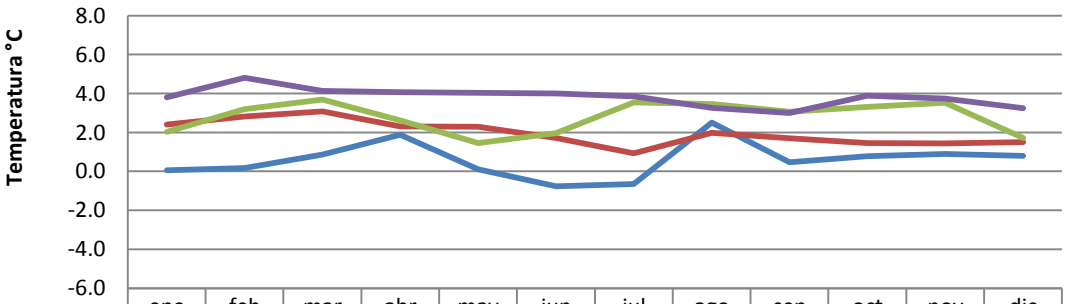
(IDEAM, 2005). En la cuenca del río Chinchiná se presentan todos los pisos térmicos lo cual favorece la biodiversidad en términos de flora y fauna, ecosistemas y unidades geomorfológicas de interés paisajístico. Se tiene un piso térmico cálido en la frontera occidental, que es la parte más baja de la 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.

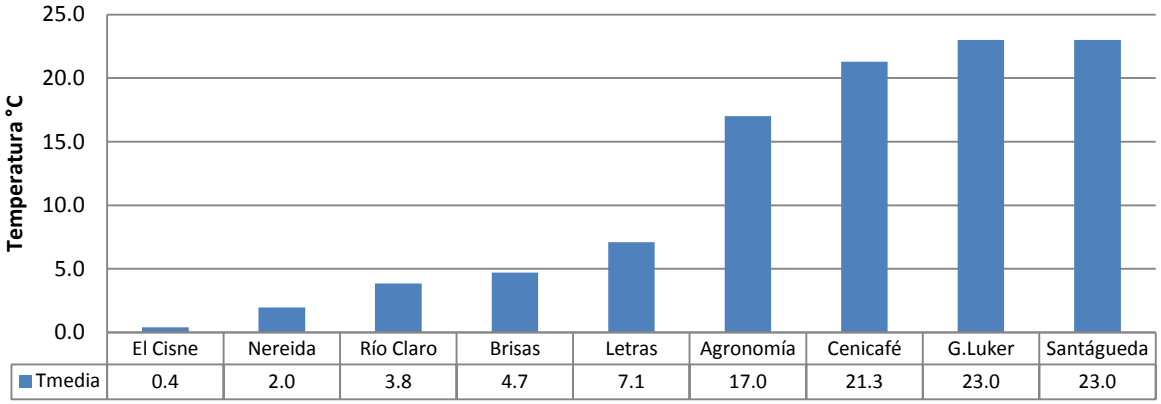
Figura 4.13: Distribución de temperaturas medias estaciones de páramo 2003-2010



	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
El Cisne	0.0	0.2	0.9	1.9	0.1	-0.8	-0.7	2.5	0.5	0.8	0.9	0.8
Nereidas	2.4	2.8	3.1	2.3	2.3	1.7	0.9	2.0	1.7	1.5	1.4	1.5
Molinos	2.0	3.2	3.7	2.6	1.5	2.0	3.5	3.5	3.1	3.3	3.5	1.7
Río Claro	3.8	4.8	4.1	4.1	4.0	4.0	3.9	3.3	3.0	3.9	3.7	3.2

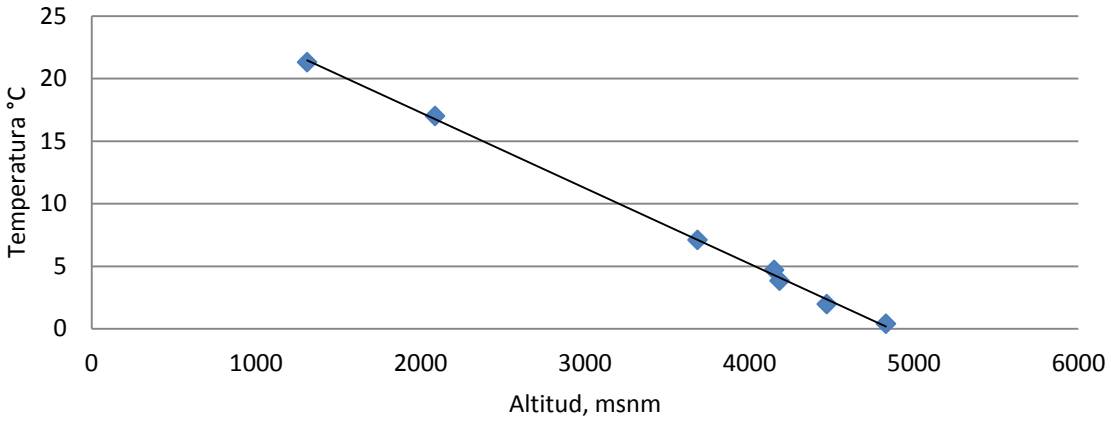
Para el período 1981-2010, la temperatura promedio se resume en la Figura 4.14, fluctúa desde 0,4°C para las áreas de páramo, hasta 23°C en la cuenca baja, en promedio. Los niveles de confianza para la media al 95% son 0,02°C en las estaciones Nereidas, Río Claro, Las Brisas, Agronomía, Cenicafé, Naranjal, 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°C/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°C y no entre 23,0 a 26,0°C.

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

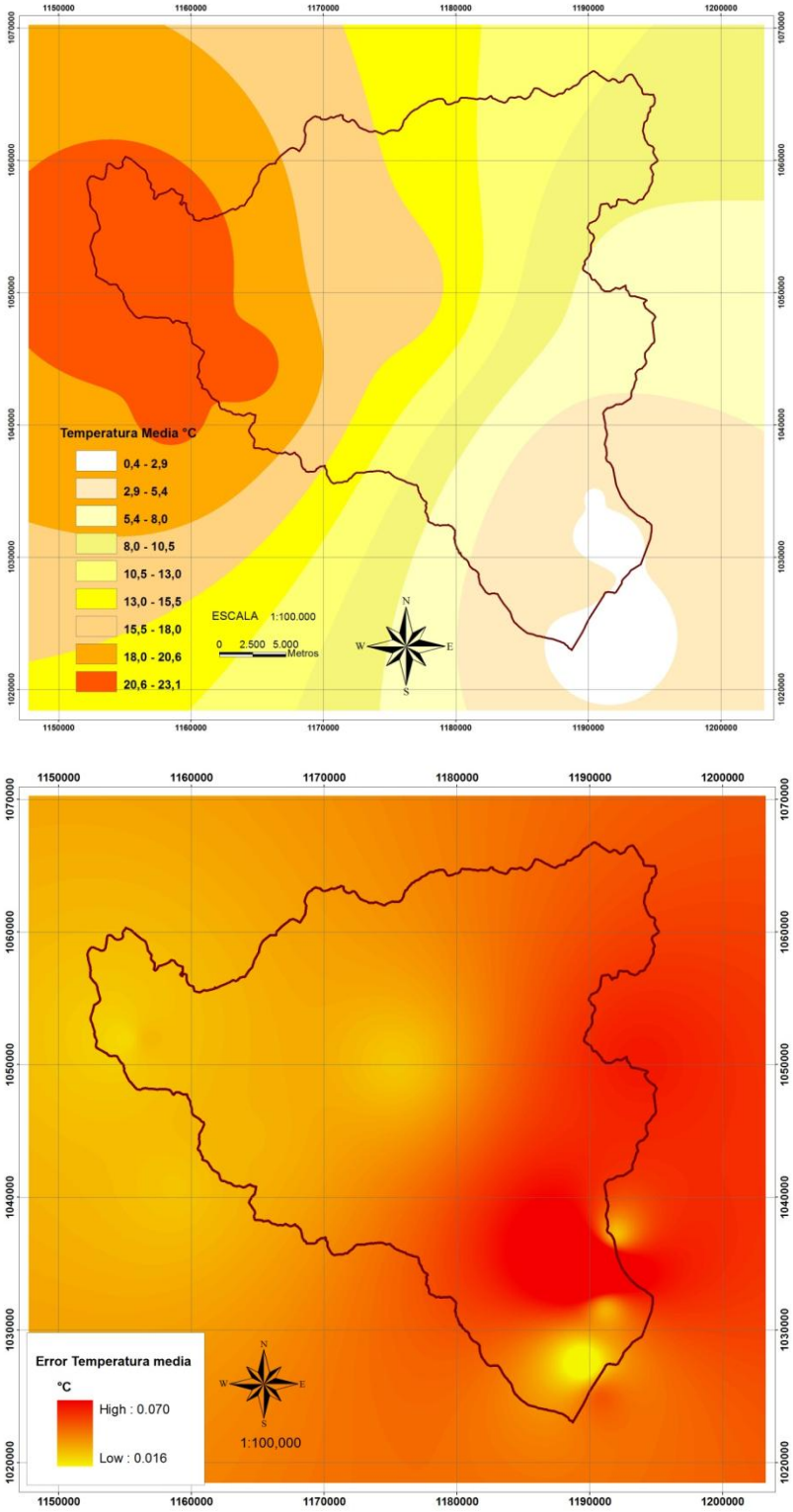


Tabla 4.2: Modelo de regresión lineal temperatura media- altitud

Parámetros Modelo		
Variable dependiente, Y		Temperatura, K
Variable independiente, X		Altitud, m.s.n.m.
Modelo		$Y = \beta o + \beta 1\ X$
βo	Valor	72,634
	Error típico	1,264
	Significancia	0,0
$\beta 1$	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 Santagueda (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

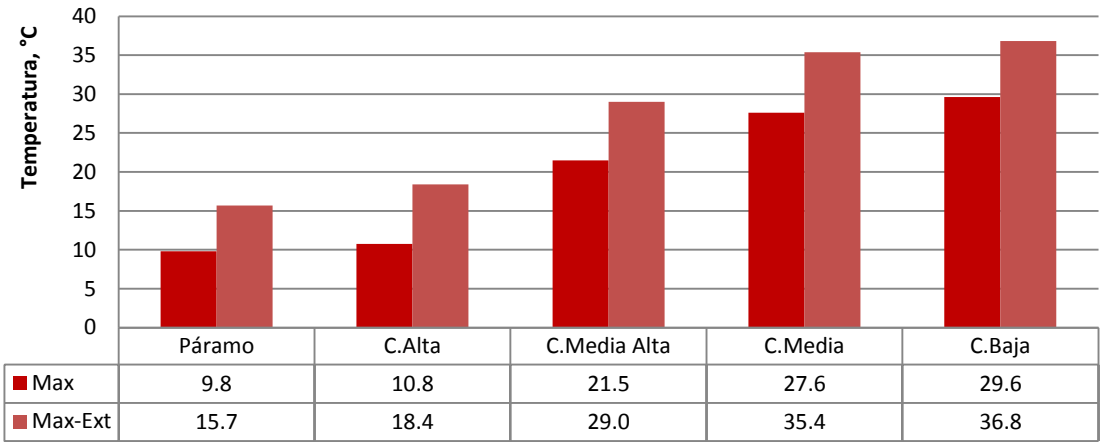
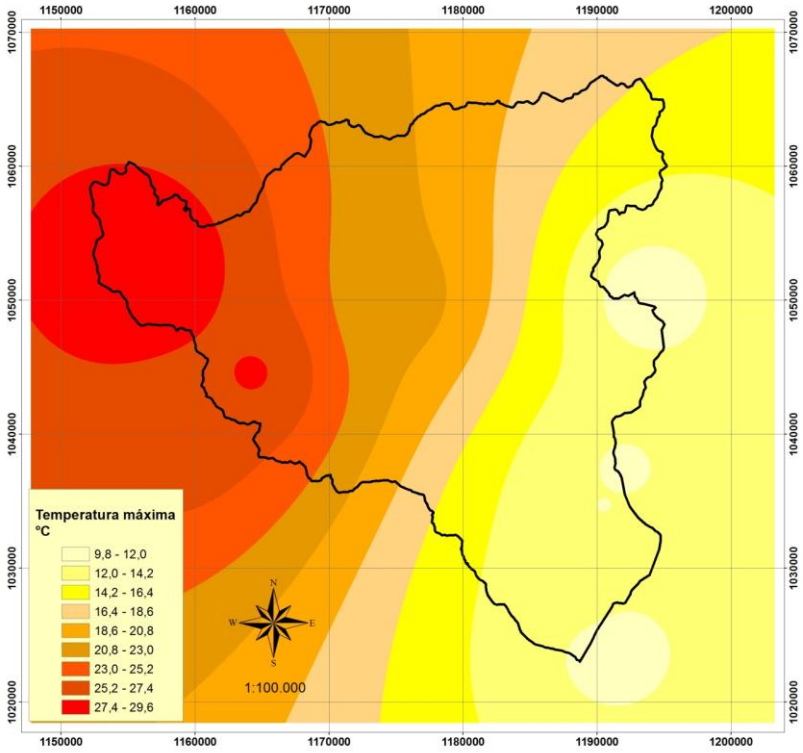
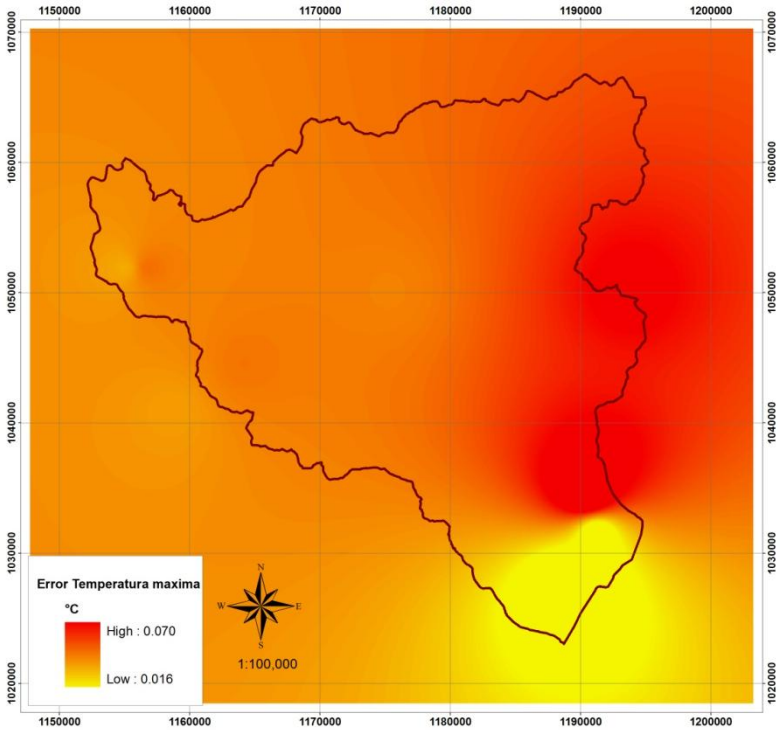


Figura 4.18: Mapa de temperaturas máximas promedio 1981-2010

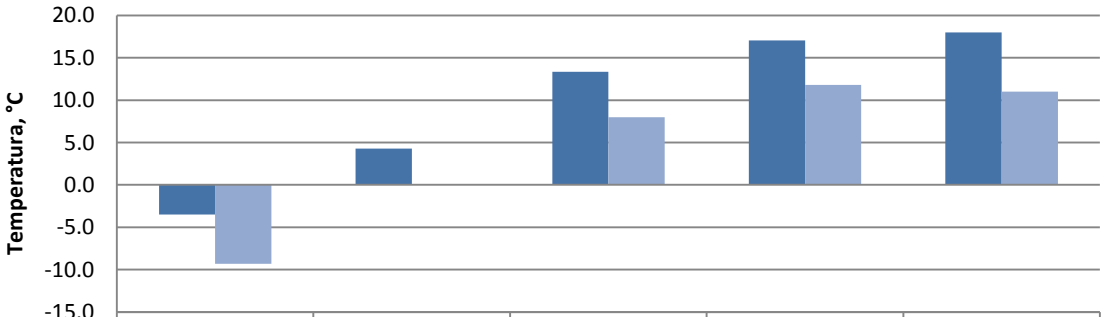




4.4.3 Temperaturas mínimas

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°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°C en las estaciones el Cisne (Páramo), Agronomía (cuenca media-alta), Cenicafé (cuenca media) y Santagueda (cuenca baja) y 0,04°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°C

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

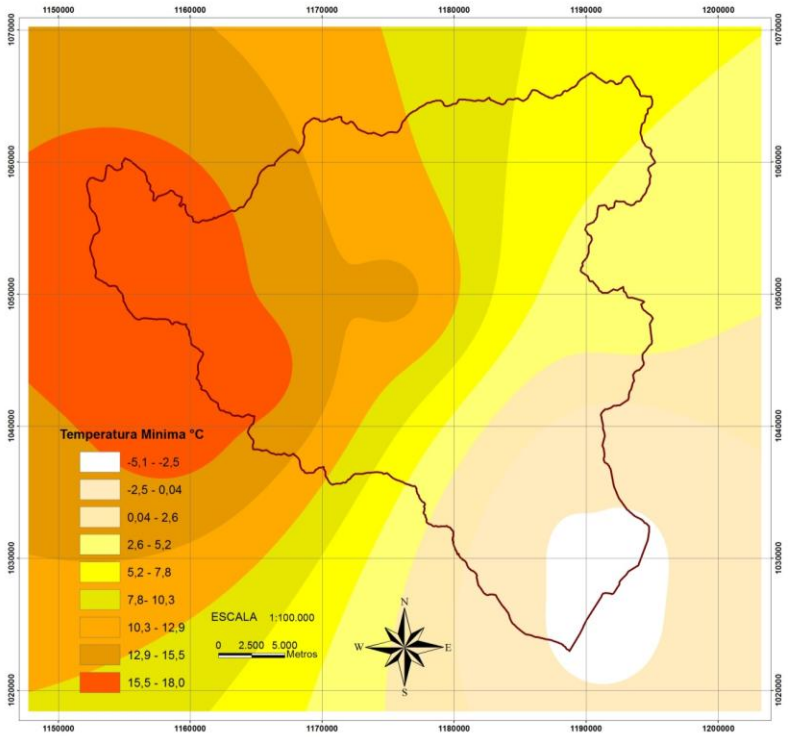


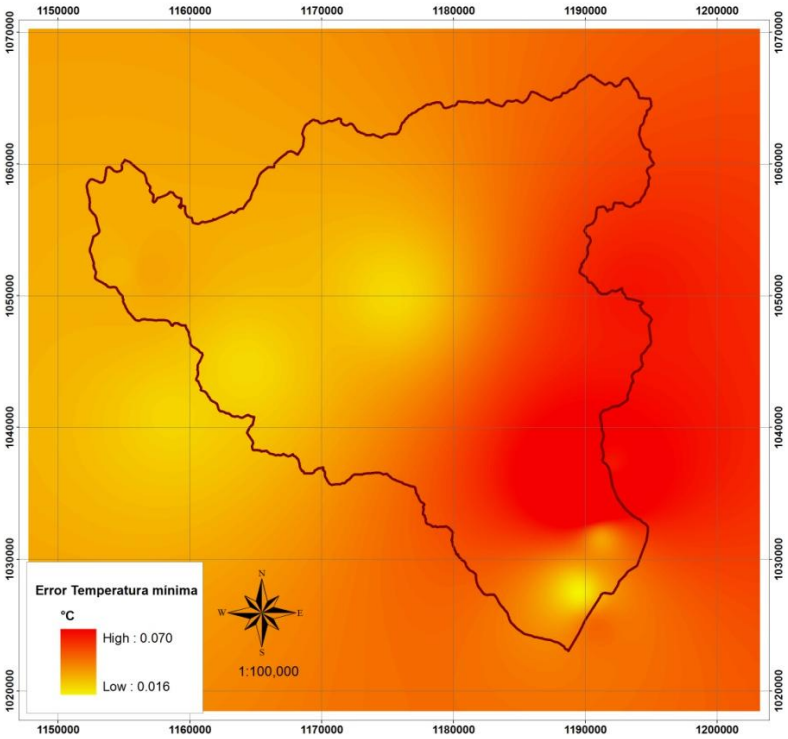
	Páramo	C.Alta	C.Media Alta	C.Media	C.Baja
Min	-3.5	4.3	13.4	17.0	18.0
Min-Ext	-9.3	0.0	8.0	11.8	11.0

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 sistema 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 $1L/m^2$.

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).

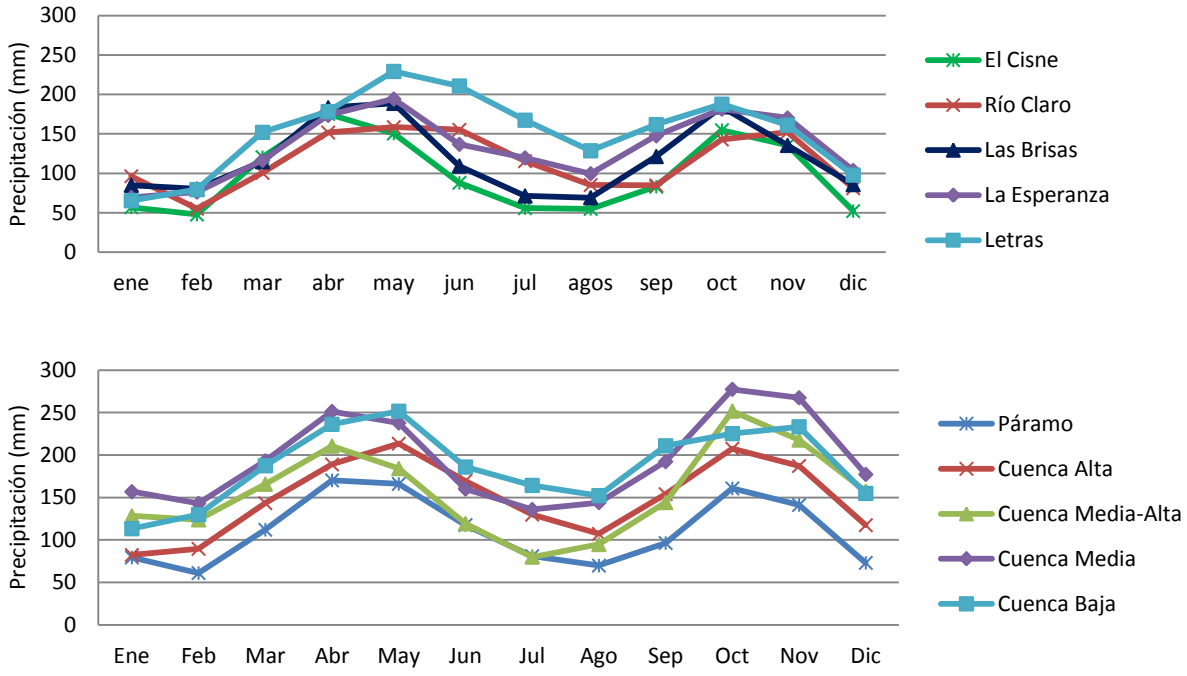
La región posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias -hasta 2.000 mm- a lo largo de la cordillera Oriental y en los valles del alto Magdalena y ato Cauca y núcleos máximos -de 3.000 a 5.000 mm- en las cuencas del Magdalena Medio y Cauca (IDEAM, 2005). La distribución intra-anual de la precipitación 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., 2.000; 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

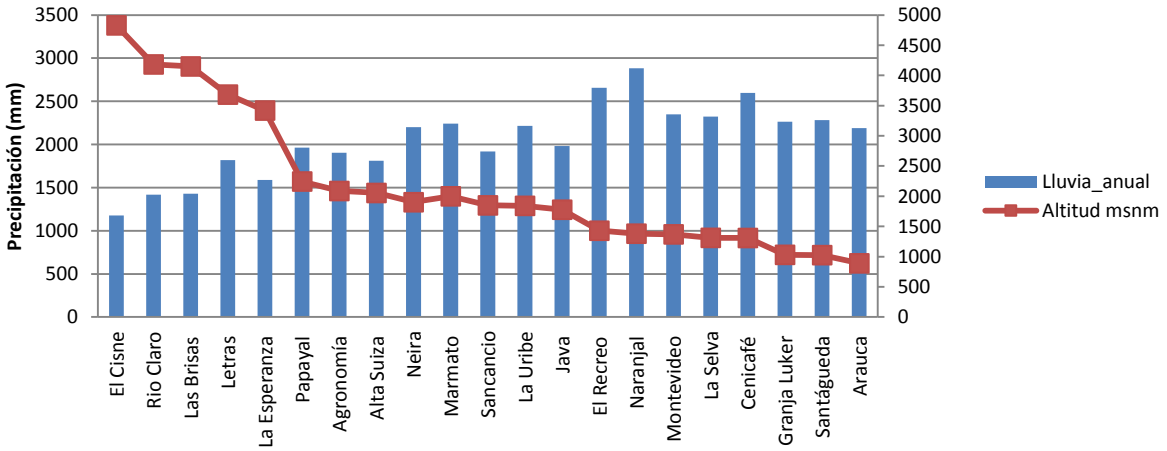


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

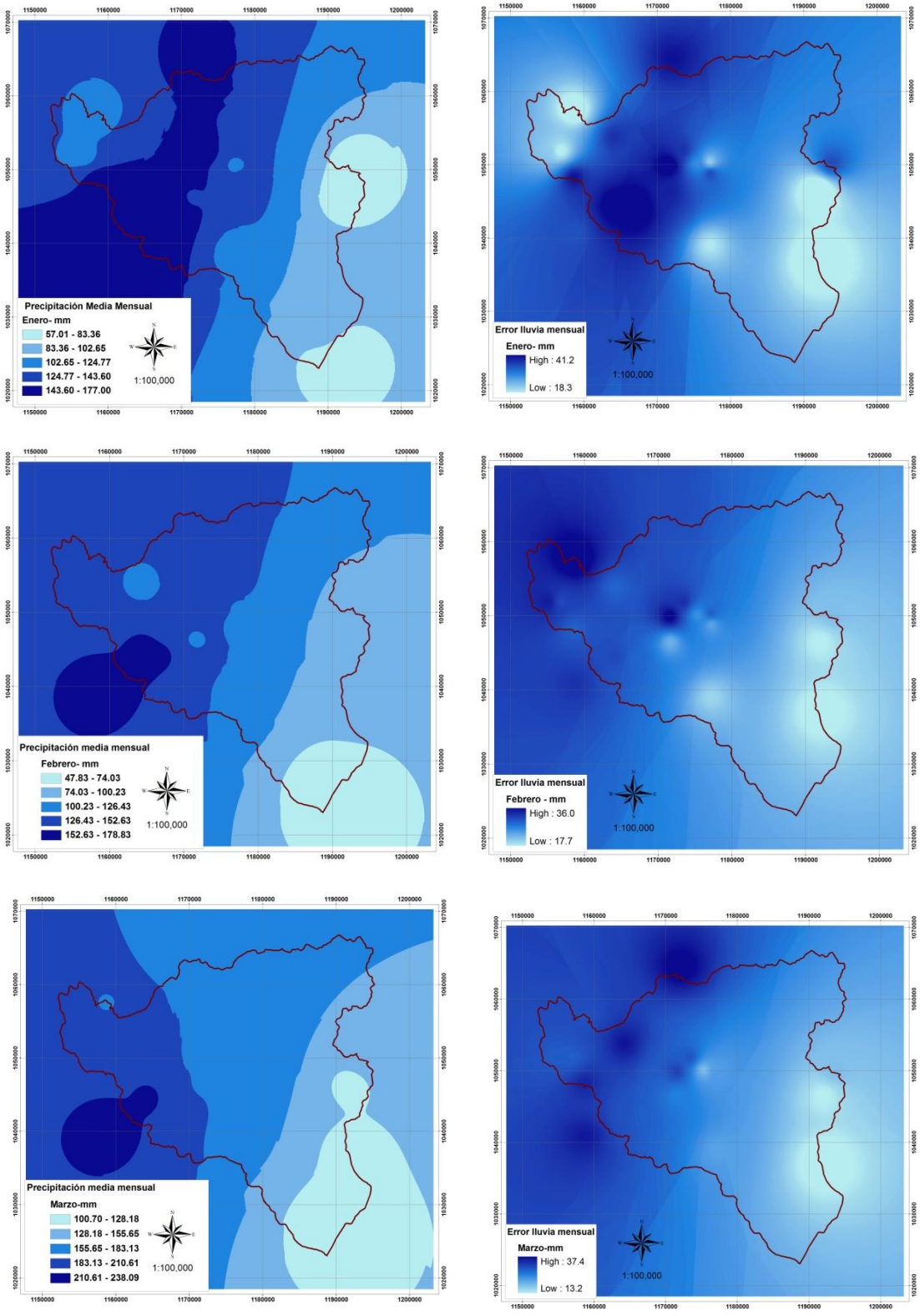


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

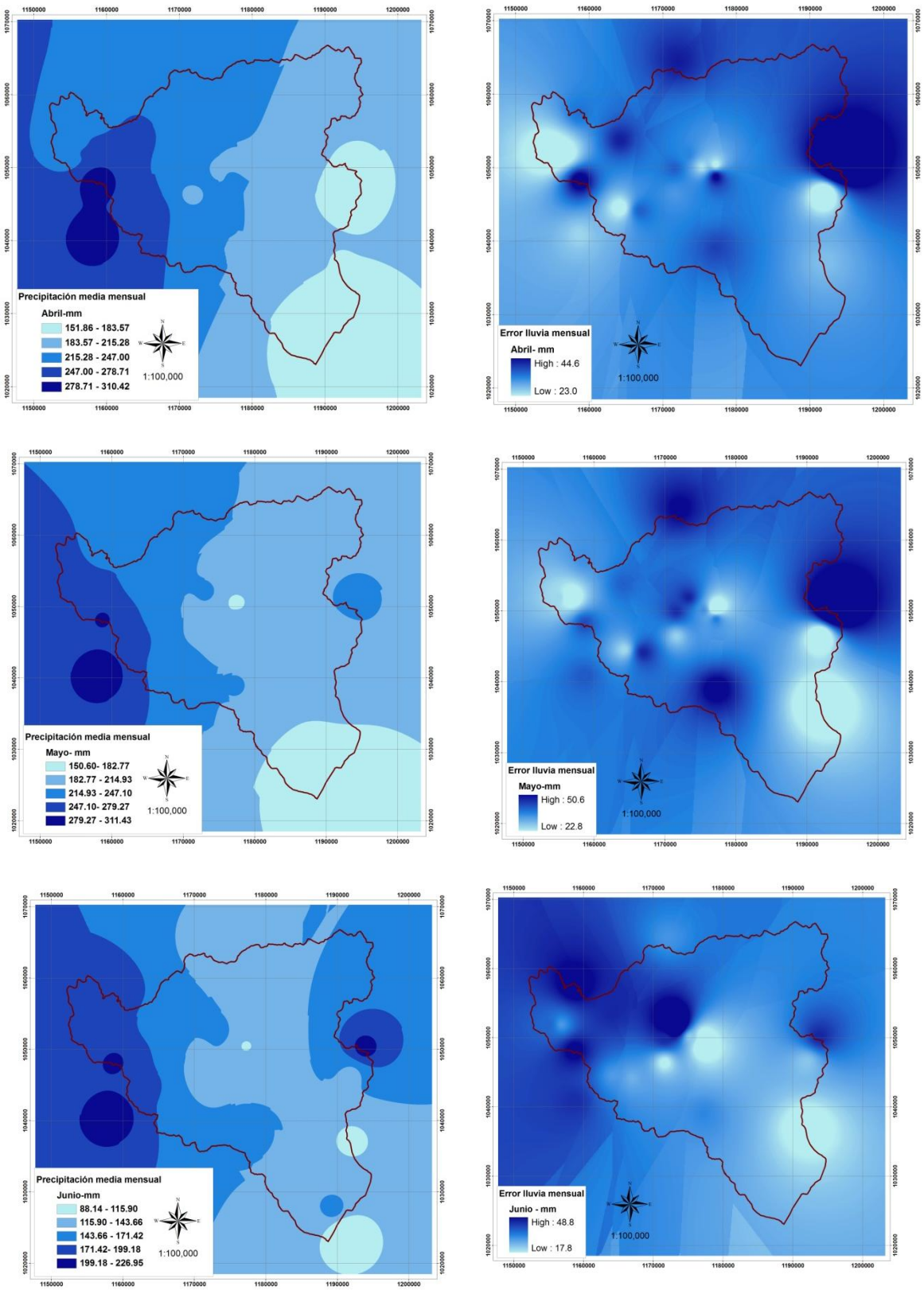


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

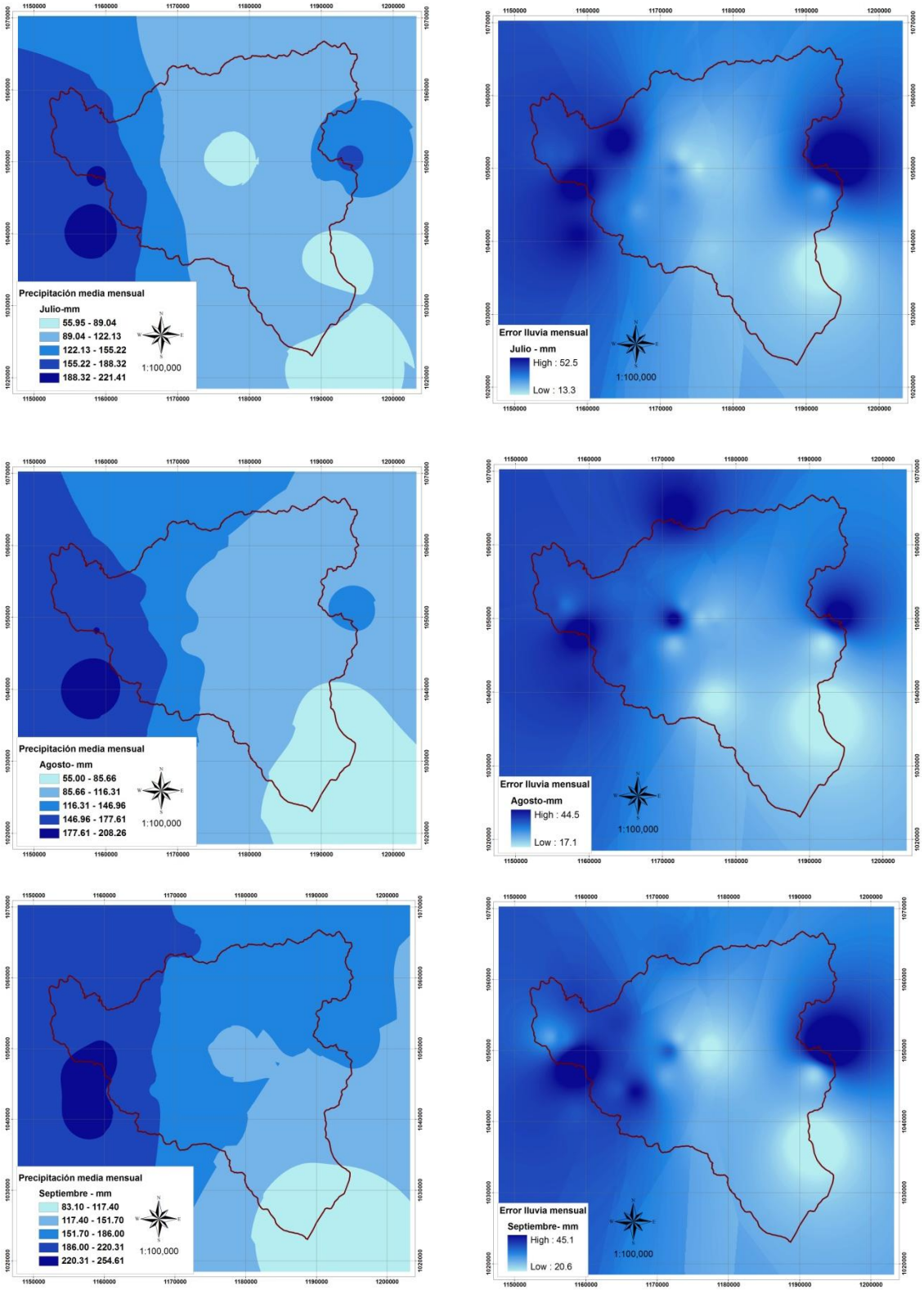


Figura 4.23: Precipitación mensual condiciones hidroclimáticas medias 1981-2010

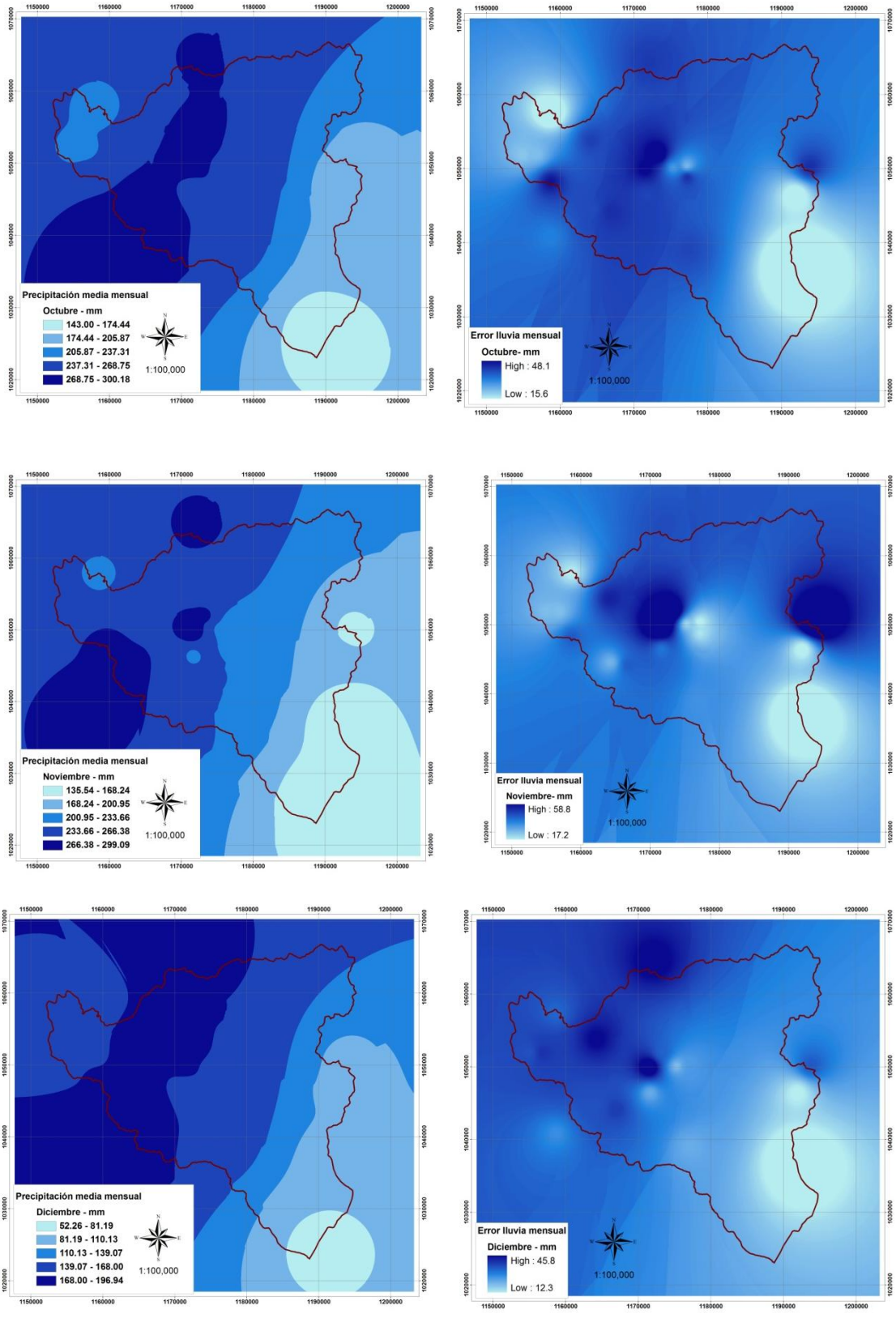
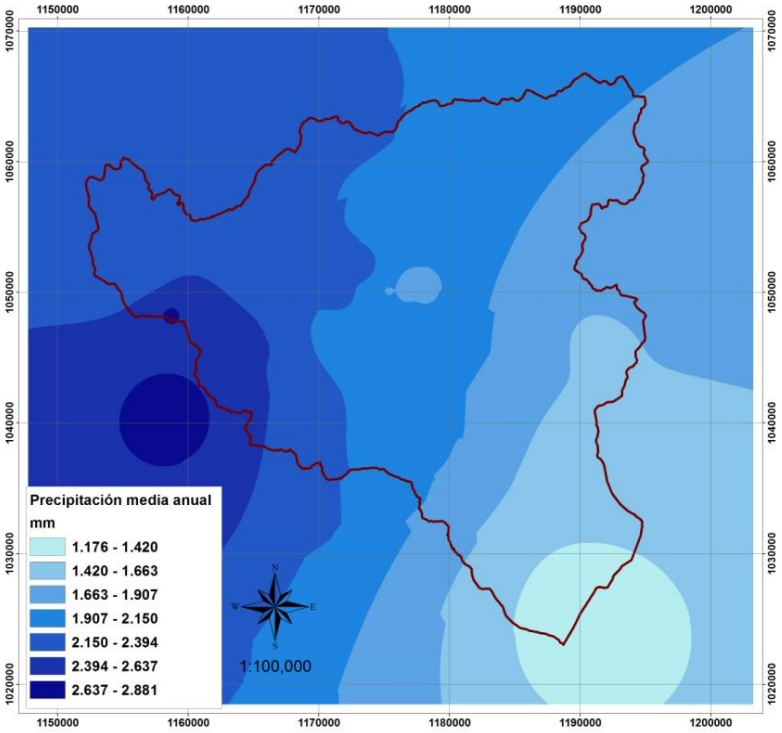
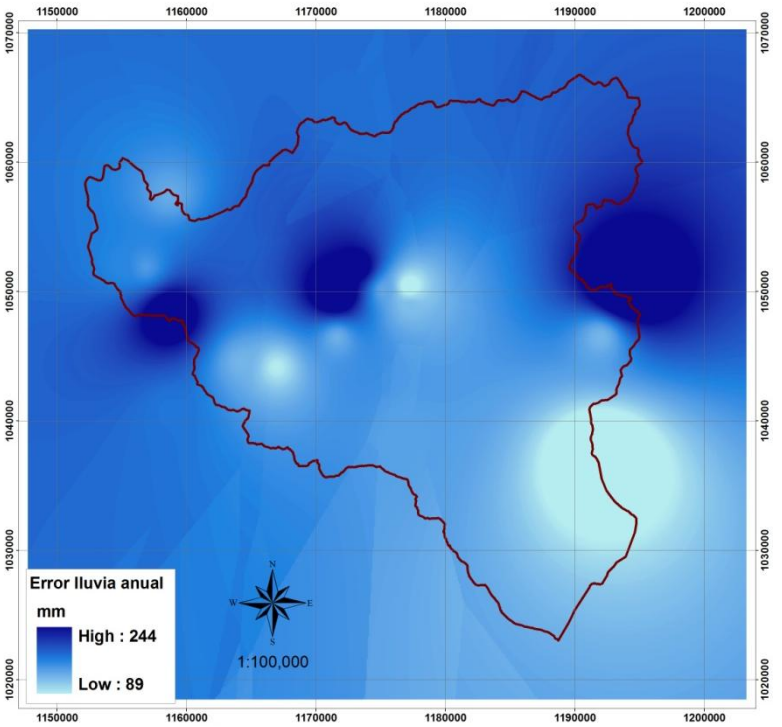


Figura 4.24: Mapa de precipitación media anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010





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)

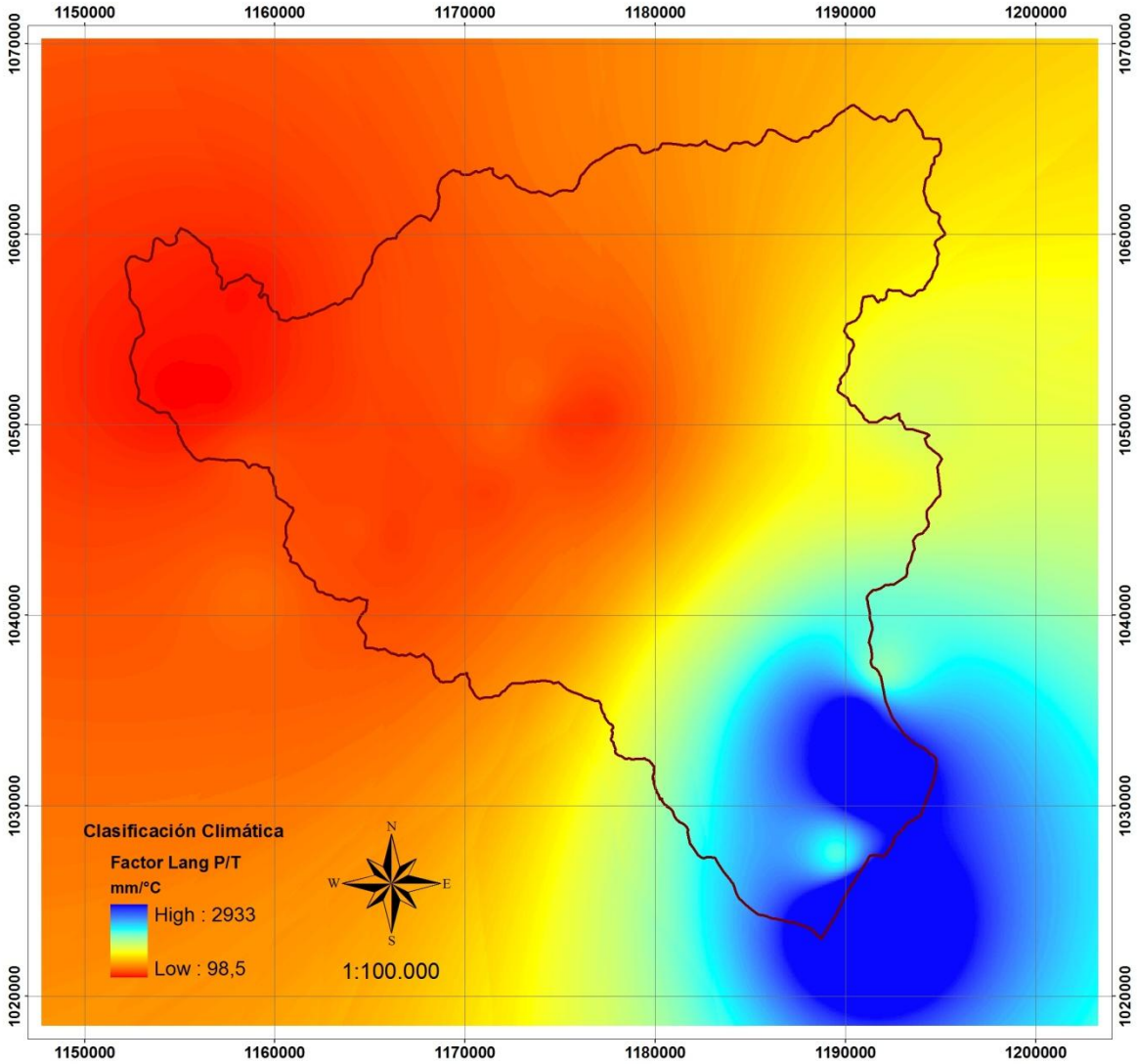
Tomando como referencia la clasificación climática de Lang (1915)- Tabla 4.4- las cuencas alta y media-alta son super-húmedas, con factores de Lang- P/T- mayores de 160; las cuencas media y baja son húmedas con factores entre 100 y 160. Los menores valores alcanzados son de 98 – zona semi-húmeda- en 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 evaluan 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 lo 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

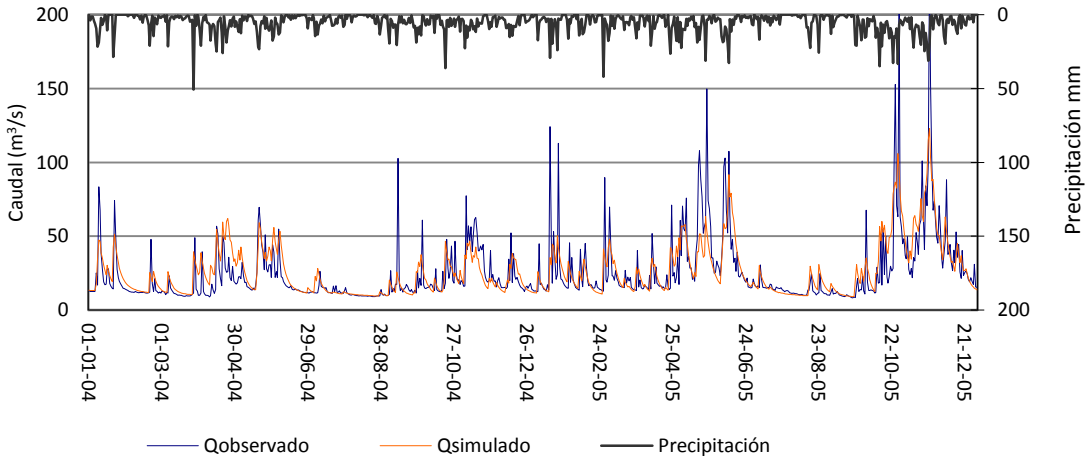


Tabla 5.2: Resultados de calibración del modelo TETIS

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

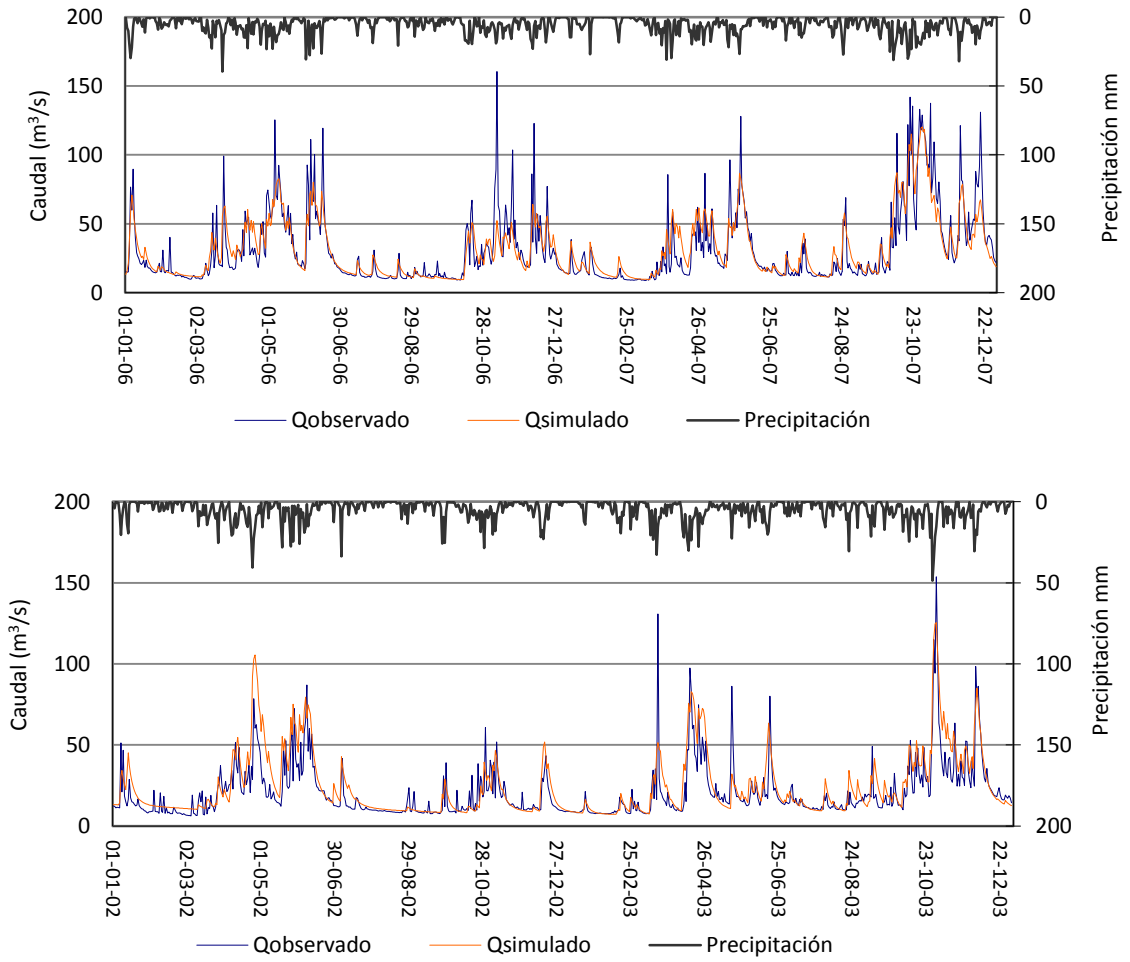
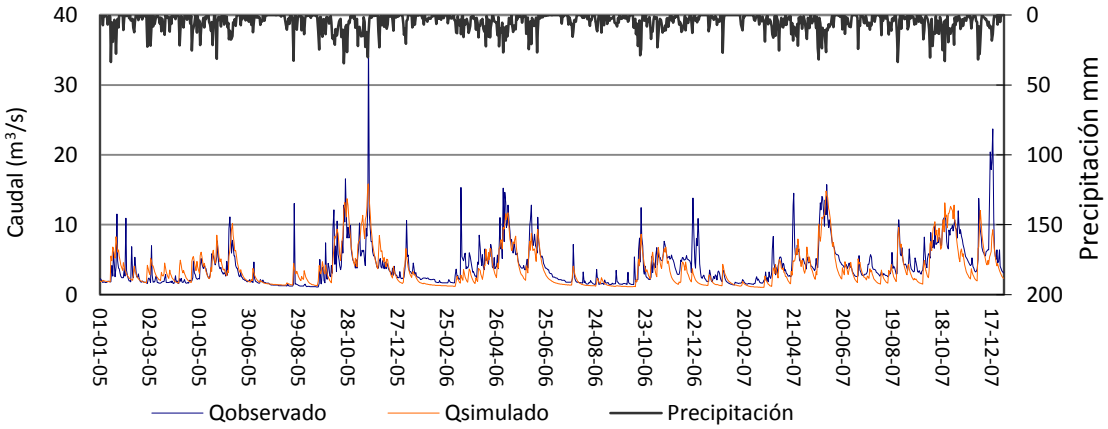


Tabla 5.3: Resultados de validación temporal del modelo TETIS

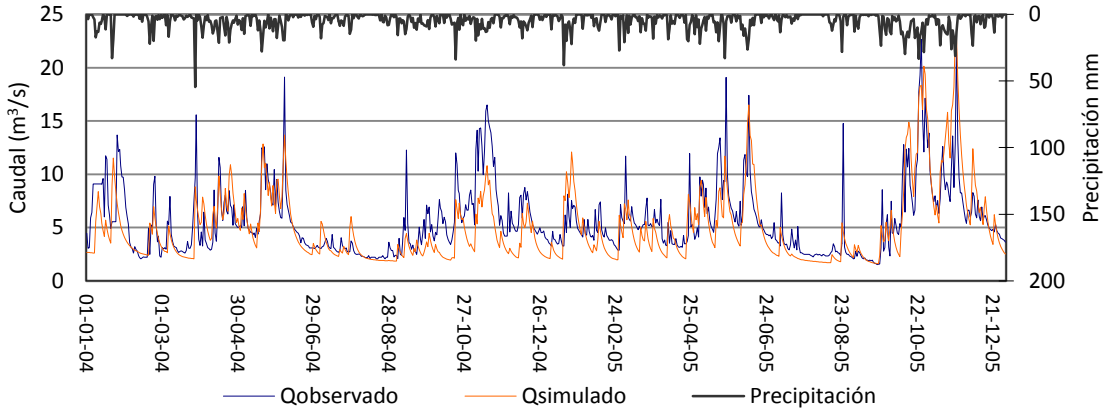
Estación	**El Retiro**			
Período inicio- fin	01/01/2002- 12/31/2003		01/01/2006 -12/31/2007	
	Resultados	Interpretación	Resultados	Interpretación
Caudal promedio simulado (m^3/s)	24,45		31,25	
Caudal promedio observado (m^3/s)	20,64		30,84	
Desviación estándar caudal observado	16,93		26,03	
Balance- 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

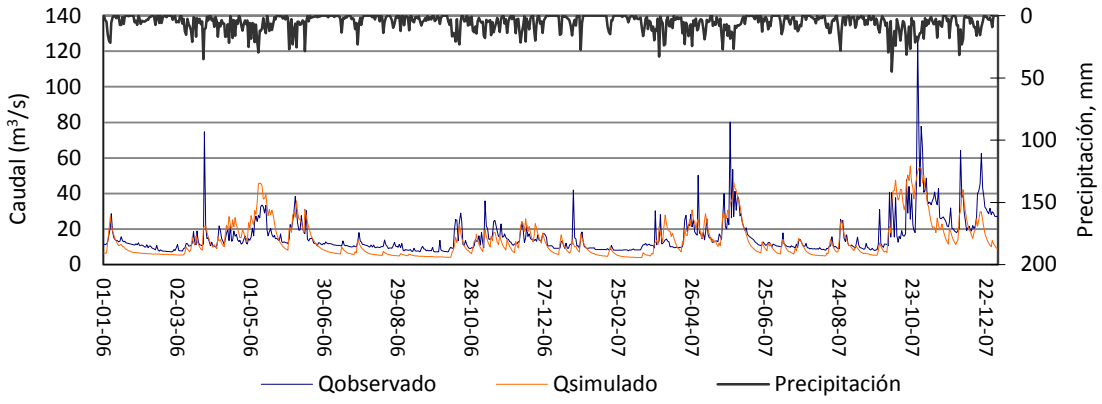


Figura 5.4: Curva de duración de caudales -2002-2009

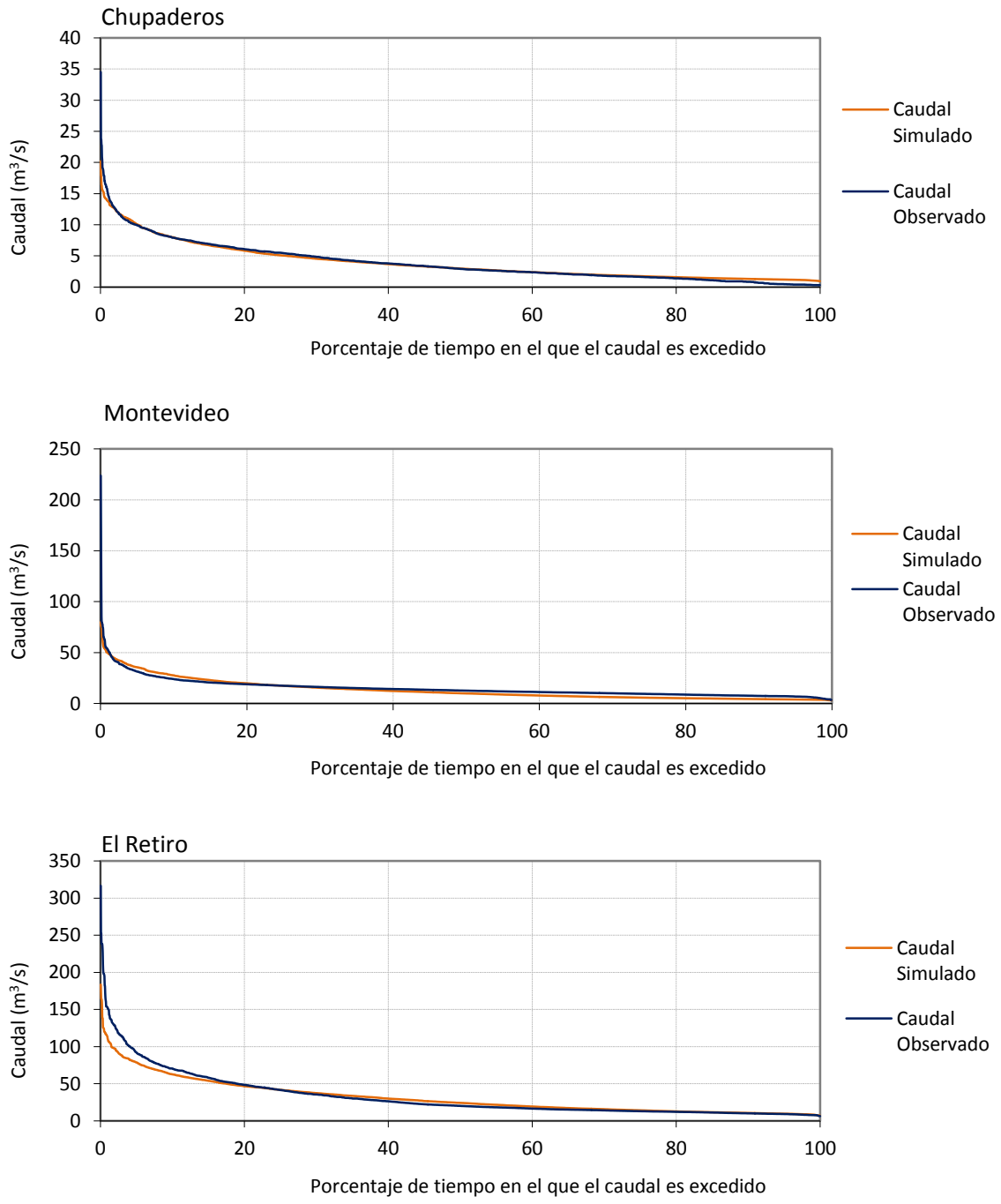


Tabla 5.4: Resultados de la validación espacial del Modelo TETIS

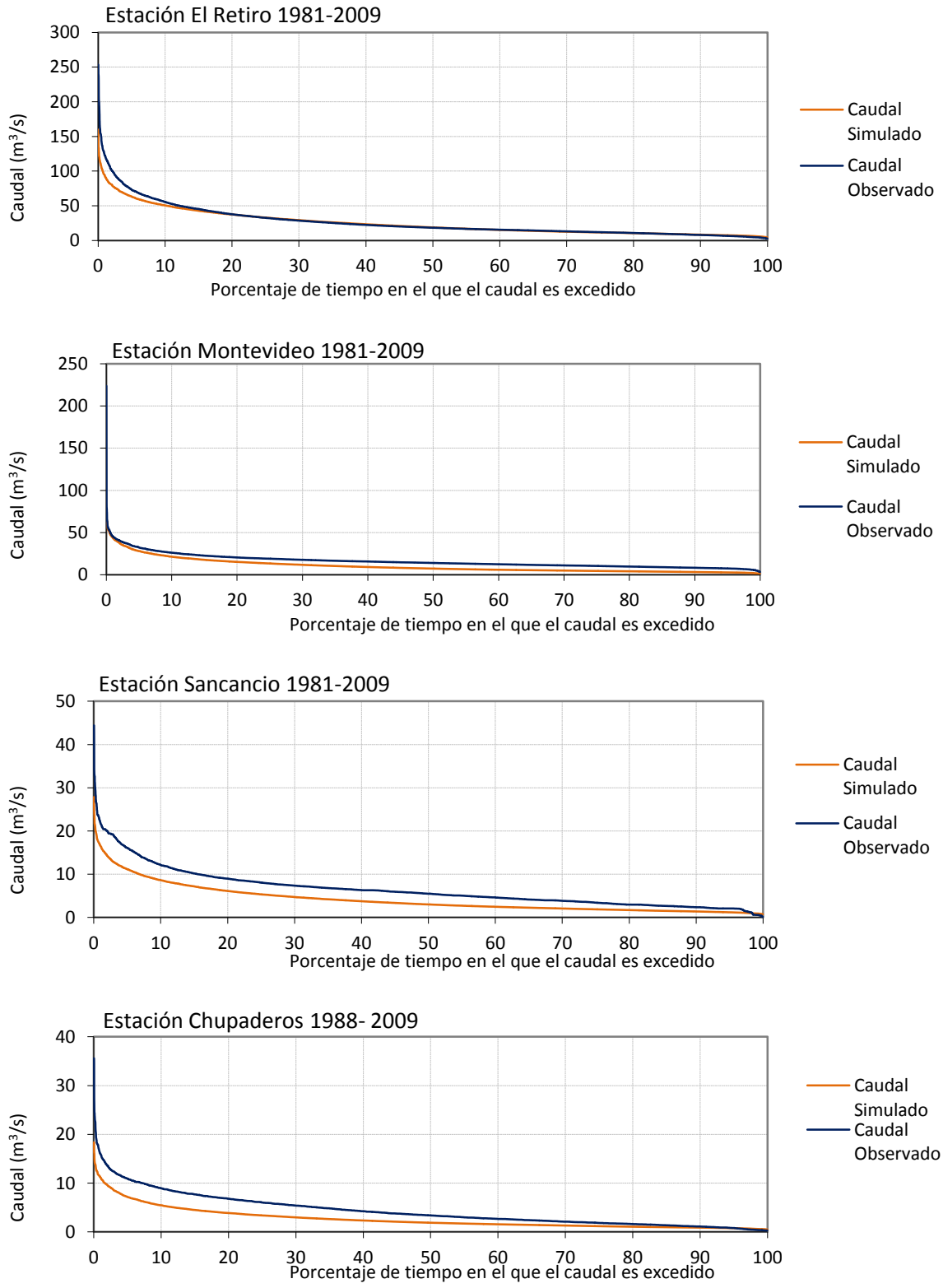
Estación	**Chupaderos**		**Sancancio**		**Montevideo**	
Período inicio	01-01-2005	Interpreta.	01-01-2004	Interpreta.	01-01-2006	Interpreta.
Período fin	12-31-2007		12-31-2007		12-31-2007	
Caudal promedio simulado (m^3/s)	3,72		4,98		13,89	
Caudal promedio observado (m^3/s)	4,11		5,60		15,77	
Desviación 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

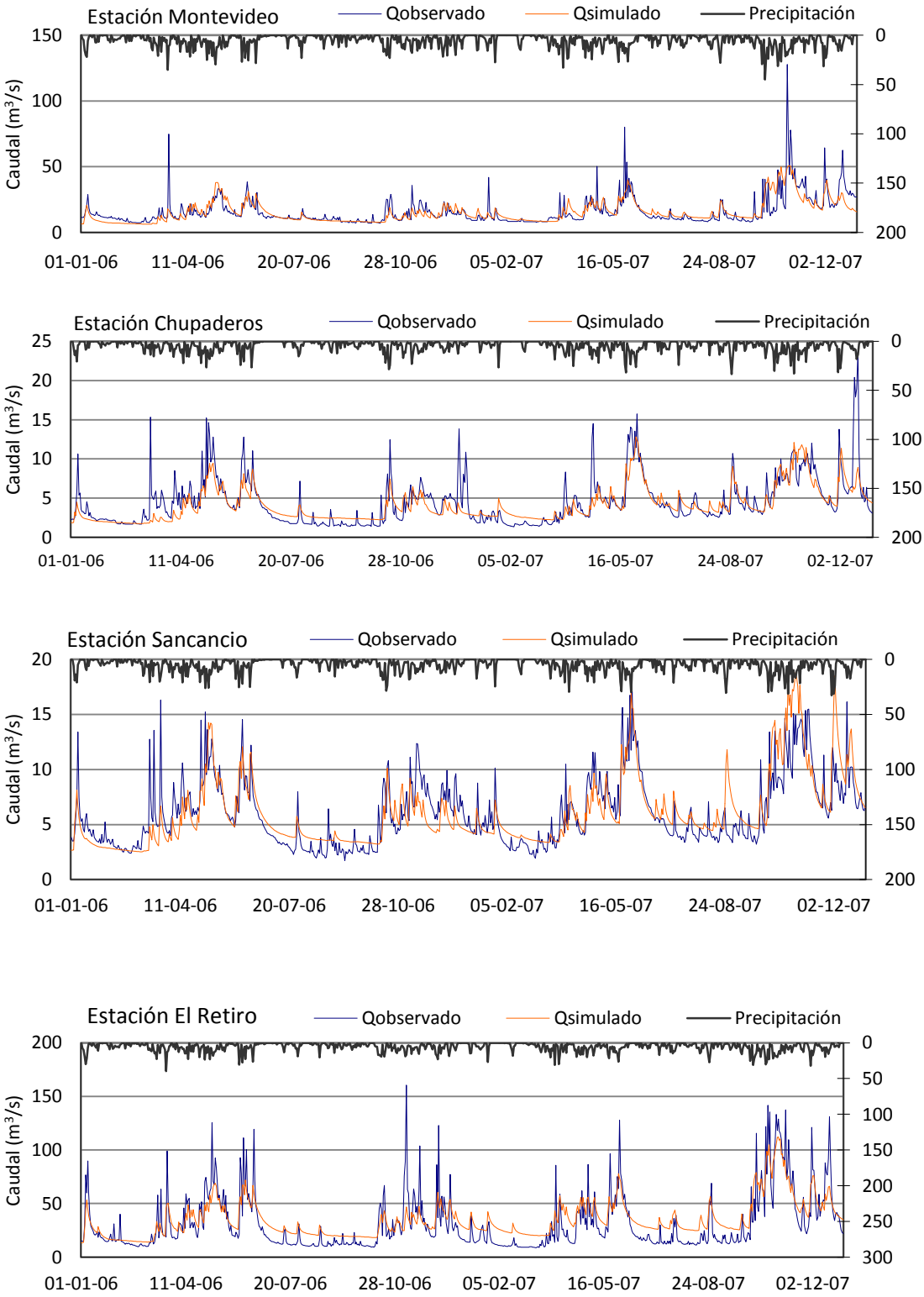


Tabla 5.8: Validación de factores obtenidos en la calibración en la estación Montevideo

Período	**2004 - 2005**			
Estación	**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 subterraneas: 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). ϕ = 382,43

- Parámetro α, que es el coeficiente de recesión del acuifero (L/día). α = 0,02151
- Parámetro c , coeficiente de excedente: c = 0
- Parámetro lmax, que representa la capacidad máxima de infiltración (mm). lmax = 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: ϕ = 147,0136
  - Parámetro λ = 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 ϕ_a = 1,00
  - Parámetro ϕ_b, capa inferior del suelo para el almacenamiento de humedad: ϕ_b = 50,257
  - Parámetro λ = 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:
  - ρ_1 = 0,61132
  - ρ_2 = 0,35238
  - ϕ = 0,5764
  - θ = -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 evaluan 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

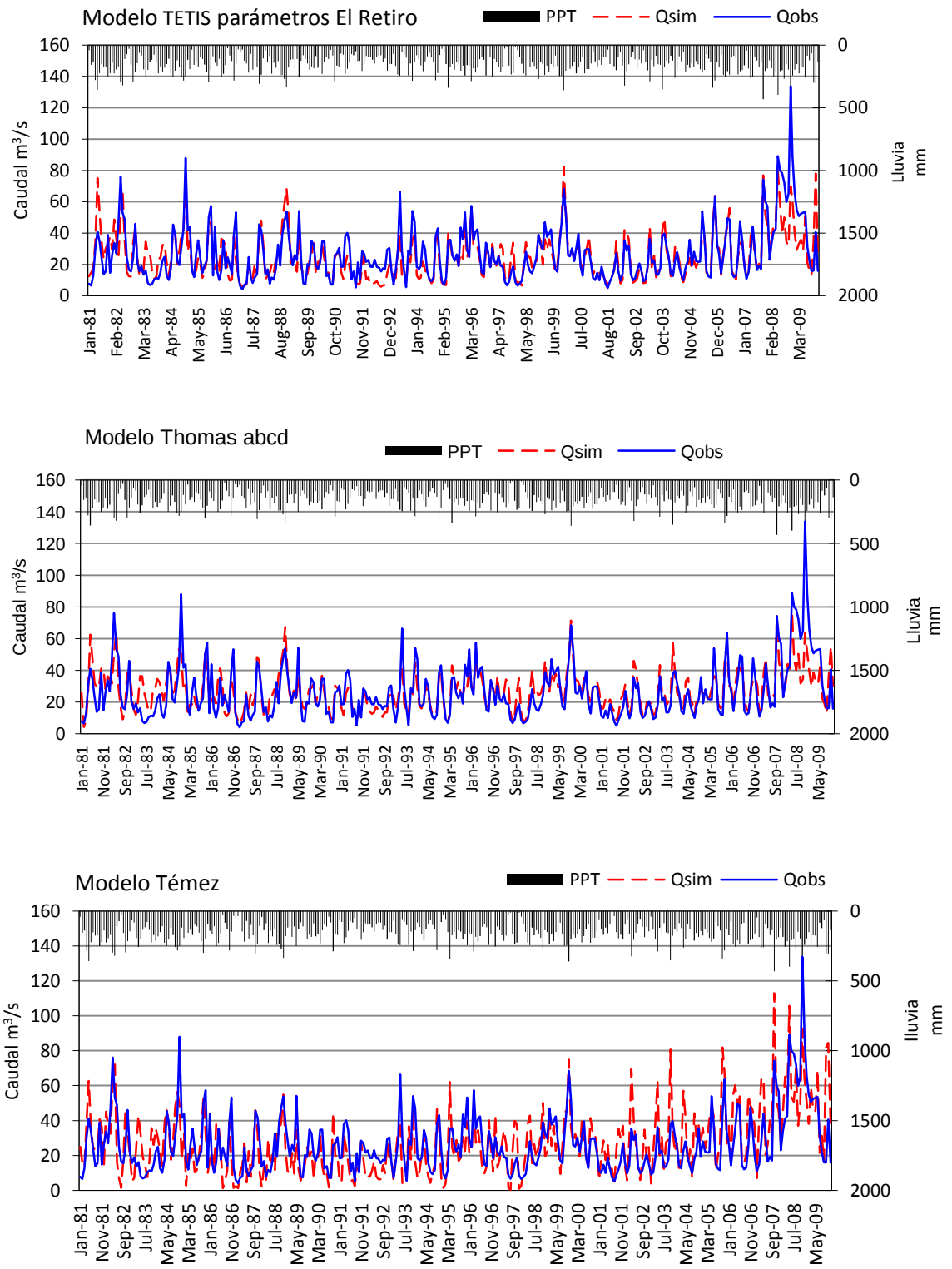


Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual El Retiro 1981-2009

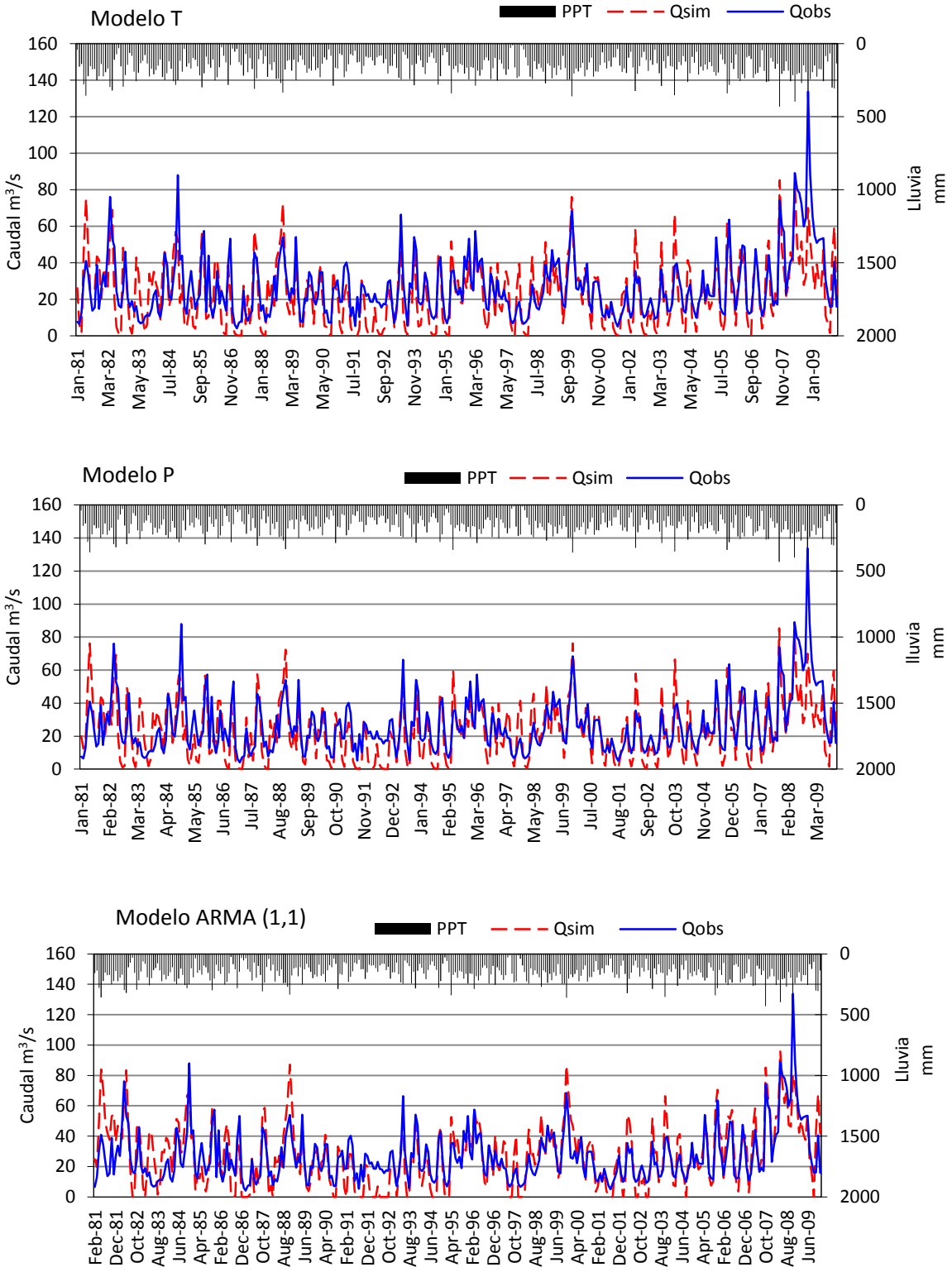


Figura 5.7: Simulación modelos hidrológicos escala mensual El Retiro 1981-2009

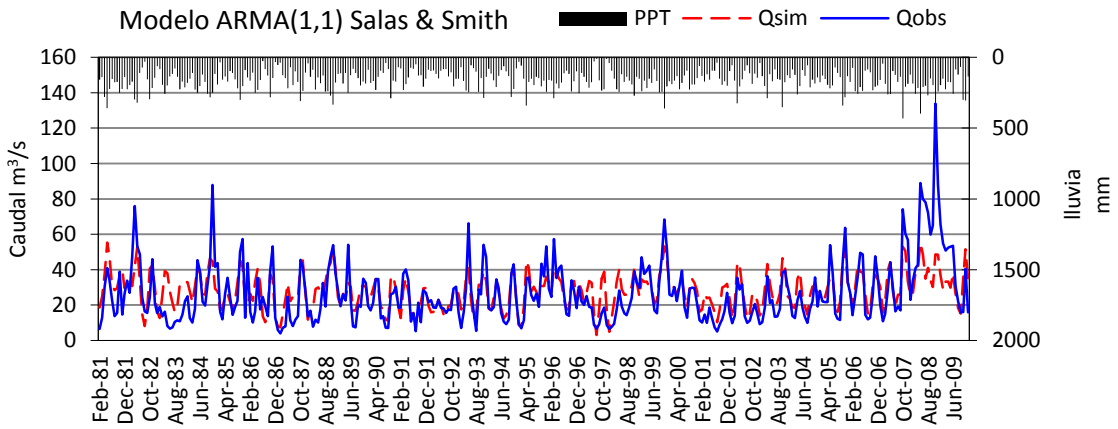


Tabla 5.15: Simulación modelos hidrológicos estación El Retiro 1981-2009

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

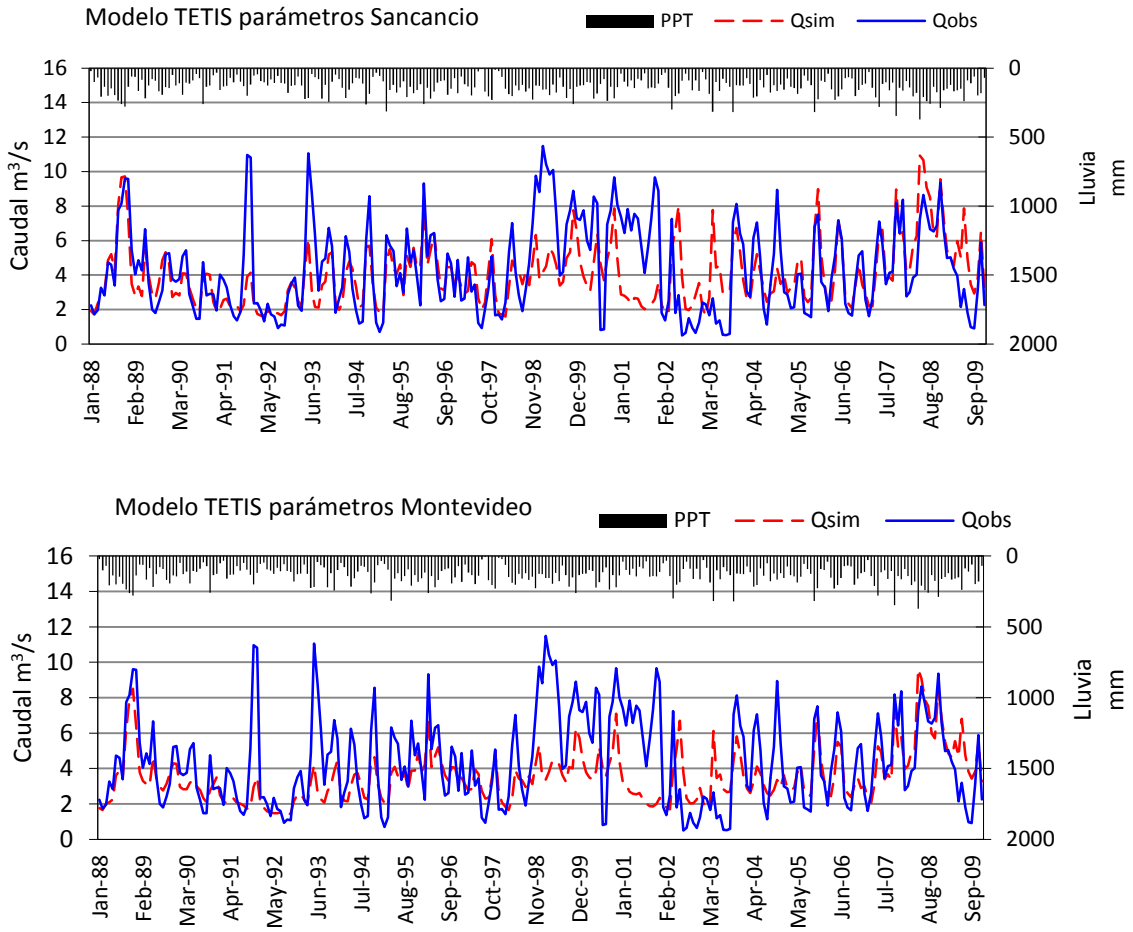


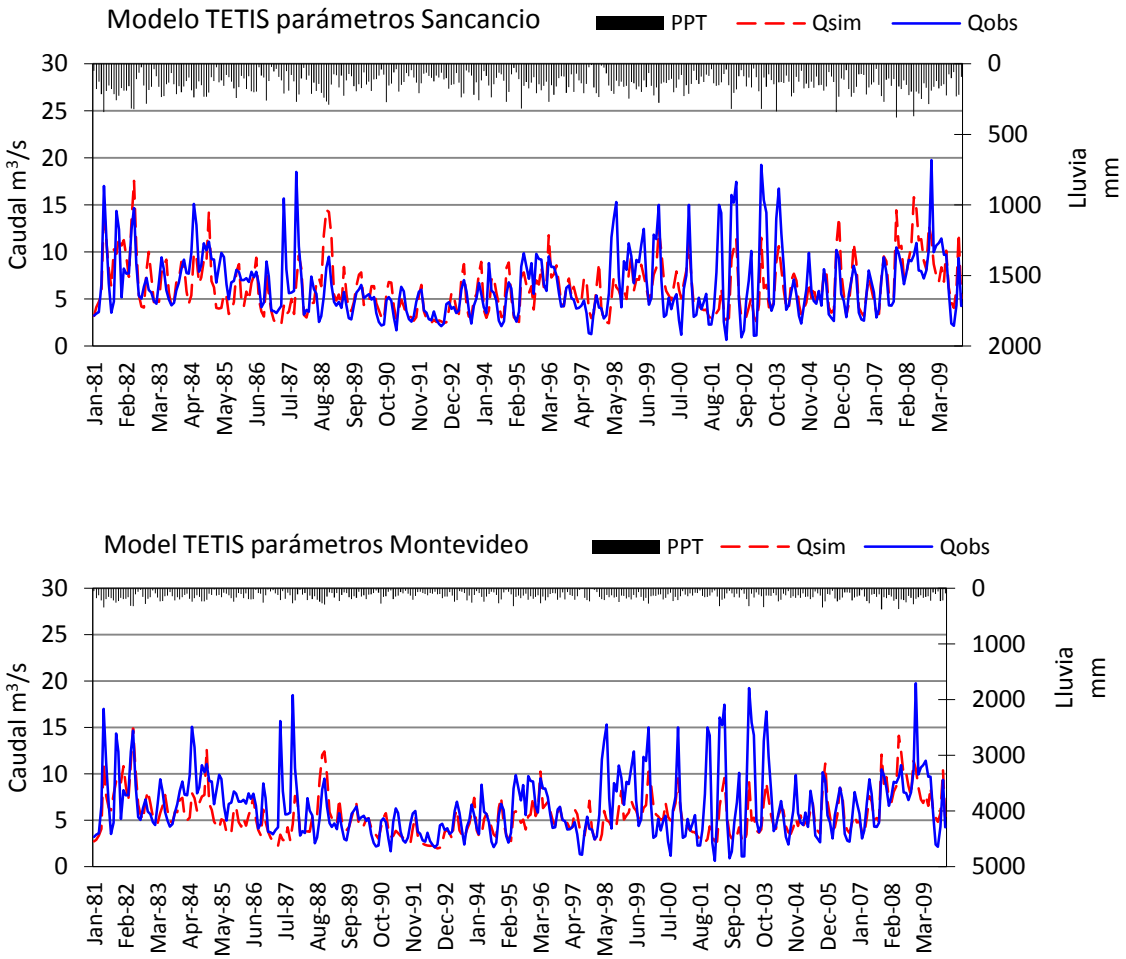
Tabla 5.18: Simulación modelos hidrológicos estación Sancancio 1981-2009

Comparación criterios de validación	Estación Sancancio					
	Qobservado:	6,52	m³/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

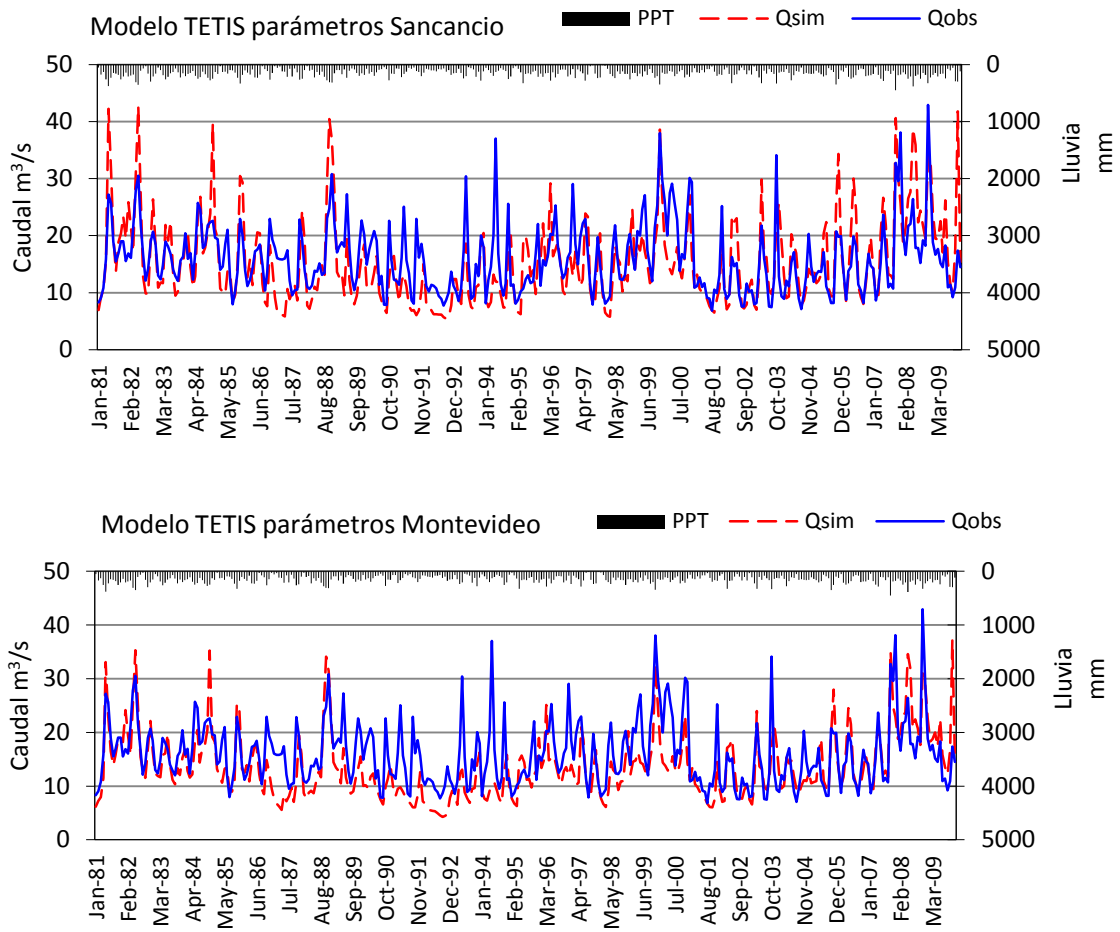


Tabla 5.19: Simulación modelos hidrológicos estación Montevideo 1996-2008

Comparación criterios de validación	Estación Montevideo					
	Qobservado:	16,30	m³/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 determina por las características del cultivo, el potencial evaporativo climático y los demás factores que influencian 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.

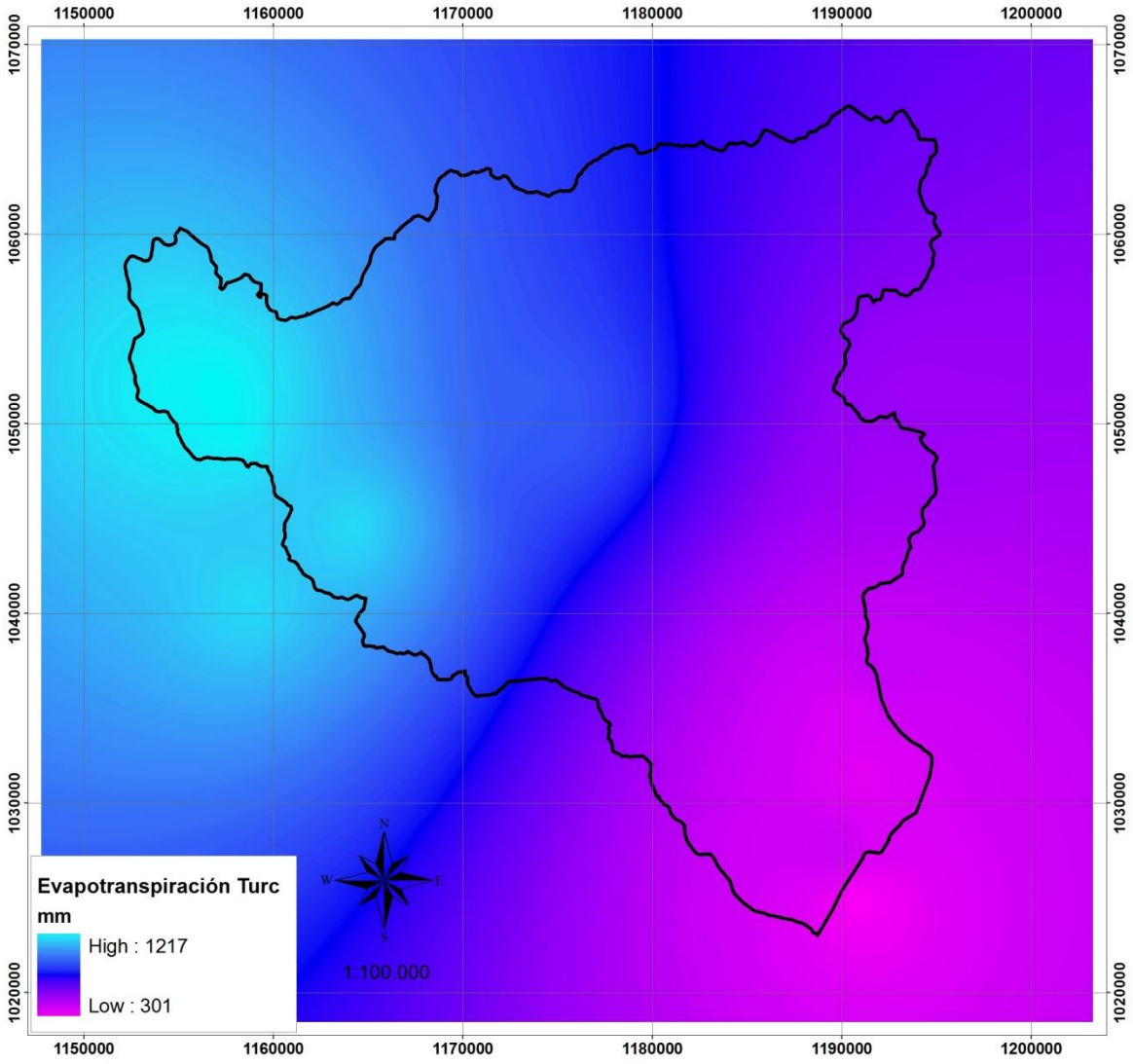
Para la modelación se requiere la ETP, se adoptó el cálculo por el método de Thornwaite, dado la posibilidad de ingresar la información tanto de radiación solar incidente como de temperatura a escala diaria, para la modelación en TETIS. La evapotranspiración real la calcula el modelo TETIS por el balance 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	$ET_j = \left(\frac{10\ t_j}{I}\right)^a \times 1{,}6$ $I = \sum_{i=1}^{12} i_j$ $i_j = \left(\frac{t_j}{5}\right)^{1{,}514}$	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) t_j: Temperatura media mensual del mes j, °C I: Índice de calor
5.2	Turc	$\bar{E} = \frac{\bar{P}}{\left(0{,}9 + \frac{\bar{P}^2}{[L(t)]^2}\right)^{0{,}5}}$ $L(t) = 300 + 25t + 0{,}05t^2$	$\bar{E}$: Evapotranspiración media anual (mm) $\bar{P}$: Precipitación media anual (mm) T: Temperatura media anual (°C)

La evapotranspiración media anual en la cuenca fue calcula 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.

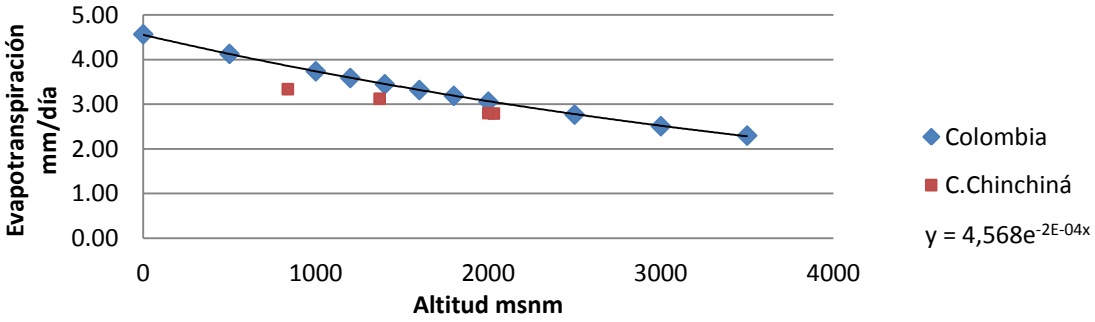
Figura 5.11: Mapa de Evapotranspiración real anual cuenca del río Chinchiná 1981-2010



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.

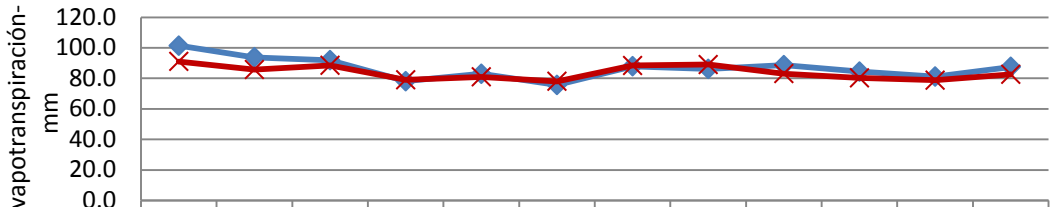
La estación Posgrados cercana a Sancancio, cuenta con registros de evapotranspiración para el período 2002-2010; la Figura 5.13 compara los valores promedio mensual obtenidos en Sancancio con los reportados en Posgrados para el mismo período. Se observa concordancia entre los valores.

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



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Posgrados	101.4	93.8	91.9	78.1	82.9	75.7	87.9	86.2	88.6	84.4	81.2	87.5
Sancancio	91.1	85.7	88.5	79.0	81.0	78.1	88.4	89.0	83.1	80.3	78.7	82.6

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

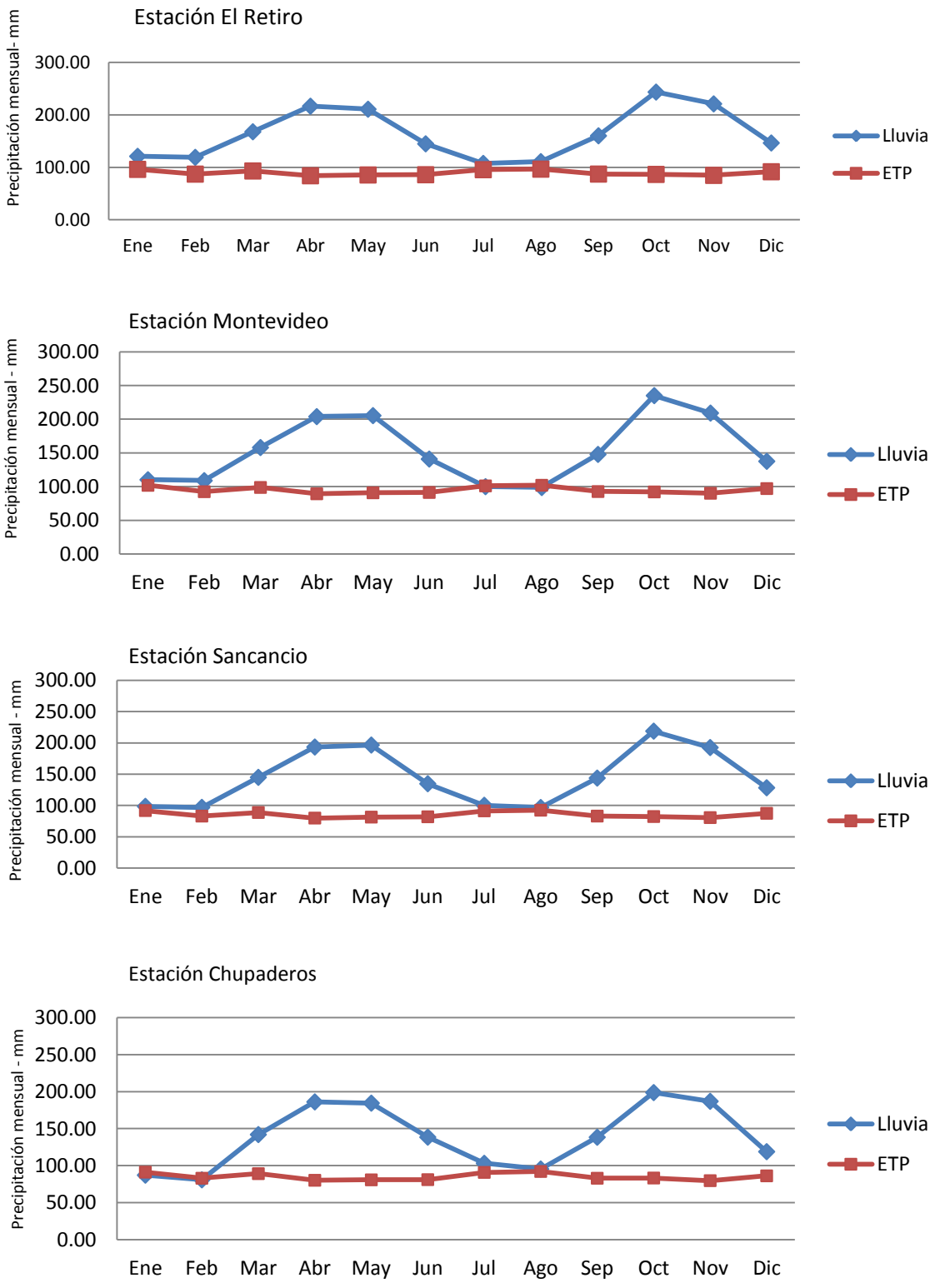
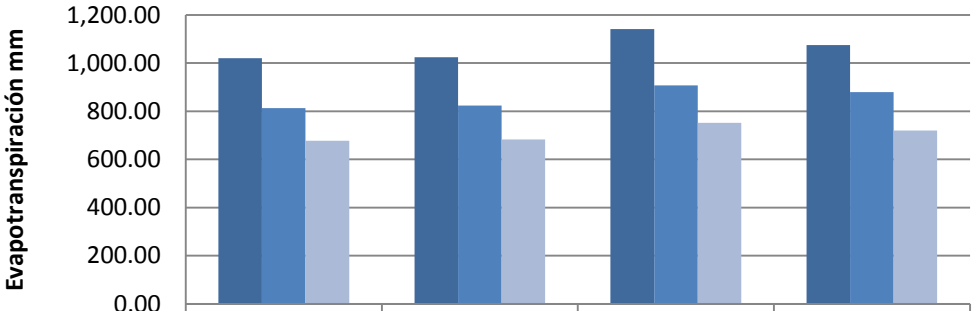


Figura 5.15: Evapotranspiración promedio anual 1981-2010



	C. Alta	C. Media-Alta	C.Media	C.Baja
Potencial	1,020.52	1,024.08	1,141.50	1,074.56
Real-Modelo	813.02	823.86	907.21	879.05
Real-Turc	677.22	682.34	751.73	720.42

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/km^2, lo cual corresponde al 50% del promedio para Colombia (58 L/s/km^2), pero superior al promedio de Suramérica (21 L/s/km^2) y al mundial (10 L/s/km^2). 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 km^2. (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 (QP50) 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.

$$\overline{Q} = \frac{1}{N}\int Q_j \, dt \qquad \text{Ec (5.3)}$$

Donde:
$\overline{Q}$: es el caudal medio en m^3/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

Rendimiento hídrico- $L/s/km^2$						
Subcuenca	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

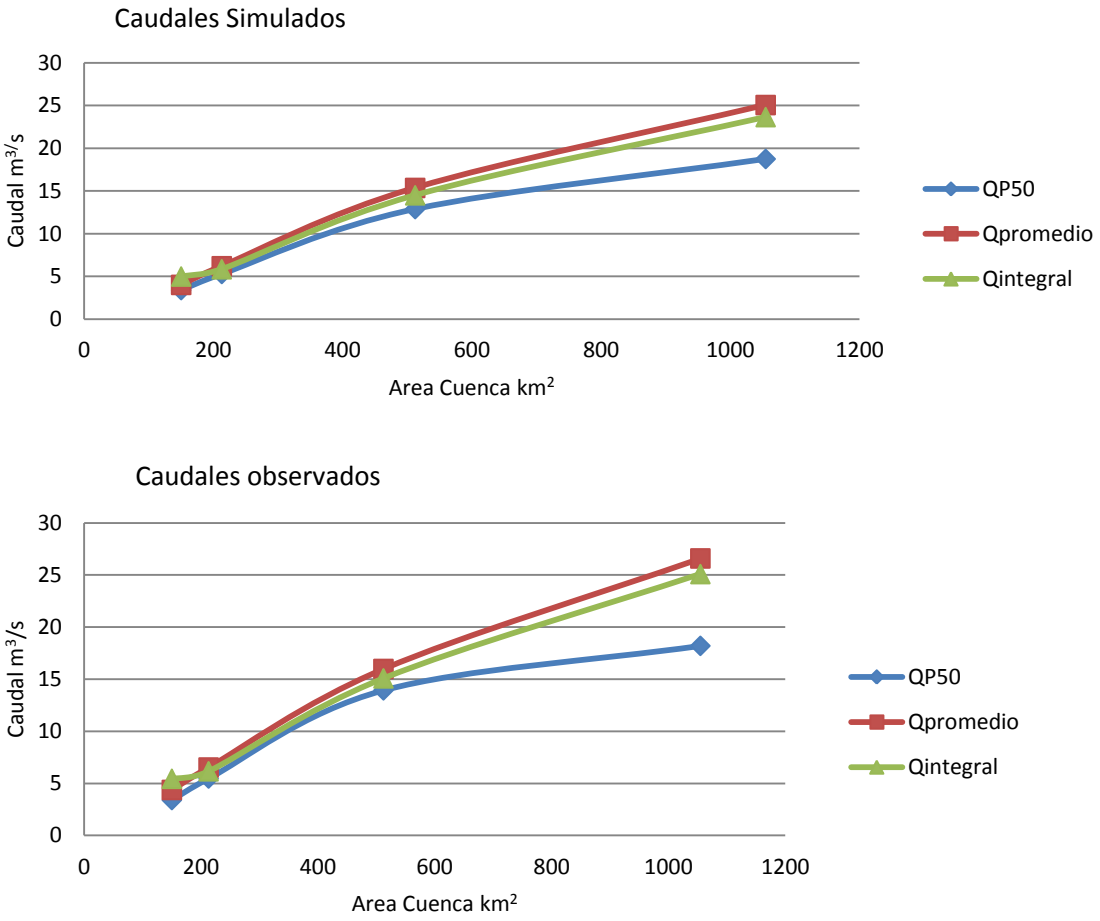


Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca

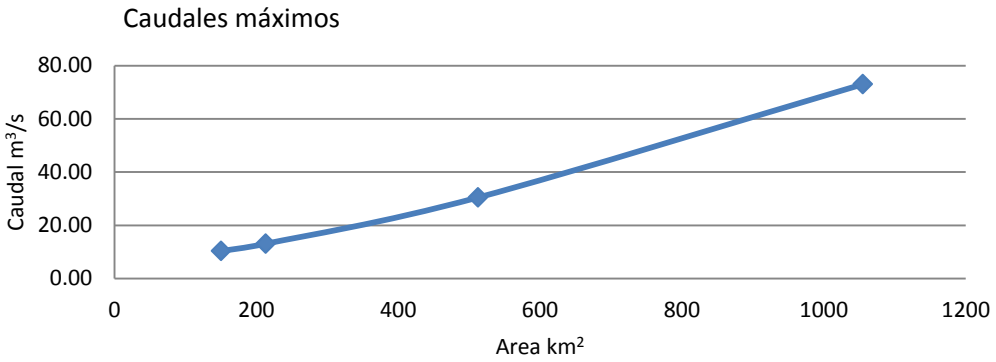
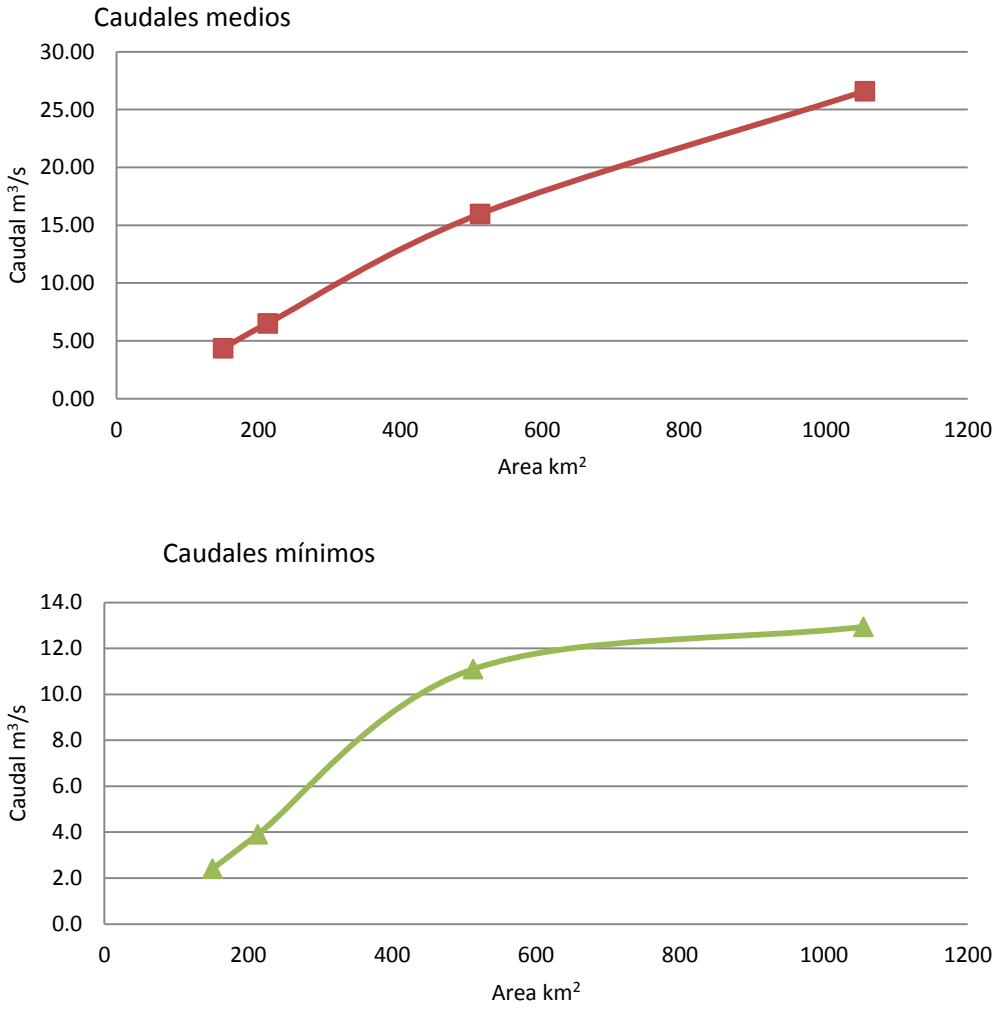


Figura 5.17: Comportamiento de los caudales observados con el área de la cuenca



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

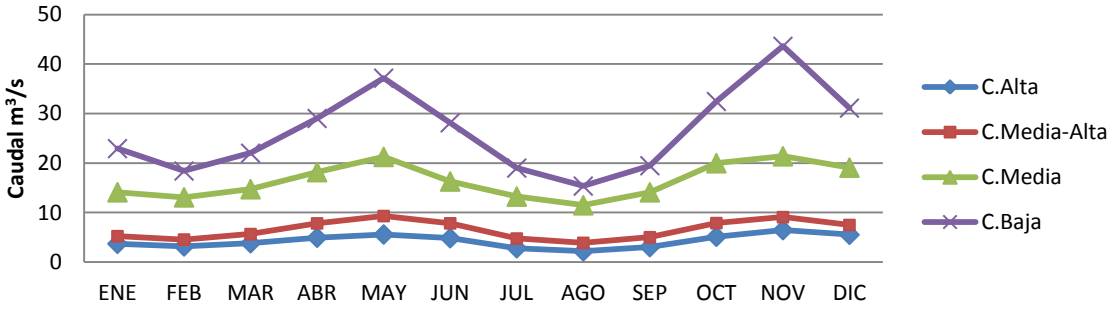
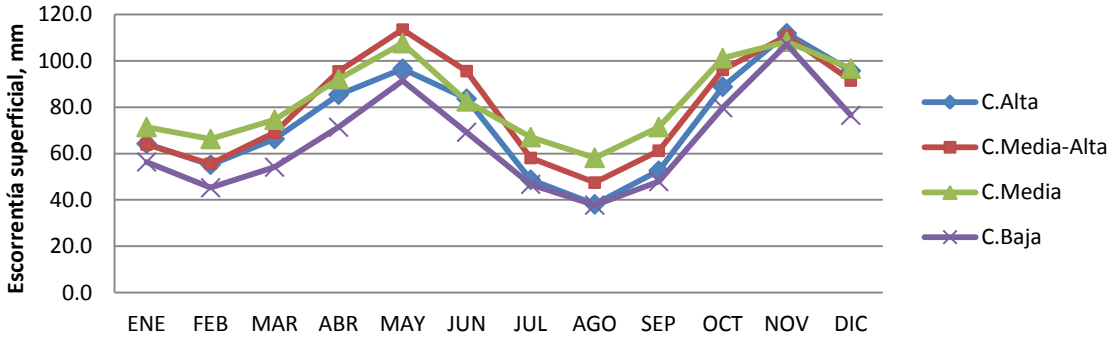
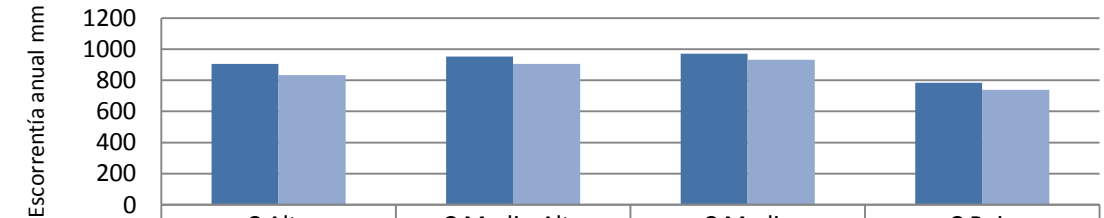


Figura 5.19: Escorrentía superficial promedio mensual



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



	C.Alta	C.Media-Alta	C.Media	C.Baja
Observado	906	952	970	784
Simulado	833	906	933	739

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 (α =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. 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. 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- 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 (α = 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 (α = 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

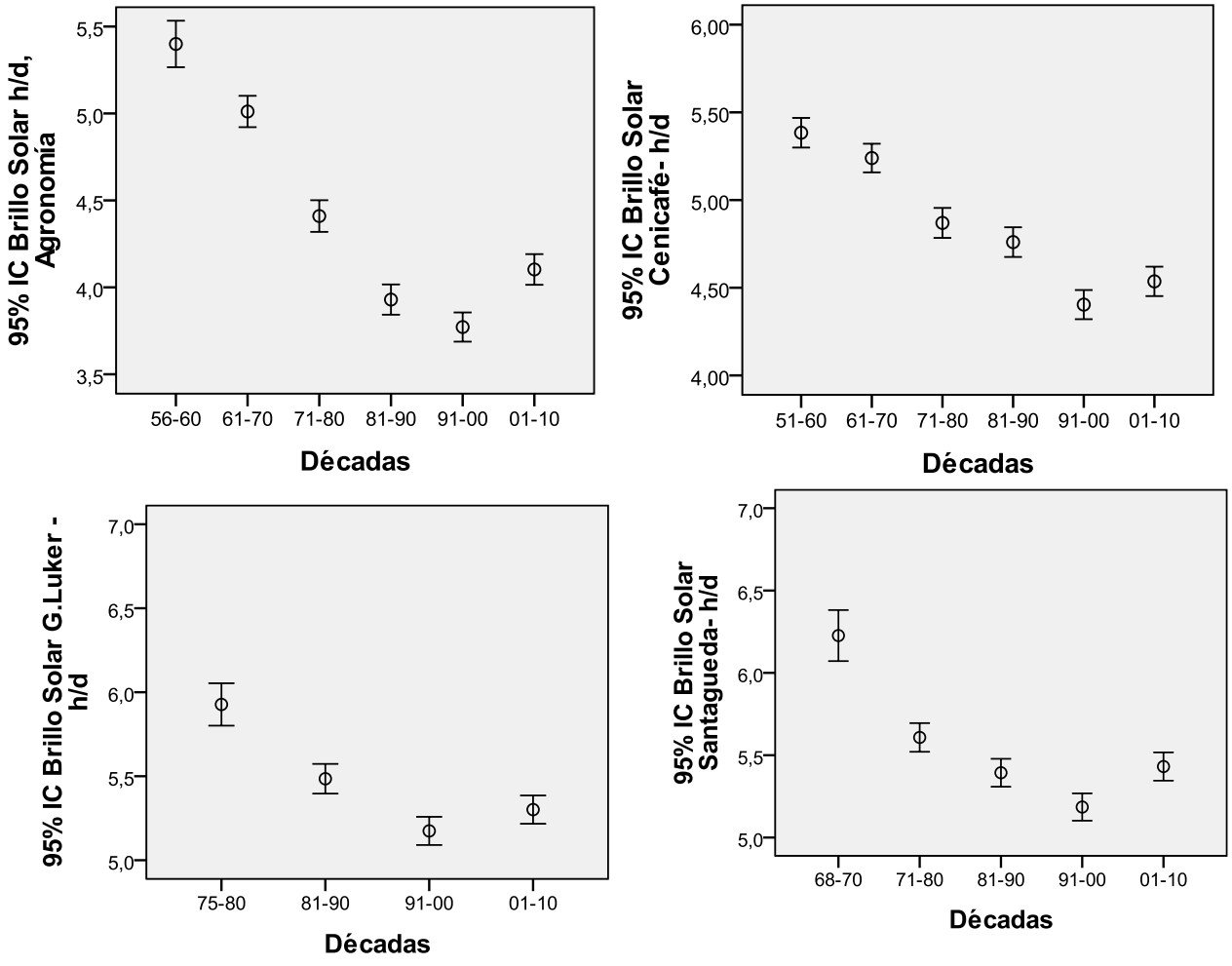
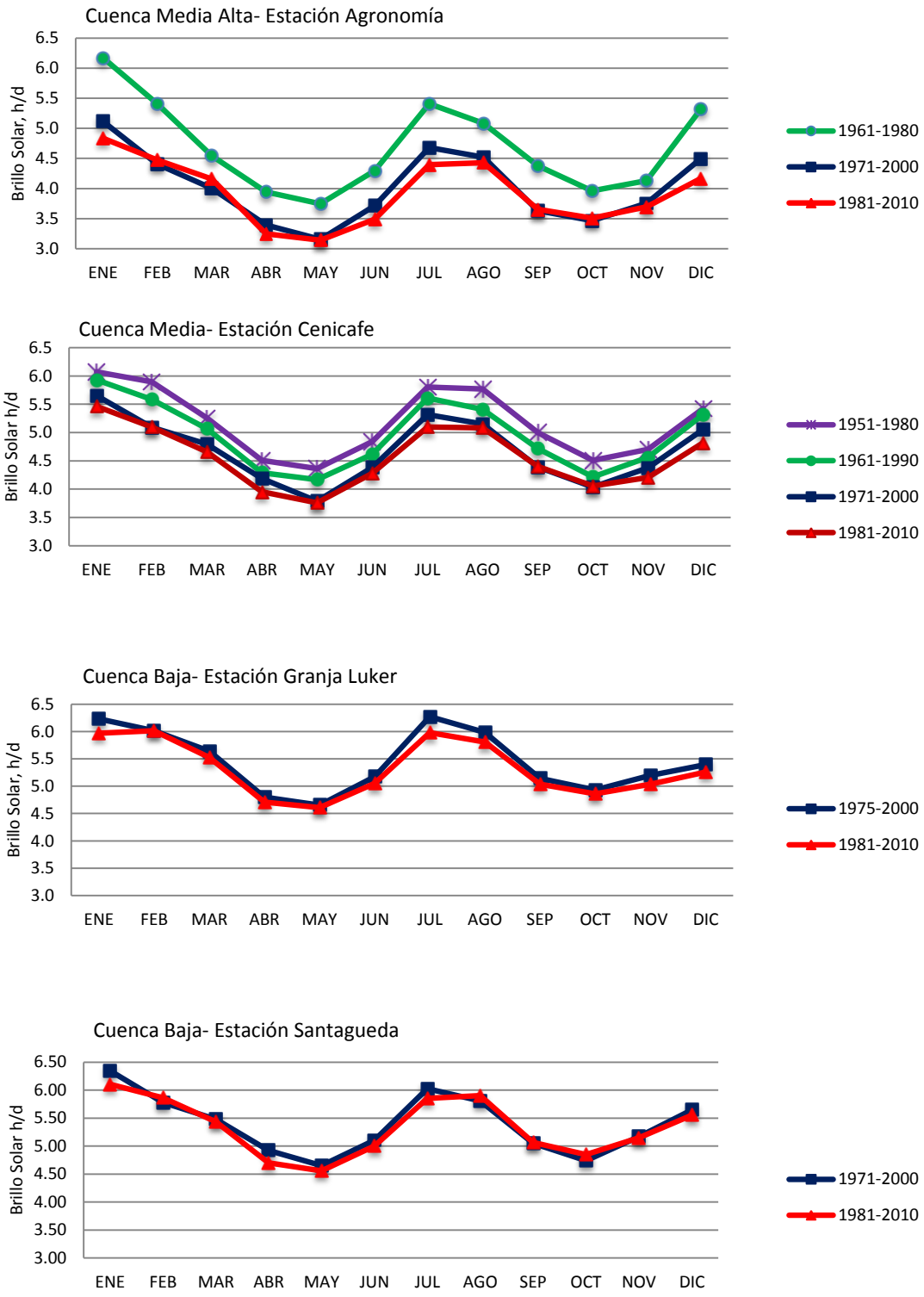



Figura 6.2: Distribución de brillo solar diario promedio tridecadal