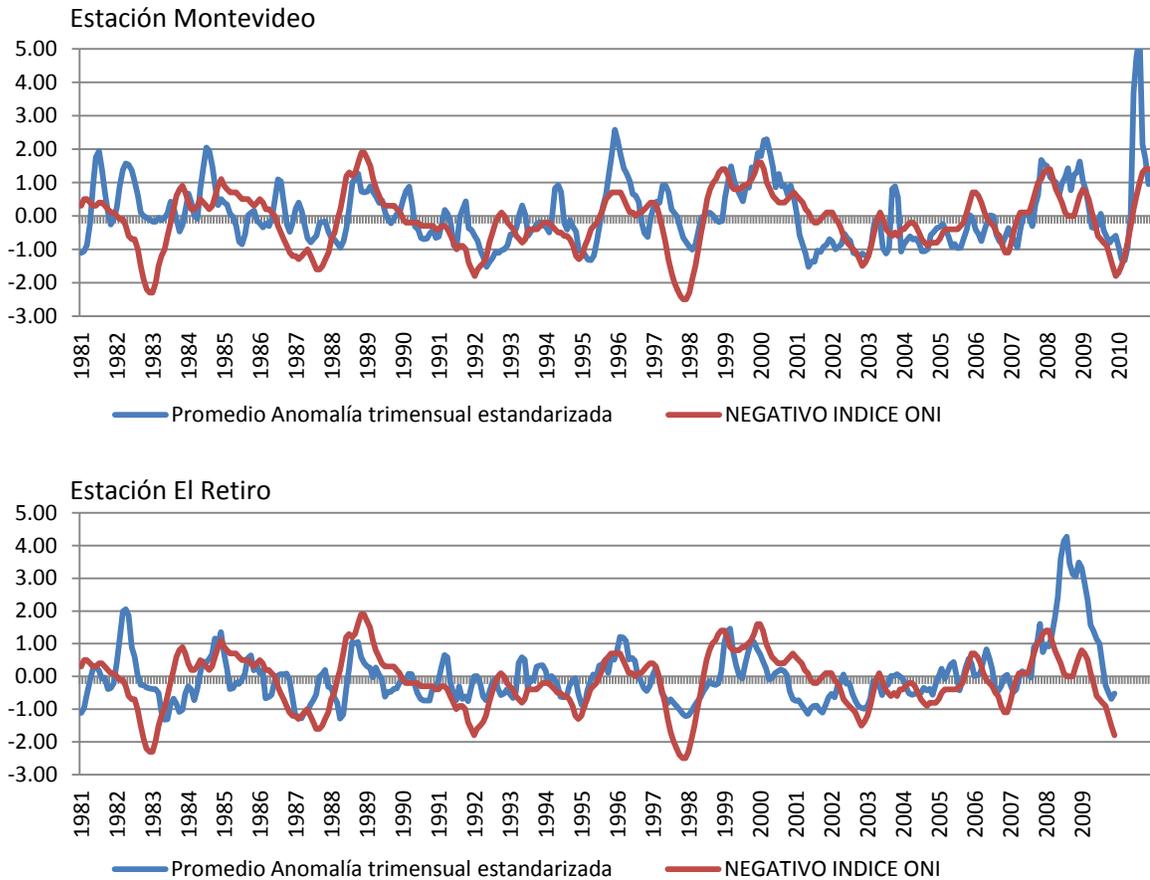


Figura 7.10: Evolución de las anomalías de los caudales medios y el ONI

Las alteraciones en el régimen hidrológico por el fenómeno de la Niña seleccionados de acuerdo con el índice ONI (menores a -0.5), se registran en la Figura 7.12. La anomalía promedio del caudal es 0.70 ± 0.21 en la estación chupaderos; 0.46 ± 0.19 en Sancancio; 0.90 ± 0.23 en Montevideo y 0.51 ± 0.21 en El Retiro. Los cambios en el caudal por los eventos fríos- la Niña, con respecto al caudal multianual 1981-2010, en promedio son del 33% en la cuenca alta, en la media-alta del 9%, en la media del 22% y en la baja del 31%. Se reportan incrementos de caudal en las cuencas media y baja hasta del 80%.

Las anomalías estandarizadas en el caudal medio por efecto del fenómeno del Niño se observan en la Figura 7.12. La anomalía promedio del caudal es -0.52 ± 0.17 en la estación chupaderos; -0.35 ± 0.14 en Sancancio; -0.40 ± 0.12 en Montevideo y -0.40 ± 0.11 en El Retiro. En la cuenca alta la reducción es 34% en promedio, con respecto al caudal multianual promedio del período 1981-2010; en la cuenca media-alta 25%; en la media 14% y en la baja 22%. Es mayor el efecto en la cuenca alta, con alteraciones hasta del 80%.

Figura 7.11: Alteración del caudal medio por eventos fríos La Niña

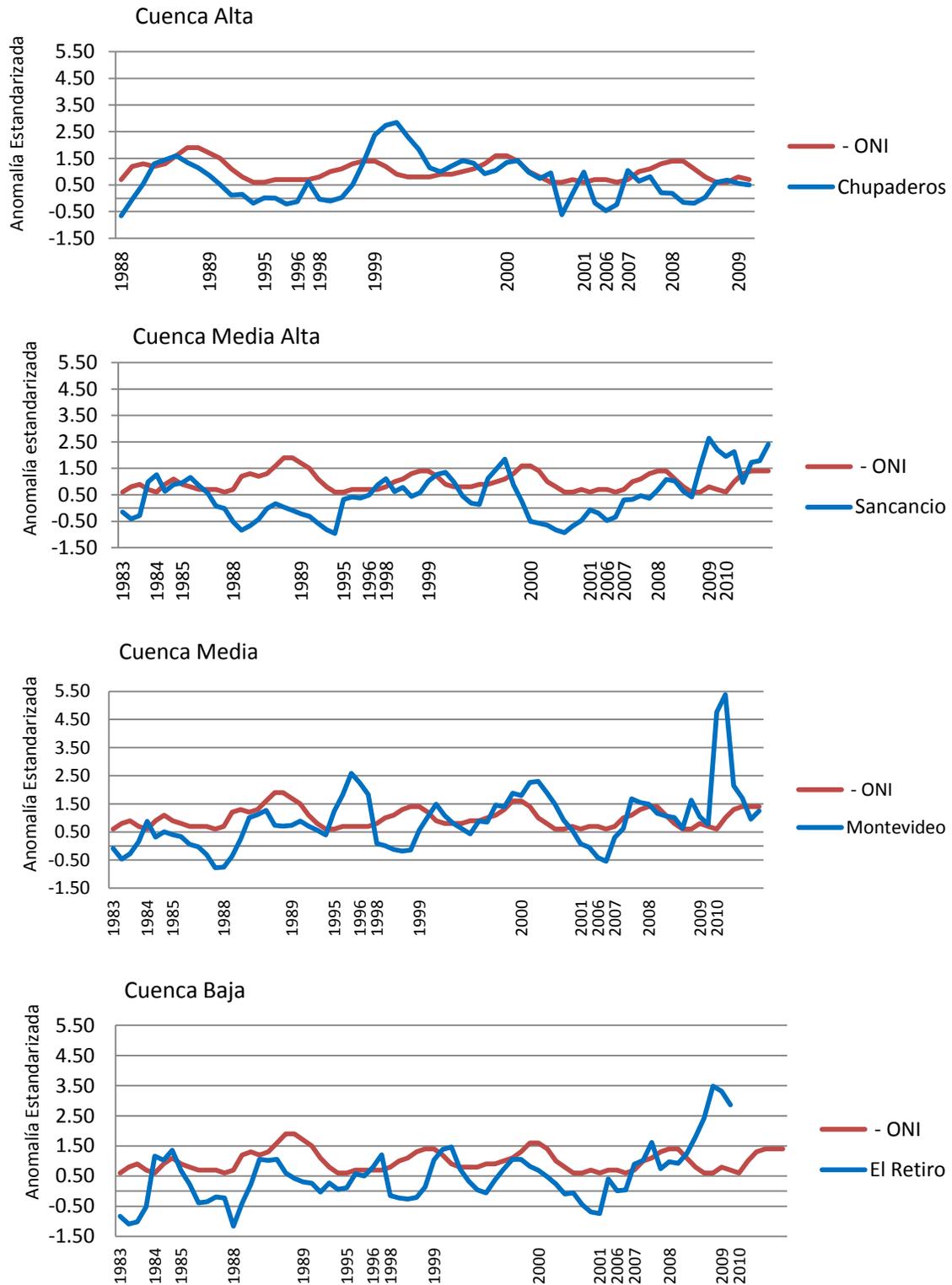
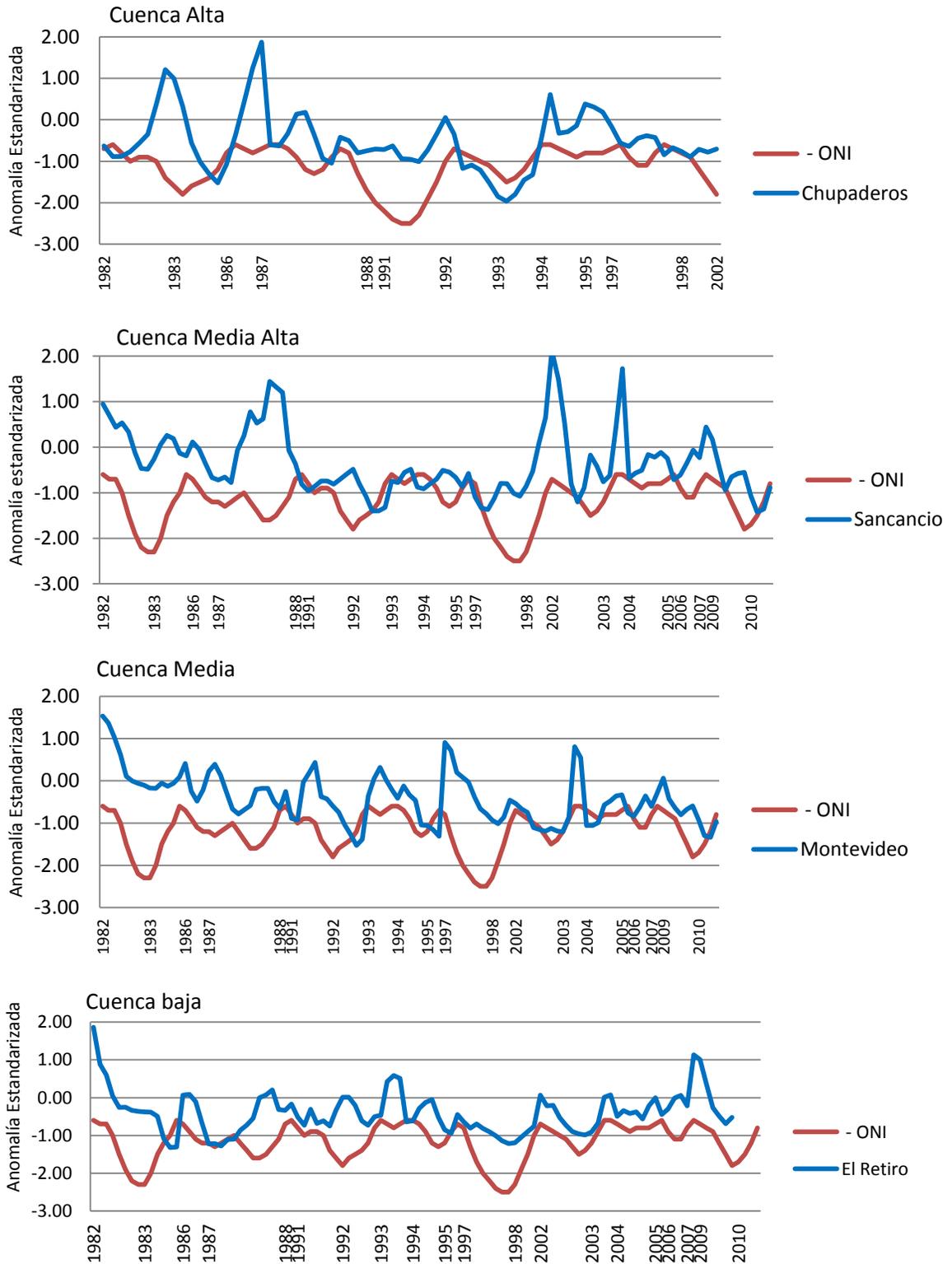


Figura 7.12: Alteración del caudal medio por eventos cálidos El Niño



8. Análisis de Vulnerabilidad

La vulnerabilidad del recurso hídrico fue evaluada considerando la susceptibilidad de la cuenca para conservar y mantener el régimen hidrológico. Para interpretar y analizar los procesos hidrológicos y estimar la vulnerabilidad de la cuenca, se emplean indicadores que permiten caracterizar el régimen hidrológico para el período 1981-2010 y estimar los cambios por variabilidad climática -máximos y mínimos promedios-, determinando de esta manera los indicadores para los años hidrológicos medios, húmedos y secos.

8.1 Indicadores del régimen hidrológico actual promedio

8.1.1 Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

Basados en la curva de duración de caudales medios diarios observados (1981-2009), se calcula el IRH; se incluye además, la evaluación con los caudales obtenidos por simulación hidrológica, los resultados se presentan en la Tabla 8.1. De acuerdo con lo establecido en la metodología (Tabla 2.4) y como el $IRH < 0,5$, la cuenca tiene muy baja capacidad de retención y regulación de humedad.

El alto coeficiente de variación de las series de caudal que fluctúa desde el 56% en Montevideo, hasta el 93% en el Retiro, es un reflejo de la baja capacidad de regulación hídrica de la fuente. Puede observarse que el IRH calculado con los caudales simulados ($Q_{Simulados}$) es ligeramente mayor que el obtenido con los caudales observados ($Q_{Observados}$). Estos valores no coinciden con los reportados por IDEAM (2010), donde el IRH alcanza una categoría moderada.

Tabla 8.1: Índice de retención y regulación hídrica- IRH. 1981-2009

Estaciones	IRH ($Q_{Observados}$)			IRH ($Q_{Simulados}$)			Categoría IRH < 0,5
	IRH _{promedio}	IRH _{p50}	IRH _{INT.}	IRH _{promedio}	IRH _{p50}	IRH _{INT.}	
Chupaderos	0,31	0,24	0,41	0,45	0,30	0,56	Muy bajo
Sancancio	0,37	0,26	0,33	0,42	0,31	0,37	Muy bajo
Montevideo	0,43	0,32	0,38	0,42	0,30	0,37	Muy bajo
El Retiro	0,36	0,22	0,34	0,35	0,23	0,32	Muy bajo

8.1.2 Caudales ambientales

Los caudales ambientales fueron calculados empleando métodos hidrológicos y representan el Q_{75} de la curva de duración de caudales (CDQ) del período 1981-2009; dado el muy bajo índice de retención y regulación hídrica. Los resultados se resumen en la Tabla 8.2. Los caudales ambientales obtenidos por modelación hidrológica son mayores en la estación Chupaderos (23%) y en Sancancio (9%), mientras que son menores en Montevideo (13%) y en El Retiro (2%).

Tabla 8.2: Caudales ambientales 1981-2009

Estaciones	Caudal ambiental - m^3/s	
	Q_{75} CDQ _{Observados}	Q_{75} CDQ _{Simulados}
Chupaderos	1,84	2,40
Sancancio	3,41	3,73
Montevideo	10,39	9,07
El Retiro	11,85	11,56

Los caudales de recuperación ambiental definidos en el Plan de Ordenamiento de la subcuenca del río Chichiná (CORPOCALDAS, 2008), dependen del tramo o zona del río y fluctúan entre 121 L/s en la cuenca alta, 1139 L/s en la cuenca media alta, 711 L/s en la cuenca media y 848 L/s en la cuenca baja.

En general, el tema de caudales ambientales está en proceso de revisión en Colombia, para tal efecto el Ministerio del Medio Ambiente tiene una propuesta para reglamentación que involucra criterios hidrológicos, hidráulicos, de calidad de agua y disponibilidad y calidad de hábitat (Minambiente, 2010).

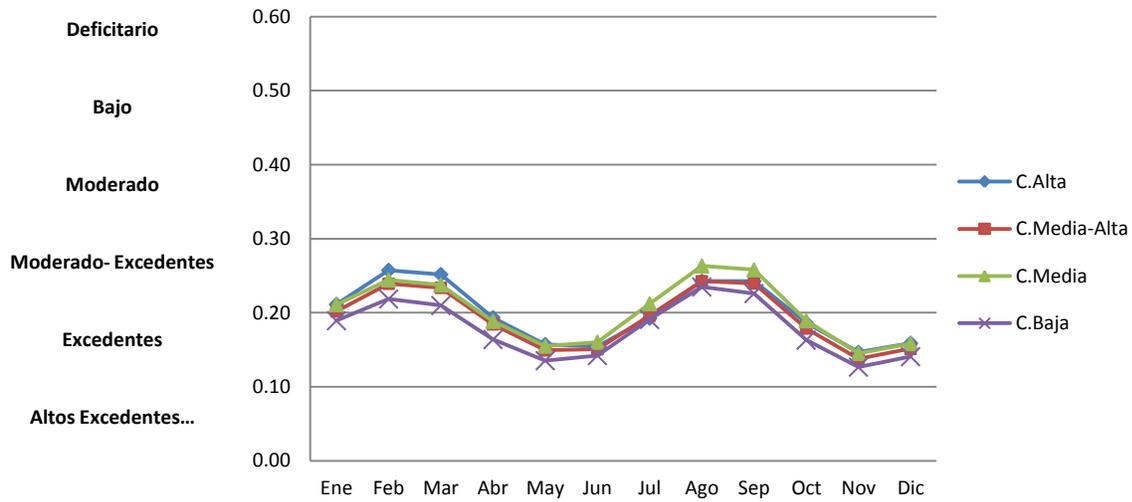
8.1.3 Índice de Aridez

Para el período 1981-2009, los valores medios del índice de aridez, determinados a partir de la evapotranspiración potencial y real se presentan en la Tabla 8.3. En las cuencas media-alta y baja se tienen excedentes de aguas; mientras que en la cuenca alta y media son moderados y con excedentes de agua. El índice de aridez varía de 0,26 a 0,13 y el comportamiento mensual se representa en la Figura 8.1, curva típica bimodal con valores más altos en los meses cálidos.

Tabla 8.3: Índice de Aridez 1981-2009

Estaciones	Índice de Aridez- la		
	Valor promedio	CV	Categoría
Chupaderos	0,20	35%	Moderado y excedentes
Sancancio	0,19	35%	Excedentes
Montevideo	0,20	36%	Moderado y excedentes
El Retiro	0,18	37%	Excedentes

Figura 8.1: Variación mensual del Índice de Aridez 1981-2009



8.1.4 Indicadores de calidad del agua

Tomando como base los estudios realizados por CORPOCALDAS (2006), los índices de Calidad- ICA se presentan en la Figura 8.2; la concentración de contaminantes en la cuenca del río Chinchiná, en la Figura 8.3 y el índice de contaminación por materia orgánica- ICOMO en la Figura 8.4. El índice de calidad está catalogado como malo y el de contaminación es alto. El índice de Alteración Potencial de la Calidad del agua-IACAL se resume en la Tabla 8.4 y se clasifica como muy alto; igual clasificación reporta el IDEAM, (2010).

Figura 8.2: Índice de Calidad ICA

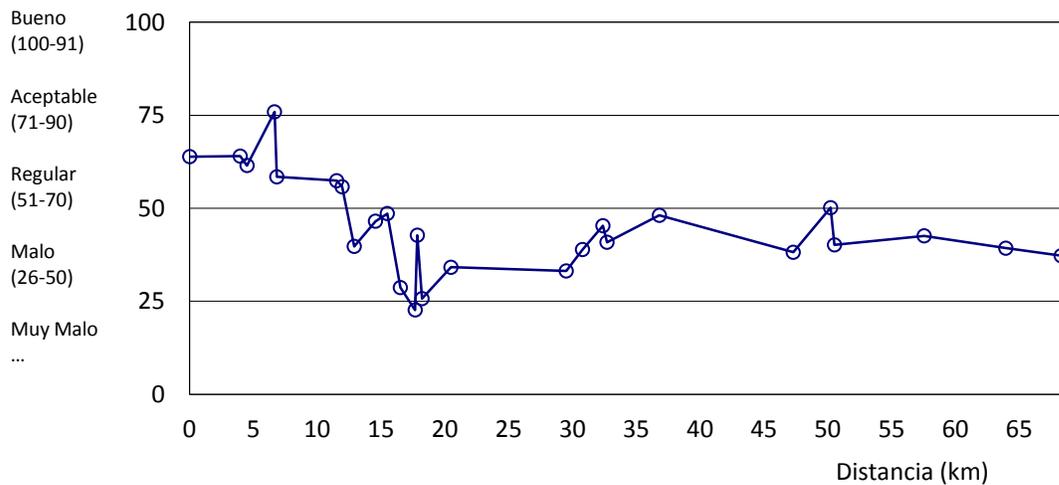
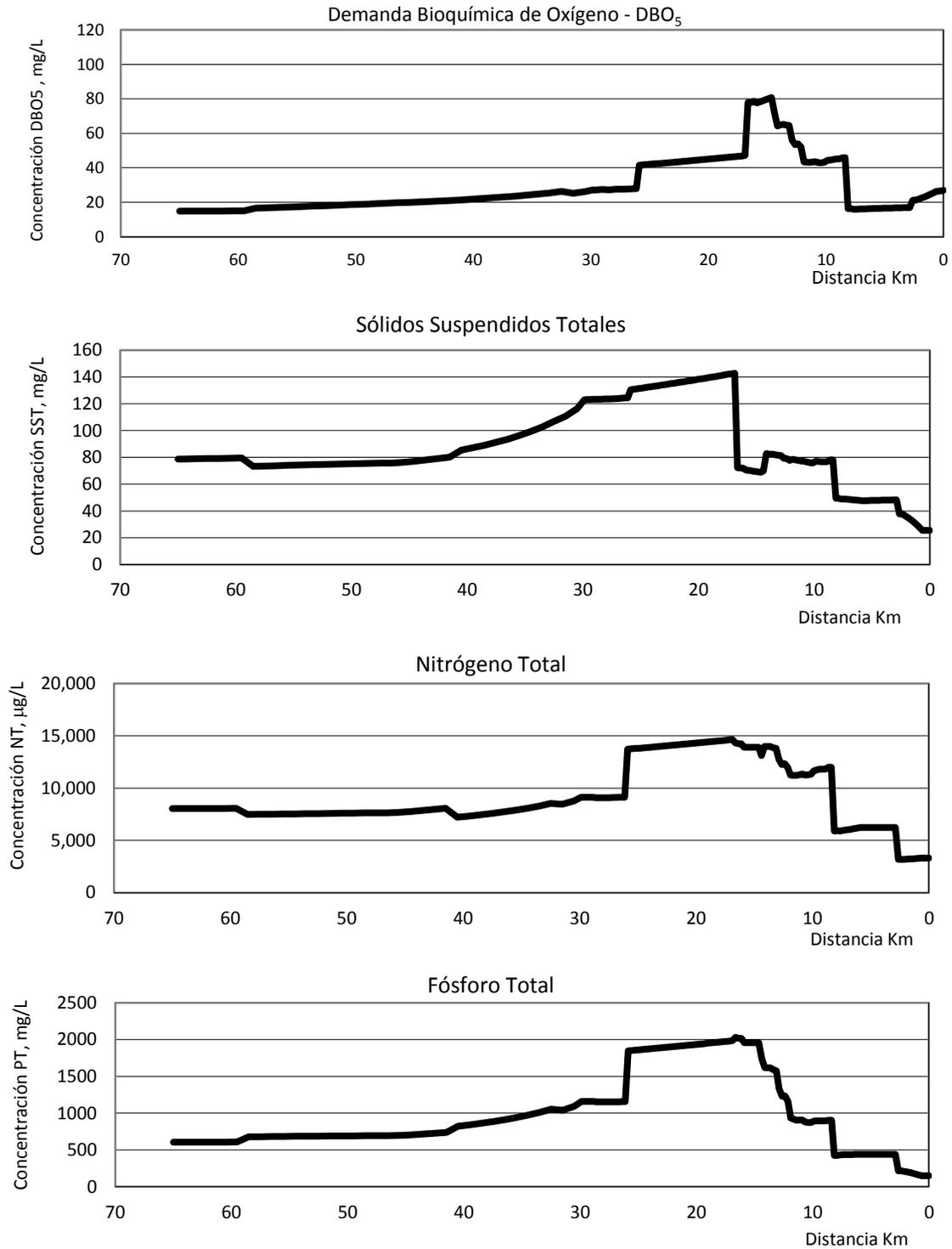
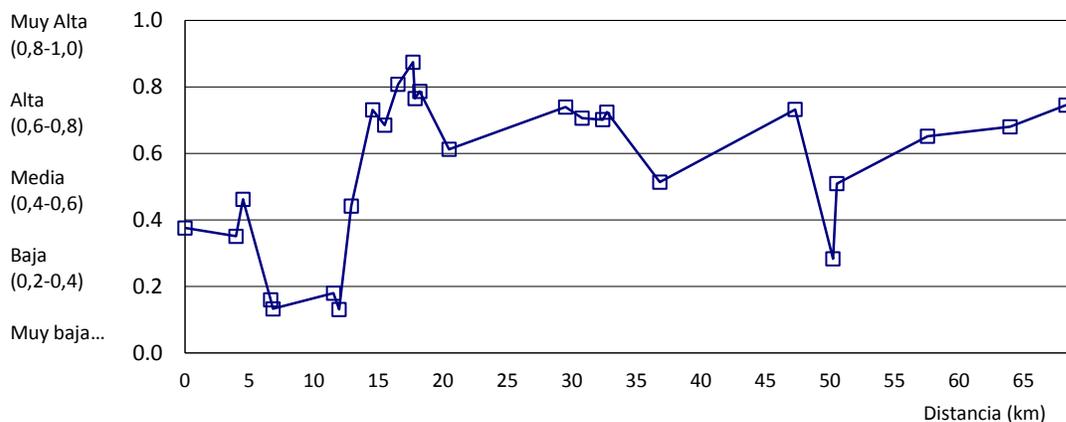


Figura 8.3: Concentración de contaminantes



Adaptada (CORPOCALDAS, 2006)

Figura 8.4: Índice de Contaminación ICOMO

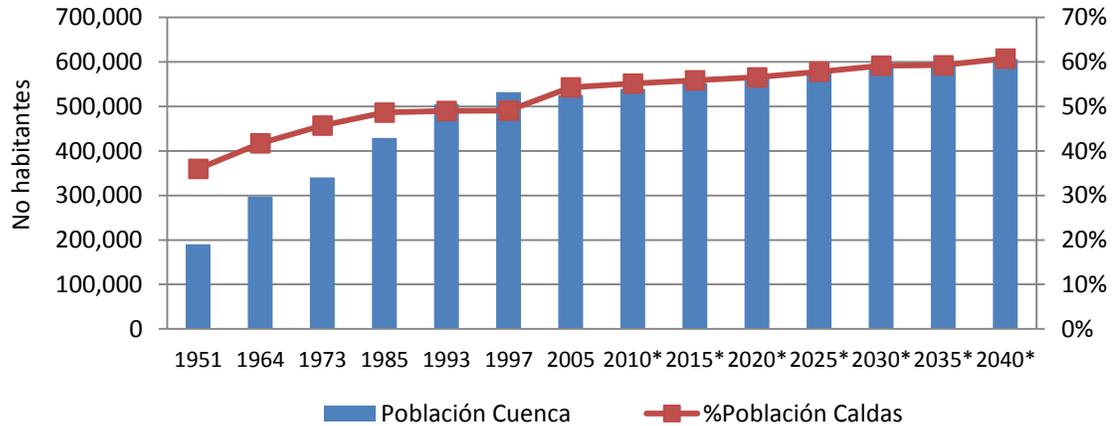
Adaptada: Corpocaldas (2005)

Tabla 8.4: Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua- IACAL

Estación	Distancia Km	Carga (Ton/año)/Mm ³			
		DBO	SST	NT	PT
Chupaderos	7,8	17,8	39,9	959,8	71,3
Sancancio	9,13	46,2	64,8	1725,5	110,3
Montevideo	27,8	27,5	105,3	551,8	59,4
El Retiro	64,5	14,8	95,9	237,3	21,7

8.1.5 Índice de disponibilidad per cápita de agua

Este índice se expresa en m³/habitante-año. Para el cálculo de la población se tiene en cuenta que el 100% del territorio de los municipios de Manizales y Villamaría pertenecen a la cuenca, el 68% del territorio de Palestina, un 42% de Neira y tan solo el 17% del municipio de Chinchiná. Todas las cabeceras municipales de estos municipios están ubicadas en la cuenca, a excepción de Neira (Contraloría General de Caldas, 2009). La evolución de la población de los Municipios de la cuenca del río Chinchiná y las proyecciones de crecimiento (Erazo, 2004; DANE, 2005; DANE 2010; Gobernación de Caldas 2011), se presentan la Figura 8.5 y en la Tabla 8.5. Si se considera la oferta hídrica total (Observada), el índice es de 1554 m³/habitante-año por tanto la categoría es de stress hídrico.

Figura 8.5: Evolución de la población cuenca del Río Chinchiná**Tabla 8.5:** Población de la cuenca del río Chinchiná

Municipio	1.985	1.993	1.997	2.005	2010*	2015*	2020*	2025*	2030*	2035*	2040*
Manizales	308.784	345.539	358.194	379.972	388.525	396.102	402.646	409.290	416.043	409.290	416.043
Chinchiná	45.595	69.868	79.261	53.496	52.488	51.492	50.474	49.476	48.498	47.539	46.599
Neira	26.823	26.628	26.697	28.140	29.359	30.513	31.630	32.788	33.988	35.232	36.522
Palestina	17.936	24.099	26.315	18.037	17.921	17.760	17.571	17.384	17.199	17.016	16.835
Villamaría	30.197	38.519	41.440	46.322	51.105	56.288	61.871	68.008	74.753	82.168	90.318
Total Cuenca	429.335	504.653	531.907	525.967	539.398	552.155	564.192	576.945	590.481	591.245	606.317
Total Caldas	883.015	1.030.062	1.084.081	968.740	978.362	988.003	997.890	997.890	997.890	997.890	997.890
% Cuenca	49%	49%	49%	54%	55%	56%	57%	58%	59%	59%	61%

Nota: * proyecciones basada Censo 2005, (DANE, 2010).

8.1.6 Índice de stress hídrico relativo y uso de agua

8.1.6.1 Oferta hídrica disponible

Oferta hídrica total. O_t . La Tabla 8.6 presenta la oferta hídrica total promedio para el período 1981-2009, la cual se calcula en $Mm^3/año$, basados en los caudales promedio observados; se incluye el cálculo con los caudales promedio obtenidos por modelación hidrológica, con TETIS. Estos valores son consistentes con los reportados por IDEAM (2010), equivalentes a $821 Mm^3$.

Tabla 8.6: Oferta hídrica total promedio 1981-2009

Cuenca	Oferta Total Promedio Mm ³ /año			
	O _t observados		O _t simulados	
	Promedio	Nivel de confianza 95%	Promedio	Nivel de confianza 95%
Alta	137,81*	2,52	126,77	1,58
Media-alta	205,61	2,52	195,52	1,89
Media	503,94	5,36	484,39	5,36
Baja	838,54	14,82	790,29	11,35

*1988-2009

Oferta hídrica neta. On Para su cálculo se sigue lo establecido en la metodología, se aplica la Ec (2.11):

$$O_n = O_t - (O_t \times R_e + O_t \times R_{it})$$

El Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje R_e , que se calcula por la Ec (2.12):

$$R_e = \frac{Q_{\min 97,5\%}}{\bar{Q}}$$

R_{it} : Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica, que depende del coeficiente de variación de la serie (Tabla 2.8). Los factores de reducción y la oferta hídrica neta se resumen en la Tabla 8.7. Sin embargo, se considera que esta metodología es muy drástica por los altos factores de reducción establecidos, por tal razón la oferta disponible o neta se calcula como la oferta natural menos el caudal ambiental (IDEAM, 2010), los resultados se presentan en la Tabla 8.6.

Tabla 8.7: Oferta hídrica neta

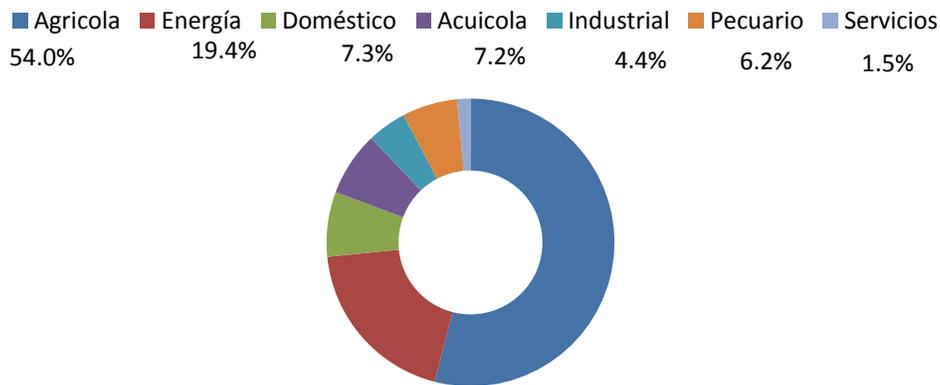
Cuenca	Oferta hídrica neta Mm ³ /año Ec (2.11)			Oferta hídrica neta Mm ³ /año O _t - Q _{ambiental}	
	Re	Rit	O _n Observados	Observados	Simulados
Alta	0,11	0,5	53,77	79,79	51,09
Media-alta	0,22	0,5	58,34	98,08	77,89
Media	0,42	0,4	92,02	176,29	198,36
Baja	0,18	0,5	267,89	464,84	425,74

8.1.6.2 Demanda hídrica

Se considera inicialmente la demanda hídrica teniendo en cuenta las concesiones de agua en la cuenca. Según CORPOCALDAS, (2008), las concesiones ascienden a 527,98 Mm³/año, de las cuales el 85,4% a la generación eléctrica, por lo tanto se realiza un análisis de demanda por sector.

Para Colombia, la mayor demanda corresponde al uso agrícola como se evidencia en la Figura 8.6 (IDEAM, 2008); mientras que para Caldas la distribución sectorial de la demanda es 71% para uso doméstico, 19% industrial, 3% servicios y 7% pecuario (IDEAM, 2008).

Figura 8.6: Participación sectorial de la demanda potencial de agua en Colombia-2008



Adaptada (IDEAM, 2010)

Para los municipios de la cuenca del río Chinchiná, la demanda de agua reportada por IDEAM (2008, 2010) se presenta en la Tabla 8.8. Tomando como base las proyecciones de crecimiento de la población; una dotación de 150 L/hab y pérdidas técnicas del 30%.

Tabla 8.8: Demanda de agua municipios de la cuenca del río Chinchiná- Mm³/año

Región	2005 (IDEAM, 2008)	2008 (IDEAM 2010)	Uso doméstico 2010*
Manizales	48,52	25,81	30,39
Chinchiná	4,43	3,56	4,11
Villamaría	3,69	3,43	4,00
Neira	2,11	0,88	2,30
Palestina	1,09	0,75	1,40
Total Municipios	59,84	34,43	42,2

Adaptada (IDEAM, 2008, 2010) * Proyecciones

La demanda de agua agrícola para el departamento de Caldas, reportada por el IDEAM (2010), se presenta en la Tabla 8.9. El consumo de agua para el beneficio del café tomando como base los coeficientes estandarizados (Cenicafe, 2000), asciende a 2 Mm³/año. Para el sector pecuario, tomando valores porcentuales similares al promedio Nacional; por tanto, se proyecta un consumo alrededor de 5,5 Mm³/año.

Tabla 8.9: Demanda de agua agrícola

Cultivo	Demanda anual (Mm ³)	Consumo efectivo en cultivo (Mm ³)
Pastos	15	10
Bosques	0	0
Cultivos permanentes	0	0
Cultivos transitorios	0	0

Adaptada (IDEAM, 2010)

En Caldas (2008), los consumos de agua de la pequeña industria alcanzan 4,088 Mm³; mientras que 17,2 Mm³ se registraban como captados por la mediana y gran empresa. Los volúmenes concesionados para el sector servicios son 13,288 Mm³ (IDEAM, 2010). La concentración de las actividades económicas en la cuenca alcanza el 70%, por tanto, el consumo de agua estimado es de 35 Mm³. Las concesiones para industria y otros usos, sin tener en cuenta generación eléctrica, ascienden a 45,8 Mm³ (CORPOCALDAS, 2008); mientras que para el sector eléctrico alcanzan 450,96 Mm³/año, sin embargo, el agua es posteriormente retornada al río. Las demandas de agua estimadas para los diferentes usos, sin considerar energía, se consolidan en la Tabla 8.10. El IDEAM (2010) reporta una demanda en la cuenca del río Chinchiná (2008) de 84,84 Mm³/año y para el río Claro de 49,34 Mm³/año; 134,18 Mm³/año en total.

Tabla 8.10: Demanda de agua sin considerar sector eléctrico

Usos	Demanda Mm ³ /año	% Demanda
Doméstico	42,2	46,8
Industrial y servicios	35,0	38,8
Agrícola	7,5	8,3
Pecuario	5,5	6,1
Subtotal	90,2	100

Por tanto, sin considerar el sector eléctrico, el índice de stress hídrico relativo alcanza valores cercano al 20%, con lo cual la clasificación es moderada; el índice de uso de agua (IUA) o escasez también es moderado. La generación eléctrica incrementa la demanda en algunos sectores del

río, desde el km 9,14- Bocatoma Planta Sancancio hasta el km 16,94 donde retorna el agua de la CHEC; para este tramo el valor del índice de uso y de stress hídrico relativa es superior al 50%, con clasificación muy alta. Los IUA reportados por IDEAM (2010) para las principales fuentes de abastecimiento municipales son muy alto en Manizales, alto en Chinchiná, bajo en Villamaría y muy bajo Palestina.

8.1.7 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento

Según la matriz de evaluación (Tabla 2.11), como el índice de regulación hídrica es muy bajo y el índice de uso de agua es moderado el índice de vulnerabilidad es alto. Para el tramo en el cual el IRH es muy bajo y el IUA muy alto, el índice de vulnerabilidad es muy alto. Para el período actual 1981-2010, los indicadores se resumen en la Tabla 8.11.

Tabla 8.11: Indicadores del régimen hidrológico medio 1981-2010

Indicador	Observados El Retiro		Simulados El Retiro	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice Regulación Hídrica-IRH	0,36	Muy bajo	0,35	Muy bajo
Índice Aridez			0,18	Excedentes
Oferta hídrica Total- Mm ³ /año	838±15		805,11±11	
Caudal Ambiental Mm ³ /año	373,70		364,55	
Oferta hídrica disponible Mm ³ /año	464,84		440,56	
Demanda hídrica Mm ³ /año	90,2		90,2	
Índice disponibilidad per cápita m ³ /hab-año	1554	Stress hídrico	1493	Stress hídrico
Índice stress hídrico relativo	0,19	Moderado	0,20	Moderado
Índice uso de agua	19,4	Moderado	20	Moderado
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento		Alto		Alto

8.2 Alteraciones por efecto de variabilidad climática

La condición hidrológica para año seco se calcula con base en los caudales mínimos mensuales promedio de la serie 1981-2010. Para el año húmedo se toman los caudales máximos mensuales promedio. En ambos casos se emplean los caudales observados para las estaciones. Para el

índice de Retención y Regulación hídrica y para el caudal ambiental, se toman las condiciones de año medio, obtenidas por la curva de duración de caudales.

Las alteraciones en los indicadores para año seco se presentan en la Tabla 8.12. De acuerdo con los indicadores si se analiza la salida de la cuenca en la estación El Retiro, hay déficit de agua porque el caudal disponible es menor que la demanda; por tanto, para suplir la demanda media de agua de 90,2 Mm³/año, el caudal ambiental debe reducirse en un 15%, del valor medio estimado (Q₇₅); la categoría del índice de disponibilidad per cápita es de escasez porque alcanzaría valores de 757 m³/hab-año. El índice de alteración potencial de la calidad del agua es muy alto; al igual que los indicadores de uso y de stress hídrico. Por tanto, el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento se incrementa alcanzado un nivel muy alto.

Tabla 8.12: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año seco

Indicador	Chupaderos		Sancancio		Montevideo		El Retiro	
	Valor	Categ.	Valor	Categ.	Valor	Categ	Valor	Categ
Índice Regulación Hídrica-IRH	0,31	Muy bajo	0,37	Muy bajo	0,43	Muy bajo	0,36	Muy bajo
Oferta hídrica Total-Mm ³ /año	76,00	±11,35	123,30	±18,92	350,05	±34,06	408,08	±58,65
Caudal Ambiental Mm ³ /año	58,02		107,54		327,66		373,70	
Oferta hídrica disponible Mm ³ /año	17,98		15,77		22,39		34,37	
Demanda hídrica Mm ³ /año							90,2	
Índice uso de agua								Muy alto
Índice disponibilidad per cápita m ³ /hab-año							757	Escasez
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento								Muy alto

Para el año húmedo, los indicadores se presentan en la Tabla 8.13. En este caso se tienen excedentes de agua; reflejados en el índice de disponibilidad per cápita de 4270 m³/hab-año. Los índices de uso y de stress hídrico alcanzan categorías bajas; a pesar de la dilución por el mayor flujo de agua, el índice de alteración potencial de la calidad del agua continua en valores muy altos por la alta carga contaminante. En consecuencia, el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento alcanzando un nivel medio.

En conclusión, para el período más reciente-1981-2010 el índice de vulnerabilidad fluctúa desde medio para el año húmedo a muy alto en año seco, alcanzando niveles altos para el año medio.

9. Posibles indicadores futuros

9.1 Bajo condiciones estacionarias

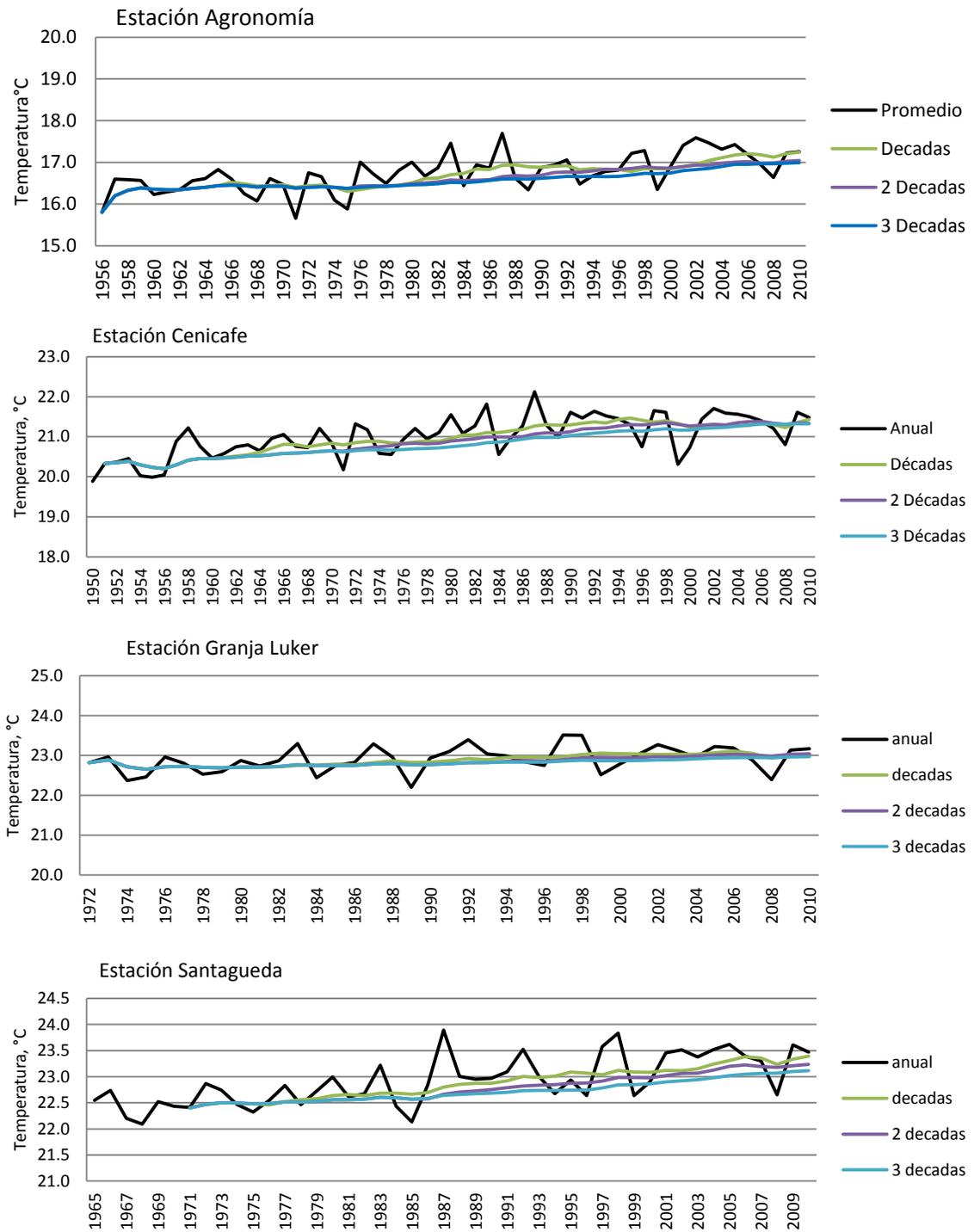
Aunque la hipótesis de estacionariedad en los procesos hidrológicos colapsa ante el cambio climático (Acevedo & Poveda, 2010), el análisis bajo condiciones estacionarias permite estimar que podría suceder en un futuro si se mantuvieran las tendencias históricas. La proyección de tendencias estima los posibles valores futuros de las variables climáticas, temperatura, precipitación y radiación solar, en caso de que se presentaran condiciones estacionarias y de que el futuro fuera una simple proyección del pasado.

Como se analizó en el capítulo seis, son evidentes las señales de cambio climático en la cuenca y las tendencias son variaciones cíclicas, no lineales. Sin embargo, por objeto del ejercicio, de carácter ideal, se realizarán las proyecciones empleando el enfoque econométrico, el cual se basa en el análisis de regresión de datos históricos. Este tipo de construcción asume que el futuro será una extensión suave y continúa del pasado y que no se tendrán cambios estructurales del sistema. Esta metodología no tiene en cuenta otros catalizadores o fuerzas que pueden alterar el sistema. Sin embargo, permite obtener una aproximación, en caso de que no existieran fuerzas adicionales (como el cambio climático o la deforestación, entre otras) que potencializaran modificaciones adicionales en el sistema.

9.1.1 Temperatura Media

Para evaluar las tendencias a largo plazo, se realizó la suavización de la curva de temperatura media promedio anual, tomando como base promedios multi-anales por una, dos y tres décadas. Las curvas suavizadas presentan tendencias lineales crecientes, como se observa en la Figura 9.1.

Figura 9.1: Tendencias en temperatura media promedio anual y curvas suavizadas



Los modelos de regresión lineal, para cada una de las estaciones, fueron validados como se explica en la metodología, los parámetros se resumen en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1: Modelos de tendencias de la temperatura media anual promedio

Parámetros Modelo		Agronomía	Cenicafé	Granja Lúker	Santágueda
Variable dependiente, Y		Temperatura °C			
Variable independiente, X		Año			
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$			
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1950	1972	1968
Curva Suavizada		2 décadas	3 décadas	3 décadas	3 décadas
β_0	Valor	16,061	20,225	22,617	22,244
	Error típico	0,022	0,022	0,007	0,018
	Sig	0,0	0,0	0,0	0,0
β_1	Valor	0,018	0,019	0,009	0,021
	Error típico	0,001	0,001	0,00	0,001
	Sig	0,0	0,0	0,0	0,0
Anova. sig		0,0	0,0	0,0	0,0
R^2		0,975	0,984	0,986	0,974
Error típico de Estimación		0,035	0,047	0,011	0,036

Con el modelo se proyectan los valores futuros y se calculan los promedios multianuales, los cuales comparados con el valor actual permiten proyectar los posibles incrementos en la temperatura media anual promedio (Tabla 9.2). Se estima por tanto, un incremento en la temperatura de media hasta de 0.55°C para el período 2011-2040, basados en el análisis de tendencias. Este valor representa sólo un 39% del incremento de la temperatura proyectada-1,4°C por IDEAM (2010), teniendo en cuenta modelos climáticos.

Tabla 9.2: Proyecciones de aumento en la temperatura media anual.

Estación	Proyección aumento temperatura media anual promedio, frente 1981-2010, °C		
	1991-2020	2001-2030	2011-2040
Agronomía	0,08 - 0,13	0,23 - 0,33	0,30 - 0,47
Cenicafé	0,10 - 0,16	0,22 - 0,35	0,36 - 0,55
Granja Lúker	0,03 - 0,07	0,06 - 0,10	0,13 - 0,16
Santágueda	0,14 - 0,19	0,28 - 0,38	0,39 - 0,55

9.1.2 Precipitación Media

Para evaluar las tendencias a largo plazo, se realizó la suavización de las curvas de precipitación media anual, tomando como base promedios interdecadales y se calcularon los modelos de regresión lineal, los cuales se resumen en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3: Modelos de tendencias de la precipitación media anual promedio

Parámetros Modelo		Agronomía	Cenicafé	Granja Lúker
Variable dependiente, Y		Precipitación Anual (mm)		
Variable independiente, X		Año		
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$		
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1942	1965
Curva Suavizada		Décadas	Décadas	Décadas
β_0	Valor	579,813	1783	854,18
	Error típico	105,349	72,437	97,053
	Significancia	0,00	0,00	0,00
β_1	Valor	26,86	13,146	36,241
	Error típico	2,208	1,224	2,533
	Significancia	0,00	0,00	0,00
Anova. significancia		0,00	0,00	0,00
R^2		0,914	0,858	0,932
Error típico de Estimación		40,704	36,017	51,165

Parámetros Modelo		Santágueda	Alta Suiza	Neira
Variable dependiente, Y		Precipitación Anual (mm)		
Variable independiente, X		Año		
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$		
Año 1 (Variable X = 1)		1964	1976	1976
Curva Suavizada		Décadas	Décadas	Décadas
β_0	Valor	841,541	1224,94	1818,645
	Error típico	91,864	38,967	17,70
	Significancia	0,00	0,00	0,00
β_1	Valor	36,559	20,067	12,115
	Error típico	2,365	1,397	0,828
	Significancia	0,00	0,00	0,00
Anova. significancia		0,00	0,00	0,00
R^2		0,937	0,936	0,892
Error típico de Estimación		52,05	25,768	40,75

En las estaciones donde se presentaron decrementos en la precipitación no fueron calculados los modelos por los bajos coeficientes de determinación obtenidos (< 70%). Estos modelos permiten estimar los posibles cambios en la precipitación promedio multianual, que se consolidan en la Tabla 9.4. Las estimaciones del IDEAM (2010) para el período 2011-2040, proyectan zonas con

reducción en la precipitación (entre -10 a -30%) y también regiones con incrementos probables (-10 a 10%), con referencia al período 1971-2000; estudios anteriores (IDEAM, 2008) sugieren variaciones en la precipitación de -10 a 10%. El análisis de tendencia proyecta posibles incrementos en la precipitación promedio anual, en algunas regiones, de la cuenca entre 6.4 al 18%, con referencia al período 1981-2010.

Tabla 9.4: Proyecciones de cambio en la precipitación anual promedio

Estación	Proyección cambio precipitación, frente 1981-2010, %	
	1991-2020	2001-2030
Agronomía	3,5 – 5,0	12,5 – 14,0
Alta Suiza	4,0 – 5,0	13,0 – 15,0
Neira	3,5 – 5,0	6,5 – 10,0
Cenicafé	2,7 – 3,6	6,4 – 8,2
Granja Lúker	5,0 – 6,5	14,0 – 17,0
Santágueda	5,0 – 7,0	15,0 – 18,0

9.1.3 Brillo Solar

Para el análisis de tendencias, se parte del brillo solar anual promedio, se realiza la suavización de las curvas empleando promedios multianuales por una dos y tres décadas como se muestra en la Figura 9.2.

Figura 9.2: Tendencias en brillo solar promedio anual y curvas suavizadas

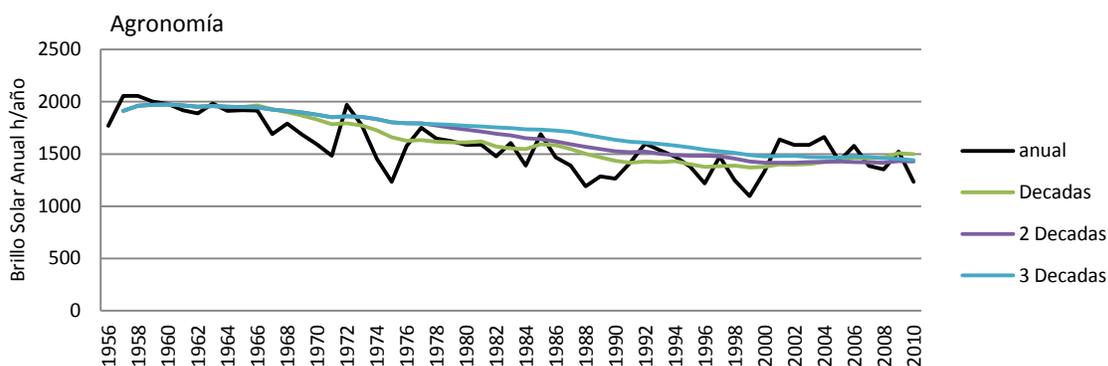
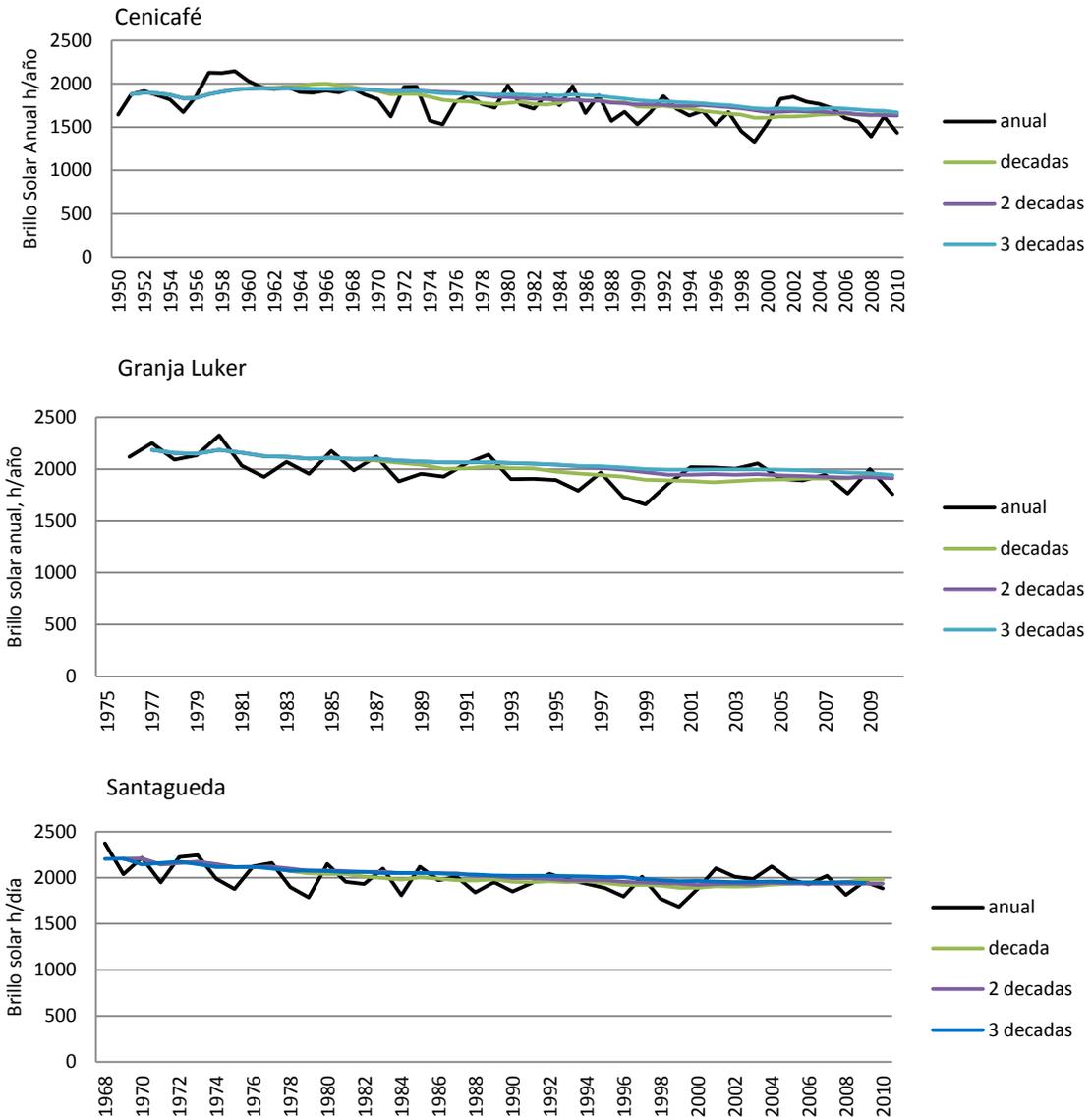


Figura 9.2: Tendencias en brillo solar promedio anual y curvas suavizadas



Los modelos de regresión lineal, para cada una de las estaciones, los parámetros y resultados de la validación se presentan en la Tabla 9.5. Con el modelo se estiman los valores futuros, los cuales comparados con el valor actual, permiten proyectar los posibles cambios en el brillo solar anual promedio, si se mantienen las tendencias (Tabla 9.6).

Tabla 9.5: Modelos de tendencias del brillo solar anual promedio

Parámetros Modelo		Agronomía	Cenicafé	Granja Lúker	Santágueda
Variable dependiente, Y		Brillo solar h/año			
Variable independiente, X		Año			
Modelo		$Y = \beta_0 + \beta_1 X$			
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1950	1975	1968
Curva Suavizada		3 décadas	3 décadas	3 décadas	3 décadas
β_0	Valor	2040,119	2052,782	2178,008	2161,618
	Error típico	15,788	9,015	6,615	6,816
	Significancia	0,0	0,0	0,0	0,0
β_1	Valor	-11,166	-6,102	-6,312	-5,414
	Error típico	0,402	0,213	0,261	0,236
	Significancia	0,0	0,0	0,0	0,0
R^2		0,985	0,967	0,970	0,958
Error típico de estimación		24,927	17,895	10,465	14,391

Tabla 9.6: Proyecciones del brillo solar por análisis de tendencias

Subcuenca	Proyección disminución en Brillo solar anual promedio, frente 1981-2010, %	
	1991-2020	2001-2030
Agronomía	1,1 - 2,2	3,4 - 5,7
Cenicafé	1,5 - 2,2	1,6 - 3,0
Santágueda	0,7 - 1,7	1,3 - 2,5

9.1.4 Escorrentía superficial

La modelación hidrológica en TETIS, para el período 2011-2040, basados en el análisis de tendencias históricas, parte de los supuestos de incrementos en la precipitación del 10% en todas las estaciones, con excepción de La Esperanza, Marmato y Montevideo donde se estiman reducciones del 10%; aumentos en la temperatura, según las estimaciones de la Tabla 9.2 y reducción en la radiación solar por efecto de la reducción en el brillo solar, según las proyecciones de la Tabla 9.6; con estos cambios se perturban las series mensuales históricas y se realiza la modelación, los resultados se consolidan en la Tabla 9.7. Para la estación El Retiro, realizando la evaluación con el modelo de Thomas se estiman aumentos promedios de caudal del 4%, con el modelo ARMA (Salas & Smith) del 3%; mientras que con TETIS son del 6%, si se comparan con los caudales promedios obtenidos por modelación hidrológica para el período 1981-2009.

Tabla 9.7: Estimación de caudal para el período 2011-2040 condiciones estacionarias

Modelo	Error balance	Modelación hidrológica 1981-2009		Simulación 201-2040	
		Caudal Promedio (m ³ /s)	Intervalo de confianza 95%	Caudal Promedio (m ³ /s)	Intervalo de confianza 95%
TETIS El Retiro	5,7%	25,05	1,55	26,68	1,63
Thomas	-2,0%	27,11	1,31	28,24	1,39
ARMA (Salas & Smith)	-5,4%	28,01	1,06	28,76	1,0

9.1.5 Indicadores del régimen hidrológico

La alteración estimada en los indicadores con cambios en el régimen de flujo bajo condiciones estacionarias se resume en la Tabla 9.8. Para uso doméstico, se proyectan tasas de incremento de la demanda con base en las estimaciones de crecimiento de la población; para los usos industrial, agrícola y pecuario se estiman las demandas de acuerdo con las tasas de crecimiento económico. Si se tiene en cuenta el error de balance, no se tiene incremento en la oferta neta, sin embargo se incluye los indicadores para la oferta hídrica simulada con el modelo TETIS, según las proyecciones de tendencias.

Tabla 9.8: Indicadores del régimen hidrológico proyección de tendencias

Indicador	1981- 2010		Modelación TETIS proyección tendencias 2011-2040	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice Regulación Hídrica-IRH	0,36	Muy baja	0,34	Muy baja
Índice Aridez	0,18	Excedentes	0,17	Excedentes
Oferta hídrica Total-Mm ³ /año	838 ±15		805±11	
Caudal Ambiental Mm ³ /año	373,7		378,5	
Oferta hídrica disponible Mm ³ /año	464,8		462,5	
Demanda hídrica Mm ³ /año	90,2		245	
Índice disponibilidad per cápita	1554	Stress hídrico	1387	Stress hídrico
Índice stress hídrico relativo	0,19	Moderado	0,29	Medio
Índice uso de agua	19,4	Moderado	29	Alto
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento		Alto		Muy Alto

Por efecto de crecimiento en la demanda, aumentan las tasas de uso, alcanzando valores altos. El índice de stress hídrico relativo continuaría en valores medios, reflejados en el índice de disponibilidad per-cápita con condiciones de stress hídrico. Por efecto del alto uso del agua y de la muy baja capacidad de retención y regulación hídrica, el índice de vulnerabilidad aumentaría a valores muy altos.

9.2 Escenarios de cambio climático

En general, las evaluaciones de impacto se dan sobre la base de proyecciones de cambio en las variables climáticas acopladas con modelos de circulación general del océano, los cuales proporcionan las proyecciones del cambio climático futuro.

Las incertidumbres en la modelización del clima surgen por las condiciones iniciales, durante la observación; en los parámetros del modelo y en el hecho que algunos procesos del sistema climático no se conocen o son imposibles de resolver debido a las limitaciones computacionales y la comprensión de los fenómenos (IPCC, 2011). Por tanto, las incertidumbres de las proyecciones se propagan a las evaluaciones de impacto y afectan las decisiones políticas posteriores (Shiogama et al, 2010)

Debe tenerse en cuenta que existen forzamientos adicionales y retroalimentaciones, como por ejemplo el uso del suelo o los contaminantes atmosféricos, que no pueden estar completamente representadas en los modelos globales y que pueden ser importantes para una región (IPCC, 2011).

Por tanto, para el estudio del cambio climático en una región, debe considerarse tanto el cambio histórico, como el global proyectado por los modelos de circulación Global y el cambio a escala reducida proyectado (Christensen et al, 2007).

Existe un desacuerdo sobre la mejor resolución para la previsión de impactos a nivel regional. Algunos investigadores afirman que el modelo original de Circulación General MCG debe mantenerse y no modificar las incertidumbres producidas por dichos modelos; sin embargo, la resolución de 100 o 200 km no es práctica para la evaluación en trópico donde las condiciones orográficas y climáticas varían significativamente a distancias relativamente pequeñas (Tabor and Williams, 2010; Hijmans et al., 2005).

Las técnicas de reducción de escala permiten obtener predicciones regionales del cambio climático y van desde la suavización e interpolación de las anomalías de los MCG, a las redes neuronales y los modelos climáticos regionales. Estas técnicas varían en precisión, resolución de salida, requisitos de computo y la solidez de la ciencia climática. Los modelos climáticos regionales proporcionan una superficie de 20 a 50 Km, por remodelamiento de las salidas de los MCG. Por otra parte, los métodos de reducción de escala estadísticos son más fáciles y mucho más rápidos para el desarrollo de superficies de alta resolución, pero tienden a reducir las diferencias (Villegas et Jarvis, 2010).

Para el análisis de cambio climático, se tienen en cuenta las proyecciones estimadas por IDEAM (2010, 2008) y Pabón (2008), en las cuales se evaluaron los escenarios A2 y B2 empleando el modelo PRECIS. Se incluye además el análisis de la información disponible en la base de datos de WorldClim (Hijmans et al., 2005), para los escenarios A2 y B2 con los modelos HadCM3, CSIRO y CCMA empleando la reducción de escala por el método Delta (Villegas & Jarvis, 2010), para el período 2010-2039 [2020].

El método estadístico Delta se basa en la suma de las anomalías interpoladas en superficies de alta resolución, a escala mensual. Produce una superficie suavizada de cambio en los climas (deltas o anomalías) y luego se aplica el clima de referencia de la base de datos WorldClim. Dicho método supone que los cambios en el clima son sólo relevantes a gran escala y que las relaciones entre las variables se mantienen hacia el futuro (Villegas et Jarvis, 2010).

9.2.1 Temperatura media

Tomando como base los estudios previos descritos en el capítulo 1, se realiza la geo-referenciación de las imágenes en ArcGis para la confirmación de los rangos de cambio de temperatura en la zona de la cuenca. Para el período 2071-2100 empleando el modelo PRECIS y el escenario A2, según los estudios de Pabón (2008), los incrementos estimados en la temperatura son de 2-4°C, por encima del promedio 1961-1990 (Figura 1.11). Iguales incrementos proyecta el IDEAM, (2008) tanto para el escenario A2 como para el escenario B2 (Figura 1.12), para el mismo período.

El IDEAM (2010) con los Modelos ERA40 y GSM-MRI, para el escenario A2 proyecta un posible aumento de temperatura de entre 1 a 2°C para el período 2011-2040; 2 a 3°C para el período 2041-2070 y 3 a 4°C para el lapso comprendido entre los años 2071 a 2100, en comparación con la Normal Climatológica 1971-2000.

Procesando la información disponible en WorldClim (Hijmans et al., 2005), con el modelo HADCM3, reducción de escala con el método delta y bajo el escenario A2, los valores estimados de temperaturas medias mensuales para el área de la cuenca se presentan en la Figura 9.3, para el período 2010-2039 [2020]. No se reportan datos para el área de los nevados.

Para el escenario B2, en el período 2010-2039 [2020], los valores promedios de las temperaturas medias mensuales se presentan en la Figura 9.4. No se tiene información sobre las temperaturas medias para el área de los nevados.

La distribución de temperaturas medias mensuales de los modelos bajo el escenario A2, para el período 2010-2039 [2020], comparadas con la normal climatológica se presentan en la Figura 9.5. El modelo HADCM3 se ajusta mejor a la distribución de comportamiento histórico, aunque proyecta mayores anomalías en la temperatura media.

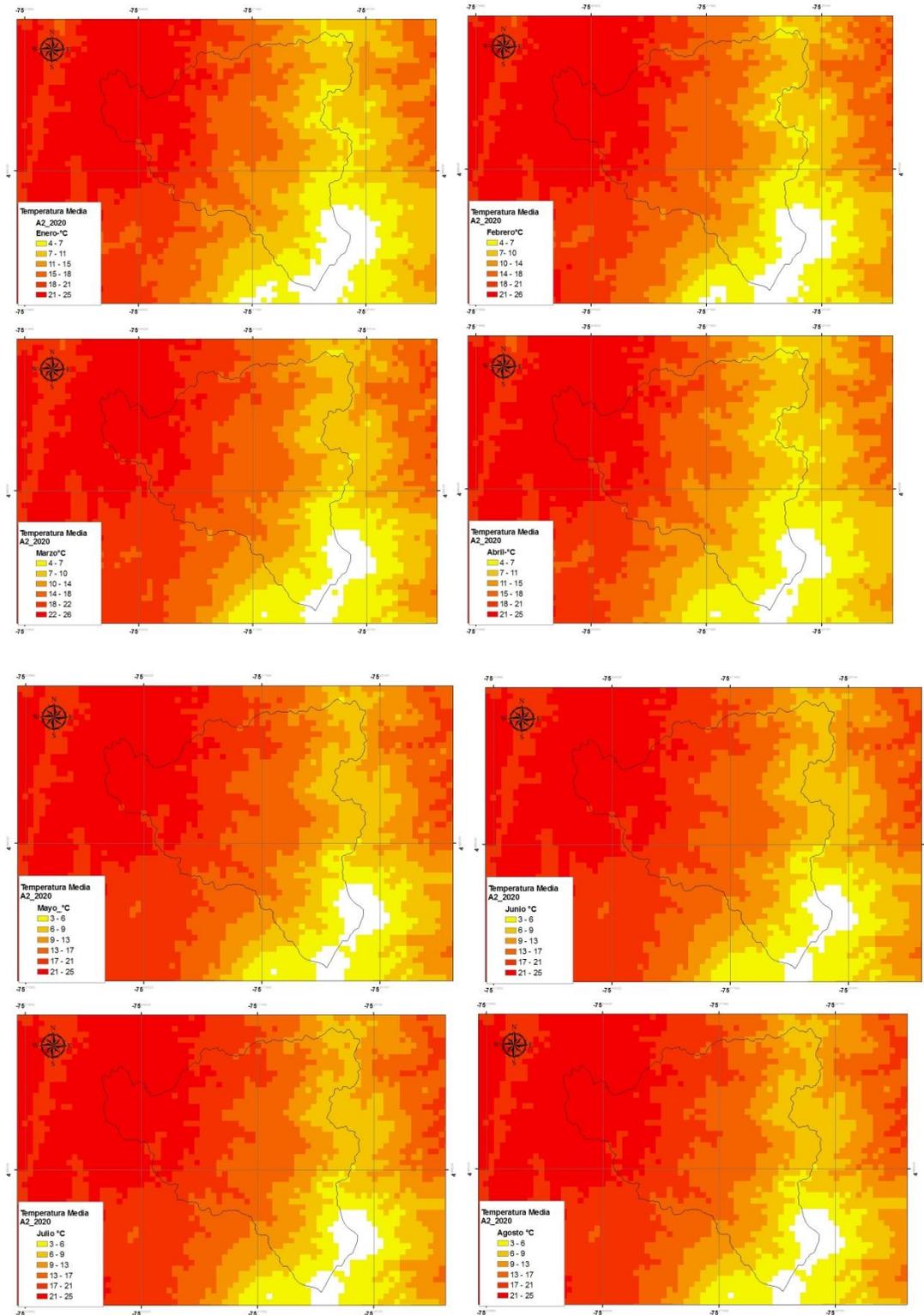
Figura 9.3: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]

Figura 9.3: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]

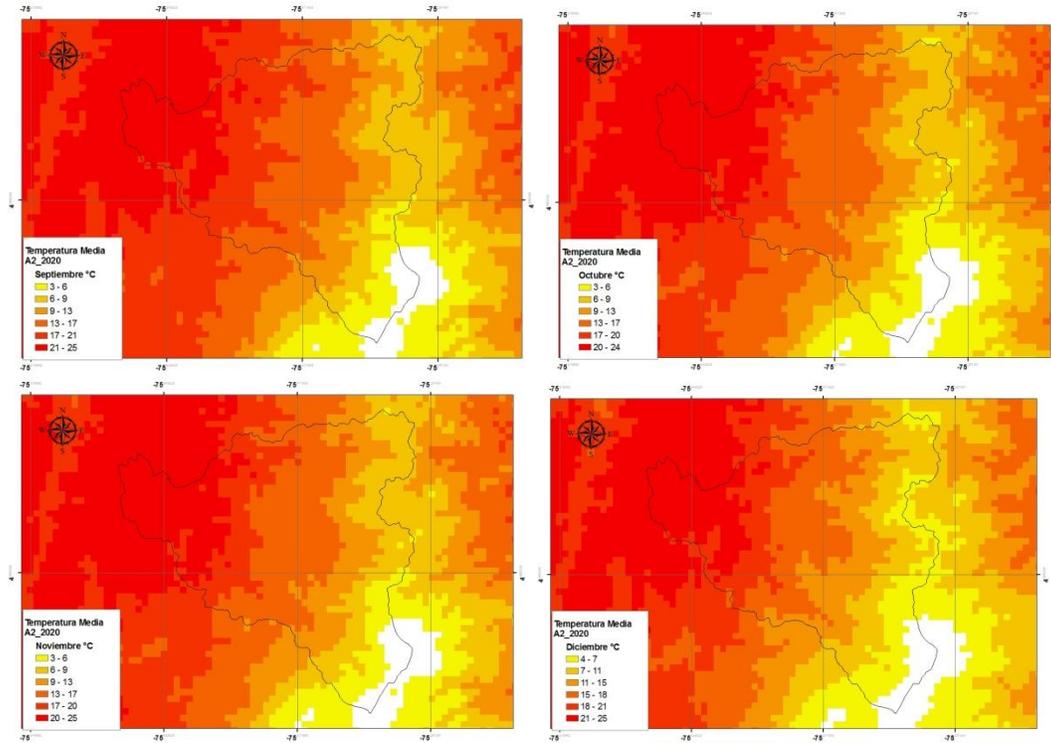


Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020]

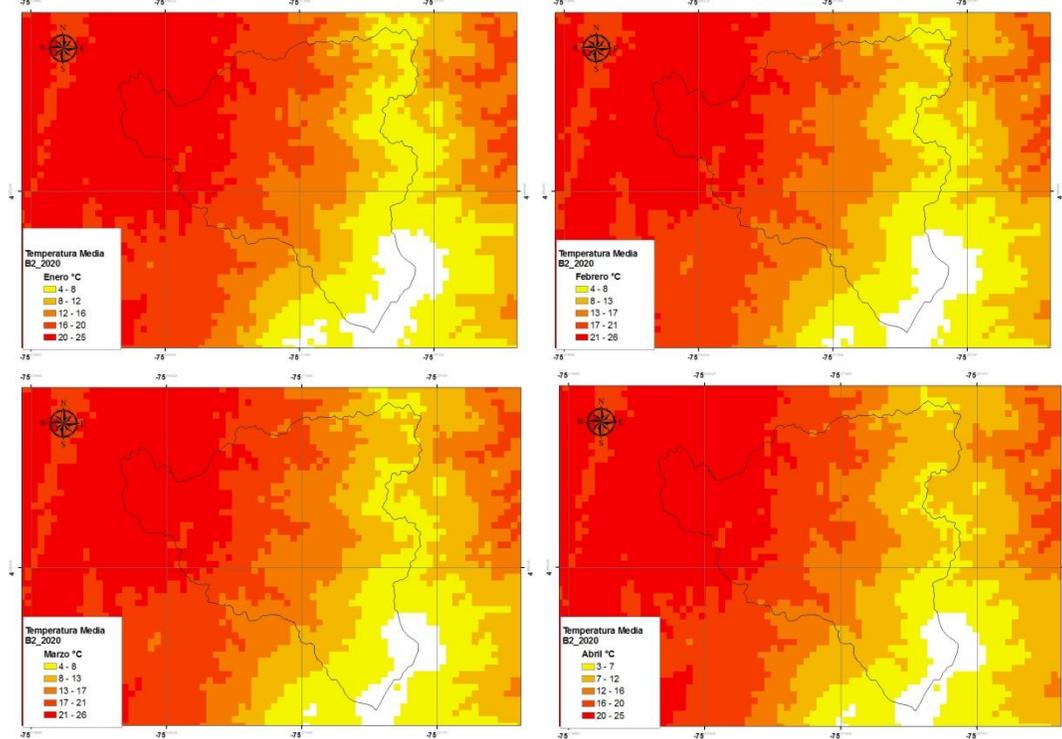


Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020]

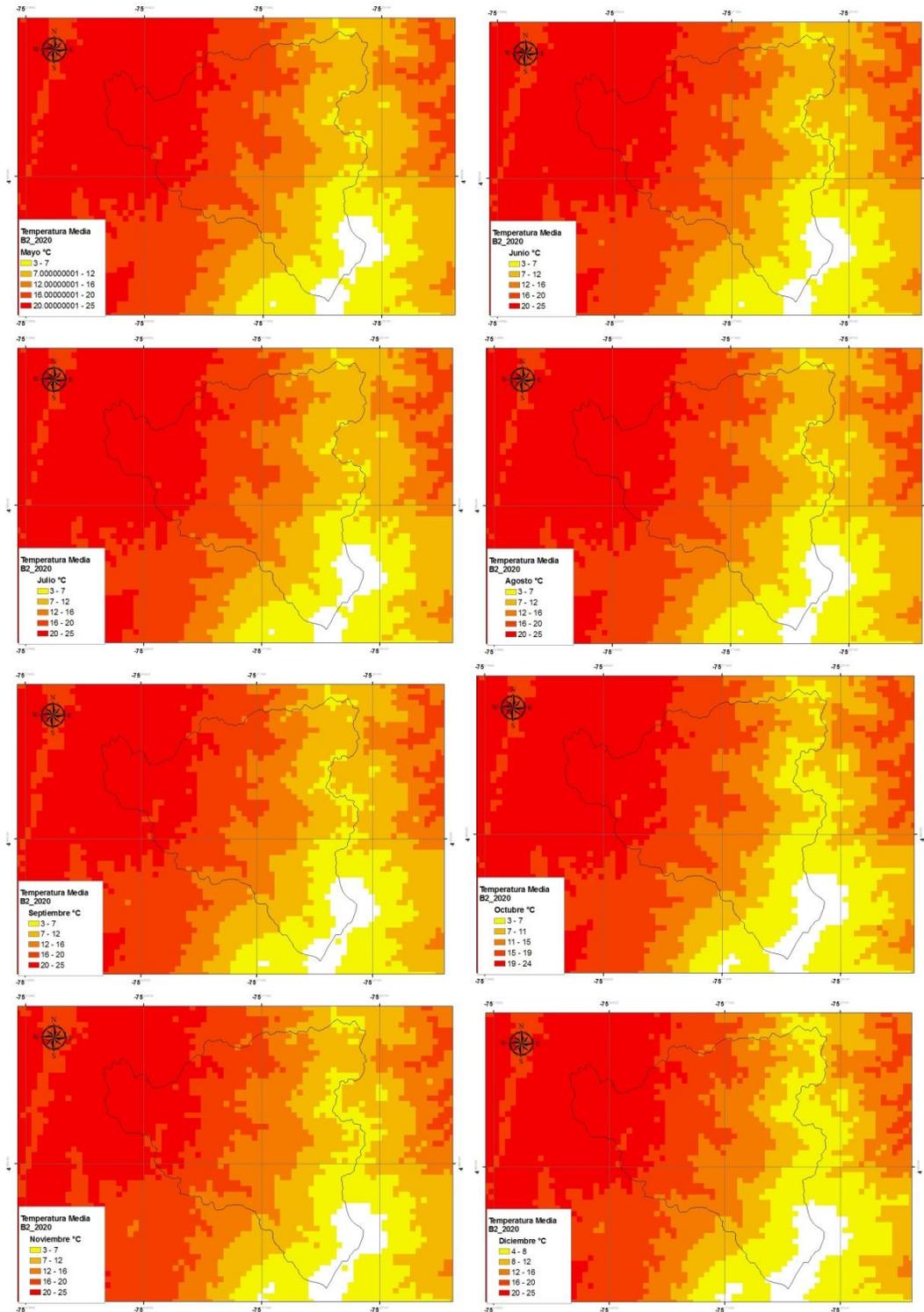
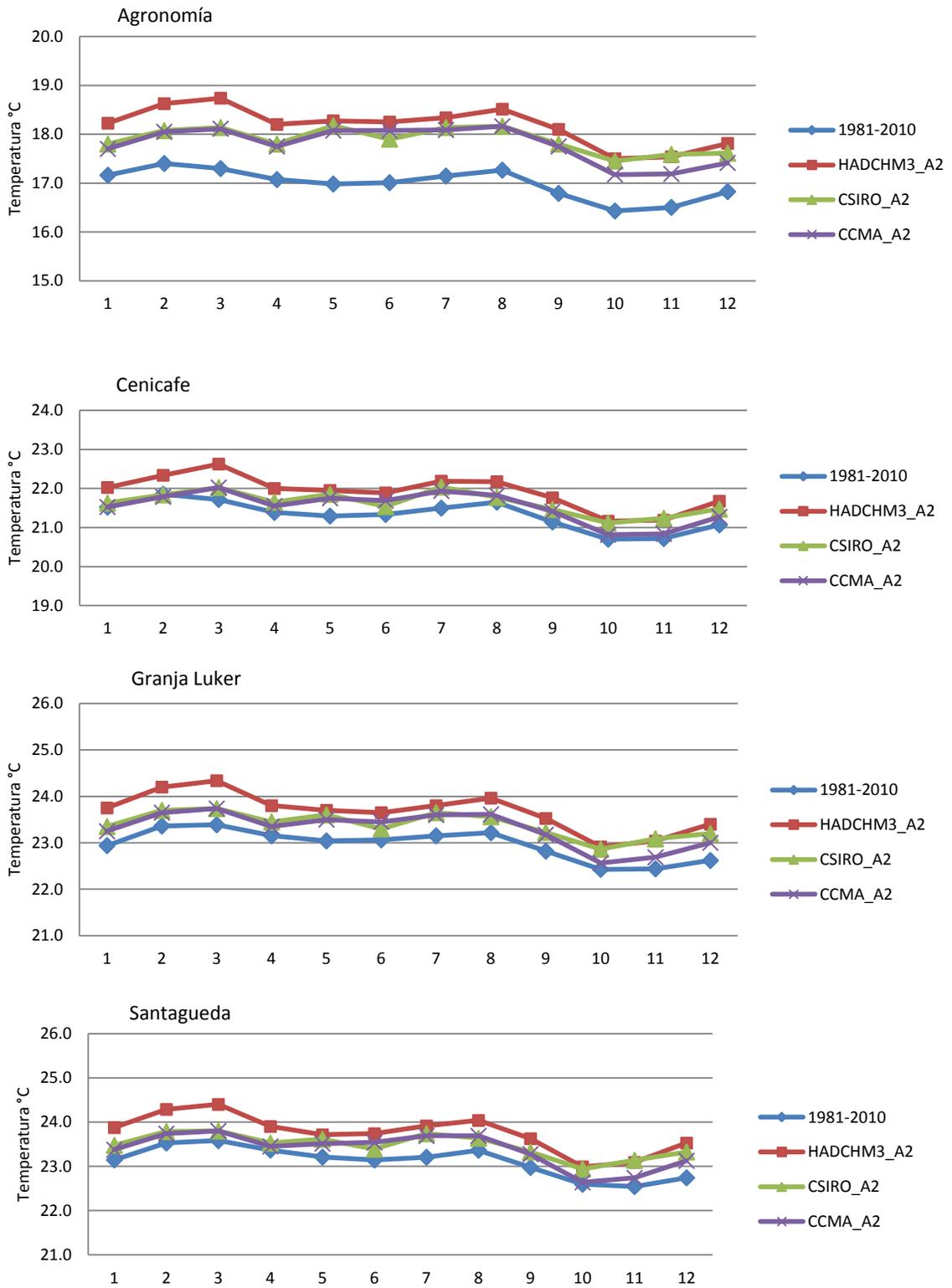


Figura 9.5: Temperatura media 2010-2039 [2020] vs normal climatológica



Las posibles anomalías en la temperatura media anual estimadas con los modelos HADCHM3, CSIRO y CCMA se consolidan en la Tabla 9.9 para el escenario A2; los valores promedio alcanzan 0,8°C con el modelo HADCHM3, 0,5° con el CSIRO y 0,4°C con el CCMA. En la Tabla 9.10 se presentan los valores estimados para el escenario B2; las posibles anomalías son en promedio 0.5°C con el modelo HADCHM3 y CCMA y 0,7°C con el modelo CSIRO; estos valores están en el rango de los valores calculados por proyección de tendencias.

Tabla 9.9: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario A2

Estación	Altitud	1981-2010	Escenario A2					
			HADCHM3		CSIRO		CCMA	
			T °C	Anomalía °C	T °C	Anomalía °C	T °C	Anomalía °C
Las Brisas	4150	4.7	5.3 ± 0.2	0.6	5.0 ± 0.2	0.3	5.0 ± 0.2	0.3
Letras	3684	7.1	7.8 ± 0.2	0.7	7.5 ± 0.2	0.4	7.4 ± 0.2	0.3
Agronomía	2088	17.0	18.2 ± 0.2	1.2	17.9 ± 0.2	0.9	17.8 ± 0.2	0.8
Naranjal	1381	21.1	22.0 ± 0.3	0.8	21.7 ± 0.2	0.6	21.6 ± 0.2	0.5
Cenicafé	1310	21.3	21.9 ± 0.3	0.6	21.6 ± 0.2	0.3	21.5 ± 0.2	0.2
G. Luker	1031	23.0	23.7 ± 0.3	0.7	23.4 ± 0.2	0.4	23.3 ± 0.2	0.3
Santágueda	1026	23.1	23.8 ± 0.3	0.7	23.5 ± 0.2	0.4	23.4 ± 0.2	0.3

Tabla 9.10: Temperatura media anual y estimaciones 2010-2039 [2020] Escenario B2

Estación	Altitud	1981-2010	Escenario B2					
			HADCHM3		CSIRO		CCMA	
			T °C	Anomalía °C	T °C	Anomalía °C	T °C	Anomalía °C
Las Brisas	4150	4.7	5.0 ± 0.2	0.3	5.2 ± 0.2	0.5	5.1 ± 0.2	0.4
Letras	3684	7.1	7.5 ± 0.2	0.4	7.7 ± 0.2	0.6	7.6 ± 0.2	0.5
Agronomía	2088	17.0	17.9 ± 0.2	0.9	18.1 ± 0.2	1.1	17.9 ± 0.2	0.9
Naranjal	1381	21.1	21.7 ± 0.2	0.6	21.9 ± 0.2	0.7	21.7 ± 0.2	0.6
Cenicafé	1310	21.3	21.6 ± 0.2	0.3	21.8 ± 0.2	0.5	21.7 ± 0.2	0.4
G. Luker	1031	23.0	23.4 ± 0.2	0.4	23.6 ± 0.2	0.6	23.4 ± 0.2	0.4
Santágueda	1026	23.1	23.5 ± 0.2	0.4	23.7 ± 0.2	0.6	23.5 ± 0.2	0.4

9.2.2 Precipitación media

Con respecto a la precipitación, basados en los estudios de Pabón (2008) para el período 2071-2100 y el escenario A2, la zona de estudio en su mayor proporción está en la franja de -30% a -10% más seco en comparación con el promedio 1961-1990; sin embargo, se tienen zonas ubicadas en la región -10 a +10% similar a lo actual. Iguales incrementos proyecta el IDEAM, (2008) para el escenario A2. En el estudio más reciente IDEAM (2010) llega a iguales

proyecciones para el 2011-2040, escenario A2, en comparación con la Normal Climatológica 1971-2000 (Figura 1.14). Por otra parte, para el escenario B2 (Figura 1.13), en el período 2071-2100, la mayor proporción de la cuenca se encuentra en la zona de -10 a $+10\%$ de precipitación similar a la actual (IDEA, 2010).

Tomando como referencia la información disponible en WorldClim, las proyecciones de precipitación media mensual para el período 2010-2039 [2020] del modelo HADCM3 escenario A2 se presentan en la Figura 9.6.

Figura 9.6: Precipitación media mensual HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]

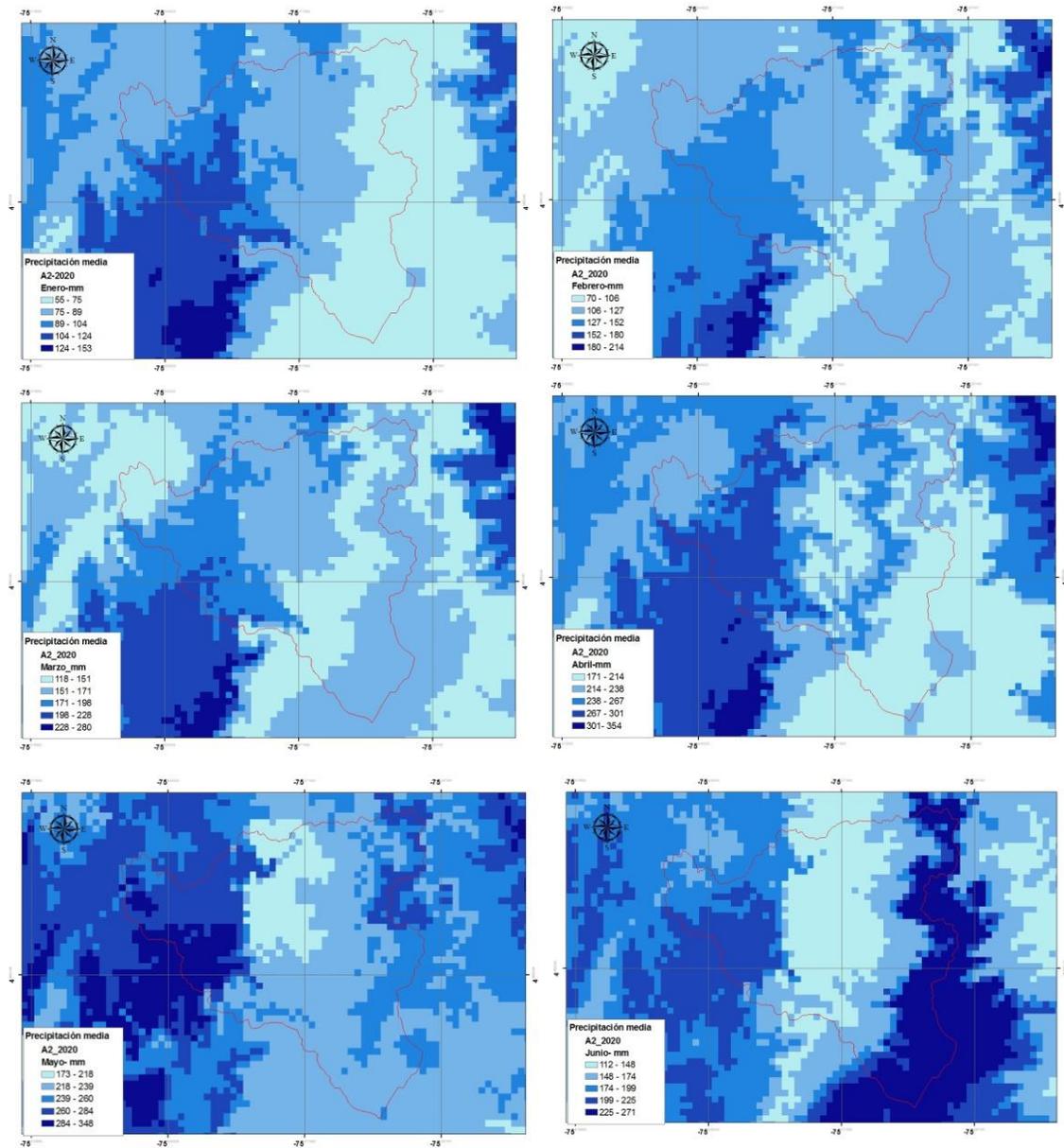
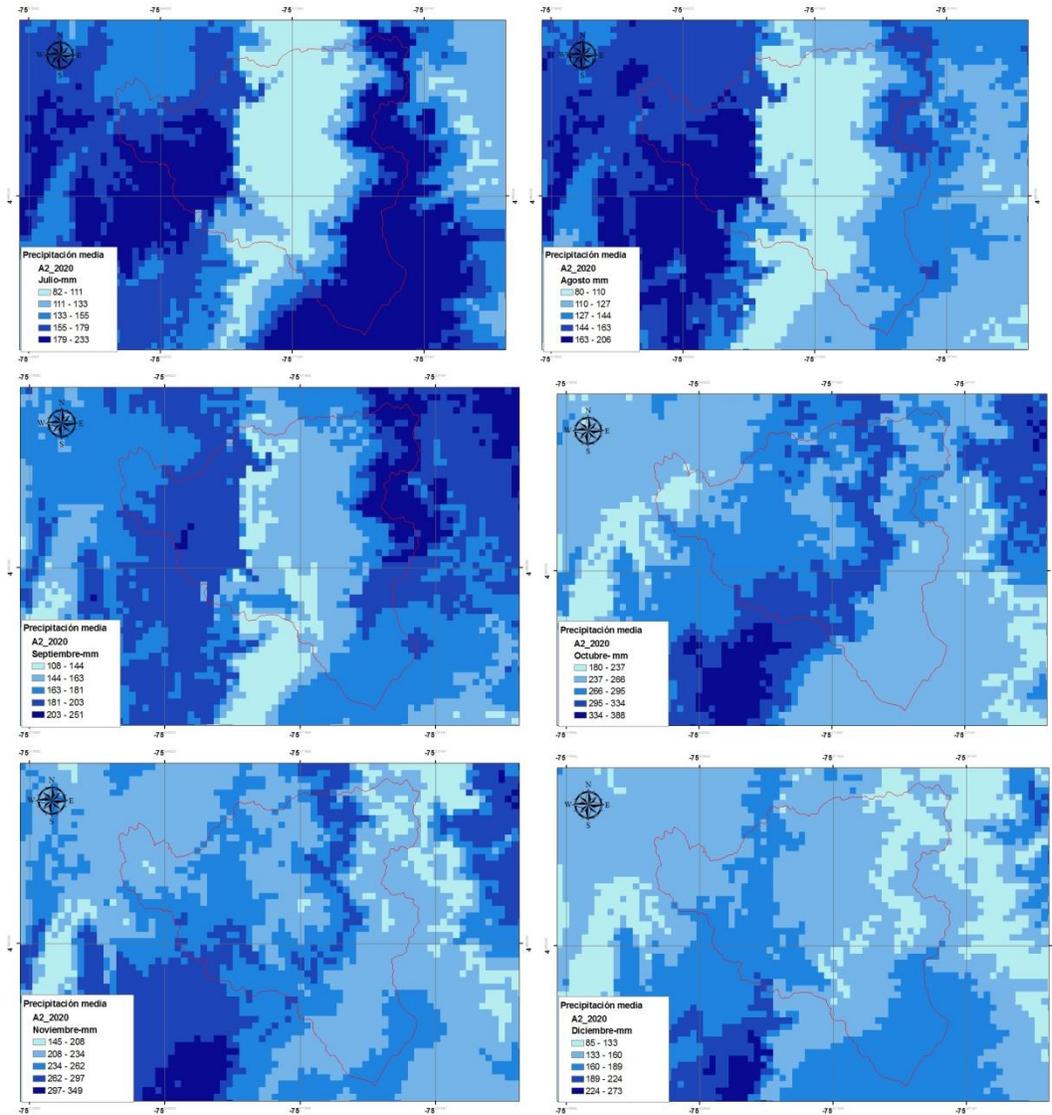
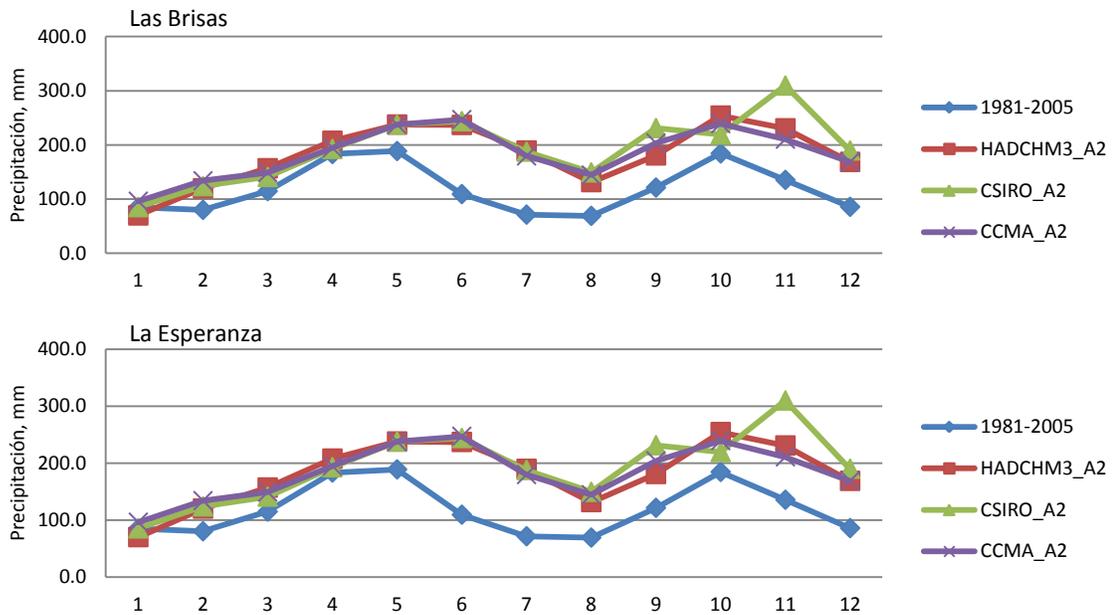


Figura 9.6: Precipitación media mensual HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]



Para las estaciones las Brisas y la Esperanza ubicadas en la cuenca alta, el comportamiento de la precipitación mensual estimada por los modelos HADCHM3, CSIRO y CCMA, bajo el escenario A2, en comparación con la normal climatológica 1981-2010 se muestra en la Figura 9.7; sólo para los meses de Enero, Marzo y Abril las anomalías estimadas se encuentran dentro del rango $\pm 10\%$.

Figura 9.7: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca alta



La Figura 9.8 esquematiza la distribución de la precipitación mensual promedio para algunas estaciones ubicadas por debajo de 2250 msnm. Los modelos HADCHM3 y CSIRO siguen la distribución de la Normal climatológica; mientras que el CCMA tiene algunas diferencias en los meses de octubre y noviembre.

Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja

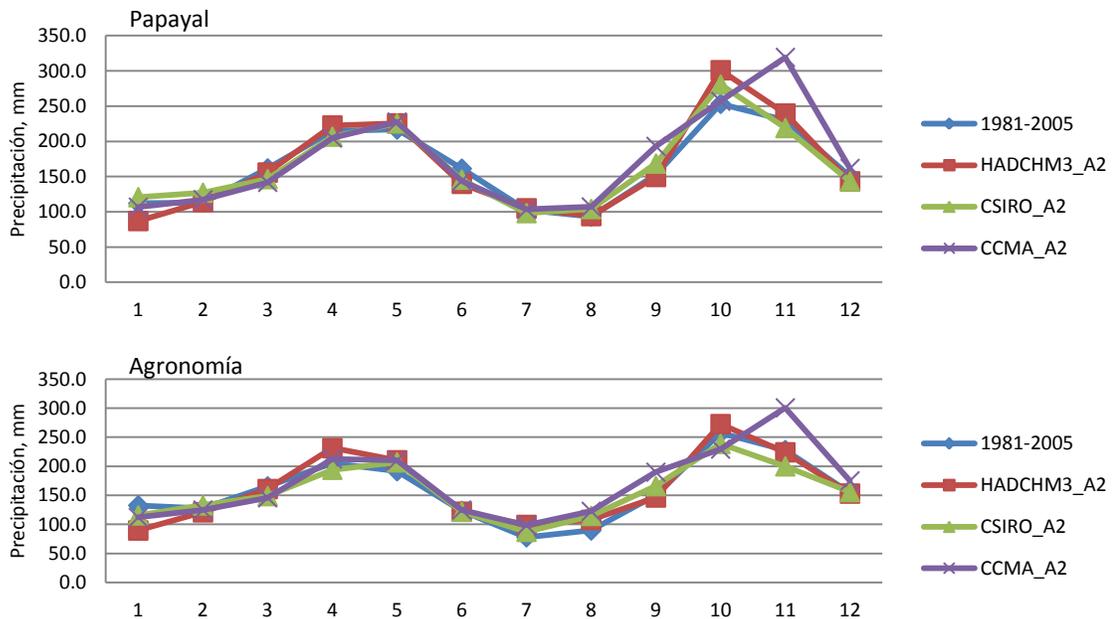


Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja

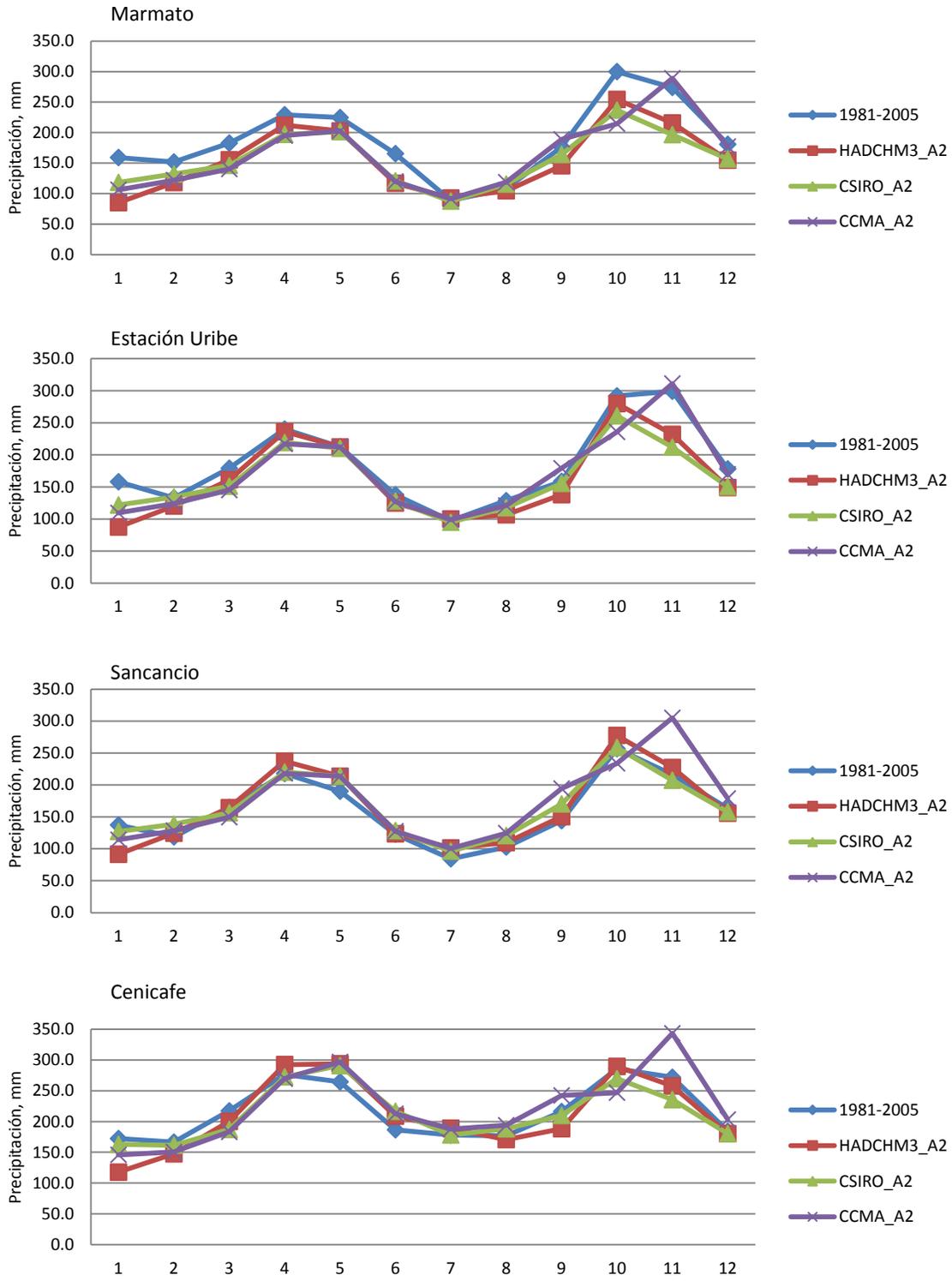
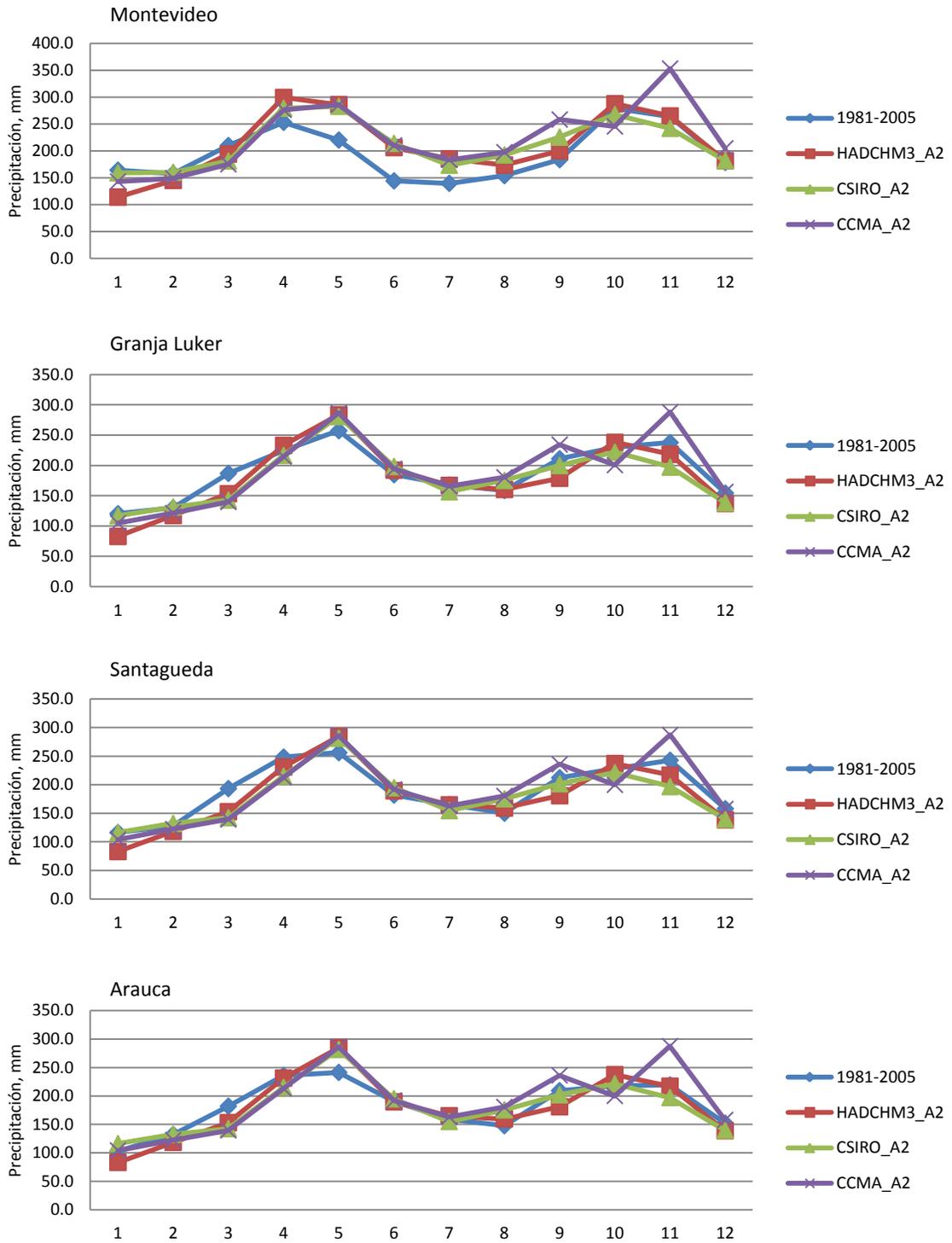


Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja



Para el escenario A2, las posibles anomalías promedio en la precipitación mensual frente a la normal climatológica 1981-2010 se resumen en las Tablas 9.11 y 9.12 para los modelos HADCHM3 y CSIRO, respectivamente. Los valores promedio fluctúan entre -11% a 10% con el primer modelo y 14% a 8% con el segundo. En las estaciones Montevideo, Neira, La Selva y Marmato se estiman las mayores anomalías; mientras que las menores se proyectan para la estación Papayal.

Tabla 9.11: Anomalía en la precipitación modelo HADCHM3-A2 2010-2039 [2020]

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papayal	2%	1%	-4%	4%	4%	-13%	2%	1%	-2%	19%	4%	-5%
Agronomía	5%	-5%	-3%	13%	10%	-1%	27%	20%	-2%	6%	-2%	-1%
Alta Suiza	-2%	-5%	-6%	0%	21%	5%	19%	13%	6%	6%	5%	-1%
Neira	-12%	-28%	-4%	11%	-1%	9%	24%	-12%	-24%	10%	-18%	-28%
Marmato	0%	-22%	-15%	-7%	-10%	-29%	4%	-3%	-17%	-15%	-21%	-14%
Sancancio	8%	5%	0%	9%	12%	1%	20%	7%	4%	8%	5%	-5%
La Uribe	3%	-10%	-10%	-2%	0%	-9%	3%	-17%	-13%	-4%	-22%	-16%
Java	5%	2%	-9%	23%	5%	12%	5%	1%	-16%	15%	10%	-1%
El Recreo	27%	-2%	-7%	-9%	2%	2%	-1%	-3%	-26%	3%	-12%	-2%
Naranjal	38%	-18%	-15%	-2%	-2%	-5%	-11%	-17%	-20%	-3%	-12%	-7%
Montevideo	35%	-8%	-8%	18%	30%	43%	33%	13%	9%	3%	1%	2%
La Selva	26%	24%	3%	11%	22%	27%	25%	14%	-11%	5%	-7%	-7%
Cenicafé	38%	-11%	-8%	6%	11%	12%	6%	-3%	-13%	1%	-5%	-2%
G.Luker	-2%	-10%	-18%	4%	10%	4%	0%	1%	-15%	4%	-8%	-11%
Santágueda	-2%	-7%	-21%	-7%	11%	4%	0%	6%	-15%	4%	-11%	-12%
Arauca	-2%	-10%	-16%	-2%	18%	-1%	3%	8%	-13%	9%	-1%	-9%

Tabla 9.12: Anomalía en la precipitación modelo CSIRO-A2 2010-2039 [2020]

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papayal	8%	13%	-9%	-4%	4%	-10%	-4%	10%	10%	11%	-5%	-5%
Agronomía	-6%	6%	-8%	5%	9%	2%	20%	11%	11%	-1%	-10%	0%
Alta Suiza	0%	6%	-11%	-7%	21%	9%	12%	19%	19%	-1%	-4%	1%
Neira	-32%	-19%	-9%	3%	-2%	13%	18%	-14%	-14%	3%	-26%	-27%
Marmato	-26%	-13%	-20%	-14%	-10%	-27%	-2%	-7%	-7%	-21%	-28%	-13%
Sancancio	-7%	17%	-5%	1%	12%	5%	14%	18%	18%	1%	-4%	-3%
La Uribe	-23%	1%	-16%	-9%	-1%	-7%	-3%	-2%	-2%	-11%	-29%	-15%
Java	-12%	14%	-15%	14%	4%	15%	-1%	-6%	-6%	7%	0%	0%
El Recreo	-7%	10%	-13%	-15%	1%	5%	-7%	-17%	-17%	-4%	-20%	-1%
Naranjal	-8%	-10%	-21%	-9%	-3%	-2%	-16%	-11%	-11%	-10%	-20%	-7%
Montevideo	-3%	2%	-14%	10%	29%	48%	24%	23%	23%	-4%	-8%	2%
La Selva	7%	38%	-3%	3%	21%	30%	18%	0%	0%	-2%	-15%	-6%
Cenicafé	-5%	-3%	-14%	-1%	10%	16%	0%	-3%	-3%	-6%	-13%	-2%
G. Luker	-3%	1%	-24%	-3%	9%	7%	-7%	-5%	-5%	-3%	-17%	-10%
Santágueda	0%	4%	-26%	-13%	10%	7%	-6%	-5%	-5%	-3%	-19%	-12%
Arauca	13%	0%	-22%	-9%	17%	2%	-3%	-3%	-3%	2%	-10%	-8%

El análisis comparativo de los valores proyectados en la precipitación media anual para 2010-2039 [2020], se consolida en la Tabla 9.13 para el escenario A2 y en la Tabla 9.14 para el B2. Si se calculan las anomalías de las estimaciones con la lluvia anual promedio multianual 1981-2010, se observa que las anomalías se ajustan a los rangos previamente establecidos por la literatura $\pm 10\%$, sólo para las estaciones ubicadas por debajo de 2200 msnm. Los modelos evaluados sobreestiman los regímenes de precipitación en las zonas altas de la cuenca, por encima de 3400 msnm.

Las diferencias en anomalías proyectadas entre los dos escenarios son del 7% para el HADCHM3 y CCMA y 3% para la modelo CSIRO.

Tabla 9.13: Precipitación media observada y estimaciones escenario A2

Estación	Altitud	1981-2010	HADCHM3_A2		CSIRO_A2		CCMA_A2	
		Normal	P, mm	Anomalía	P, mm	Anomalía	P, mm	Anomalía
Las Brisas	4150.00	1429	2185	53%	2205	54%	2312	62%
Letras	3684.00	1820	2298	26%	2331	28%	2436	34%
La Esperanza	3420.00	1590	2084	31%	2106	32%	2204	39%
Papayal	2245.00	1962	1977	1%	1986	1%	2083	6%
Agronomía	2088.00	1902	1937	2%	1952	3%	2046	8%
Alta Suiza	2055.00	1812	1863	3%	1881	4%	1974	9%
Neira	1902.00	2201	1989	-10%	1995	-9%	2087	-5%
Marmato	2000.00	2242	1858	-17%	1874	-16%	1966	-12%
Planta Sancancio	1850.00	1919	1976	3%	1995	4%	2088	9%
Estación Uribe	1842.00	2215	1949	-12%	1957	-12%	2052	-7%
Java	1778.00	1982	2024	2%	2030	2%	2130	7%
El Recreo	1430.00	2658	2470	-7%	2489	-6%	2606	-2%
Naranjal	1381.00	2881	2565	-11%	2582	-10%	2706	-6%
Montevideo	1370.00	2350	2540	8%	2562	9%	2685	14%
La Selva	1312.00	2322	2467	6%	2488	7%	2599	12%
Cenicafé	1310.00	2598	2538	-2%	2555	-2%	2678	3%
Granja Luker	1031.00	2265	2164	-4%	2178	-4%	2288	1%
Santágueda	1026.00	2282	2158	-5%	2173	-5%	2282	0%
Arauca	890.00	2190	2158	-1%	2173	-1%	2282	4%

Tabla 9.14: Anomalías en la precipitación anual promedio

Estación	Altitud	1981-2010	HADCHM3_B2		CSIRO_B2		CCMA_B2	
		Normal	P, mm	Anomalía	P, mm	Anomalía	P, mm	Anomalía
Las Brisas	4150.00	1429	2334	63%	2268	59%	2189	53%
Letras	3684.00	1820	2458	35%	2398	32%	2303	27%
La Esperanza	3420.00	1590	2225	40%	2168	36%	2086	31%
Papayal	2245.00	1962	2113	8%	2055	5%	1988	1%
Agronomía	2088.00	1902	2076	9%	2015	6%	1946	2%
Alta Suiza	2055.00	1812	1996	10%	1943	7%	1874	3%
Neira	1902.00	2201	2119	-4%	2058	-6%	1852	-16%
Marmato	2000.00	2242	1992	-11%	1935	-14%	1871	-17%
Planta Sancancio	1850.00	1919	2115	10%	2060	7%	1984	3%
Estación Uribe	1842.00	2215	2086	-6%	2020	-9%	1958	-12%
Java	1778.00	1982	2163	9%	2097	6%	2033	3%
El Recreo	1430.00	2658	2649	0%	2563	-4%	2465	-7%
Naranjal	1381.00	2881	2749	-5%	2664	-8%	2559	-11%
Montevideo	1370.00	2350	2721	16%	2644	13%	2541	8%
La Selva	1312.00	2322	2646	14%	2560	10%	2464	6%
Cenicafé	1310.00	2598	2720	5%	2635	1%	2533	-2%
Granja Luker	1031.00	2265	2320	2%	2244	-1%	2160	-5%
Santágueda	1026.00	2282	2313	1%	2239	-2%	2155	-6%
Arauca	890.00	2190	2313	6%	2239	2%	2155	-2%

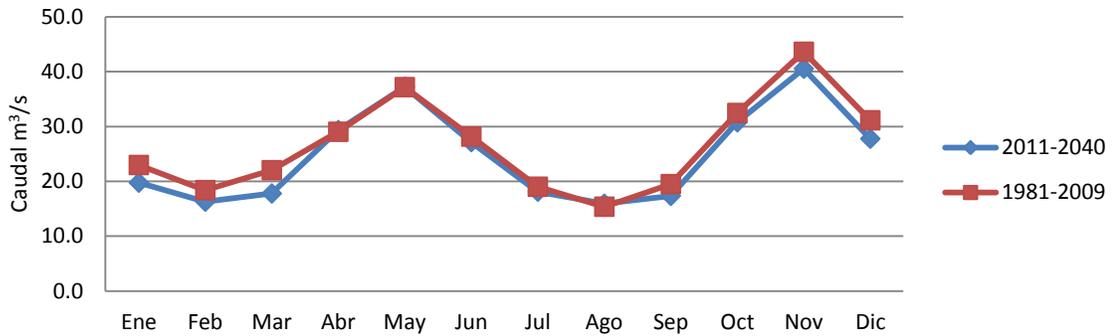
9.2.3 Escorrentía superficial

Considerando los valores de precipitación y temperatura a escala mensual proyectadas por el modelo HADCHM3 para el escenario A2, se corren los diferentes modelos en la estación El Retiro. Con el modelo TETIS, la distribución de caudales promedio para el período 2010-2039 comparado con la normal climatológica 1981-2010 se representa en la Tabla 9.15 y en la Figura 9.9. El caudal promedio estimado es $24,8 \pm 1.6 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa una reducción del 7%.

Tabla 9.15: Caudal y anomalías promedio estimadas 2010-2039

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal m^3/s	19.8	16.3	17.8	29.3	37.2	27.1	18.1	15.9	17.3	30.8	40.5	27.8
Nivel confianza	4.0	3.2	3.8	4.5	7.2	4.5	3.9	3.3	3.9	6.0	7.7	4.7
Anomalía	-14%	-11%	-19%	1%	0%	-4%	-5%	4%	-11%	-5%	-7%	-11%

Figura 9.9: Caudal promedio mensual estación El Retiro Escenario A2

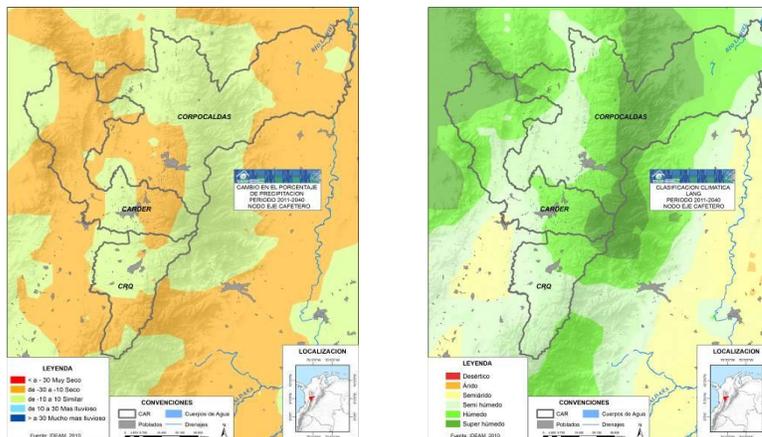


Con el modelo Thomas el caudal promedio simulado es $27 \pm 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a un incremento del 2%. Con el Modelo Arma 1.1. Salas y Smith, el caudal simulado es $28.2 \pm 1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual equivale a un incremento del 6% en el caudal.

Según las proyecciones del IDEAM (2010) y las estimaciones del Nodo Regional de cambio climático, para el período 2011-2040, se estima una posible reducción del régimen de pluviosidad en un 11.8% y en escenario pesimista de hasta el 31.5%; un aumento de 1.4°C en la temperatura; reducción de la humedad relativa en 2.1% y cambios en la clasificación climática de Lang, entre húmedo y semihúmedo, como se indica en la Figura 9.10.

Tomando los valores promedio de la temperatura ($+1,4^\circ\text{C}$) y en la precipitación (-10%), según las proyecciones del IDEAM (2010), se perturban las series mensuales y se calculan los caudales para el período 2011-2040, por modelación hidrológica. Con TETIS se proyectan caudales promedio de $19 \pm 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa una reducción del 28% en la oferta hídrica en comparación con la normal climatológica para el período 1981-2010. Con el modelo Thomas se estiman caudales promedio de $22.8 \pm 1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalentes a una reducción del 14% y con el modelo Arma 1.1. (Salas & Smith) el caudal simulado es $25.2 \pm 1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual corresponde a una reducción del 5%.

Figura 9.10: Posibles cambios climáticos 2011-2040 (IDEAM, 2010)



9.2.4 Indicadores del régimen hidrológico

Basados en los resultados de la simulación hidrológica con el modelo TETIS, a partir de las estimaciones de cambios en la temperatura y precipitación con escenarios de cambio climático, se calculan los posibles indicadores futuros, los cuales se consolidan en la Tabla 9.16. Se consideran tanto las proyecciones de caudal obtenidas a partir de los cambios estimados en la temperatura y precipitación con el modelo HADCHM3 bajo el escenario A2, como las condiciones más extremas reportadas por IDEAM (2010).

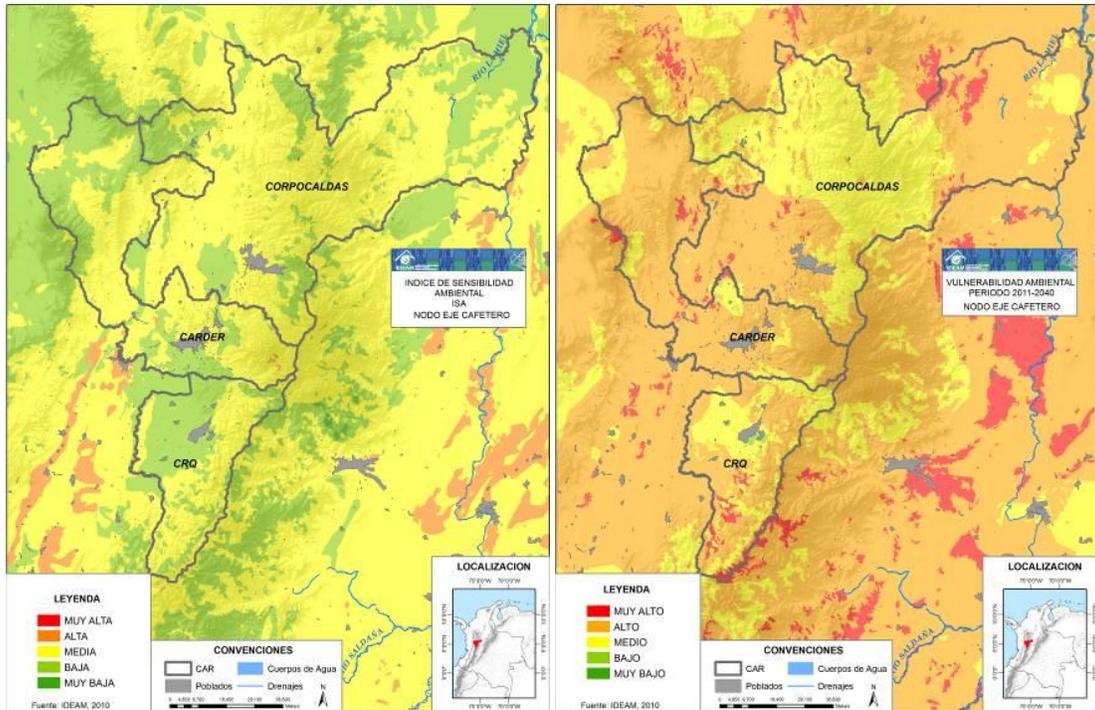
Por efecto de aumento de la demanda y reducción en la oferta, el índice de uso de agua llegaría a valores muy altos; el índice de stress hídrico relativo a valores altos y se sobrepasaría los límites del índice de disponibilidad per cápita de 1000 m³/hab-año (Falkenmark, 1999), incrementando el grado de vulnerabilidad de la cuenca.

Tabla 9.16: Indicadores del régimen hidrológico proyecciones futuras

Indicador	1981- 2010		2011-2040 Cambio climático- HADCHM3_A2		2011-2040 Cambio climático (1.4°C, -10% P)	
	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
Índice Regulación Hídrica-IRH	0,36	Muy baja	0,35	Muy baja	0,36	Muy baja
Índice Aridez	0,18	Excedentes	0,18	Excedentes	0,20	Moderado y Excedentes
Oferta hídrica Total- Mm ³ /año	838 ±15		782±50		599,3±38	
Caudal Ambiental Mm ³ /año	373,7		351,9		278,7	
Oferta hídrica disponible Mm ³ /año	464,8		430,1		320,6	
Demanda hídrica Mm ³ /año	90,2		245		245	
Índice disponibilidad per cápita	1554	Stress hídrico	1290	Stress hídrico	988	Escasez de agua
Índice stress hídrico relativo	0,19	Medio	0,57	Alto	0,76	Alto
Índice uso de agua	19,4	Moderado	57	Alto	76	Muy Alto
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento		Alto		Muy Alto		Muy Alto

Según las proyecciones del IDEAM (2010) y las estimaciones del Nodo Regional de cambio climático, para el período 2011-2040; la sensibilidad de la región está en una categoría de media/baja y predomina la alta vulnerabilidad para dicho período, como se observa en la Figura 9.11

Figura 9.11: Sensibilidad y Vulnerabilidad al Cambio climático (IDEAM, 2010)



10. Conclusiones

El análisis de vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático se ha realizado de forma satisfactoria a lo largo de este trabajo. Las señales de cambio climático en la cuenca del río Chinchiná se evidencian por el aumento promedio en las temperaturas medias en 0,5°C, mínimas en 0,45°C y máximas en 0,25°C, para el período 1981-2010, con respecto al registro histórico-1951-1980. La tasa de cambio promedio de la temperatura media es 0,18°C/década, mayor que los promedios nacionales registrados por IDEAM (2010) y que los globales reportados por el IPCC (2007), 0,17°C/década y 0,13°C/década, respectivamente. El nivel de aumento de las temperaturas mínimas es en promedio de 0,13°C/década para las cuencas alta a media y 0,26°C/década para la cuenca baja; mayores que el promedio nacional 0,10°C/década (IDEAM, 2010). Para las máximas el incremento promedio es 0,11°C/década, consistentes con el promedio nacional (IDEAM, 2010).

En la cuenca del río Chinchiná se evidencia el fenómeno de Oscurecimiento Global (*Global dimminig*), término empleado para describir la reducción gradual de la cantidad de luz solar que alcanza la superficie terrestre. A escala global, numerosos estudios (Gilgen & et.al, 1988; Li & Zhou, 1995; Liperet, 1997; Stanhill & Cohen, 2001; Pinker et.al., 2005; Rodrigues & et.al., 2010) muestran reducciones significativas en la radiación solar que alcanza la tierra durante los últimos 50 años; reducción estimada, en 2,7% por década (Stanhill & Cohen, 2001). Entre las posibles causas identificadas (Stanhill & Cohen, 2001), partiendo del modelo de Darnell (1992) se encuentran los cambios en la carga de aerosoles, en la nubosidad y sus interacciones. Sin embargo, recientes estudios (Bartók, 2010; Wild & et.al., 2005) indican un cambio en la tendencia a partir de 1990s, atribuido a cambios en el contenido de aerosoles. Esta modificación en la tendencia es detectada gráficamente en el brillo solar; sin embargo, el análisis de varianza no indica diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) que permitan confirmar dicho cambio. Es importante el seguimiento de este fenómeno porque opaca los efectos del calentamiento global, pero tiene repercusiones en la productividad agrícola.

Para la humedad relativa, la anomalía promedio en las estaciones de la cuenca media refleja un incremento de 1,5% en la humedad relativa; mayor que la reportado como promedio nacional 1% (IDEAM, 2010). Sin embargo, en las estaciones de la cuenca media-alta y bajo no se presentan cambios significativos, lo cual es consistente con las proyecciones del IPCC (2007).

Con respecto a la precipitación promedio, se encuentra tanto incremento (anomalías hasta del 9%) como disminución (anomalías hasta del 5%); el efecto neto es positivo (2%), pero no es estadísticamente significativo ($\alpha=0,10$). Sin embargo, en la medida que aumenta la escala de tiempo de la serie, se va reduciendo el número de estaciones donde se encuentran diferencias significativas ($\alpha=0,10$), por la alta variabilidad de la precipitación, con coeficiente de variación entre el 140 al 260%. En los meses más lluviosos se evidencia el aumento de la precipitación con diferencias estadísticas significativas ($\alpha=0,10$) en el 50% de las estaciones evaluadas.

El régimen hidrológico en la cuenca del río Chinchiná es afectado por el fenómeno de variabilidad climática natural ENSO- Oscilación del Sur; la Niña ocasiona un incremento en los caudales del 28%, en promedio, con eventos extremos hasta del 83%, registrados en la cuenca baja; por otra parte, el Niño produce una disminución en el flujo, alcanzado un promedio del 24%, con extremos de 80% en las cuencas alta y media alta. Estos cambios en el caudal se deben a las alteraciones en los patrones de precipitación que producen los episodios fríos- aumentos del 27% en promedio hasta del 140% - y los eventos cálidos- disminución del 18% en promedio con reducciones extremas hasta del 55%- . Consistente con el IDEAM (2010), las afectaciones son más intensas para el trimestre diciembre-enero-febrero en el Niño; sin embargo, para la Niña la mayor intensidad ocurre entre septiembre a diciembre.

Se evidencia intensificación del fenómeno de la Niña y aumento de los episodios de lluvias intensas por encima del percentil 95 y 99. Las características morfométricas de la cuenca permiten dispersar el escurrimiento de lluvias intensas y por tanto, está menos sujeta a inundaciones; sin embargo, la alta torrencialidad y las características geomorfológicas, en especial sus altas pendientes, aumentan la posibilidad de avenidas torrenciales y avalanchas, lo cual aumenta la vulnerabilidad del recurso. Se recomienda el desarrollo de estrategias de adaptación a la variabilidad climática dentro del plan de gestión por su impacto no sólo en el recurso hídrico, sino también en las actividades socioeconómicas que se desarrollan en la cuenca.

En relación a la oferta hídrica, el balance hídrico reporta reducciones en la cuenca; se detecta el incremento, en algunas estaciones. Para el período actual 1981-2010, la cuenca del río Chinchiná está sometida a stress hídrico basado en el índice de disponibilidad per cápita; los indicadores de calidad del agua son malos y la alteración potencial de la calidad es muy alta, como consecuencia del alto grado de contaminación. La vulnerabilidad es alta, debido al muy bajo índice de retención y regulación del recurso hídrico y las presiones moderadas de uso con respecto a la oferta hídrica superficial disponible. En algunas zonas, se evidencian presiones altas por la demanda para generación eléctrica, con lo cual se aumenta el grado de vulnerabilidad.

La modelación para el período 2011-2040, basados en el análisis de tendencias históricas, no proyectan cambios significativos en la oferta hídrica. El índice de uso del agua alcanzaría valores altos por efectos del crecimiento de la población y de las actividades económicas; por la muy baja capacidad de regulación hídrica; el Índice de Vulnerabilidad, IVH, se incrementaría a muy alto. Las proyecciones de tendencias son empleadas para la modelación bajo condiciones estacionarias con la cual asume que el futuro es una simple proyección del pasado; por efecto del cambio climático esta suposición no puede ser considerada.

Con escenarios de cambio climático para el período 2011-2040 en relación con la normal climatológica 1981-2010, los posibles incrementos de la temperatura son de 0,8°C; 0,5° y 0,4°C con los modelos HADCHM3, CSIRO y CCMA, respectivamente, para el escenario A2. Para el escenario B2 los incrementos de temperatura son 0,5°C con los modelos HADCHM3 y CCMA y 0,7°C con el modelo CSIRO. Sin embargo, deben tenerse en cuenta que el método de downscaling Delta tiende a reducir las diferencias proyectadas por los modelos de circulación global. Con relación a la precipitación, los modelos evaluados sobre-estiman las lluvias en las zonas alta de la cuenca por encima de los 3400 msnm; en las demás regiones el cambio en la precipitación anual fluctúa, para el escenario A2, entre -17% a 8% con el modelo HADCHM3; -16% a 9% con CSIRO y -12% a 14% con CCMA. Mientras que para el escenario B2, -11% a 16% HADCHM3; -14% a 13% CSIRO y -17% a 8%.

A partir de las estimaciones de cambio en la precipitación y la temperatura dadas por el modelo HADCHM3 para el escenario A2, se estiman los cambio en la oferta hídrica, la cual podría presentar una reducción del 7%, según la modelación con TETIS. Por otra parte, los modelos Thomas y Arma 1.1, proyectan incrementos del 2 al 6% para las mismas condiciones. Sin embargo, deben considerarse los errores de balance obtenidos en el proceso de calibración 5% para el modelo TETIS; -2% para el modelo Thomas y -5% para el modelo Salas & Smith. Con estos resultados y realizando proyecciones en la demanda basados en las tasas demográficas y los índices de crecimiento económico, los indicadores de uso de agua y el índice de vulnerabilidad pasaría a valores muy altos.

Estimando reducciones en la precipitación de -10% y aumento en la temperatura de 1,4°C, basados en las proyecciones de la segunda comunicación Nacional, la reducción en la oferta hídrica alcanzaría el 28%, según el modelo TETIS; sin embargo, los modelos Thomas y Arma 1.1., las reducciones serían del 14% y 5%, respectivamente. Nuevamente, es importante considerar los errores del balance obtenidos para estos modelos. Bajo estas condiciones el índice de disponibilidad per cápita sería inferior a 1000 m³/hab-año (Falkenmark, 1999) alcanzando la condición de escasez de agua. Por efecto de aumento de la demanda y reducción en la oferta, el índice de uso de agua llegaría a valores muy altos y el índice de stress hídrico relativo a valores altos; incrementando el grado de vulnerabilidad de la cuenca.

Estos resultados están basados en condiciones medias actuales; tienen incertidumbres generadas en la medición las variables climatológicas temperatura y precipitación; en la modelación hidrológica, por los errores de balance y en las proyecciones por efectos de la estructura de los modelos y los errores asociados; no pueden tener en cuenta todas las todas las posibilidades de adaptación ni todos los factores no climáticos dinamizantes de cambio; por tanto, deben ser tomados como indicadores de la necesidad de profundizar en la investigación y conocimiento de los impactos potenciales.

El cambio climático es un fenómeno complejo que plantea desafíos para todos los sectores; la incorporación de nuevas tecnologías permitirá descubrir estrategias y oportunidades de adaptación que faciliten el desarrollo sostenible y permitan anticiparse, de manera proactiva para afrontar los cambios generados por el cambio climático y la variabilidad climática natural. El uso de herramientas tecnológicas como la modelación hidrológica permite estimar los cambios y anticiparse para establecer acciones de adaptación.

11. Líneas de Investigación futuras

Para la cuenca del río Chinchiná, la implementación de medidas efectivas de adaptación es requerida para reducir los efectos e impactos del cambio climático y de la vulnerabilidad climática. Es necesario profundizar en el enfoque probabilístico que incluya diferentes escenarios de variación de las lluvias y de las demás variables del ciclo hidrológico y sus probabilidades de ocurrencia, de tal manera que se pueda estimar las incertidumbres asociadas a la simulación de caudales.

Por otra parte, proyectos futuros deben considerarse los impactos del uso del suelo y la deforestación y su influencia en el régimen hidrológico, aspectos que no fueron abordados en el estudio. Otras posibles líneas de investigación abarcan los efectos e impactos en el sector agrícola y energético, sectores altamente demandantes de agua en la cuenca.

Para los proyectos futuros se recomienda el análisis de los escenarios con modelos climáticos que representen de una manera más apropiada las condiciones de montaña; de igual manera, se requiere la evaluación de otras técnicas de reducción de escala, de tal manera que no se minimicen las proyecciones efectuadas por los modelos.

Bibliografía

- Acevedo & Poveda (2010). Construcción y análisis de curvas intensidad-frecuencia-duración (IDF), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Revista Colombia Amazónica*
- Adger, et. al. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press.
- Alcaldía de Manizales. (2003). Plan de Ordenamiento territorial de Manizales. Manizales.
- Allen, Ingram, & Stainforth. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* 419 .
- Alley, W.M. (1984). On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*, 20 (8), 1137-1149.
- Allen, Pereira, Raes, Smith. (1998). Crop evaporation; guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper. 56. 300p.
- Allison, et. al.. (2009). *The Copenhagen Diagnosis*. Sydney, Australia: The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC).
- Andersen, H.E., Kronvang, B., Larsen, S.E., Hoffmann, C.C., Jensen, T.S., Rasmussen, E.K. (2006): Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin. *Science of the Total Environment* 365: 223-237.
- Andreásson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. and Lindström, G. 2004: Hydrological change: climate change impact simulations for Sweden.
- Ångström, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 50:121-125.
- Aparicio, F. J. (2007). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Arnell N W, 2003. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol 7. Issue 5.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrigation Drainage Eng.* 119(3): 429-442.
- Bae, Jung and Chang. Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation. (2008). *Climate Research* Vol 35: 213-226.
- Balagli et al. Managing Climatic Risks for Enhanced Food Security: Key information capabilities. *Procedia Environmental Sciences* 1 (2010) 313–323. 2010.
- Banco de la República. (2007). *El fenómeno del Niño y su posible impacto en Colombia*. Bogotá.
- Banco Mundial. (2008). *Desarrollo con menos carbono, respuestas latinoamericanas al desafío del cambio climático*.
- Bartak. (2009). How to extract river networks and catchment boundaries from DEM: a review of digital terrain analysis techniques. *Journal of Landscape Studies* 2 , 57-68.
- Barthel, et. al. (2008). An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain. *Environmental Modelling and Software*, 23: 1095-1121.
- Bathurst, J. C. & O'Connell, P. E.: 1992, Future of distributed parameter modeling: The Systeme Hydrologique Europeen, *Hydrological Processes* 6, 265–277.

- Bartok. (2010). Changes in solar energy availability for South-eastern Europe with respect to global warming. *Physics and Chemistry of the Earth* 35 , 63-69.
- Bendient, & Huber. (1988). *Hydrology and Foodplain Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Beven, K.: (1989), Change ideas in hydrology – The case of physically based models, *J. Hydrol.* 105, 157–172.
- Beven, K.J. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16 (1), pp. 41-51.
- Blumm, M. D., & Tornqvist, T. E. (2000). Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology* 47 , 2-48.
- Bormann, Helge. (2007). Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. *Ecological modeling*, August 2007.
- Box & Jenkins. (1976). *Time series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day, San Francisco, 575 pp.
- Brekke, L.D., et. al. (2009). *Climate Change and Water Resources Management-A Federal Perspective*
- CARDER. (2007). *Situación de los recursos naturales y el medio ambiente en Risaralda*. Pereira: Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- Carvajal, Jiménez y Materón, 1998: Incidencia del fenómeno del Niño en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia. *B. Inst. Fr. Estud. Andines*, 27.
- Castro, L. (2006). *Enfoques teóricos para definir caudales ambientales*.
- Ceballos, et.al. (2010). *Glaciares Santa Isabel y El Cocuy Colombia: Seguimiento a su dinámica durante el período 2006-2008*. En C. D. Lopez, & J. Ramirez, *Glaciares, nieves y Hielos de America Latina. Cambio Climático y Amenazas*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería- INGEOMINAS.
- Chow, Maidment, & Mays. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmeier, D.P. and Palmer, R.N. 2004: The effects of climate change on the hydrology and wáter resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change* 62, 337–63.
- Clark. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. *Proc. Amer. Soc. Eng. , Vol 69. P 1333-1360*.
- Clark, et. al. (2008). Fuse: a modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research* 44.
- Collazos, Guillermo (2009). *Sistema Soporte de Decisión H2O, para planificación y gestión de recursos hídricos*. <http://ssd-h2o.com.ar/>
- Comisión Económica para el América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2009). *Cambio Climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Contraloría General de Caldas. (2009). *Informe Auditoría a la Gestión Integral del Recurso Hídrico Cuencas Chinchiná y Miel*. Manizales.
- CORPOCALDAS. (2005). *Caracterización de la cuenca del Río Chinchiná*. Manizales: CORPOCALDAS.
- CORPOCALDAS. (2001). *Mapa de suelos de Caldas*. Manizales.
- CORPOCALDAS.(2008). *Resolución No 035*. Manizales: Corporación Autónoma Regional de Caldas.
- CORPOCALDAS. (1999). *Síntesis del Diagnóstico Plan de Ordenamiento Ambiental del Territorio de la Cuenca del Río Chinchiná*. Manizales.
- Correa (2005) *Implementación del Modelo de Thomas para el balance hídrico empleando la herramienta computacional HidroSIG-JAVA*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Cortes. (2010). *Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una ciudad de media montaña andina*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Cunge. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *J. Hydraul. Res IAHR* 7(2) , 205-230.
- DANE. (2010). *COLOMBIA. PROYECCIONES DE POBLACIÓN MUNICIPALES POR ÁREA 2005-202*.
- Debels, & Ecurra. (2010). *Introducción al Uso de Herramientas de Modelación*. Bogotá: Banco Mundial.
- Debels, P. & Ecurra (2010). *Análisis e interpretación de resultados de procesos de modelación*. Bogotá: Banco Mundial.

- Decreto 1729. (2002). Cuencas Hidrográficas. Bogotá: Presidencia de la República.
- Dominguez et. al. (2008). Relaciones Demanda-Oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del Recurso Hídrico Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc: Vol XXXII Numero 123* , 195-212.
- Dore. (2004). *Climate Change and changes in global precipitation patterns: What do we know?* St Catharines, Canada: Climate Change Laboratory, Brock University.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chavez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de Cuencas: Teoría y Práctica*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Eckhardt, K. and Ulbrich, U. (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284, 244–52
- eflownet. (2011). Global Environmental Flow Network. Recuperado el Agosto de 2011, de <http://www.eflownet.org/>
- Erazo, J. (2004). Análisis de la aplicación de la exoneración del impuesto predial como inventivo para la conservación en Manizales. Manizales: Instituto Alexander von Humboldt.
- Eslava, et.al. (1986). Los Climas de Colombia. *Atmosfera* , pp 35-81.
- Estrela T (1997). *Formulación teórica del modelo Témez*. Publicaciones del CEDEX 18 p.
- Falkenmark, M. 1999. Forward to the future: a conceptual framework for water Dependence en *AMBIO a journal of the human environment*, Royal Swedish Academy of Sciences, XXVIII.
- FAO. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*.
- Francés F, Vélez J.I y Vélez J.J. (2007). “Split parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models”. *Journal of Hydrology*, 332, p 226-240.
- Frei, A., Armstrong, R.L., Clark, M.P. and Serreze, M.C. 2002: Catskill Mountain water resources: vulnerability, hydroclimatology, and climate-change sensitivity.
- FOREC, CORPOCALDAS, CARDER, CVC, CORTOLIMA. (2000). *Construcción de un Ordenamiento Territorial para el desarrollo sostenible de la ecorregión del Eje Cafetero*. Ministerio del Medio Ambiente.
- Gandin (1965) *Objective Analysis by Least Squares*, Israel Program for Scientific translations
- Garbrecht, & Martz. (1999). The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology* 193 , 204-213.
- Gardner, L. R. (2009). Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. *Journal of Hydrology* .
- Genta. (2008). *Monitoreo y disponibilidad de recursos hídricos en Uruguay*. Dirección Nacional de Aguas y Saneamiento. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Montevideo.
- Gilgen, et.al. (1988). Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *J. Climate* 11. , 2042-2061.
- GIRS Center. (2011). *Hydrological Drainage Delineation for use in the Capra Model- Theory*. Florida: The Florida International University.
- GIRS Center. (2010). *Preparation of DEM raster data sets for use in the CAPRA model- Theory*. Florida: Florida International University.
- Gleick, P. H. 1986, *Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes*, *J. Hydrol.* 88, 97–116.
- Gobernacion de Caldas- Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Estudios para el desarrollo del ordenamiento territorial y estudio técnicos para el sistema vial de la región centro sur de Caldas*. Manizales.
- Gobernación de Caldas. (2011) *Carta estadística 2010-2011 del departamento de Caldas*. Manizales.
- Gómez, G. L.; Guzmán, M., O. 1995. *Relación empírica entre la radiación global y el brillo solar en el área de cenicafé, Chinchiná, Caldas*. Cenicafé.
- Grimaldi, et.al. (2007). A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advanced in Water Resources* , Vol 30, Issue 10, p. 2151-2158.
- Grisales, A. (1979). *Suelos de la zona cafetera, clasificación y uso*. Medellín: Fondo Cultural Cafetero.
- Guan, Dabo. 2008. A new and integrated hydro-economic accounting and analytical framework for water resources: A case study for North China. *Journal of Environmental Management* 88 (2008) 1300–1313

- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
- Haltiner and Salas (1988). Development and testing of a multivariate, seasonal, ARMA (1,1) Model. *Journal of Hydrology*, 104. 247-272
- Hathaway. (1945). Design of Drainage facilities Transactions. American Society of Civil Engineers , p. 697-730.
- Hellweger. (1997). AGREE-DEM Surface Reconditioning System. Texas University.
- Henderson, & Wooding. (1964). Oveland flow and groundwater flow from a steady rain of finite duration. *J. Geoph. Research* , p. 193-206.
- Henriquez, Azócar, & Aguayo. (2006). Cambio de uso de suelo y escorrentía superficial. *Revista de Geografía Norte Grande* , No 36 p 61-74.
- Hense, A. P., Krahe, & Fohm. (1988). Recent fluctuations of tropospheric temperatura and water vapor content in tropics. *Meteorol. Atmos Phys.* vol 38 , 215-227.
- Hermelin, M. (2007). Entorno natural de 17 ciudades de Colombia. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Hijmans et al. Very high resolution interpolated climate surface for global land areas. *International Journal of climatology* 25: 1965-1978.
- Hoffman, & Sander. (2007). remote sensing and GIS in Hydrogeology. *Hydrogeology Jornal* 15 , 1-3.
- IDEAM et.al. (2010). 2a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial
- IDEAM. (2005). Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales- IDEAM.
- IDEAM. (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- IDEAM. (2009). Boletines informativos sobre el monitoreo del Fenómeno del Niño.
- IDEAM. (2001). Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- IDEAM. (2010). Estudio Nacional de Agua 2010. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- IDEAM. (2004). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2008). Guía técnico Científica para la ordenación de Cuencas Hidrográficas en Colombia (Segunda Edición ed.). Bogotá.
- IDEAM. (2004). Guía Técnico-Científica para la Ordenación y Gestión de Cuencas Hidrográficas en Colombia. Bogotá.
- IDEAM. (2008). Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia. Estudio Nacional del Agua. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2008). Informe sobre evaluación de los recursos hídricos de Colombia. Bogotá.
- IDEAM. (2004). Zonificación y codificación de Cuencas Hidrográficas en Colombia. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1993). Mapa Geológico de Caldas.
- International Institute for Sustainable Development. IISD. (2003). Combining disaster risk reduction, natural resource management and climate change adaptation in a new approach to the reduction of vulnerability and poverty.
- IPCC. (2007). Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza: Informe del Grupo Integubernamental de Exoertos sobre el cambio climático.
- IPCC. (2008). El Cambio Climático y el agua. Ginebra, Suiza.

- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC, 2001: *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge,
- IPCC (2011) *Expert Meeting on assessign and combining multimodel climate projections*. National Center for Atmospheric Research. Colorado, USA.
- Izzard. (1946). *Hydraulics of runoff from developed surfaces from developed surfaces*. Proceedings of the 26th Annual meeting of the Highway Research Board, National Research Council .
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones del Café - CENICAFE.
- Jenson, & Domingue. (1988). *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11) , 1593-1600.
- Jiang Tao; et. al. (2007). *Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China*. *Journal of Hydrology* (2007) 336, 316– 333
- Johnstone, & Cross. (1949). *Elements of Applied Hydrology*. New York: Ronald Press.
- Kenward, Lettenmaier, Wood, & Fielding. (2000). *Effects on Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions*. *Remote Sensing of Environmental* 74 , 432-444.
- Kerby. (1959). *Time of concentration of overland flow*. *Civil Eng* 60 , 174.
- Kirpich. (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. *Civil Eng.* 10 (6) , 362.
- Korzun, V.I., et. al. (1978). *Atlas of world water balance*. USSR National Committee for the International Hydrological Decade. Paris, UNESCO.
- Kundzewicz, et.al. (2007). *“Freshwater resources and their management”*, *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. *Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- Li, & Zhou. (1995). *The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanisms*. *Acta Met Sin* 9 , 57-68.
- Linacre. (1992). *Climate data and resources*. London: Routledge.
- Lindsay & Creed. (2005). *Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach*. *Hydrologica Process* 19 , 3113-3126.
- Liperet. (1997). *Recent Changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany*. *Int. J Climate* 17 , 1581-1593.
- Liu. (2008). *Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues*. *Progress in Physical Geography* 32(1) , pp. 31–49.
- Loaiciga, H. A., Valdes, J. B., Vogel, R., Garvey, J. and Schwarz, H.: 1996, *Global warming and the hydrologic cycle*, *J. Hydrol.* 174, 83–127.
- Lofgren. (2004). *Global warming effects on Great Lakes water: More precipitation but less water?* Proceedings 18 th Conference on Hydrology, 8th Annual Meeting of the American Meteorology Society, (pág. 3). Seattle.
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Dalezios, N.R. (2002). *Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada*. *Hydrology and Earth System Sciences* 6.
- Lvovitch, M. I. 1970. *World water balance (General Report)*. Symposium on the world water balance. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93, Vol. II.
- Ma, L., J. C. Ascough II, L. R. Ahuja, M. J. Shaffer, J. D. Hanson, and K. W. Rojas. 2000. *Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation*. *Trans. ASAE* 43(4): 883-895.
- Magrin, et. al. (2007). *Latina America, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Malham. (2000). Elementos científicos y no científicos que conciernen al calentamiento climático producido por el hombre. New Jersey: Universidad Princeton.
- Martz, & Garbrecht. (1999). An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computes & Geosciences* 25 (7) , 835-844.
- Martz, & Jong. (1988). CATCH: A Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. *Computer & Geosciences* 14 , 627-640.
- Masson (1966). Quantitive estimation of solar radiation. *Solar energy*. Vol 10 issue 3, 119-124.
- McCarthy, et.al. (2001). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. London: Cambridge University Press.
- McCuen, R.H. & Spiess, J.M. Assessment of kinematic wave time of concentration. *J. of Hydraulic Eng. ASCE*, 121 (3), 256-266. 1995
- Mesa. (2007). *¿A dónde va a caer este globo? Acerca del futuro de la Tierra*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Mesa, Poveda, & Carvajal. (1997). *Introduction to the Climate of Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Meyer. (1915). Computing run-off from rainfall and otgher physical data. *Trans. Am. Soc. Civil Engs* V79 , 1056-1155.
- Mimikou, M., Kouvopoulos, Y., Cavadias, G. and Vayianos, N. (1991), Regional hydrological effects of climate change, *J. Hydrol.* 123, 119–146.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Propuesta de Reglamentación de caudales ambientales*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 865 de 2004. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2008). *Reconocimiento de los Servicios Ambientales, una oportunidad para la gestión*. Bogota.
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (2010). Decreto 4831 . Bogotá.
- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Decreto 3939. Bogotá.
- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Reflexiones sobre el clima y sus implicaciones en el desarrollo humano en Colombia*. Bogotá.
- Mitchell, T. D. y Hulme M. (1999). Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography* 23 (1): 57-78.
- Monsalve, G. (2008). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Montealegre, E. (2005). *Escalas de variabilidad Climática*. IDEAM. Bogotá
- Montserrat, F. *Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica*. Universidad Politécnica de Valencia. Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, MOPTMA, España, 1995.
- Morales, R. (2008). Impactos del cambio climático en la dinámica física de cuerpos de aguas interiores. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias.
- Morgali, & Linsley. (1965). Computer analysis of overland flow. *Journal of Hydraul.*
- Moriasi. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation*. Transactions of the ASABE 50: (3) , 885-900.
- Murthy. (2002). *Basic principles of agricultural meteorology*. BS Publications.
- Nash, & Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3) , 282-290.
- NOOA. (2011). National Weather Services. Obtenido de Climate Prediction Center. ENSO impacts on the US: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- Obeysekera & Salas, (1986) Modeling of aggregated hydrologic time series. *Journal of Hydrology*, 86. 197-219
- Ocampo, O (2011) El cambio climático y su impacto en el Agro. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes.

- O'Callaghan, & Mark. (1984). The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28 , 328-344.
- Ochoa, A., & Poveda, G. (2008). Distribución espacial de señales de cambio climático en Colombia. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias.
- Pabón. (2008). El Cambio Climático en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Padilla, Bosch & Calvache (1996). Análisis de series temporales de dos manantiales kársticos mediante la aplicación de modelos ARMA. *Geogaceta*.
- Palmer (1965). Meteorological drought. US. Weather Bureau, Washington DC. Research paper No 45, 58 pp.
- Penman. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Londres: P.R.S. .
- Pérez. (1985). Determinación del tiempo de concentración para estimar la avenida de diseño. *Ingeniería Civil (La Habana), Cuba* , V36 N1 p 40-53.
- Perrin, Charles. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-debit au travers d'une approche comparative. Institut National Polytechnique de Grenoble. Cemagref
- Philander SG. (1990). El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, New York.
- Pilgrim, & McDermott. (1982). Design floods for small rural catchments in Eastern New South Wales. *Civ. Eng. Trans. Inst. Engs. Aust.* , pp 226-234.
- Pinker, & et.al. (2005). Do satellites detect trends in surface solar radiation? *Science* 308 , 850-854.
- Ponce. (1989). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall.
- Ponce & Simmons (1978). Applicability of kinematic and dynamic models. *Journal of the hydraulics division*. 353-360.
- Ponce, & Yevjevich. (1978). Muskingum-Cunge method with variable parameters. *J. Hydraul. Div. ASC* 104 (12) , 1663-1667.
- Poveda G and Mesa OJ. (1997). Feedbacks between hydrological process in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *J. Clim.* 10.
- Poveda et al.(2011), Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots, *Climate Dynamics*, 36 (11-12).
- Poveda, G., & O.J. Mesa (1999), La Corriente de Chorro Superficial del Oeste ("del CHOCÓ") y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y Variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, Vol. 23, No. 89, 517-528.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia. Una síntesis desde la década Interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb.Ciencia* 28 (107) , 201-222.
- Poveda et. al (2007). Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12, No. 1, 1-4
- Poveda (2011), Mixed memory, (non) Hurst effect, and maximum entropy of rainfall in the tropical Andes. *Advances in Water Resources*, 34 (2), 243-256
- Poveda, G. et. al. (2006), Modern climate variability in northern South America and southern Mesoamerica, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, & Palaeoecology*, 234, 3-27
- Poveda, G., & O.J. Mesa (2000), On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 11, 1675-1678. June 1.
- Praskievicz Sarah & Heejun Chang. (2009). A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography* 33(5) (2009) pp. 650–671
- PROCUENCA. (2010). Clean Development Mecanism Project Desing Document form for afforestation and reforestation .
- Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2000). Panorama del Impacto ambiental de los recientes desastres naturales en América Latina y el Caribe.
- Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2008). Informe sobre desarrollo Humano 2007-2008. Nueva York: Mundi-Prensa.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA]. (2006). El Cambio Climático en América Latina y el Caribe. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT.
- Ramirez, A. (2008). Efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales: El caso de la cuenca del Río Conchos; México. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias.
- Randall. (1998). Present Climates of South America. En *Climates of the Southern Continents. Present, Past and Future*. Wiley .
- Refsgaard, J. C. 1997. Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrology* 198(1): 69-97.
- Revelle, R.R. and P.E. Waggoner, 1983. Effects of carbon dioxide-induced climatic Change on water supplies in the Western United States, in *Changing climate: Report of the carbon dioxide assessment committee*, National Academy Press, Washington.
- Robinson. (1964). Surface measurements of solar and terrestrial radiation during the IGY and IGC. *Annals of the International Geophysical Year Vol 32 Meteorology Part II*. London: Pergamon Press.
- Rodrigues, et.al. (2010). Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy* 84 , 1852-1862.
- Romano, E.A. (2007). Algoritmo computacional para describir la dinámica del ciclo hidrológico superficial en una cuenca a partir de cartas temáticas. Bogotá
- Rosenzweig, et.al. (2004). Water Resources for agriculture in a changing climate: International case studies. *Global Environmental Change Vol 14 No 4* .
- Rosgen. (1994). A classification of natural rivers. *Catena* 22 , 169-199.
- Ruddiman. (2008). *Earth's Climate past and future*. New York: W.H. Freeman and Company.
- Salas, Yevjevich & Lane. (1980). *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resour. Pub. Littleton, 484 pp.
- Salas, Boes & Smith (1982). Estimation of ARMA Models with seasonal parameters. *Water Resour. Res.* 18 (4): 1006-1010.
- Salazar, J. C. (2008). Estrategias y medidas de adaptación frente a los impactos del cambio climático y vulnerabilidades de los recursos hídricos en la cuenca del río Amazonas. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias.
- Sanders. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources* 30(8) , 1831-1843.
- Sanders. (1999). Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis. ESRI User Conference. San Diego, California.
- Schaake, J. C. and Liu, C., 1989, 'Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources.
- Sharma. (2009). Application of climate information and predictions in water sector: capabilities. WCC-3. Geneve.
- Silva, G. (1998). *Hidrología Básica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Singh, J., H. V. Knapp, and M. Demissie. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
- Smith, Poveda, Mesa, & Perez. (1996). En búsqueda de señales de cambio climático en Colombia. IV Congreso colombiano de meteorología. Bogotá: Sociedad Colombiana de Meteorología.
- Soil Conservation Service, SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55. Washington.
- Solanes, & Jouravlev. (2006). *Water Governance for Development and Sustainability*. Santiago: Economic Commission for Latin America and The Caribbean.
- Stanhill, & Cohen. (2001). Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussions of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agriculture and forest meteorology* 107 , 255-278.
- Stern. (2006). *The Economics of Climate Change*. Londres: Cambridge University Press.

- Stott, P. A., Stone, D. A., & Allen, M. R. (2004). Human Contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* vol 432 , 610-614.
- Swartman, R. K.; Ogulande, O. (1966): An investigation on packed bed collectors. *Solar energy*, 10 (3), pp. 106-110.
- Tabios, G. Q & Salas, JD 1985 A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation *Water Resources Bulletin* 21(3), 365-380
- Tarboton. (1997). A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33 , 309-319.
- Témez J.R. (1977). Modelo matemático de transformació "Precipitación-aportación". *Asociación de Investigación Industrial Eléctrica*, 39 p.
- Témez, J.R. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales de Avenidas en pequeñas cuencas naturales. MOPU. *Ingeniería civil y medio ambiente*.
- Témez. (1991). Extended and improved Rational Method . *Proc. XXIV Congress, Madrid, España* , pp 33-40.
- Tharme (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River research and applications*. 19: 397-441
- Thodsen, (2007). The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. *Journal Hydrology* 333, 226-238.
- Thomas, H.A. (1981). Improved methods for rational water assessment Report, US Water Resources Council, Washington, DC, USA.
- Trenberth, K., & Thomas, R. (2003). Modern Global Climate Change. *Science* 5- Vol 302 .
- Tucker, G. E., & Slingerland, R. (1997). Drainage basin responses to climate change. *Water Resources Research* 33 (8) , 2031-2047.
- UNESCO, (1979). Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra. *Estudios e informes sobre hidrología*, Madrid.
- UNESCO. (1982). Guía Metodologica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur.
- UNESCO. (2009). Water in a Changing World. www.unesco.org/water/
- Valencia, & Zuluaga. (1991). Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de Antioquia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Vaze, & Teng. (2007). High Resolution LiDAR DEM- How good is it? *International Congress on Modelling and Simulation*.
- Velásquez, A., & Rosales, C. (2002). Los pasos del Niño en Colombia 1980-2001. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Vélez, J. J., & Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales.
- Verdin, & Verdin. (1999). A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology* 21 (1) , 1-12.
- Verhaar, P., Pascale, Ferguson, & Hoey. (2007). A modified morphodynamic model for investigating the response of rivers to short-term climate change. *Geomorphology* .
- Villegas & Jarvis (2010). Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis. *International Center for Tropical Agriculture, CIAT*
- Vincent, K. (2007). Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale. *Global Environmental Change* , 12-24.
- Vogell, R.M., I Wilson and C. Daly, 1999. Regional 701 regression models of annual streamflow for the United States. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 125:148-157.
- Wanielista, Kerster, & Eaglin. (1977). *Hydrology, water quantity and quantity control*. New York: Wiley
- Weng. (2001). Modeling Urban Growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management* , No 28, Vol 6, p 737-748.
- Whipple. (1911). Solubility of Oxygen in Sea Water. *J. Amer. Chem Soc* 33 .
- Wild, et.al. (2005). From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science* 308 , 847-850.

- World Water Assessment Programme, [WWAP]. (2003). Development Report: Water for People, Water for Life. Paris, New York and Oxford: UNESCO and Berghahn Books.
- World Meteorological Organization -WMO. (1960). IGY Radiation Observations Forms R-2a. Geneva: WMO.
- Wu, Li, & Huang. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography*, 210-223.
- Xu, C., (1999). Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments *Water Resources Management* 13: 369–382, 1999.
- Xu, Chong-yu. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 23,2 (1999) pp. 229–249
- Xu, C.Y. and V.P Singh. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management*. Vol 18 N6. 591-612
- Yang, Yu, & Chen. (2005). Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrological Process* Vol 19, 1967-1981.
- Yaoling Bai, Thorsten Wagener, Patrick Reed (2009). A top-down framework for watershed model evaluation and selection under uncertainty. *Environmental Modelling & Software* 24 901–916.
- Zhu, Tian, & Zhao. (2006). An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis. *Computers & Geosciences* 32, 615-623.