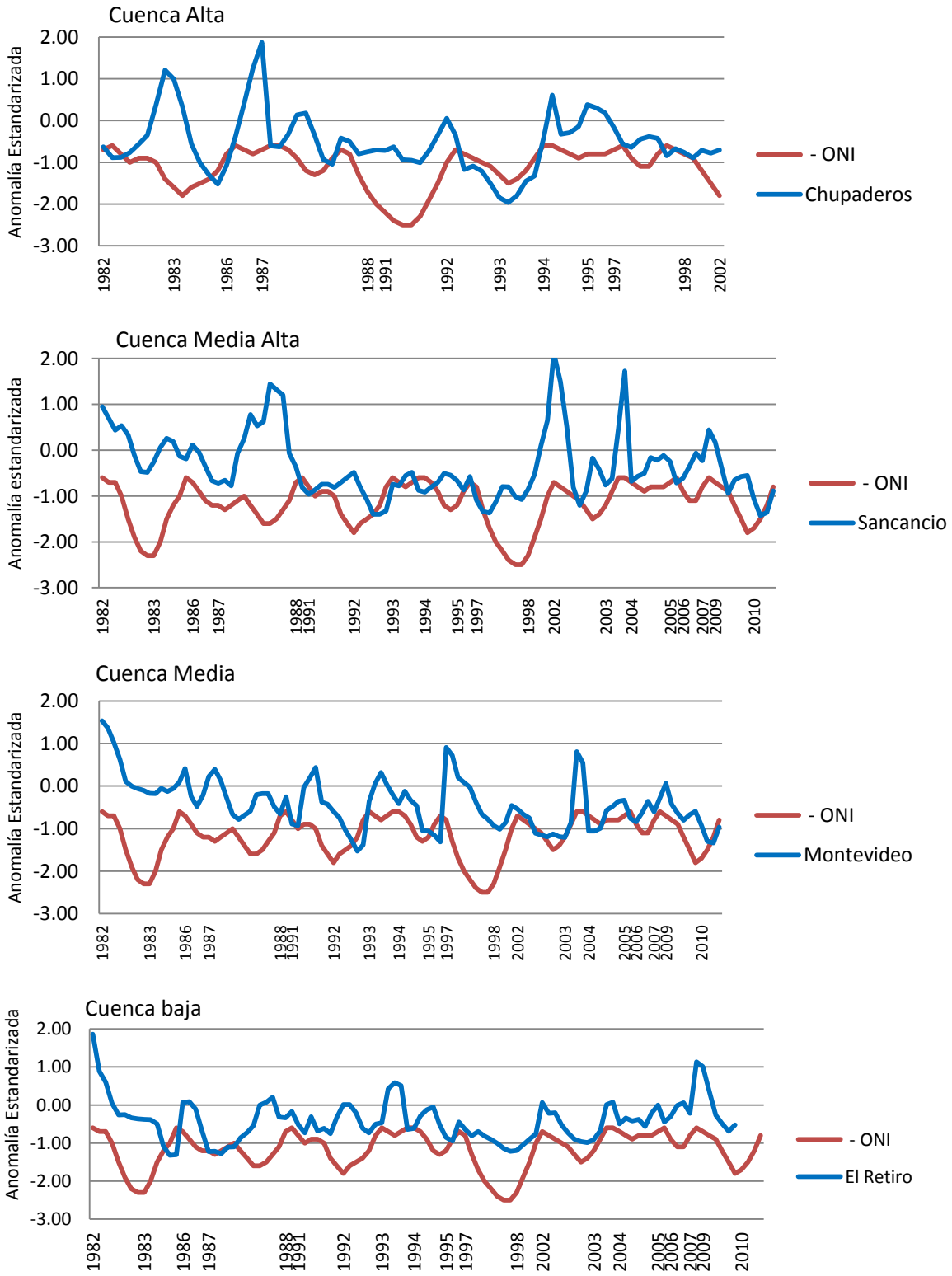
Figura 7.12: Alteración del caudal medio por eventos cálidos El Niño



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).

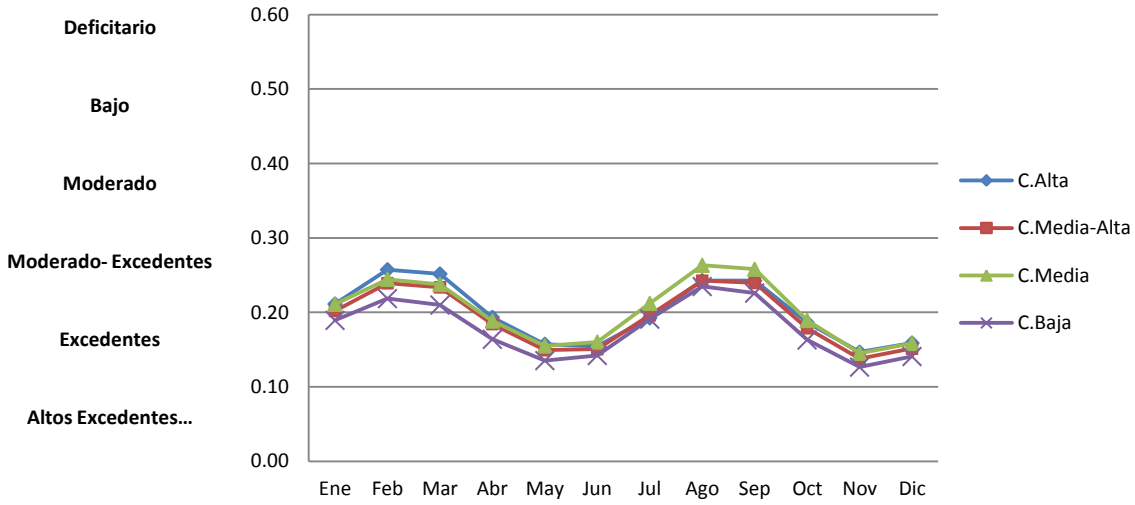
8.1.3 Índice de Aridez

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- Ia		
	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), os 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

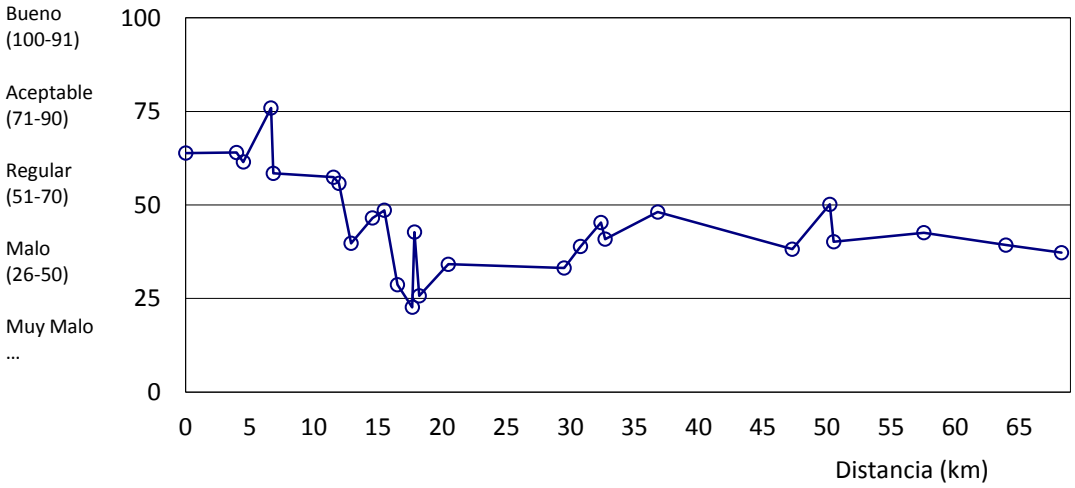
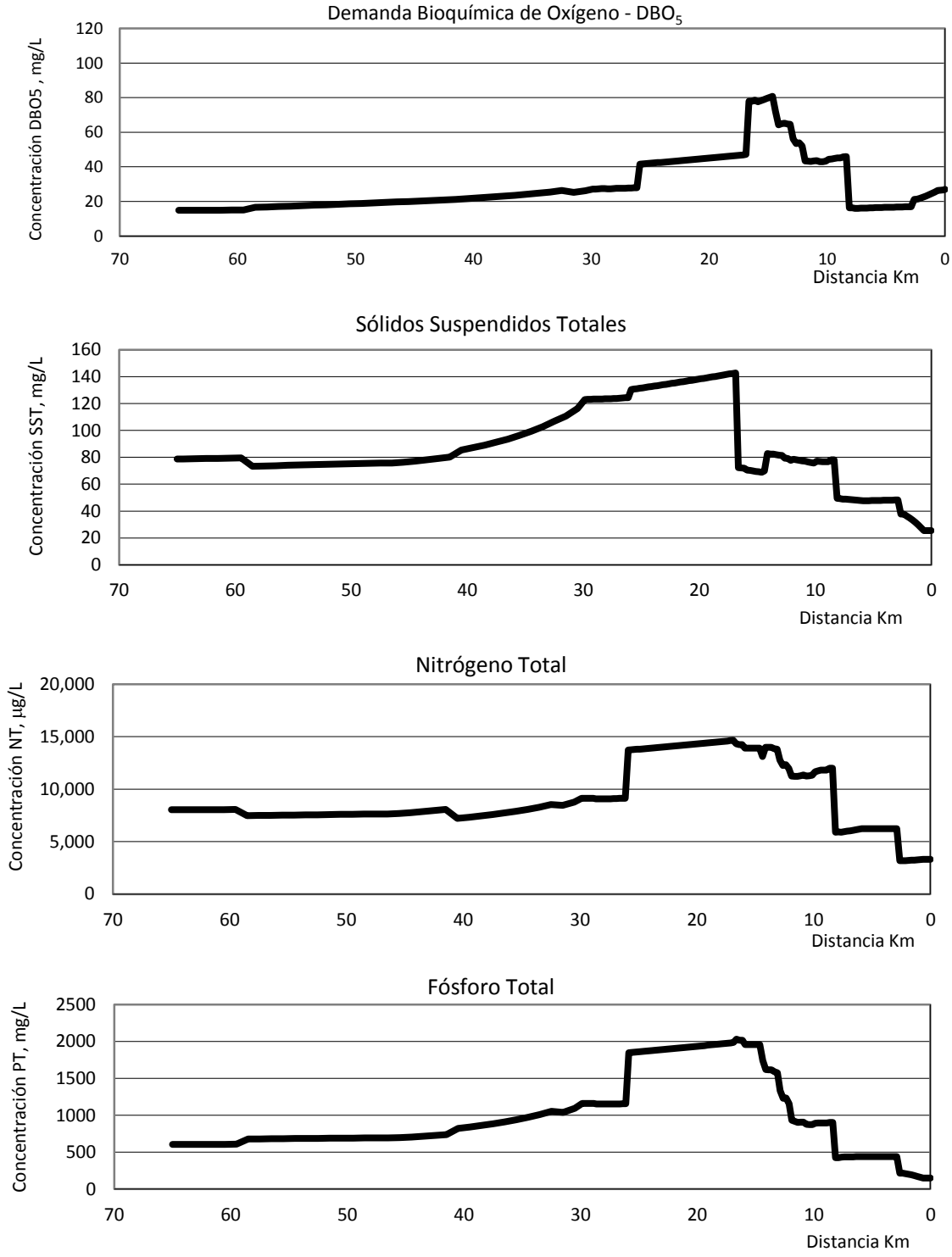
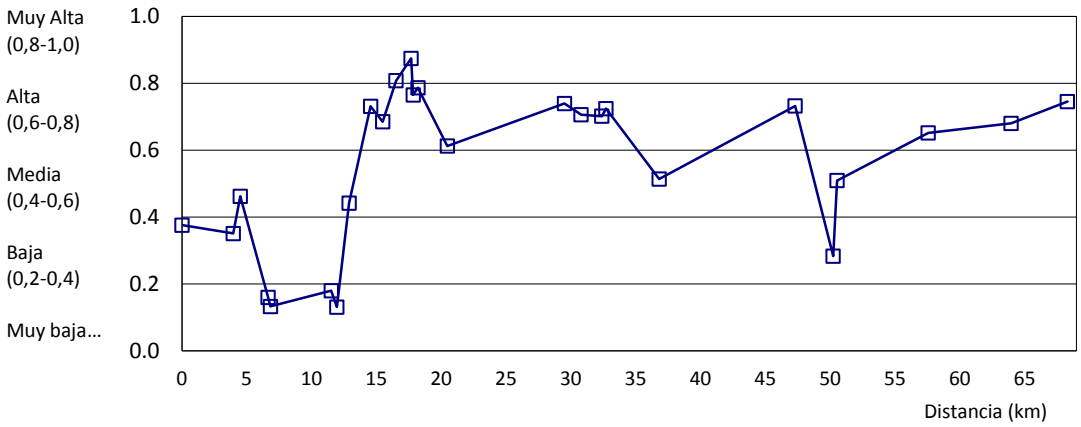


Figura 8.3: Concentración de contaminantes



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	Carga (Ton/año)/Mm^3			
	Km	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 m^3/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 m^3/habitante-año por tanto la categoría es de stress hídrico.

Figura 8.5: Evolución de la población cuenca del Río Chinchiná

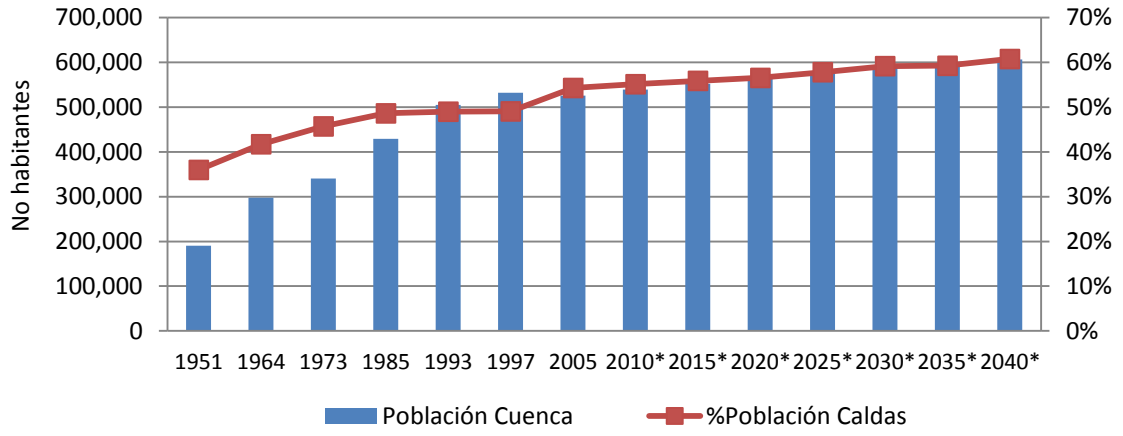


Tabla 8.5: Población de la cuenca del río Chinchiná

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 Mm3/año, basados en los caudales promedios 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):

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

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

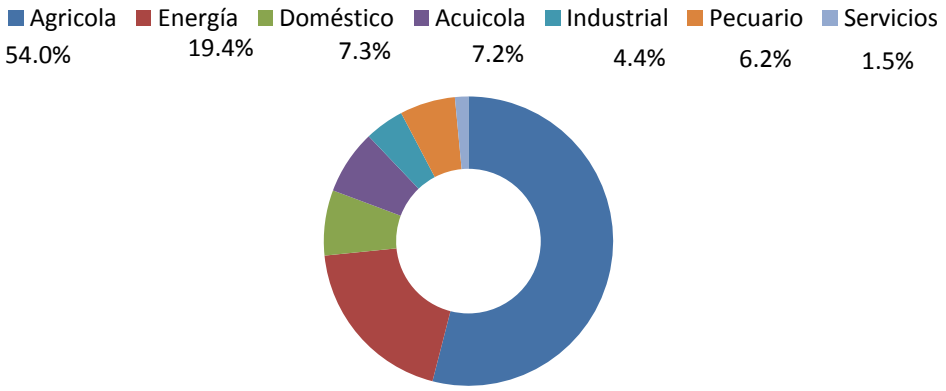
Cuenca	Oferta hídrica neta Mm^3/año Ec (2.11)			Oferta hídrica neta Mm^3/año $O_t - Q_{ambiental}$	
	Re	Rit	$O_{n\ Observados}$	Observados	Simulados
Alta	0,11	0,5	53,77	79,79	51,09
Media-alta	0,22	0,5	58,34	98,08	77,89
Media	0,42	0,4	92,02	176,29	198,36
Baja	0,18	0,5	267,89	464,84	425,74

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 Mm^3/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- Mm^3/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 Mm^3/año. Para el sector pecuario, tomando valores porcentuales similares al promedio Nacional; por tanto, se proyecta un consumo alrededor de 5,5 Mm^3/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 Mm^3; mientras que 17,2 Mm^3 se registraban como captados por la mediana y gran empresa. Los volúmenes concesionados para el sector servicios son 13,288 Mm^3 (IDEAM, 2010). La concentración de las actividades económicas en la cuenca alcanza el 70%, por tanto, el consumo de agua estimado es de 35 Mm^3. Las concesiones para industria y otros usos, sin tener en cuenta generación eléctrica, ascienden a 45,8 Mm^3 (CORPOCALDAS, 2008); mientras que para el sector eléctrico alcanzan 450,96 Mm^3/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 Mm^3/año y para el río Claro de 49,34 Mm^3/año; 134,18 Mm^3/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 Mm^3/año, el caudal ambiental debe reducirse en un 15%, del valor medio estimado (Q_{75}); la categoría del índice de disponibilidad per cápita es de escasez porque alcanzaría valores de 757 m^3/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 m^3/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.

Tabla 8.13: Alteraciones en los indicadores por variabilidad climática- Año húmedo

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	326,71	±68,12	412,81	±3,41	960,9	±175,34	2302,76	±506,47
Caudal Ambiental Mm^3/año	58,02		107,54		327,66		373,70	
Oferta hídrica disponible Mm^3/año	268,69		305,27		633,24		1929,06	
Demanda hídrica Mm^3/año							90,2	
Índice uso de agua							4,7	Bajo
Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento								Medio

9. Posibles indicadores futuros

9.1 Bajo condiciones estacionarias

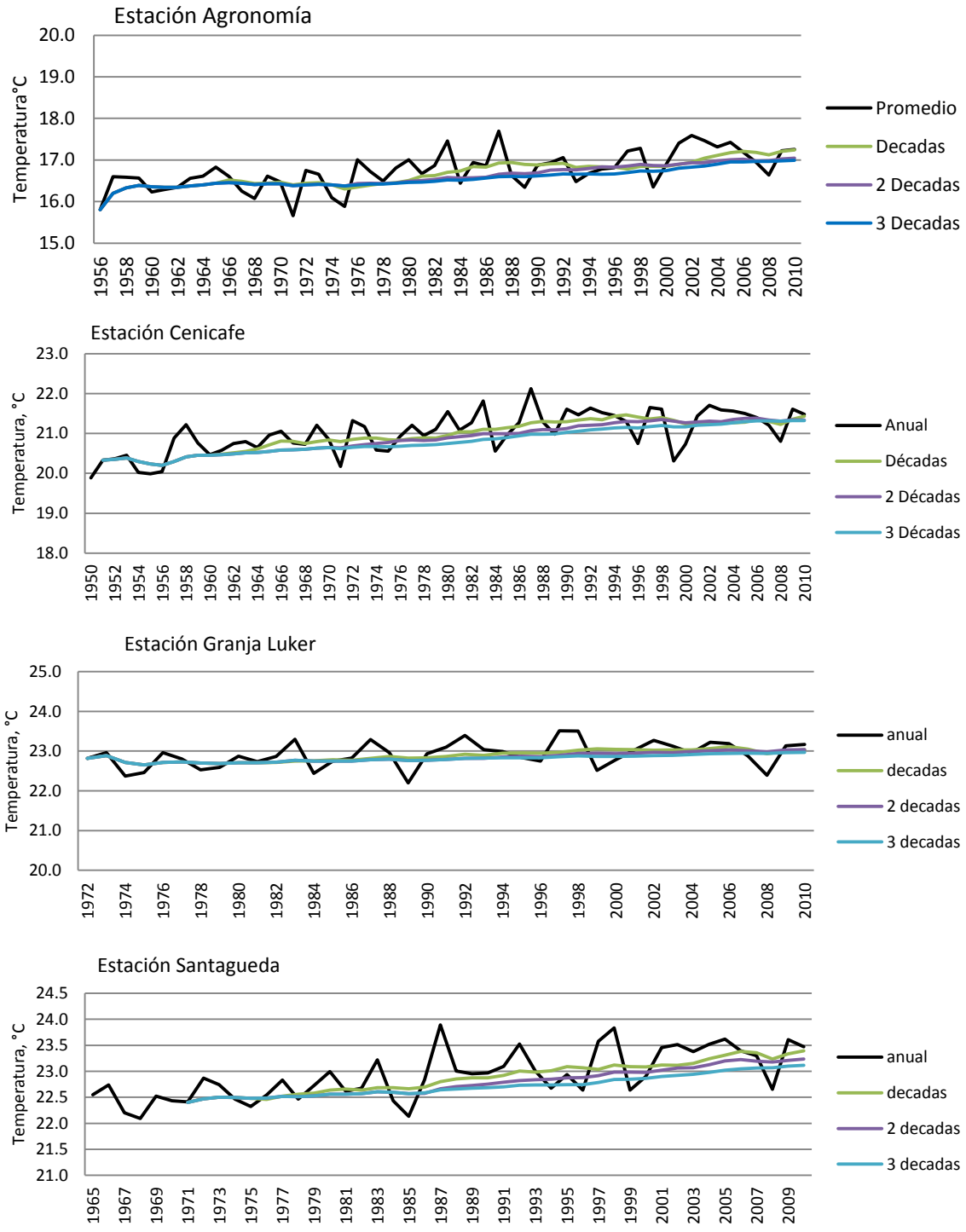
Aunque la hipótesis de estacionariedad en los procesos hidrológicos colapsa ante el cambio climático (Acevedo & Poveda, 2010), el análisis bajo condiciones estacionarias permite estimar que podría suceder en un futuro si se mantuvieran las tendencias históricas. La proyección de tendencias estima los 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-anuales 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		$Y = \beta o + \beta 1\ X$			
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1950	1972	1968
Curva Suavizada		2 décadas	3 décadas	3 décadas	3 décadas
βo	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
$\beta 1$	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		$Y = \beta o + \beta 1\ X$		
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1942	1965
Curva Suavizada		Décadas	Décadas	Décadas
βo	Valor	579,813	1783	854,18
	Error típico	105,349	72,437	97,053
	Significancia	0,00	0,00	0,00
$\beta 1$	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		$Y = \beta o + \beta 1\ X$		
Año 1 (Variable X = 1)		1964	1976	1976
Curva Suavizada		Décadas	Décadas	Décadas
βo	Valor	841,541	1224,94	1818,645
	Error típico	91,864	38,967	17,70
	Significancia	0,00	0,00	0,00
$\beta 1$	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

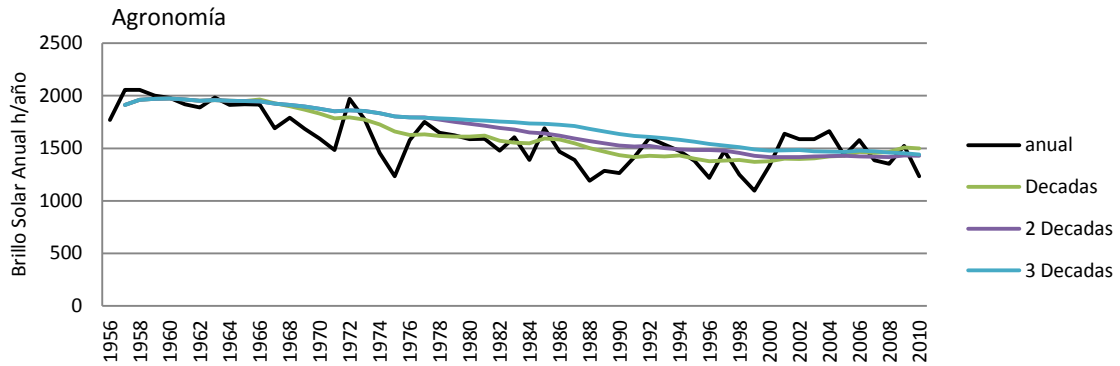
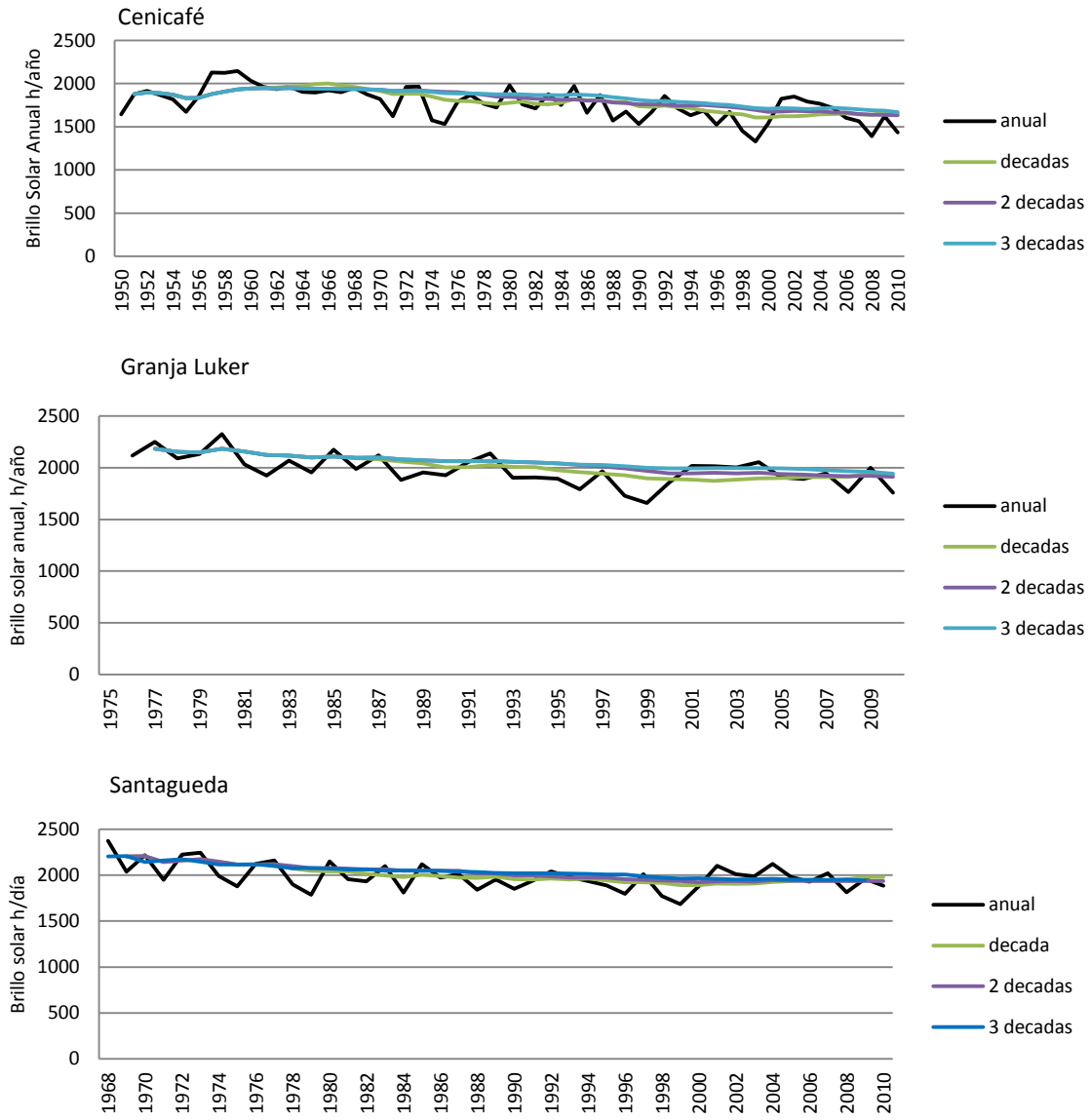


Figura 9.2: Tendencias en brillo solar promedio anual y curvas suavizadas



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		$Y = \beta o + \beta 1\ X$			
Año 1 (Variable X = 1)		1956	1950	1975	1968
Curva Suavizada		3 décadas	3 décadas	3 décadas	3 décadas
βo	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
$\beta 1$	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 computaciones 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 considerase 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 periodo 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 la 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 modelos HADCHM3 se ajustan 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]

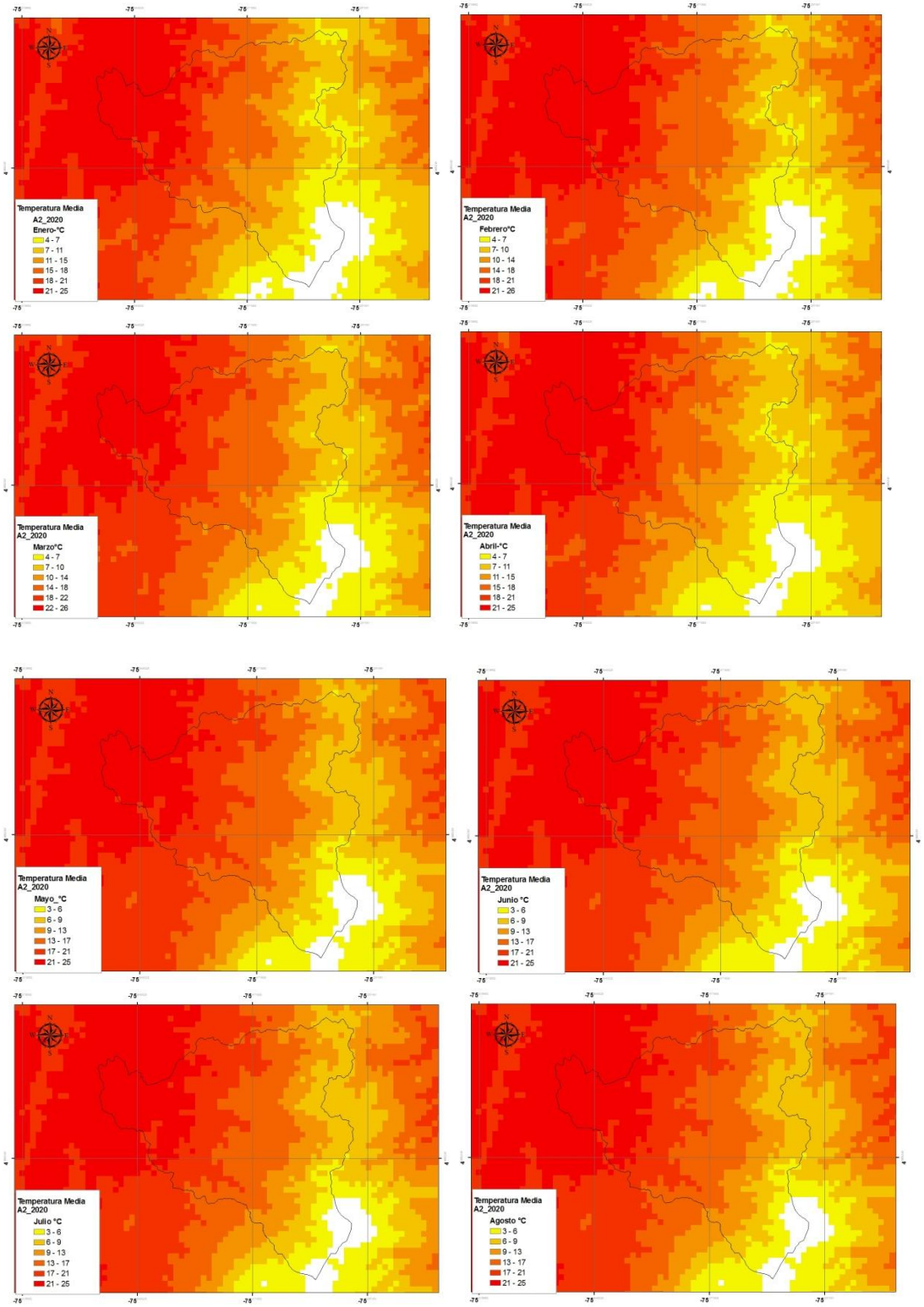


Figura 9.3: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]

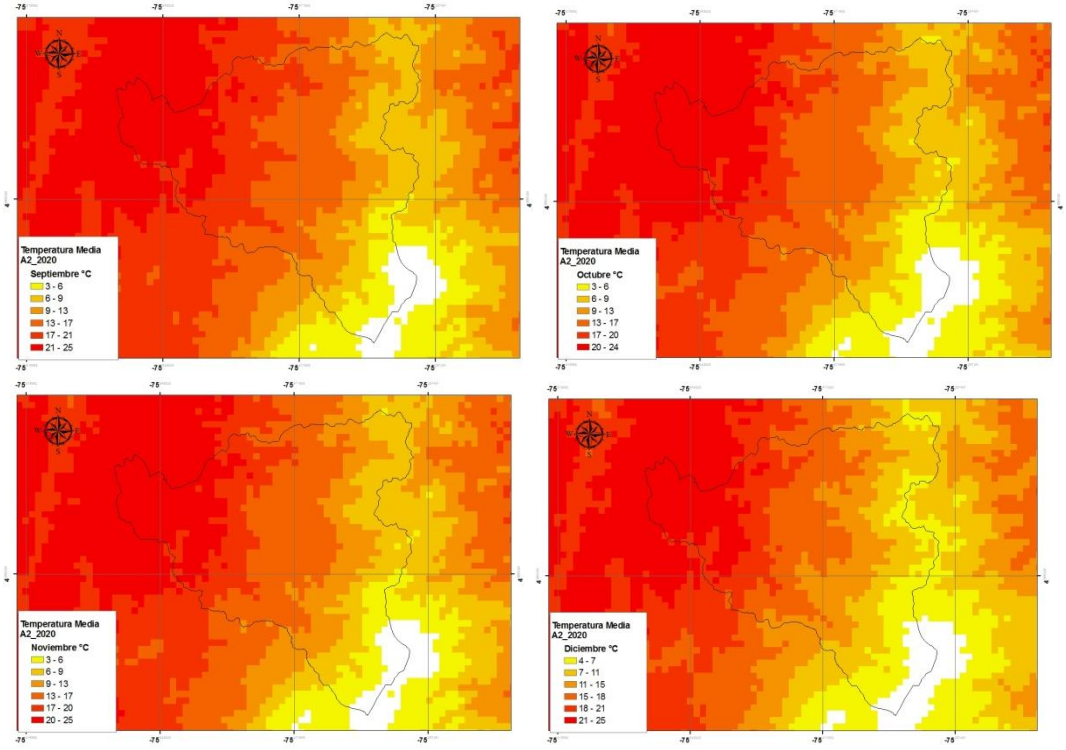


Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020]

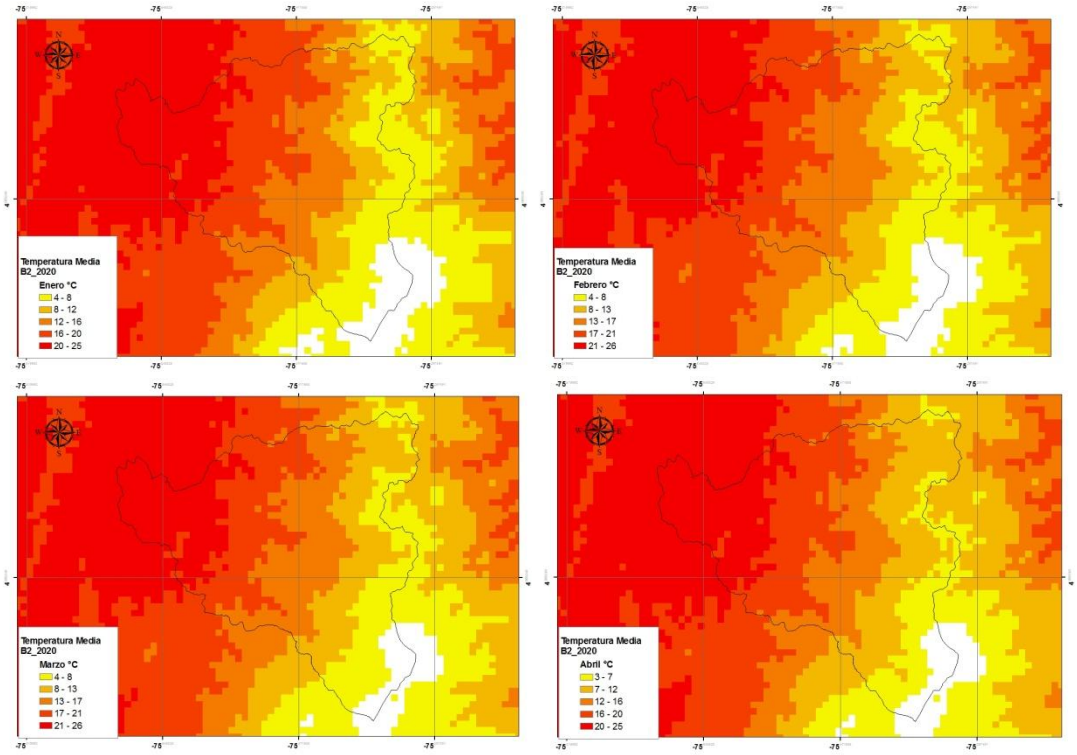


Figura 9.4: Temperatura media modelo HADCHM3 Escenario B2, 2010-2039 [2020]

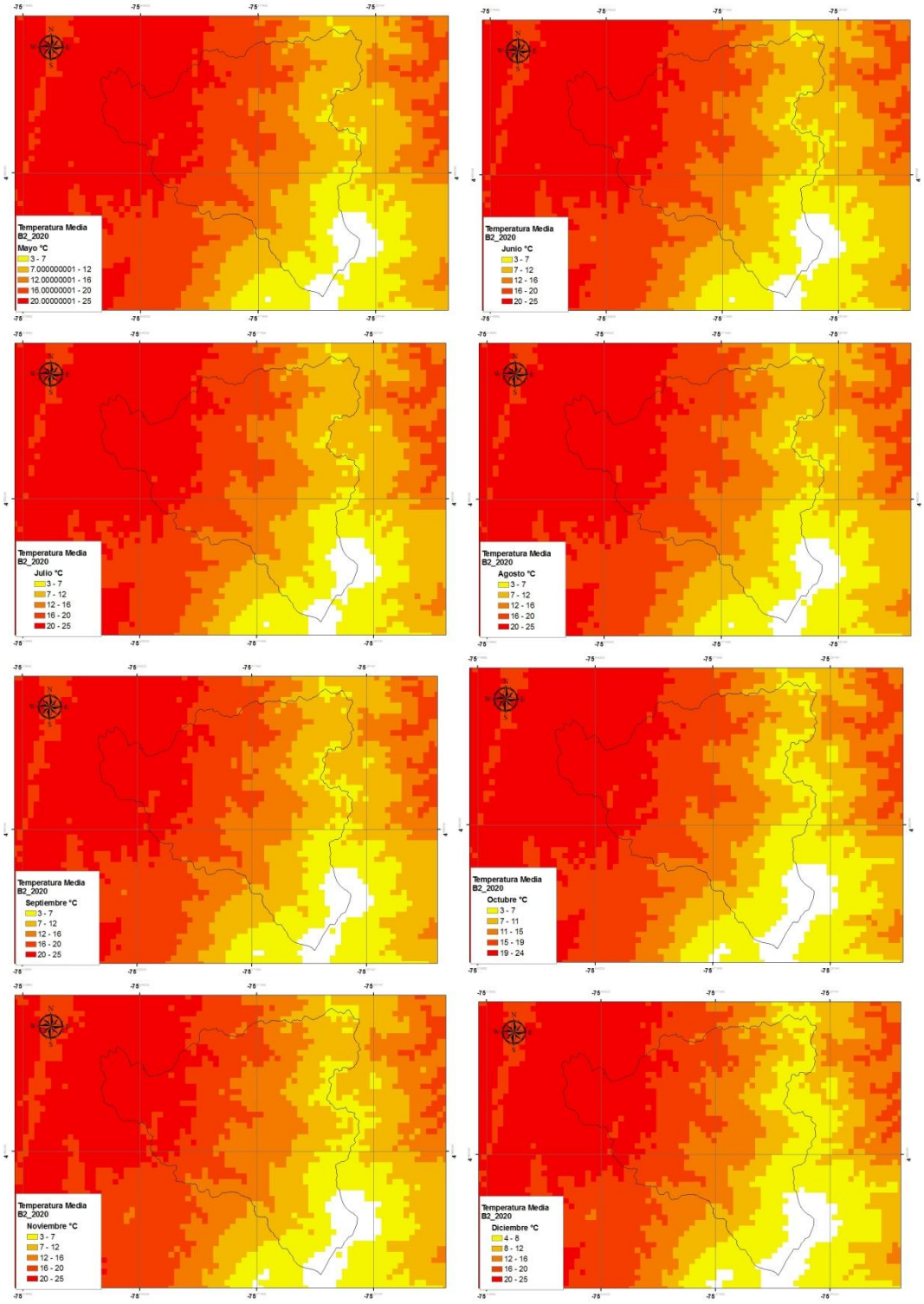
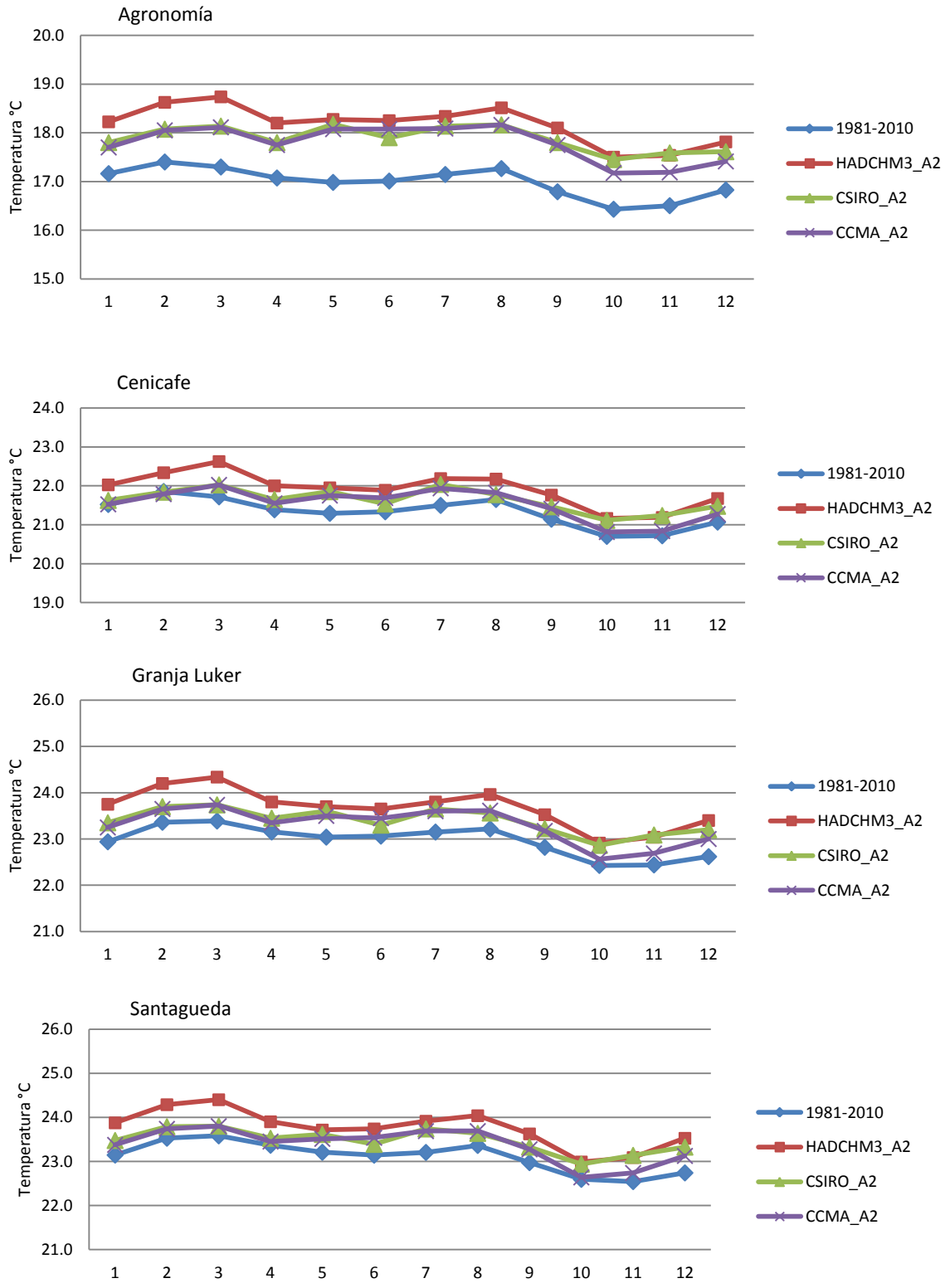


Figura 9.5: Temperatura media 2010-2039 [2020] vs normal climatológica



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					
			HADCM3		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]

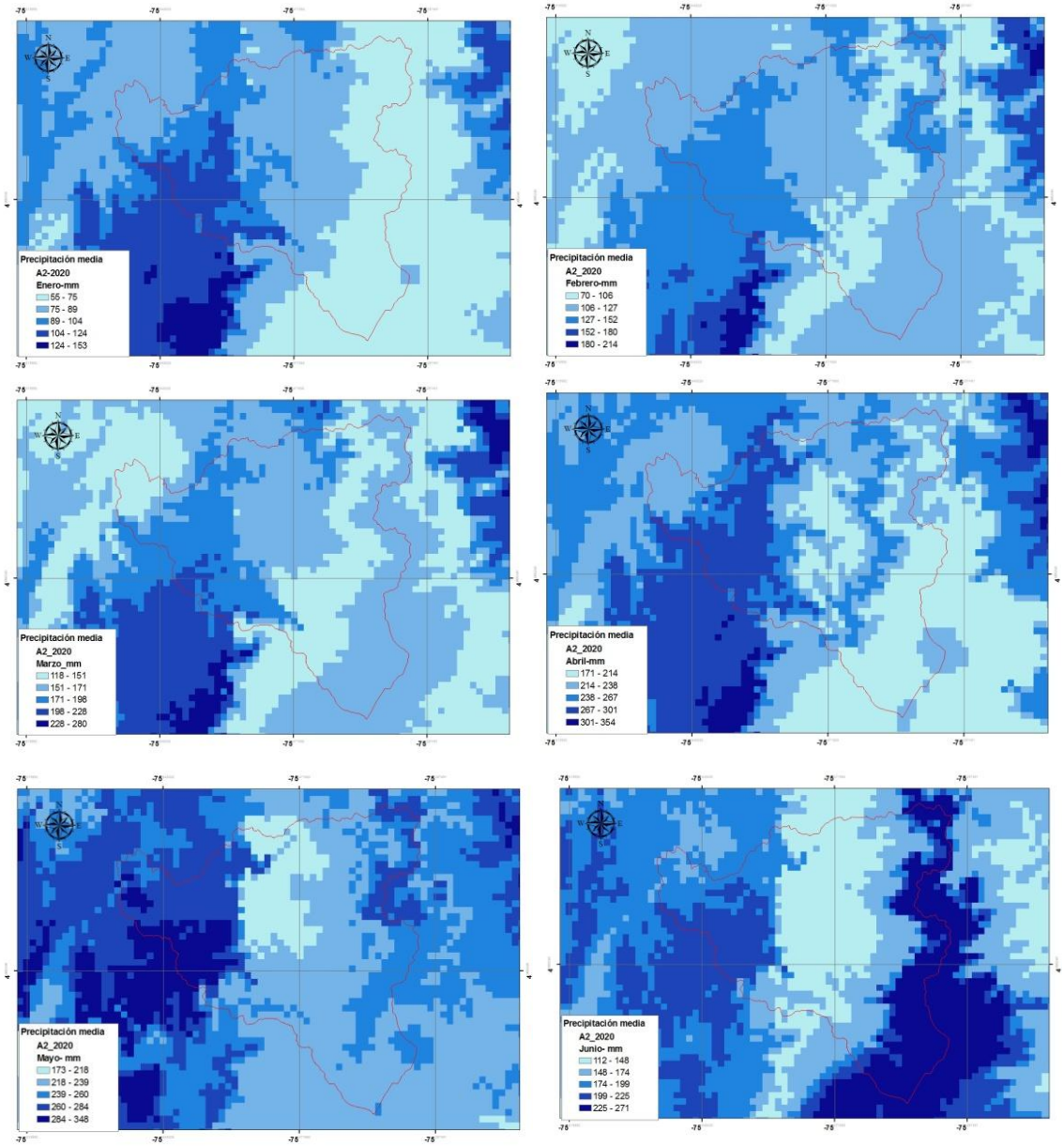
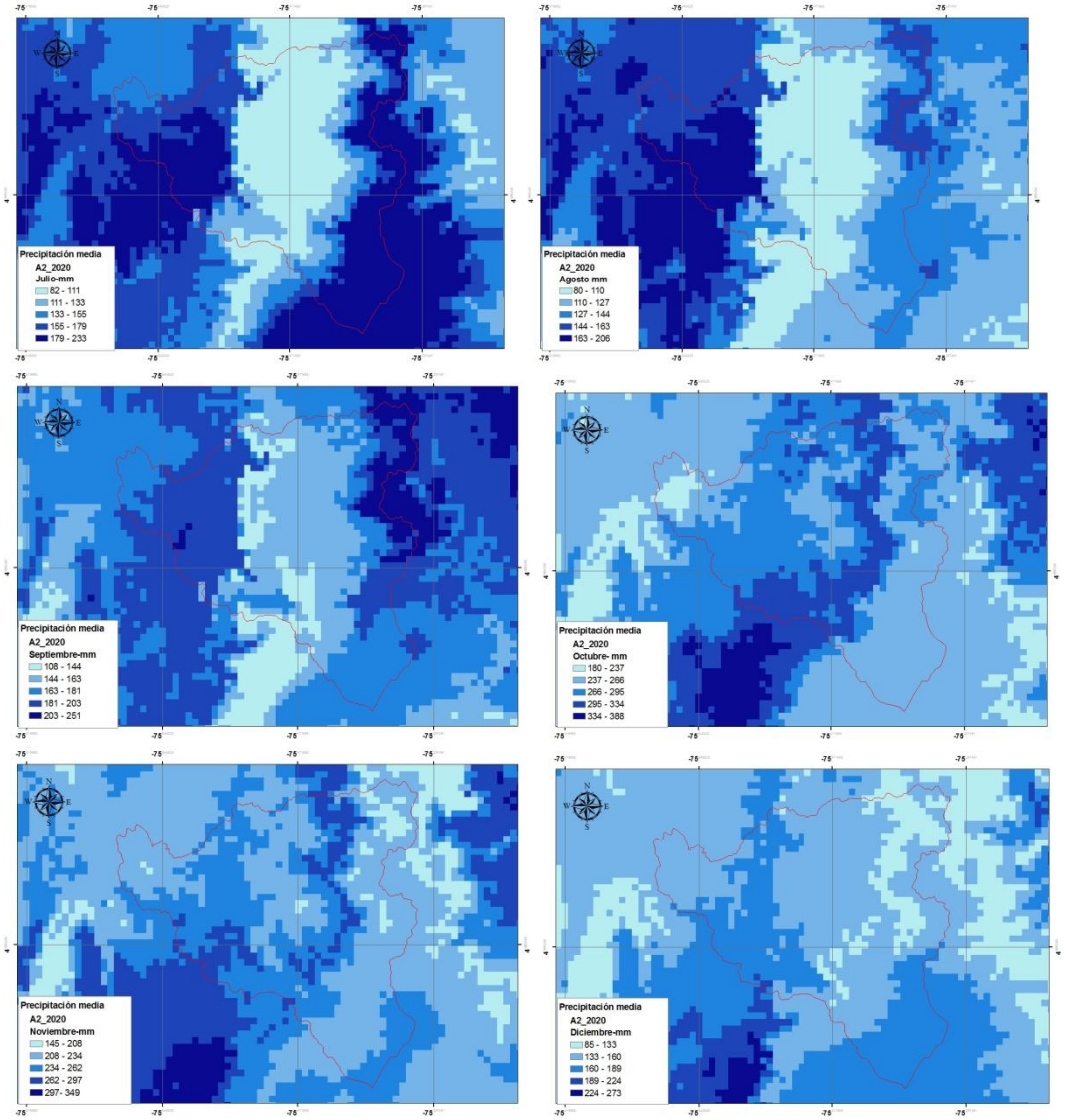
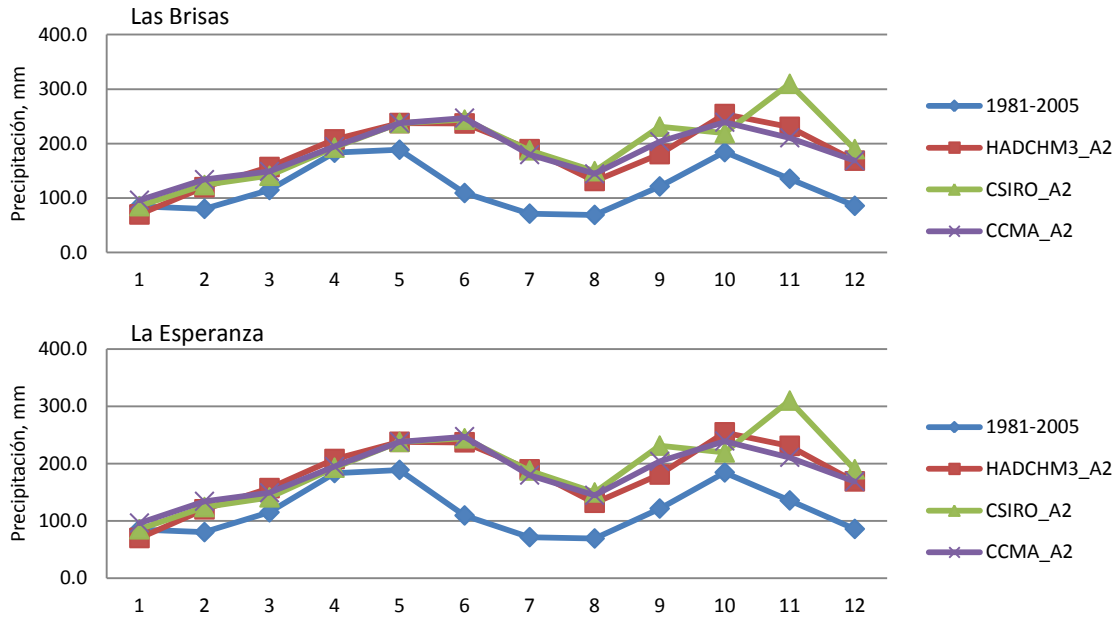


Figura 9.6: Precipitación media mensual HADCHM3 Escenario A2, 2010-2039 [2020]



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 ± 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

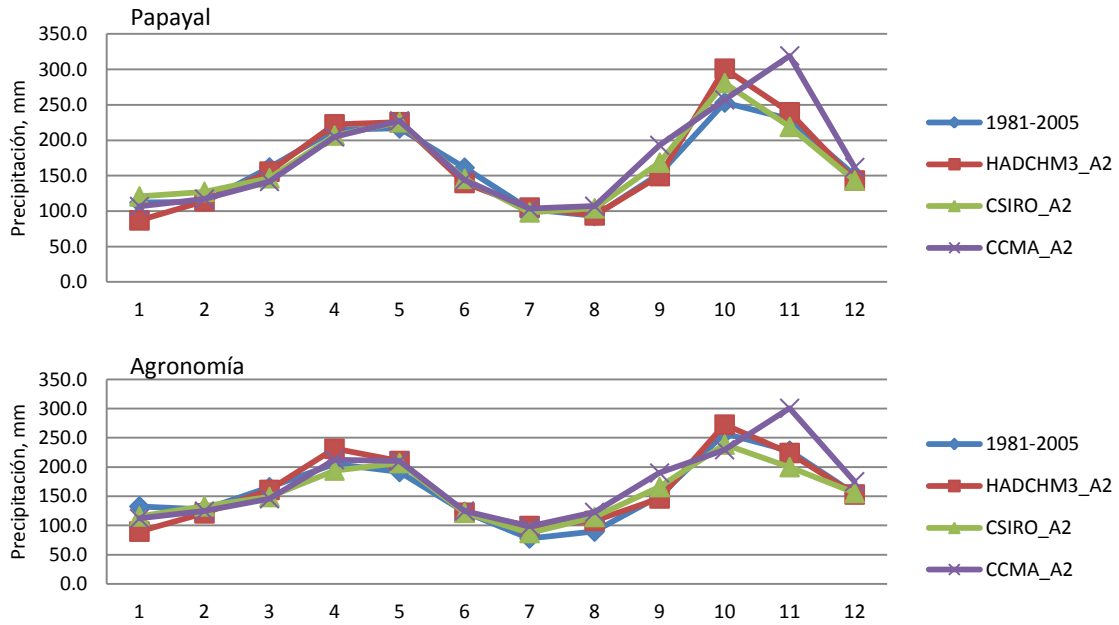


Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja

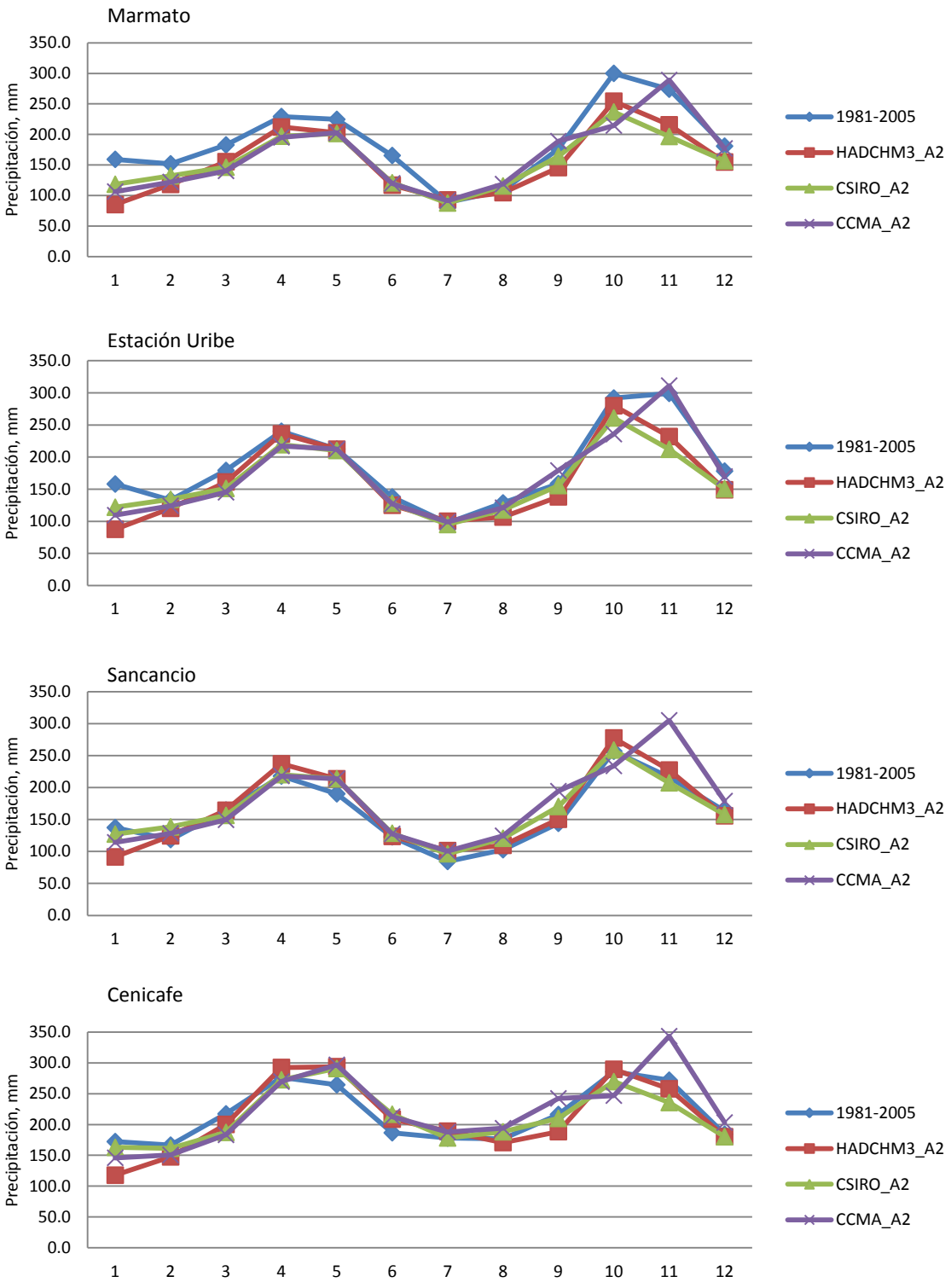
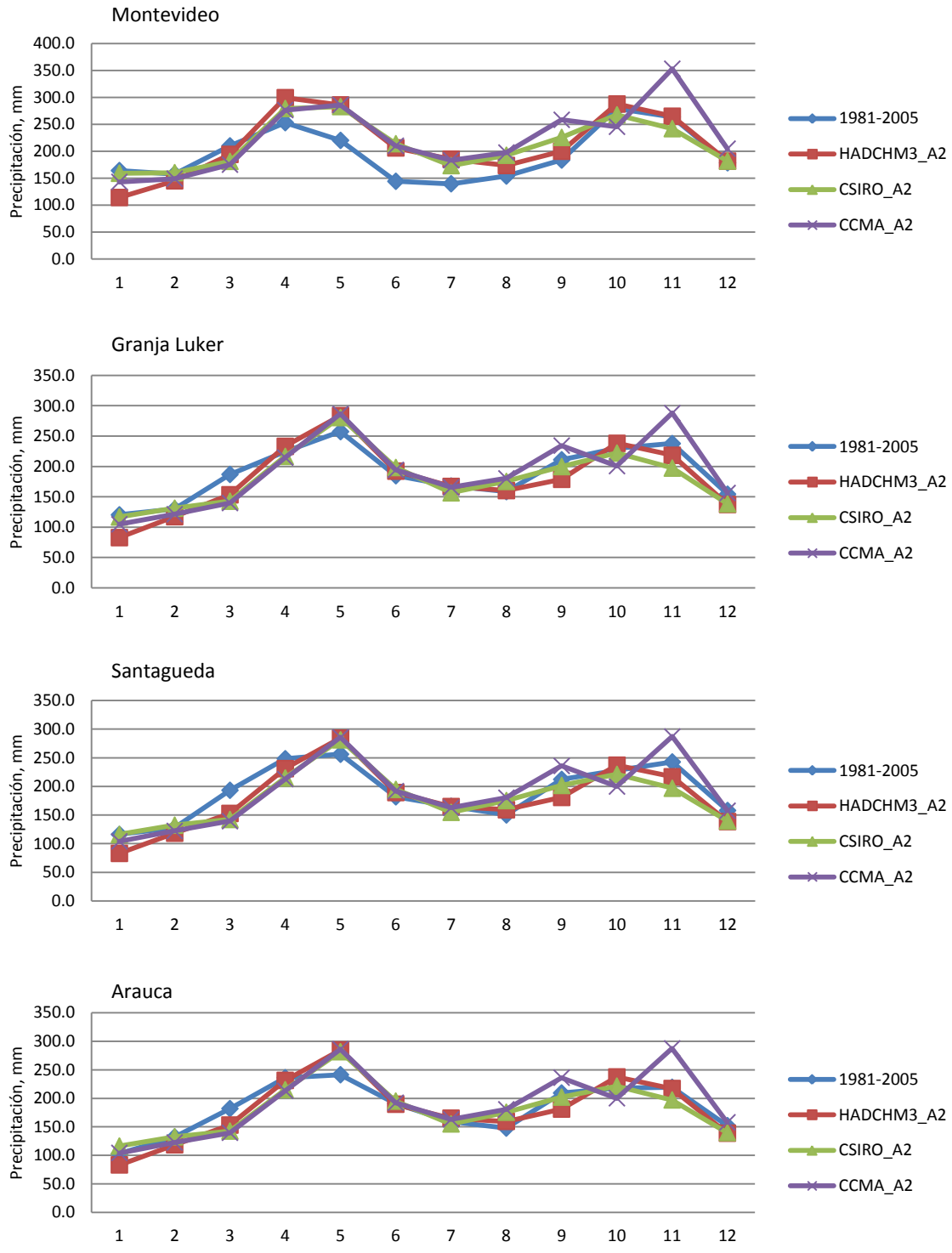


Figura 9.8: Precipitación mensual estimada vs normal climatológica cuenca media-alta a baja



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 promedios 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%
Agronomia	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%
Agronomia	-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 medial 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 ± 10%, sólo para las estaciones ubicadas por debajo de 2200 msnm. Los modelos evaluados sobre-estiman 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

		1981-2010	HADCHM3_A2		CSIRO_A2		CCMA_A2	
Estación	Altitud	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%
Agronomia	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

		1981-2010	HADCHM3_B2		CSIRO_B2		CCMA_B2	
Estación	Altitud	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%
Agronomia	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%

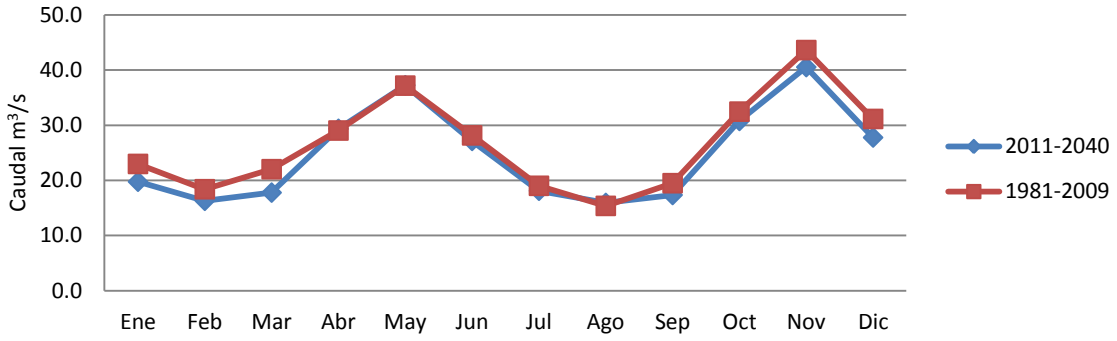
9.2.3 Escorrentía superficial

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 ± 1.6 m^3/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

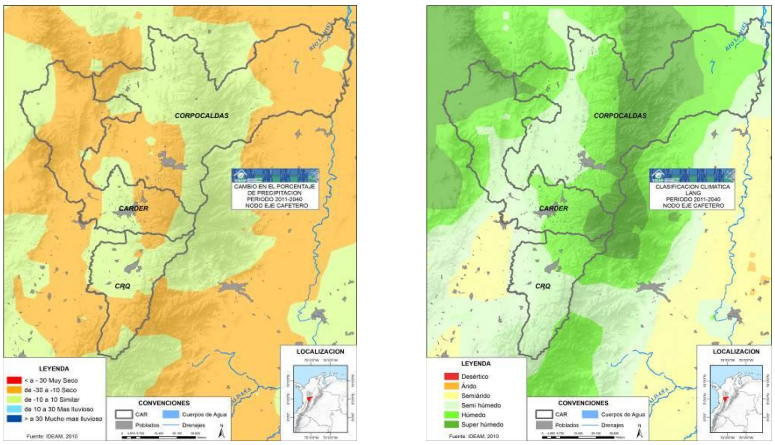


Con el modelo Thomas el caudal promedio simulado es 27 ± 1.4 m^3/s, que corresponde a un incremento del 2%. Con el Modelo Arma 1.1. Salas y Smith, el caudal simulado es 28.2 ± 1.1 m^3/s, lo cual equivale a un incremento del 6% en el caudal.

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°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 ± 1.2 m^3/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 ± 1.1 m^3/s, equivalentes a una reducción del 14% y con el modelo Arma 1.1. (Salas & Smith) el caudal simulado es 25.2 ± 1.1 m^3/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).

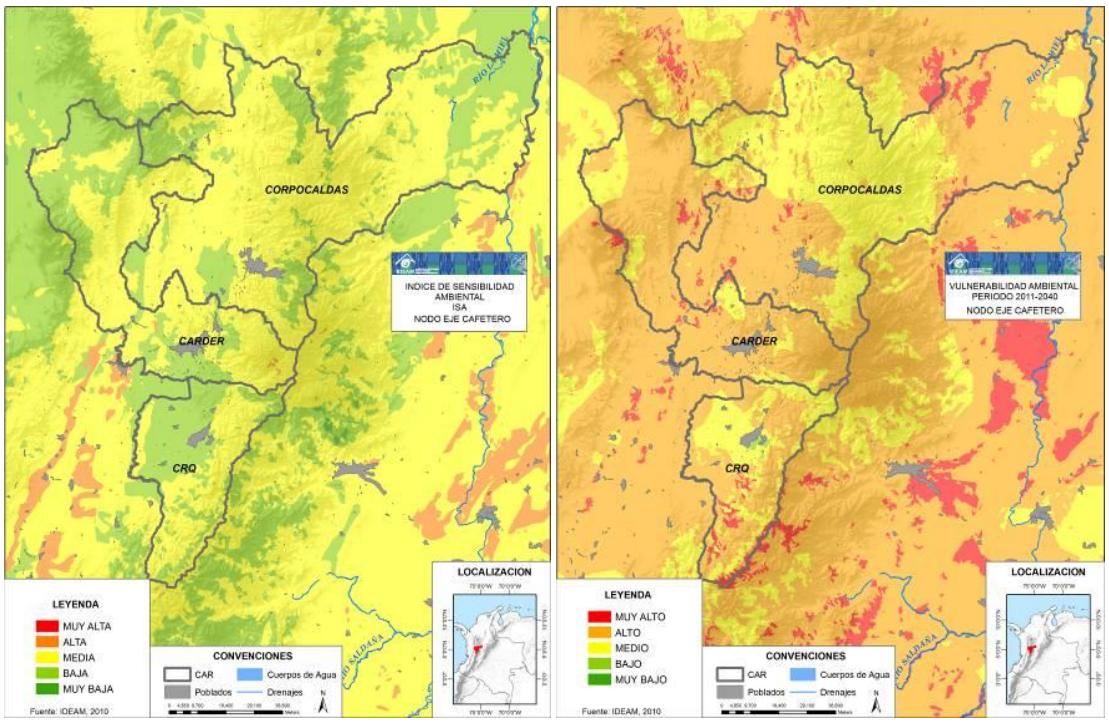
Por efecto de aumento de la demanda y reducción en la oferta, el índice de uso de agua llegaría a valores muy altos; el índice de stress hídrico relativo a valores altos y se sobrepasaría los límites del índice de disponibilidad per cápita de 1000 m^3/hab-año (Falkenmark, 1999), incrementando el grado 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) muestras 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 (α = 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 (α=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 (α=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 (α=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 m^3/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, constratints 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 balkance 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 & Jenkinks. (1976). Time series Analysis: Forecasting and Control. Holden Day, San Franciso, 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 Autonóma 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. Etud. 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. Engs. , 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 computacionesl 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, & Escurra. (2010). Introducción al Uso de Herramientas de Modelación. Bogotá: Banco Mundial.

Debels, P. & Escurra (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 Expoertos sobre el cambio climático.

IPCC. (2008). El Cambio Climático y el agua. Ginebra, Suiza.

IPPC. (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. Cambrigde 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 mechanims. Acta Met Sin 9 , 57-68.

Linacre. (1992). Climate data and resources. London: Rougtledge.

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 ht 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 Princenton.

Martz, & Garbrecht. (1999). An outlet breaching algorith for the treatment of closed depressions in a raster DEM. Computres & 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 Hidraulic 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 soial 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 dún modele global pluie-debil au travers dúne approche comparative. Institut National Polytechnique de Grenoble. Cemagref

Philander SG. (1990). El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, New York.

Pilgrim, & McDemortt. (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). Aplicability of kinematic and dinamic 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 decada Interdecanal 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 Rio 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 terrestiral 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, Californa.

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 Meterología.

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.