



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **EVALUACIÓN DEL POSIBLE EFECTO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ**

**LUISA FERNANDA CUSGÜEN CASTRO**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2013



# **EVALUACIÓN DEL POSIBLE EFECTO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ**

**LUISA FERNANDA CUSGÜEN CASTRO**

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

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director (a):

Doctor, Ingeniero Nelson Obregón Neira

Codirector (a):

Doctor, Químico Martha Cristina Bustos López

Línea de Investigación:

Calidad del Agua

Grupo de Investigación:

Resiliencia y Saneamiento Ambiental (RESA)

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2013



*A mi familia y mi pareja, quienes a pesar de todos los impases durante el desarrollo de este proyecto, creyeron en mí y me apoyaron incondicionalmente.*



## **Agradecimientos**

A Dios, porque su mano estuvo presente, mostrándome el camino correcto, en medio de tantos intentos fallidos, y me bendijo con excelentes y admirables directores, codirectores y jurados.

Al director y codirectora de esta tesis por su valiosa y atenta asesoría y apoyo permanente, inclusive desde que trabajaba en proyectos de tesis fallidos previos a este.

A los docentes y director de la Maestría de ingeniería ambiental que me guiaron y encaminaron a desarrollar este estudio.

A mi amiga y colega Julieth Lombo, que me colaboró en minería de datos. A instituciones que me facilitaron información y recursos, entre las que destaco: A la Universidad Nacional de Colombia, A la Pontificia Universidad Javeriana, A la Corporación Autónoma Regional CAR, Al Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM).





## Resumen

El presente documento, desarrolla una evaluación de la Calidad del Agua del cauce principal de la cuenca Ubaté – Suárez bajo escenarios de Cambio Climático, permitiendo brindar una perspectiva futura de la influencia que tendrá el cambio climático, representado en cambios en variables como precipitación y temperatura en la respuesta hidrológica de la cuenca, y por ende, en la calidad del agua de sus corrientes principales. La respuesta hidrológica y la calidad del agua responden de acuerdo a cambios en coberturas vegetales, usos del suelo, demanda hídrica y generación de vertimientos por parte de la población. Para el desarrollo de la modelación hidrológica y de calidad del agua se emplea la herramienta de modelación WEAP, y se simulan los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B con registros de variables climáticas como precipitación y temperatura mensuales multianuales para periodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 y 2071 a 2100. En consecuencia, la respuesta hidrológica y de calidad del agua varía entre los escenarios y a lo largo del paso del tiempo, siendo más marcado su efecto durante el último periodo de treinta años simulado. Se puede concluir que el escenario más crítico a nivel de oferta y calidad del agua sería el A1B, y el más difícil de gestionar (por sus eventos extremos) el A2.

**Palabras clave:** *Modelación Hidrológica, Calidad del Agua, Cambio Climático, Cambio en Coberturas, Uso del Suelo y Demanda Hídrica.*

## Abstract

This paper develop an evaluation of the water quality in the main channel of the watershed Ubaté – Suárez, under Climate Change Scenarios, allowing to provide a future perspective about the effect of Climate Change, represented as changes in precipitation, temperature variables, and anthropogenic factor such as increased water demand by population growth, in hydrology and water quality in the main currents in the watershed. For hydrologic and quality water modeling, the tool WEAP is used, and the climate change scenarios A2, B2 and A1B are simulated, with their variables monthly precipitation and temperature for 2011 – 2040, 2041 -2070 and 2071 and 2100.

**Key Words:** *Hydrologic Modeling, Water Quality, Climate Change, Land use, Water Demand*

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XX</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>XXII</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
1.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....	3
1.1.1 Concepto de Modelación .....	3
1.1.2 Generalidades .....	7
1.1.3 Balance Hídrico .....	8
1.1.4 Modelación Hidrológica y Escenarios de Cambio Climático .....	10
<b>2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>19</b>
2.1 UBICACIÓN .....	19
2.2 DESCRIPCIÓN .....	21
2.2.1 Climatología .....	23
2.2.2 Hidrología .....	23
2.2.3 Cobertura Vegetal y Usos del Suelo .....	26
2.3 DEMANDA HÍDRICA .....	29
2.3.1 Generalidades .....	29
2.3.2 Demografía .....	29
2.3.3 Censo de Usos y Usuarios .....	31
2.3.4 Sistema de Abastecimiento .....	33
2.4 SANEAMIENTO – RECURSO HÍDRICO .....	38
2.4.1 Antecedentes .....	38
2.4.2 Vertimientos Domésticos .....	39
2.4.3 Vertimientos Industriales .....	42
2.5 CALIDAD DEL AGUA .....	45
2.6 ESTUDIOS PREVIOS DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	47
<b>3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO</b> .....	<b>51</b>

3.1	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO – INFORMACIÓN TOMADA DE MODELACIÓN CLIMÁTICA.....	51
3.1.1	Generalidades .....	51
3.1.2	Escenarios Futuros.....	52
3.2	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	54
3.2.1	Cobertura Y Uso Del Suelo.....	54
3.2.2	Ordenamiento Territorial .....	55
3.2.3	Demografía Y Vertimientos.....	56
<b>4.</b>	<b>MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....</b>	<b>62</b>
4.1	SELECCIÓN DEL MODELO .....	62
4.2	DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA DESARROLLADA POR WEAP .....	68
4.2.1	Generalidades .....	68
4.2.2	Método Seleccionado: Humedad del Suelo para Lluvia Escorrentía ....	70
4.3	MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP .....	73
4.3.1	Desarrollo Esquema de Modelación .....	73
4.3.2	Calibración y Resultados .....	97
4.3.3	Análisis de Resultados.....	103
4.3.4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	105
4.3.5	Análisis de Resultados.....	143
<b>5.</b>	<b>MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA .....</b>	<b>151</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA QUAL 2k INCLUIDA EN WEAP .....	151
5.1.1	Generalidades .....	151
5.2	ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA – ESTUDIOS PREVIOS	158
5.3	MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA EN WEAP .....	165
5.3.1	Desarrollo Esquema de Modelación .....	165
5.3.2	Calibración y Resultados .....	169
5.3.3	Análisis de Resultados.....	172
5.4	MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	174
5.4.1	Análisis de Resultados.....	199
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>203</b>
6.1	Conclusiones.....	203
6.2	Recomendaciones.....	206
<b>A.</b>	<b>Anexo: Estaciones Climatológicas e Hidrológicas.....</b>	<b>207</b>
	<b>ANEXO A.1. Estaciones Climatológicas e Hidrológicas en la Cuenca Ubaté – Suárez</b>	<b>207</b>
	<b>ANEXO A.2. Ventana de tiempo de estaciones Climatológicas.....</b>	<b>213</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Mapas.....</b>	¡Error! Marcador no definido.
	<b>Bibliografía .....</b>	¡Error! Marcador no definido.



## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1: Esquema de protocolo de modelación .....	4
Figura 2-1: Cuenca Ubaté – Suárez de segundo orden. ....	20
Figura 2-2. Censos población urbana y rural 1993 y 2005 de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté Suárez. ....	29
Figura 2-3. Tasa de cambio en la población urbana, rural y total en los municipios ubicados en la cuenca Ubaté Suárez entre 1993 y 2005. ....	30
Figura 2-4. Distribución porcentual del consumo de agua de cada subcuenca de tercer orden de la cuenca Ubaté Suárez .....	32
Figura 3-1. Tendencia de desarrollo poblacional para los municipios de la cuenca Ubaté Suárez. ....	56
Figura 4-1. Componentes modelados con el método de la Humedad del Suelo.....	70
Figura 4-2. Esquema de la cuenca Ubaté – Suárez en WEAP.....	79
Figura 4-3. Áreas subcuencas y puntos de interés Río Ubaté – Suárez.....	79
Figura 4-4. Distribución coberturas vegetales para cada subcuenca.....	82
Figura 4-5. Valores de precipitación ponderada por áreas de isoyetas del año de inicio1993 en cada subcuenca. ....	88
Figura 4-6. Valores de evapotranspiración de referencia calculada para el año de inicio1993 en cada subcuenca. ....	89
Figura 4-7. Condiciones climáticas e hidrológicas para el periodo histórico de referencia que caracterizan variabilidad climática por fenómenos como ENSO, para la cuenca Ubaté Suárez. ....	90
Figura 4-8. Caudales medios mensuales del año 1993 para cada una de las estaciones medidoras de caudal seleccionadas en la cuenca Ubaté - Suárez.....	90
Figura 4-9. Número de habitantes en el casco urbano y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez. ....	93
Figura 4-10. Dotación neta urbana y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez. ....	94
Figura 4-11. Número de habitantes para el escenario de referencia en el casco urbano y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez.....	94
Figura 4-12. Módulos de riego con variación mensual para diferentes cultivos en las cuencas con distrito de riego administrado por la CAR. ....	95
Figura 4-13. Esquema con sitios de demanda en WEAP de la cuenca Ubaté - Suárez ..	96
Figura 4-14. Resultados calibración modelo hidrológico por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.....	98

Figura 4-15. Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2011 hasta el año 2040 en cada subcuenca. ....	105
Figura 4-16. Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2041 hasta el año 2070 en cada subcuenca. ....	106
Figura 4-17. Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2071 hasta el año 2100 en cada subcuenca. ....	108
Figura 4-18. Valores de temperatura futura para escenario A2, B2 y A1B del año de inicio 2011 hasta el año 2040 en cada subcuenca. ....	109
Figura 4-19. Valores de temperatura futura para escenario A2, B2 y A1B del año de inicio 2041 hasta el año 2070 en cada subcuenca. ....	110
Figura 4-20. Valores de temperatura futura para escenario A2 y B2 del año de inicio 2071 hasta el año 2100 en cada subcuenca. ....	111
Figura 4-21. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	112
Figura 4-22. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2011 a 2040, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	116
Figura 4-23. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A1B en el periodo 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	119
Figura 4-24. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	123
Figura 4-25. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	127
Figura 4-26. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A1B para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	131
Figura 4-27. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	136
Figura 4-28. Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	139
Figura 5-34. Ejemplo comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	146
Figura 5-1. Segmentación y balance hídrico del modelo QUAL 2kw. ....	152
Figura 5-2. Balance de Flujo QUAL 2Kw. ....	153
Figura 5-3. Modelo de Temperatura QUAL 2Kw. ....	154
Figura 5-4. Balance de masa QUAL 2Kw. ....	155

Figura 5-5. Caudales mensuales de los años de campañas de campo de calidad del agua, comparados con el año base y con los caudales medios mensuales multianuales. ....	159
Figura 5-6. Datos históricos de los determinantes calidad del agua sobre la corriente Ubaté y Suárez. ....	161
Figura 5-7. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	169
Figura 5-8. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	170
Figura 5-9. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	171
Figura 5-10. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	174
Figura 5-11. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	175
Figura 5-12. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	176
Figura 5-13. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	177
Figura 5-14. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	178
Figura 5-15. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	179
Figura 5-16. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	180
Figura 5-17. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	181
Figura 5-18. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	182
Figura 5-19. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	184



Figura 5-20. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	184
Figura 5-21. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	185
Figura 5-22. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	186
Figura 5-23. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	187
Figura 5-24. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	188
Figura 5-25. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	189
Figura 5-26. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	190
Figura 5-27. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	191
Figura 5-28. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	192
Figura 5-29. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	193
Figura 5-30. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	194
Figura 5-31. Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	195
Figura 5-32. Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	196
Figura 5-33. Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	197
Figura 5-34. Ejemplo comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de	

cambio climático A2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	200
Figura 4-29. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 4-30. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 4-31. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-34. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-35. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-36. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-37. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-38. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-39. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-40. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5-41. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

---

Figura 5-42. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.....**Error! Marcador no definido.**

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1: Cuencas de tercer orden de la cuenca de segundo orden, Ubaté – Suárez, de Cundinamarca.....	19
Tabla 2.2: Jerarquización de cauces, Ubaté – Suárez, de Cundinamarca.....	23
Tabla 2.3. Clasificación Cobertura Vegetal en la cuenca Ubaté Suárez.....	27
Tabla 2.4. Caudal de consumo por parte de usuarios en cada subcuenca por uso del agua de la cuenca Ubaté Suárez.....	31
Tabla 2.5. Nivel, superficie lámina de agua y volumen de almacenamiento de cuerpos lénticos de agua en la cuenca Ubaté – Suárez.....	33
Tabla 2.6. Estructuras principales de control en la cuenca Ubaté – Suárez.....	34
Tabla 2.7. Captaciones y vertimientos de las cabeceras municipales de la cuenca Ubaté – Suárez.....	36
Tabla 2.8. Módulos de consumo para distritos de riego para las cinco cuencas regadas en la cuenca Ubaté - Suárez.....	37
Tabla 2.9: Vertimientos de Cabeceras municipales de la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez.....	40
Tabla 2.10: Caudal de Aguas Residuales de vertimientos de industrias lácteas en la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez.....	43
Tabla 2.11: Tendencia de determinantes de calidad de la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez.....	45
Tabla 3.1. Dotación neta y nivel de complejidad para proyección de demanda de agua.....	60
Tabla 4.1. Comparación modelos hidrológicos que podrían emplearse para la modelación hidrológica.....	64
Tabla 4.2. Puntos de control para modelación de la cuenca Ubaté Suárez.....	73
Tabla 4.3. Cobertura Vegetal homologada para la Cuenca Ubaté - Suárez.....	80
Tabla 4.4. Cálculo de demanda de agua para población rural de la cuenca Ubaté Suárez por municipio.....	92
Tabla 4.5. Cálculo de demanda de agua para población urbana Comparada con la captación real de la cuenca Ubaté Suárez por municipio.....	92
Tabla 4.6. Parámetros de Calibración empleados en el Modelo Hidrológico WEAP.....	97
Tabla 5.1: Determinantes de calidad evaluados en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez, para vertimientos domésticos e industriales (industria láctea y minera).....	159
Tabla 5.2. Caracterización hidráulica y datos climatológicos tomados en campo para cada punto muestreado sobre el río principal Ubaté – Suárez, tomados en la campaña realizada en el año 2007.....	165

---

Tabla 5.3. Resultados análisis de laboratorio de calidad del agua del año 2007 para cada punto muestreado sobre el río principal Ubaté – Suárez. ....	166
Tabla 6.1: Estaciones Climatológicas en la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez .....	207
Tabla 6.2: Estaciones Hidrológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez, con sus respectivos análisis de datos faltantes, datos atípicos, aleatoriedad, homogeneidad y tendencia.....	210
Tabla 6.3: Ventana de tiempo de estaciones Climatológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez. ....	213
Tabla 6.4: Ventana de tiempo de estaciones Hidrológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez.....	220

## Introducción

El desarrollo de grandes ciudades y municipios, producen tanto beneficios económicos y sociales, como consecuencias desfavorables a nivel ambiental, destacándose el deterioro en la calidad del recurso hídrico de las fuentes receptoras de los vertimientos de aguas residuales. Como consecuencia se genera la reducción del uso potencial del agua, además de que puede afectar la salud pública, los ecosistemas y su paisaje.

La mayor parte de los ríos más importantes de Colombia reciben cargas contaminantes, y al efectuar una evaluación de las causas, se encuentran fuentes puntuales de vertimiento, del sector doméstico e industrial, de los cuales, el sector doméstico ha llegado a presentar el mayor aporte de carga orgánica, representada con determinantes como la DBO. Esto es producto de que usuarios no se encuentren conectados a la red de alcantarillado o de la inexistencia, la ineficiencia o del requerimiento de mayor capacidad de remoción de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. A esto se le suman industrias que no tratan las aguas residuales que vierten clandestinamente o sistemas de tratamiento de aguas residuales que son ineficientes (Blackman, A., 2005; IDEAM, 2010).

La problemática ambiental de la contaminación de los cuerpos de agua requiere esfuerzos continuos para su mitigación, minimización y en un futuro que se espera sea próximo, su restauración, compensación y prevención. Estos esfuerzos se empiezan a implementar oficialmente soportados por un marco legislativo que ha venido desarrollándose los últimos años en Colombia, como una necesidad de gestionar la calidad de las fuentes hídricas del país, y las posibles alternativas de tratamiento y disposición.

Por ello, es de gran importancia evaluar el desarrollo socioeconómico que puede llegar afectar la dinámica y calidad natural de una cuenca, teniendo en cuenta las características físicas y ecosistémicas de dicha unidad biogeográfica; entre estas, como

punto de partida se cuenta con la hidrología y la climatología, la cual junto con la topología, cobertura vegetal y suelo, y la interacción con aguas subterráneas, permite determinar rendimiento hídrico de la cuenca. A partir de este, se puede evaluar la capacidad de dilución de un cuerpo de agua frente a un vertimiento, que junto con el análisis de la hidrodinámica y de las reacciones químicas que se pueden dar en tramos de corrientes lólicas o en cuerpos de agua lénticos, se puede establecer si un cuerpo de agua tiene capacidad de autodepuración de un vertimiento de ciertas características.

Para realizar una evaluación de estas condiciones hidrológicas y de calidad del agua, se emplean los modelos, los cuales son herramientas útiles para orientar la toma de decisiones de inversión en infraestructura de mitigación de riesgo, de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Estos modelos permiten estimar posibles impactos de transformaciones, captaciones o vertimientos que se realizan sobre fuentes hídricas, permitiendo simular determinantes de la calidad del agua y el transporte de contaminantes de acuerdo a regímenes hidrológicos propios de la cuenca y a la variación que estos puedan tener bajo escenarios de Cambio Climático (Camacho et al., 2010). La utilidad y efectividad de estos modelos depende de la capacidad predictiva que puede alcanzarse luego de un proceso de calibración, posterior validación y proceso post-Auditoria (Dominguez, E., 2007).

La evaluación de la susceptibilidad de la respuesta hidrológica de las cuencas bajo escenarios de Cambio Climático se ha desarrollado en países desarrollados, donde la disponibilidad y calidad de información hidroclimática es suficiente y la aplicación de modelos matemáticos ha sido una herramienta muy efectiva en la formulación de escenarios hidrológicos para el cambio climático. En contraste, en Latinoamérica se cuenta con información escasa, que en muchos casos es de baja calidad, por lo cual la aplicación de modelos matemáticos pueden no ser efectivos o resultar excesivamente costosos (Domínguez, E., 2001). Por esto, se efectúa una revisión de los modelos hidrológicos disponibles y la selección se hace, bajo un criterio de planeación, que pueda dar lugar a escenarios de gestión.

Con el fin de aportar a esta labor, el proyecto de tesis contenido en el presente documento, desarrolla una evaluación de la Calidad del Agua del cauce principal de la cuenca Ubaté – Suárez bajo escenarios de Cambio Climático, permitiendo brindar una

perspectiva futura, la cual puede ser útil para desarrollar una gestión ambiental a través de instrumentos administrativos y gubernamentales como los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas, las cuales involucran mecanismos de comando y control como las metas de Calidad del Agua de los cuerpos de agua y los Planes de Cumplimiento de usuarios y administración de municipalidades.



## Justificación

Este proyecto se desarrolla para la cuenca Ubaté – Suárez porque esta cuenca presenta condiciones adversas debido al desarrollo socioeconómico de sus habitantes, y a las condiciones naturales que además pueden generar afectación en la cuenca, como el caso de la erosión, que junto con la minería, ayuda a la sedimentación de cuerpos de agua como la Laguna de Fúquene. Además, con los vertimientos de industrias como la industria láctea, se alteran parámetros de calidad del agua que reducen su potencial de uso como fuente de abastecimiento.

De igual forma, resulta interesante esta cuenca, ya que cuenta con cuerpos de agua lénticos como sus Lagunas, incluidos en programas de conservación de humedales y proyectos de investigación, los cuales deben sincronizarse con políticas de protección ambiental nacional e internacional, estas últimas a tener en cuenta gracias a los tratados de libre comercio (TLC) que Colombia ha firmado los últimos años.

Por otra parte, al incluir dinámicas socioeconómicas, cambiando las dinámicas de uso y cobertura del suelo por actividades industriales que se presentes en la cuenca (minería e industria láctea), se pueden inferir escenarios que en el futuro pueden ser forzantes importantes en el régimen hidrológico de las cuencas hidrográficas, lo cual puede reflejarse en resultados favorables o desfavorables en la concentración de determinantes de calidad del agua.

De esta forma, se puede generar una base para establecer programas de gestión efectivos para las cuencas hidrográficas.



# Objetivos

- **Objetivo General**

Evaluar la posible afectación de la Calidad del Agua del cauce principal de la cuenca Ubaté – Suárez bajo escenarios de Cambio Climático, teniendo en cuenta la incertidumbre inherente a los procesos simulados.

- **Objetivos Específicos**

- Desarrollar la modelación hidrológica de la cuenca Ubaté – Suarez que facilite la evaluación del impacto debido a escenarios de Cambio Climático.
- Evaluar el impacto de los escenarios de Cambio Climático en el caudal del cauce principal Ubaté – Suárez.
- Inferir el comportamiento de la Calidad del Agua en el río Ubaté – Suárez, a partir de posibles impactos de Cambio Climático.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

### 1.1.1 Concepto de Modelación

Los modelos son la forma de explicar la realidad. La forma como se reemplaza el objeto real de estudio define el tipo de modelación, el cual puede ser físico, matemático, lógico, análogo, etc. (Domínguez, E., 2013a)

El proceso de modelación matemática (Figura 1-1) de cualquier objeto cognitivo (proceso, fenómeno) consiste en un plan de trabajo preciso, el cual involucra los siguientes puntos (Domínguez, E., 2013):

A. Definir el objeto de la modelación:

Al definir el objeto de estudio, se puede definir el tipo de modelo más apropiado, con cuál precisión se requiere trabajar y la ventana de tiempo a emplear.

B. Formulación del modelo conceptual

Se formula de acuerdo a la disponibilidad de información existente, la factibilidad de realizar trabajo de campo. De igual forma, se determina la complejidad de los procesos a tener en cuenta y se comprende la percepción del usuario sobre el proceso objeto de modelación.

C. Selección del tipo de modelo

D. Selección del código a aplicar

En caso dado de que sea necesario desarrollarlos o ajustarlos a las necesidades de modelación. Para ello se debe realizar:

- a) Formulación numérica
- b) Codificación para el ordenador
- c) Verificación del código

## E. Parametrización del modelo

Se define a través de mediciones de campo existentes o adicionalmente programadas, o se establece a través de la solución del problema inverso.

## F. Validación del modelo

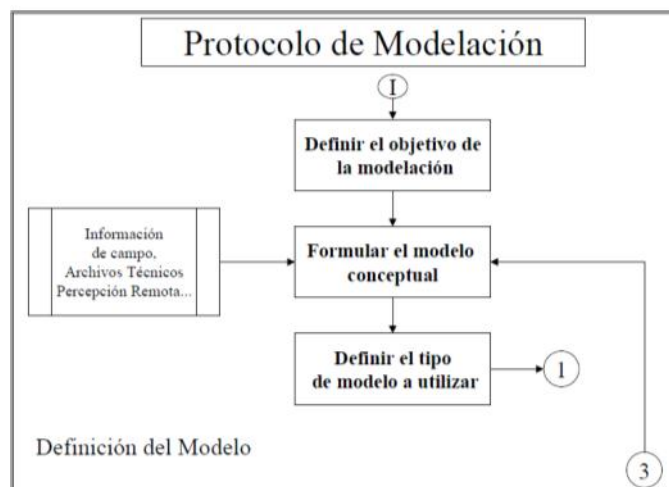
Con el fin de probar cual es el rango de bondad del modelo, este se parametriza con información existente, luego sin cambiar los parámetros encontrados, se prueba el modelo en un rango de datos no utilizados en la parametrización, calculando el error promedio del modelo. Si este error se encuentra dentro de los límites permisibles, se considera que el modelo esta validado; de lo contrario se efectúa nuevamente el proceso de parametrización. Existen criterios de validación entre los que se encuentran: criterio del Centro Hidrometeorológico Ruso ( $S/\sigma\Delta$ ), el criterio Bayesiano de Información (BIS) empleado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el criterio de eficiencia de Nash-Sucktliffe y el porcentaje de pronósticos acertados.

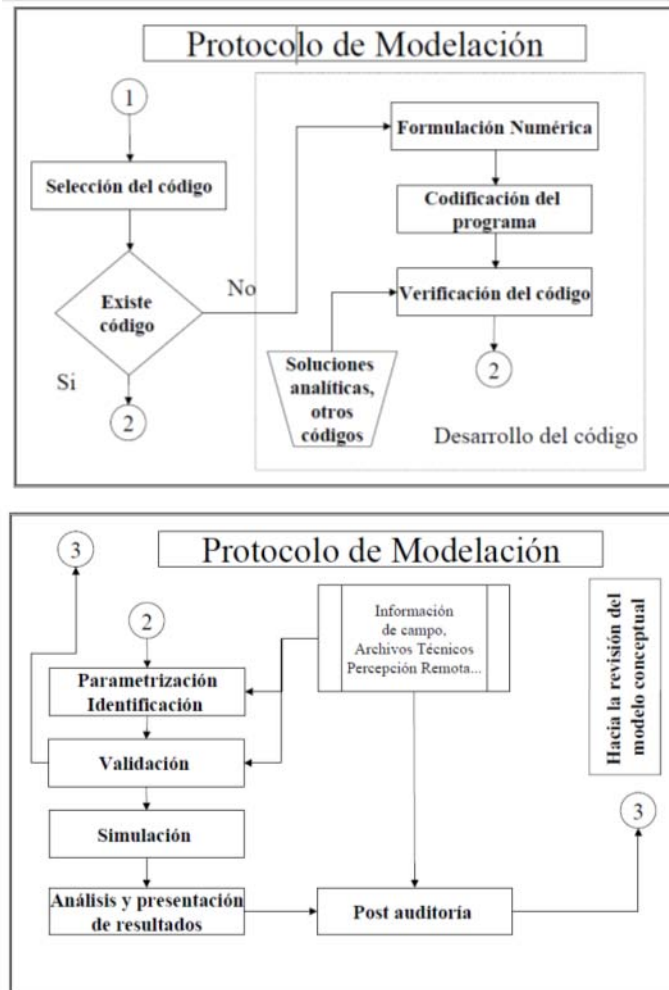
## G. Simulación

## H. Análisis y presentación de resultados

## I. Post-auditoria

**Figura 1-1:** Esquema de protocolo de modelación





Fuente: Domínguez, E., 2013.

Para entender de manera integral la respuesta hidrológica de la cuenca se pueden usar diferentes aproximaciones conceptuales, comúnmente conocidas como modelos hidrológicos. Estos están compuestos por dos partes principales: modelo conceptual y modelo computaciones.

El modelo conceptual se soporta en aproximaciones hidrológicas que describen las dinámicas a través de variables, propiedades y procesos relevantes que ayudan a explicar el sistema natural, que para el caso de modelos hidrológicos está representado por el ciclo hidrológico o partes de él.

El modelo computacional es la herramienta capaz de simular los procesos hidrológicos definidos en el modelo conceptual. Esta herramienta está compuesta por funciones o

representaciones de la realidad capaces de transformar las variables de entrada en variables de salida, usando parámetros que caracterizan propiedades relevantes del sistema natural o de los procesos asociados a éste.

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados de acuerdo a la descripción espacial de los procesos en simplificados y distribuidos, y de acuerdo a los procesos físicos que describe en empíricos, conceptuales o basados en la física.

Un modelo simplificado asume la cuenca como una unidad donde las variables y parámetros representan valores promedio de la cuenca. Un modelo distribuido es estructurado para describir la variación espacial de las propiedades de la cuenca usando una red de puntos llamada malla.

Un modelo empírico es definido como un modelo desarrollado sin la consideración explícita de procesos físicos. Típicamente estos modelos asumen una relación funcional entre valores de entrada y salida concurrentes en el tiempo a través de uso de inferencia estadística o conceptos de hidroinformática como redes neuronales. Un modelo basado en la física describe los procesos usando descripciones complejas basadas en representaciones matemáticas en donde todos los parámetros, en principio, tienen un significado físico (Pérez et al. 2011) Un modelo conceptual usualmente combina estructuras y ecuaciones de base física con relaciones empíricas.

Para construir modelos hidrológicos a escala de cuencas, usualmente se usan combinaciones de estos tipos de modelos. Una combinación muy común es modelos conceptuales simplificados, los cuales tratan de describir las dinámicas de flujo del ciclo hidrológico usando relaciones basadas en parámetros físicos de una manera simplificada. Este tipo de modelos normalmente están basados en esquemas de tanques donde la transferencia de agua de un tanque a otro puede estar basado en relaciones físicas, empíricas o semi-empíricas. Ejemplos de este tipo de modelos incluyen SWAT (Arnold et al. 1998) y HBV (Lindstrom et al. 1997). En la literatura se puede encontrar que normalmente los modelos conceptuales son simplificados sin embargo existen algunas excepciones como el reconocido modelo TOPMODEL (Beven et al. 1995) y mHM (Kumar



et al. 2010), los cuales se pueden definir como distribuido (o semi-distribuido) conceptual o también llamados distribuido basados en procesos.

### 1.1.2 Generalidades

En la actualidad no existe en la comunidad internacional un protocolo de modelación oficialmente aceptado por todos, sin embargo, existen aportes que divulgan su pertinencia. El objetivo del estudio y la información disponible son un aspecto importante para establecer la estructura matemática y selección del modelo. Luego, se resuelve el problema inverso (Domínguez, E., 2000), en donde se realiza la determinación del vector de parámetros óptimos y su validación, con su respectiva función objetivo y análisis de sensibilidad de las diferentes soluciones viables para el vector de parámetros óptimos. Finalmente, se resuelve el problema directo y se debe validar y verificar (Castillo, C., *et al.*, 2009).

Adicionalmente, la modelación hidrológica, implementada de una manera especial, puede ser una herramienta de control de calidad de los datos tomados de redes de observación hidrometeorológicas (Domínguez, E., 2000).

Por medio de información del área de estudio, y de datos de observación hidrometeorológica, la modelación hidrológica puede representar el estado actual de las corrientes modeladas. También, puede evaluar escenarios futuros, involucrando influencias antrópicas sobre el recurso (Domínguez, E., 2000).

Los modelos pueden clasificarse según el proceso, según la escala y según la técnica de solución. De acuerdo al proceso puede ser agregado o distribuido, determinístico, estocástico o la mezcla de estos últimos. De acuerdo a la escala, se cuenta con escala espacial o temporal; la escala temporal incluye modelos de eventos, continuos o para largos periodos de tiempo y si es un modelo a nivel diario, mensual o anual; la escala espacial define la homogeneidad del proceso hidrológico; así, en cuencas grandes, el almacenamiento en la red de drenaje o en el canal domina sobre la fase terrestre, y en pequeñas cuencas la fase terrestre domina sobre el flujo superficial, ya que son muy sensibles a eventos torrenciales. De acuerdo a la técnica de solución puede ser analítica o numérica (diferencias finitas o elementos finitos) (Logreira, A., 2008).

### 1.1.3 Balance Hídrico

Sin embargo, para realizar un análisis inicial, se plantea efectuar un balance hídrico base, a partir de registros históricos de estaciones climatológicas e hidrológicas. La ecuación que se emplea, se presenta a continuación:

$$\Delta S = S_{I-1} + \sum(P - E - Q - I) \quad (1-1)$$

Asumiendo que la Infiltración y el cambio en el almacenamiento es cero, se simplifica la expresión, para lo cual, se define el caudal por área de cuenca aferente, de acuerdo a la precipitación y evaporación interpolada a un pixel de 1 km. La ecuación que representa lo anterior es:

$$Q = \sum(P - E) \quad (1-2)$$

En la ecuación anterior las variables que son medidas directamente por estaciones climatológicas e hidrológicas son la precipitación y el caudal. Por ende, la variable a calcular es la evapotranspiración potencial o puede asumirse que es igual a la evaporación medida, aunque de esta forma, posiblemente se sobrestimaría. Para calcularla existen diversos métodos, de los cuales se destacan:

- **Método de Thornthwaite**

Para realizar el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), primero se calculan variables necesarias, como el índice de calor mensual (Márquez, A., 2013):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (1-3)$$

Donde, t es la temperatura media mensual (°C).

De igual forma, se calcula el índice de calor anual y la variable *a*:

$$I = \sum i \quad (1-4)$$

$$a = 675x10^{-9}I^3 - 771x10^{-7}I^2 + 1792x10^{-5}I + 0.49239 \quad (1-5)$$

Se emplean estas variables para calcular la ETP sin corregir, por medio de la siguiente ecuación:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a \quad (1-6)$$

Esta fórmula se corrige de acuerdo al número de días del mes y número de horas de sol:

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{d}{30} \right) \quad (1-7)$$

Dónde  $N$  es el número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud y  $n$  es el número de días del mes.

- **Método FAO Penman – Monteith**

La ecuación de Penman Monteith combina el balance energético con la transferencia de masa, para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua ( $ET_0$ ) a partir de datos climáticos estándar de horas de sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento. Este método fue ampliado al tener en cuenta factores de resistencia de acuerdo a superficies cultivadas; de esta forma se involucra la resistencia superficial, la cual es la resistencia al flujo de vapor a través de los estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo, y la resistencia aerodinámica, la cual es la que se da en la zona inmediatamente superior a la vegetación e incluye la fricción que sufre el aire al fluir sobre las superficies vegetativas (Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 2006).

Sin embargo, el panel de expertos organizados por la FAO en 1990, afinaron el método, definiendo un cultivo de referencia, con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial de  $70 \text{ s m}^{-1}$ , un albedo de 0.23, de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad 1-8$$

Donde,

$ET_0$ : evapotranspiración del cultivo de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$R_n$ : la radiación neta en la superficie de cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$R_a$ : la radiación extraterrestre ( $\text{mm d}^{-1}$ )

$G$ : el flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

T: temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$u_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )

$e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$ : presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ : déficit de presión de vapor (kPa)

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\gamma$ : constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

Las variables como  $r_a$ ,  $r_s$ ,  $\gamma$ ,  $e_s$ ,  $e_a$ ,  $\Delta$ ,  $R_n$  y  $G$  se definen a partir de constantes, la altura de medición sobre la superficie y de datos de temperatura máxima y mínima o en su defecto temperatura media (sometido a subestimación), humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol;. Variables como  $R_a$  se definen a partir de la localización del área de estudio.

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se pueden emplear programas como CROPWAT, el cual cuenta con rutinas y bases de datos para efectuar dichos cálculos de forma rápida.

Ahora, para incorporar las coberturas vegetales y el cambio del uso del suelo, se emplea un factor de cultivo  $K_c$  que permite transformar la  $ET_0$  en la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ )

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (1-9)$$

## 1.1.4 Modelación Hidrológica y Escenarios de Cambio Climático

### 1.1.4.1 Estado Del Arte

A lo largo de los años se han efectuado publicaciones de la influencia del cambio climático en aspectos del ciclo hidrológico (Candela, L., 2012).

La escogencia de modelos hidrológicos depende de los datos disponibles, los procesos que deben tenerse en cuenta y cómo procesos relevantes deben ser descritos (Candela,

L., 2012). De igual forma, se pueden llegar a evaluar aspectos como el cambio global para planeación futura en las cuencas hidrográficas. El cambio global es definido como los cambios relacionados con actividades antrópicas con impactos directos e indirectos de la cantidad del agua, influenciando el manejo sostenible de los recursos hídricos en cuencas hídricas superficiales. El cambio Global por lo tanto abarca el Cambio Climático, como una modificación de los patrones de precipitación, junto con el cambio en el uso de suelo, la expansión urbana y cambios en la demanda de agua tanto en humanos como en ecosistemas. Sin embargo, a pesar de que el enfoque del Cambio Global sería útil, implica involucrar otros procesos interconectados del sistema hidrológico, el manejo del agua, aspectos socioeconómicos y sus medidas de mitigación y adaptación, y en general la evolución de factor socioeconómicos que son parcialmente impredecibles (Pouget, L., 2012), las cuales salen del enfoque técnico que preliminarmente debe tomarse para evaluar impactos ambientales presentes y posibles con y sin gestión.

En este caso específico, se conocen estudios como los de Pouget *et al.* (2012), en el cual emplea metodologías como DPSIR, la cual incluye modelación bajo escenarios de análisis y definición de estrategias de adaptación, considerando interacción entre la sociedad y el ambiente, con cinco ejes interconectados secuencialmente formando un ciclo: forzantes (demanda del agua, cambio climático y uso del suelo), Presión (tasas de evaporación, extracción, escorrentía), Estado del agua - rendimientos (cantidad y calidad), Impactos (sociales, económicos y ambientales) y responsables (soluciones, costo - beneficio). Además, para el evaluar el cambio climático tomó dos enfoques: Escenarios empleados, A2, B1 y B2 de la IPCC para tres escenarios de tiempo 2027, 2050 y 2100, en los cuales la temperatura incrementa pero de la precipitación son irregulares; y modificación histórica de series en la subcuenca de acuerdo a cambio regional del clima y de usos del suelo. Para el cambio del suelo tuvo en cuenta el cambio de cobertura forestal, el desarrollo urbano y la recarga de acuíferos aguas arriba; el cambio del uso del suelo se evaluó por medio de la proyección de cobertura Eururalis, y por medio de estudios locales. La demanda del agua se evalúa basada en proyecciones demográficas y estudios regionales. Los análisis de costo – beneficio se expresan en términos monetarios. Para evaluar lo anterior, se incluyeron modelos como HBV para el modelo hidrológico; SIMGES para el modelo de manejo del agua; TRANSIN para el modelo de agua subterránea y GESCAL para el modelo de calidad del agua. De igual forma, en modelos de cambio climático que sólo evalúan recarga de acuíferos, se cuenta

con variables de importancia como los tiempos de residencia que están relacionados con la intensidad de la precipitación efectiva, el cual es variable de evento a evento y en un evento simple. Para estos estudios, como el desarrollado por Baruffi, F., *et al.*, (2012), se ha tenido en cuenta la parametrización física a partir el uso de la cobertura vegetal, la textura del suelo y la pendiente local para el balance de humedad en el suelo.

De igual forma, se destacan estudios como los de Stehr, A., *et al.*, en el cual se emplean Modelos de Circulación Atmosférica como MAGIC (Modelo acoplado de ciclo de gases, temperatura global media y nivel del mar global medio) y SCENGEN (Base de datos con patrones globales normalizados por cambio unitario en la temperatura promedio global) correspondiente a siete modelos climáticos globales, para simular seis escenarios (A1FI, A1T, A1B, A2, B2, B1) para una ventana de tiempo de 30 años, considerando cambios promedio de precipitación y temperatura mensual y anual, evaluando así el cambio climático; además, se evalúa la variabilidad climática empleando salidas del modelo global de gran escala HadCM3, y el modelo forzado en superficie HadAM3, de mayor resolución, el cual a su vez emplea simulaciones regionales PRECIS.

Stehr, A., *et al.*, emplea la salida de estos modelos climáticos en el modelo hidrológico SWAT, a partir de un DEM de 90 m., y con calibración automática PARASOL incursionada en SWAT2005 de datos mensuales de caudal, empleando tres indicadores estadísticos Nash – Sutcliffe (EF), PBIAS y  $R^2$ , estableciendo que responde mejor si EF y  $R^2$  se acercan a 1, PBIAS a 0 y si la representación gráfica ajusta caudales modelados a los observados. Finalmente los caudales obtenidos con modelos globales se encuentran en la envolvente de los caudales de la línea base, en contraste con el modelo regional de cambio climático (Downscaling dinámico) en el que los caudales se encuentran por debajo de la envolvente en los caudales de invierno y primavera.

Por su parte Candela L. (2012) efectuó modelación acoplada y evaluó la sensibilidad de estos con el cambio de coberturas, para una cuenca no instrumentada con corrientes efímeras. Empleó HEC-HMS 3.4 para simular un periodo de 25 años debido a la escasez de datos; a cambio se basó en el tipo de suelo, la tasa de infiltración, morfometría y en patrones de precipitación, observaciones *insitu*, literatura y parámetros adoptados de estudios previos o en paralelo del área de estudio. A nivel de cuenca, la generación de

caudal es sensible a cambios leves en precipitación y mucho más en casos de eventos extremos. La recarga fue computada con VisualBALAN 2.0, físicamente basada del balance en el suelo, contemplando procesos como infiltración (en función de las propiedades del suelo), evaporación, consumo de las plantas, percolación a capas bajas, precipitación e irrigación, y parámetros acuífero – suelo (profundidad, porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento) y parámetros de vegetación (altura, almacenamiento y coeficiente de interceptación). Los parámetros fueron obtenidos de la literatura. Las proyecciones obtenidas presentan alta variabilidad, cierto retraso y por ende un efecto de suavizado. El almacenamiento del acuífero responde más lento a las condiciones hidráulicas que los cuerpos de agua superficiales, por lo cual resulta difícil efectuar correlaciones cruzadas. La recarga de acuíferos resulta altamente dependiente de las condiciones de humedad del suelo y es altamente sensible a cambios estacionales (Candela, L., 2012). Para escenarios futuros de la cobertura y uso del suelo futuro fue representada por una proyección al 2030 (ETC/LUSI) extendida al 2050. Además, se efectuó downscaled model de ECHAM5 de las proyecciones de precipitación y temperatura para escenarios de cambio climático SRES A2 y B1; y se efectuó la modelación hidrológica a futuro para el periodo de 2025 a 2050 (Candela, L., 2012).

También, se han desarrollado estudios de estimación hidrológica de acuerdo a resultados de modelos globales de cambio climático, estimando curvas IDF, para registros diarios de 24 horas, empleando la función de distribución generalizada de valor extremo (GEV) y estimando los parámetros con la metodología de los L – momentos, tanto para la simulación de control, como para los escenarios de cambio climático. De esta forma, para los cambios futuros Acevedo, L. (2009) emplea tres indicadores, el error cuadrático medio, la distancia de Mahalanobis, y mapas porcentuales de cambio para cada periodo de retorno, y se realizan histogramas diarios de precipitación en los cuales se evidencian cambios en frecuencia y acumulación. Para evaluar los cambios en caudales, se emplearon las salidas de los modelos climáticos y se calcula y compara el balance hídrico histórico y el de cada uno de los escenarios.

Respecto al estudio de los efectos de escenarios de cambio climático en aguas subterráneas se cuenta con estudios como los de Baruffi, F., *et al.* (2012), quien emplea simulaciones de 2010 a 2100 y basado en downscaling con 3 periodos de referencia de

2070 a 2100 (periodo seco, húmedo y medio). La evaluación del peligro en los escenarios involucra exposición de factores (potencial de áreas expuestas) y susceptibilidad (características geofísicas o ecosistémicas). El downscaling dinámico fue desarrollado con COSMO – CLM limitado a un modelo de área, implementado a una resolución horizontal de aproximadamente 8 km y empleando los datos del modelo global CMCC como condiciones límite. El COSMO – CLM es un modelo atmosférico no hidrostático, sigue mejor la descripción orográfica y contraste con suelo – mar. Además, considera que los tiempos de residencia están relacionados con la intensidad de la precipitación efectiva. Este parámetro no es únicamente variable de evento a evento, sino también en un evento simple. La topografía de las cuencas de montaña estudiadas es más bien compleja y los procesos relacionados con nieve son importantes para caracterizar el balance hidrológico estacional., empleando un promedio de precipitación interpolado por la técnica de kriging basado de en tasas de lluvia de datos de estaciones; la acumulación de nieve y derretimiento es representada usando la versión de modelo distribuido UEB, mientras que el balance de agua suelo es formulado siguiendo una representación realista de dinámicas temporales de la humedad del suelo con una parametrización física basada la cual permite el uso de la cobertura vegetal, la textura del suelo y la pendiente local. Además, el régimen de esos ríos se ve afectado por actividades de manejo como reservorios artificiales y desviaciones apropiadas para el enfoque de manejo (Baruffi, F., *et al.*, 2012).

#### **1.1.4.2 Modelos Empleados en la Evaluación de Efectos del Cambio Climático en la Hidrología**

Entre los componentes que son tenidos en cuenta, para la modelación de escenarios, se destaca la cobertura y uso del suelo. Entre los modelos que representan mejor la influencia de la cobertura en la respuesta hidrológica se cuenta con los modelos distribuidos, los cuales tienen en cuenta la variabilidad espacial de las variables, físicamente basados. Entre los modelos que permiten evaluar influencia en cambio de uso del suelo y cobertura vegetal, se tienen HEC-HMS, LASCAM, MIKE-SHE, PRMS, SLURP, SWIM, WEAP, HSPF, SWAT, HSPF, WMS8, HIDROSIG, CREAMS, SWRRB, WASIM (Logreira, A., 2008).



A continuación se presenta una descripción de los modelos hidrológicos que podrían ser empleados para la modelación hidrológica de la cuenca Ubaté – Suárez, bajo escenarios de Cambio Climático.

- **HEC-HMS**

HEC-HMS (Hydrologic Engineer Center), fue desarrollado por el Centro de Investigación del U. S. Army Corps of Engineers (Chow V. et al., 1994). Éste simula procesos de precipitación – escorrentía en sistemas dendríticos de cuencas, incluyendo hidrología de inundación, o la escorrentía en cuencas pequeñas urbanas o naturales. Lo anterior se efectúa por medio de la separación de los componentes del ciclo hidrológico y por medio de la definición de límites del entorno (Scharffenberg & Fleming, 2010) del área de interés (U. S. Army Corps of Engineers web, 2011); los componentes a su vez, están representados por un conjunto de parámetros que especifican sus características particulares y las relaciones matemáticas que describen sus procesos físicos.

Es un modelo determinístico, es decir, se requiere el conocimiento de condiciones de frontera, condiciones iniciales y parámetros del modelo. Inicialmente fue concebido para eventos pero puede emplearse para modelación continua; es apto para escala regional o local y requiere información hidroclimatológica (Logreira, A., 2008).

Este modelo requiere la descripción física de la cuenca, donde los elementos de la cuencas son relacionado ente si, como son las subcuencas, corrientes, reservorios, sumideros, confluencias, estructuras, etc. El programa incluye varios elementos para simular las pérdidas por infiltración, como son el método del Número de Curva del SCS, Green Ampt, Smith Parlange, etc.; con cambiar estos parámetros se puede representar el cambio en cobertura de suelo. Para el cálculo de la humedad del suelo, el programa puede emplear el método de una capa de déficit constante para una simulación simple continua, o el método de las cinco capas para simulaciones más complejas. Para transformar el exceso de precipitación en escorrentía, incluye siete métodos, entre los que se destacan los métodos de hidrograma unitario de Clark, Snyder y SCS, entre otros. Para determinar las contribuciones de cada subcuenca al flujo base, el programa cuenta con cinco métodos diferentes para esta estimación, y para las simulaciones del flujo en la corriente, el programa cuenta con seis métodos (Logreira, A., 2008).

Entre las limitaciones del modelo se puede mencionar que una de estas es que los parámetros se asumen constantes a lo largo del tiempo (modelo estacionario). Además, calcula inicialmente la evapotranspiración y luego la infiltración, lo cual en la realidad son procesos que se desarrollan de forma simultánea (Logreira, A., 2008).

- **WEAP**

WEAP (Water Evaluation and Planning System), fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute, con el fin de Simular procesos como lluvia- escorrentía, flujo base, recarga subterránea. Este es un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. El modelo trabaja con el balance de masa a nivel mensual, el agua es despachada para cumplir con los requerimientos de consumo, sujeto a demandas prioritarias. Se puede escoger entre tres métodos de simulación para procesos como escorrentía, infiltración e irrigación, dependiendo del nivel de complejidad que se requiera. Se requiere información como el tiempo de simulación, fronteras espaciales de la simulación, etc., y como datos de entrada, precipitación, radiación solar, caudales, etc. (Logreira, A., 2008).

De igual manera, tiene capacidad para hacer análisis sectoriales, de conservación de agua, derechos de agua, operación de embalses, generación hidroeléctrica, rastreo de contaminantes, calidad de agua, valoración de vulnerabilidad y mantenimiento de los requerimientos de los ecosistemas, también cuenta con un módulo de análisis financiero que permite hacer comparaciones beneficio- costo de diferentes proyectos o alternativas. Permite considerar alternativas de desarrollo y valorar los efectos en las políticas, costos, hidrología, abastecimientos municipales e industriales y el clima (Logreira, A., 2008).

- **SWAT**

SWAT (Soil and Water Assessment Tool), fue desarrollado por el USDA Agricultural Service (ARS) con el objetivo de simular el proceso lluvia escorrentía, prácticas de cultivo, coberturas vegetales, producción de sedimentos, etc. El modelo subdivide la cuenca en áreas de propiedades similares como pueden ser características climáticas, hidrológicas, de erosión de nutrientes, agrícolas o urbanos (Logreira, A., 2008).

Es un modelo unidimensional, físicamente basado que puede ser aplicada a escala regional o local. Trabaja por unidades de respuesta hidrológica, las cuales son el cruce de los diferentes tipos de suelo y a cada una se le asigna un atributo diferencial. Este modelo está basado en el balance hídrico, y es dividido en dos fases, la terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas en la corriente de cada cuenca; y la segunda fase o módulo del agua que se especializa en el movimiento de esta a través de la red hídrica de la cuenca (Logreira, A., 2008).

Este modelo es aplicado ampliamente a nivel mundial, y se caracteriza por ser muy demandante en sus requerimientos de información de entrada, sin embargo, es útil para los requerimientos de largo plazo. Entre los datos que se requiere se tiene precipitación diaria, radiación solar, humedad relativa, temperatura, caudales, etc. La delimitación de la cuenca se efectúa por medio del DEM. (Logreira, A., 2008).



## 2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 UBICACIÓN

La cuenca de hidrográfica de los ríos Ubaté-Suárez está localizada en al norte del departamento de Cundinamarca y al suroccidente del departamento de Boyacá; esta cuenca hace parte de la gran Cuenca Suárez, que además de los departamentos citados se encuentra igualmente en el departamento de Santander (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Es una cuenca de segundo orden, tiene una extensión total de 3024.99 km<sup>2</sup> y tiene 11 cuencas de tercer orden que forman parte de la misma, las cuales se presentan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Cuencas de tercer orden de la cuenca de segundo orden, Ubaté – Suárez, de Cundinamarca

No. cuenca	Nombre de la Cuenca	Municipios
2401-01	Laguna de Suesca	Tausa, Sutatausa, Ubaté
2401-02	Río Alto Ubaté	Cucunubá, Sutatausa, Ubaté, Lenguazaque
2401-03	Río Suta	Lenguazaque, Guachetá, Suesca, Cucunubá
2401-04	Laguna de Cucunubá	Guachetá, Fúquene, Ráquira, San Miguel del Sema
2401-05	Río Lenguazaque	Lenguazaque, Guachetá, Suesca,



Sin embargo, el alcance del presente trabajo de grado involucra sólo el área de jurisdicción de la CAR, debido a que se tuvo acceso a dicha información gracias a que dicha entidad, lo cual excluye la cuenca 2401-11 Río Ráquira. De igual forma, no se incluye la cuenca 2401-01 Laguna de Suesca, debido a que esta no cuenca con conexión hidráulica con la red de drenaje de la cuenca Ubaté Suárez, y además tiene mayor influencia en la cuenca alta del río Bogotá, debido a que sirve como fuente de abastecimiento de esta.

## 2.2 DESCRIPCIÓN

La cuenca Ubaté – Suárez (Figura 2-1) tiene un área de 3024.99 km<sup>2</sup>. En áreas sobre los 3000 m.s.n.m., en esta cuenca se ha venido incrementando significativamente actividades agroindustriales, especialmente con explotaciones de papa y ganadería extensiva, afectando zonas que deberían estar protegidas. De esta forma, solo se han constituido y reconocido cinco área de protección: Páramo de Rabanal, Páramo de Telecom y Merchán, Reserva Forestal Protectora El Robledal, la zona de Reserva Guargua y el DMI de Juaitoque, cuya extensión total es de tan solo 5.953 ha, creándose en esta forma un conflicto de uso, cuya solución debe compatibilizar tanto la parte ambiental como la de subsistencia de los agricultores dedicados de hace mucho tiempo a estas explotaciones (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

El río Ubaté nace en el municipio de Carmen de Carupa, por la confluencia de los ríos Hato y La Playa y sus principales afluentes son los ríos Suta y Lenguaque y alcanza un área de drenaje de 751,52 km<sup>2</sup>, es el principal afluente de la laguna de Fúquene, eje de recolección de aguas en el valle (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006). La parte alta del río Ubaté cuenta con una pendiente media del 3.34%, con parámetros máximos de 8 al 10% y pendientes mínimas del 1% (Consorcio Cuencas, 2006).

La Laguna de Fúquene, que tiene un área superficial aproximada de 30 Km<sup>2</sup>. El área total de drenaje de la laguna es de 1013,45 Km<sup>2</sup>. La laguna drena solamente por el río Suárez, que fluye hacia el norte, con pendiente suave, hacia Garavito. Los tributarios tales como Susa, Simijaca y Chiquinquirá se unen al río Suárez en la margen izquierda

antes de alcanzar la estación de Garavito, alcanzando un área de 1837 km<sup>2</sup>. En los periodos de intensa pluviosidad ocurren inundaciones en la zona plana del río Ubaté, debido, principalmente, al lento drenaje en razón de la baja pendiente, con un valor promedio de 0,04% (Consortio Cuencas, 2006), y los niveles altos, tanto freático como los de las aguas de la laguna de Fúquene. Pequeños diques se han construido a lo largo del perímetro de la Laguna (canal perimetral) para proteger de las inundaciones las áreas bajas. Sin embargo, un área grande de terreno se inunda por el efecto de vasos comunicantes del agua de laguna, que mana desde el nivel freático superior. Las inundaciones se producen cuando los niveles de agua rebasan la cota 2.540 m.s.n.m. (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

La cuenca del Río Ubaté se extiende hasta a la desembocadura en la Laguna de Fúquene. Con caudal medio de 2,8 m<sup>3</sup>/s, regulado mediante el Embalse de El Hato y la operación de esclusas en el Río Ubaté, en la parte plana de la cuenca. A la altura del municipio de Saboya el Río Suárez presenta un caudal medio de 8 m<sup>3</sup>/s, con máximos de 12m<sup>3</sup>/s, en mayo y mínimos de 1m<sup>3</sup>/s en enero. El promedio de descarga anual se calcula de 3,9 m<sup>3</sup>/s, la estación Puente Colorado, localizada en el extremo inferior del Río Ubaté y 10.2 m<sup>3</sup>/s en la estación Garavito (ubicada al final de la cuenca) (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

El embalse del Hato y la Laguna de Fúquene son las fuentes hídricas para producción agrícola más grandes en el área. La influencia antrópica por la búsqueda de suelo productivo de tipo orgánico, ha motivado la destrucción de las coberturas en bosque hacia las partes altas de la cuenca, que con las prácticas inapropiadas para el desarrollo de cultivos limpios como la papa, al cabo del tiempo han constituido coberturas de tipo bajo con suelos degradados, que al acompañarse con la pendiente, han generado la favorabilidad de variables erosivas ante la presión constante por el uso del suelo (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

La parte final de la cuenca, desde la desembocadura del río Chiquinquirá en el río Suarez, hasta la salida de la cuenca, presenta pendientes bajas, con un valor medio de 0,45% (Consortio Cuencas, 2006).



En cuanto a las aguas subterráneas, el área de recarga se calcula en 651,5 km<sup>2</sup> y su oferta en 77,3 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/año.

### 2.2.1 Climatología

La caracterización y clasificación climática establecida para la cuenca Ubaté – Suárez, emplea datos de precipitación, temperatura, evaporación, humedad relativa, radiación y brillo solar) de las estaciones presentadas en el Anexo B.1.

Los datos tomados de estas estaciones son sometidos a análisis de homogeneidad, aleatoriedad, datos atípicos y datos faltantes.

Los resultados de dichos análisis se presentan en el Anexo A.1. De igual forma, se determina la ventana de tiempo para las estaciones hidrológicas y climatológicas del área de estudio, con el fin de descartar las estaciones que cuenten con pocos registros o registros no coincidentes con la mayoría de estaciones o con estaciones control (Anexo A.2.)

### 2.2.2 Hidrología

La cuenca del río Ubaté – Suárez presenta una red de drenaje altamente intervenida, debido a necesidades de riego, ocupación de sus cuerpos de agua lénticos o por eventos de inundación. Sin embargo, la red de drenaje se describe en la Tabla 2.2, y en la topología presentada en el Anexo B.2. Las estaciones hidrológicas se presentan en el Anexo B.1.

**Tabla 2.2:** Jerarquización de cauces, Ubaté – Suárez, de Cundinamarca

CUENCA DE SEGUNDO ORDEN	CUENCA DE TERCER ORDEN	CUENCA DE CUARTO ORDEN	CUENCA DE QUINTO ORDEN
Río Ubaté - Suárez	2401 – 01 Laguna de Suesca	Río El Triunfo	
	2401-02 Río Ubaté (Alto Ubaté)	Río Hato	Q. de los Hoyos
			Q. Suasuque
		Río La Playa	Q. El Mortiño
			Q. Chimbita
			Q. Canuelal
			Q. La Pinuela
		Q. Los Medios	

CUENCA DE SEGUNDO ORDEN	CUENCA DE TERCER ORDEN	CUENCA DE CUARTO ORDEN	CUENCA DE QUINTO ORDEN
			Q. El Raque
		Q. Chusca	
		Q. Ventamarilla	
		Q. Chintoque	
		Q. Suaga	Q. San Rafael
		Q. Lajas	
		Q. El Cantero	
		Q. Chacón	
		Q. Alisal	Q. Bocatoma
			Q. El Rincón
		Q. Suchinica	Q. Hatico o Eneas
			Q. El Pantano
			Q. Chegua
			Q. Charquirá
			Q. San Ignacio
			Q. Caseteja
			Q. Carriza
			Q. Honda
	2401 – 03 Río Suta	Río Agua Clara	Q. Dorotea
		Río Agua Sal	Q. Honda
			Q. Pajarito
			Q. Chaparra Orquiro
		Río Chirtoque	Q. El Cajón
			Q. Minas
			Q. El Volcán
			Q. El Chorrillo
		Q. Negra	
		Q. Campíos	
	2401 – 04 Laguna de Cucunubá	Q. Cucunubá	
		Laguna Palacio	
		Q. Palacio	
		Desagüe Media Luna	
		Q. Grande	
		Q. Carrizal	
		Q. Zanja Grande	
		Q. Esparthujal	
		Q. El Chorro	
		Q. Chuncesita	
		Q. La Toma	
	2401 – 05 Río Lenguazaque	Río Tibitá	Q. Nemoconcito
			Q. Arrollan
			Q. Jotoque
			Q. La Manga
			Q. Retamo
			Q. Pantanito
			Q. Farasia
			Q. Agua Fría
			Q. Amarilla
			Q. Carbonera
			Q. La Sierra
			Río Albarracín
			Q. Alisol
		Q. Ovejas	Q. El Caliche
		Q. Blanca	
		Q. La Charrera	

CUENCA DE SEGUNDO ORDEN	CUENCA DE TERCER ORDEN	CUENCA DE CUARTO ORDEN	CUENCA DE QUINTO ORDEN
		Q. Buita	Q. Arenosa
			Q. Las Lajas
		Q. Gachaneca	Q. Balconcitos
			Q. del Chital
			Q. de Mojica
	Q. Boquerón Chiquito		
	2401 – 06 Laguna de Fúquene (Bajo Ubaté)	Río Ubaté	Río Suta
			Río Lenguazaque
		Río Fúquene	Q. del Molino
			Q. Las Galianas
		Q. Tagua	
		Q. Monroy	
		Q. Miña	Q. Tolima
		Q. Honda	
	Q. Nutria		
	Q. Carrisal		
	2401 – 07 Río Susa	Q. Las Canoas	
		Q. La Bolsa	
		Q La Fragua	
		Q. La Chamba	
		Q. La Coquira	
		Q. Chatoca	
		Q. Quintston	
		Q. El Soche	
	Q. Puente Myanite		
	2401 – 08 Río Simijaca	Q. San Jacinto	
		Q. El Tablón	
		Q. El Salitre	
		Río San José	Q. Las Juntas
			Q. Las Calletanas
			Q. El Surrón
			Q. Las Cuevas
			Q. Pantano Largo
Q. Los Alisos			
Q. California			
Q La Fragua			
Q. El Curubo			
Q. El Pedregal			
2401 – 09 Río Chiquinquirá	Q. La Playa		
	Q. Quindion		
	Q. María Ramos	Q. Arcabuco	
	Q. El Palmar		
2401 – 10 Río Suárez (Alto Suárez)	Río Chiquinquirá		
	Río Madrón	Q. Pinuela	
		Q. de Sasa	
		Q. El Espino	
		Q. El Rosal	
		Q. Las Puertas	
	Q. Becerros		
	Río Simijaca	Q. Salitre	
	Río Susa		
	Canal Madre		
	Canal El Cacho		
Q. La Charrera			
Q. Peña de Méndez			
Q. Piedras			

CUENCA DE SEGUNDO ORDEN	CUENCA DE TERCER ORDEN	CUENCA DE CUARTO ORDEN	CUENCA DE QUINTO ORDEN	
		Q. Mirabuenos		
		Q. Puente Tierra		
		Q. La Calera		
		Q. Cascajal	Q. Ruda	
		Q. El Morisco		
	2401 – 11 Río Ráquira	Río Salado	Q. Salada	
		Río Candelaria	Q. Pedro Viejo	
			Q. Torongua	
			Q. El Muelle	
			Q. Los Moreno	
			Q. Guaracnita	
			Río Frita	
			Q. El Penco	
			Q. Gacheneca	
			Q. Los Buitres	
			Q. de Minas	
			Q. El Guarno	
			Q. El Bosque	
			Q. Chinguichangua	
		Río Sutamarchan	Q. La Providencia	
	Q. La Zambrana			
Q. La Reja				
Q. Cucharero	Q. Aranda			
Q. Los Arrayanes				
Q. La Calera				

### 2.2.3 Cobertura Vegetal y Usos del Suelo

La cuenca del río Ubaté – Suárez presenta al ser altamente intervenida presenta diversidad de usos del suelo, especialmente por agricultura y ganadería. Se destaca el cultivo de la papa en la cuenca alta del río Ubaté, el maíz en la cuenca del río Chiquinquirá, Simijaca y Susa, y el frijol en pequeña proporción en toda la cuenca (CAR, 2006).

Como segunda actividad económica se tiene la minería (explotación de carbón y en algunos casos, transformado en coke) ubicada sobre el cordón oriental de la cuenca, en los municipios Cucunubá, Lenguaque y Bajo Ubaté (CAR, 2006).

Además, la industria láctea involucra actividades como explotación lechera en las cuencas de Simijaca, Suta, Susa, Chiquinquirá, Alto Ubaté, Alto Suárez, Bajo Suárez y Lenguaque, y almacenamiento de leche y transformación en derivados lácteos en Simijaca y Ubaté (CAR, 2006).

La clasificación de cobertura vegetal suministrada por la CAR, se presenta en la y en el plano de Cobertura Vegetal de la Cuenca Ubate – Suárez del Anexo B.1.

En general, los principales cultivos son pastos, trigo, cebada, maíz y tomate (CONPES 3451, 2006).

**Tabla 2.3.** Clasificación Cobertura Vegetal en la cuenca Ubaté Suárez.

<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1.	TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS
1.1.	Zonas urbanizadas
1.1.1.	Tejido urbano continuo
1.1.2.	Tejido urbano discontinuo
2.	TERRITORIOS AGRICOLAS
2.1.	Cultivos anuales o transitorios
2.1.4.	Papa
2.1.5.	Maíz
2.1.6.	Arveja
2.1.7.	Habichuela
2.1.8.	Fríjol
2.1.10.	Trigo
2.1.11.	Avena
2.1.12.	Cebada
2.2.	Cultivos permanentes
2.2.2.	Aguacate
2.2.4.	Plátano y banano
2.2.8.	Frutales
2.2.9.	Cultivos confinados (Viveros, flores)
2.3.	Pastos
2.3.1.	Pastos tecnificados
2.3.2.	Pastos limpios
2.3.3.	Pastos arbolados
2.3.4.	Pastos enmalezados o enrastrados
2.3.5.	Mosaico de pastos
2.3.6.	Pastos en suelos erosionados
2.4.	Áreas agrícolas heterogéneas - Mosaicos
2.4.3.	Plátano y otros cultivos
2.4.4.	Frutales y otros cultivos
2.4.5.	Caña panelera, pastos y otros cultivos

<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
2.4.6.	Habichuela y otros cultivos
2.4.7.	Maíz, pastos y otros cultivos
2.4.9.	Arveja y otros cultivos
2.4.11.	Cebada, pastos y otros cultivos
2.4.14.	Mora y otros cultivos
2.4.16.	Papa y otros cultivos
2.5.	Mosaico de pastos y cultivos
2.5.3.	Pastos y cultivos de clima frío
2.6.	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
2.6.3.	Cultivos de clima frío, pasto y espacios natur.
2.6.4.	Cultivos de pastos con espacios naturales
2.6.5.	Mosaico agro-urbano
3.	<b>BOSQUES Y AREAS SEMI NATURALES</b>
3.1.	Bosques
3.1.1.	Bosque natural denso
3.1.2.	Bosque natural fragmentado
3.1.3.	Bosque de galería y/o ripario
3.1.4.	Bosque Plantado
3.1.5.	Bosque con predominio de guadua
3.1.6.	Bosque secundario
3.1.7.	Mosaico de Bosque plantado
3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.1.	Pastos naturales y sabanas herbáceas
3.2.2.	Pastos naturales, rastrojos y otros
3.2.3.	Vegetación de páramo y subpáramo
3.2.5.	Rastrojo y arbustales
3.2.6.	Rastrojos y pastos
3.2.7.	Rastrojo y tierras eriales
3.2.8.	Rastrojos y bosques
3.2.9.	Rastrojos y cultivos
3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.1.	Playas de río
3.3.2.	Afloramientos rocosos
3.3.3.	Tierras desnudas o degradadas
3.3.4.	Tierras erosionada con reforestaciones o vegetación natural dispersa
3.3.5.	Pajonales o rastrojos con afloramientos rocosos o en tierras eriales
4.	<b>AREAS HUMEDAS</b>
4.1.	Áreas húmedas continentales
4.1.1.	Zonas Pantanosas
5.	<b>SUPERFICIES DE AGUA</b>

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
5.1.	Aguas continentales
5.1.1.	Ríos (50 m)
5.1.2.	Lagunas, lagos y ciénagas
5.1.3.	Embalses y cuerpos de agua artificiales

## 2.3 DEMANDA HÍDRICA

### 2.3.1 Generalidades

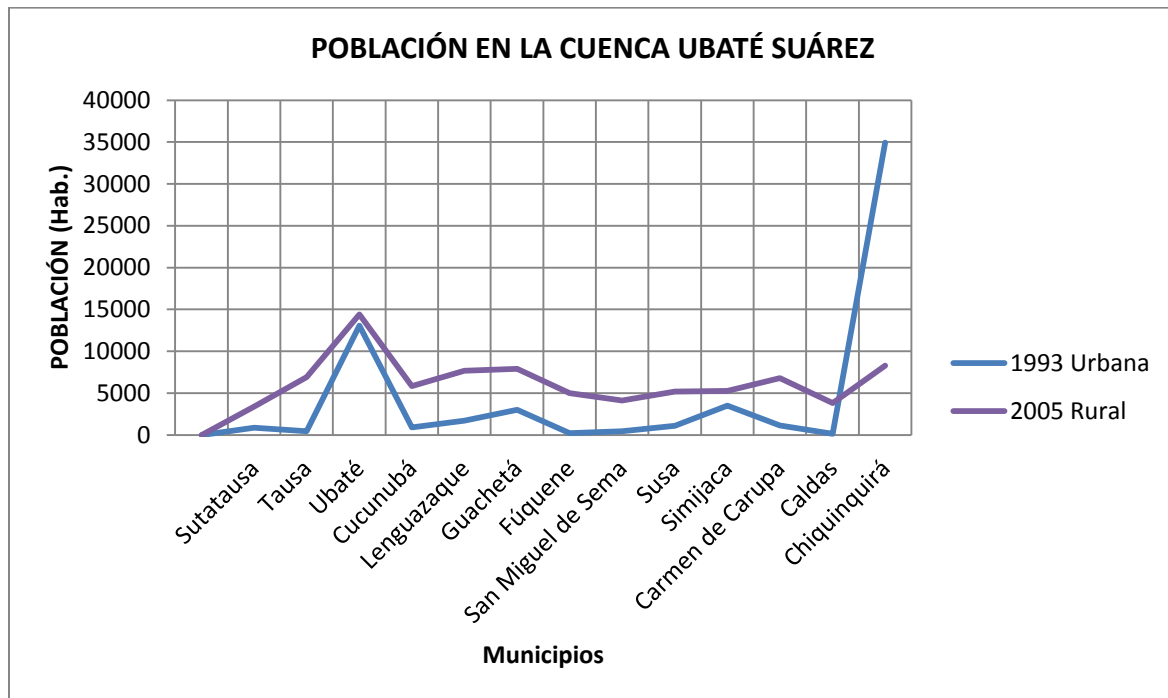
La demanda hídrica en la cuenca Ubaté Suárez principalmente es para áreas de irrigación y en menor proporción para uso municipal y ganadería. Las áreas de irrigación en su mayoría se encuentran en la parte plana del valle Ubaté – Suárez (CONPES 3451, 2006), con aproximadamente 6800 usuarios, 4500 metros lineales de canales secundarios y terciarios para riego y drenaje. Además cuenta con uso intensivo de la ganadería (CONPES 3451, 2006), con aproximadamente 290000 cabezas de ganado.

El sistema de canales además de abastecer zonas de cultivos, incluye el consumo de agua del ganado (CONPES 3451, 2006).

### 2.3.2 Demografía

Con el fin de establecer la demanda hídrica por parte de la población urbana y rural se toman los censos 1993 y 2005 (ver Figura 2-2), con el fin de establecer tasas de crecimiento que puedan emplearse tanto para la modelación base como para la modelación futura.

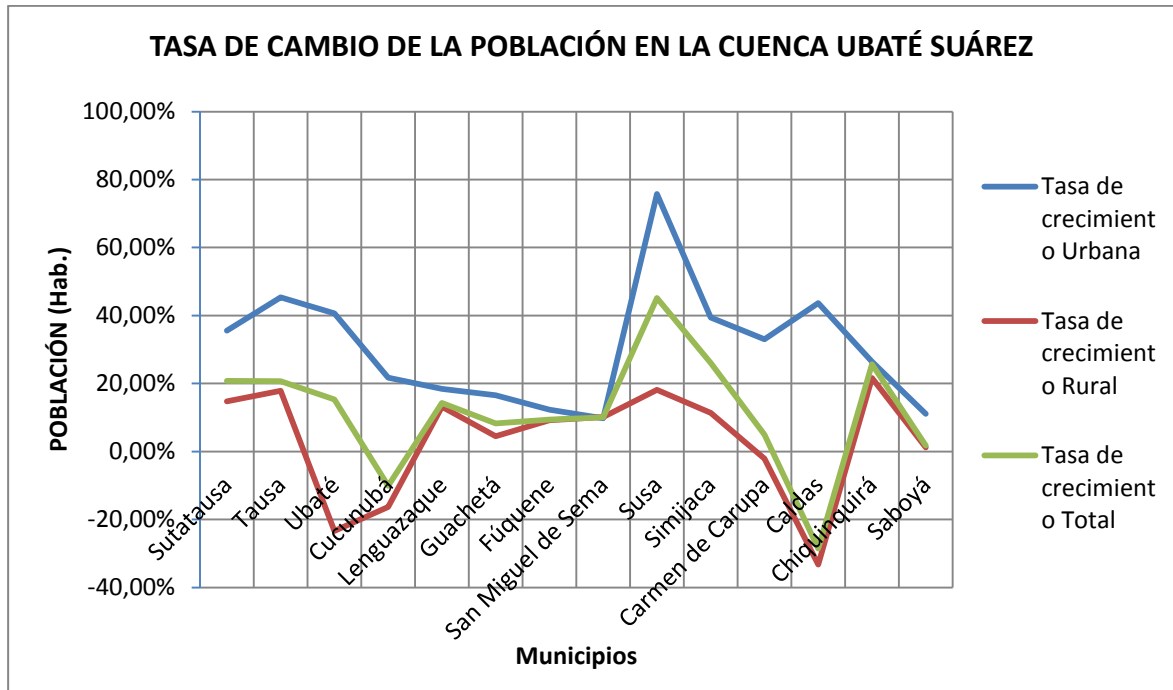
**Figura 2-2.** Censos población urbana y rural 1993 y 2005 de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté Suárez.



Por ello, se determina la tasa de cambio de la población (crecimiento o decrecimiento) urbana, rural y total, como se presenta en la Figura 2-3, donde se puede observar que en general todos los municipios presentan crecimiento en su población urbana, destacándose los municipios de Susa, seguido de Tausa y Caldas. Respecto a la población rural, en algunos casos decreció como en Ubaté, Cucunubá, Carmen de Carupa y Caldas, y en los demás la tendencia fue creciente especialmente en Susa, Chiquinquirá y Tausa. Y en general, la población tuvo una tendencia de crecimiento, a diferencia de Cucunubá y Caldas.

**Figura 2-3.** Tasa de cambio en la población urbana, rural y total en los municipios ubicados en la cuenca Ubaté Suárez entre 1993 y 2005.





### 2.3.3 Censo de Usos y Usuarios

Entre el año 2006 y 2010 se efectuó un levantamiento de usos y usuarios del recurso hídrico en la cuenca Ubaté – Suárez (ver plano en el Anexo B.1.) contratado por la CAR, el cual se hizo con el fin de actualizar caudales captados para usos del agua y vertimientos, de los cuales se estudiaron consumo de agua para uso pecuario, acuícola, doméstico y agrícola, como se presenta en la Tabla 2.4 (CAR, 2010).

A partir del censo se concluye que la mayor parte de consumo de agua se destina para uso agrícola; de igual forma se observa que comparando los consumos en las subcuencas, las que mayor demanda de agua presenta se destacan la subcuenca del río Suta, Lenguazaque y Suárez.

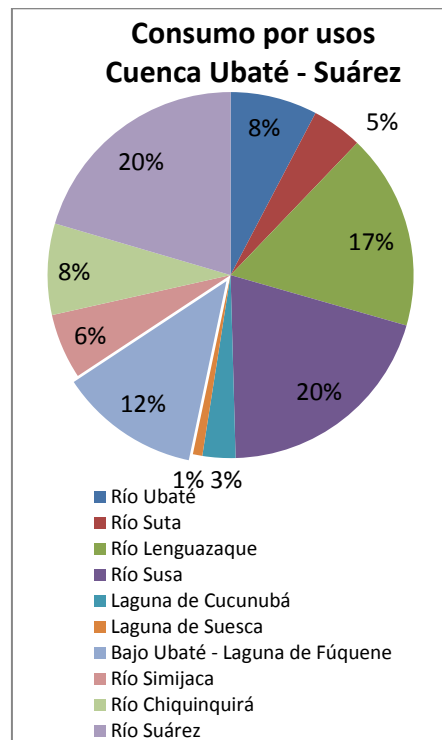
**Tabla 2.4.** Caudal de consumo por parte de usuarios en cada subcuenca por uso del agua de la cuenca Ubaté Suárez

CONSUMO (l/s)	PECUARIO	ACUÍCOLA	DOMÉSTICO	AGRÍCOLA
Río Ubaté	2.01	6.71	3.83	4862.36
Río Suta	2.29	0.65	1.76	2833.31

CONSUMO (l/s)	PECUARIO	ACUÍCOLA	DOMÉSTICO	AGRÍCOLA
Río Lenguazaque	4.24	1.10	5.28	10955.71
Río Susa	1.38	0.00	2.31	12757.13
Laguna de Cucunubá	1.50	0.00	0.61	1845.54
Laguna de Suesca	0.14	0.00	0.09	527.39
Bajo Ubaté - Laguna de Fúquene	6.57	0.99	7.65	7856.44
Río Simijaca	1.30	1.19	2.43	3661.82
Río Chiquinquirá	2.16	3.28	2.85	5105.80
Río Suárez	6.44	2.94	65.00	12898.06

Fuente: CAR, 2010

**Figura 2-4.** Distribución porcentual del consumo de agua de cada subcuenca de tercer orden de la cuenca Ubaté Suárez



### 2.3.4 Sistema de Abastecimiento

- **Descripción**

El sistema de abastecimiento de las áreas de riego es administrado y operado por la CAR como organismo ejecutor a través del sistema hidráulico conformado por el embalse del Hato (con capacidad de 13,2 Mm<sup>3</sup>), las lagunas de Palacio, Cucunubá y Fúquene y ríos principales como Ubaté, Suta, Lenguaque y Suárez, con tres estructuras principales de regulación (compuertas Cartagena, el Cubio y Tolón<sup>1</sup> presentadas en la Tabla 2.6) y con 147 estructuras de control en toda la red de riego (CONPES 3451, 2006).

**Tabla 2.5.** Nivel, superficie lámina de agua y volumen de almacenamiento de cuerpos lénticos de agua en la cuenca Ubaté – Suárez.

Sub-sistema	Nivel de agua	Superficie de la lámina de agua (km <sup>2</sup> )	Volumen de almacenamiento
	(m)		(Millones de m <sup>3</sup> )
Embalse del Hato	2847.29 m (máximo nivel de agua)	0.96	14.4
	2842.70 m (nivel de agua normal)	0.76	9.7
	2828.00 m (nivel de agua bajo)	0.33	2
Laguna de Palacio	2544	0.4	0.29
	2542.5	0	0
Laguna de Cucunubá	2544	2.5	6.8
	2539	0	0
Laguna de Fúquene	2540	32.6	82.5
	2532.5	0	0

Fuente: AETS (2007)


El embalse del Hato suministra irrigación para el área de Ubaté y para el casco urbano de Ubaté, y efectúa control de inundación para la laguna de Fúquene; La laguna de

<sup>1</sup> Hasta 1990 se contaba con la compuerta de Merchán, pero fue derribada por un creciente súbita.

Palacios<sup>2</sup> y la laguna de Cucunubá suministran irrigación para el área de Cucunubá; La laguna de Fúquene suministra irrigación para sus áreas circundantes y para las áreas ribereñas del río Suárez, y abastece el acueducto de la ciudad de Chiquinquirá. Las compuertas de Cartagena, con altura de 1.74 m, y las compuertas del Cubio, con altura de 2.53 m, efectúan el control de agua de las lagunas de Palacio y Cucunubá; las compuertas de Tolón, con altura de 2.52 m, efectúan el control de agua de la laguna de Fúquene (CAR, 2006).

La operación de estas estructuras influencia notoriamente la oferta y calidad hídrica a lo largo del cauce principal de la cuenca, ya que en casos en los que se requiere almacenar agua en la laguna por baja oferta, aguas abajo de las compuerta de Tolón, solo fluyen aguas residuales de municipios como Chiquinquirá y Saboyá, además de que se presenta reducción en la velocidad de flujo y estancamiento, lo cual favorece ambientes anóxicos y desarrollo de patógenos.

**Tabla 2.6.** Estructuras principales de control en la cuenca Ubaté – Suárez.

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
-	Compuerta Cartagena	Alta	

<sup>2</sup> Prácticamente extinta por depósitos de sedimentación (CAR, 2006).

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
20	Compuerta el Cubio	Media	
27	Compuerta Tolón	Baja	

Las obras (captaciones, canales, vertederos, compuertas, etc.) a los cuales se ha sometido la red hídrica de la cuenca entre 1960 y 1990 se ejecutaron con el objetivo principal de drenar áreas, debido a la saturación del suelo con el aumento del nivel freático en épocas invernales, lo que produce continuas inundaciones. Por lo tanto dichas obras no se efectuaron de forma planificada y como parte de un distrito de riego articulado, dando como resultado ineficiencia y falta de cobertura, generando excesivas pérdidas en la distribución del recurso hídrico (CONPES 3451, 2006).

Sin embargo, esta consecuencia, es producto de mala gestión en la cuenca desde la época de la colonia en el año de 1822, en la cual se inició un proceso de desecación de la laguna de Fúquene, para ocupación de tierras. Dicho proceso aún es promovido por la población del área, con la ocupación de la ronda hídrica, con fines de uso pecuario. De esta forma, se reduce la capacidad de amortiguamiento y almacenamiento y por ende de la calidad del agua de la laguna de Fúquene y de la cuenca baja (CONPES 3451, 2006).

Otro proceso que afecta la capacidad de almacenamiento y que altera la red de drenaje de la cuenca es la producción de sedimentos, por actividades agrícolas y mineras en zonas de páramo y subpáramo, en la cuenca alta (CONPES 3451, 2006).

- **Captaciones y fuentes de abastecimiento**

Las captaciones efectuadas a las fuentes de abastecimiento y los vertimientos de las cabeceras urbanas se presentan en la Tabla 2.7. Es importante identificar claramente dichas fuentes para evaluar la oferta hídrica disponible y la afectación de los caudales de retorno en cuanto a calidad y cantidad.

El servicio de acueducto en el sector urbano cuenta con una cobertura aproximada del 93%. En contraste en el sector rural se presentan serias dificultades, ya que existe baja cobertura, se cuenta con acueductos veredales por sectores o algunas familias se abastecen de nacimientos propios y/o tomas por medio de las cuales conducen agua a través de mangueras, sin sistemas de tratamiento (CAR, 2006).

**Tabla 2.7.** Captaciones y vertimientos de las cabeceras municipales de la cuenca Ubaté – Suárez.

SUBCUENCA	MUNICIPIO	CAPTACIÓN (BOCATMA)	CAUDAL CAPTADO (l/s)	VERTIMIENTO	CAUDAL RESIDUAL VERTIDO (l/s)
Suesca	Suesca	Río Bogotá	11	Río Bogotá	18
Alto Ubaté	Ubaté	Río Ubaté (sector El Guacal)	48	Río Susa	35
	Carmen de Carupa	Río La Playa (Q. Mortiño)	5	Q. Suchinica	1.2
Río Susa	Tausa	Q. El Chapetón (R. Agua Sal)	1.2	Río Aguasal	1.6
	Sutatausa	Río Agua Clara (R. Agua Sal)		Q. Honda	
Laguna de Cucunubá	Cucunubá	Q. La Chorrera (Q. Grande)	4	Q. San Isidro	5.5
Río Lenguazaque	Lenguazaque	Río Tibita	50	Río Lenguazaque	7.5
Río bajo Ubaté - Fúquene	Fúquene	Nacadero Pozo profundo	3	Río Fúquene	
	Guachetá	Q. Honda (vereda Peñas)	30	Q. Santander	
Río Susa	Susa	Río San José	4	Río Susa	1.92

SUBCUENCA	MUNICIPIO	CAPTACIÓN (BOCATMA)	CAUDAL CAPTADO (l/s)	VERTIMIENTO	CAUDAL RESIDUAL VERTIDO (l/s)
Río Simijaca	Simijaca	Río Simijaca	20	Río Simijaca	15
Río Chiquinquirá	Chiquinquirá	Río Suárez	100	Aguas Abajo Río Suárez	5
	Caldas	Q. Los Robles (R. Chiquinquirá)		Q. La Playa	
Río Alto Suárez	Saboyá	Q. Cantoca	7	Q. La Ruda	
Río Ráquira	Ráquira	Río Dulce (sector la Chorrera)	6	Aguas Abajo Río Ráquira	
	San Miguel de Sema	Q. La Cortadera		Q. Santa Ana y Cortadera	

Fuente: CAR, 2006

La demanda agrícola, por su parte, se centra en cinco cuencas: La Laguna de Fúquene, el río Susa, el río Simijaca, el río Chiquinquirá y el río Suárez, las cuales de acuerdo al POMCA publicado por la CAR (2006) cuentan con los siguientes módulos de consumo.

**Tabla 2.8.** Módulos de consumo para distritos de riego para las cinco cuencas regadas en la cuenca Ubaté - Suárez

MÓDULOS DE CONSUMO (lt/s ha)												
SUBCUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Laguna de Fúquene												
Pastos	1.49	1	0.75		0.23	0.37	0.95	1.02	0.58			0.98
Maíz	1.31				0.23	0.37	0.79					0.98
Papa	0.41				0.23	0.22						0.82
Trigo y cebada	0.95					0.22	0.46					0.82
Río Susa												
Pastos	1.4	1	0.1			0.3	1	0.8	0.4			0.8
Maíz	1.3					0.3	0.8					0.8
Papa	0.4					0.2						0.6
Trigo y cebada	0.9					0.2	0.5					
Río Simijaca												
Pastos	1.5	1.1	0.2			0.4	1.1	0.9	0.5			0.8
Maíz	1.3					0.4	0.9					0.8
Papa	0.4					0.3	0.1					0.7

MÓDULOS DE CONSUMO (lt/s ha)												
SUBCUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Trigo y cebada	1					0.3	0.6					0.7
Río Chiquinquirá												
Pastos	1.1	0.9	0.2			0.2	0.8	0.8	0.3			0.7
Maíz	0.9					0.2	0.6					0.7
Papa	0.1					0.1						0.5
Trigo y cebada	0.6					0.1	0.3					0.5
Río Suárez												
Pastos	1.2	0.9	0.2			0.2	0.8	0.8	0.2			0.6
Maíz	1					0.2	0.6					0.6
Papa												
Trigo y cebada												

Fuente: CAR, 2006

## 2.4 SANEAMIENTO – RECURSO HÍDRICO

### 2.4.1 Antecedentes

La cuenca abarca desde el páramo hasta el bosque alto andino, predominando este último. Precisamente por esta condición benéfica del clima aunada al tipo de relieve que comprende la parte baja y una potencialidad de suelo para la agricultura y la ganadería de tipo medio, facilitó ocupación de la zona incluso desde tiempos de la colonia, lo cual implica más de 400 años de intervención continua. La presión sobre los recursos naturales se ha incrementado proporcionalmente al tamaño de la población (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

La Laguna de Fúquene fue objetivo de desecación para incrementar la disponibilidad de tierra firme, rica en nutrientes para la producción agropecuaria. Esta situación se constituyó desde entonces en un fuerte factor de presión y riesgo ambiental para la disponibilidad de los recursos hídricos de la cuenca, en términos de calidad y cantidad (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Sin embargo, con el paso del tiempo, el crecimiento de las poblaciones tanto al interior de la cuenca como de los sitios a los cuales abastecía incrementó la presión sobre los



recursos en particular sobre el suelo, como soporte de la vida humana, de las comunidades faunísticas y florísticas, y sobre la forma de aprovechamiento productivo. Esta presión se hace más evidente durante la llamada “revolución verde”, época durante la cual el uso de agroquímicos y pesticidas surge como la solución a los problemas de plagas, y como una forma de garantizar el enriquecimiento de nutrientes necesarios para los cultivos, prometiendo mejores rendimientos y productividad a lo largo del año (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Así mismo, los procesos migratorios derivados de la violencia y la proximidad de la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez a la capital de la República, generaron más expectativa a la hora de ocupar el territorio. Las grandes haciendas que durante la colonia equivalían a más de 50.000 ha, fueron fraccionándose hasta ciertos tamaños que ofrecían relativa sustentabilidad y que en la actualidad se constituyen en importantes hatos lecheros. Pero estos fraccionamientos al ser insuficientes generaron presión, sobre zonas que tradicionalmente se consideraban de gran fragilidad y baja productividad (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

De esta forma, la concentración de la población en la zona alta de la cuenca, empieza a incursionar en la zona de páramo, ocasionando sustitución de la vegetación nativa por cultivos, que posteriormente son reemplazados por ganadería incipiente, convirtiéndose en sistemas netamente de pancoger, que escasamente aseguran la sustentabilidad de una unidad familiar (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Los vertimientos de aguas residuales industriales se originan por los dos principales actividades económicas de la cuenca: la primera en el costado occidental, sentido sur a norte, predominantemente de producción lechera y procesos de transformación de la misma, y la segunda, el cordón oriental marcado por la extracción de carbón y coquización principalmente (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

## **2.4.2 Vertimientos Domésticos**

Las aguas residuales de origen doméstico, son vertidas directamente sobre las fuentes hídricas superficiales, o sobre vallados cercanos, solo cuatro de los quince municipios que hacen parte de la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez, cuentan con tratamiento

primario de aguas residuales (PTAR), las fuentes receptoras de las aguas residuales municipales se presentan en la Tabla 2.9 (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Sin embargo, de las plantas las tratamiento de agua residual existentes no tratan la totalidad de las aguas residuales correspondientes al caudal de diseño, y presentan bajas eficiencias en la remoción debido al aporte de aguas residuales sin pretratamiento vertidas por la industria láctea (CONPES 3451, 2006).

La cobertura del servicio de alcantarillado en los centros urbano es de aproximadamente del 70%, aunque sigue siendo un sistema combinado de aguas lluvias. En contraste la cobertura de alcantarillado en la zona rural es baja; la población en algunos casos emplea pozos sépticos, y para la disposición de aguas servidas (aguas residuales de cocina y lavaderos de ropa), se vierten a las zanjas, a travesando cultivos o potreros (CAR, 2006).

Al evaluar el impacto ambiental por dichos vertimientos en cada subcuenca en el documento CONPES 3451, se concluye que:

- El vertimiento efectuado por el municipio de Tausa, en la quebrada Aguasal, la cual es afluente del río Suta, es autodepurado.
- El vertimiento del municipio de Sutatausa se efectúa sobre el río Suta y genera impactos en el detrimento de la calidad del agua de dicho río.
- En la cuenca alta del río Ubaté se vierten aguas residuales del municipio de Carmen de Carupa al río Ubaté; sin embargo, representa mayor impacto en la calidad del agua, vertimientos difusos del sector agropecuario.
- En la cuenca baja del río Ubaté se vierten aguas residuales del municipio de Ubaté y se evidencia detrimento en la calidad del agua.

**Tabla 2.9:** Vertimientos de Cabeceras municipales de la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez

SUBCUENCA	MUNICIPIO	VERTIMIENTOS	CAUDAL RESIDUAL (l/s)	PTAR
Suesca	Suesca	Río Bogotá	18	
Alto Ubaté	Ubaté	Río Suta	35	X

SUBCUENCA	MUNICIPIO	VERTIMIENTOS	CAUDAL RESIDUAL (l/s)	PTAR
	Carmen de Carupa	Quebrada de Suchinica	1,2	
Río Suta	Tausa	Río Aguasal	1,6	
	Sutatausa	Q. Honda		
Laguna de Cucunubá	Cucunubá	Q. San Isidro	5,5	
Río Lenguazaque	Lenguazaque	Río Lenguazaque	7,5	X
Río bajo Ubaté - Fúquene	Fúquene	Río Fúquene		
	Guachetá	Q. Santander		
Río Susa	Susa	Río Susa	1,92	
Río Simijaca	Simijaca	Río Simijaca	15	
Río Chiquinquirá	Chiquinquirá	Aguas abajo Río Suárez		
	Caldas	Q. la Playa		
Río Alto Suárez	Saboya	Q. La Ruda	5	X
Río Ráquira	Ráquira	Aguas abajo Río Ráquira		
	San Miguel de Sema	Q. santa Ana y Cortadera		X

Fuente: Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA -CONPES 3451, 2006.

Entre los vertimientos no puntuales se tienen la escorrentía de suelos cultivados y de ganadería, y aguas residuales y sedimentos de vivienda dispersa en suelo rural (CONPES 3451, 2006).

La laguna de Fúquene es receptor natural de dichos vertimientos. Entre estos, determinantes como nitrógeno total y fósforo total sobrepasan el criterio ordinario de eutrofización de las lagunas, lo cual se evidencia en el crecimiento denso de plantas acuáticas que emiten ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y contribuyen a la disminución de oxígeno disuelto en el agua. De las aproximadamente 3000 ha. de la superficie de la laguna de Fúquene, 2500 ha se encuentran invadidas por Elodea Brasileira, Buchón, y plantas acuáticas no consideradas como malezas como Junco (*Scirpus Californicus*) y Catleya (*Typha angutifolia*) (CONPES 3451, 2006).

Esto hace que el ecosistema de la laguna de Fúquene sea frágil, ya que acumula grandes concentraciones de nutrientes y permite la proliferación de malezas, que junto con vertimientos de aguas residuales e industriales, y la operación de compuertas

favorece la presencia de microorganismo patógenos y la generación de ambientes anóxicos en la cuenca baja (CONPES 3451, 2006).

### **2.4.3 Vertimientos Industriales**

Las industrias pertenecientes a la zona de estudio, corresponden a los procesos productivos lácteos y mineros, estos procesos se asientan en las siguientes subcuencas:

- Río Simijaca
- Río Suta
- Río Alto Ubaté
- Río Susa
- Alto Suárez
- Río Lenguazaque

- **Industria Láctea**

El agua residual en las industrias lácteas es producida por las actividades de mantenimiento, como el lavado de carrotanques, silos, líneas de conducción equipos de pasteurización, recipientes de acero inoxidable: tinas, cantinas, canastas, así como el aseo general de las plantas. Toda el agua residual es conducida a trampa grasas y a otros mecanismos de tratamiento convencionales, posteriormente el efluente residual pasa por diferentes líneas de conducción hasta ser descargado en el alcantarillado municipal o a quebradas y ríos. El tratamiento usual de las grasas, consiste en colocarlas en lechos de secado, donde se les adiciona cal, para luego utilizarlas como abono. El agua residual proveniente de los procesos lácteos, tienen altos contenidos de DBO, DQO, Grasas y aceites, Sólidos Suspendidos, con un pH bajo por lo que tienden a ser ácidas, y en algunos casos presentan contenidos considerables de coliformes totales y fecales. El caudal no puede ser dispuesto directamente en fuentes superficiales o en alcantarillado municipal (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

Alrededor de las 50 empresas de lácteos ubicadas en Ubaté, Chiquinquirá y Simijaca, 41 vierten el alcantarillado y 9 a los ríos (CONPES 3451, 2006).

Para la reducción de este impacto sobre las fuentes superficiales, se debe instalar en cada una de las empresas un sistema de tratamiento capaz de hacer una remoción aceptable según se indica en el artículo 72 del Decreto 1594 de 1984 para normas de vertimiento (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

**Tabla 2.10:** Caudal de Aguas Residuales de vertimientos de industrias lácteas en la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez

CUENCA	MUNICIPIO	INDUSTRIA	m3/día	TRATAMIENTO	VERTIMIENTO	DISPOSICIÓN GRASAS
Simijaca	Simijaca	Alpina	35	Trampa grasas	Alcantarillado municipal	Grasa enterrada
	Simijaca	Delay	9	No	Alcantarillado municipal	
	Simijaca	Incolacteos Ltda	110	Laguna de oxidación	Campo de infiltración	
	Simijaca	Lácteos Ledsim	1.7	No	Alcantarillado municipal	
	Simijaca	Picos de Sicuara	500	Trampa grasas, campo de infiltración, floculación	Riego	Abono en fincas
	Simijaca	Pasteurizadora Santo Domingo	60	Trampa grasas	Alcantarillado municipal	
Chiquinquirá	Chiquinquirá	Lácteos Tirzo	30	Trampa grasas, sistema de filtración, tanque de almacenamiento	Campo de infiltración	Grasa quemada
	Vereda Córdoba	Lácteos Caseleta		Trampa grasa canal	Campo de infiltración	Grasa en potrero
Lenguazaque	Ubaté - Lenguazaque	Doña Leche	30	Trampa grasas	Alcantarillado Ubaté	Grasa enterrada
	Ubaté - Lenguazaque	Parmalat Ubaté	17	Trampa grasas	Alcantarillado Ubaté	

CUENCA	MUNICIPIO	INDUSTRIA	m3/día	TRATAMIENTO	VERTIMIENTO	DISPOSICIÓN GRASAS
Fúquene	Fúquene - Capellanía	Industria Lácteo Colfrance		Laguna, floculación	Río Ubaté	
	Fúquene - Capellanía	Lácteos Santa Ana	2.5	No	Alcantarillado municipal	
	San Miguel de Sema	Parmalat San Miguel	0.3	Trampa grasas	Alcantarillado municipal	Enterrado
Río Alto Suárez	Ubaté - Chiquinquirá - Fúquene	Lácteos de la Sabana Alquería	5	Floculador, trampa grasas, desinfección		
Río Alto Suárez	Chiquinquirá - Saboyá	El Diamante		Tanque subterráneo (36 m <sup>3</sup> )		

Fuente: CAR (2006)

- **Industria minera**

Las empresas mineras están concentradas en las subcuencas de:

- Laguna de Cucunubá
- Río Suta
- Río Bajo Ubaté-Fúquene
- Río Lenguazaque
- Río Ráquira

El agua para uso industrial se extrae de pozos profundos y acueductos veredales, la mayoría carecen de procesos de tratamiento de aguas provenientes de los procesos, antes de verterlas a las quebradas (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006).

En la cuenca se hace minería relacionada con explotación de mantos de carbón, arena y piedra, en 509 minas ubicadas en Cucunubá, Lenguazaque, Gachetá, Tausa, Sutatausa y Ráquira (CONPES 3451, 2006).

El agua residual proveniente de la industria minera contiene en su mayoría altos porcentajes de sólidos suspendidos y sólidos disueltos los cuales aportan a las fuentes receptoras un aspecto de color fuerte aportando un fuerte impacto de contaminación hídrica en las fuentes que se encuentran en la cuenca. Las minas de carbón que se encuentran dentro de la cuenca no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales (Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA., 2006). Entre los parámetros que podrían presentar mayores valores por vertimientos de minería de carbón, se tienen la Conductividad, Níquel, Cadmio, Cobre, Hierro, Magnesio, Manganeso, Plomo, Sulfuros y Zinc.

## 2.5 CALIDAD DEL AGUA

En general, la cuenca Ubaté – Suárez presenta concentraciones considerables materia orgánica y nutrientes; especialmente para la remoción de las concentraciones de fósforo, nitrógeno y azufre se requiere tratamiento especializado o restricción de uso.

Por su parte, las concentraciones de oxígeno disuelto en algunos tramos presentan valores inferiores a 3 mg/L, donde las concentraciones de patógenos superan los 107 NMP/100 mL, como es el caso del Río Suta y la Quebrada Ruda (Aguas abajo). En la Tabla 2.11 se describe el comportamiento general de los determinantes de la calidad del agua, de acuerdo al estudio realizado por el Consorcio Cuencas, en el año 2006.

**Tabla 2.11:** Tendencia de determinantes de calidad de la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez

PARÁMETRO	TENDENCIA
pH	Los valores de pH oscilan entre 3,5 y 8,6. Los valores medios están entre 6 y 6,5.
Temperatura	La temperatura incrementa con la disminución natural de la altitud, oscilando entre 13 y 21 °C
Conductividad	Se presentan valores altos, especialmente aguas abajo del Río Suta con 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , aguas abajo del río Chiquinquirá con 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y aguas abajo de la quebrada Ruda con 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos cuerpos de agua aportan conductividad a la cuenca, además del embalse del Hato.

PARÁMETRO	TENDENCIA
Sólidos Suspendidos	Presenta concentraciones promedio de 25 mg/L con concentraciones máximas de 80 mg/L, destacándose el punto Puente Barcelona después de la descarga del Embalse del Hato y la descarga de la Quebrada Puente Tierra.
Sólidos Disueltos	Presenta concentraciones levemente altas, especialmente después de la descarga del embalse del Hato y el río Suta, donde se alcanzan concentraciones de 230 mg/L.
Oxígeno Disuelto	Se presentan concentraciones bajas. Sólo en el tramo inicial de la cuenca se alcanza 8 mg/L; en promedio se presentan valores de 4 mg/L. Los ríos que hacen que el OD descienda son el río Susa, Suta y Chiquinquirá. Los valores ascienden un poco, por encima de los 6 mg/L gracias a la laguna de Fúquene, en puente San Miguel y en la estación esclusa Tolón.
Coliformes Totales y E. Coli	<p>La concentración de coliformes totales supera los 106 NMP/100 mL y llega a concentraciones de 107 NMP/100 mL aguas abajo del río Suta y de la quebrada Ruda.</p> <p>La concentración de <i>E. Coli</i> aumenta después de la descarga del embalse del Hato y el río Suta hasta 106 NMP/100 mL. Aguas abajo la concentración desciende, aunque se mantiene en 105 NMP/100 mL.</p> <p>Los afluentes que más aportan son los ríos Susa, Suta, Simijaca y Chiquinquirá.</p>
DBO Total y Soluble	Incrementa fuertemente después del río Suta, con concentraciones superiores a 70 mg/L. Aguas abajo la concentración promedio es de 15 mg/L, aunque aumenta levemente después del río Chiquinquirá. Los afluentes más destacados son el río Suta, Simijaca, Chiquinquirá y la quebrada Puente Tierra.
DQO Total y Soluble	Cuenta con una concentración media de 65 mg/L, con un pico de 300 mg/L después del río Suta. Los afluentes más destacados son el río Suta, Simijaca y la quebrada Puente Tierra.
Fósforo Total y Soluble	<p>Las concentraciones presente son normales con picos aguas abajo de la quebrada Ruda y río Suta.</p> <p>Por su parte la concentración de fósforo soluble son altas, con valores de 8 mg/L después del río Suta y de 1,5 mg/L después del río Simijaca.</p>
Nitrógeno Total	Con concentraciones medias de 3 mg/L, con aumento después del río Susa con 16 mg/L y después de la quebrada Ruda con 6 mg/L. Otro río que presenta aportes importantes es el Chiquinquirá.
Nitrógeno Amoniacal	Las concentraciones son superiores a las normales con aumento después del río Susa con 14 mg/L y después de la quebrada Ruda a la altura de la estación puente Colorado. Se destacan los aportes del río Suta, Simijaca y en menor grado la quebrada Ruda.
Nitratos y Nitritos	<p>Los nitratos se encuentran en rangos normales, pero después del río Chiquinquirá llega un pico de 15 mg/L.</p> <p>Los nitritos presentan picos después del río Suta y aguas arriba de la laguna de Fúquene con más de 0,1 mg/L.</p>
Sulfatos y Sulfuros	Los sulfatos presentan concentraciones normales. Los sulfuros presentan concentraciones menores de 1 mg/L con picos de 3 y 11 mg/L aguas abajo



PARÁMETRO	TENDENCIA
	de la quebrada Ruda. Los puntos con valores más altos de sulfatos son aguas abajo del río Suta, Chiquinquirá, la quebrada Ruda y en la estación el Cubio.
CO <sub>2</sub>	Presenta valores altos respecto a valores de referencia de aguas superficiales, especialmente después del río Suta y en el canal Madrón-Paris.
Alcalinidad y Dureza	Presentan valores normales, con picos que aumentan más de 100 mg/L de carbonatos, especialmente aguas abajo del río Suta, Chiquinquirá y de la quebrada la Ruda.
Cloruros	Valores dentro de rangos normales, con un pico de 35 mg/L después del río Suta.
Calcio, Magnesio y Sodio	Presenta picos de calcio y sodio después del río Suta y Chiquinquirá.
RAS	En valores normales
Cobre, Cromo, Níquel y plomo	En valores normales

## 2.6 ESTUDIOS PREVIOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Ubaté – Suárez ha sido una cuenca de especial interés, debido a que es una de las más intervenidas, después de la cuenca del río Bogotá, en el departamento de Cundinamarca y por ende, se han generado conflictos de uso del agua y de la tierra.

Por ello, organizaciones gubernamentales, internacionales y privadas han estudiado los diferentes aspectos ambientales y sociales de la cuenca. Entre estos, se destacan estudios como:

Modelación De La Calidad De Las Corrientes Hídricas Principales De Las Cuencas De Segundo Orden De La Jurisdicción De La CAR (Consortio Cuencas 2006). Este fue un estudio contratado por la CAR, con el fin de establecer los lineamientos de la política del manejo de vertimientos.

En el estudio se realizó una revisión de información secundaria, relacionada con la caracterización física de las cuencas; esta caracterización contempló morfometría (basada en el DEM30), procesos erosivos, hidráulica del cauce principal de las cuencas

de segundo orden. Se emplearon datos de cobertura de estudios previos que reportan datos 1:25.000 en la jurisdicción CAR; fuera de la jurisdicción se emplean 1:100.000.

Además, efectuó la modelación hidrológica por medio de SWAT, con resolución temporal diaria. El ajuste de las series de caudales simuladas y las registradas se logró mediante la calibración de los parámetros de Coeficiente de Respuesta, Número de Curva, Conductividad Hidráulica Saturada. La calibración de los caudales se realizó con base a los caudales medios diarios medidos en las estaciones de caudal, en caso de que existiesen. Además, se realizaron diagramas de dispersión para caudales modeladas y simuladas. De ello, se concluye para la cuenca del río Ubaté – Suárez que el ajuste no es bueno tanto para caudales bajos como para los altos, lo cual puede deberse en gran parte a la presencia de embalses en la zona (EL Hato) y a la regulación de caudales aguas abajo.

De igual forma, efectuó la modelación de la calidad del agua en QUAL 2K, empleando datos de calidad del agua definidos para diferentes puntos de muestreo a lo largo del cauce principal y de afluentes de importancia en cuanto al potencial de afectación de la calidad del agua, como es el caso de Río Suta y la Quebrada Ruda.

Actualización y Complementación de la Oferta Hídrica Superficial para Cuencas hasta Quinto Orden para la Jurisdicción de la CAR. Universidad de Pamplona 2010. Este fue un estudio contratado por la CAR con fines de actualización de información de oferta hídrica para cuencas hasta de quinto orden con referencia de escalas 1:25.000.

Se emplearon datos hidroclimatológicos suministrados por la CAR. En la interpretación del uso del suelo y cobertura vegetal se utilizó la metodología Corin Land Cover del cual se dispone de la clasificación hasta orden 3. Los tipos de suelo fueron asociados al contexto agrícola con la finalidad de facilitar el empleo de esta información en la evaluación de que se ocupa este estudio, con respecto a las características de infiltración superficial, entre otros. Se tomó información de los POMCAS, del estudio realizado por CONIF (2005) para identificación de tipo y uso de suelos. De igual forma se empleó información generada por la URPA (1994) del tipo de suelos, y del IGAC y la

Gobernación de Cundinamarca (2000) los cuales estudiaron características como humedad y conflicto de uso del suelo.

También se evaluó la distribución de la precipitación se empleó el Método de la ponderación del cuadrado de las distancias recíprocas o IDW (Inverse Distance Weighted) con grillas de 30 y 60 m y se definieron Índices de Precipitación para tener en cuenta en la condición de antecedencia de la precipitación mensual para la aplicación de la Teoría del CN en periodos largos; para periodos cortos se incluyen los valores de precipitación antecedente.

Luego con el CN, se calcula la diferencia potencial máxima entre Precipitación y Caudal a la hora que se inicia la tormenta y representa proporcionalmente la pérdida de escorrentía por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial (S) y se calcula la precipitación efectiva con procedimiento utilizado es el propuesto por el Soil Conservation Service – SCS. Al caudal obtenido se le adiciona el caudal base, el cual se define como el caudal que puede ser igualado o excedido el 97.5% para corrientes instrumentadas y un porcentaje (28%) del caudal medio que es igualado o excedido 95%.

Evaluación de la vulnerabilidad y estrategia de adaptación en un complejo de humedales de la cordillera oriental colombiana: Lagunas de Fúquene, Cucunubá y Palacio. Franco, L., et al. 2011 el cual fue desarrollado por Fundación Humedales entre 2010 y 2011 con el apoyo de ECOPEPETROL.

El primer objetivo buscó hacer una propuesta conceptual para analizar la vulnerabilidad frente a cambio climático de los humedales del complejo lagunar Fúquene, Cucunubá y Palacio (altiplano Cundiboyacense), partiendo del desarrollo de un modelo ecológico conceptual del complejo, en el cual se hicieron explícitos los procesos y estructuras que dan cuenta de la funcionalidad del sistema y por lo tanto de sus posibilidades de respuesta adaptativa frente al fenómeno climático. Con base en el modelo, en el conocimiento de estas lagunas, en literatura sobre los ecosistemas de montaña y en aspectos de la teoría de la resiliencia, se identificaron factores con el potencial para acentuar la vulnerabilidad de los humedales ante Cambio Climático Global. Factores que no pueden ser modificados con una acción de manejo, local, regional o nacional; estos se refieren a aspectos climáticos o algunos hidrológicos, por ejemplo; si bien estos en sí

mismos (o vistos de manera independiente) no reflejarían la vulnerabilidad del sistema, cuando son interpretados y analizados a la luz del contexto particular del humedal en estudio puede ser evidente que influirían y acentuarían su vulnerabilidad frente al cambio del clima. Además otros factores son los que tienen el potencial para ser modificados con acciones de manejo en terreno. Por ejemplo, el estado de las coberturas en el buffer de los cauces aferentes al humedal, el estado de las desembocaduras de estos cauces en el humedal y la conexión, física y funcional, en la interfase tierra-agua.

El segundo objetivo planteó la evaluación de la vulnerabilidad del complejo de Fúquene a partir de la propuesta conceptual y metodológica hecha y de los factores identificados. Esta evaluación se llevó a cabo con recorridos en campo, análisis de series históricas climáticas, hidrológicas, mapas de coberturas, y talleres y entrevistas con actores locales y regionales que son relevantes para el manejo y uso de los servicios ecosistémicos proveídos por las lagunas del valle del Río Ubaté.

El tercer objetivo del proyecto planteó una estrategia integral de adaptación en la cual se ponen de relevancia tres grupos de objetivos basados en lo evidenciado en el análisis de vulnerabilidad: conocimiento del sistema y su funcionamiento como resultado de la sinergia entre los cambios en su carácter ecológico, la dinámica natural y la regulación para el manejo; restitución y mantenimiento de la estructura biofísica y social de sustento de los atributos de naturaleza y carácter ecológico; conciencia social acerca del fenómeno climático, los cambios ecosistémicos que aumentan la vulnerabilidad y la capacidad institucional para enfrentar los impactos.

El cuarto objetivo produjo un marco metodológico para el desarrollo de este tipo de estudios.

## **3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

### **3.1 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO – INFORMACIÓN TOMADA DE MODELACIÓN CLIMÁTICA**

#### **3.1.1 Generalidades**

La información climatológica de los escenarios de cambio climático fue tomada del estudio publicado por la CAR y la Universidad Nacional de Colombia (2011), *El Cambio Climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*.

En este estudio se modeló el clima regional con el modelo PRECIS, el cual permite regionalizar los productos de los modelos climáticos globales (en este caso se empleó el modelo global HadCM3) y llevarlos a una resolución espacial relativamente detallada y efectúa la simulación con base en información de la circulación atmosférica de gran escala (producida por un modelo global) y las características regionales de la superficie (orografía, suelo y cobertura vegetal); en el caso de la cobertura vegetal, ésta, interactúa con el viento, la radiación solar y la precipitación, provee a la atmósfera flujos de calor y regula la escorrentía; para el suelo, dependiendo de su textura tiene propiedades térmicas e hidrológicas y de acuerdo a su color participa en el balance de radiación con albedo. Entre las particularidades regionales que puede tener en cuenta el modelo se cuenta con el balance de radiación, la dinámica de circulación atmosférica en mesoescala, el ciclo de los sulfatos, la formación de nubes y precipitación, la transferencia de masa y energía, desde la cobertura vegetal y la capa del suelo a la atmósfera. De igual forma, de acuerdo a estudios previos efectuados por Pabón (2008)

PRECIS, permite representar procesos de interacción como el efecto föhn, el cual genera que algunas zonas de barlovento, sean más húmedas que las de sotavento y a su vez, que las de sotavento sean más cálidas, como es el caso de valles interandinos como valle del Magdalena, los cuales se calentarían más, respecto a zonas de piedemonte oriental de la cordillera Oriental. (Pabón C., J. D. 2011).

Los datos generados por el modelo fueron valores multianuales para el periodo 1971 – 2000. La validación del modelo se efectuó respecto a la representación espacial de los valores multianuales de las variables climatológicas y el ciclo anual; esta se efectuó comparando valores de variables climatológicas observadas con las simuladas entre el año 1971 y 2000, por medio de cálculo de coeficientes de correlación, error cuadrático medio (RMSE), y la relación de esta última con el respectivo promedio multianual y el sesgo (BIAS). Es importante resaltar que el modelo PRECIS, de acuerdo a estudios efectuados a nivel mundial, tiende a sobreestimar la precipitación y a presentar un mayor calentamiento (Pabón C., J. D. 2011), por lo cual se emplean metodologías de corrección de las salidas del modelo.

Entre las tendencias recientes, se destaca la ligera reducción de días con lluvia para la zona de la laguna de Fúquene (Estación Isla Santuario) y un aumento en la cantidad de precipitación anual, lo cual sugiere un aumento eventos de precipitación intensos (superiores a 25 mm/día). Respecto a los escenarios de cambio climático, (Pabón C., J. D. 2011).

### **3.1.2 Escenarios Futuros**

Los escenarios de cambio climático se efectúan para A2 y B2, para tres periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100; generalmente los escenarios de cambio climático se hacen para el periodo 2070-2100 debido a que este horizonte de tiempo presenta cambio marcado. Las variables que se analizan son precipitación, temperatura y humedad relativa (Pabón C., J. D. 2011).

Evaluando los cambios que se pueden presentar entre estos periodos, se tiene, que el periodo comprendido entre 2011 y 2040 solo se presentan cambios significativos para la zona del municipio de Guatavita, al oriente de la provincia de Ubaté, donde el calentamiento sería el mayor (incrementos de 2 a 4 °C), aunque se recomienda utilizar un incremento generalizado de 1 a 2°C; de igual forma, el calentamiento sería más marcado desde noviembre hasta abril. La humedad relativa presenta un incremento del 3%, con cambios en el patrón espacial y temporal, con disminución los meses enero, junio, agosto y aumento en meses de julio y noviembre. La evapotranspiración tendría un aumento del 30%. La precipitación presenta un aumento del 10% al suroriente y disminución de la precipitación en el resto del área (Pabón C., J. D. 2011).

Para el escenario 2041-2070, aumenta la temperatura, sobretodo en B2, llegando a aumentos de 3°C, aunque es menos extenso espacialmente que el aumento en A2. Estos aumentos serían marcados de noviembre a marzo y en el mes de julio. De igual forma se estima aumento en la precipitación entre enero y mayo, y se reduciría en agosto, del orden del 30%, a excepción del nororiente de la provincia de Chiquinquirá. Respecto a la evapotranspiración se estima una disminución entre el 10 y el 30% (Pabón C., J. D. 2011).

En el periodo de 2071 a 2100, para A2 se observan diferencias marcadas respecto al periodo base: la temperatura presenta variaciones de 3 a 4 °C, siendo el máximo entre julio y agosto. Para B2 se observa mayor extensión espacial de cambios en temperatura. Hacia el sector oriental de la provincia de Ubaté, se presentan reducciones del 3 al 5%, en la humedad relativa siendo marcado entre junio, julio, agosto con disminuciones de hasta el 10% sobre amplias áreas; el resto del año, las disminuciones serían menores, inclusive podrían registrarse aumentos en los meses de octubre a abril, siendo los meses de octubre a noviembre los que tendrían mayores incrementos. La lluvia presenta una reducción con variaciones, generalizada entre mayo y septiembre.; entre octubre y febrero, especialmente en noviembre y diciembre se presentarían incrementos del 10%. La evapotranspiración disminuiría por debajo del 10% (Pabón C., J. D. 2011).

## **3.2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

Para la modelación hidrológica en la generación de escenarios se emplea un modelo que cuente con la precipitación y la temperatura como forzantes, además de la cobertura vegetal, con el fin de evaluar impactos en esta y en el uso del suelo en la respuesta hidrológica de la cuenca. Para ello, se generaron tres escenarios a la proyección de 100 años:

- Escenario pesimista, en el cual exista crecimiento poblacional, desarrollo industrial, cambio incontrolado de coberturas vegetales, minería, y la generación de vertimientos de aguas residuales sin tratamiento.
- Escenario constante, en el cual las condiciones actuales perduren.
- Escenario optimista, en el cual exista un ordenamiento territorial ambiental y socioeconómico adecuado.

### **3.2.1 Cobertura Y Uso Del Suelo**

La cobertura y uso del suelo fue evaluado a partir de la tendencia que se había presentado en las coberturas registradas en imágenes satelitales de los últimos años, a partir de las cuales se efectuó una clasificación de acuerdo al modelo hidrológico seleccionado. Con estas imágenes y del levantamiento de coberturas que efectuó el IGAC a escala 1:25000, en el año 2010, se siguió el protocolo de modelación hidrológica, con los datos históricos de variables climatológicas e hidrológicas.

A partir de estas imágenes, también se desarrolló un modelo tendencial de coberturas, retroalimentado por planes de gobierno, y una mesa de expertos en el cual se predigan obras hidráulicas y desarrollo socioeconómico en la cuenca, que afecte las coberturas.



### 3.2.2 Ordenamiento Territorial

Este aspecto es la variable que presenta mayor incertidumbre, debido a que el desarrollo y planificación de la zona se efectúa cada cuatro años, y cada periodo se ve afectado por la política del momento. De igual forma, se observan diferentes puntos de vista entre los diferentes actores de la cuenca, frente a la problemática ambiental de la cuenca, por lo cual, el ordenamiento territorial y el crecimiento poblacional o las dinámicas migratorias a futuro serán notoriamente influenciadas por ello.

Por ende, la presión sobre el recurso hídrico y el retorno de este en forma de agua residual a las corrientes de la cuenca, tendrán una relación directa con la tendencia poblacional.

Entre los proyectos que se han venido evaluando hace unos años en documentos CONPES, para manejo crecientes súbitas y escasez del recurso hídrico en época seca, se destacan los que se enuncian a continuación:

- Embalse San José, almacenando agua del río del mismo nombre, el cual es afluente del río Simijaca.
- Embalse en la cuenca alta del río Lenguazaque

De igual forma, se proyecta construir plantas de tratamiento de agua residual con capacidad de tratamiento apropiada a las características del vertimiento, como es el caso de vertimientos de industria láctea. Estas serán construidas para mínimo cinco municipios, a corto y mediano plazo.

### 3.2.3 Demografía Y Vertimientos

De acuerdo al análisis de crecimiento poblacional realizado previamente se establece una tendencia demográfica para los tres escenarios, en el cual se sigue la tendencia de crecimiento por medio de una función sigmoide, derivada del modelo logístico. Esta función describe una progresión temporal desde unos niveles bajos, al inicio, con una transición intermedia de fuerte aceleración, hasta llegar a un climax, presentando una forma de S. De esta forma, al principio el crecimiento es exponencial, y luego, se presenta una competencia de la variable, en ese caso, población (N), por algún recurso crítico, lo cual se representa por medio de un cuello de botella o capacidad de carga máxima, por lo cual la tasa de crecimiento disminuye y finalmente se llega a la madurez a la tendencia de finalización del crecimiento (Jiménez, R. 2013; Lallana, V., Lallana, M., 2004).

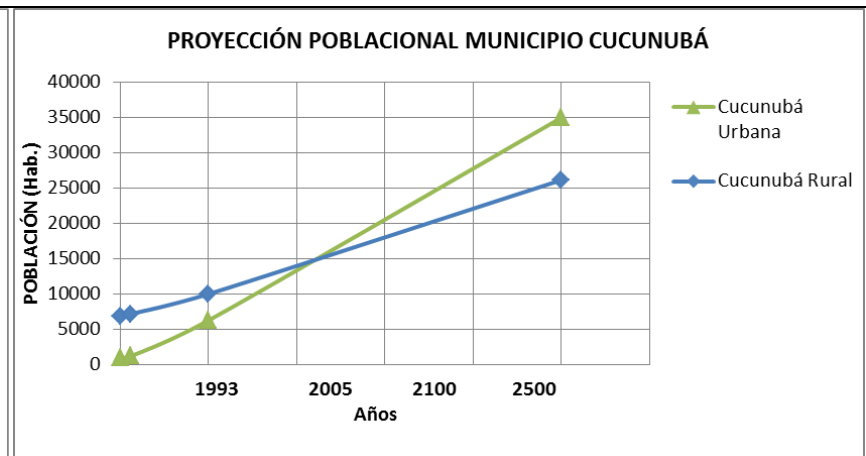
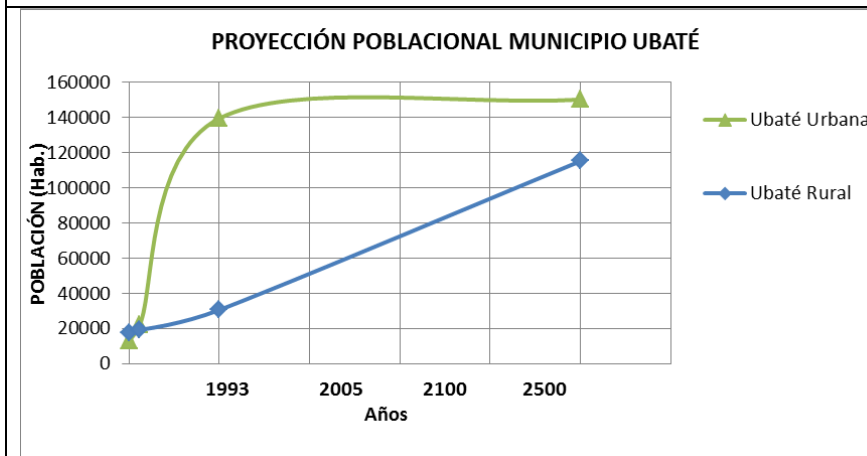
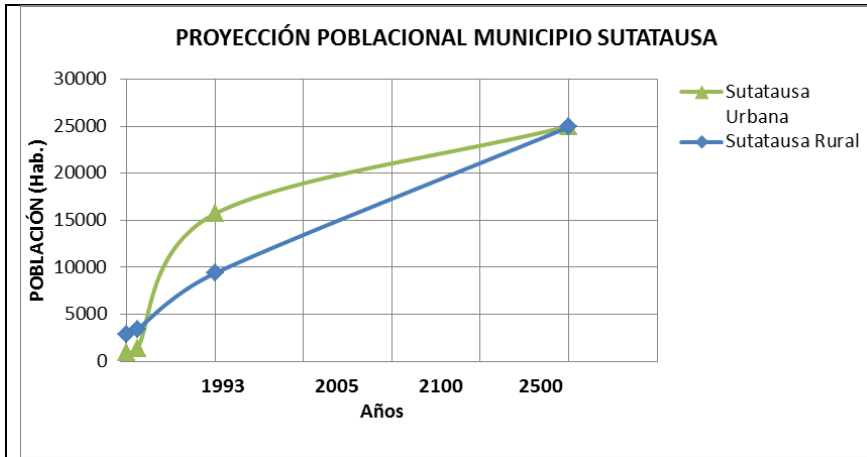
Modelo logístico 
$$\frac{dN}{dt} = \frac{rN(K-N)}{K}$$

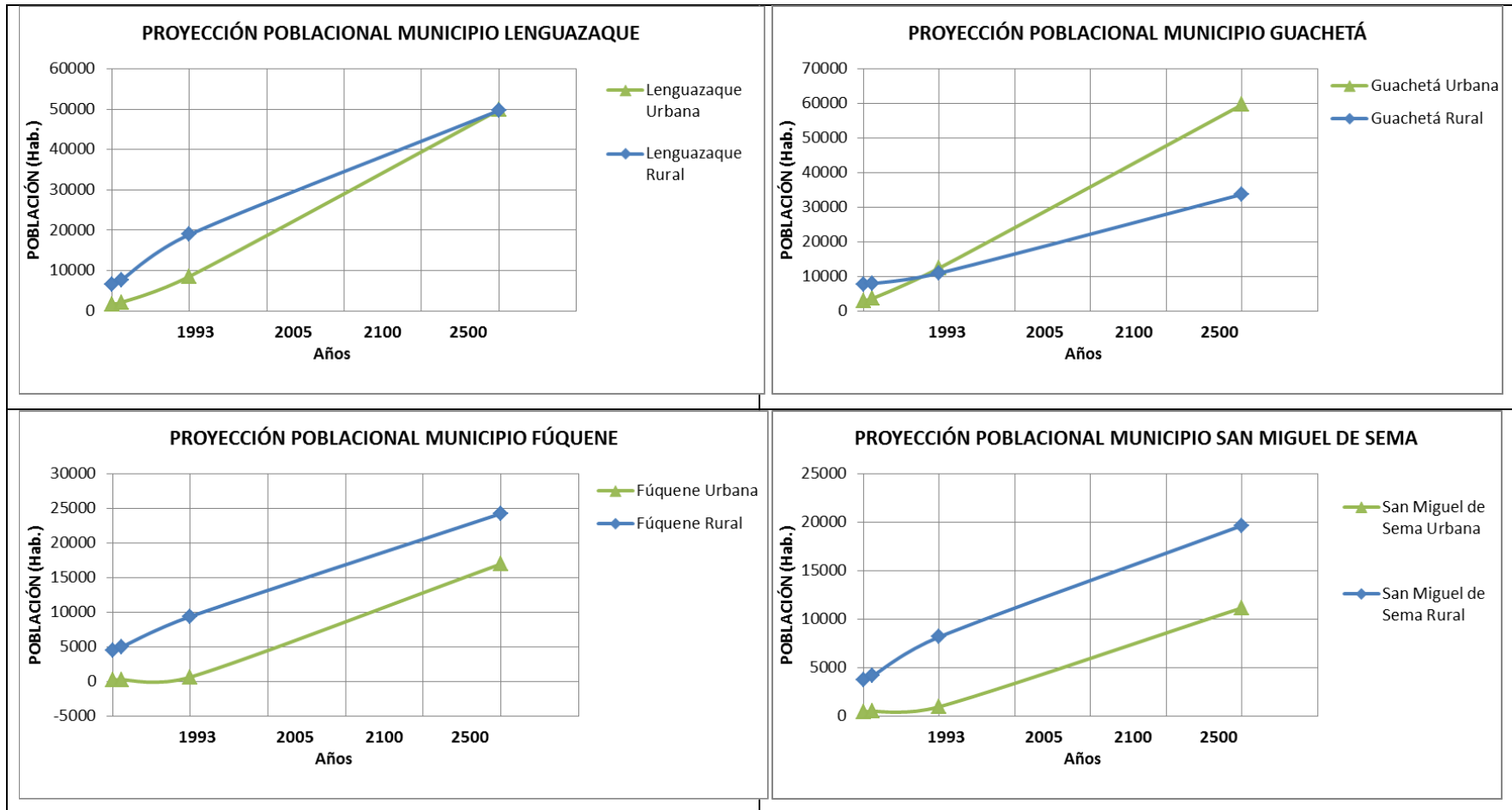
$$x = \frac{N}{K} \quad \frac{dx}{dt} = rx(1-x)$$

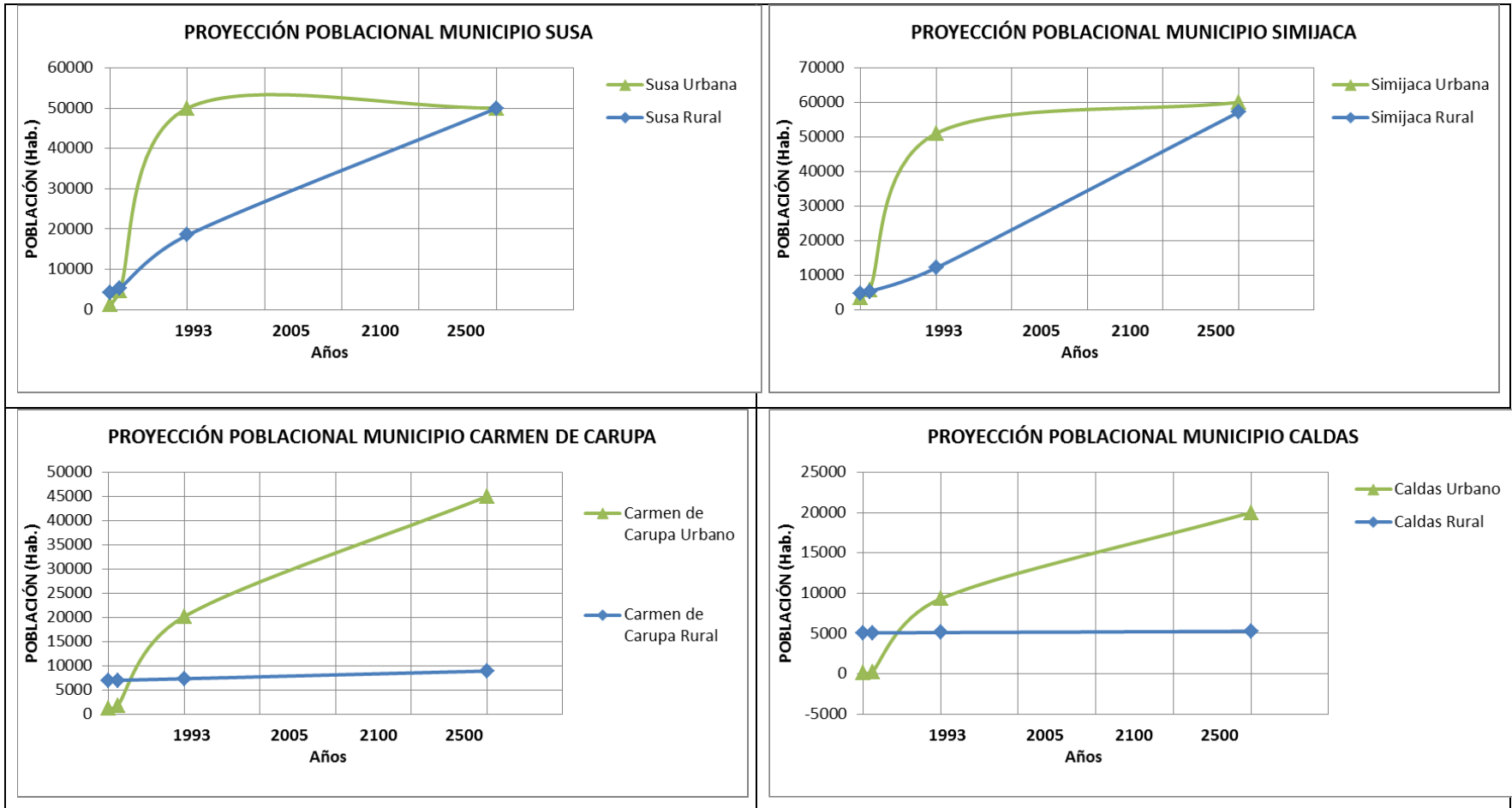
Función sigmoide 
$$\frac{1}{x(t)} = 1 + \left(\frac{1}{x_0-1}\right) e^{-rt}$$

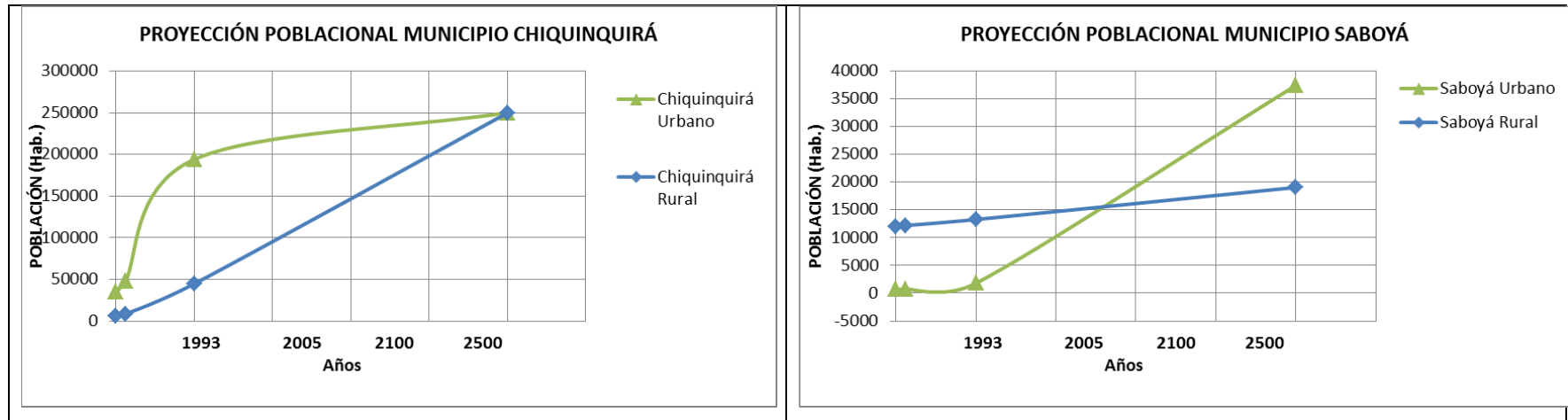
Los resultados se presentan para cada municipio en la Figura 3-1.

**Figura 3-1.** Tendencia de desarrollo poblacional para los municipios de la cuenca Ubaté Suárez.









A partir la población, se establece la demanda hídrica, estableciendo la dotación neta acorde al nivel de complejidad, para clima frío - templado, sobre cada fuente de abastecimiento, de acuerdo a la resolución 2320 de 2009. Los valores de dotación neta y complejidad del sistema para los municipios se presenta en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Dotación neta y nivel de complejidad para proyección de demanda de agua

MUNICIPIO	Nivel de Complejidad	Dotación Neta (lt/hab.día)
Sutatausa	Medio	115
Tausa	Medio	115
Ubaté	Medio Alto	125
Cucunubá	Medio	115
Lenguzaque	Medio	115
Guachetá	Medio	115

---

Fúquene	Medio	115
San Miguel de Sema	Medio	115
Susa	Medio	115
Simijaca	Medio	115
Carmen de Carupa	Medio	115
Caldas	Medio	115
Chiquinquirá	Medio Alto	125
Saboyá	Medio Alto	125

Respecto a la proyección de vertimientos se efectúa por medio de un coeficiente de retorno para la población urbana de 0.85 y rural de 0.50, acorde a la descripción de abastecimiento y saneamiento efectuada previamente.

## 4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

### 4.1 SELECCIÓN DEL MODELO

Los modelos que se han adoptado para el desarrollo de la Modelación hidrológica de los impactos de los escenarios de cambio climático en la escorrentía superficial fueron adoptados de acuerdo a la información disponible, a la escala espacial y temporal y a la proyección de escenarios de cambio climático, a las necesidades de inclusión de captaciones y vertimientos, entre otros criterios. La comparación entre los modelos hidrológicos contemplados para emplear en el presente estudio, se presenta en la Tabla 4.1, teniendo en cuenta escala temporal y espacial, si son modelos agregados o distribuidos, información requerida y con la que se cuenta.

Al evaluar la familia de modelos disponibles, se selecciona WEAP por varios aspectos:

- De acuerdo a la información histórica climatológica e hidrológica suministrada con resolución diaria. No se contó con información específica para modelación hidrológica en páramos (lluvia horizontal).
- De acuerdo a las variables climatológicas que se tienen en cuenta como forzantes de evaluación de afectación de los recursos hídricos bajo escenarios de cambio climático, las cuales se encuentra en periodos de treinta años, a nivel mensual.
- De acuerdo a necesidades de manejo de cuencas (planeación, evaluación de escenarios y políticas de adaptación).
- De acuerdo a la necesidad de modelar la hidrología base y la futura a una escala temporal de meses y no de eventos.
- De acuerdo a la necesidad de modelar la hidrología a una escala espacial de 25 km.
- De acuerdo a la necesidad de incluir usuarios (extracciones y vertimientos) en el modelo, lo cual WEAP permite incluirlo.



- De acuerdo a la visión de incluir cambio en coberturas y uso del suelo como otra variable que define el efecto en la respuesta hidrológica de las cuencas.

En conclusión, para el desarrollo de la modelación hidrológica se escoge como modelo el WEAP (Water Evaluation and Planning System), porque es un modelo de planeamiento especialmente flexible en cuanto a la inserción de demandas y retorno (en el caso de aguas residuales) hídricos de cuencas y permite la modelación de la calidad del agua, como lo requería el caso de estudio; además, permite evaluar para escenarios futuros alternativas de desarrollo y valorar los efectos en las políticas, costos, hidrología, abastecimientos municipales e industriales y cambio climático.



PARÁMETRO	ESCALA	EXISTE	WEAP	SWAT	HMS	PRMS	FIESTA	TOPMODEL	IHACRES	DHSVM
	Mensual	X	-	-	-	-	X	-	-	-
Radiación onda corta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Radiación onda larga	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Latitud	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>DATOS MORFOMETRÍA – SUELO</b>										
DEM	30	X	X	X	O	-	-	X	-	X
Topología de la cuenca	-	X	-	-	X	X	X	X	-	X
Cobertura vegetal	1:25000	X	X	X	O	O	X	-	-	X
Tipo de suelo	1:100000	X	X	X	O	O	-	-	-	X
Geología	1:100000	X	X	X	-	O	-	-	-	-
Vías	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Áreas de agricultura irrigada	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Tecnologías de irrigación	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>RESERVORIOS Y REPRESAS</b>										
Capacidad de almacenamiento	-	-	X		X		-	-	-	-
Volumen inicial	-	-	X		X		-	-	-	-
Curva de volumen/elevación	-	-	X	X	X		-	-	-	-
Evaporación	Diaria	-	X	X	-		-	-	-	-
	Mensual	-	X	X	X		-	-	-	-
Pérdidas de agua subterránea	Mensual	-	X		-		-	-	-	-
Máximo nivel de conservación	-	-	X		-		-	-	-	-

PARÁMETRO	ESCALA	EXISTE	WEAP	SWAT	HMS	PRMS	FIESTA	TOPMODEL	IHACRES	DHSVM
Máximo nivel de seguridad	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Máximo nivel inactivo	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
<b>DEMANDA/VERTIMIENTOS</b>										
Número de usuarios	Diaria	-	X	-	-	-	-	-	-	-
	Mensual	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Consumos per cápita	Diaria	-	X	-	-	-	-	-	-	-
	Mensual	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Variación mensual	Mensual	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Porcentaje de retorno	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Extracciones	lps	-	X	-	X	-	-	-	-	-
Vertimientos	lps	-	X	X	X	-	-	-	-	-
<b>PUNTOS DE CONTROL</b>										
Punto de concentración y cierre de subcuencas	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Estaciones de monitoreo de caudal	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Localización de canales de extracción	-	X	X	-	X	-	-	-	-	-
Confluencia de ríos	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-
<b>DATOS PARA CALIBRACIÓN</b>										
Series de caudales	Diaria	X	X	X	X	X	-	X	X	-
	Mensual	X	X	X	-	-	X	-	X	-
Generación sedimentos	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-

PARÁMETRO	ESCALA	EXISTE	WEAP	SWAT	HMS	PRMS	FIESTA	TOPMODEL	IHACRES	DHSVM
Series de tiempo - nieve	-	N.A.	O	-	-	-	-	-	-	-
Área de cobertura y escorrentía de glaciares	-	N.A.	O	-	-	-	-	-	-	-
Caudales mínimos de extracción	-	N.A.	O	-	-	-	-	-	-	-
Agua subterránea - Flujo Base	Mensual	-	O	-	X	X	N.A.	-	-	-
Capacidad hidroeléctrica para calcular producción hidroeléctrica o Mínimo caudal de turbina o Máximo caudal de turbina o Cabeza Hidráulica o Factor de planta o Eficiencia	-	N.A.	O	-	-	-	-	-	-	-
<b>ESCALA</b>	<b>ESPACIAL</b>	Local, Regional	Local, Regional	Local, Regional	Local, Regional	Nacional, local, regional, 1 km y 1 ha	Local, Regional	Local, Regional	Local, Regional	
	<b>TEMPORAL</b>	Semanal, Mensual	Diaria, Mensual	Diaria, Horaria	Diaria, Horaria	Mensual con ciclo diario de intercepción de neblina	Horaria	Horaria, Diaria, Mensual	Horario	
<b>TIPO</b>		Agregado	Semi-Distribuido	Distribuido - Agregado	Distribuido	Distribuido	Semi-Distribuido	Agregado	Distribuido	

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA DESARROLLADA POR WEAP

### 4.2.1 Generalidades

El modelo WEAP para el cálculo del balance hídrico emplea información climatológica, de cobertura vegetal, hidrológica, además de información de oferta y demanda. Entre la información climatológica se puede mencionar precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud y cantidad inicial de nieve; de la información hidrológica se requieren los caudales medios. Respecto a la información de oferta se requiere información de infraestructura física de control y demandas (captaciones).

Con esta información, modela los componentes de evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial y sub-superficial y flujo base para cada subcuenca o catchment.

Para ello, WEAP oferta cinco métodos para la simulación de procesos de evapotranspiración, escorrentía, infiltración y demandas de riego. Estos métodos deben escogerse teniendo en cuenta la información disponible y la complejidad de los procesos que se requieren representar. Los cinco métodos incluidos en la herramienta de modelación WEAP se describen a continuación<sup>3</sup>:

- ***Método único para demandas de riego (Método del coeficiente Simplificado)***

Es el más simple de todos los métodos de demandas de irrigación, ya que usa los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca para calcular demandas que pueden ser requeridas para cumplir con la evapotranspiración requerida que la precipitación no puede satisfacer. Este no simula procesos de escorrentía o infiltración, o cambios en la humedad del suelo.

---

<sup>3</sup> Tomado de la herramienta Help de WEAP.

- **Método de Lluvia Escorrentía (Método del coeficiente Simplificado)**

Este método también determina la evapotranspiración para áreas irrigadas o cultivos secano, usando coeficientes de cultivo. El resto de la lluvia es simulada como escorrentía que puede ser proporcionada a un río y puede fluir a agua subterránea.

- **Método de Lluvia Escorrentía (Método de la Humedad del Suelo)**

Es el más complejo de los cuatro métodos. Se representa como una cuenca con dos capas de suelo, así como el potencial de acumulación de la nieve. En la capa superior de suelo, este simula evapotranspiración, considerando lluvia e irrigación en suelo agrícola o no agrícola; además simula escorrentía, interflujo superficial y cambios en la humedad del suelo. Este método se distingue porque la caracterización del uso del suelo, genera impactos en la respuesta hidrológica. Los cambios en la humedad del suelo y el flujo base son simulados en la capa baja del suelo. La percolación profunda también puede ser transmitida directamente al nodo de agua subterránea por un nodo de interconexión entre la cuenca y el agua subterránea, lo cual genera que el método para esa cuenca pase a tener un esquema de humedad del suelo de 1 capa.

- **Método MABIA**

Este método simula diariamente los requerimientos de transpiración, evaporación, irrigación programada, de acuerdo al crecimiento de cultivos y los rendimientos, e incluye los módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua en el suelo.

Este usa el método dual  $K_c$ , donde el  $K_c$  es dividido en un coeficiente de cultivo "Basal"  $K_{cb}$  y un componente separado,  $K_e$ , el cual representa la evaporación de la superficie del suelo. El  $K_{cb}$  representa las condiciones actuales de evapotranspiración cuando la superficie del suelo es seca, pero la humedad en la zona de raíces es suficiente para satisfacer toda la transpiración. En este orden de ideas, se afirma que MABIA es una mejora de CROPWAT, el cual usa el método del coeficiente  $K_c$ , y por ende, no separa evaporación y transpiración.

Este es derivado de la herramienta de software privado MABIA, desarrollado en el Instut National Agronomique de Tunisie, por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun.

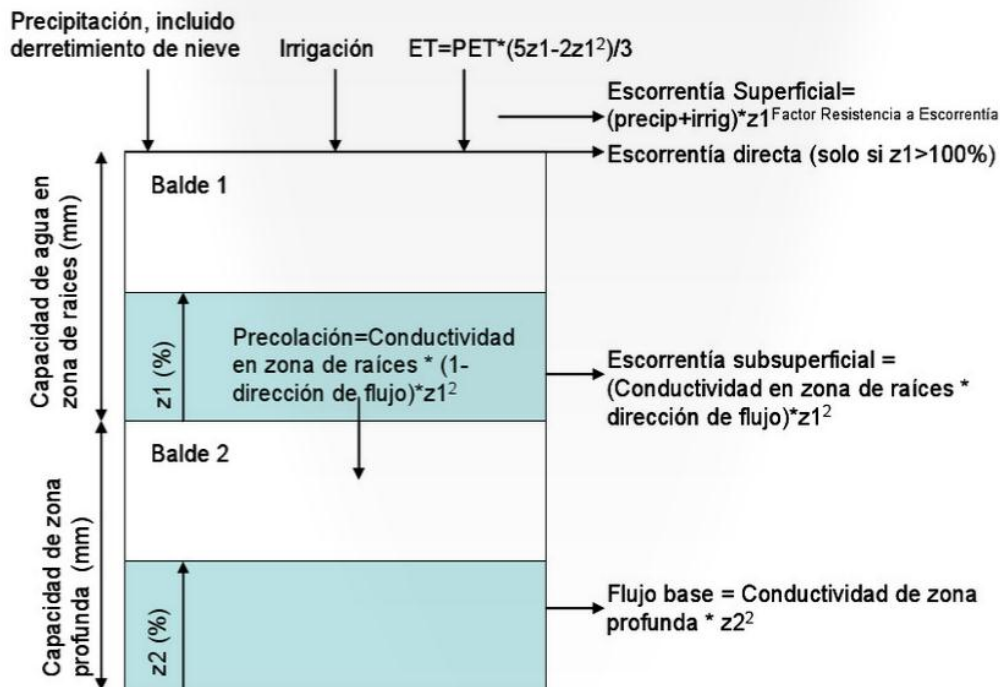
## 4.2.2 Método Seleccionado: Humedad del Suelo para Lluvia Escorrentía

De acuerdo a lo presentado anteriormente, el método de simulación de lluvia escorrentía es el de Humedad del Suelo, por lo cual se profundiza en los cálculos que son desarrollados por medio de este.

Este método cuenta con un esquema basado en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial, sub-superficial (interflujo) y la percolación profunda para una unidad de cuenca hidrográfica; la percolación en la unidad de cuenca puede ser transmitida a un cuerpo de agua superficial como flujo base o directamente al agua subterránea por medio de un nodo de conexión. Véase la Figura 4-1.

La unidad de cuenca puede ser dividida en N áreas, representando diferentes usos y tipos de suelo, y de esta forma, se puede efectuar un balance de agua por cada tipo de suelo. Las variables climatológicas se asumen homogéneas en cada subcuenca.

**Figura 4-1.** Componentes modelados con el método de la Humedad del Suelo



Fuente: Centro De Cambio Global-Universidad Católica De Chile, Stockholm Environment Institute (2009).



El balance hídrico se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)Z_{1,j}^{RRF} - f_i k_{s,j} Z_{1,j}^2 - (1 - f_i) k_{s,j} Z_{1,j}^2 \quad (4-1)$$

Dónde:

$Z_{1,j} = [1,0]$  es el almacenamiento relativo tomado como una fracción del almacenamiento efectivo total de la zona de raíces.

$Rd_j$  (mm): para la fracción de cobertura del suelo,  $j$ .

$P_e$ : Precipitación efectiva, incluyendo deshielo de nieve acumulada en la subcuenca, donde  $m_c$  es el coeficiente de derretimiento el cual se describe a continuación.

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad (4-2)$$

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_s \\ 1 & T_i > T_s \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T_i \leq T_l \end{cases} \quad (4-3)$$

$$A_{c_i} = A_{c_{i-1}} + (1 - m_c) P_i \quad (4-4)$$

$$m_r = A_c m_c \quad (4-5)$$

Dónde  $T_i$  es la temperatura observada para el mes  $i$ ,  $T_l$  y  $T_s$  es la temperatura de fusión y congelación,  $A_{c_i}$  es la acumulación de nieve,  $P_i$  la precipitación total observada.

PET: es la evapotranspiración potencial, calculado a partir del cálculo por medio del cultivo de referencia, por medio de la ecuación Penman – Monteith modificada, para un cultivo estándar de pasto, con una altura de 0.12 m y con una resistencia superficial de 69 s/m, y con dos modificaciones para su implementación en WEAP: el albedo varía en el rango de 0.15 a 0.25 como una función de la cobertura de nieve, y flujo de calor del suelo ha sido ignorado.

$K_{c,j}$ : es el coeficiente de cultivo para cada cobertura.

$P_e(t)Z_{1,j}^{RRF}$ : es la escorrentía superficial, dónde  $RRF_j$  es el factor de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo.

$f_i k_{s,j} Z_{1,j}^2$  (mm/tiempo): es el interflujo, donde  $k_{s,j}$  es un estimador de la conductividad de la zona de raíces saturada,  $f_j$  es el coeficiente de partición relacionado con el suelo, tipo de cobertura y topografía de la fracción particionada de agua que fluye tanto horizontal como verticalmente.

$(1 - f_i) k_{s,j} Z_{1,j}^2$ : es la percolación profunda.

Así, escorrentía superficial y de interflujo de cada subcuenca es:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left( P_e(t) Z_{1,j}^{RRF_i} + f_i k_{s,j} Z_{1,j}^2 \right) \quad (4-6)$$

En los casos donde no hay flujo de retorno porque se crea una conexión entre una cuenca y un nodo de agua subterránea, el flujo base emana de un segundo balde, el cual se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_i) k_{s,j} Z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} Z_2^2 \quad (4-7)$$

Dónde interflujo va a este almacenamiento.

$S_{max}$ : es la percolación profunda del almacenamiento superior de la capa 1.

$K_{s2}$  (mm/tiempo): es la conductividad saturada del almacenamiento bajo, la cual es tomada como un valor singular para una cuenca, por lo cual no cuenta con subíndice y no cuenta con un algoritmo predictor – corrector.

De igual forma, al existir una conexión entre un acuífero y un nodo de escorrentía/infiltración, el segundo término de la ecuación 4.6 es ignorado y se cuenta con la recarga del acuífero:

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_i) k_{s,j} Z_{1,j}^2 \quad (4-8)$$

Dónde A es el área de contribución de la cuenca.

La irrigación también es incluida en el cálculo de escorrentía, incluyéndolo a partir de un factor, el cual define que fracción del agua escurre hacia ríos y/o agua subterránea, y cuál es consumida. Esta es definida por el usuario.

## 4.3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP





### 4.3.1 Desarrollo Esquema de Modelación






Se seleccionó como periodo de modelación con datos históricos climatológicos e hidrológicos entre el año 1993 y 2012, conforme a la ventana de tiempo presentada en el Anexo A.2., empleándose solo las estaciones con datos en este periodo. De igual forma, se adopta este periodo por disponibilidad de información confiable de censos poblacionales y por corresponder a un periodo posterior de la construcción del embalse El Hato.


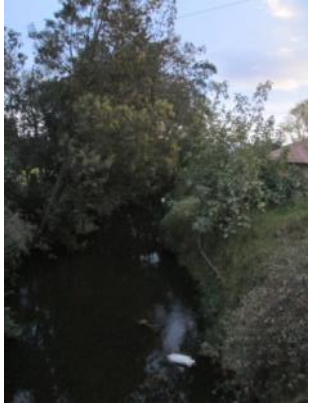

Se desarrolló el esquema de la cuenca en WEAP, ingresando ríos, embalses o lagunas, estaciones y cierre de las cuencas (Figura 4-2). Se identificaron diez (10) subcuencas a modelar para la jurisdicción CAR; sin embargo, al señalarse como puntos de control, algunas estaciones medidoras de caudal, se obtuvo un total de treinta y dos (32) puntos, los cuales se enlistan en la Tabla 4.2, donde el FID señala el número con el que se señala espacialmente las subcuencas en los mapas del Anexo B.1.






**Tabla 4.2.** Puntos de control para modelación de la cuenca Ubaté Suárez




FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
6	Laguna de Cucunubá	Alta	
10	Laguna de Suesca	Alta	
12	Entrrada Embalse El Hato	Alta	

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
11	Corralejas Salida Embalse El Hato	Alta	 
14	La Malilla Q. La Playa	Alta	
5	La Boyera R. Ubaté	Alta	
16	Pte. Barcelona R. Ubaté	Alta	
15	R. Ubaté	Alta	

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
7	El Pino R. Suta	Alta	
13	R. Suta	Alta	
8	Tapias R. Lenguazaque	Alta	
19	Boqueron R. Lenguazaque	Alta	
18	Pte. La Balsa R. Lenguazaque	Alta	
17	R. Lenguazaque	Alta	
20	Esclusa el Cubio Laguna de Fúquene	Media	
4	Laguna de Fúquene – Chalet	Media	

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
21	Chizaque R. Fúquene	Media	
22	Ticha Muñoz Q. Honda	Media	
2	Pte Peralonso R. Susa	Media	
23	R. Susa	Media	

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
25	Pte. San Miguel R. Suárez	Baja	
3	Pte. Guzman R. Simijaca	Baja	
24	R. Simijaca	Baja	
0	Pte. Pinilla R. Chiquinquirá	Baja	
26	R. Chiquinquirá	Baja	
27	Esclusas Tolon R. Suárez	Baja	 

FID	NOMBRE	CUENCA	FOTOGRAFÍA
31	La Balsa R. Suárez	Baja	
1	Merchan R. Suárez	Baja	
30	Pte. Arboledas R. Madrón	Baja	
29	Garavito R. Suárez	Baja	
28	R. Suárez	Baja	

Cada subcuenca (o punto de interés) es caracterizado con información como:

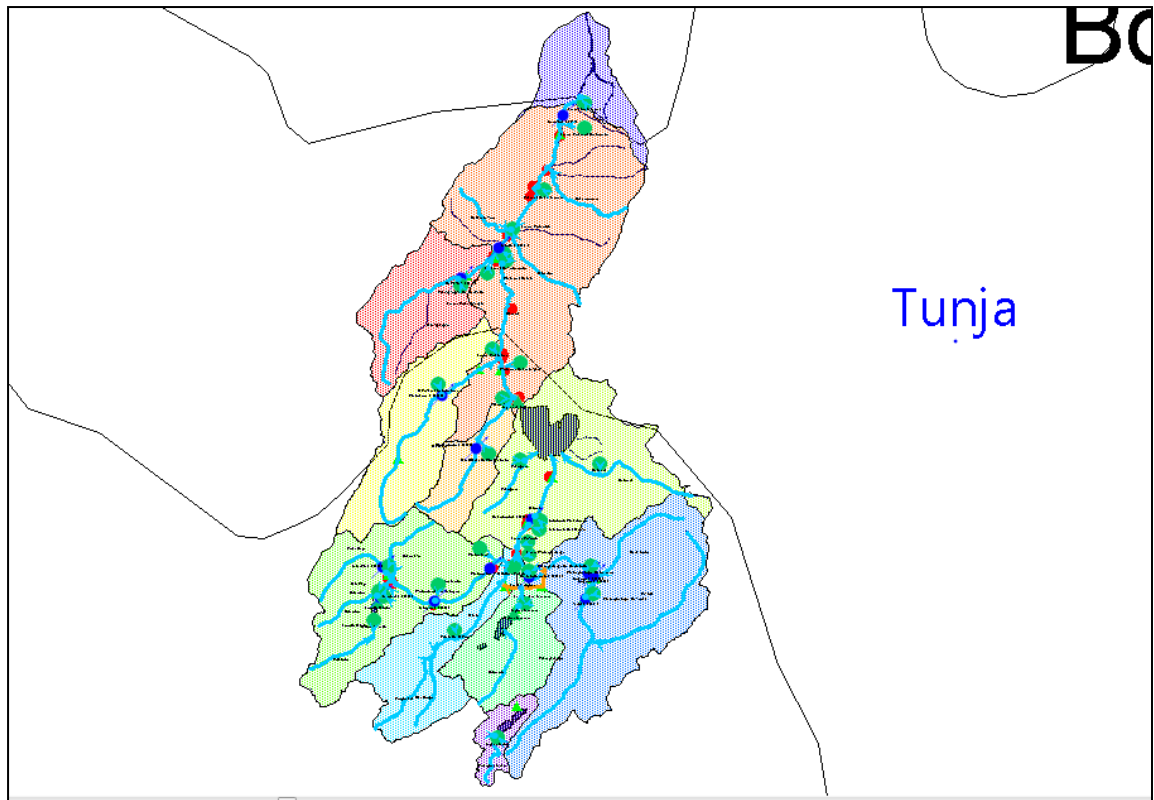
- Uso del Suelo
  - Área
  - Cobertura del suelo y Coeficiente de cultivo
  - Precipitación efectiva
- Climatología
  - Precipitación
  - Evapotranspiración de referencia.
- Calidad del Agua



El área de cada subcuenca se presenta en la Figura 4-3. Se ingresan las subcuencas y las curvas nivel vs volumen de los cuerpos de agua lénticos de la cuenca, las cuales se presentaron previamente en la Tabla 2.5.

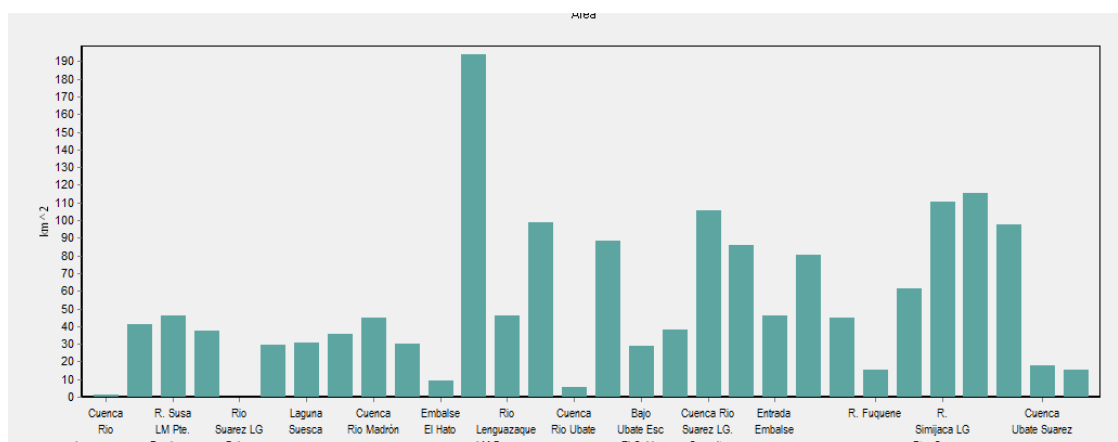
Para estas subcuencas se ingresó la cobertura vegetal que fue identificada, homologando algunas coberturas que eran similares, con el fin de disminuir la densidad de los datos a insertar, reduciendo recursos computacionales, y por ende, permitiendo mayor eficiencia en la modelación. La distribución porcentual de las coberturas vegetales para cada subcuenca se presenta en la Tabla 4.3.

**Figura 4-2.** Esquema de la cuenca Ubaté – Suárez en WEAP.



Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

**Figura 4-3.** Áreas subcuencas y puntos de interés Río Ubaté – Suárez.



Fuente: Autor, obtenido con WEAP

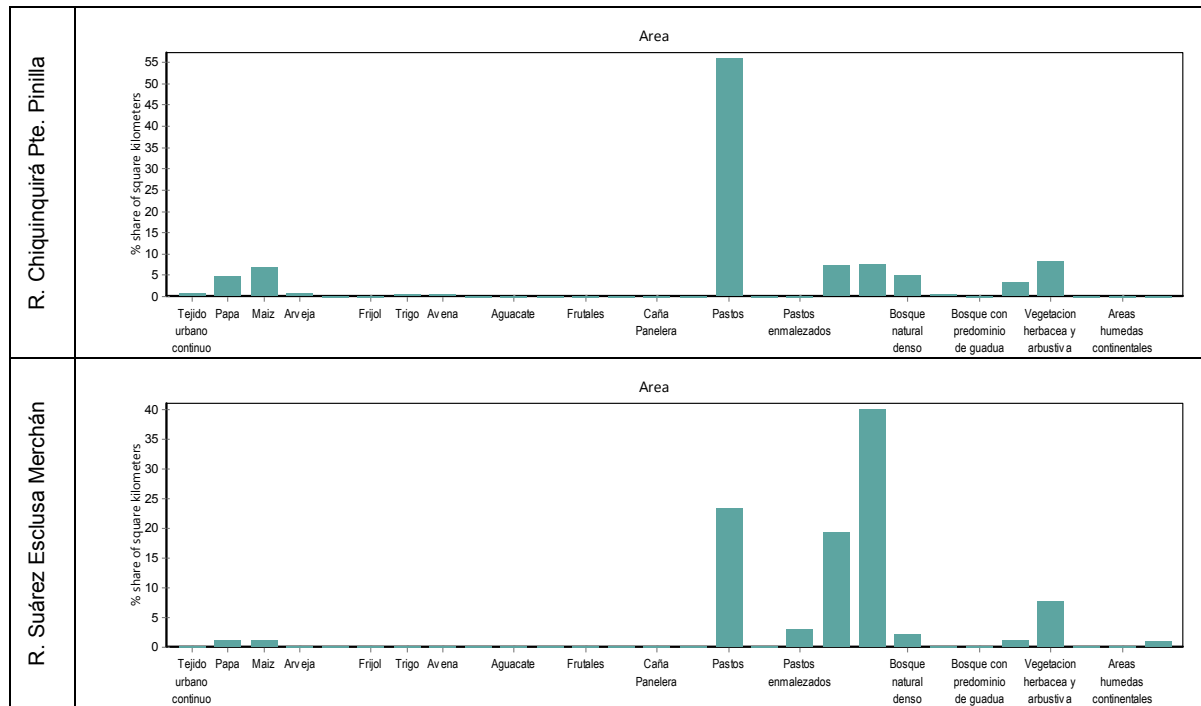
**Tabla 4.3.** Cobertura Vegetal homologada para la Cuenca Ubaté - Suárez

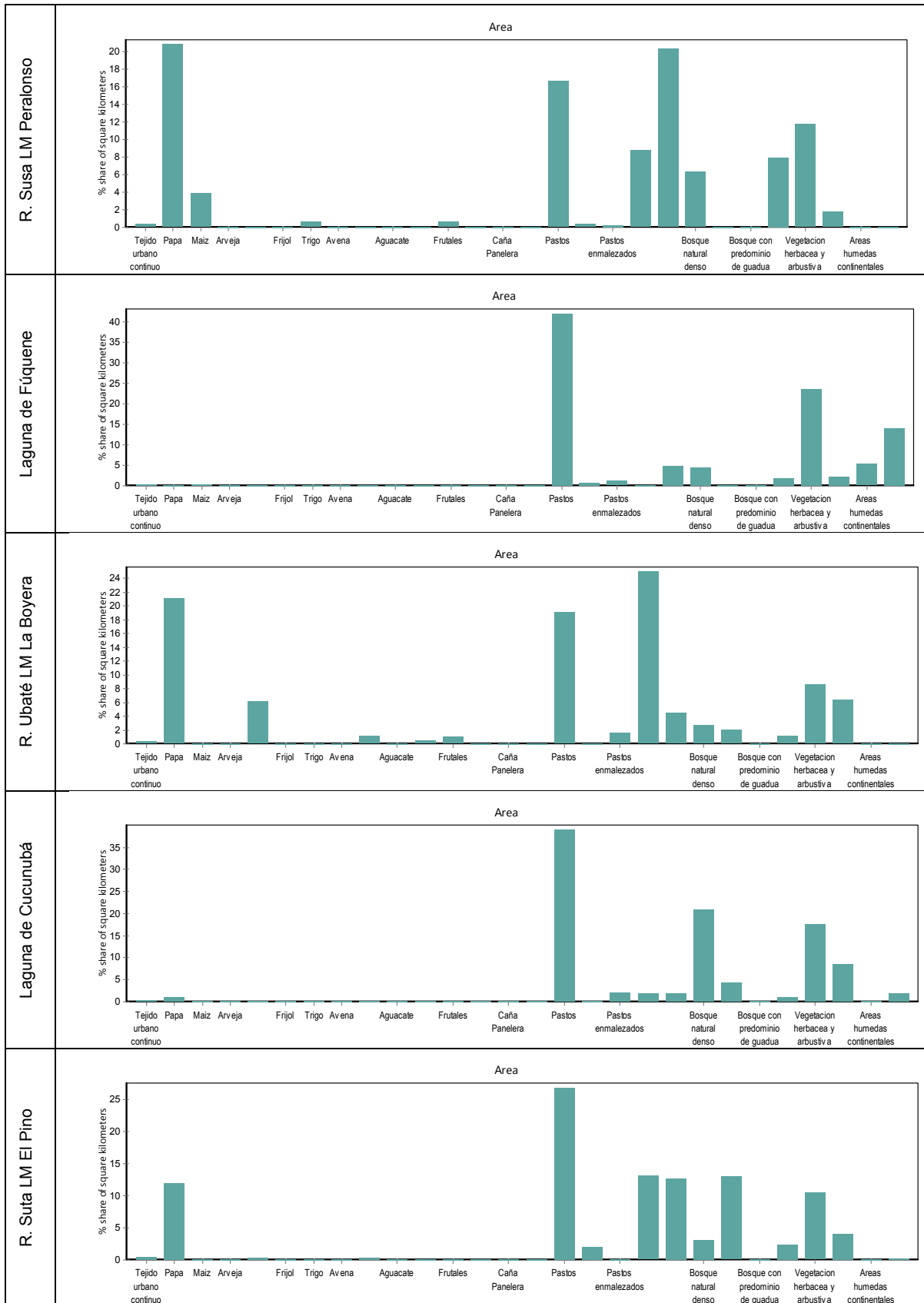
CÓDIGO	HOMOLOGACIÓN	DESCRIPCIÓN
1.		TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS
1.1.		Zonas urbanizadas
1.1.1.	1.1.	Tejido urbano continuo
1.1.2.	1.1.	Tejido urbano continuo
2.		TERRITORIOS AGRICOLAS
2.1.		Cultivos anuales o transitorios
2.1.4.	2.1.4.	Papa
2.1.5.	2.1.5.	Maíz
2.1.6.	2.1.6.	Arveja
2.1.7.	2.1.7.	Habichuela
2.1.8.	2.1.8.	Fríjol
2.1.10.	2.1.10.	Trigo
2.1.11.	2.1.11.	Avena
2.1.12.	2.1.12.	Cebada
2.2.		Cultivos permanentes
2.2.2.	2.2.2.	Aguacate
2.2.4.	2.2.4.	Plátano y banano
2.2.8.	2.2.8.	Frutales
2.2.9.	2.2.9.	Cultivos confinados (Viveros, flores)
2.3.		Pastos
2.3.1.	2.3.	Pastos
2.3.2.	2.3.	Pastos
2.3.3.	2.3.3.	Pastos arbolados
2.3.4.	2.3.4.	Pastos enmalezados o enastrojados

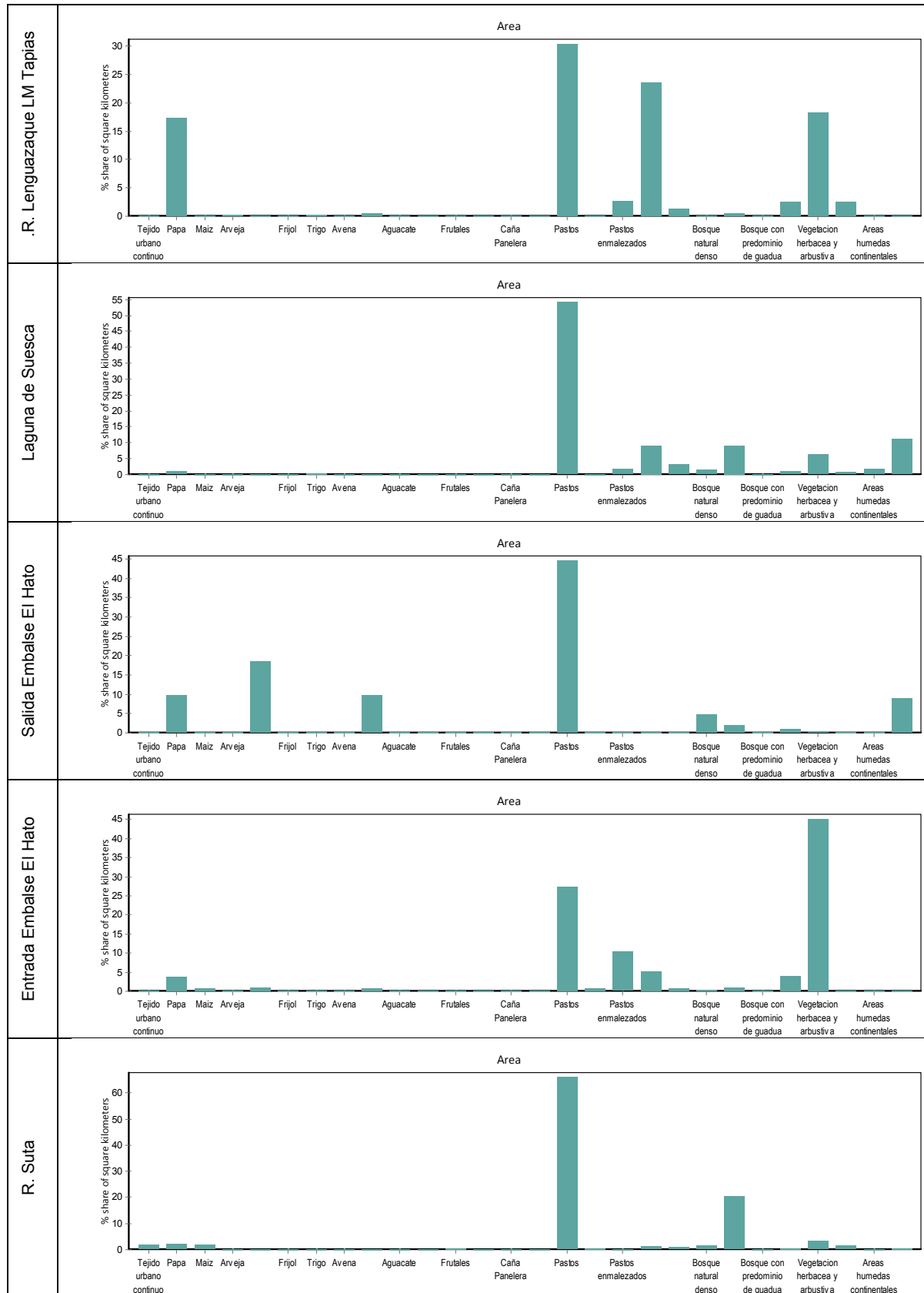
<b>CÓDIGO</b>	<b>HOMOLOGACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
2.3.5.	2.3.	Pastos
2.3.6.	2.3.	Pastos
2.4.		Áreas agrícolas heterogéneas - Mosaicos
2.4.3.	2.2.4.	Plátano y banano
2.4.4.	2.2.8.	Frutales
2.4.5.	2.2.3.	Caña panelera
2.4.6.	2.1.7.	Habichuela
2.4.7.	2.1.5.	Maíz
2.4.9.	2.1.6.	Arveja
2.4.11.	2.1.12.	Cebada
2.4.14.	2.2.7.	Mora
2.4.16.	2.1.4.	Papa
2.5.		Mosaico de pastos y cultivos
2.5.3.	2.5.3.	Pastos y cultivos de clima frío
2.6.		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
2.6.3.	2.6.3.	Cultivos de clima frío, pasto y espacios natur.
2.6.4.	2.6.4.	Cultivos de pastos con espacios naturales
2.6.5.	2.6.5.	Mosaico agro-urbano
3.		<b>BOSQUES Y AREAS SEMI NATURALES</b>
3.1.		Bosques
3.1.1.	3.1.1.	Bosque natural denso
3.1.2.	3.1.1.	Bosque natural denso
3.1.3.	3.1.1.	Bosque natural denso
3.1.4.	3.1.4.	Bosque Plantado
3.1.5.	3.1.5.	Bosque con predominio de guadua
3.1.6.	3.1.6.	Bosque secundario
3.1.7.	3.1.1.	Bosque natural denso
3.2.		Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.1.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.2.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.3.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.5.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.6.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.7.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.8.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.9.	3.2.	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.3.		Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.1.	3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.2.	3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.3.	3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación

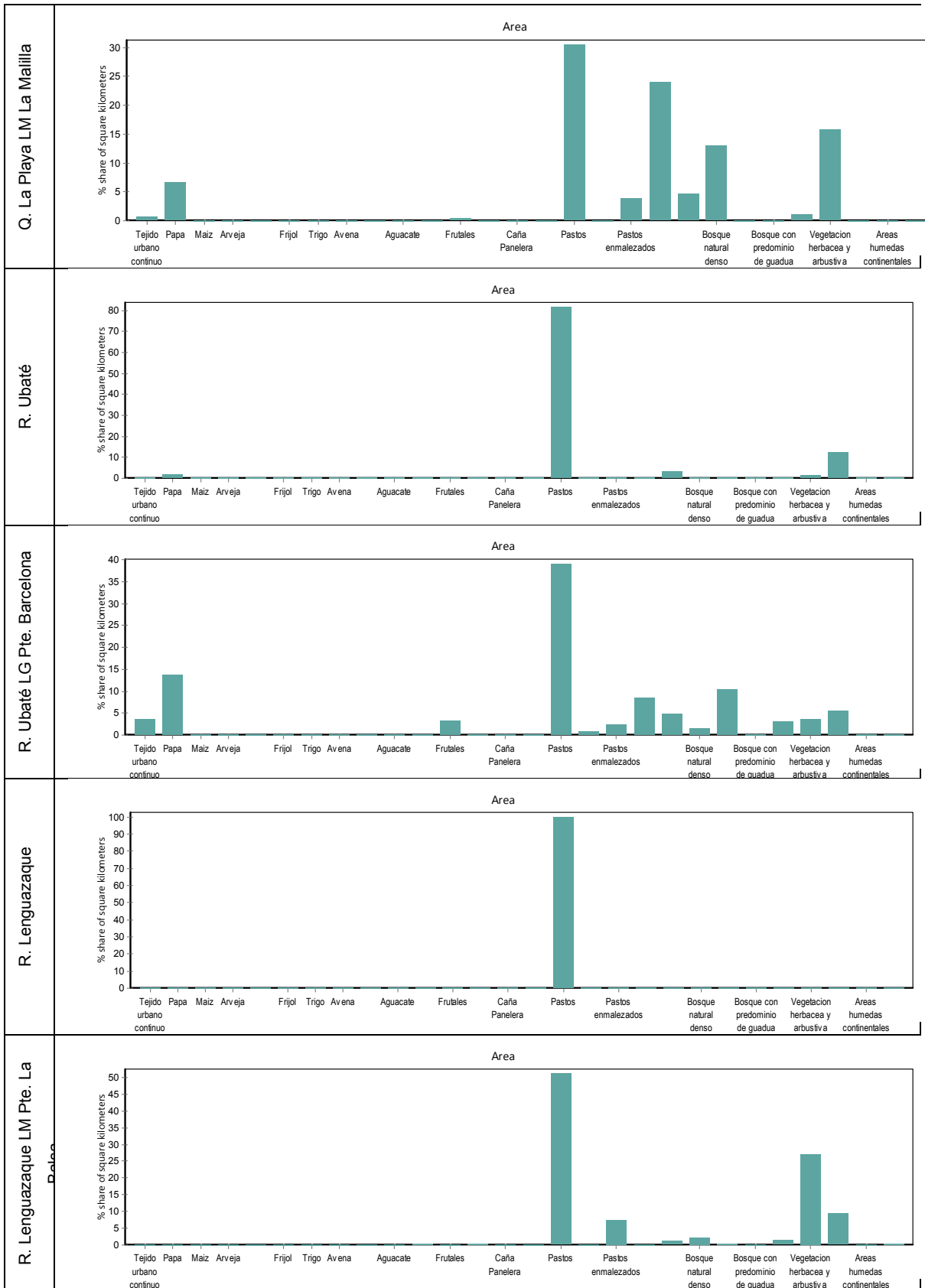
CÓDIGO	HOMOLOGACIÓN	DESCRIPCIÓN
3.3.4.	3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.5.	3.3.	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
4.		AREAS HUMEDAS
4.1.		Áreas húmedas continentales
4.1.1.	4.1.	Zonas Pantanosas
5.		SUPERFICIES DE AGUA
5.1.		Aguas continentales
5.1.1.	5.1.	Aguas continentales
5.1.2.	5.1.	Aguas continentales
5.1.3.	5.1.	Aguas continentales

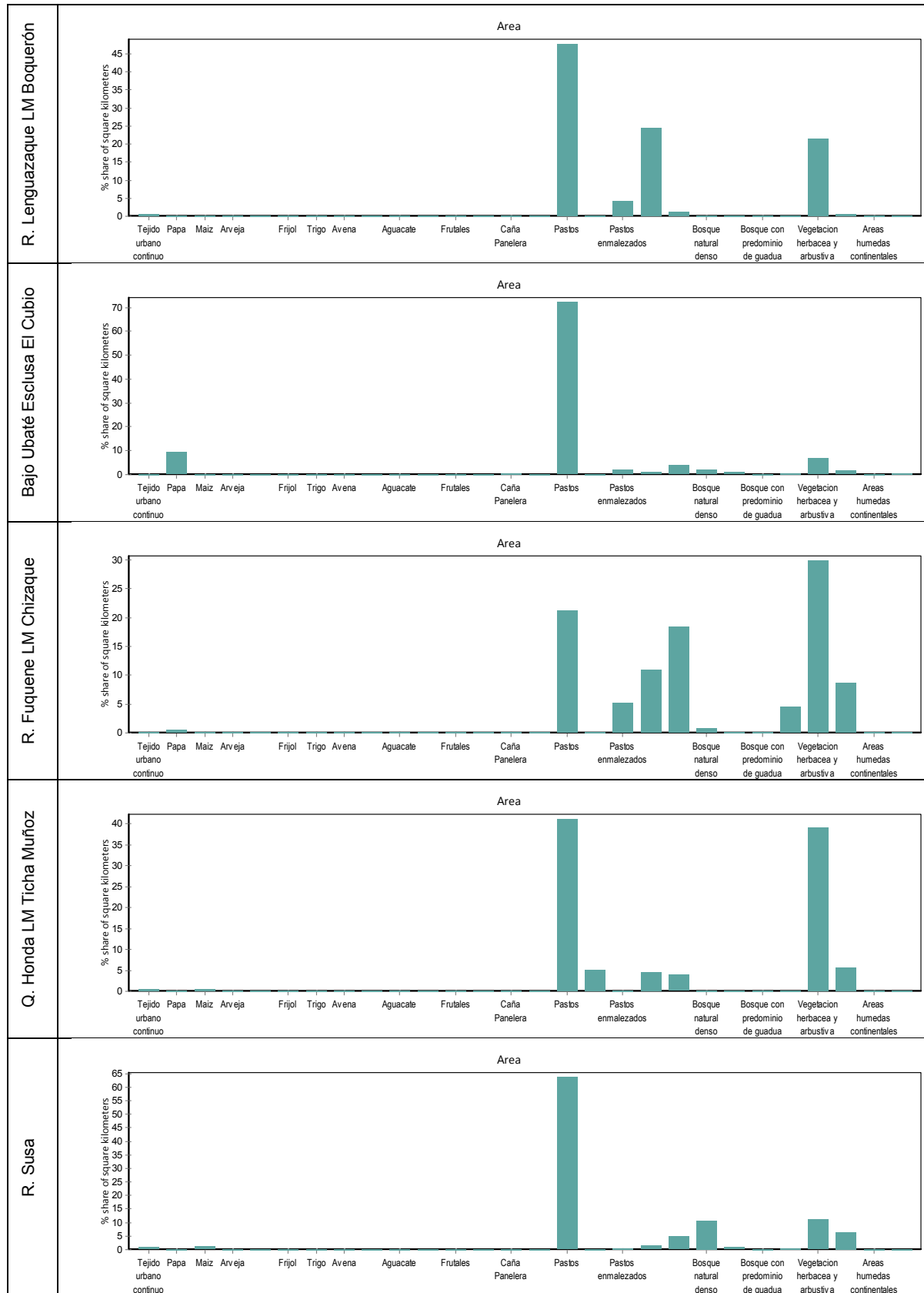
Figura 4-4. Distribución coberturas vegetales para cada subcuenca



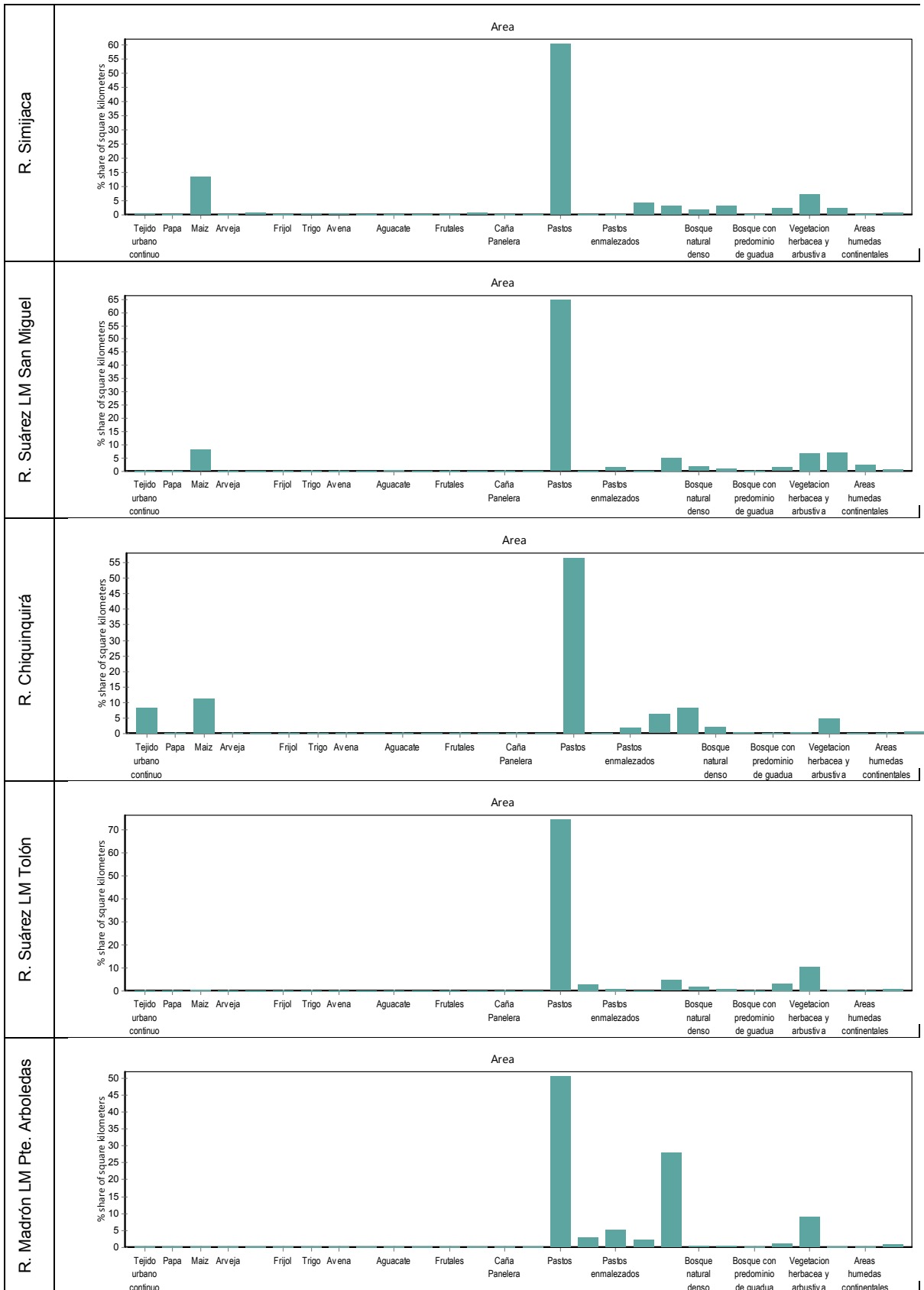


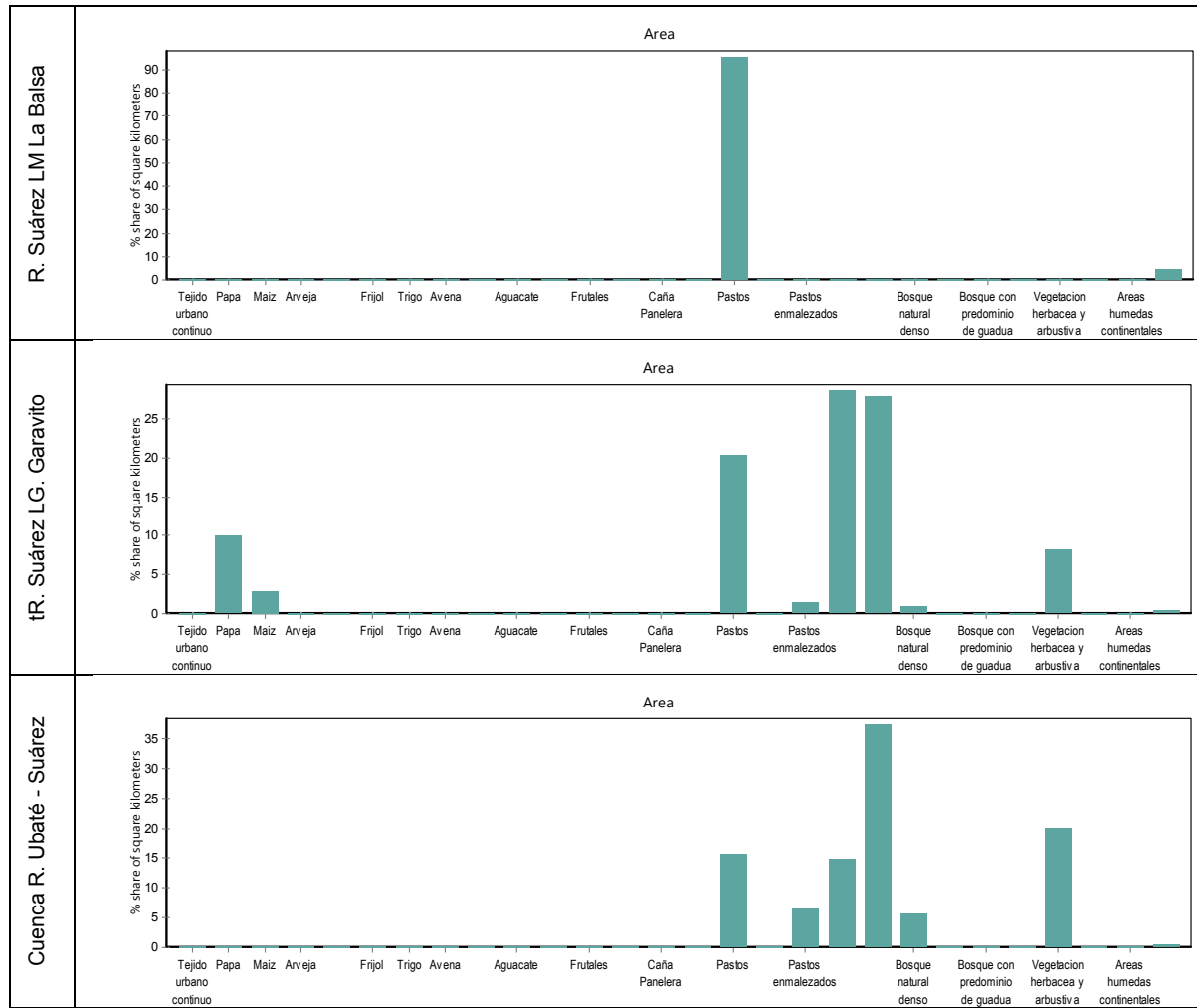








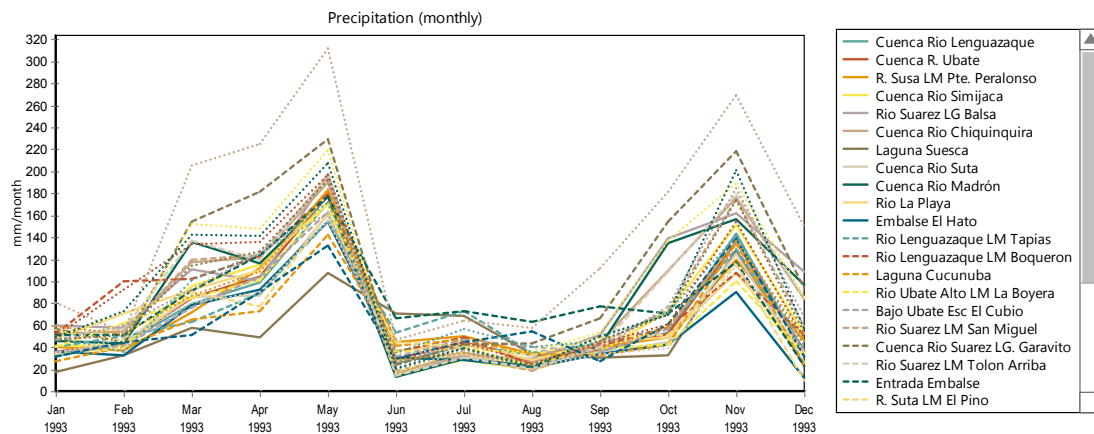




Fuente: Autor, obtenidos con WEAP.

Para la inserción de datos de precipitación por subcuenca, se efectuó interpolación con la metodología de distancia media ponderada (IDW) y se obtuvieron isoyetas mensuales. A partir de estas, se definió una valor de precipitación por subcuenca, ponderadas por áreas, como se presenta en la Figura 4-5.

**Figura 4-5.** Valores de precipitación ponderada por áreas de isoyetas del año de inicio 1993 en cada subcuenca.

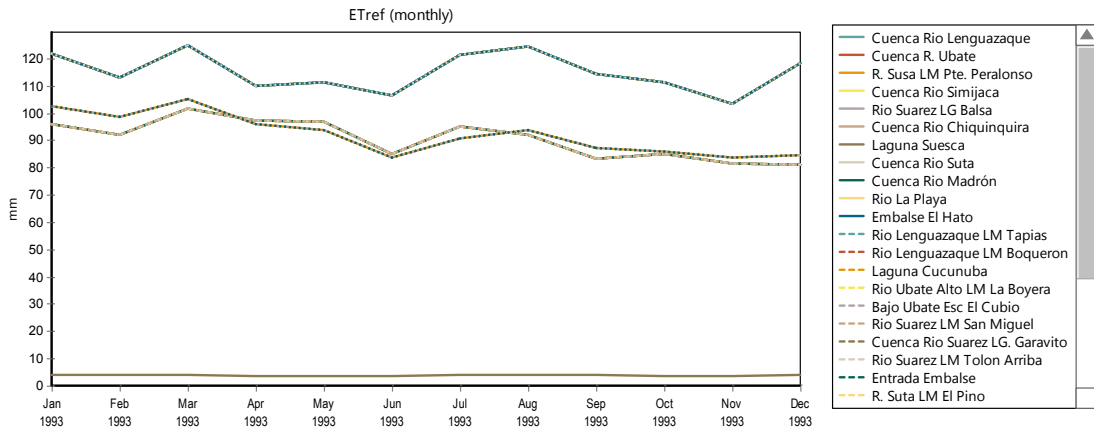


Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

Para el cálculo de la Evapotranspiración potencial, WEAP emplea los datos de temperatura de ocho estaciones, y los datos de humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento de tres estaciones climatológicas estación Esclusa Tolón (2401518), estación Novilleros (2401519) y estación Sutatausa (2401521), que representan el comportamiento de estas variables en tres zonas de la cuenca, definidas como cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, y la calcula por el método de Penman – Monteith modificado.

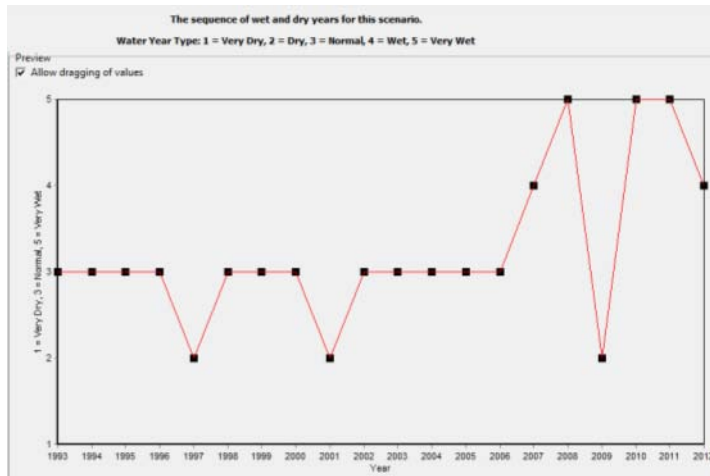
De igual forma, se caracterizan los años de referencia, de acuerdo a fenómenos ENSO, teniendo en cuenta el año de referencia, como se presenta en la Figura 4-7.

**Figura 4-6.** Valores de evapotranspiración de referencia calculada para el año de inicio 1993 en cada subcuenca.



Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

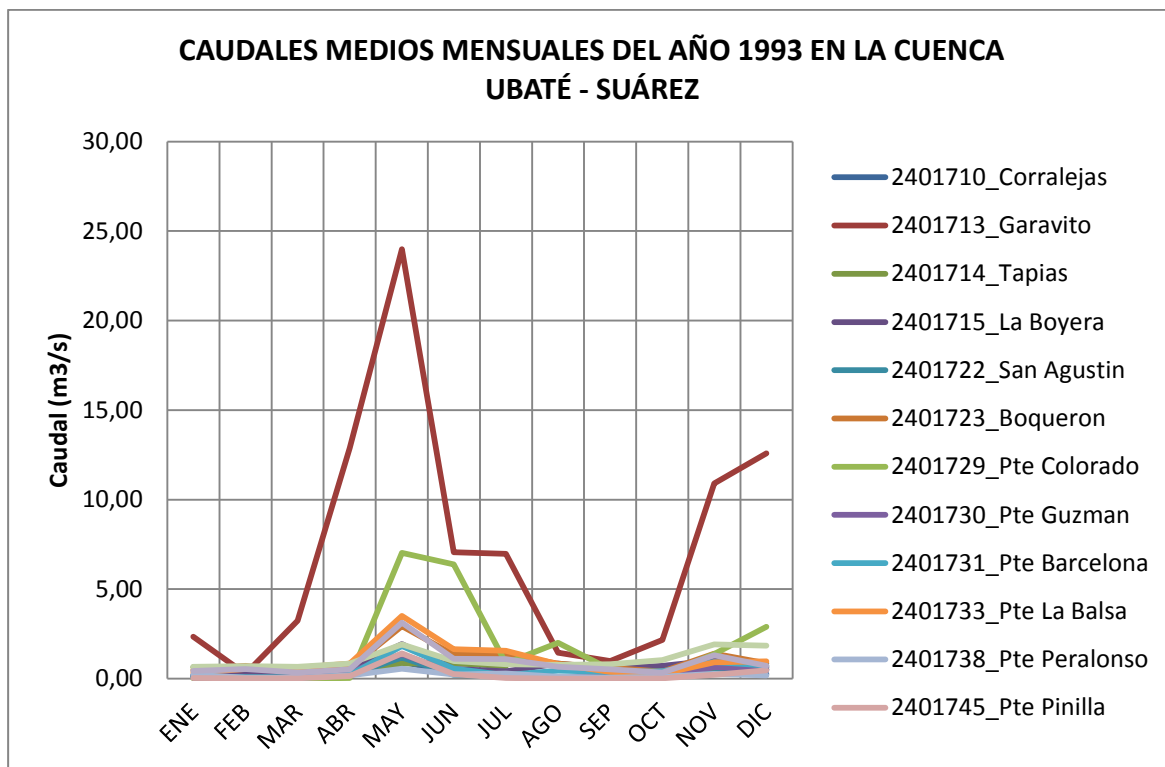
**Figura 4-7.** Condiciones climáticas e hidrológicas para el periodo histórico de referencia que caracterizan variabilidad climática por fenómenos como ENSO, para la cuenca Ubaté Suárez.



Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

Además, se ingresan los valores de caudal para cada una de las estaciones medidoras de caudal que fueron seleccionadas en la ventana de tiempo. Estos caudales mensuales se presentan en la Figura 4-8.

**Figura 4-8.** Caudales medios mensuales del año 1993 para cada una de las estaciones medidoras de caudal seleccionadas en la cuenca Ubaté - Suárez.



Se ingresan los puntos de demanda hídrica, para cada uno de los municipios de la cuenca, con datos de población urbana y rural.

La población es separada entre urbana y rural porque la tendencia de crecimiento presenta marcadas diferencias entre una y otra, y para efectos de evaluación de la demanda, emplean diferentes fuentes de suministro y vertimiento.

La cantidad de agua captada y vertida para los cascos urbanos, de acuerdo a los presentado en los numerales 3.3.4. y 3.4., es tomado de CAR (2006) and Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA. (2006).

Para calcular la demanda de agua por parte de la población rural se ingresan los datos de dotación neta y número de habitantes, como se presenta en la Tabla 4.4 y se conectan a los nacedores de la cuenca a la cual pertenecen, como aproximación a las diversas captaciones que acueductos veredales o nacimientos que emplea la población rural.

**Tabla 4.4.** Cálculo de demanda de agua para población rural de la cuenca Ubaté Suárez por municipio.

MUNICIPIO	Nivel de Complejidad	Rural	
		Dotación Neta (lt/hab.día)	Consumo m3/año
Sutatausa	Medio	115	120971.95
Tausa	Medio	115	238543.925
Ubaté	Medio Alto	125	809935
Cucunubá	Medio	115	286017.65
Lenguazaque	Medio	115	279679.425
Guachetá	Medio	115	316911.25
Fúquene	Medio	115	189685.025
San Miguel de Sema	Medio	115	155937.125
Susa	Medio	115	178435.725
Simijaca	Medio	115	195687.45
Carmen de Carupa	Medio	115	291348.475
Caldas	Medio	115	212771.275
Chiquinquirá	Medio Alto	115	272459.725
Saboyá	Medio Alto	125	549781.25

Si se compara los valores captados entre el área urbana y rural, simulando los valores que en teoría deberían presentarse para el área urbana, se evidencia gran diferencia, siendo mucho más altos los del área urbana, como se presenta Tabla 4.5.

**Tabla 4.5.** Cálculo de demanda de agua para población urbana Comparada con la captación real de la cuenca Ubaté Suárez por municipio.

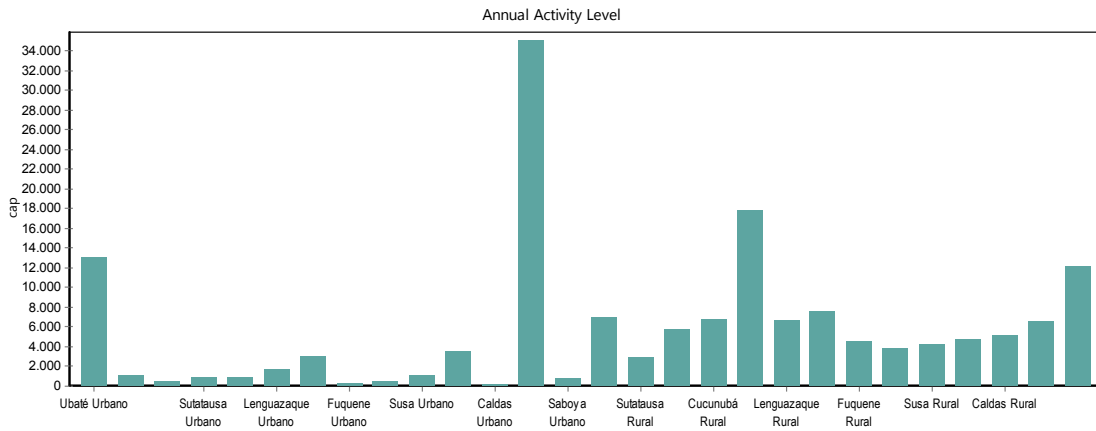
MUNICIPIO	Nivel de Complejidad	Calculado Urbano		Real Urbano		Diferencia
		Dotación Neta (lt/hab.día)	Consumo m3/año	Captación (lt/s)	Consumo m3/año	
Sutatausa	Medio	115	36728.125			
Tausa	Medio	115	18259.125	1.2	37843.2	51.75%
Ubaté	Medio Alto	125	596775	48	1513728	60.58%
Cucunubá	Medio	115	37987.375	4	126144	69.89%
Lenguazaque	Medio	115	71693.3	50	1576800	95.45%

MUNICIPIO	Nivel de Complejidad	Calculado Urbano		Real Urbano		Diferencia
		Dotación Neta (lt/hab.día)	Consumo m3/año	Captación (lt/s)	Consumo m3/año	
Guachetá	Medio	115	126596.6	30	946080	86.62%
Fúquene	Medio	115	8646.85	3	94608	90.86%
San Miguel de Sema	Medio	115	18133.2			
Susa	Medio	115	46634.225	4	126144	63.03%
Simijaca	Medio	115	146408.8	20	630720	76.79%
Carmen de Carupa	Medio	115	47473.725	5	157680	69.89%
Caldas	Medio	115	5792.55			
Chiquinquirá	Medio Alto	125	1594411.25	100	3153600	49.44%
Saboyá	Medio Alto	115	28501.025	7	220752	87.09%

Los valores de captación con los cuales no se cuenta, se calculan con valores teóricos y se les adiciona la diferencia calculada entre estos y los valores reales. Estos datos se ingresan en WEAP, como se presenta en la Figura 4-9 y Figura 4-10.

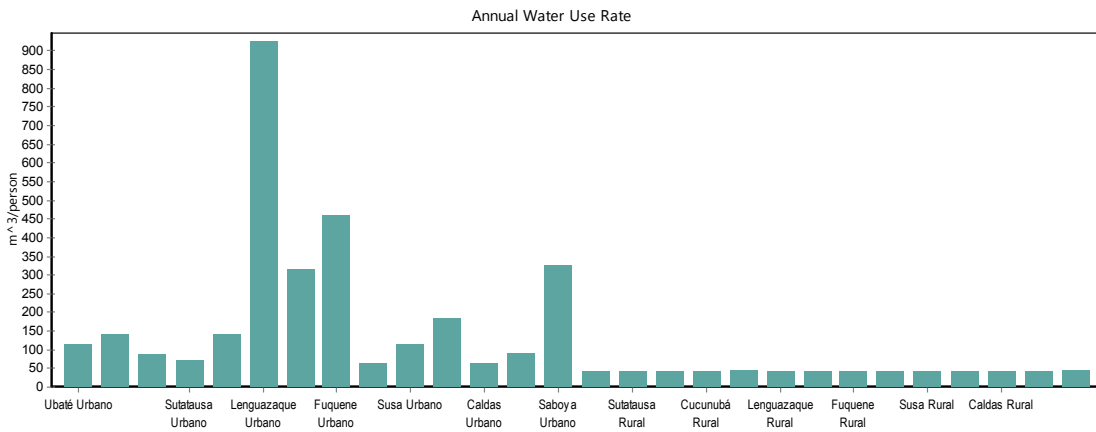
Por su parte, se ingresan los vertimientos de centros urbanos de acuerdo a lo presentado en el numeral 3.4.2., es tomado de CAR (2006) y Unión Temporal AUDICON - AMBIOTEC, LTDA. (2006), como flujos de retorno. No se ingresan como plantas de tratamiento de aguas residuales debido a que no se cuenta con datos de calidad del agua antes y después del tratamiento, y por ende, de registros de eficiencia de remoción y consumo.

**Figura 4-9.** Número de habitantes en el casco urbano y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez.



Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

**Figura 4-10.** Dotación neta urbana y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez.

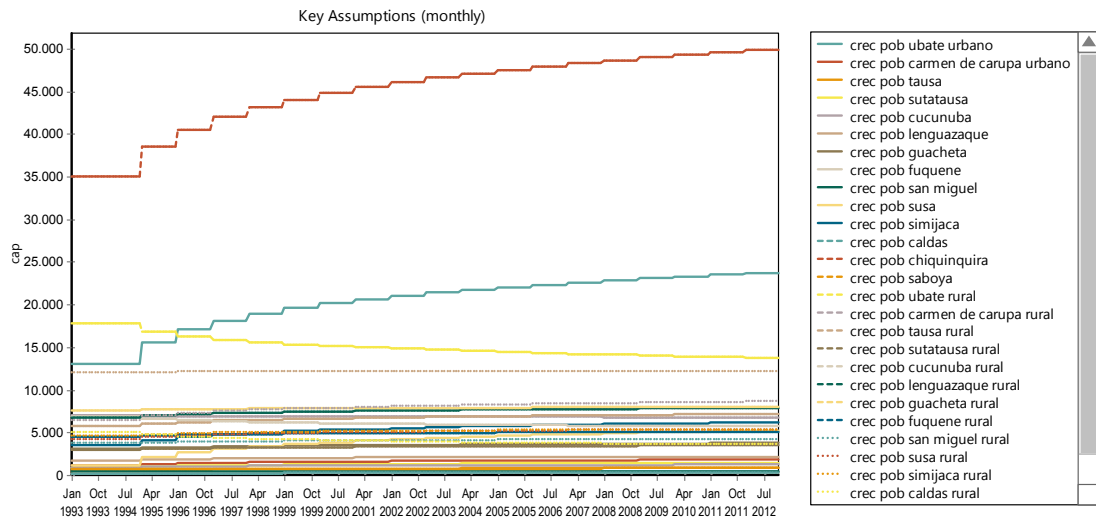


Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

Para el escenario de referencia presenta la ecuación de crecimiento poblacional para cada casco urbano en la cuenca Ubaté Suárez como se presenta en la Figura 4-11.

**Figura 4-11.** Número de habitantes para el escenario de referencia en el casco urbano y rural de los municipios ubicados en la cuenca Ubaté – Suárez.

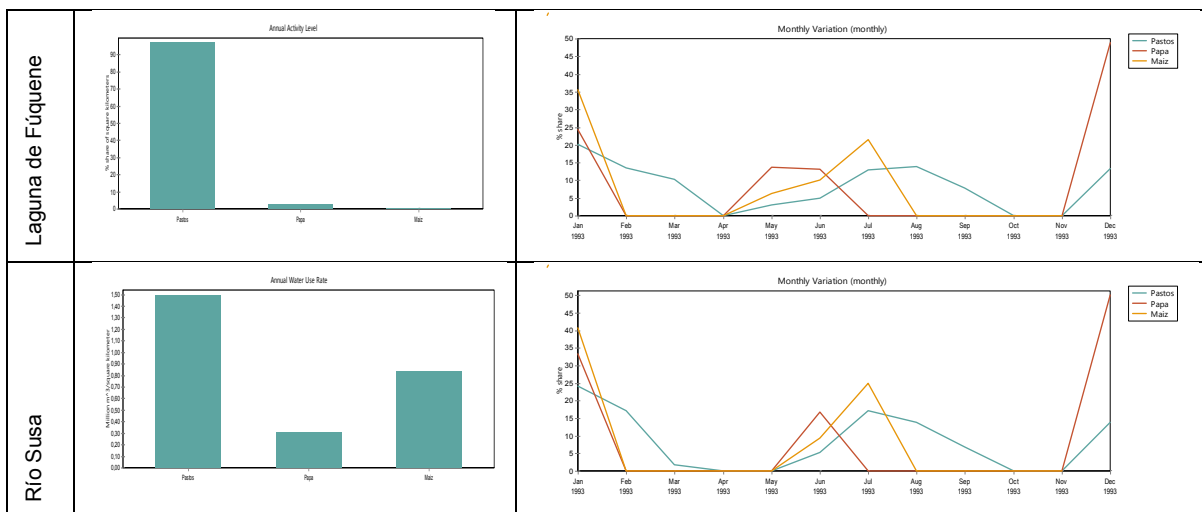


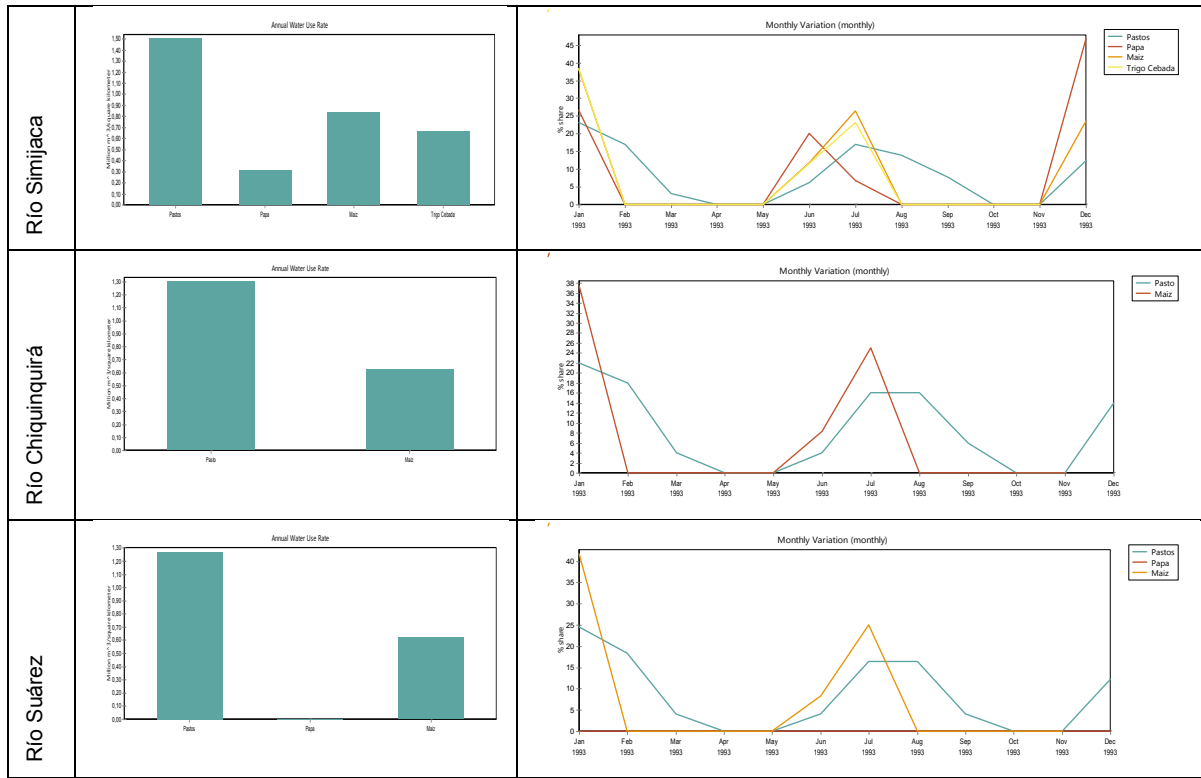


Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

De igual forma, se ingresan los puntos de demanda hídrica para riego, los cuales son las cinco cuencas hidrográficas que cuentan con un distrito de riego con administración centralizada en la CAR, con los módulos de riego con variación mensual, como se presenta en la Figura 4-12.

**Figura 4-12.** Módulos de riego con variación mensual para diferentes cultivos en las cuencas con distrito de riego administrado por la CAR.

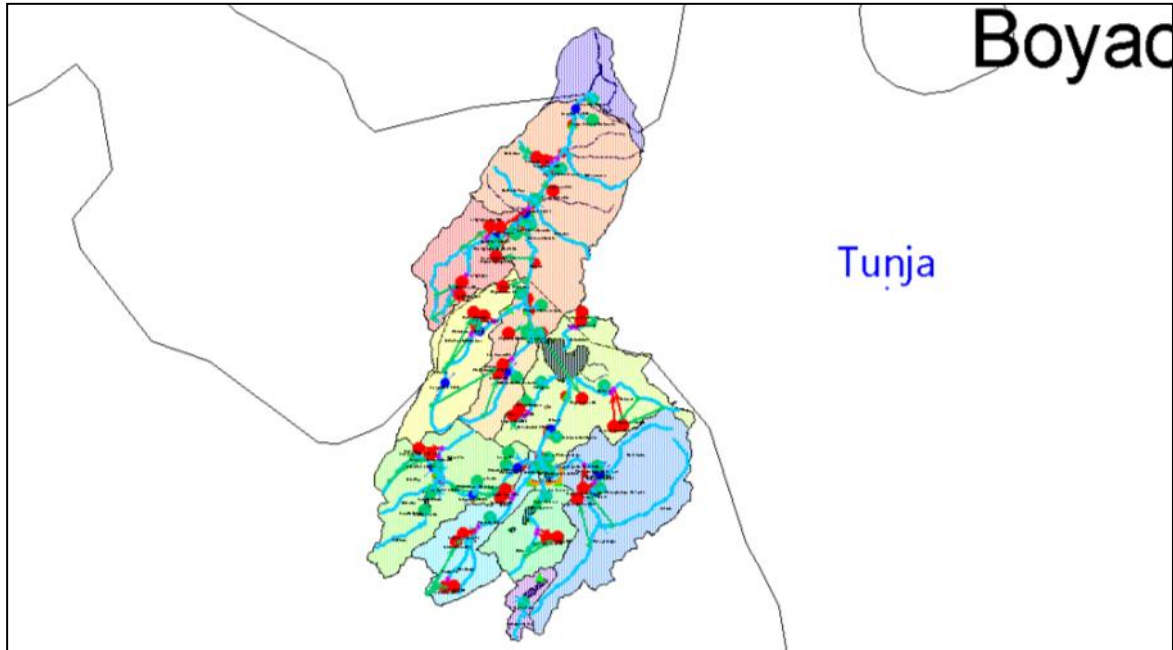




Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

Finalmente se configura el esquema presentado en la Figura 4-13.

**Figura 4-13.** Esquema con sitios de demanda en WEAP de la cuenca Ubaté - Suárez



Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

### 4.3.2 Calibración y Resultados

Los parámetros que se calibran para la modelación hidrológica son los relacionados con el método de Humedad del Suelo para el cálculo de Lluvia – escorrentía. Los parámetros fueron definidos a partir de información secundaria encontrada en estudios previos (ver numeral 2.6) o fueron estimados de acuerdo a la respuesta hidrológica de la cuenca, tomando como referencia los puntos de control dónde se encuentran datos de estaciones hidrológicas. Los parámetros de calibración se presentan en la Tabla 4.6:

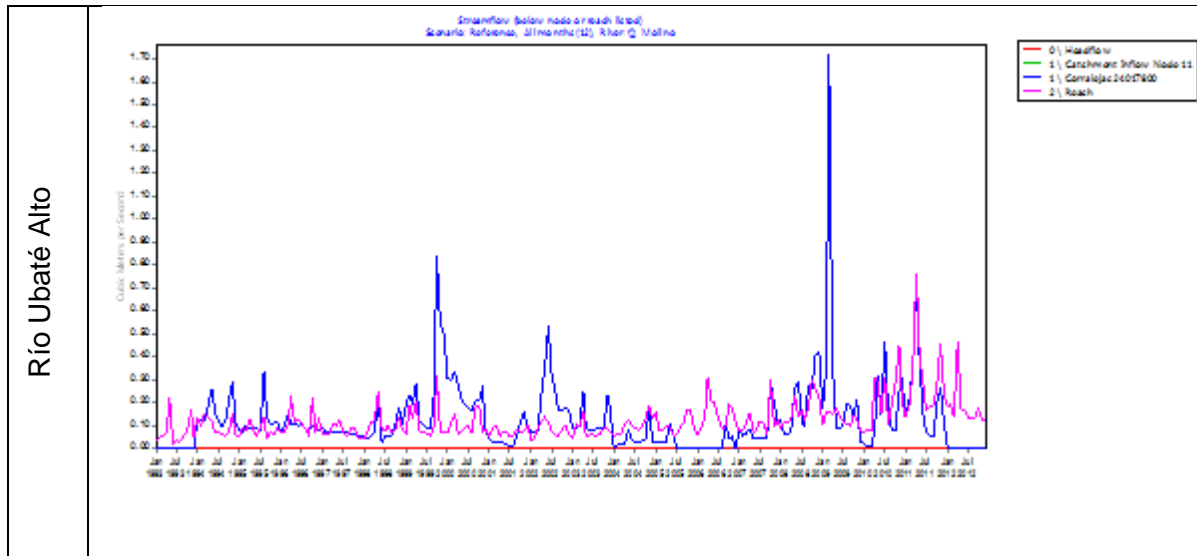
**Tabla 4.6.** Parámetros de Calibración empleados en el Modelo Hidrológico WEAP

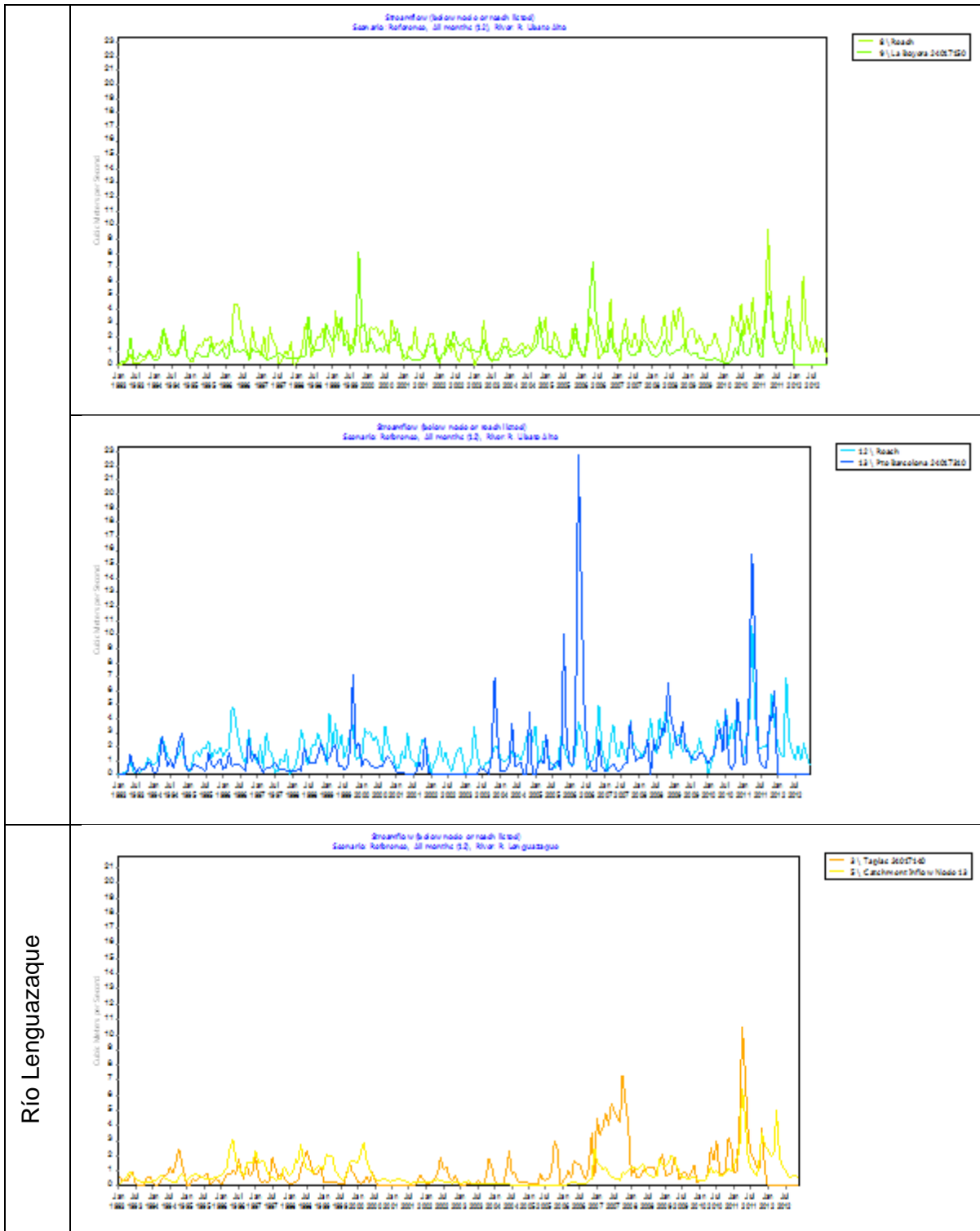
Parámetro de Calibración	Tipo
Kc	Suelo
Capacidad de Agua del Suelo (Soil Water Capacity – SWC)	Suelo
Capacidad de Agua Profunda (Deep Water Capacity – DWC)	Suelo
Factor de Resistencia de la Escorrentía (Runoff Resistance Factor – RRF)	Suelo
Conductividad de la Zona de Raíces (Root Zone Conductivity – RZC)	Suelo
Conductividad Profunda (Deep Conductivity – DC)	Suelo
Dirección de Flujo Preferencial (Preferred Flow Direction – PFD)	Suelo
Inicial Z1 (Initial Z1)	Suelo
Inicial Z2 (Initial Z2)	Suelo

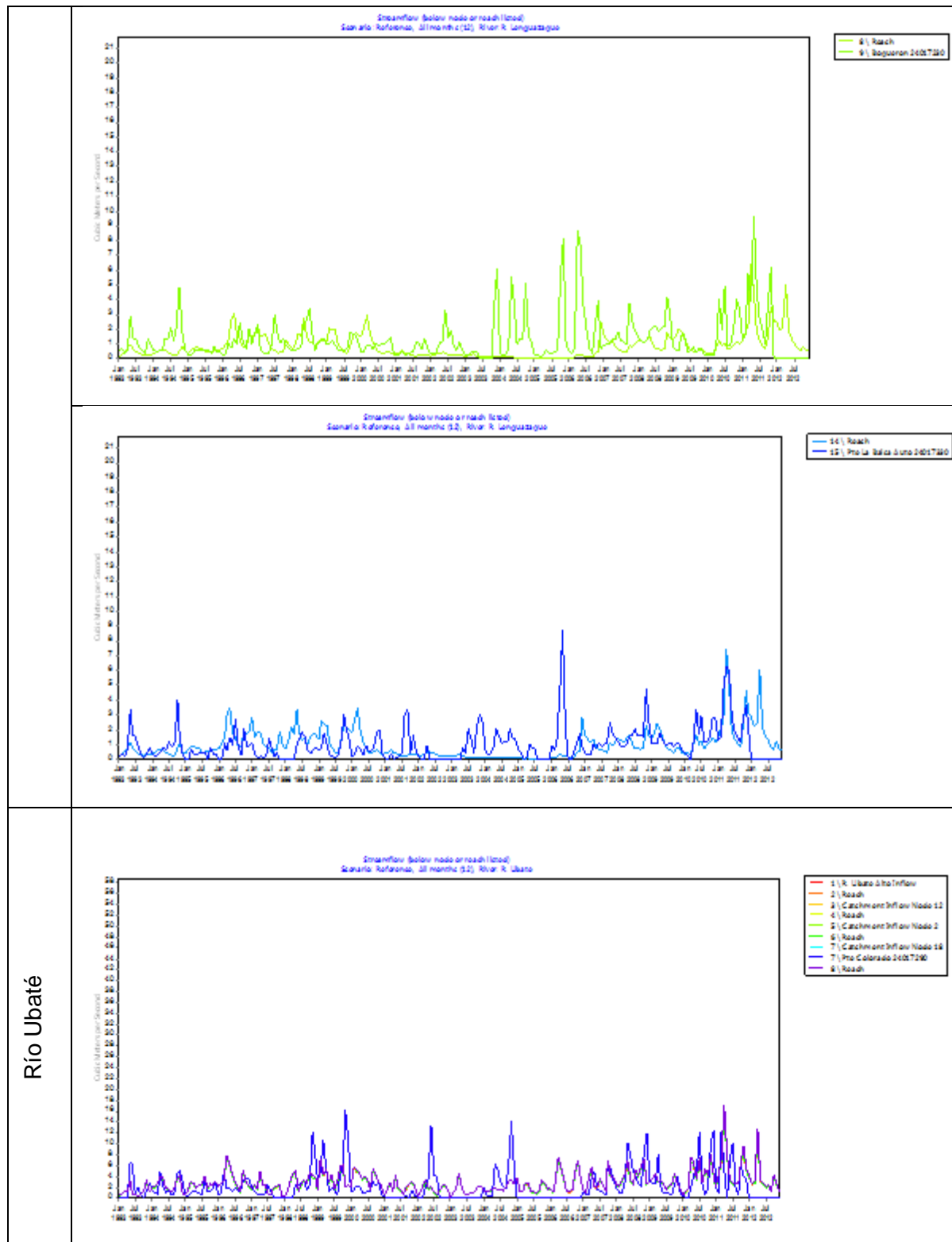
La calibración se desarrolló manualmente, procurando la reproducción adecuada de los caudales medios mensuales para el periodo histórico de datos, teniendo en cuenta métricas estadísticas de comparación entre los caudales simulados y observados (Anexo C), como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de Nash (Dawson, C.W., Abrahart, R.J., See, L.M., 2007). No se tuvo en cuenta, periodos en los cuales se presentaron datos faltantes de registro de caudal.

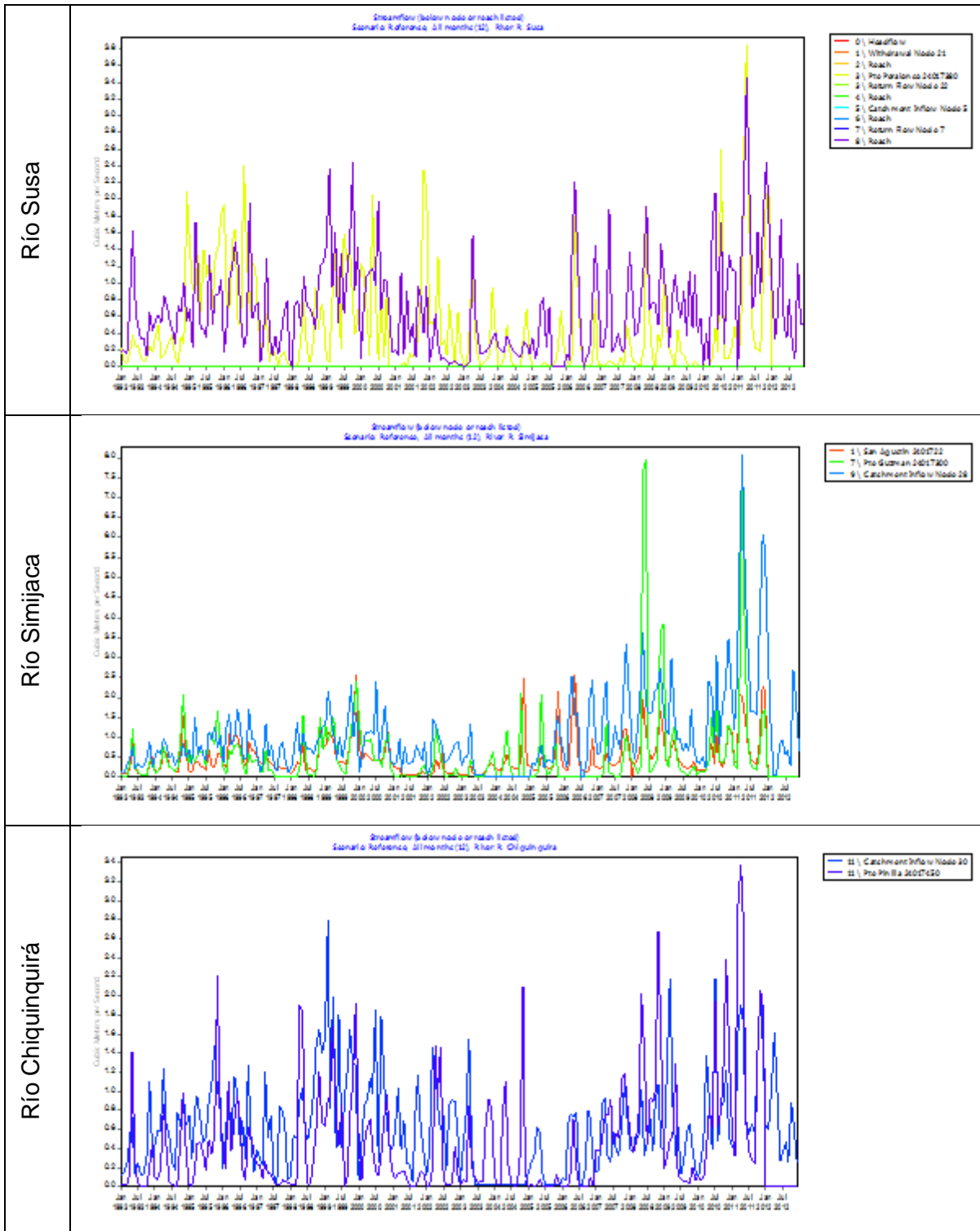
Los resultados se presentan en la Figura 4-14 y permiten evidenciar que los puntos que mejor fueron calibrados se presentaron en el río Lenguaque y en el río Simijaca.

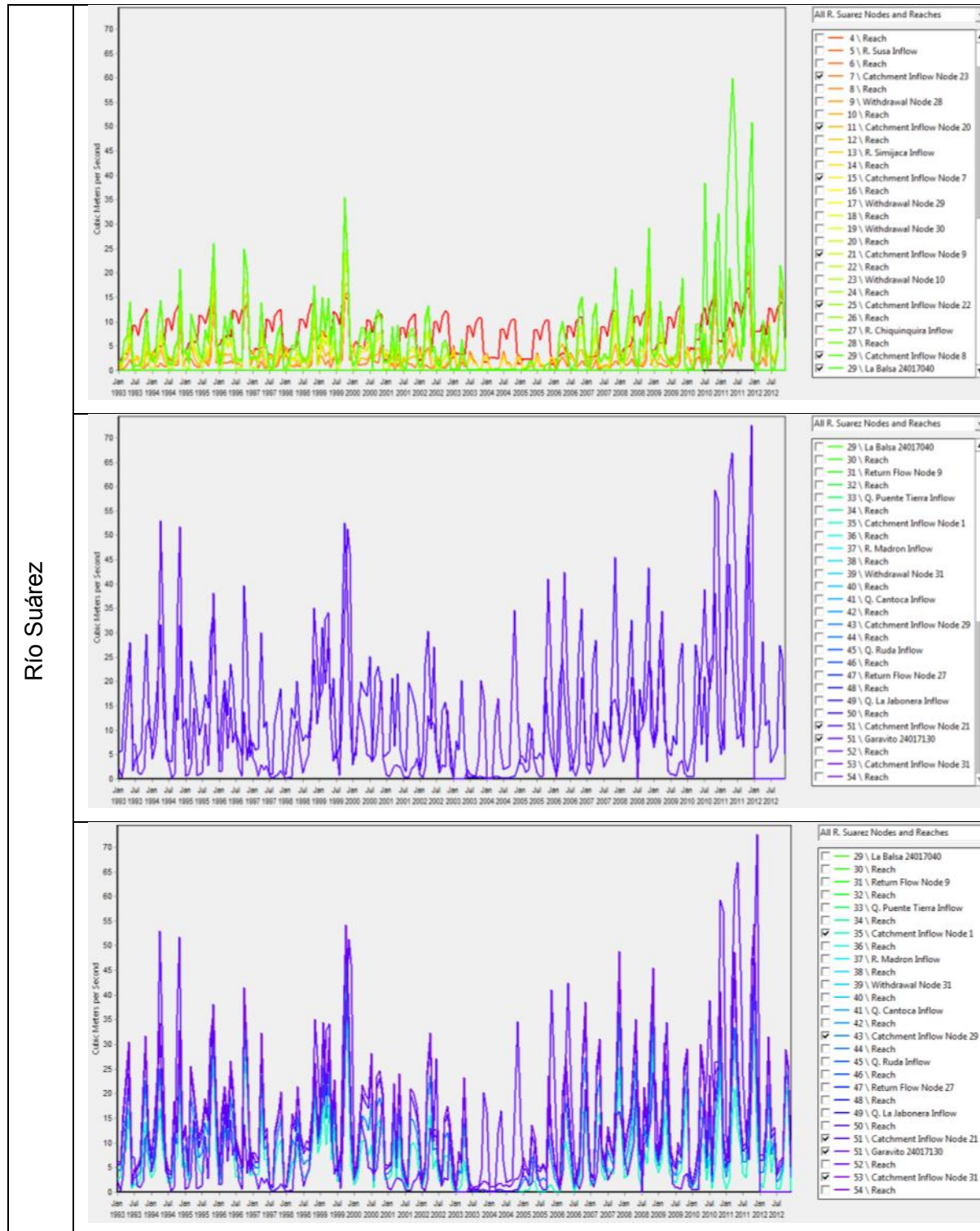
**Figura 4-14.** Resultados calibración modelo hidrológico por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.













### 4.3.3 Análisis de Resultados

- Se observa que para la quebrada el Molino, monitoreada por la estación Corralejas (24017800), y el río Ubaté en la parte alta, monitoreado por la estación la Boyera (24017150), en la parte media por la estación Pte. Barcelona (24017310) se presenta una óptima calibración para caudales medios, en contraste con los caudales medios máximos (picos), los cuales si no son representados, ya que registran caudales más bajos a los observados. En esta corriente, de modo general, se observan picos que no son bien representados en periodos del año 2000, 2006 y 2009, lo cual puede ser producto de datos de precipitación faltantes o por crecientes súbitas por tormentas de corta duración y alta intensidad.
- En el río Lenguazaque, Tapias (24017140), Boqueron (24017230), Pte la Balsa (24017330) se observa un ajuste óptimo de caudales medios, y caudales altos en el periodo de 2010 a 2011. Para el periodo de 2003 a 2006 no se representan adecuadamente, producto del vacío de datos de precipitación de las estaciones climatológicas empleadas en la interpolación de precipitación de esta cuenca.
- Para el río Ubaté en su parte baja, cercana a su desembocadura en la Laguna de Fúquene, después de recibir al río Lenguazaque y Suta, se observa una calibración que registra valores cercanos a los observados, a excepción de picos puntuales registrados en el año 2000, 2002, 2005, lo cual puede ser producto de representación de caudales medios pico que no fueron representados aguas arriba, o puede ser producto de operación de la compuerta Cartagena (conexión entre el río Lenguazaque y la Laguna Cucunubá) la cual opera como atenuador de picos del río Lenguazaque y hace que la zona de desembocadura de la Laguna de Cucunubá almacene dicha agua, generándose remanso aguas arriba; o por la operación de la compuerta el Cubio, la cual se encuentra unos metros aguas abajo, y puede represar el agua, de modo tal que genere remanso.
- La cuenca del río Susa, en la estación Pte Peralonso (24017380), registra valores pico frecuentes, los cuales fueron representados lo más cercano posible, en algunos casos con caudales medios superiores y otros inferiores a los observados.
- En río Simijaca presenta una calibración aceptable en caudales medios promedio y en caudales medio pico para el 2011, de acuerdo a la estación Pte Guzmán

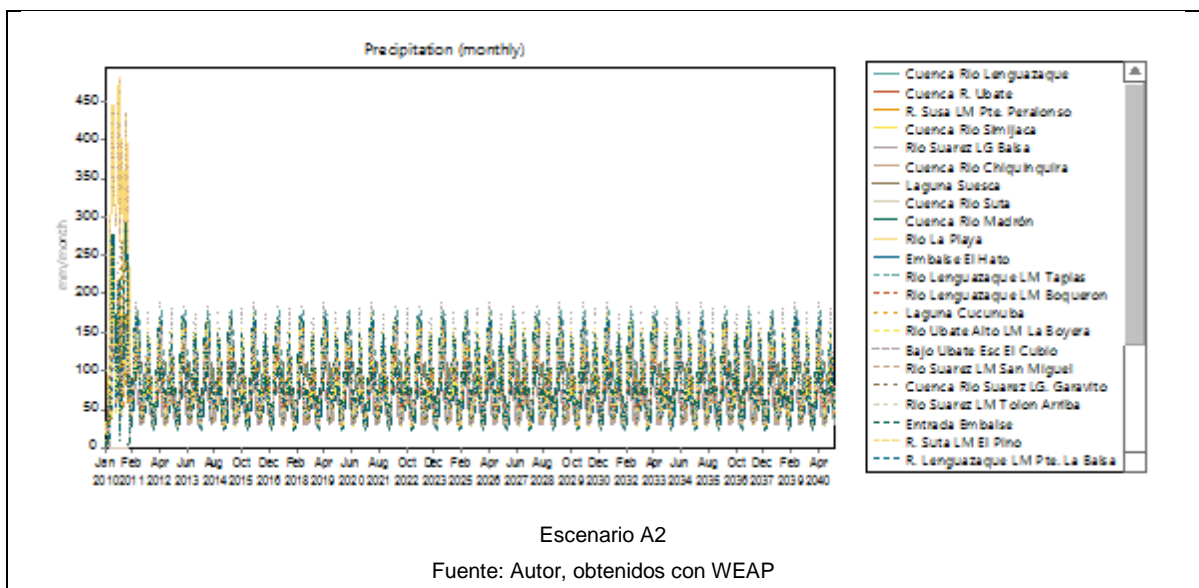
(24017300). Para el caso de caudales medios bajos y picos como el registrado en el año 2008-2009, no se obtienen representación, lo cual puede ser producto de captaciones no registradas para el caso de caudales medios bajos, o por falencia de datos de precipitación o por crecientes súbitas por tormentas de corta duración y alta intensidad en el caso de caudales medios altos.

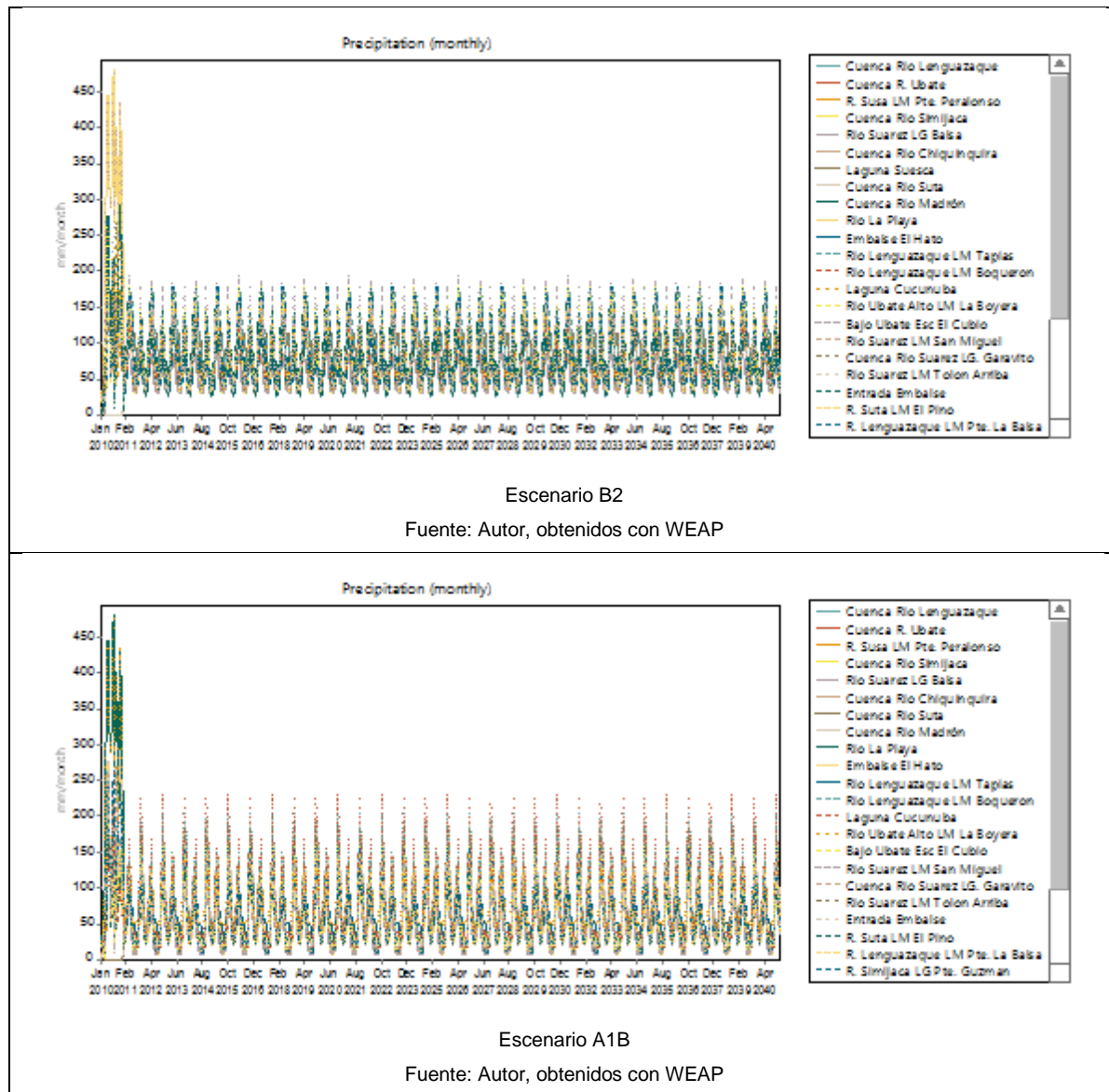
- El río Chiquinquirá, en la estación Pte Pinilla (24017450), registra valores pico frecuentes, los cuales fueron representados lo más cercano posible, en algunos casos con caudales medios superiores a los observados, lo cual puede ser producto de falencia en la calidad de datos de entrada.
- En la cabecera de río Suárez hasta la estación La Balsa (24017040) se evidencia una marcada reducción de flujo base. Los pocos caudales medios históricos registrados fueron superiores a los simulados, por lo cual se estima en este punto la calibración no es óptima, ya que en otros puntos en el periodo de caudales medios máximos 2010 – 2011 se logró una mejor representación.
- En el río Suárez, a la altura de la estación Garavito (24017130) se observa una adecuada representación de los caudales medios promedio, a pesar de que cuentan con caudales pico frecuentes. Los caudales que no se lograron representar adecuadamente fueron los caudales medios máximos del periodo 2010 – 2011, lo cual permitiría inferir que estos responden a eventos extremos (tormentas con alta intensidad y poca duración) que generan caudales mayores, y los cuales serían mejor representados con programas de eventos de crecientes como HEC-HMS.

### 4.3.4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

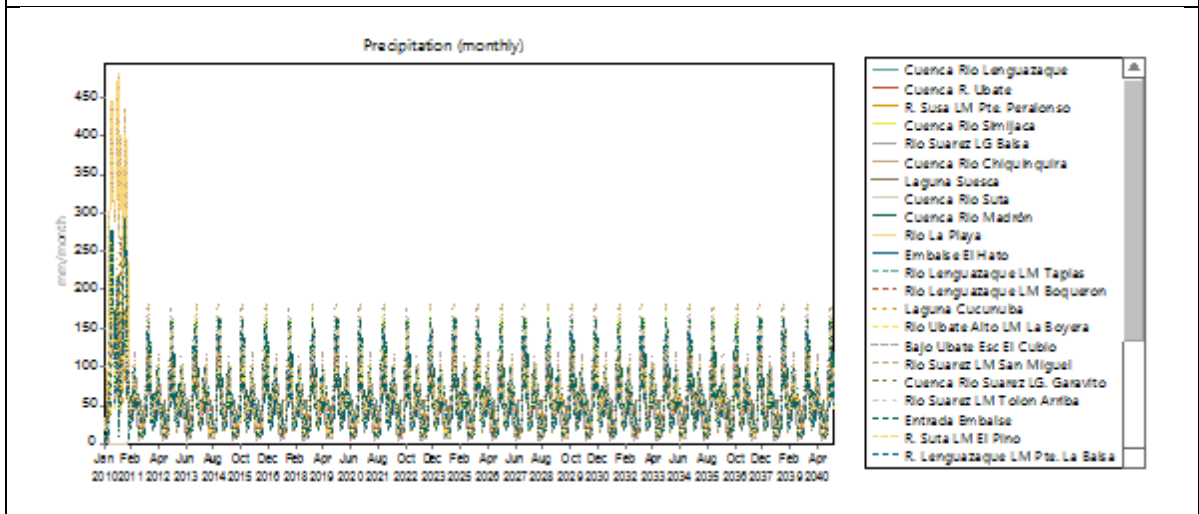
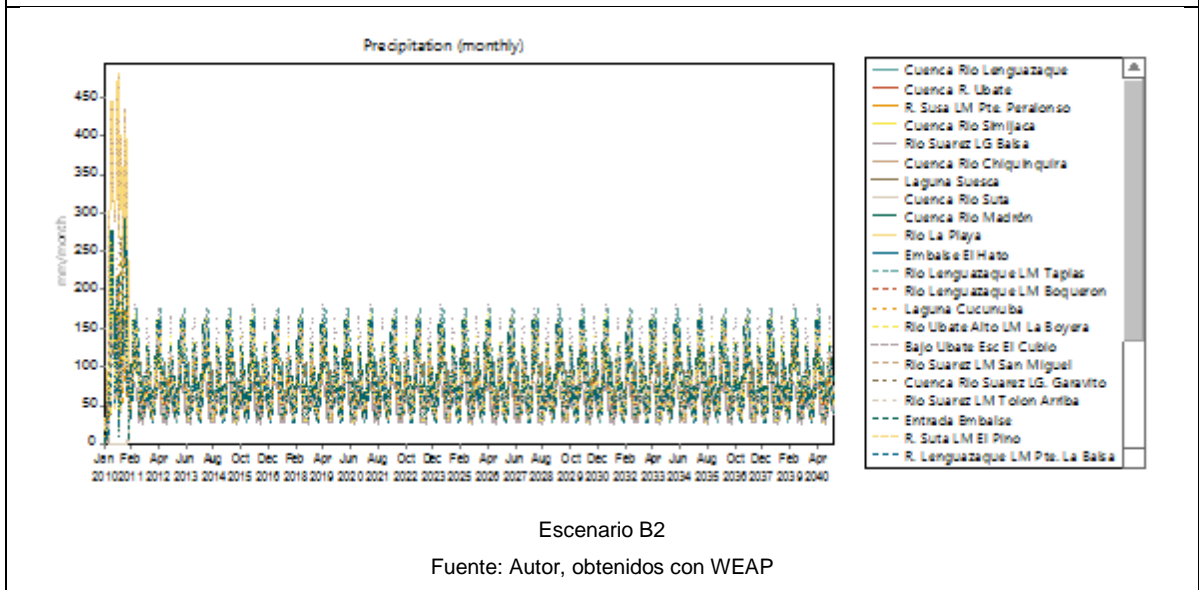
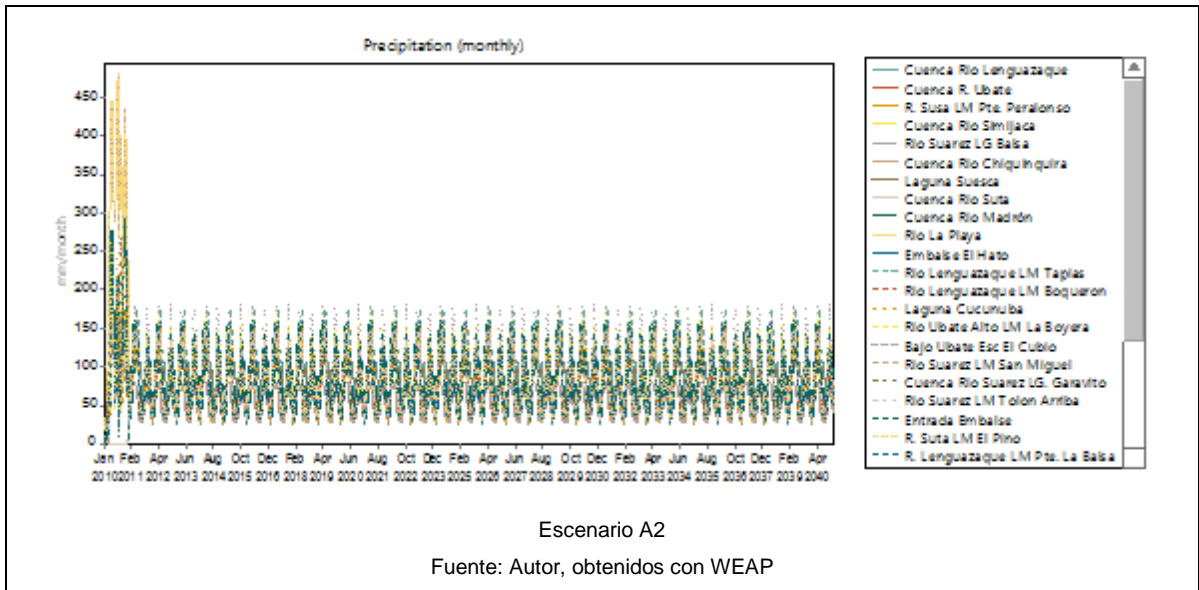
Los datos de precipitación y temperatura de escenarios futuros fueron tomados del estudio realizado bajo el Convenio Inter-administrativo No. 000976 suscrito entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Universidad Nacional de Colombia (Facultad de Ciencias Humanas – Departamento de Geografía, cuyo objeto fue *“Aunar esfuerzos administrativos, logísticos, financieros y científicos entre las entidades organizadoras con el propósito de realizar investigación científica que permita modelar y obtener escenarios de precipitación, temperatura y humedad relativa tanto a nivel anual multianual como mensual multianual por cambio climático para promover, crear, compilar y difundir el conocimiento científico”* (2011). Estos fueron tomados por cada estación y se efectuó interpolación con la metodología de distancia media ponderada (IDW) y obtuviéndose así, isoyetas mensuales para cada subcuenca, ponderadas por áreas. Esto se efectuó para los escenarios EA2, EB2 y EA1B de los años 2011-2040, 2041-2070 y para los escenarios EA2 y EB2 de los años 2071-2100, como se presenta en la Figura 4-15.

**Figura 4-15.** Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2011 hasta el año 2040 en cada subcuenca.



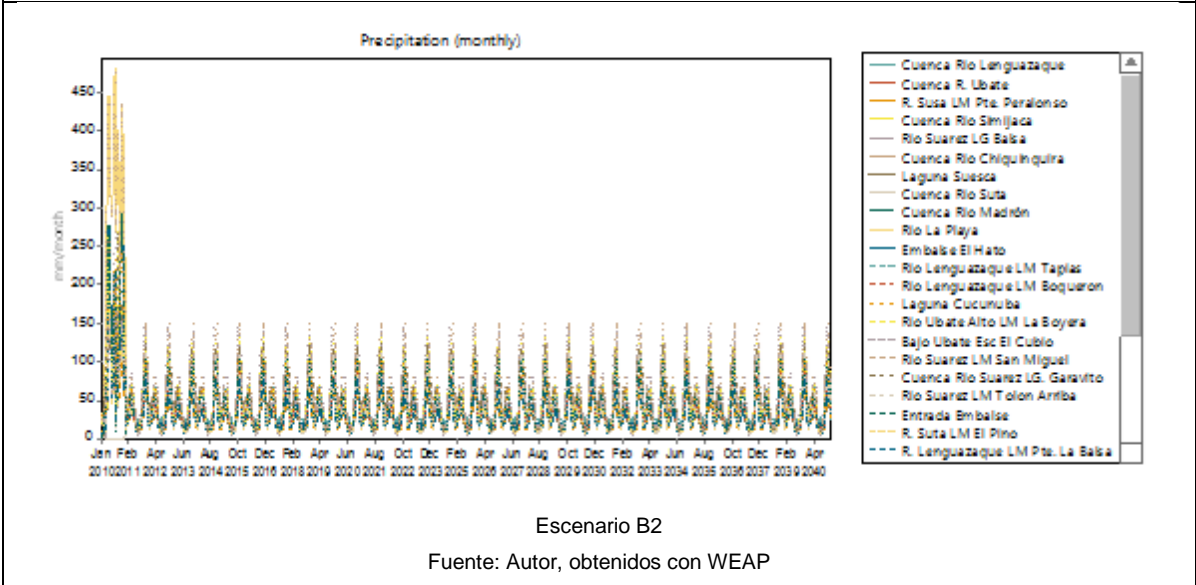
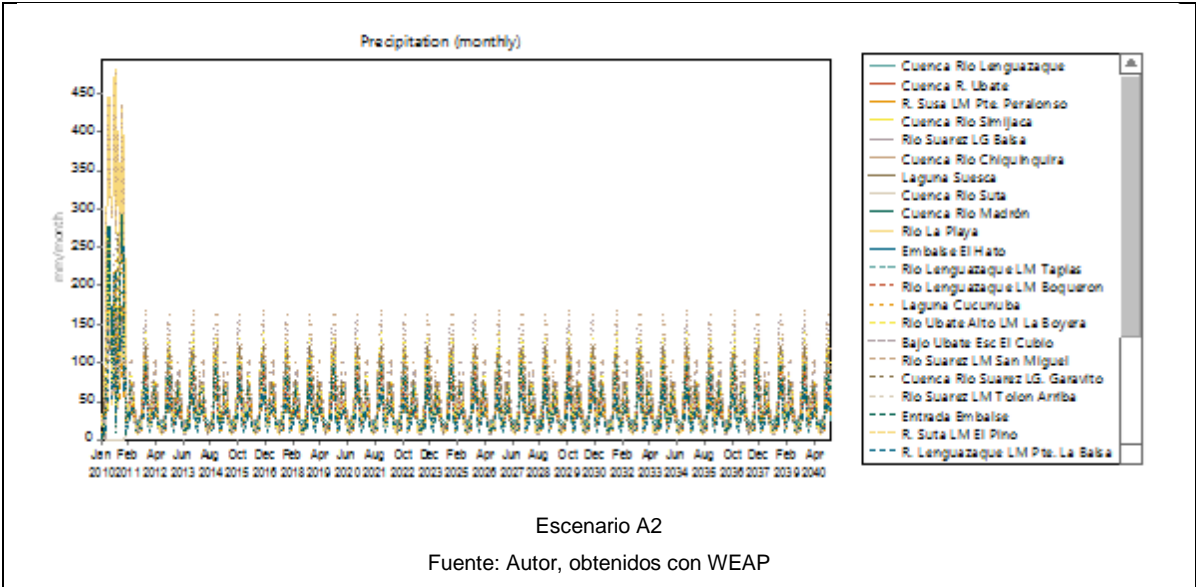


**Figura 4-16.** Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2041 hasta el año 2070 en cada subcuenca.



Escenario A1B  
Fuente: Autor, obtenidos con WEAP

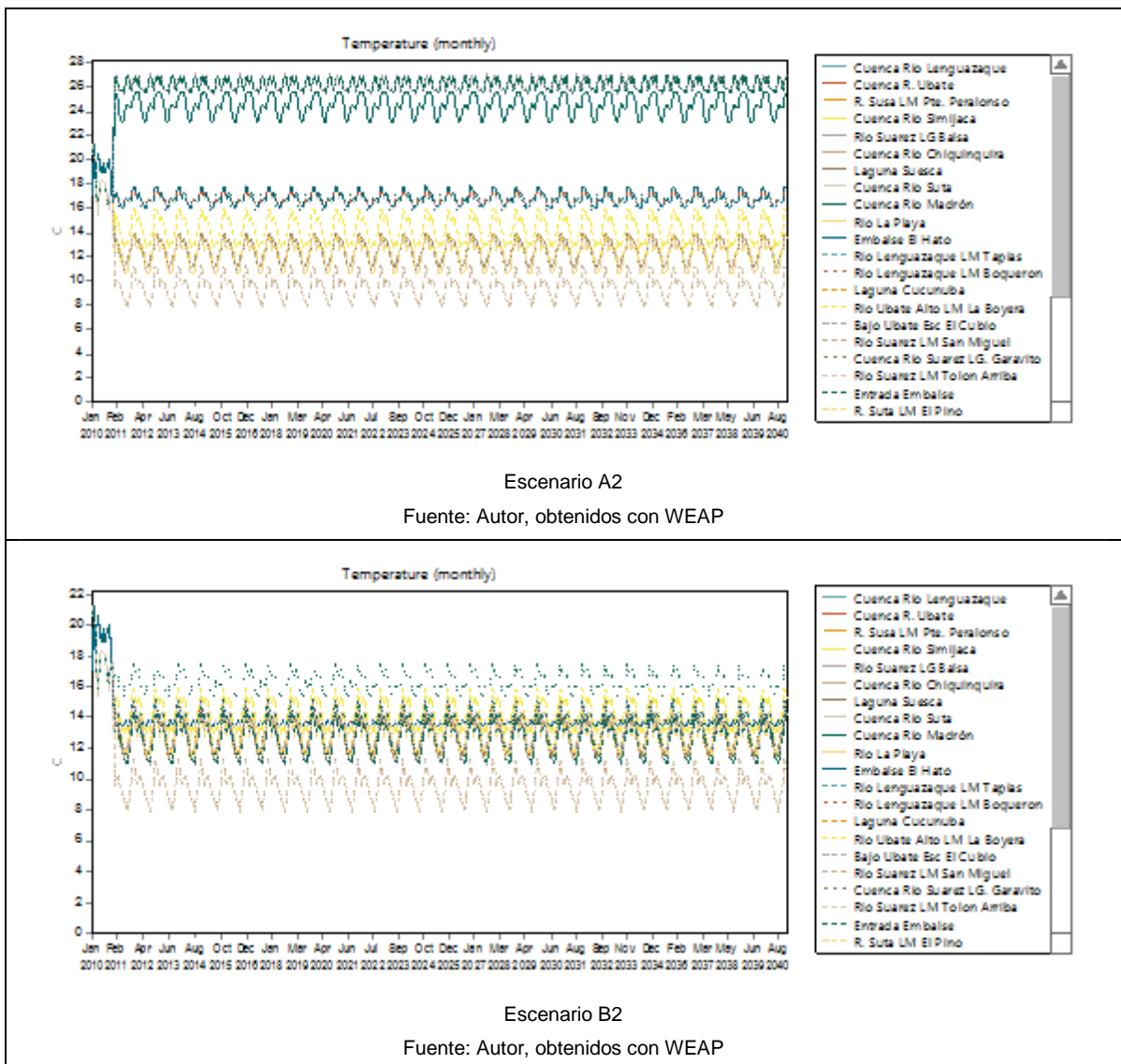
**Figura 4-17.** Valores de precipitación ponderada futura para escenario A2, B2 y A1B, por áreas de isoyetas del año de inicio 2071 hasta el año 2100 en cada subcuenca.

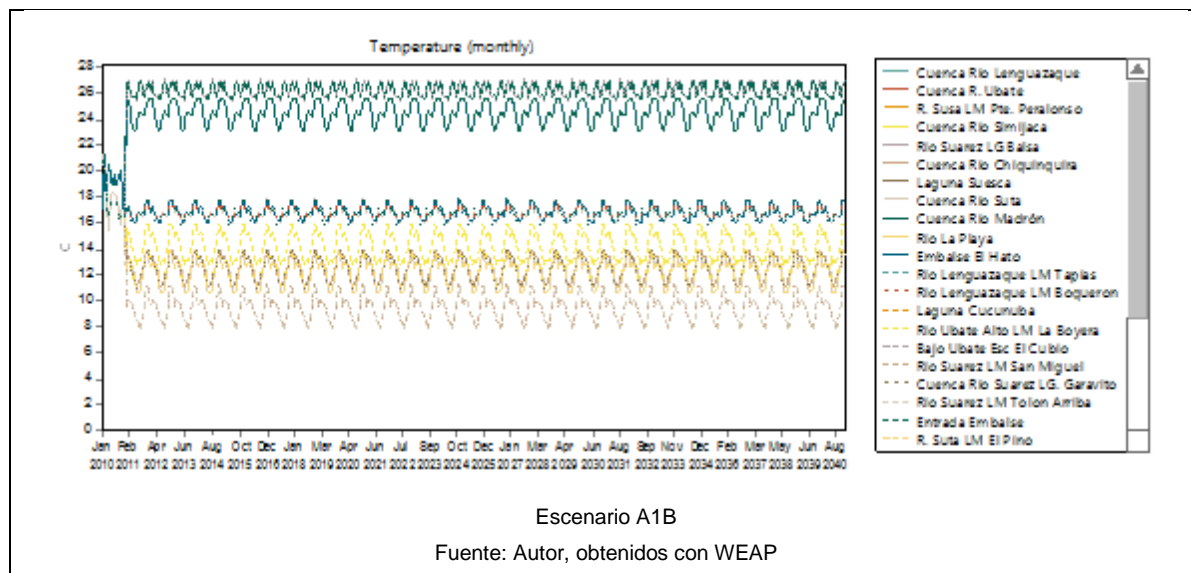


Para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia diaria se emplean los datos de temperatura, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento de tres estaciones climatológicas estación Esclusa Tolón (2401518), estación Novilleros (2401519) y

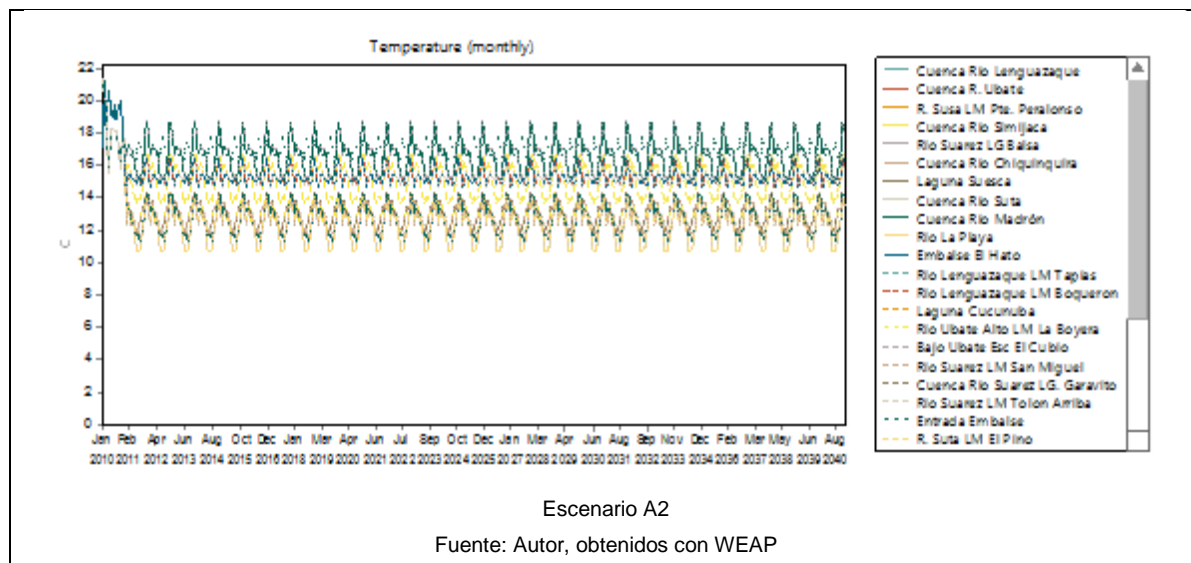
estación Sutatausa (2401521), que representan el comportamiento de estas variables en tres zonas de la cuenca, definidas como cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. Luego, estos valores son calculados mensualmente y son ingresados para cada subcuenca, como se presentan en la Figura 4-6.

**Figura 4-18.** Valores de temperatura futura para escenario A2, B2 y A1B del año de inicio 2011 hasta el año 2040 en cada subcuenca.





**Figura 4-19.** Valores de temperatura futura para escenario A2, B2 y A1B del año de inicio 2041 hasta el año 2070 en cada subcuenca.





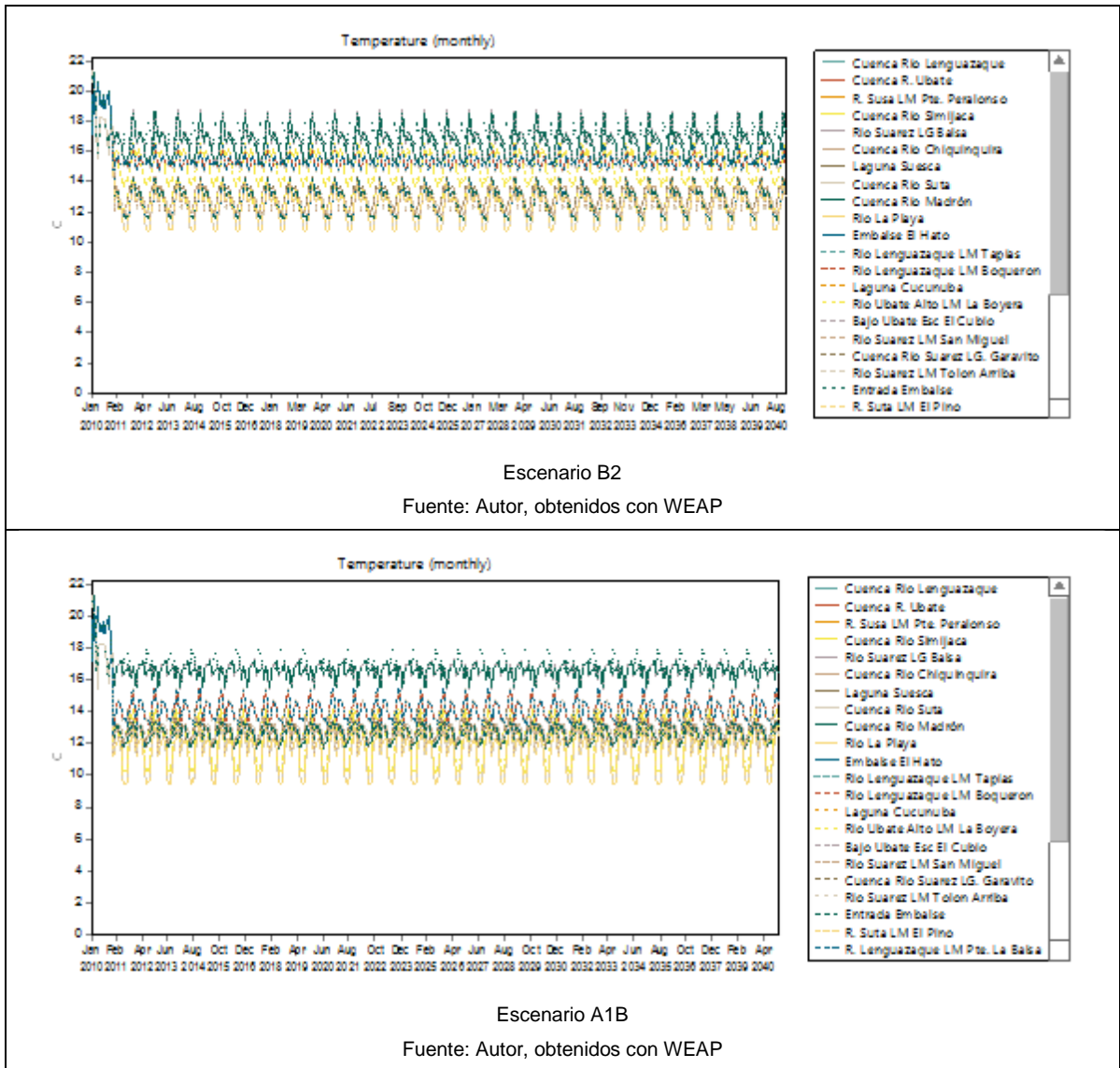
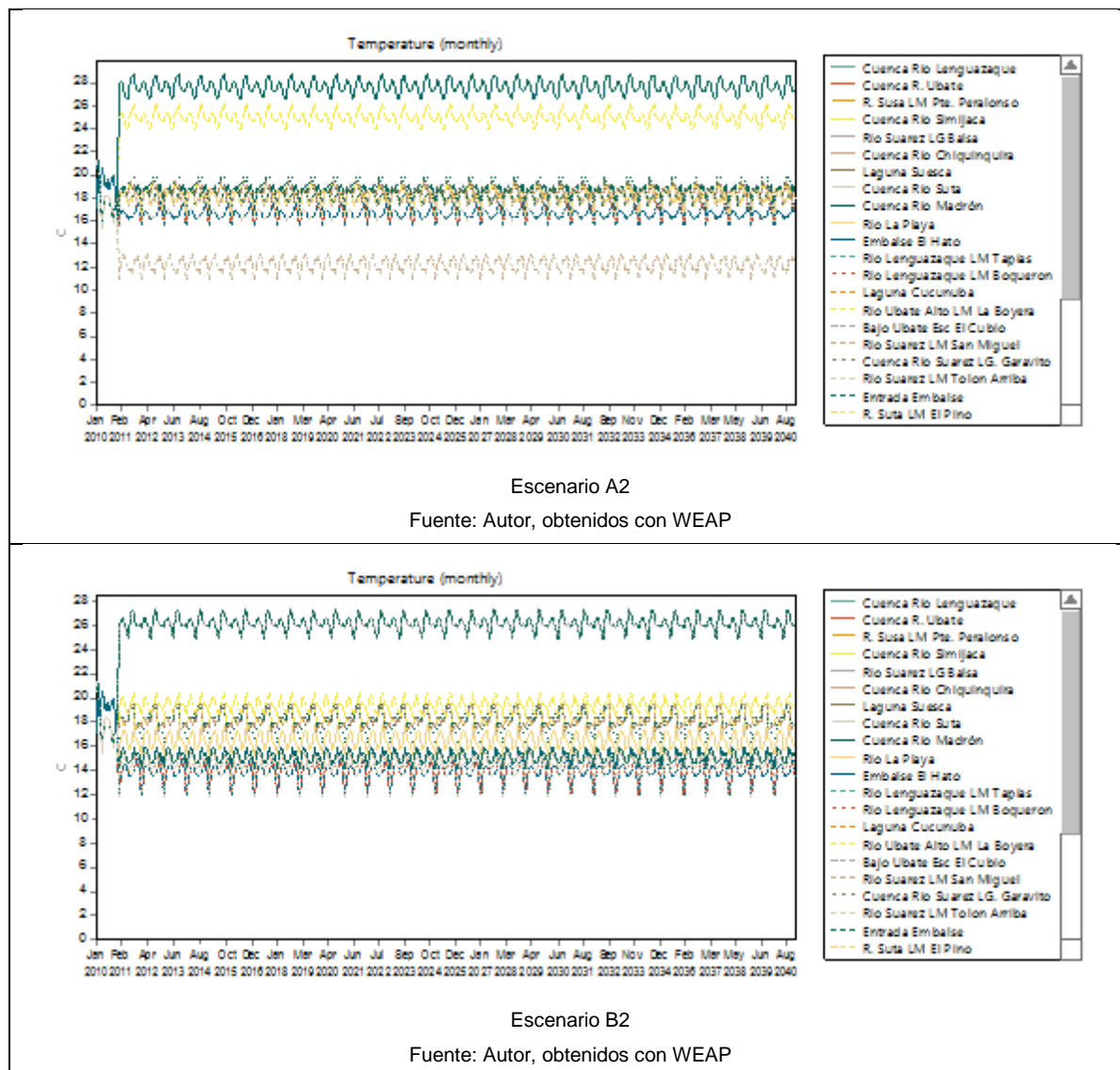
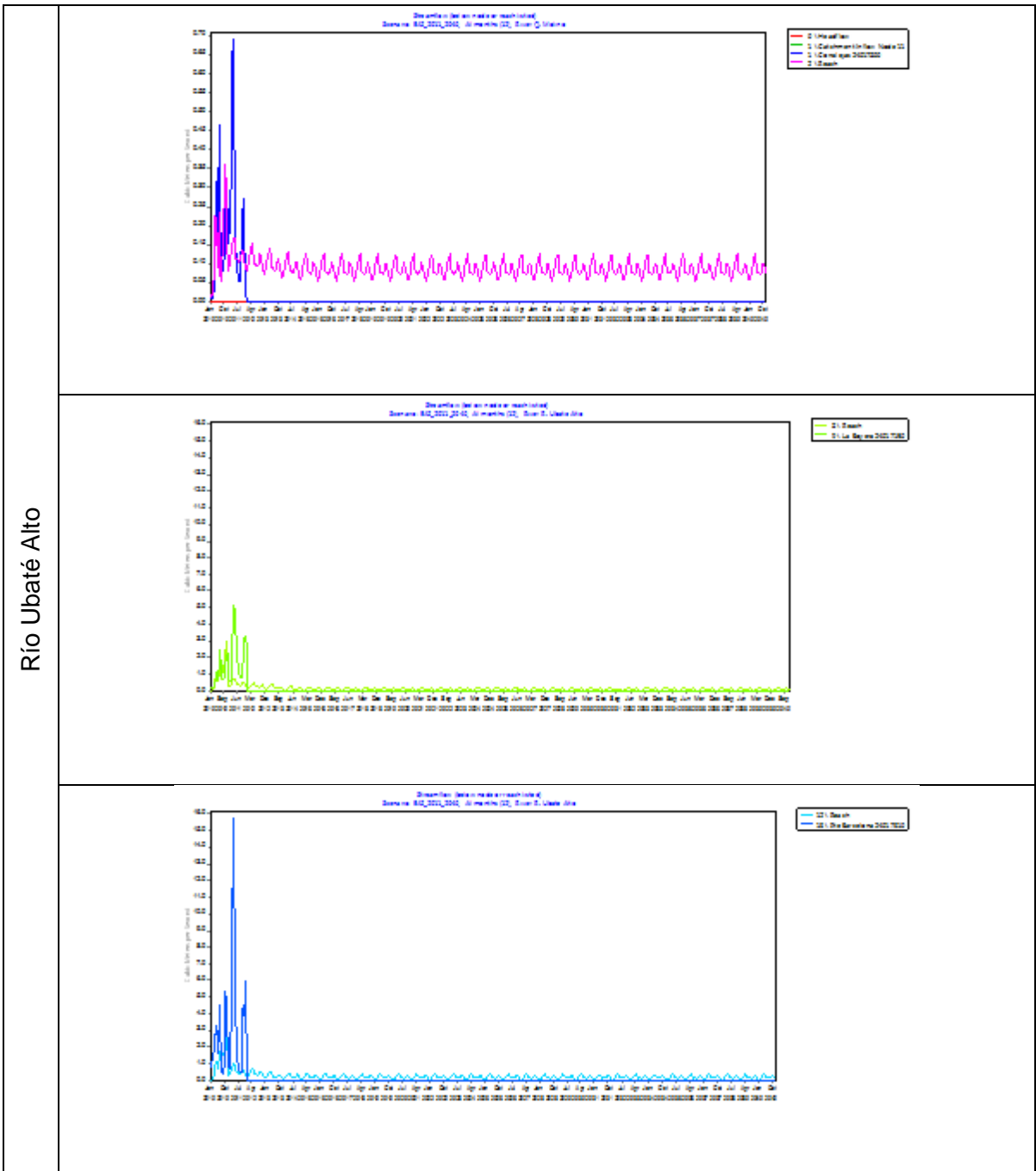


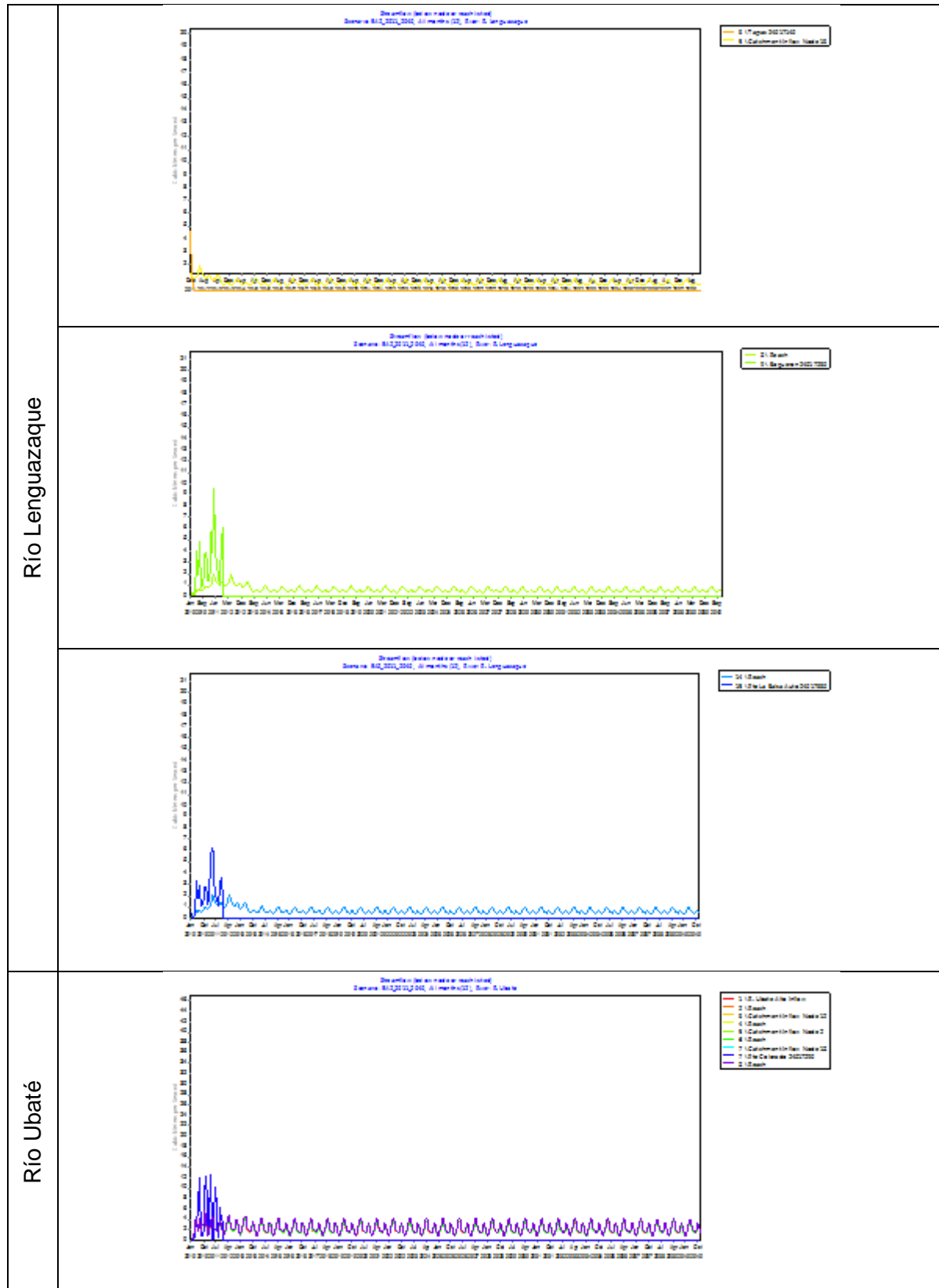
Figura 4-20. Valores de temperatura futura para escenario A2 y B2 del año de inicio 2071 hasta el año 2100 en cada subcuenca.



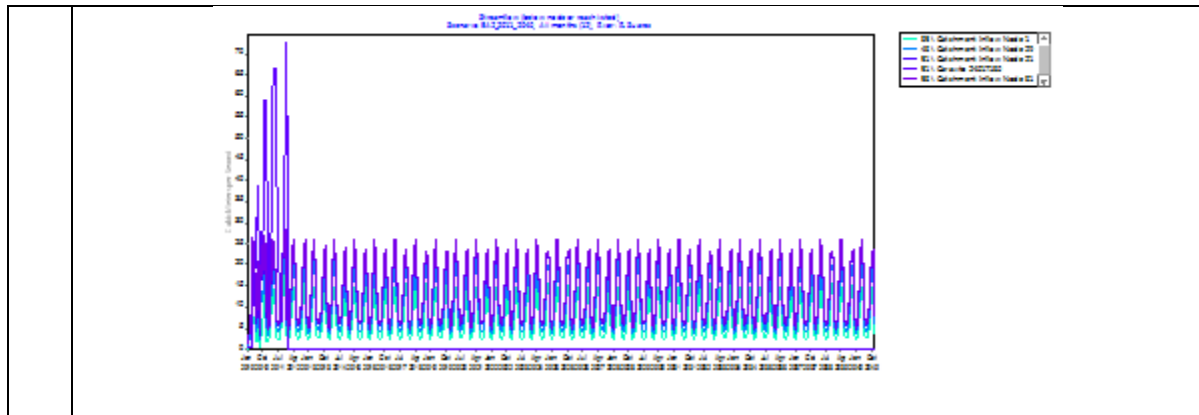
Los resultados se presentan en las siguientes figuras, para cada uno de los escenarios evaluados.

**Figura 4-21.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

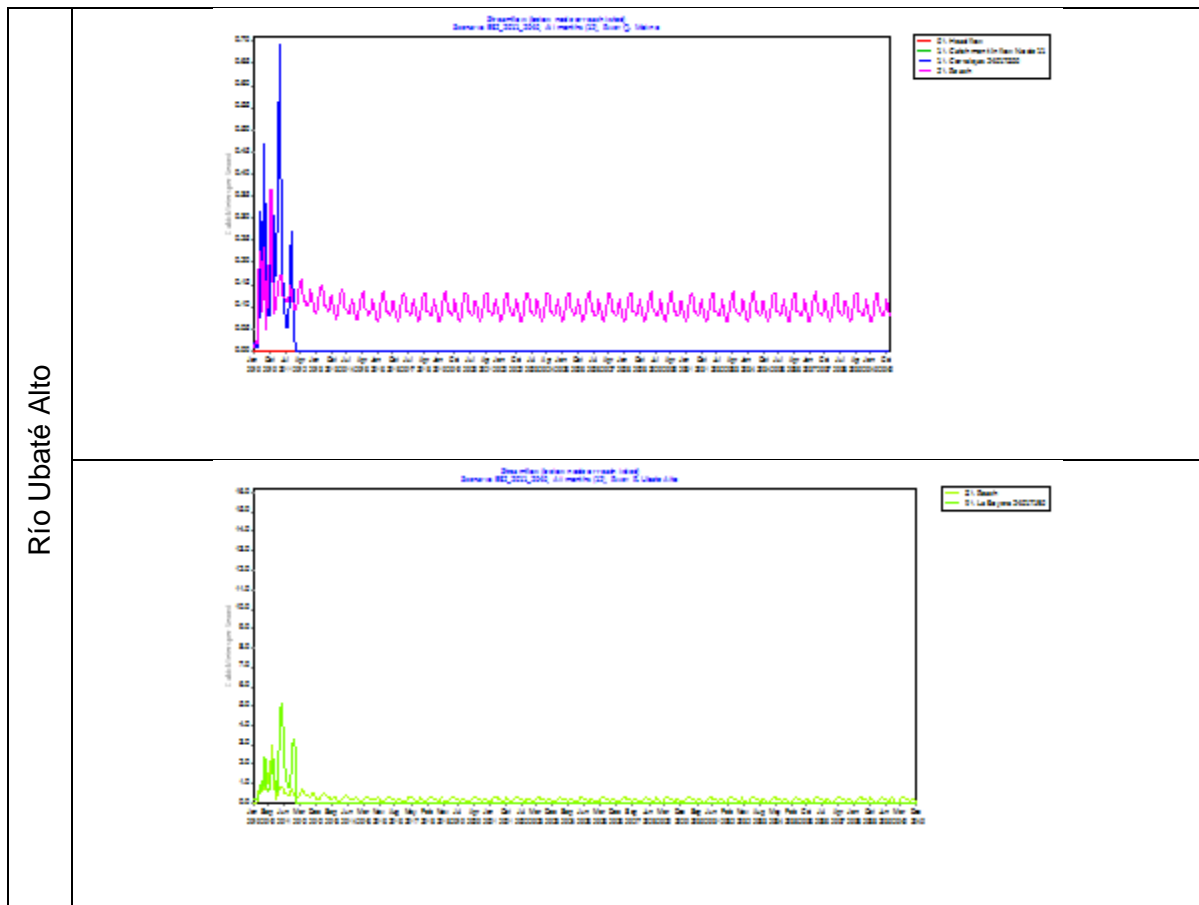


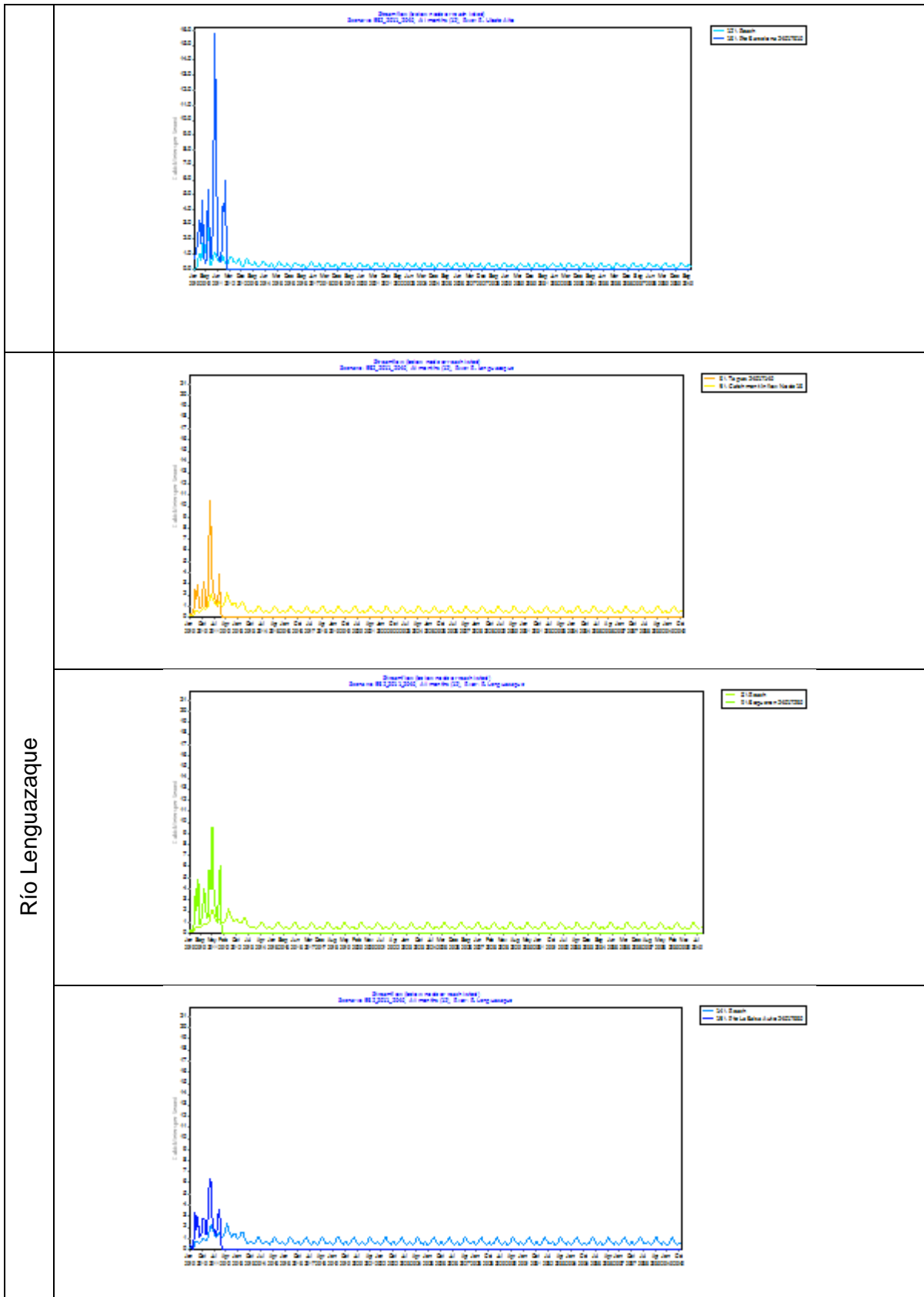


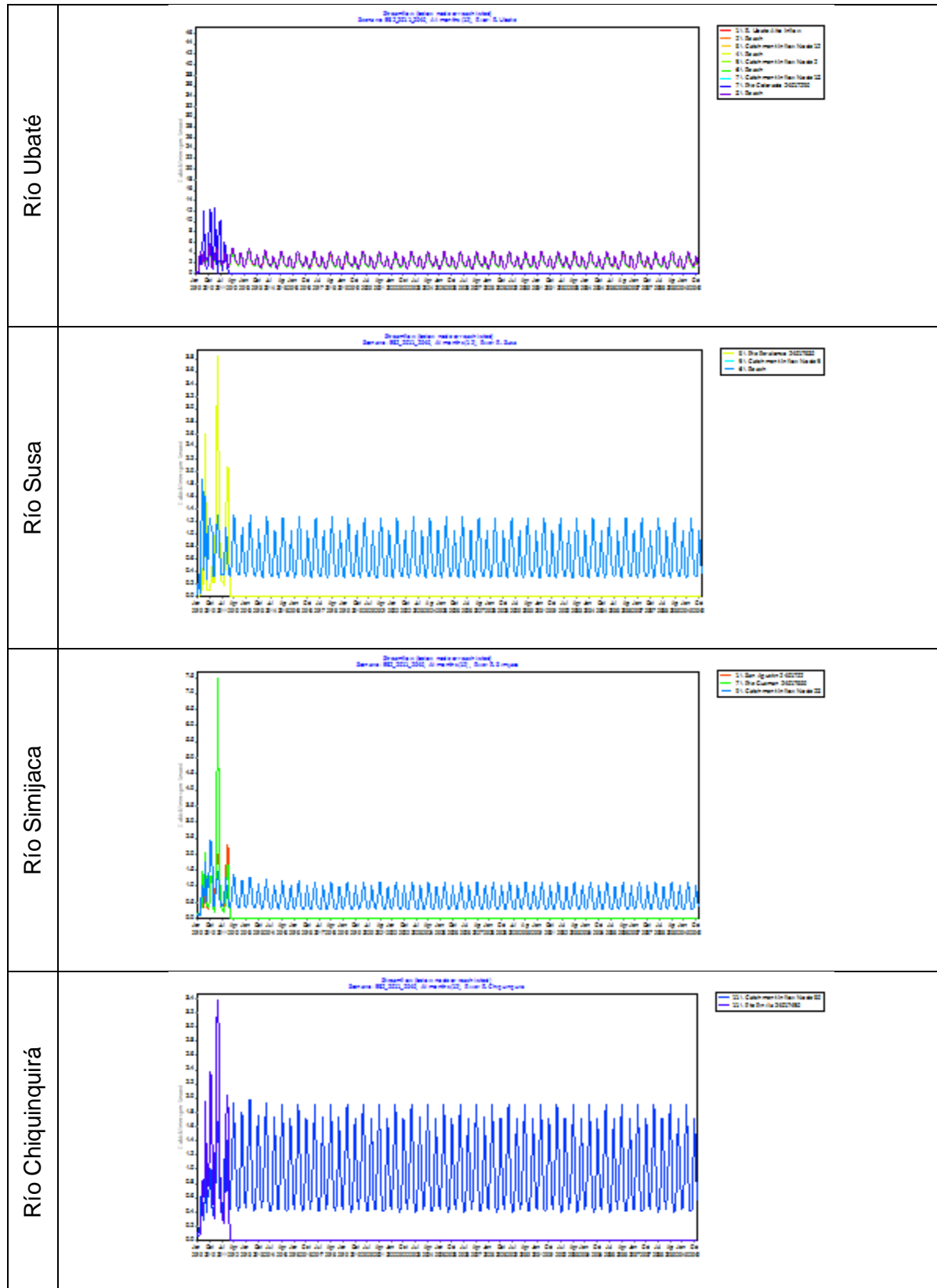
Río Susa	
Río Simijaca	
Río Chiquinquirá	
Río Suárez	



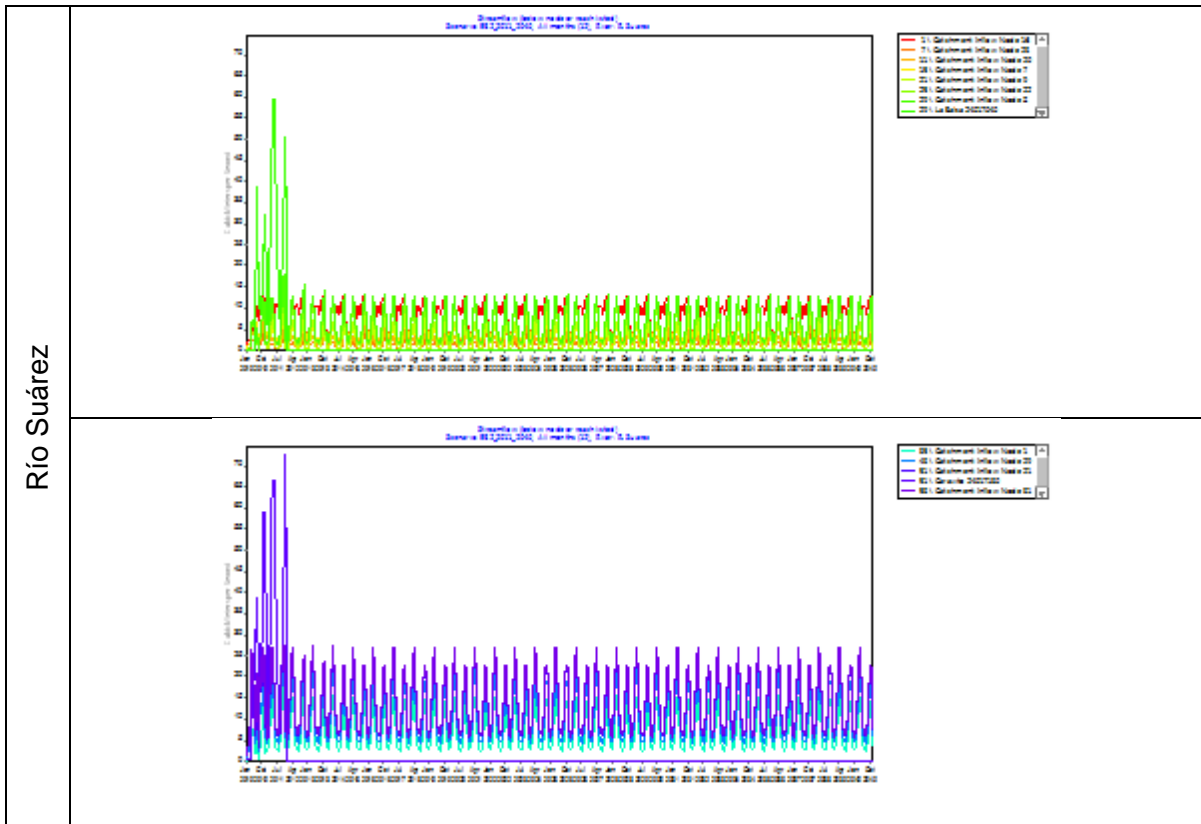
**Figura 4-22.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2011 a 2040, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



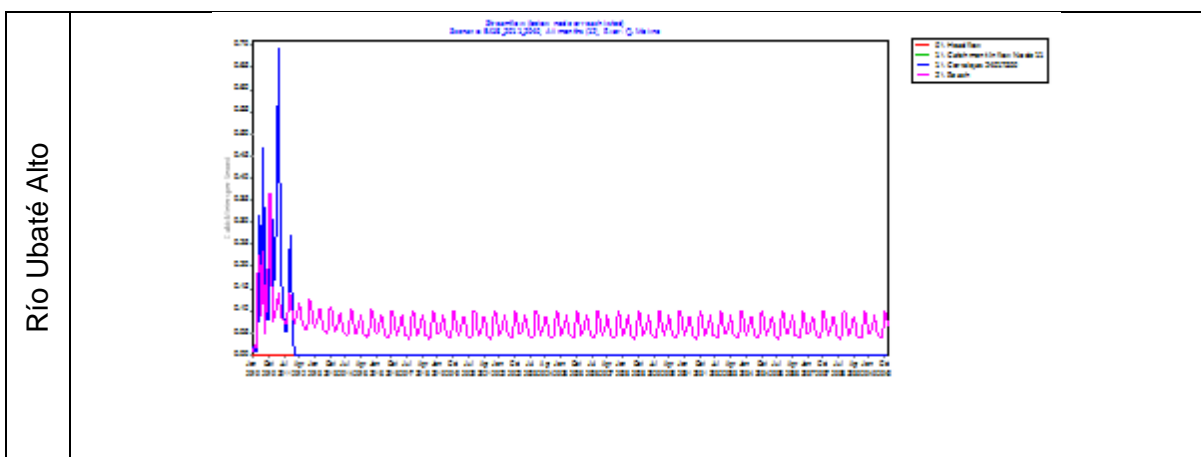


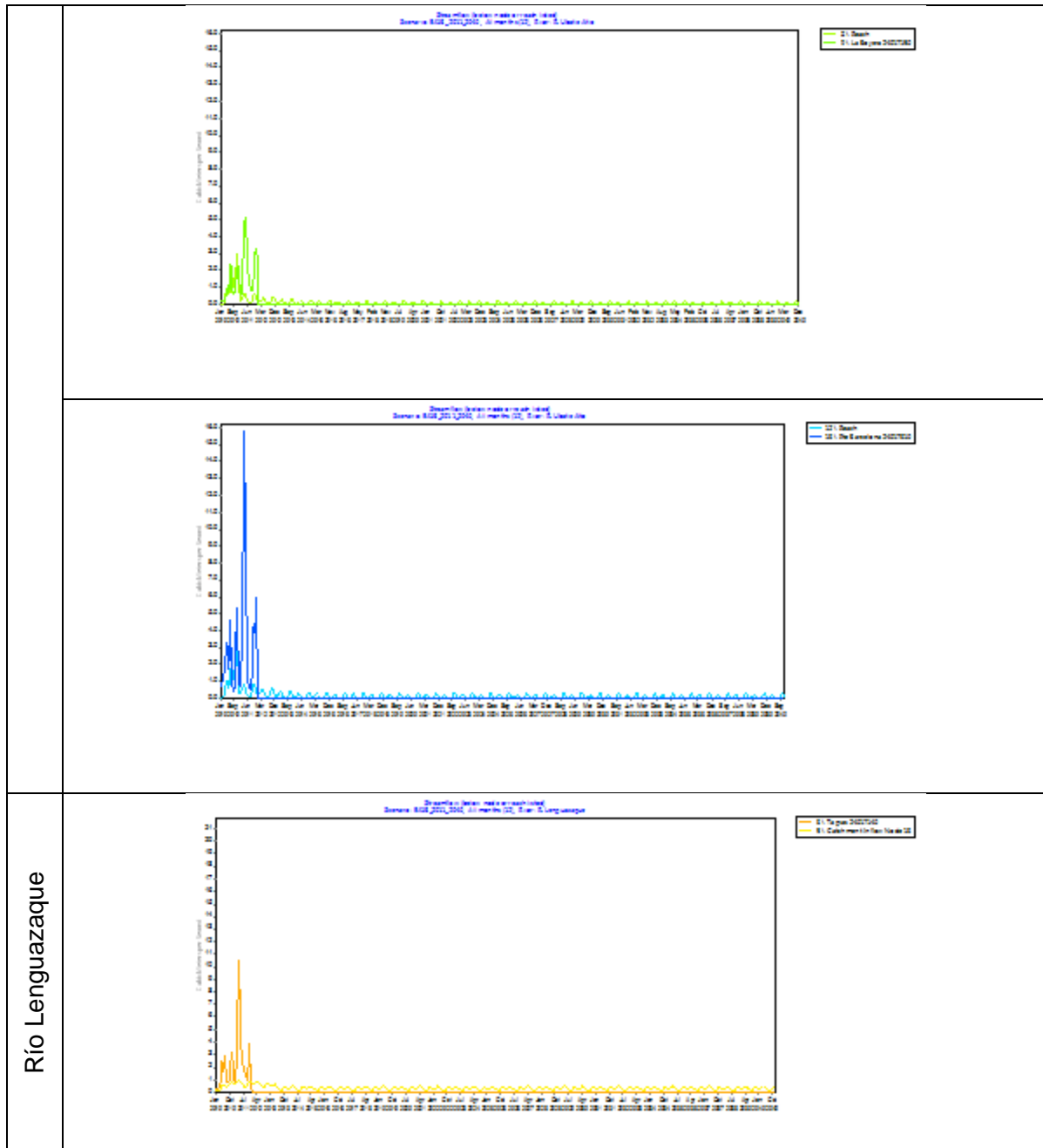


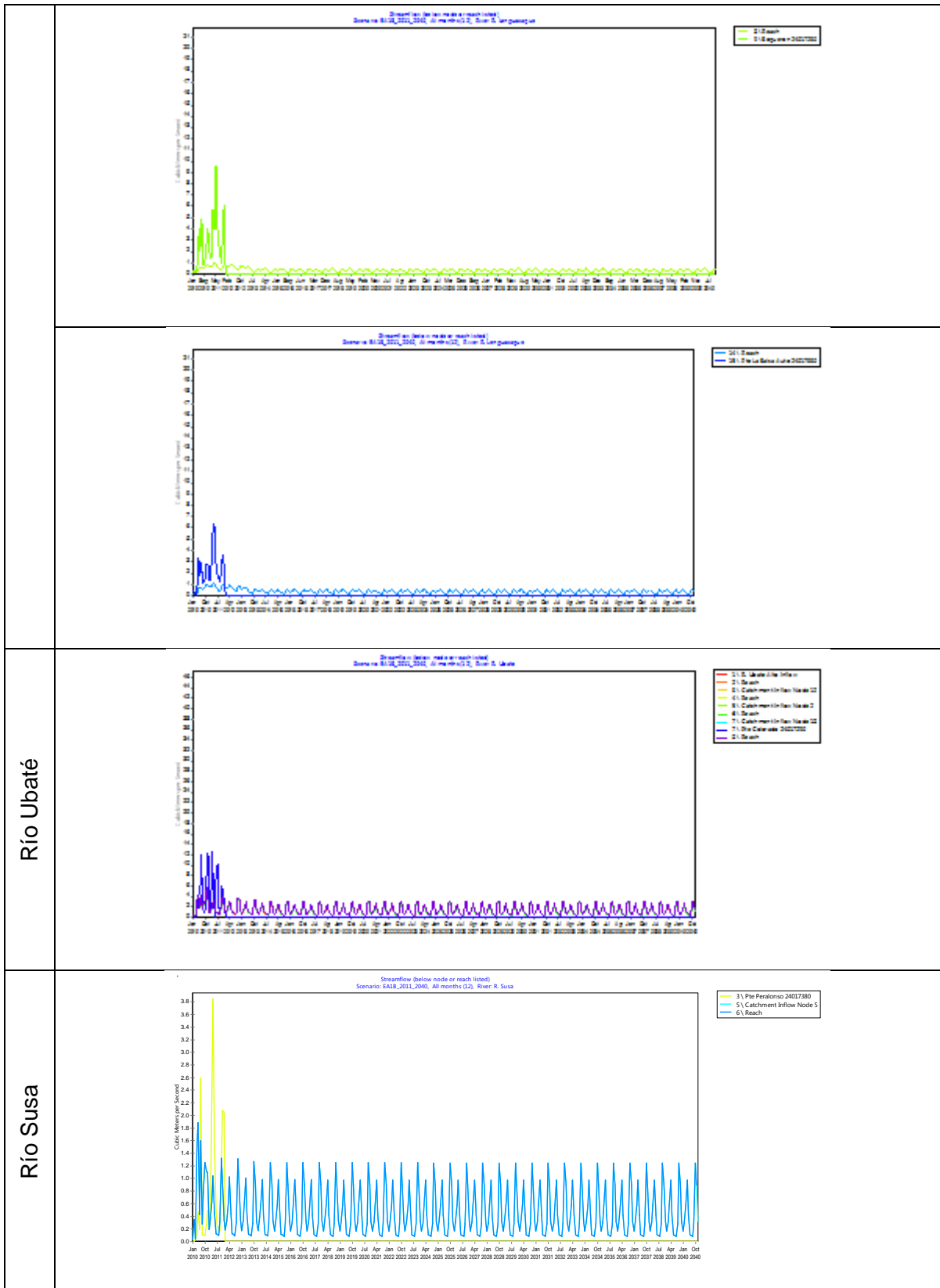


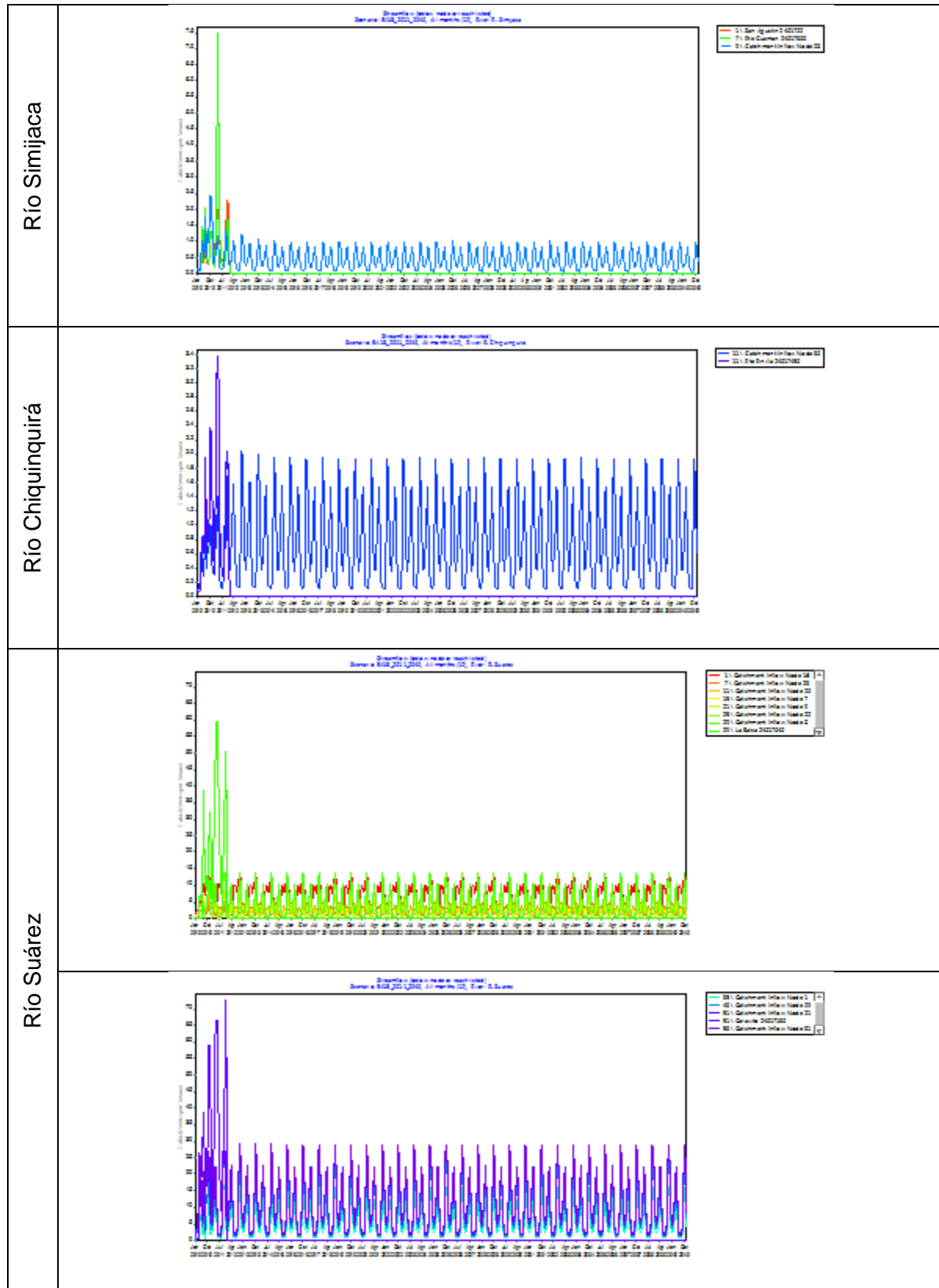


**Figura 4-23.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A1B en el periodo 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

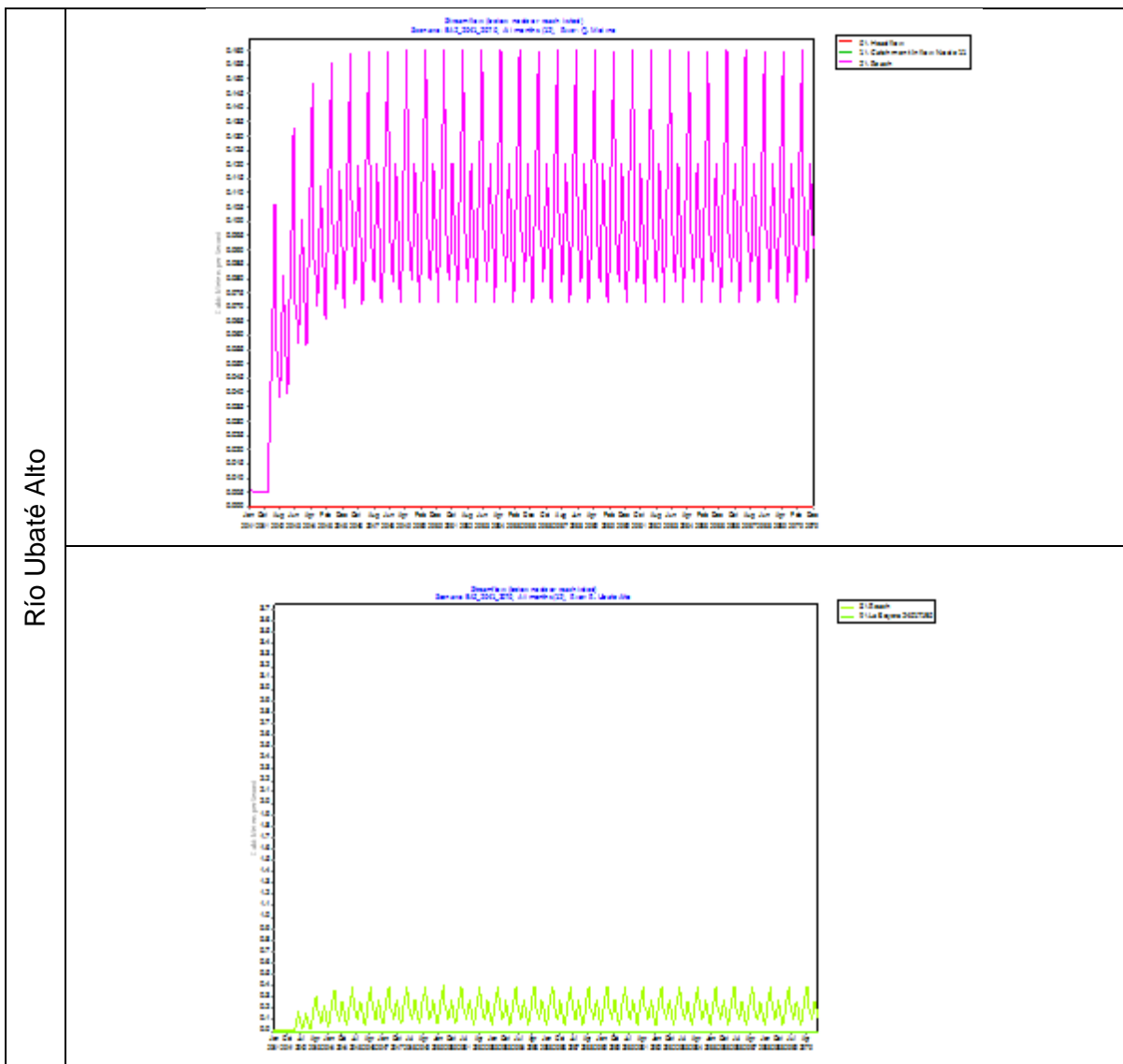


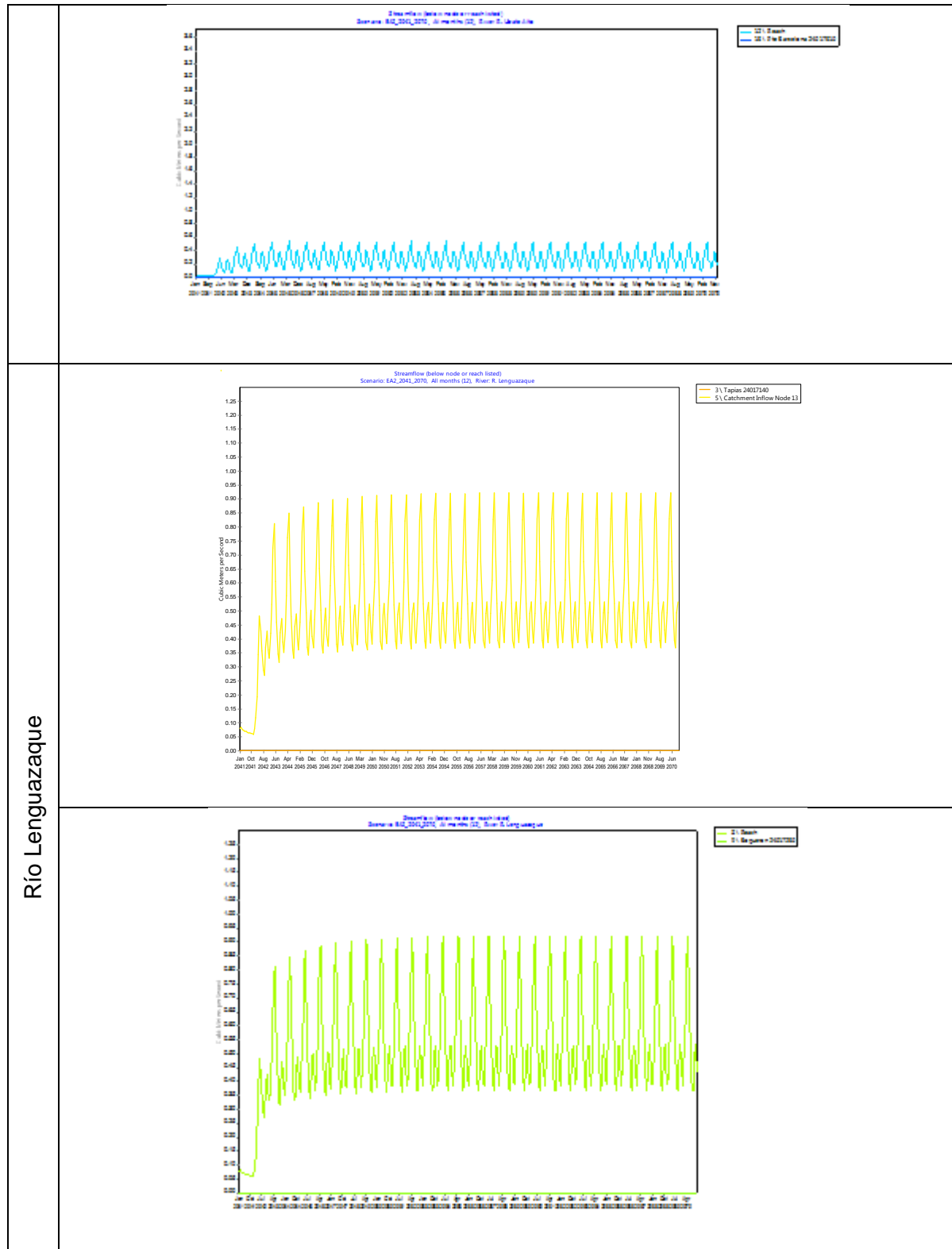


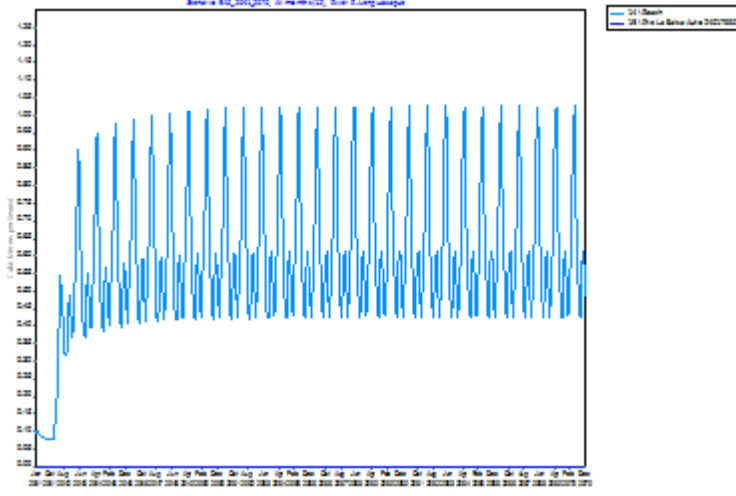
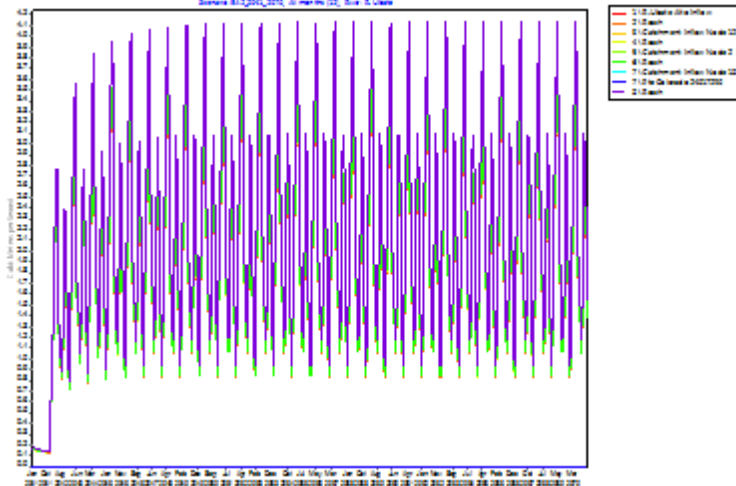
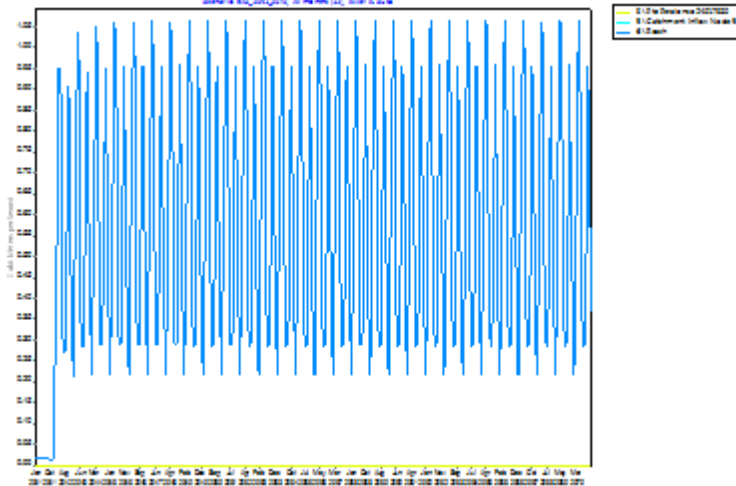


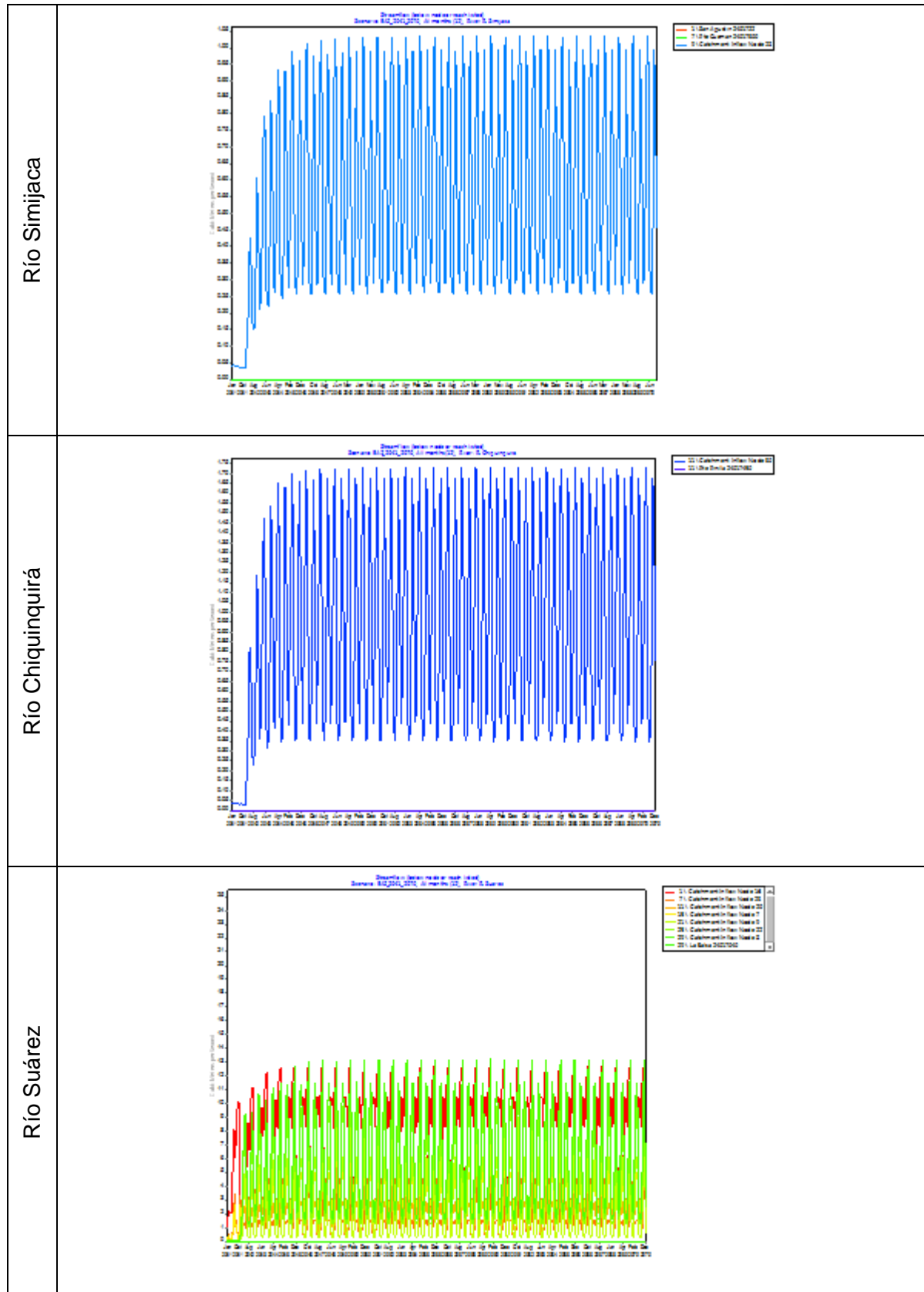


**Figura 4-24.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

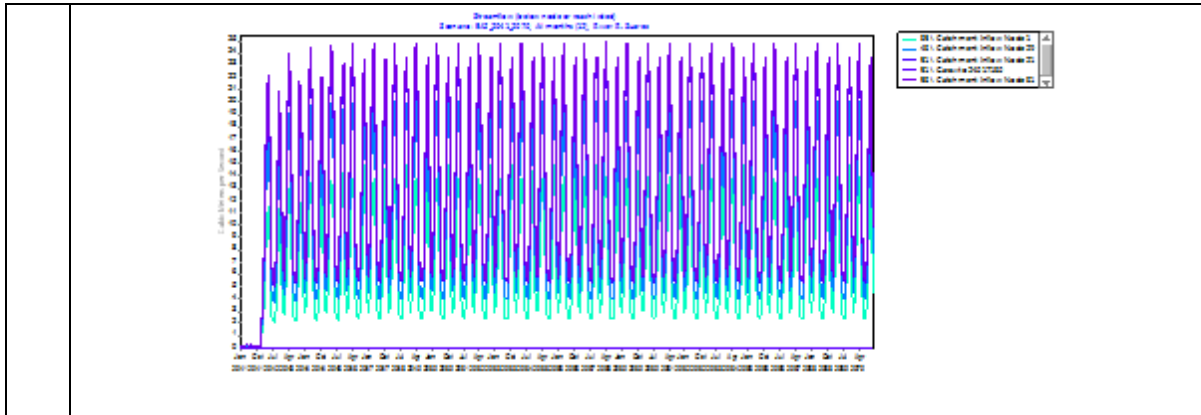




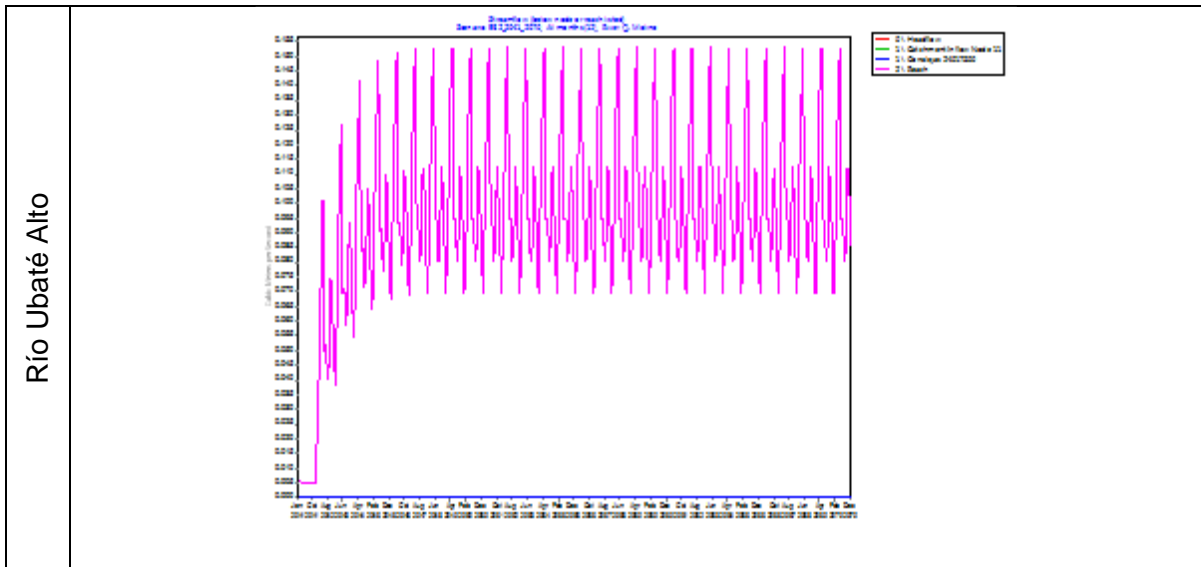
	
Río Ubaté	
Río Susa	

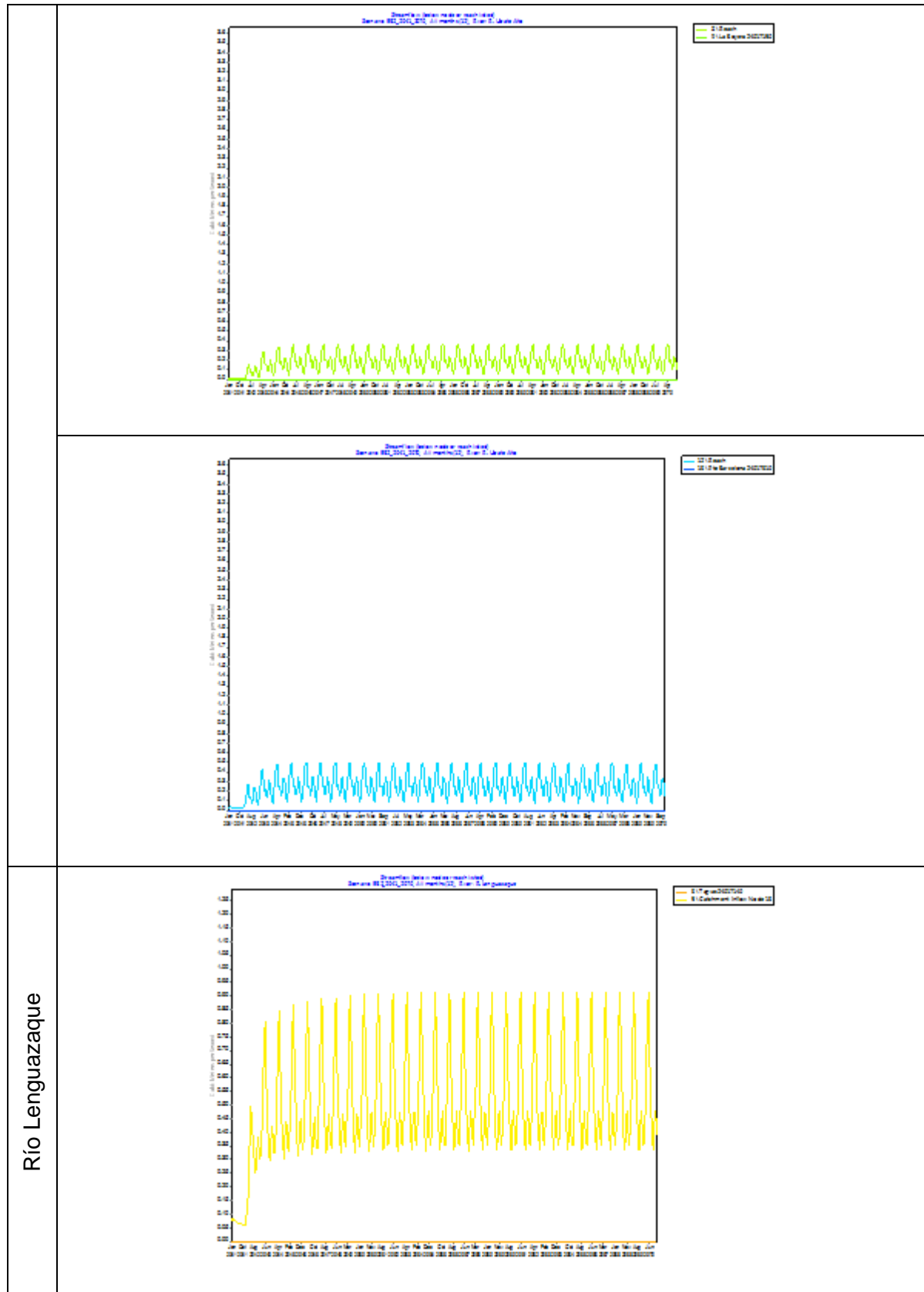


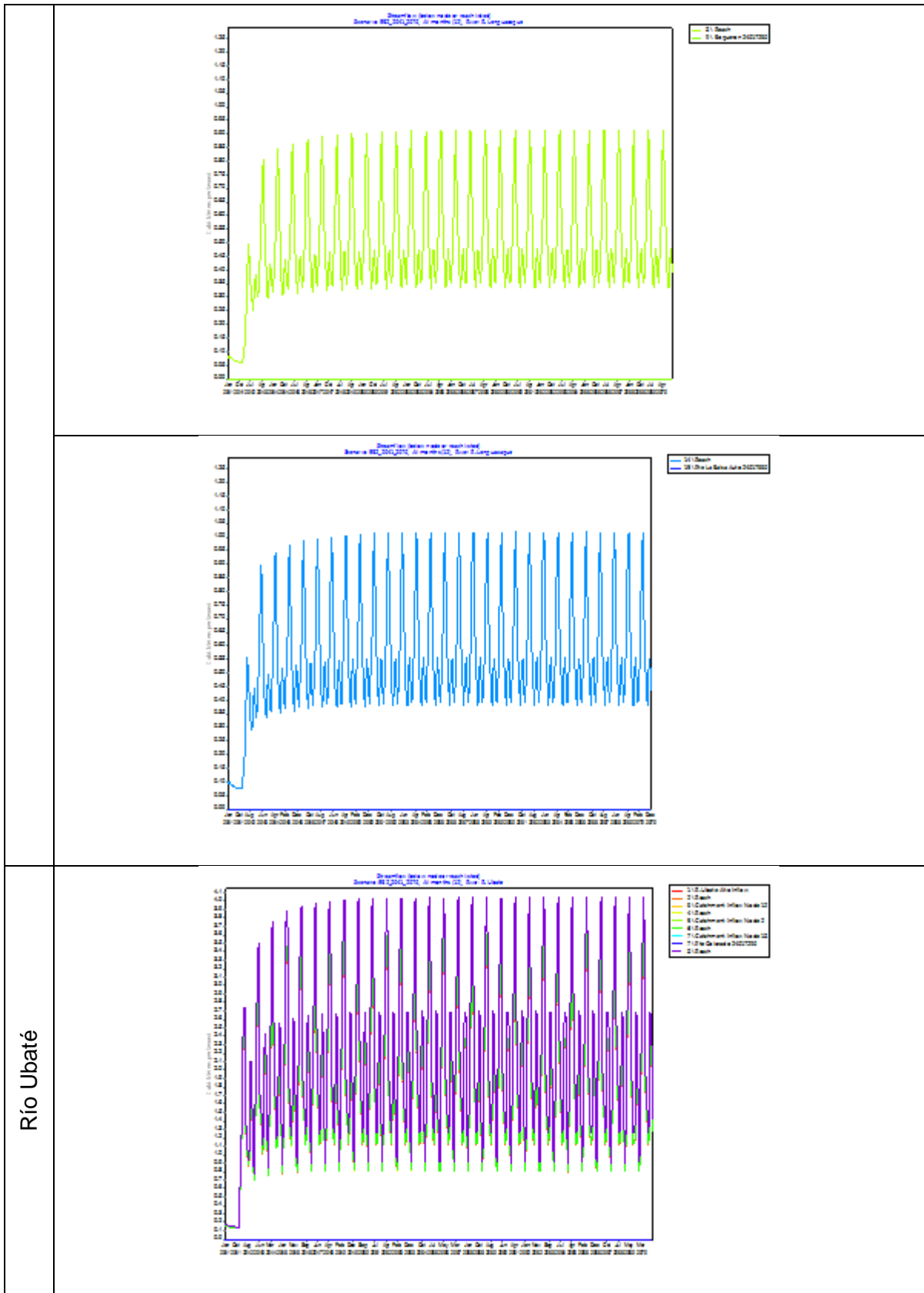


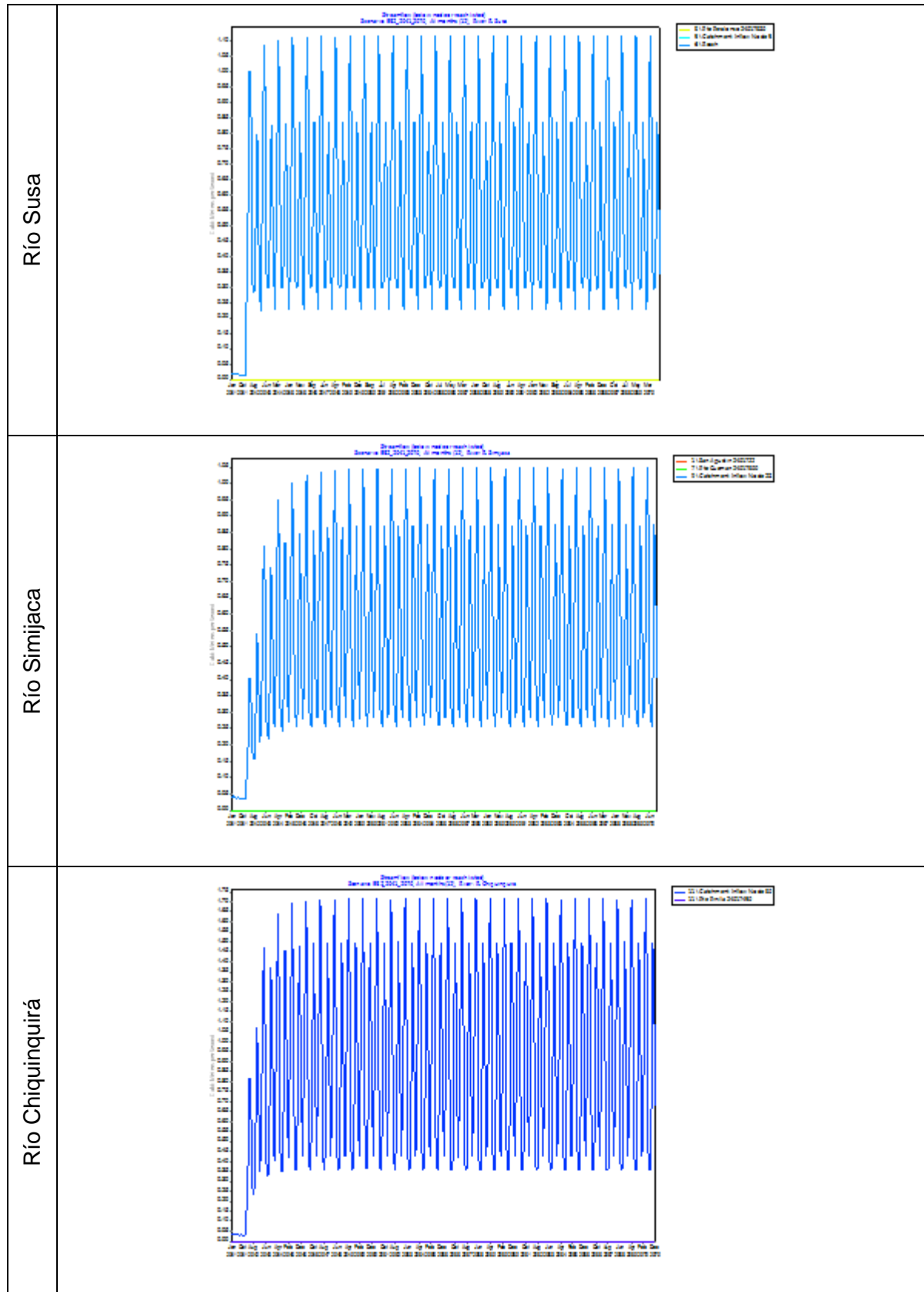


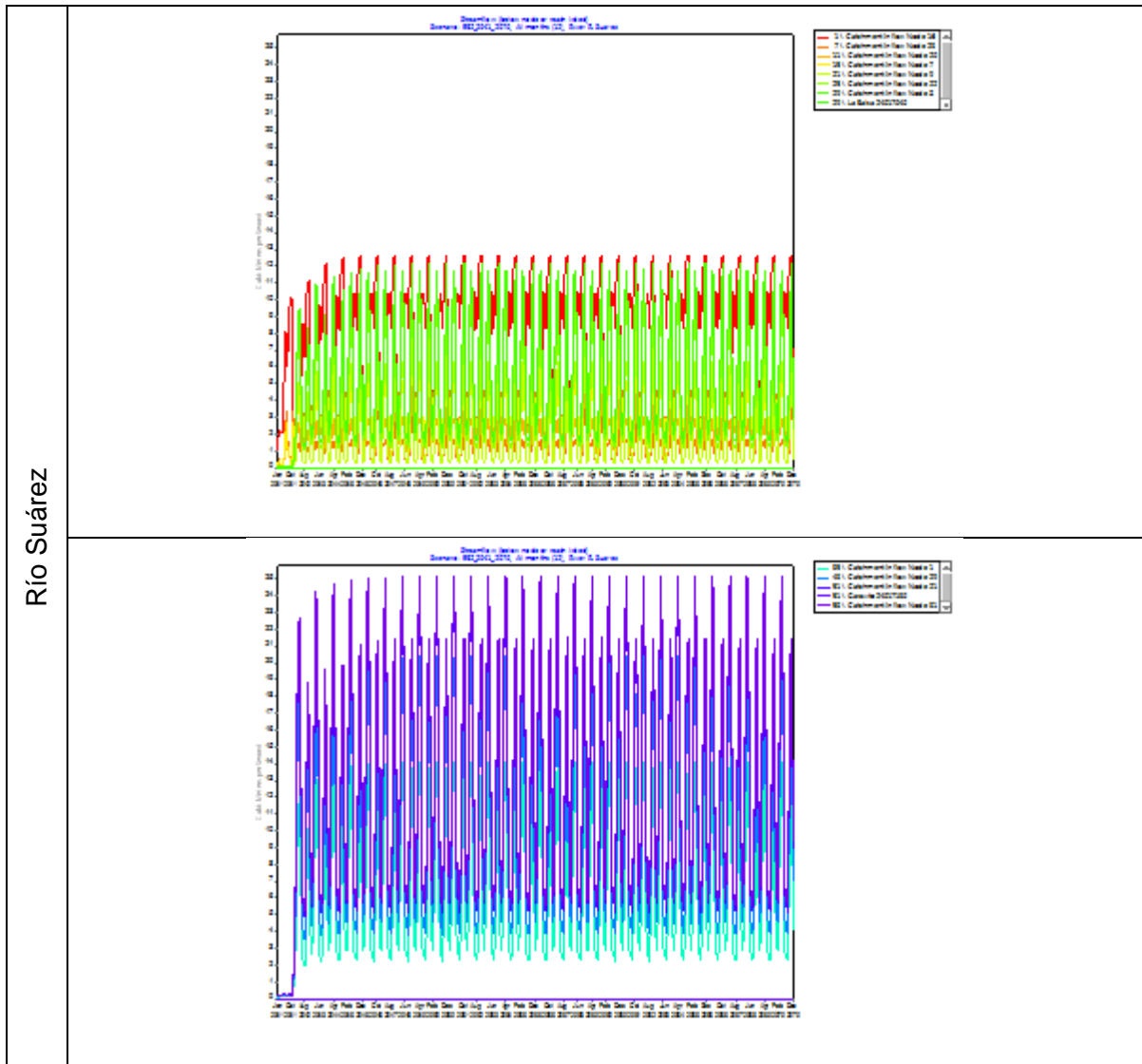
**Figura 4-25.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.





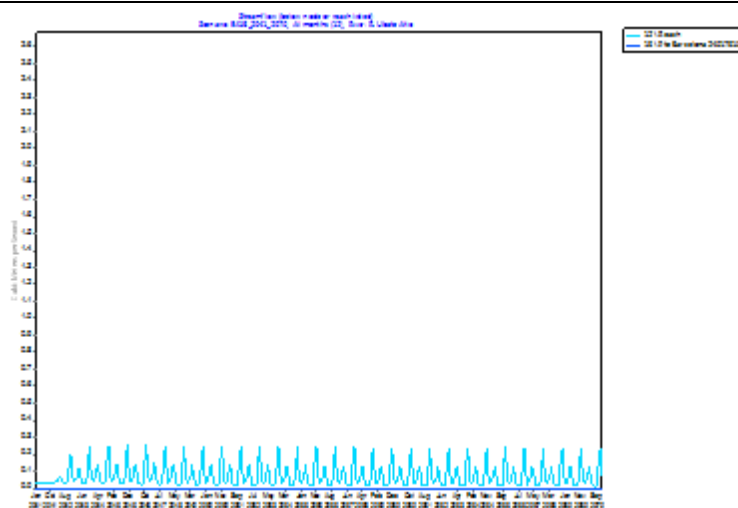
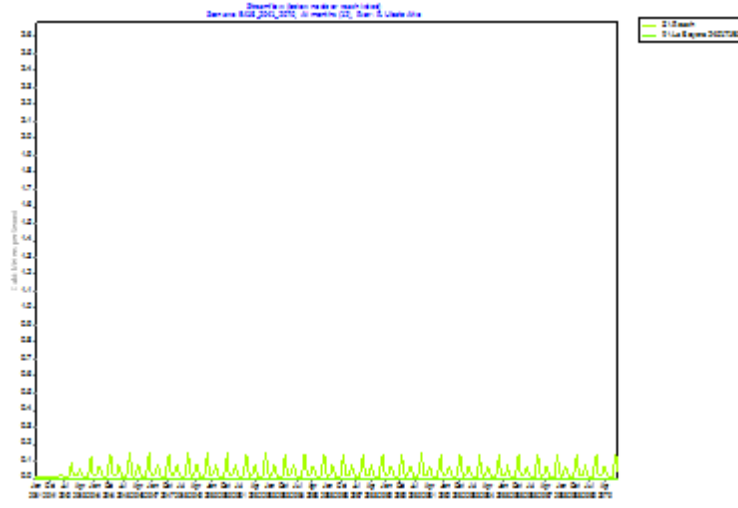
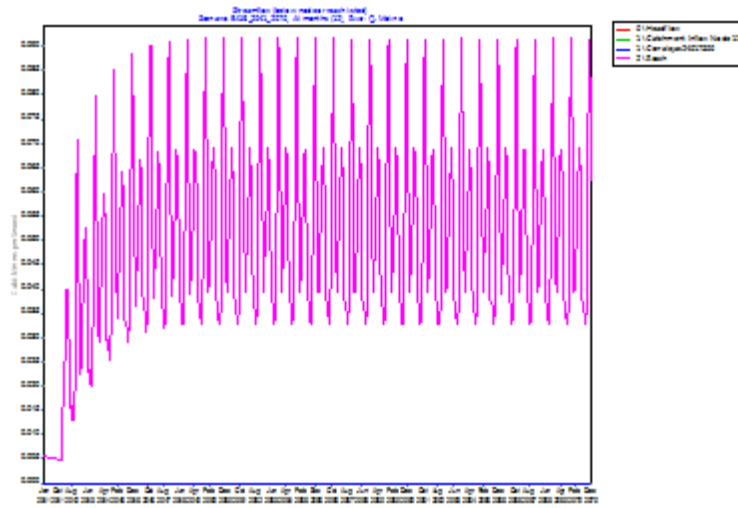




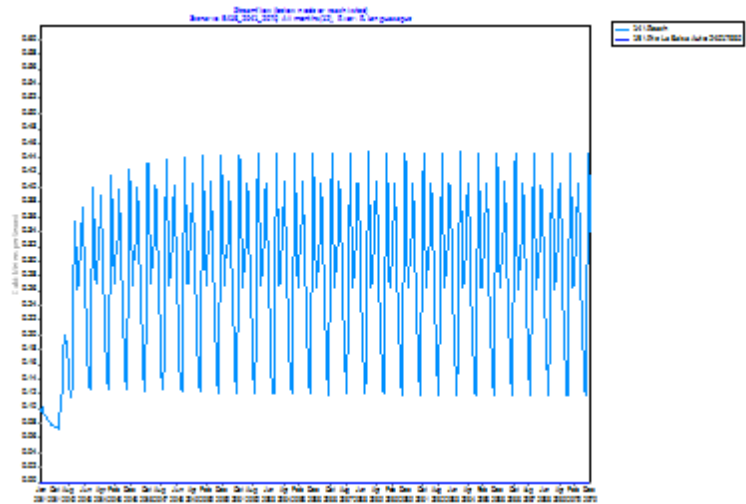
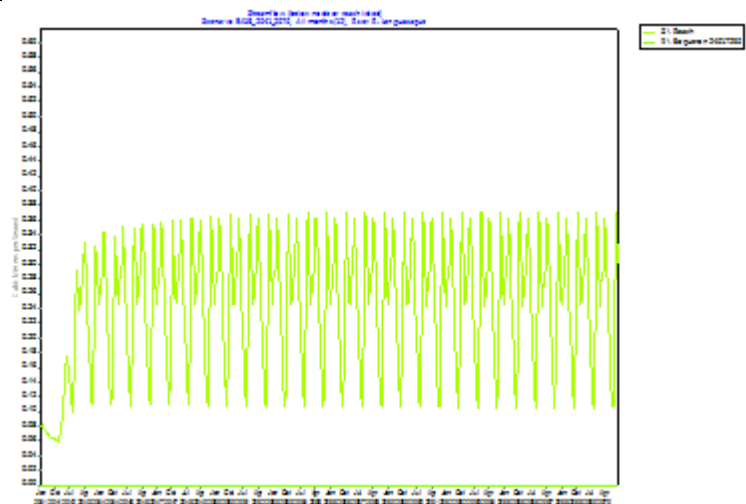
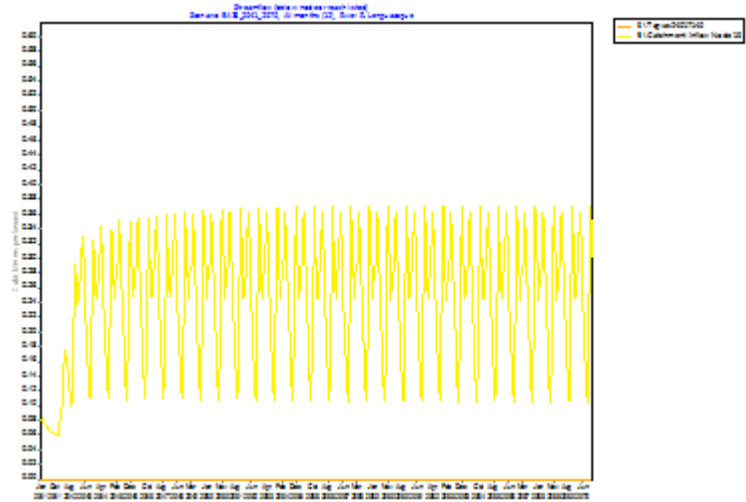


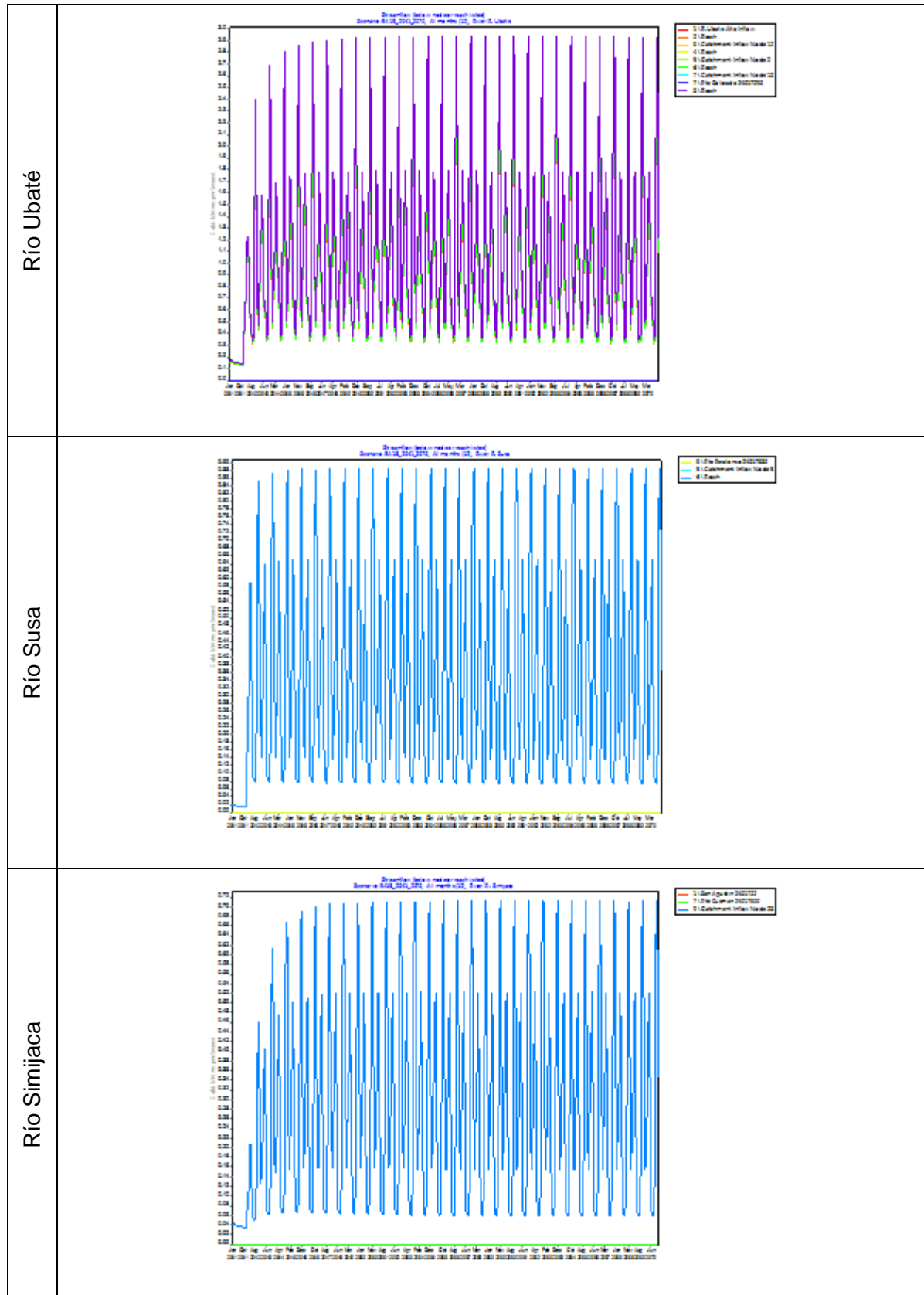
**Figura 4-26.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A1B para el periodo 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

Río Ubaté Alto

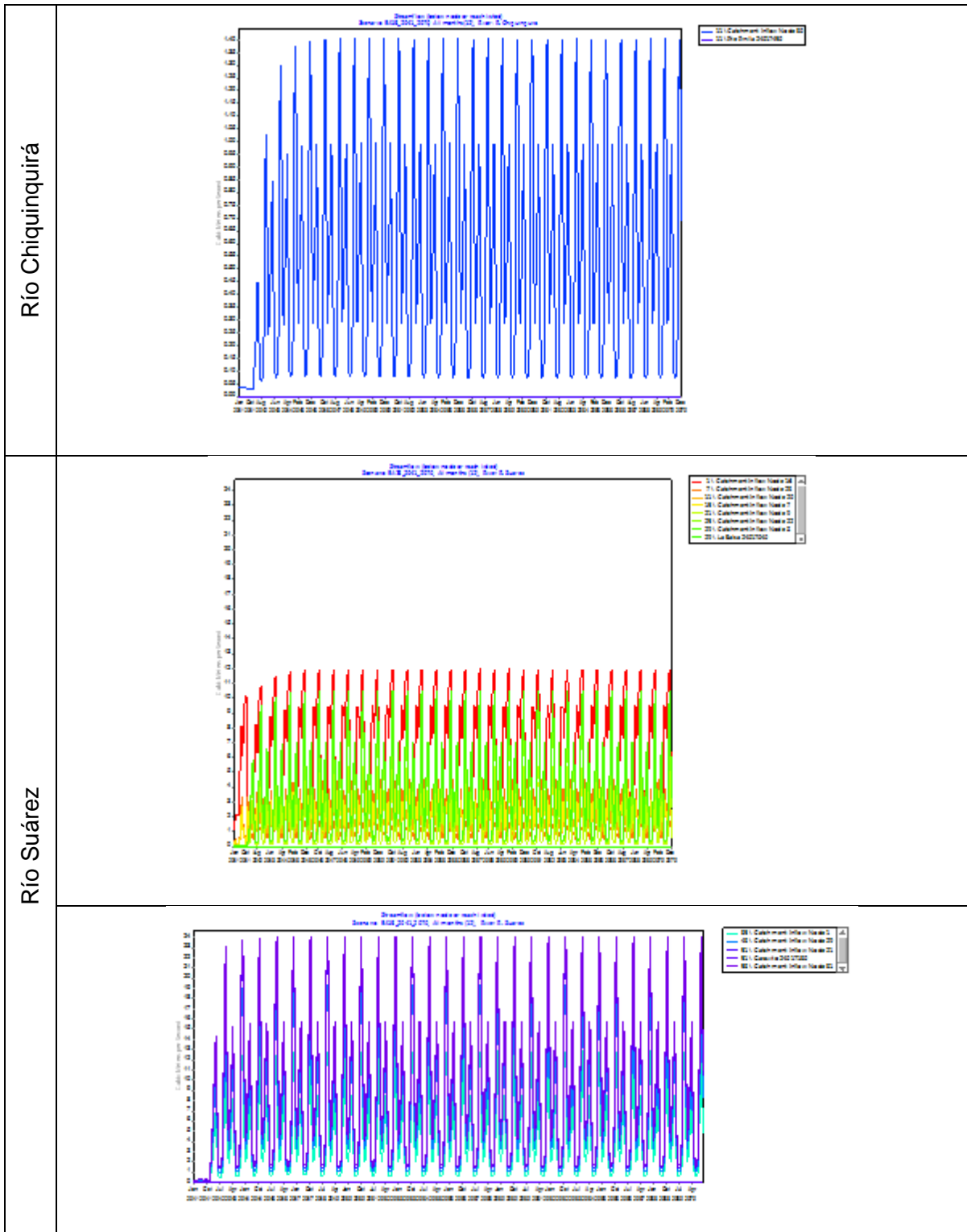


Río Lenguazaque

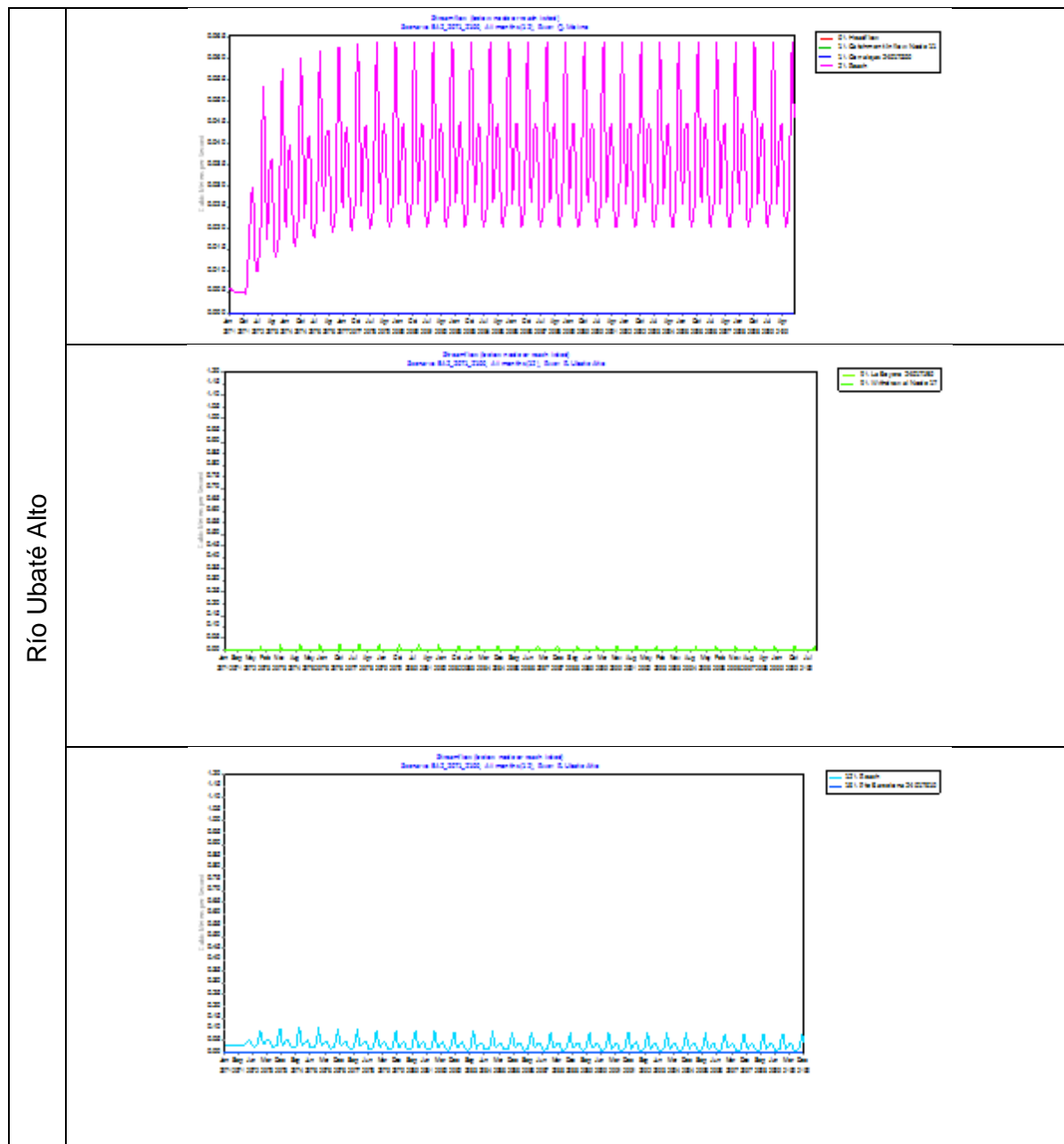




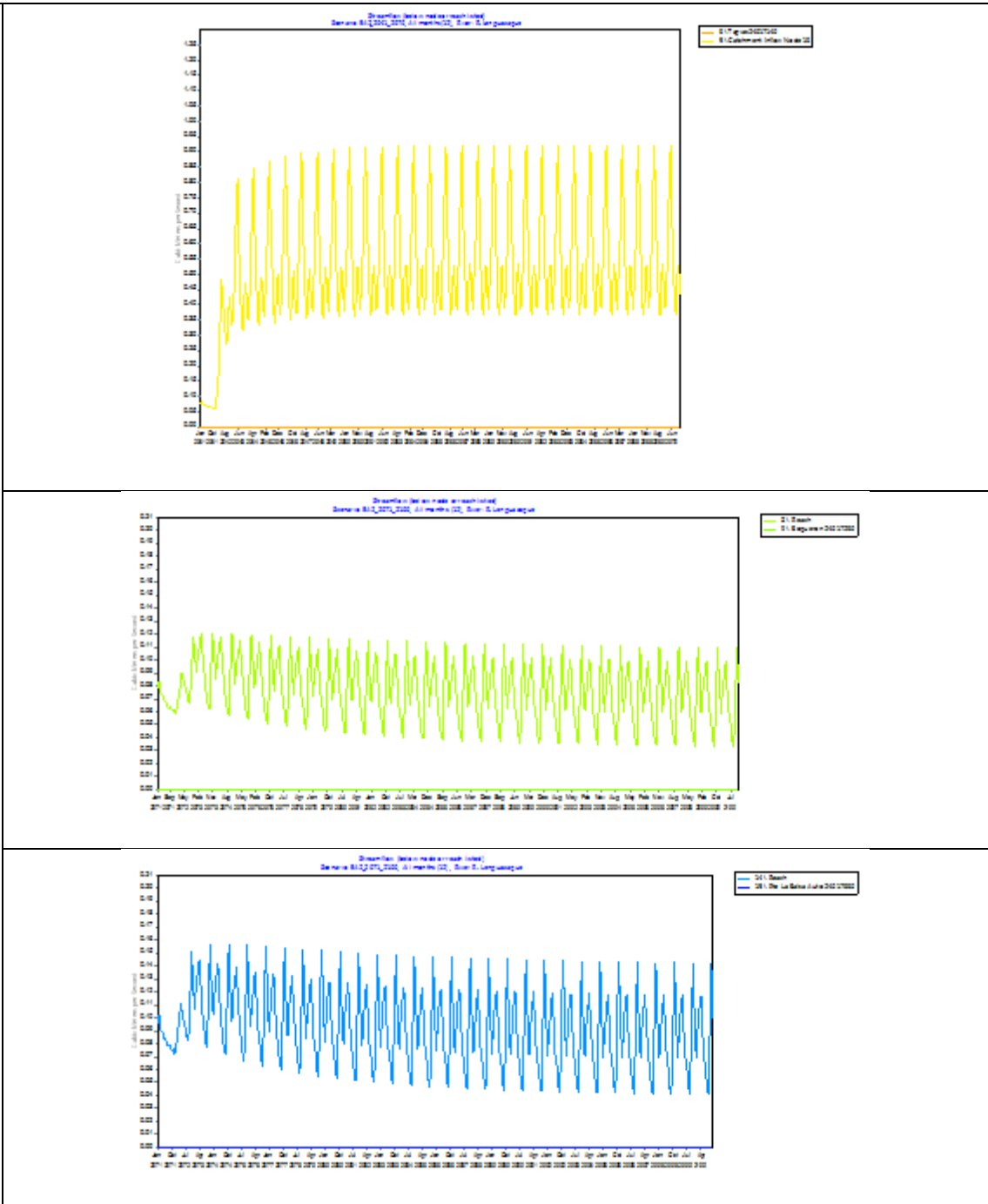


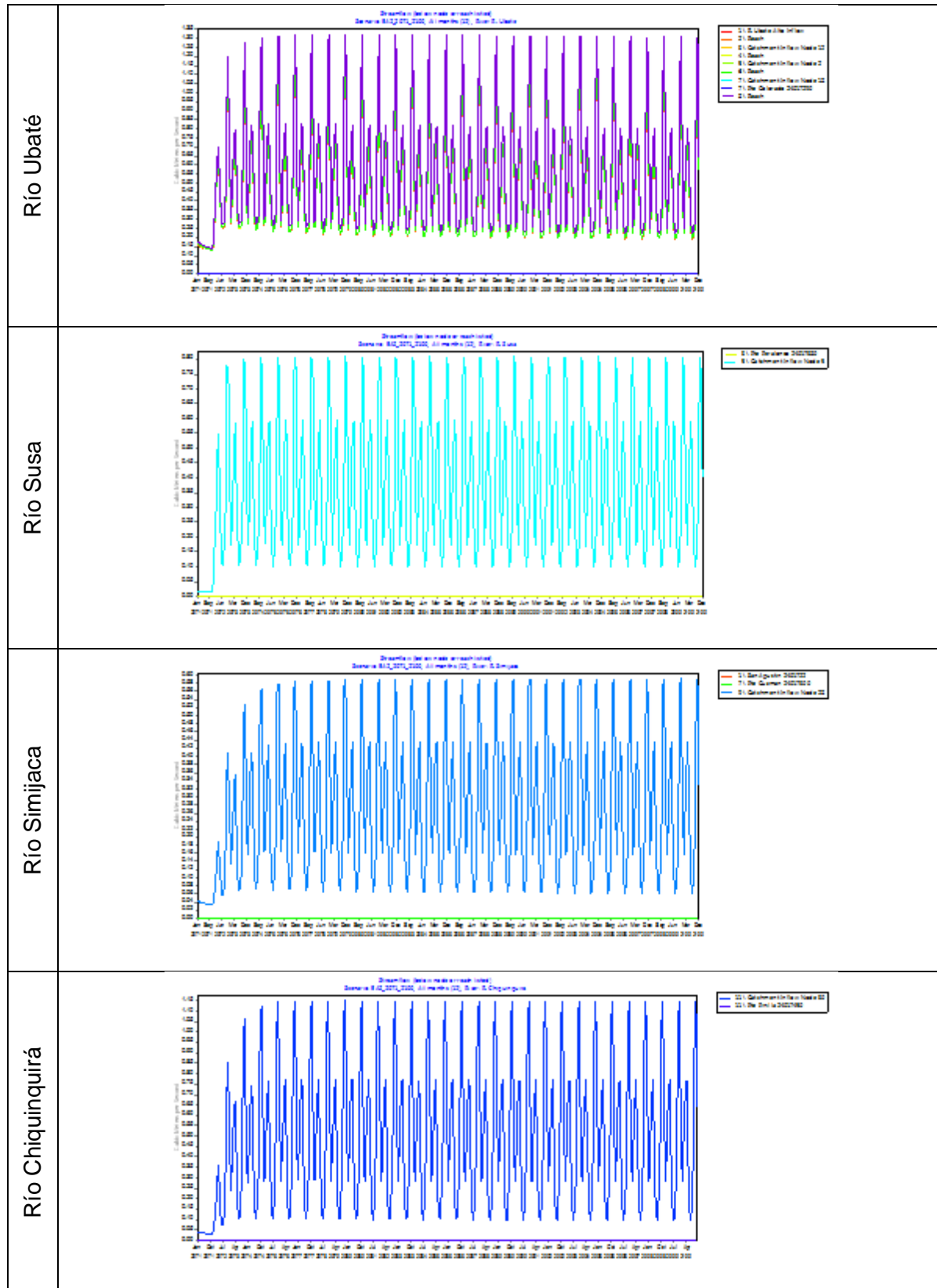


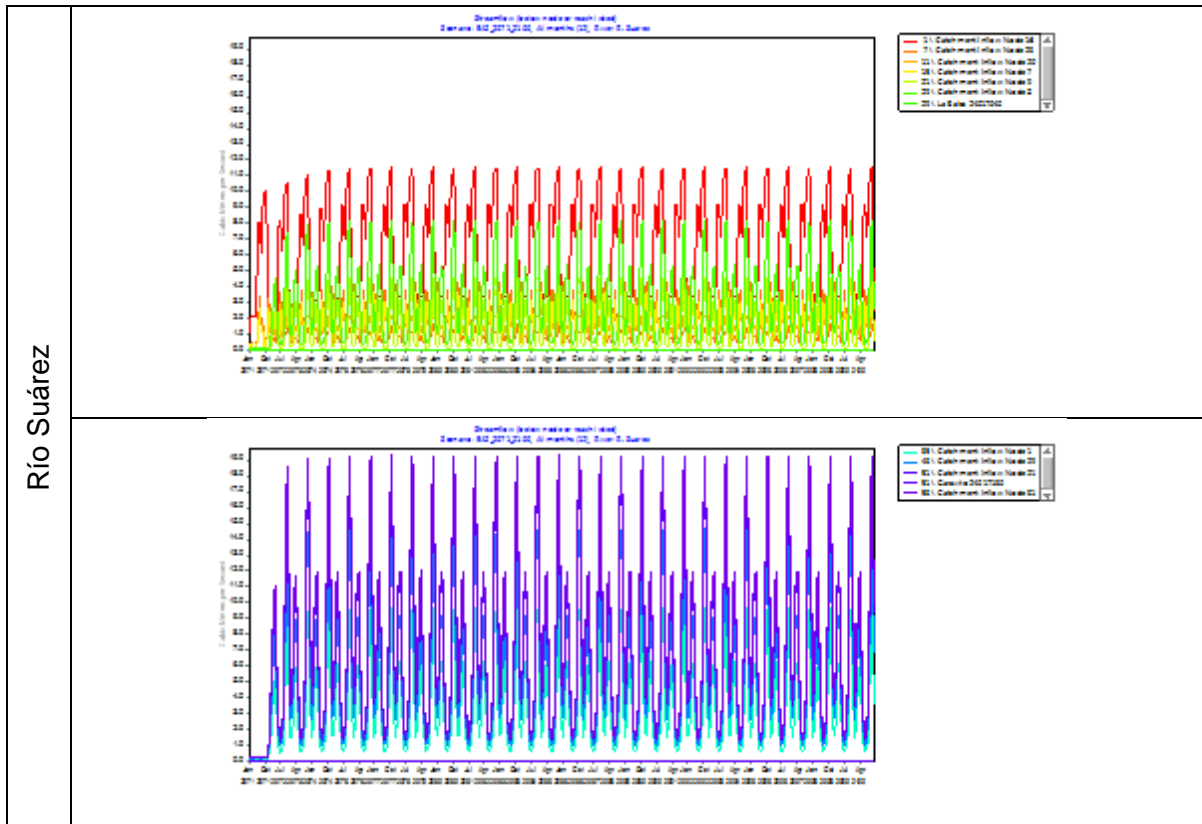
**Figura 4-27.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 para el periodo 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



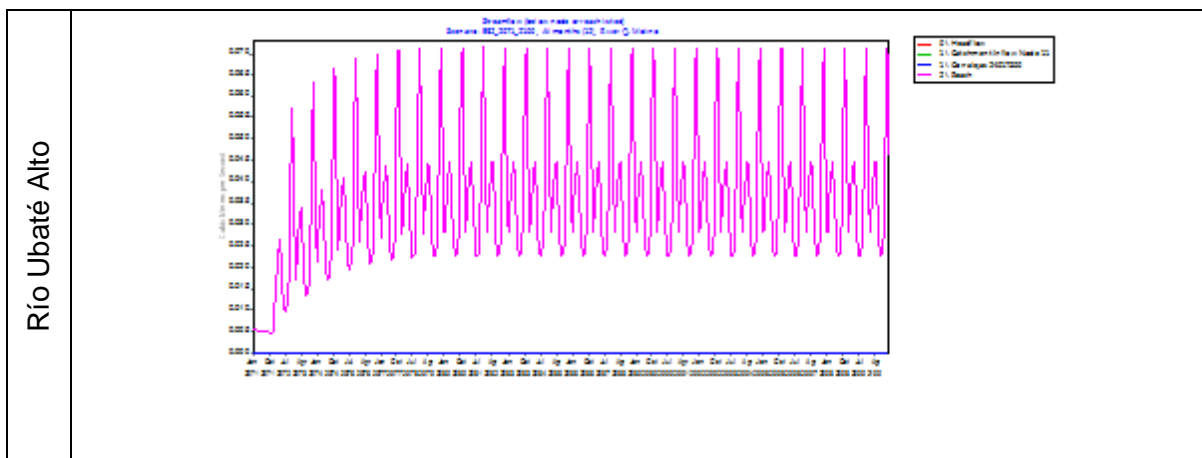
Río Lenguazaque

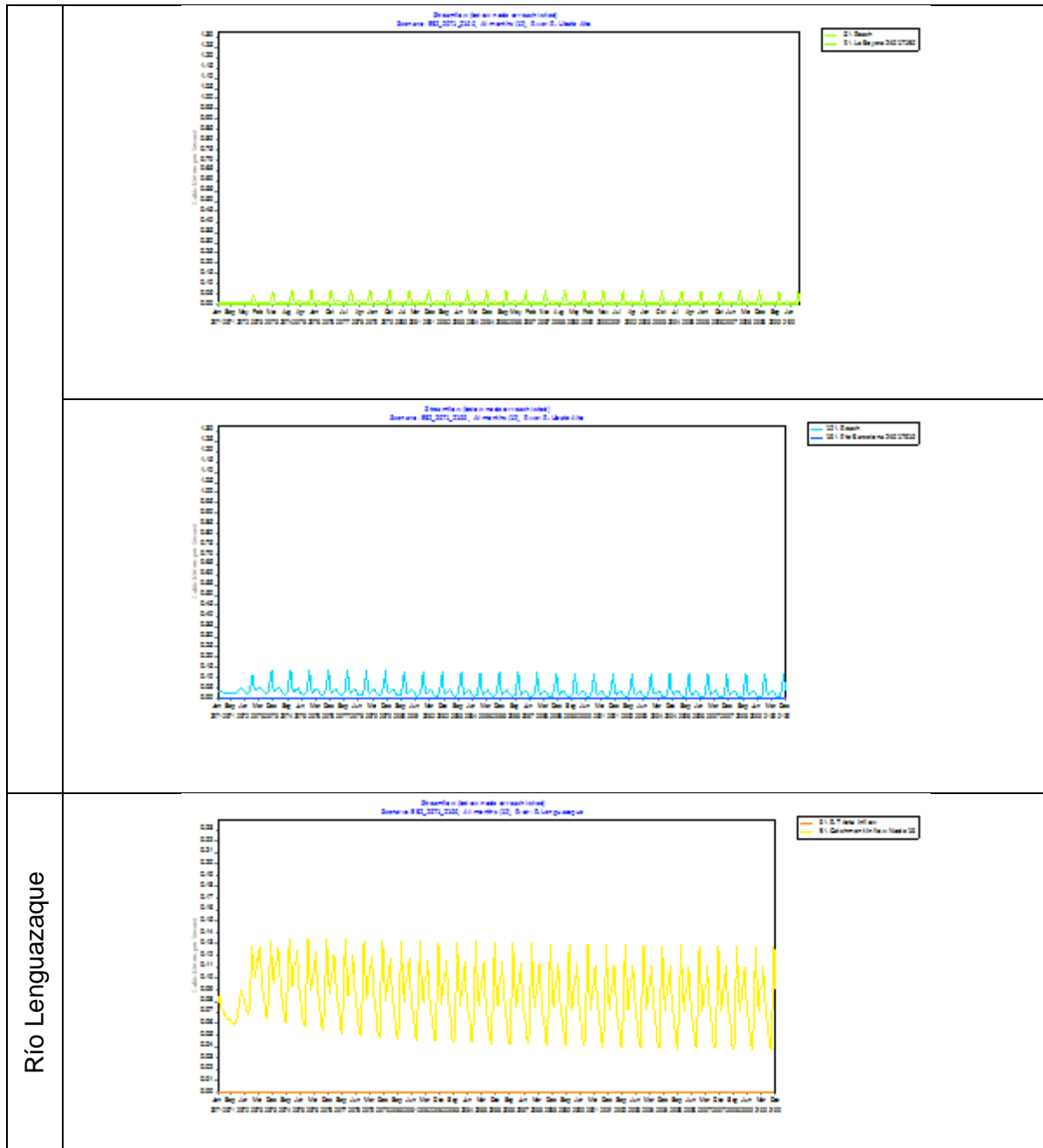


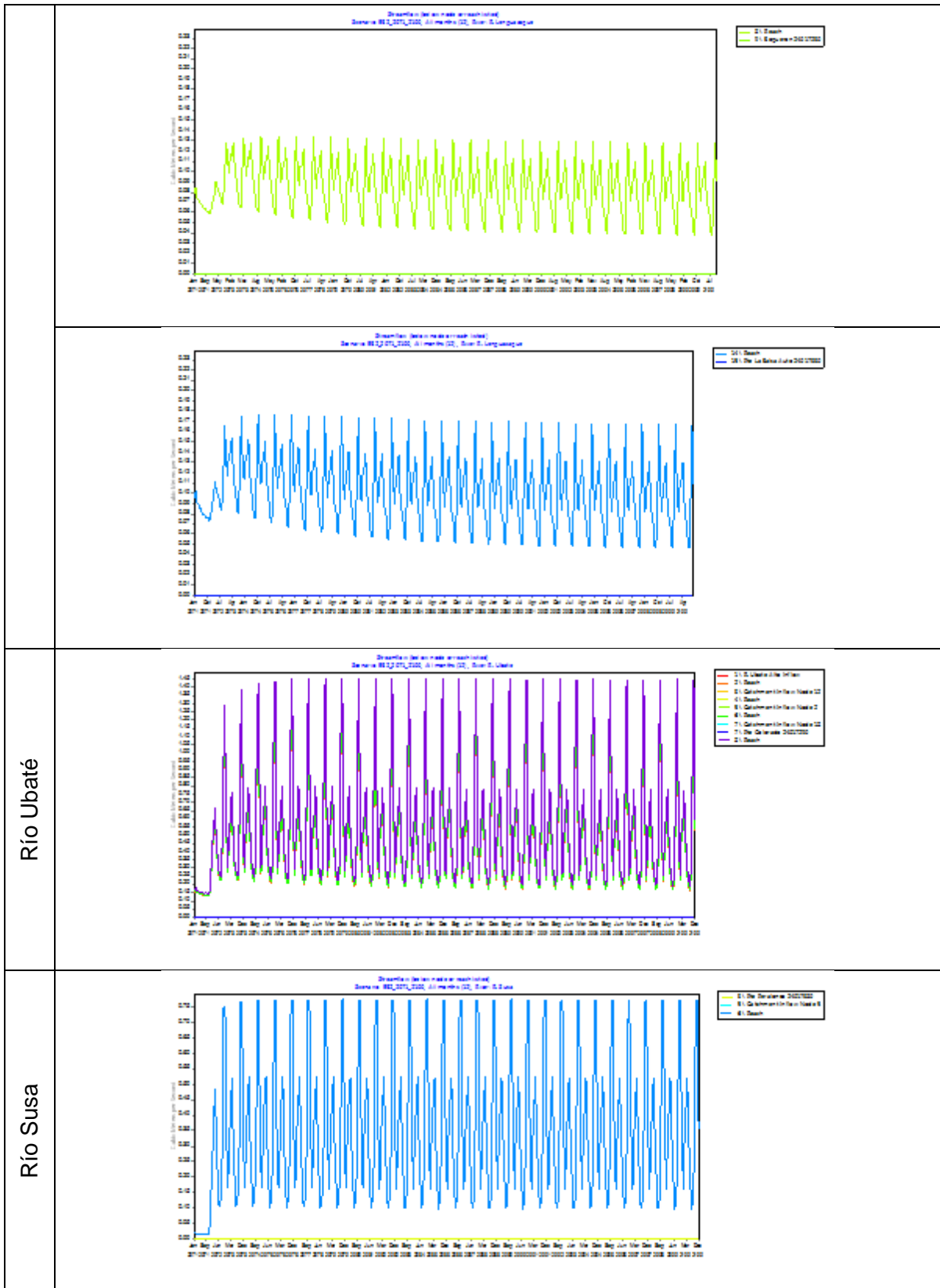


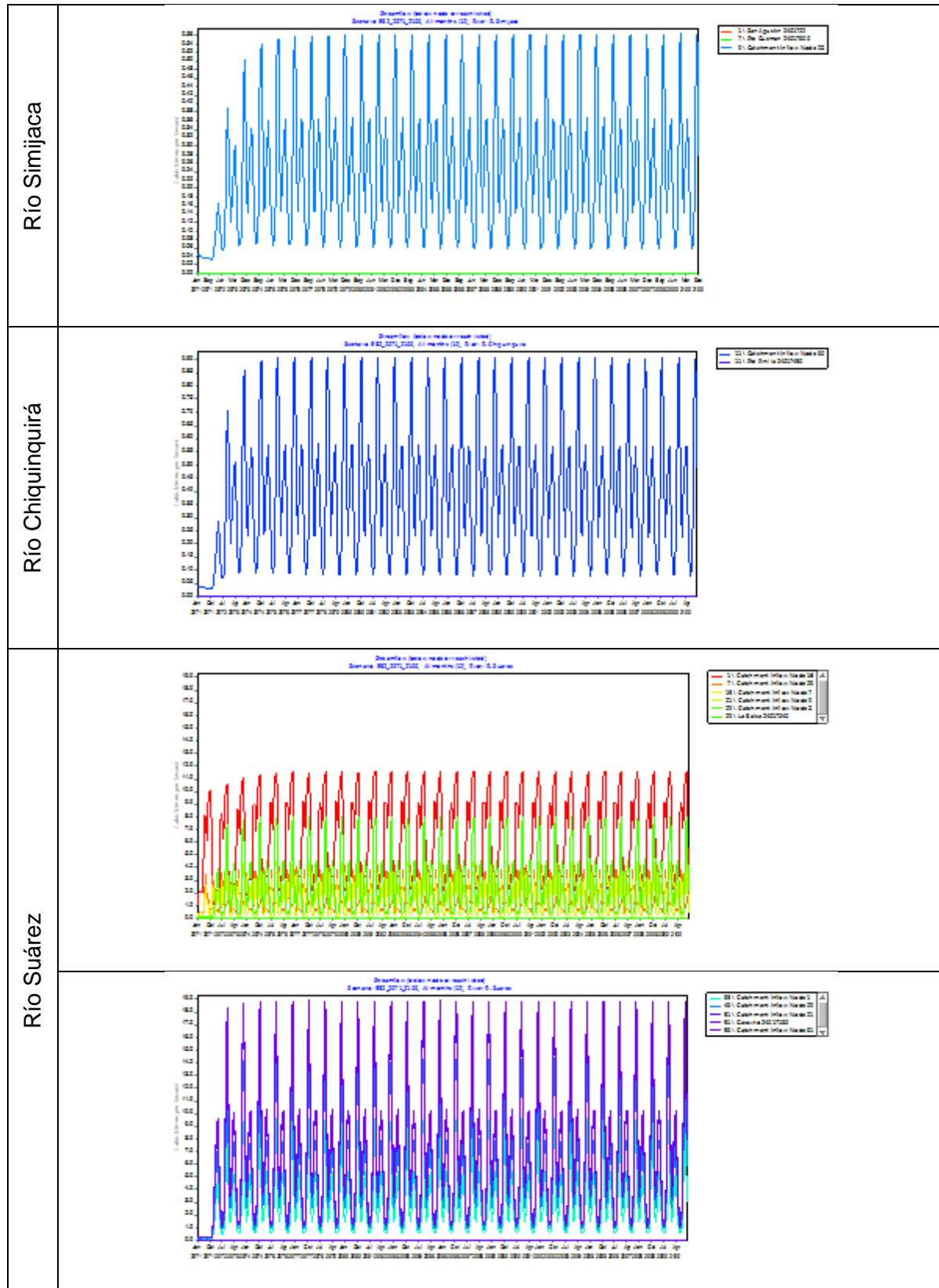


**Figura 4-28.** Resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático B2 para el periodo 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.











### 4.3.5 Análisis de Resultados

Para realizar un análisis de resultados detallado, se establecen dos enfoques: un análisis respecto al periodo histórico simulado previamente, y un análisis de comparación entre escenarios.

#### 4.3.5.1 Análisis respecto al histórico de referencia

- **Escenarios del 2011 al 2040**
- Se observa que para la quebrada el Molino, monitoreada por la estación Corralejas (24017800) los valores de caudal medio simulados a futuro, para los escenarios A2, B2 y A1B, oscilan en el rango de los valores de caudal medio históricos.
- En el río Ubaté en la parte alta, monitoreado por la estación la Boyera (24017150), en la parte media por la estación Pte. Barcelona (24017310) se puede observar que los caudales medios simulados para los escenarios A2, B2 y A1B, se presenta una marcada reducción, respecto a los históricos observados.
- En el río Lenguazaque, monitoreado por las estaciones Tapias (24017140), Boqueron (24017230), Pte la Balsa (24017330) se presenta una reducción ligera para escenarios A2 y B2 y un poco más acentuada para el escenario A1B.
- Para el río Ubaté en su parte baja, cercana a su desembocadura en la Laguna de Fúquene, después de recibir al río Lenguazaque y Suta, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, respecto a los escenarios, aunque si se evidencia una reducción respecto al escenario A1B.
- Comparando el histórico del río Susa, en la estación Pte Peralonso (24017380) con los escenarios, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, evidenciándose extremos en el escenario B2 y una reducción respecto al escenario A1B.
- En río Simijaca se observa una reducción moderada en los caudales medios respecto a los escenarios futuros. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto.

- El río Chiquinquirá, en la estación Pte. Pinilla (24017450) se presenta una tendencia contrastante con las demás, ya que se registran aumento moderado en el caudal para todos los escenarios, respecto al histórico.
- En la cabecera de río Suárez hasta la estación La Balsa (24017040) y a la altura de la estación Garavito (24017130) se observan caudales cercanos a los históricos registrados, evidenciándose extremos en el escenario A2. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto.
- **Escenarios del 2041 al 2070**
- Se observa que para la quebrada el Molino, monitoreada por la estación Corralejas (24017800) los valores de caudal medio simulados a futuro, para los escenarios A2, B2 y A1B, oscilan en el rango de los valores de caudal medio históricos, aunque los valores medios máximos son menores a los históricos. De igual forma, se observa que los caudales medios son marcadamente bajos en el escenario A1B.
- En el río Ubaté en la parte alta, monitoreado por la estación la Boyera (24017150), en la parte media por la estación Pte. Barcelona (24017310) se puede observar que los caudales medios simulados para los escenarios A2, B2 y A1B, se presenta una marcada reducción, respecto a los históricos observados, siendo más notoria para el escenario A1B.
- En el río Lenguazaque, monitoreado por las estaciones Tapias (24017140), Boqueron (24017230), Pte la Balsa (24017330) se presenta una reducción ligera para escenarios A2 y B2 y mucho más acentuada para el escenario A1B.
- Para el río Ubaté en su parte baja, cercana a su desembocadura en la Laguna de Fúquene, después de recibir al río Lenguazaque y Suta, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, respecto a los escenarios, aunque si se evidencia una reducción respecto al escenario A1B.
- Comparando el histórico del río Susa, en la estación Pte Peralonso (24017380) con los escenarios, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, evidenciándose extremos en el escenario A2 y B2 y una reducción respecto al escenario A1B.

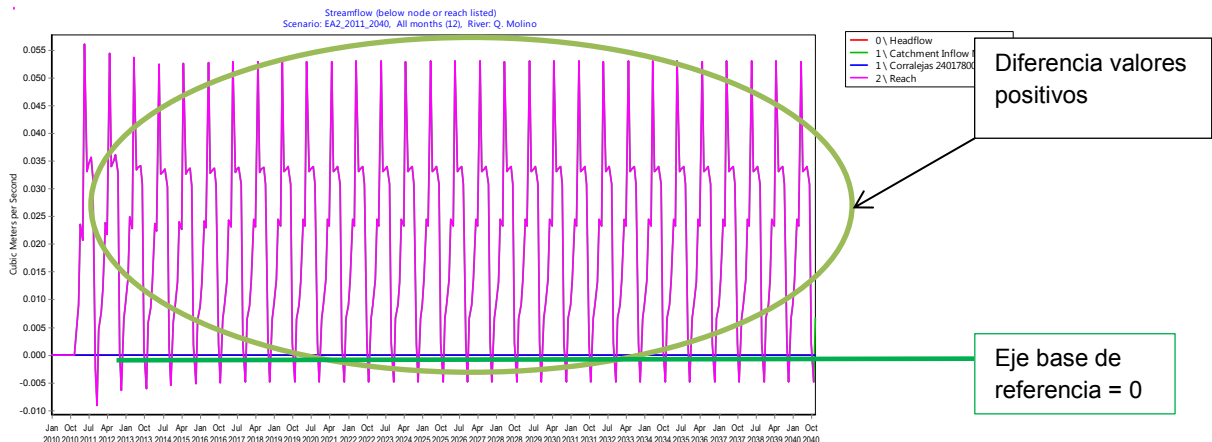
- En río Simijaca se observa una reducción moderada en los caudales medios respecto a los escenarios futuros. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto; la diferencia por defecto es notoria en el escenario A1B.
  - El río Chiquinquirá, en la estación Pte. Pinilla (24017450) se presenta una tendencia contrastante con las demás, ya que se registran aumento moderado en el caudal para todos los escenarios, respecto al histórico.
  - En la cabecera de río Suárez hasta la estación La Balsa (24017040) y a la altura de la estación Garavito (24017130) se observan caudales cercanos a los históricos registrados, evidenciándose caudales extremos ligeramente mayores a los históricos. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto.
- **Escenarios del 2071 al 2100**
  - Se observa que para la quebrada el Molino, monitoreada por la estación Corralejas (24017800) los valores de caudal medio simulados a futuro, para los escenarios A2 y B2, se reducen marcadamente, siendo más bajos en el A2.
  - En el río Ubaté en la parte alta, monitoreado por la estación la Boyera (24017150), en la parte media por la estación Pte. Barcelona (24017310) se puede observar que los caudales medios simulados para los escenarios A2 y B2 se presenta una marcada reducción, respecto a los históricos observados, especialmente para el escenario A2.
  - En el río Lenguazaque, monitoreado por las estaciones Tapias (24017140), Boqueron (24017230), Pte la Balsa (24017330) se presenta una reducción ligera para escenarios A2 y B2.
  - Para el río Ubaté en su parte baja, cercana a su desembocadura en la Laguna de Fúquene, después de recibir al río Lenguazaque y Suta, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, respecto a los escenarios, aunque si se evidencia una reducción respecto al escenario A2.
  - Comparando el histórico del río Susa, en la estación Pte Peralonso (24017380) con los escenarios, se observan caudales cercanos a los históricos registrados, pero no llegan a presentarse esa aleatoriedad y picos extremos.

- En río Simijaca se observa una reducción moderada en los caudales medios respecto a los escenarios futuros. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto.
- El río Chiquinquirá, en la estación Pte. Pinilla (24017450) se presenta una tendencia contrastante con las demás, ya que se registran aumento moderado en el caudal para todos los escenarios, respecto al histórico.
- En la cabecera de río Suárez hasta la estación La Balsa (24017040) y a la altura de la estación Garavito (24017130) se observan caudales cercanos a los históricos registrados. Sin embargo debido a la marcada variación en los históricos en algunos casos esta diferencia es más marcada por exceso y por defecto.

#### 4.3.5.2 Análisis entre escenarios

Se emplea la comparación de valores de magnitud entre escenarios, tomando como base el A2, con el fin de evaluar diferencias. Esto se efectúa por medio de las siguientes gráficas, en las cuales, se tiene un valor cero, como valor del escenario base y se observan valores por encima o por debajo de este.

**Figura 4-29.** Ejemplo comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



En la anterior gráfica, se observa que la mayor parte de la diferencia es positiva, por lo cual se puede inferir, que el escenario A2 presenta mayor caudal que el escenario A1B. También se observa que en algunos meses, con poca magnitud, la diferencia es negativa, siendo el caudal en el escenario A2 menor.

- **Escenarios del 2011 al 2040**

- Para la quebrada el Molino, comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas con mayores caudales que en el B2, y el A1B en algunos meses registra caudales ligeramente mayores, pero en la mayoría de los casos son menores respecto al A2.
- En el río Ubaté alto en la parte alta y media, se observa que el escenario A2 evidencian mayores caudales que el B2, y el A1B en algunos meses registra caudales mayores por muy poca cuantía, pero la gran mayoría de los casos son menores respecto al A2.
- Respecto al río Lenguazaque, se puede afirmar que el escenario A2 evidencian mayores caudales que el B2, y el A1B los caudales medios son menores respecto al A2.
- Para el río Ubaté en la parte baja, comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas con mayores y menores caudales que en el B2, dependiendo del mes, y el A1B en algunos meses registra caudales ligeramente mayores, pero en la mayoría de los casos son menores respecto al A2.
- En el caso del río Susa, se observa que el escenario A2 registra diferencias marcadas, unas de caudales superiores y otras inferiores dependiendo el mes, pero la magnitud de la diferencia de los caudales menores supera a los mayores. Lo mismo ocurre para el escenario A1B, aunque la magnitud de la diferencia de los caudales mayores supera a la de los menores.
- Para el río Simijaca se observa que en el escenario A2 se presentan caudales menores y mayores a los escenarios B2 y A1B, aunque en su cuantía y magnitud, son más los caudales menores.

- En el río Chiquinquirá comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas con mayores caudales que en el B2, y el A1B, se registran diferencias marcadas, unas de caudales superiores y otras inferiores dependiendo el mes.
  - En el río Suarez, cerca de su cabecera y cerca de la estación Garavito (24017130), se puede evidenciar que comparado con el escenario B2, el escenario A2 presenta diferencias de caudales mayores y menores, siendo las diferencias más marcadas para los caudales menores. Respecto al escenario A1B se presenta lo mismo.
- 
- **Escenarios del 2041 al 2100**
  - Para la quebrada el Molino, comparando el escenario A2, se observa que el este registra algunos meses con caudales mayores y otros con menores respecto al B2. Por su parte, este respecto al A1B registra caudales medios mayores.
  - En el río Ubaté alto en la parte alta y media, se observa que el escenario A2 registra caudales superiores e inferiores ligeramente a los de B2, dependiendo del mes, y el A1B registra caudales menores por respecto al A2.
  - Respecto al río Lenguazaque, se puede afirmar que el escenario A2 evidencian mayores caudales que el B2, y el A1B.
  - Para el río Ubaté en la parte baja, se observa que el escenario A2 registra diferencias marcadas con mayores y menores caudales que en el B2, dependiendo del mes, y el A1B en algunos meses registra caudales ligeramente mayores, pero en la gran mayoría de los casos son menores respecto al A2.
  - En el caso del río Susa, se observa que el escenario A2 registra diferencias marcadas, unas de caudales superiores y otras inferiores dependiendo el mes, pero la magnitud de la diferencia de los caudales mayores supera a la de los menores.
  - Para el río Simijaca se observa que en el escenario A2 se presentan caudales menores y mayores a los escenarios B2, pero son muchos más en cuantía y magnitud los caudales mayores respecto a B2. En el caso de A1B, este registra caudales menores a A2.

- En el río Chiquinquirá se observa que en el escenario A2 se presentan caudales menores y mayores a los escenarios B2, pero son muchos más en cuantía y magnitud los caudales mayores respecto a B2. En el caso de A1B, este registra caudales menores a A2.
  - En el río Suarez, cerca a su cabecera y cerca a la estación Garavito (24017130), presenta diferencias de caudales mayores y menores, siendo las diferencias más marcadas para caudales menores registrados en los escenarios B2 y A1B.
- **Escenarios del 2071 al 2100**
- Para la quebrada el Molino, comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas en su mayoría, por menores caudales que en el B2.
  - En el río Ubaté alto en la parte alta y media y en el río Lenguzaque, se observa que el escenario A2 evidencian caudales ligeramente menores que el B2.
  - Respecto al río Lenguzaque, se puede afirmar que el escenario A2 evidencian menores caudales que el B2, de considerable magnitud.
  - Para el río Ubaté en la parte baja, comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas con mayores y menores caudales que en el B2, dependiendo del mes.
  - En el caso del río Susa, se observa que el escenario A2 registra diferencias marcadas, unas de caudales superiores y otras inferiores dependiendo el mes, pero la magnitud de la diferencia de los caudales menores supera a los mayores.
  - Para el río Simijaca se observa que en el escenario A2 se presentan caudales menores y mayores a los escenarios B2, los cuales en cuantía y magnitud, son más los caudales menores los de B2.
  - En el río Chiquinquirá comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias marcadas con mayores caudales que en el B2.
  - En el río Suarez, cerca a su cabecera y cerca a la estación Garavito, se puede evidenciar que comparado con el escenario B2, el escenario A2 presenta diferencias de caudales mayores y menores, siendo las diferencias más marcadas para los caudales menores de B2.





## **5.MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA**

### **5.1 DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA QUAL 2k INCLUIDA EN WEAP**

#### **5.1.1 Generalidades**

El Stream Water Quality Model – QUAL 2Kw Es un modelo de calidad del agua de estado estable en ríos, de uso libre, desarrollado bajo la aplicación de Visual Basic. Ejecuta un balance de masas donde considera el transporte del vertimiento, la dispersión longitudinal y el movimiento de masa a lo largo del cuerpo de agua receptor. (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

El modelo Qual 2Kw emplea una ecuación general de balance para la concentración de un constituyente  $C_i$  en la columna de agua (excluyendo la zona en la cual se encuentran los sedimentos saturados de agua debajo y a los lados de los ríos) de un tramo  $i$ . Los términos de transporte y carga para la modelación de las algas en el fondo son omitidos en la ecuación de balance masa (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

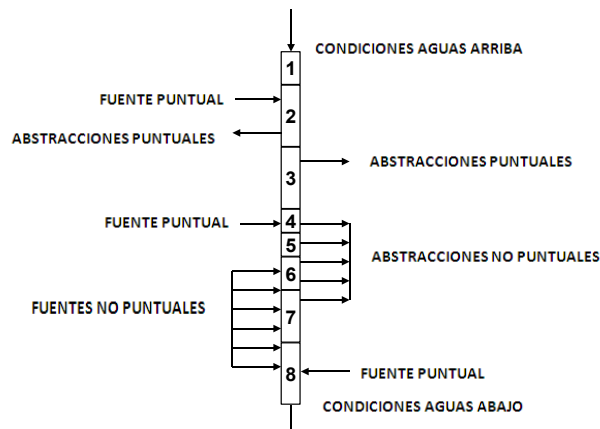
El QUAL 2Kw es un modelo unidimensional, que puede usarse tanto en condiciones de régimen permanente, como no permanente; este, además permite, de acuerdo a su estructura, múltiples descargas, extracciones y afluentes, considerados puntuales, como también caudales distribuidos además puede simular, numerosos parámetros de calidad de aguas, como Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Temperatura, Nitrógeno Orgánico, Amonio, Nitrito, Nitrito, Nitrito, Fósforo Orgánico, Fósforo Disuelto, Coliformes entre otros (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012). Sin embargo, los

módulos incluidos en WEAP son Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Temperatura, y un módulo para sustancias conservativas.

- **Segmentación y balance hidráulico**

El modelo representa al cuerpo de agua como una serie de segmentos en un tramo, con condiciones hidráulicas similares (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

**Figura 5-1.** Segmentación y balance hídrico del modelo QUAL 2kw



Fuente: Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H.,(2012)

- **Balance de Flujo**

El balance de flujo en estado estacionario es implementado para cada uno de los modelos, y esta dado bajo la siguiente expresión (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012):

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_{evap,i} \quad (5-1)$$

Donde:

$Q_i$ : Flujo de salida desde del elemento  $i$  hacia el elemento de aguas abajo  $i+1$  ( $m^3/día$ ).

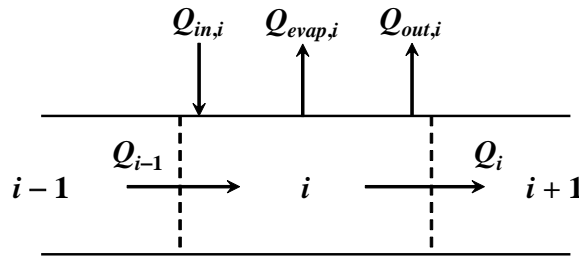
$Q_{i-1}$ : Ingreso desde el elemento de aguas arriba  $i-1$  ( $m^3/día$ ).

$Q_{in,i}$ : Flujo total de ingreso en el elemento desde fuentes puntuales y no puntuales ( $m^3/día$ ).

$Q_{out,i}$ : Flujo total de salida por abstracciones puntuales y no puntuales ( $m^3/día$ ).

$Q_{evap,i}$ : Flujo total de salida por abstracciones evaporación ( $m^3/día$ ).

**Figura 5-2.** Balance de Flujo QUAL 2Kw



Fuente: Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H.,(2012)

- **Características Hidráulicas**

Cuando la salida de cada elemento es calculada, se procede a calcular la velocidad y profundidad de salida, por medio de tres formas: aliviaderos - vertederos, curvas de gastos y por medio de la ecuación de Manning (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

- **Modelo de Temperatura**

El modelo calcula la transferencia de calor desde elementos adyacentes como sedimentos, cargas y la atmósfera (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left( \frac{m^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right) + \frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left( \frac{m}{100 \text{ cm}} \right) \quad (5-2)$$

Donde:

$T_i$ : Temperatura del elemento  $i$  ( $^{\circ}C$ ).

$E_i$ : Coeficiente de dispersión de carga entre elementos  $i$  e  $i+1$  ( $m^3/día$ ).

$W_{h,i}$ : Carga de calor neto a partir de fuentes puntuales y no puntuales en el elemento  $i$  (cal/día).

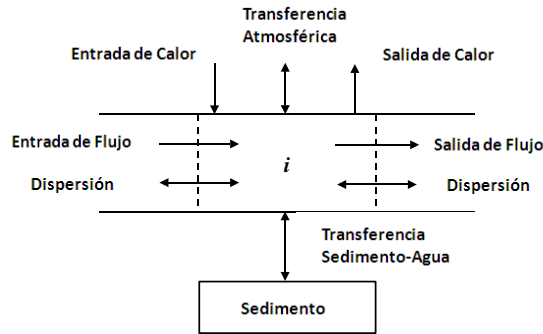
$\rho_w$ : Densidad del agua (g/cm<sup>3</sup>).

$C_{p,w}$ : Calor específico del agua (cal/(g °C)).

$J_{a,i}$ : Flujo de calor aire-agua (cal/(cm<sup>2</sup> d)).

$J_{s,i}$ : Flujo de calor sedimento-agua (cal/(cm<sup>2</sup> d)).

**Figura 5-3.** Modelo de Temperatura QUAL 2Kw



Fuente: Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H.,(2012)

• **Constituyentes del Modelo: Balance General de Masas**

El modelo utiliza el siguiente balance de masas para todos los parámetros excepto para algas de fondo (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012):

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \tag{5-3}$$

Donde:

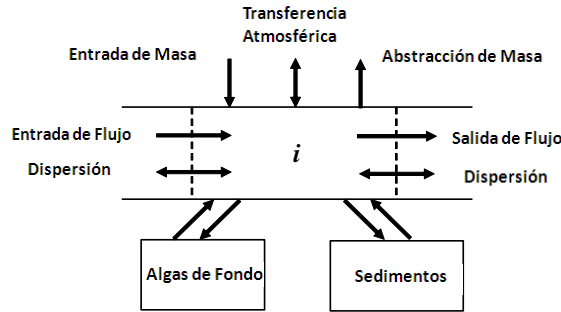
$C_i$ : Es la concentración del constituyente en el elemento  $i$  (mg/L).

$V_i$ : Es el volumen del elemento  $i$  (m<sup>3</sup>).

$W_i$ : Carga externa del constituyente al elemento  $i$  (g/día).

$S_i$ : Fuente y sumideros del constituyente debido a reacciones y mecanismos de transferencia de masa ( $\text{g}/\text{m}^3/\text{día}$ ).

**Figura 5-4.** Balance de masa QUAL 2Kw



Fuente: Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H.,(2012)

- **Reacciones Fundamentales**

Entre las reacciones fundamentales se cuenta con el efecto de la temperatura en las tasas de reacción (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012).

$$k(T) = k(20)\theta^{T-20} \tag{5-4}$$

Donde,

$k(T)$  es la tasa de reacción ( $\text{d}^{-1}$ ) a una temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta$  es un coeficiente de la temperatura de acuerdo al tipo de reacción.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) Carbonácea**

La interpretación de las medidas de la DBO en aguas naturales es compleja por tres razones: La filtración; la DBO no filtrada puede presentar oxidación del carbón orgánico particulado y disuelto; esta se separa en el QUAL 2k. También puede incluir la DBO nitrogenásea (NDBO) la cual no se inhibe y ayuda a la reducción de oxígeno. Además, la  $\text{DBO}_5$  debe ser transformada a DBO última, a través de la tasa de decaimiento de la DBO que se presentó esos cinco días: de esta forma se puede extrapolar el valor de la DBO a DBO última.

$$CBODFNU = \frac{CBODFN5}{1 - e^{-k_1 5}} \quad (5-5)$$

Dónde,

CBODFNU es la DBO última carbonácea disuelta (mg O<sub>2</sub>/L).

CBODFN5: es la DBO carbonácea disuelta de cinco días (mg O<sub>2</sub>/L).

k<sub>1</sub>: es la tasa de descomposición de la DBO en la botella (d<sup>-1</sup>) a 20°C.

La DBO última carbonácea disuelta es la DBO rápida y la DBO lenta es la diferencia entre la DBO carbonácea afectada por un factor y la DBO última carbonácea disuelta.

$$c_f = CBODFNU \quad (5-6)$$

$$c_s = r_{oc}DOC - CBODFNU \quad (5-7)$$

○ **Oxígeno Disuelto (D)**

El oxígeno disuelto se pierde por oxidación rápida de la DBO carbonácea, por nitrificación, respiración de las plantas, etc., y dependiendo si el agua se encuentra aturada, no saturada y si se genera aireación.

$$S_o = r_{oa}PhytoPhoto + r_{oa} \frac{BotAlgPhoto}{H} - r_{oc}FastCOxid - r_{on}NH4Nitr - r_{oa}PhytoResp - r_{oa} \frac{BotAlgResp}{H} + OxReaer \quad (5-8)$$

Dónde,

$$OxReaer = k_a(T)(o_s(T, elev) - o) \quad (5-9)$$

$$\ln o_s(T, 0) = -139.34411 + \frac{1.575701 \times 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 \times 10^7}{T_a^2} + \frac{1.243800 \times 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 \times 10^{11}}{T_a^4} \quad (5-10)$$

$$o_s(T, elev) = e^{\ln o_s(T, 0)} (1 - 0.0001148 \text{elev})$$

$k_a(T)$  es el coeficiente de reaireación que depende de la temperatura ( $d^{-1}$ )

$O_s$ : es el oxígeno de saturación de acuerdo a la temperatura y a la elevación ( $mg O_2/L$ ).

El coeficiente de reaireación puede ser introducido, o calculado de acuerdo a condiciones hidráulicas, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$k_a(20) = k_{ah}(20) + \frac{K_{Lw}(20)}{H}$$

Dónde,

$k_{ah}(20)$  es la tasa de reaireación a  $20^\circ C$  basada en características hidráulicas del río.

$K_{Lw}$  es el coeficiente de reaireación de transferencia de masa basado en la velocidad del viento (m/s).

H: es la profundidad media del tramo (m).

Finalmente el balance del oxígeno es:

$$\frac{do_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} o'_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} o_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} o_i + \frac{E'_i}{V_i} (o_{i+1} - o_i) + \frac{W_{o,i}}{V_i} + S_{o,i} \quad (5-11)$$

Dónde,

$$o'_{i-1} = o_{s,i-1} - \frac{o_{s,i-1} - o_{i-1}}{r_d} \quad (5-12)$$

- **Reacciones Constituyentes**

Las reacciones constituyentes configuran modelos para cada uno de los elementos y procesos biológicos.

Así, en WEAP (versión educativa) se incluyen los módulos con reacciones conservativas, reacción DBO lenta y DBO rápida, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto (demanda, oxígeno de saturación, reaireación, reaireación con estructuras hidráulicas), los cuales se describen a continuación (Chapra, S. C., Pelletier, G. J., Tao, H., 2012):

- **Sustancia Conservativa (s)**

Las sustancias conservativas no están sujetas a reacción, por lo cual la tasa de reacción es cero ( $S_s=0$ )

## **5.2 ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA – ESTUDIOS PREVIOS**

La evaluación de la calidad del agua, se efectúa partir de la información de campañas de medición de calidad del agua, suministrada amablemente por la Subdirección de Recursos Naturales de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y a partir del inventario de usos y usuarios que contrató dicha entidad, a SECAB - Planeación Ecológica, Ltda., la cual hizo el levantamiento de la información desde el año 2006 y publicó sus resultados en el año 2010.

Se efectúa un análisis de acuerdo a los resultados de las campañas de calidad del agua realizadas por la Corporación Autónoma Regional CAR, cada semestre, desde el año 2007, en 37 puntos sobre el cauce principal y afluentes importantes (Ver Anexo B.4.). De estos análisis se emplean determinantes que reflejan afectación fisicoquímica en la calidad del agua por vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, como se presenta en la Tabla 5.1.



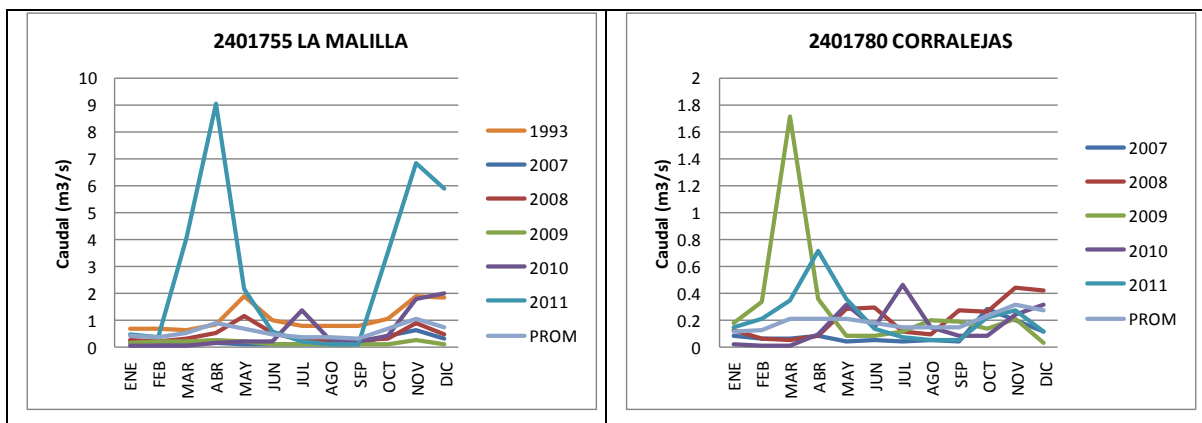
**Tabla 5.1:** Determinantes de calidad evaluados en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez, para vertimientos domésticos e industriales (industria láctea y minera)

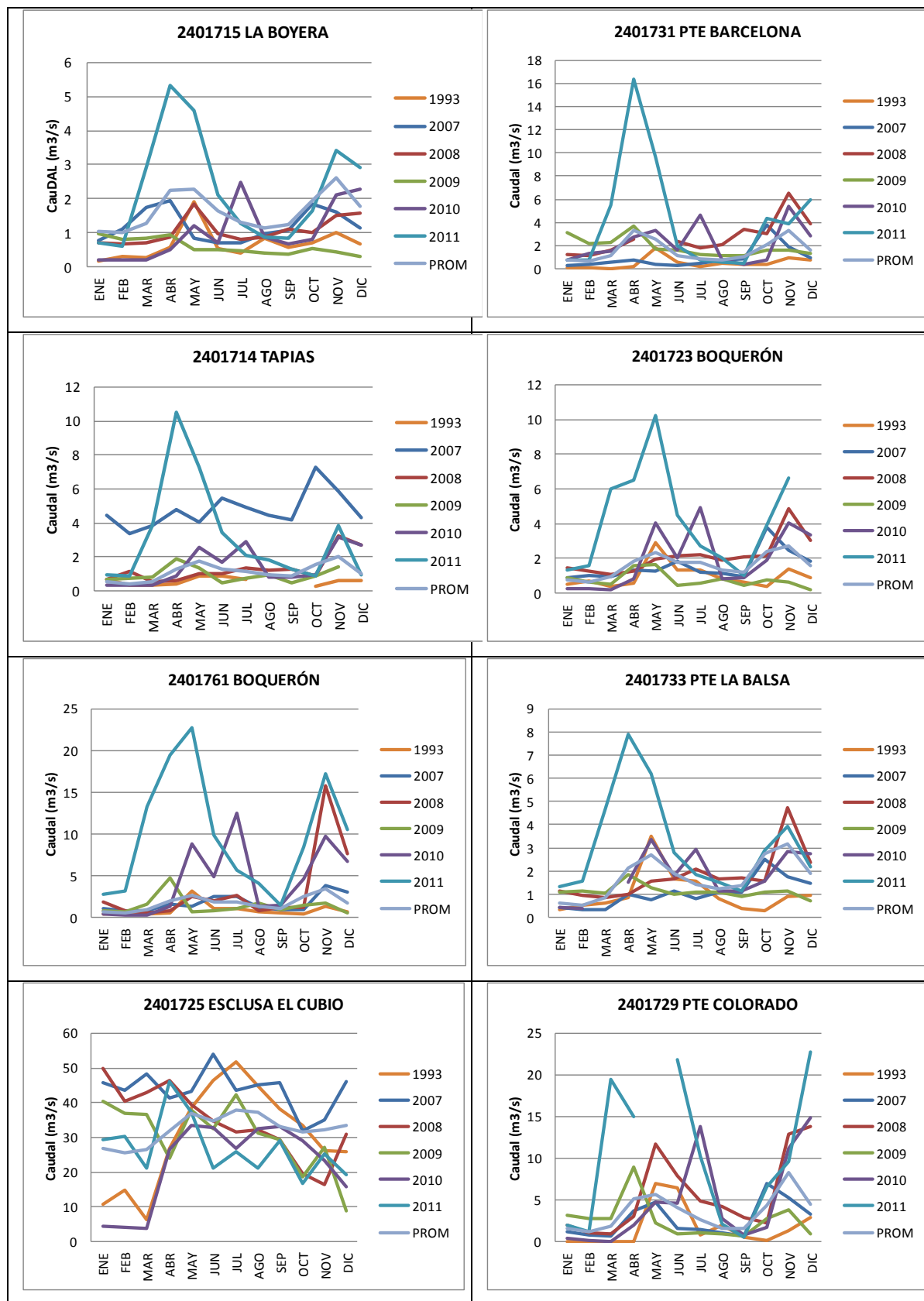
DETERMINANTES	VERTIMIENTO
Oxígeno Disuelto	Domésticos Industria láctea
DBO	Domésticos Industria láctea
DQO	Domésticos Industria láctea

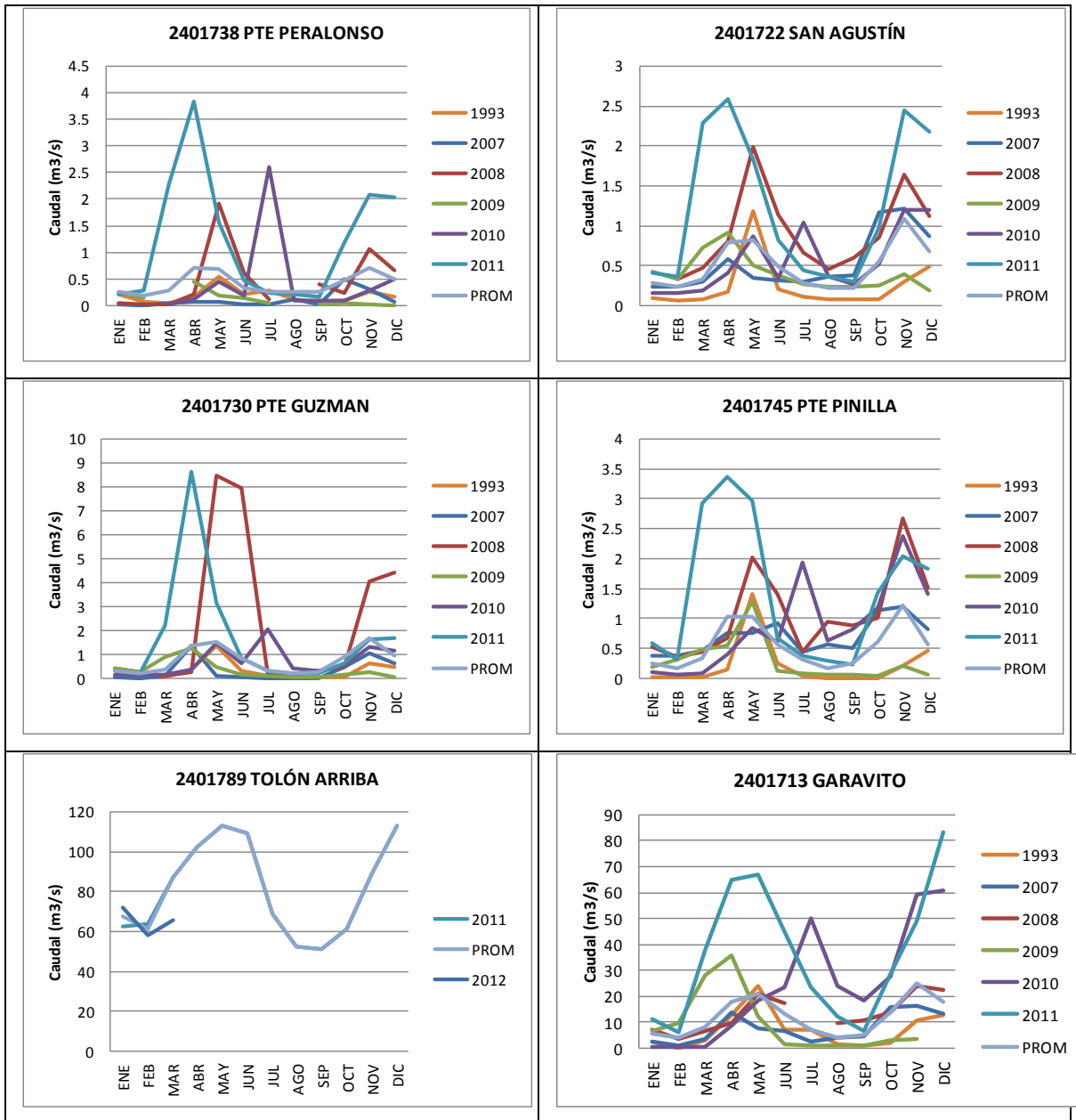
Los resultados de análisis de estos determinantes, evaluados en estudios como el desarrollado por el CONSORCIO CUENCAS (2006) son representados espacialmente (ver Anexo B.4.). A partir de estos, se puede concluir que los puntos más críticos son: Río Suta (afluente), Laguna de Fúquene

Además, resulta relevante evaluar específicamente los caudales del periodo de las campañas de muestreo. A partir de estos, se observa similitud en algunos casos, entre los caudales del año 1993 y 2009, y en otros, entre 1993 y 2008, los cuales siguen la tendencia del promedio mensual multianual. También, se evidencian claramente eventos extremos en el año 2011, y para algunas estaciones, en el año 2008, 2009 y 2010.

**Figura 5-5.** Caudales mensuales de los años de campañas de campo de calidad del agua, comparados con el año base y con los caudales medios mensuales multianuales.

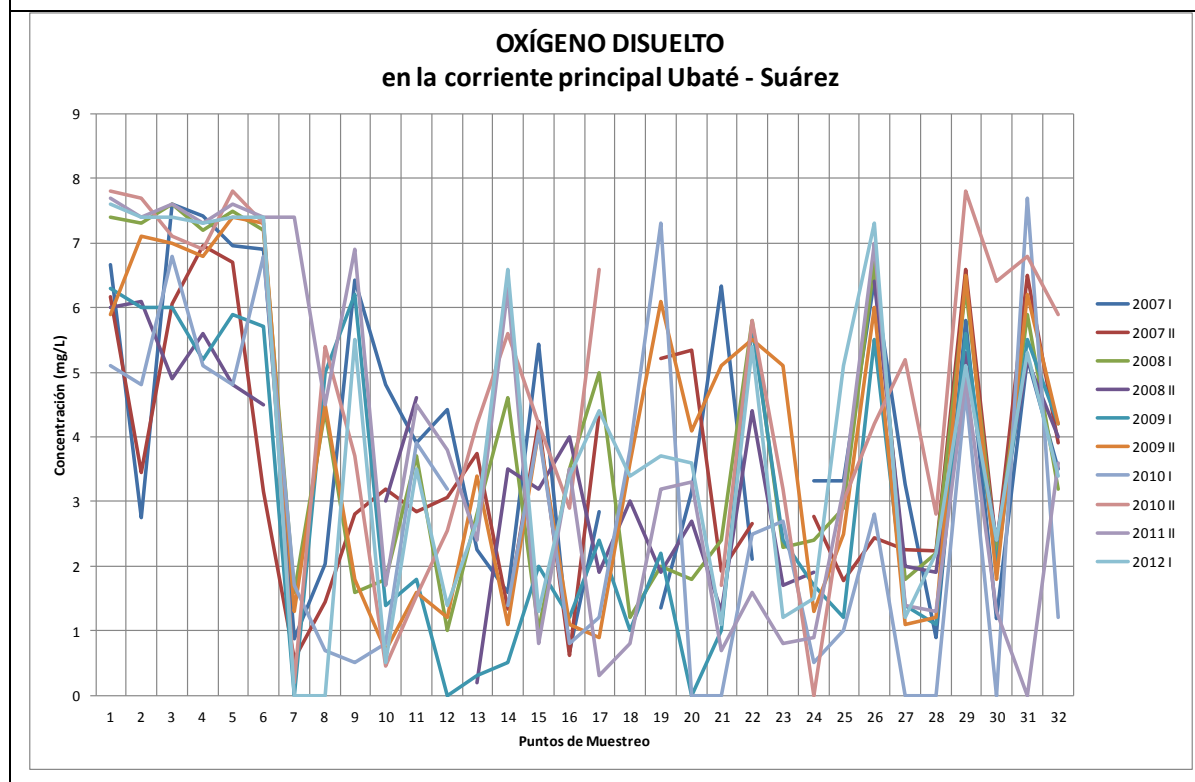
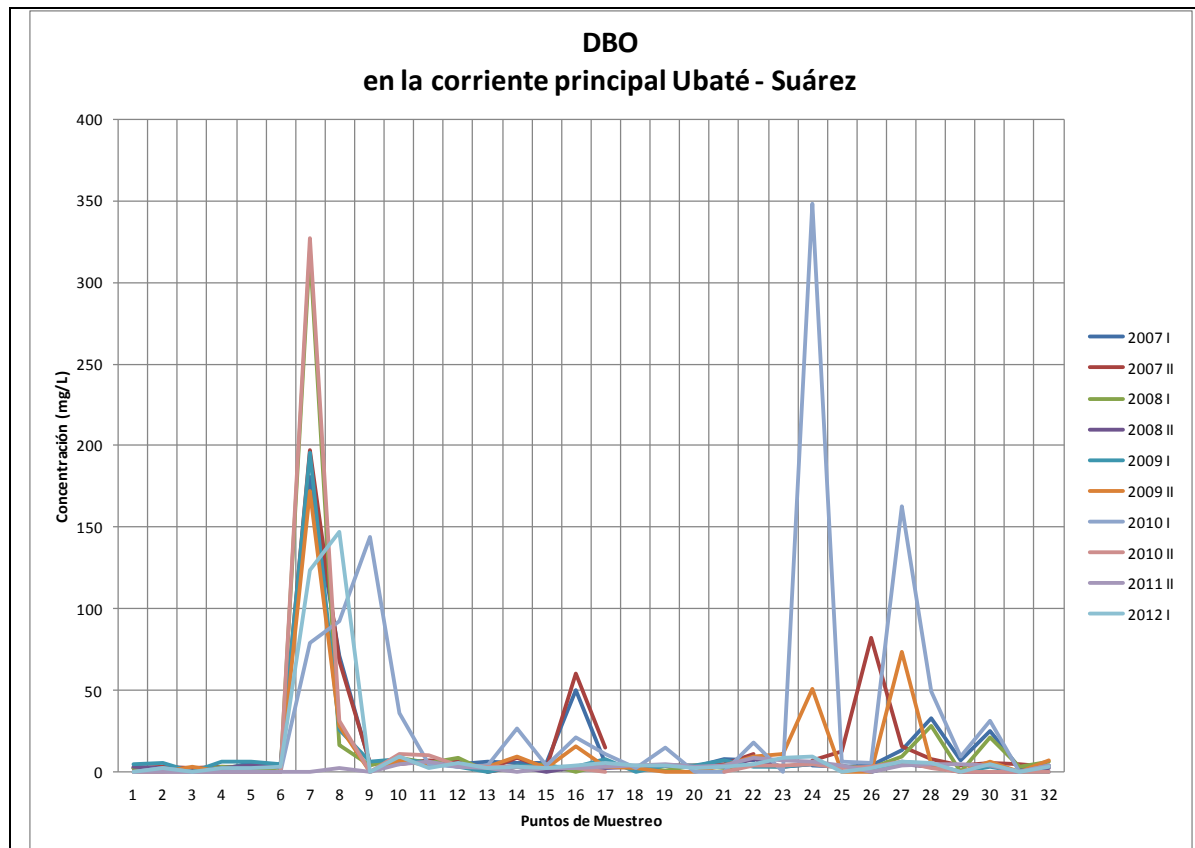


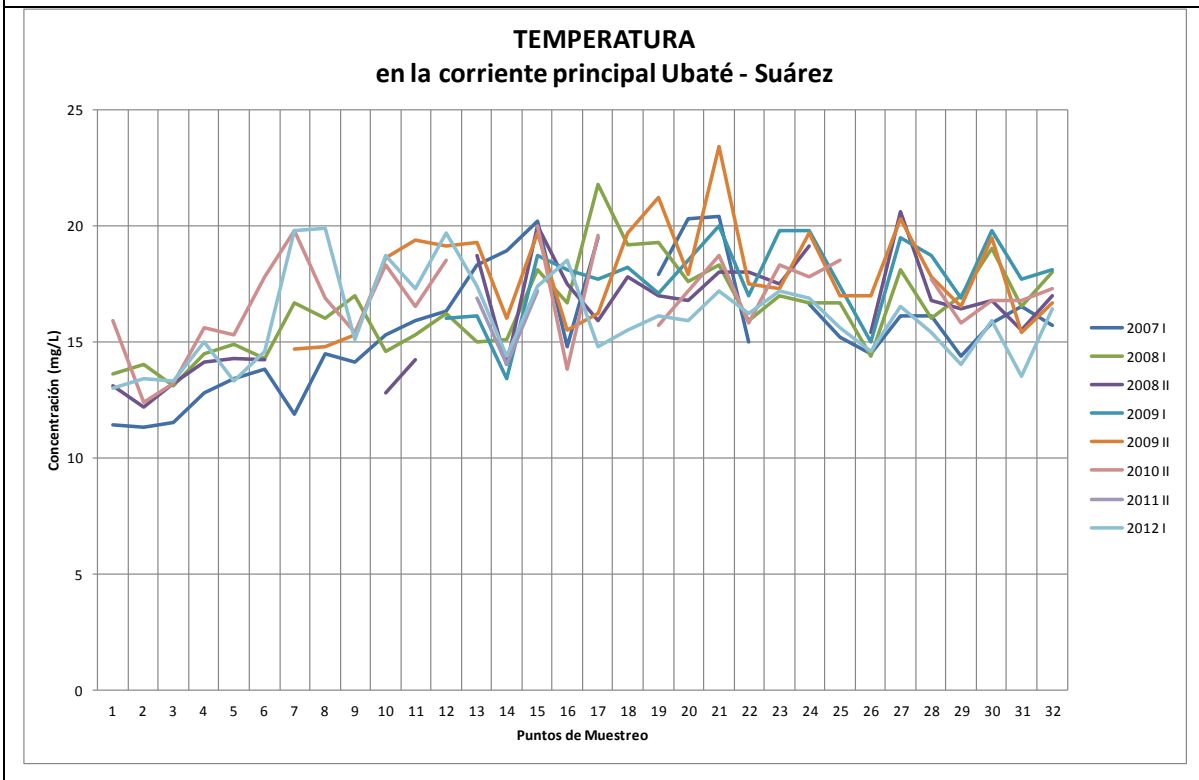
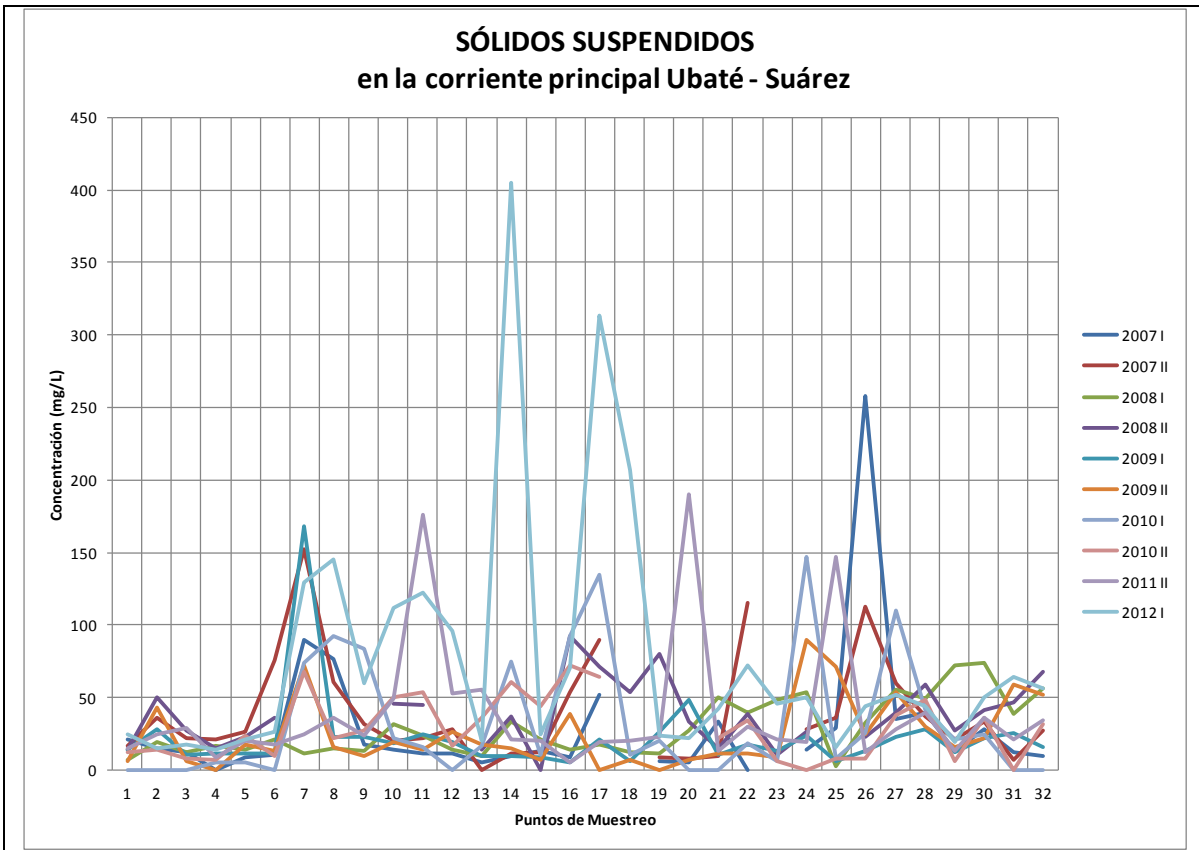




De igual forma, se evalúa el corto comportamiento histórico de calidad del agua en la cuenca de estudio, con el que se cuenta para cada punto de muestreo, por parámetro, el cual se presenta en la Figura 5-6.

**Figura 5-6.** Datos históricos de los determinantes calidad del agua sobre la corriente Ubaté y Suárez.





A partir de la anterior figura, se puede afirmar que los valores pico de determinantes como la DBO (demanda Biológica de Oxígeno) se presentan en el punto del río Suta (punto No. 7) y en su desembocadura en el río Ubaté (punto No. 8), en el río Simijaca (punto No. 16), en el vallado Escorial (punto No. 17), en la desembocadura del río Simijaca al río Suárez (punto No 18), en la desembocadura del río Chiquiquirá al río Suárez (punto 24), en el canal Madrón (No. 25), en la quebrada Puente Tierra y aguas abajo de esta (punto No. 26 y 27), en la esclusa Merchán (punto No. 28), aguas debajo de la quebrada la Ruda (punto No. 30) y en la estación Garavito (punto No. 32).

En cuanto al oxígeno disuelto, este varía extremadamente entre punto y punto, aunque de modo general, se puede evidenciar un descenso marcado desde el punto del río Suta (punto No. 7), y a partir de allí se torna oscilante, pero con concentración baja. Las concentraciones altas de oxígeno disuelto corresponden a los tributarios de la corriente principal, siendo consecuente con los puntos críticos resaltados en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

Por su parte, los sólidos suspendidos Totales (SST) se presentan en mayor concentración en la desembocadura de los tributarios y en los tributarios. Lo mismo ocurre con la temperatura, la cual, a nivel general tiene una tendencia de ascenso a lo largo de la corriente.

## 5.3 MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA EN WEAP

### 5.3.1 Desarrollo Esquema de Modelación

Para la modelación de calidad del agua de los puntos monitoreados, se ingresa la caracterización hidráulica, las variables climáticas registradas tomadas en campo en cada punto muestreado (ver Tabla 5.2) y los resultados de concentración de los determinantes de calidad analizados (ver Tabla 5.3). Se toma como año base, el año 2007, ya que en este año se inició la evaluación y modelación de la calidad del agua de la cuenca Ubaté Suárez por funcionarios de la CAR, basados en el estudio realizado por el CONSORCIO CUENCAS 2006.

La modelación se centró en el río Ubaté (Alto Ubaté y río Ubaté denominado así en el proyecto en WEAP), con cabecera en la Quebrada Molino, y en el Río Suárez. Los demás ríos y quebradas se ingresan como tributarios, los cuales con su aporte inciden en su calidad del agua.

Es importante resaltar que la modelación de la calidad del agua sólo se centró en evaluar los determinantes señalados en la Tabla 5.1, debido a que solo estos módulos de calidad están incluidos en WEAP; para incluir los demás módulos, se requiere una licencia y una vinculación al grupo de investigación del Stockholm Environment Institute (SEI), desarrollador de la herramienta de modelación, por lo cual, no se desarrolló por razones de tiempo y de convenios.

**Tabla 5.2.** Caracterización hidráulica y datos climatológicos tomados en campo para cada punto muestreado sobre el río principal Ubaté – Suárez, tomados en la campaña realizada en el año 2007.

PUNTO MUESTREADO	Distancia	Q, m <sup>3</sup> /s	Profundidad (m)	Ancho (m)	Velocidad (m/s)	Tiempo de Viaje	Pendiente	Temperatura del aire	Cobertura de Nubes	Sombra
Estación LM la Malilla	0.00	0.14	0.06	3.00	0.83	0.00	0.041000	13.00	100.0%	70.0%
A. arriba Río el Hato	0.60	0.14	0.05	3.00	0.93	0.01	0.060000	13.60	90.0%	20.0%
Estación LM la Boyera	5.96	0.14	0.05	3.20	0.86	0.08	0.050000	14.10	100.0%	5.0%
Puente Barcelona	14.04	0.14	0.08	3.30	0.55	0.18	0.012000	14.90	60.0%	50.0%
Esclusa Tolon	50.16	10.02	5.01	20.00	29.60	0.00	0.000100	15.80	40.0%	20.0%
LG la balsa	50.81	13.31	3.04	10.00	0.44	0.02	0.000100	17.90	60.0%	10.0%
Aguas abajo quebrada Puente tierra	53.61	13.86	3.86	8.00	0.45	0.10	0.000100	16.90	70.0%	30.0%
LG esclusa Merchan	58.31	13.86	1.91	7.50	0.97	0.22	0.000840	20.00	70.0%	100.0%
Aguas abajo quebrada la Ruda	59.51	13.93	2.60	12.50	0.43	0.23	0.000100	18.00	100.0%	10.0%
Aguas abajo quebrada la Ruda	59.57	10.28	2.12	12.50	0.39	0.00	0.000100	13.50	100.0%	30.0%
Garavito	65.59	10.28	1.24	12.50	0.67	0.18	0.000520	16.70	50.0%	10.0%

Fuente: Informes suministrados por la Subdirección de Recursos Naturales de la CAR.

**Tabla 5.3.** Resultados análisis de laboratorio de calidad del agua del año 2007 para cada punto muestreado sobre el río principal Ubaté – Suárez.



No. Punto	Nombre	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto en campo*	DBO *	DQO *	Sólidos Suspendidos *	pH en campo*	Coliformes Totales *	E. coli *
1	ESTACIÓN LG MALILLA	11.4	6.16	2.6	14.4	16.5	7.21	1000	1000
2	QUEBRADA SUCHINICA	11.3	3.45	3.3	36.4	36	3.02	4100	4100
3	RÍO UBATÉ ANTES DEL RÍO HATO	11.5	6.06	2.1	25.6	21.7	7.3	5000	2400
4	RÍO EL HATO	12.8	6.95	3.1	37.2	21	4.06	1000	1000
5	ESTACIÓN LG LA BOYERA	13.4	6.7	2.6	24.2	26	7.66	4500	8500
6	ESTACIÓN LG PUENTE BARCELONA	13.8	3.15	2.7	29.6	75.3	4.29	13000	4100
7	RÍO SUTA	11.9	0.56	197	371	152	6.88	2000000	760000
8	DESPUÉS DEL RÍO SUTA	14.5	1.44	68	317	60.4	4.02	1000000	360000
9	RÍO LENGUAZAQUE	14.1	2.81	5.4	39.1	31.8	3.55	7500	2500
10	LM ESCLUSAS EL CUBIO	15.3	3.2	4.9	29.8	20	6.64	2700000	260000
11	ESTACIÓN LG. PUENTE COLORADO	15.9	2.85	7	31.2	21.9	6.87	26000	15000
12	RÍO UBATÉ ANTES DE LAGUNA FUQUENE	16.3	3.06	6	39.5	28.4	6.51	24000	7400
13	RÍO SUARÉZ DESPUÉS DE LAGUNA DE FÚQUENE	18.3	3.74	1.9	42.2	0	6.93	1000	1000
14	CANAL RÍO SUSÁ	18.9	1.34	8.2	106	11.6	6.92	230000	63000
15	ESTACIÓN LG SAN MIGUEL. PUENTE CONCRETO	20.2	4.24	2.4	66.1	12.6	7.38	10000	10000
16	RÍO SIMIJACA	14.8	0.62	60	158	53.3	7.22	2000000	390000
17	VALLADO ESCORIAL	19.5	4.36	14.6	56.8	90	7.07	31000	10000
18	AGUAS ABAJO DEL RÍO SIMIJACA								
19	VALLADO GRANDE	17.9	5.22	3.7	46	9	6.82	2000	1000
20	QUEBRADA EL CHARCO	20.3	5.34	3.5	34.1	8.1	6.73	9000	1000
21	LG. ESCLUSAS DE TOLÓN	20.4	1.92	4.3	70.1	10	6.59	1000	1000
22	RÍO CHIQUINQUIRA	15	2.65	10.9	80.4	115	6.84	73000	21000

No. Punto	Nombre	Temperatura °C	Oxígeno Disuelto en campo*	DBO *	DQO *	Sólidos Suspendidos *	pH en campo*	Coliformes Totales *	E. coli *
23	LG LA Balsa								
24	AGUAS ABAJO RÍO CHIQUINQUIRÁ	16.6	2.77	7.1	94.8	28.1	6.83	15000	9800
25	CANAL MADRÓN	15.2	1.77	12.3	106	36	6.48	1000	1000
26	QUEBRADA PUENTE TIERRA	14.5	2.44	82	154	113	6.83	490000	52000
27	AGUAS ABAJO QUEBRADA PUENTE TIERRA	16.1	2.26	15.8	53	60	6.69	110000	24000
28	ESC. MERCHÁN	16.1	2.24	7.5	51.4	36.5	6.73	170000	46000
29	Q. LA RUDA	14.4	6.6	3.8	21.4	21	7.1	1.30E+04	2.70E+03
30	AGUAS ABAJO Q. LA RUDA	15.8	2.3	5.1	48.4	33.3	6.75	1.20E+05	2.00E+04
31	QUEBRADA LA JABONERA	16.5	6.5	4.3	13	7	6.78	5.40E+03	4.10E+02
32	LG. GARAVITO	15.7	3.9	3.3	47.6	27.1	6.78		

Fuente: Informes suministrados por la Subdirección de Recursos Naturales de la CAR.

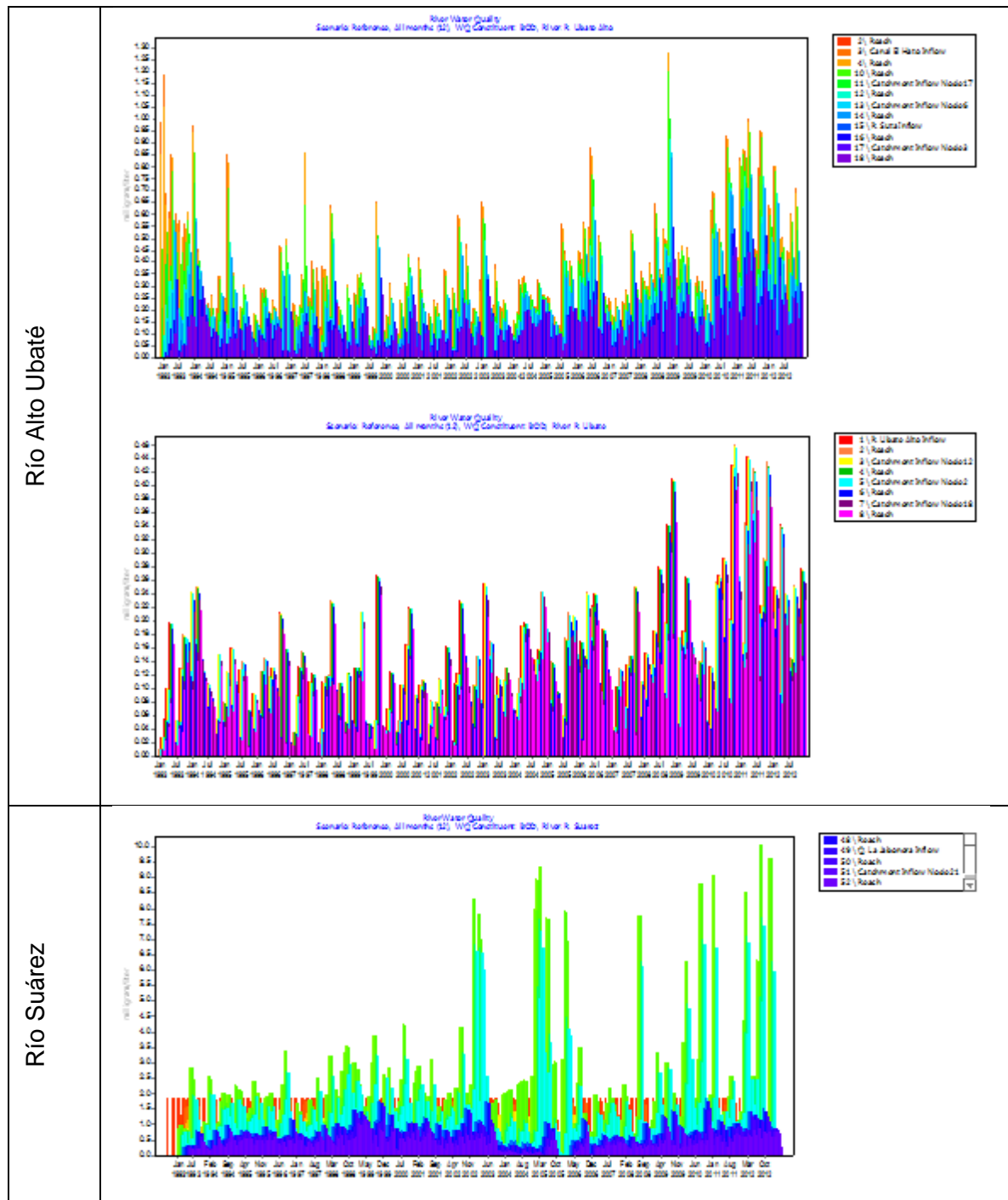
### 5.3.2 Calibración y Resultados

La modelación de calidad del agua se efectúa por medio de módulos del QUAL 2k incluidos en WEAP. Esto trae consigo algunas limitantes al usuario de la versión educativa, ya que no existe una interfaz o vía de acceso para calibrar las tasas de reacción de los diferentes determinantes simulados. En este orden de ideas, se efectúa la modelación de acuerdo a tasas teóricas establecidas a partir de literatura y estudios previos efectuados por el equipo desarrollador de QUAL 2k.

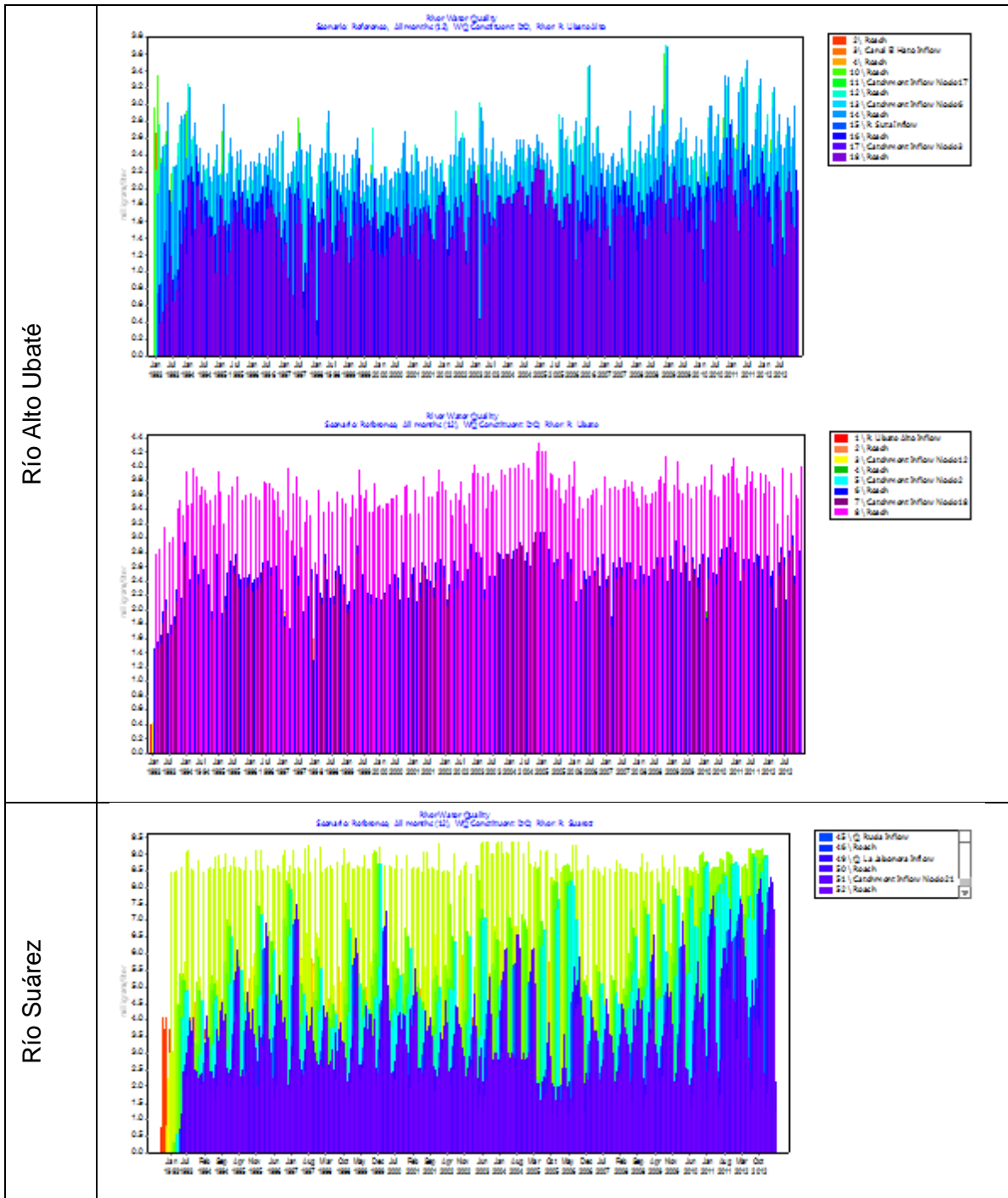
De acuerdo a lo anterior, no se pudo efectuar calibración de los parámetros de modelación de calidad del agua, por lo cual, se toman los valores de calidad del agua como indicadores diferenciales, más no como cuantificadores exactos de la concentración de los determinantes evaluados. De esta forma, dichos indicadores sólo cumplen la función de representar el cambio de la concentración de los determinantes evaluados, respecto al escenario histórico de referencia y a los escenarios futuros.

Los resultados de esta modelación se presentan en la Figura 5-7.

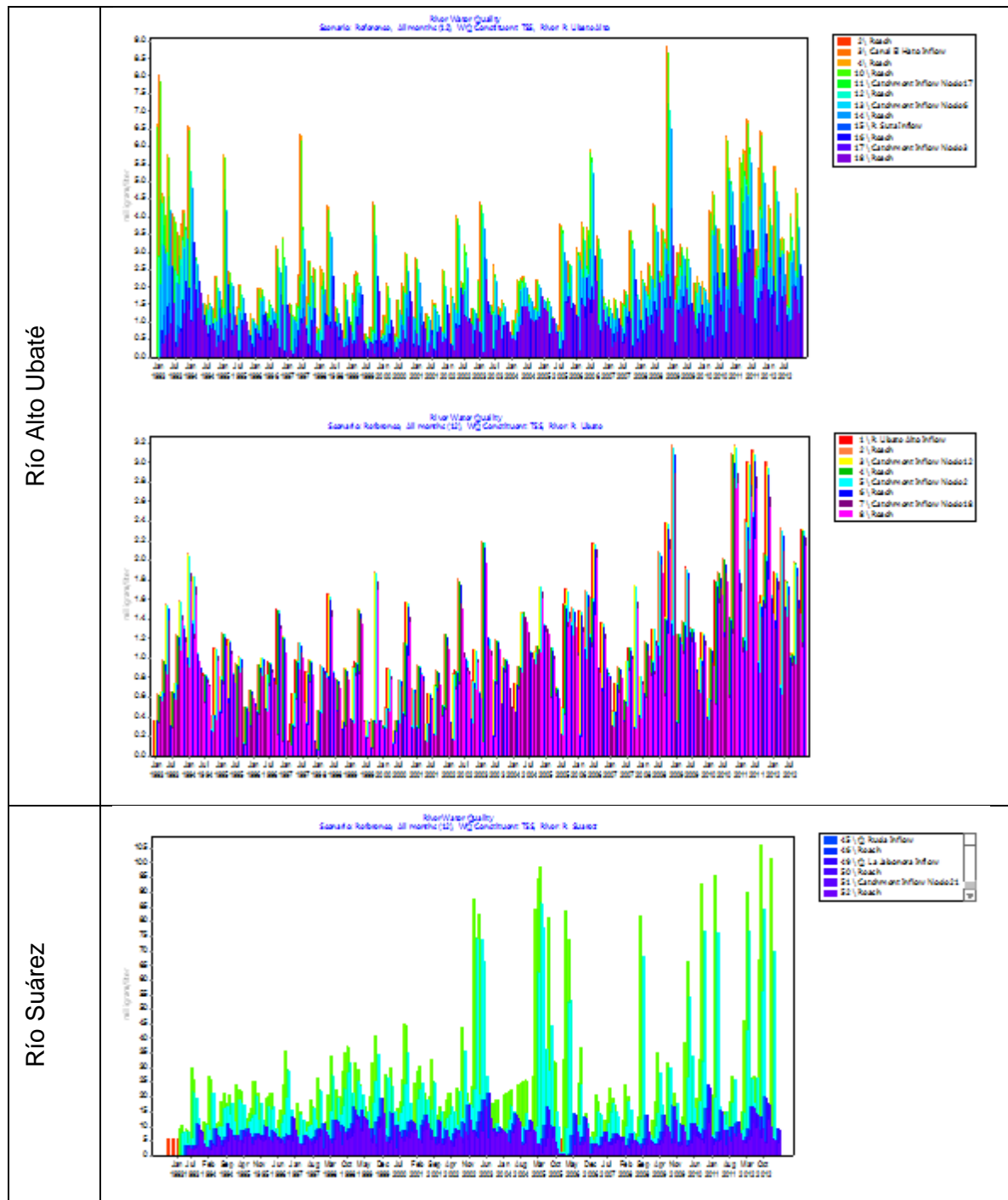
**Figura 5-7.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-8.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-9.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspended Totales (SST) por subcuencas, de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



### 5.3.3 Análisis de Resultados

- Para el río Ubaté en la parte alta se observa una tendencia de descenso en la Demanda Biológica de Oxígeno.

Por su parte, el oxígeno disuelto a lo largo del tramo presenta un ligero ascenso, hasta que llegan las aguas del río Suta, donde la tendencia cambio moderadamente.

Finalmente, los sólidos suspendidos totales se mantienen, hasta que empiezan a descender en la estación la Boyera, y luego, después del río Suta, se mantienen cercanos, hasta que vuelve a descender a la altura de la esclusa el Cubio, producto de estancamiento de las aguas.

- En el río Suárez, se observa que al inicio del tramo la DBO va en descenso, hasta que llega al punto donde recibe aguas residuales del río Chiquinquirá, ya partir de allí, y con las descargas subsiguientes de la quebrada Puente Tierra y Madrón, aunque tiende a descender, se mantiene en valores altos. Luego, sigue en descenso más marcado, aunque conserva una base.

Lo inverso ocurre con el oxígeno disuelto hasta la altura de las compuertas Tolón, donde empieza a descender, tal vez producto de estancamiento de las aguas, seguido del vertimiento del río Chiquinquirá, lo cual acentúa la tendencia de descenso, la cual no están marcada hasta la altura de la esclusa Merchan; luego la tendencia cambio con un aumento gracias a la confluencia con la quebrada Jabonera; sin embargo a la altura de la estación Garavito, el oxígeno disuelto vuelve a descender.

Respecto a los sólidos suspendidos, estos son bajos al inicio del tramo, gracias al efecto de sedimentación de la Laguna de Fúquene. Esta tendencia cambia con el aporte del río Chiquinquirá, el cual a partir de este punto sigue una ligera tendencia de descenso, la cual se hace marcada y considerable después del canal Madrón hasta la quebrada La Ruda.

Esto se genera por el flujo no permanente que facilita el estancamiento de las aguas del río Suárez, por la operación de las compuertas Tolón.

## 5.4 MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Como se mencionó anteriormente, al efectuarse la modelación de calidad del agua se efectúa por medio de módulos del QUAL 2k incluidos en WEAP, los cuales no permiten calibrar tasas de reacción de los diferentes determinantes simulados, no se calibra los parámetros de modelación de calidad del agua, sino que se toman los valores de calidad del agua como indicadores, más no como cuantificadores exactos de la concentración de los determinantes evaluados. De esta forma, dichos indicadores sólo cumplen la función de representar el cambio de la concentración de los determinantes evaluados, respecto al escenario histórico de referencia y a los escenarios futuros.

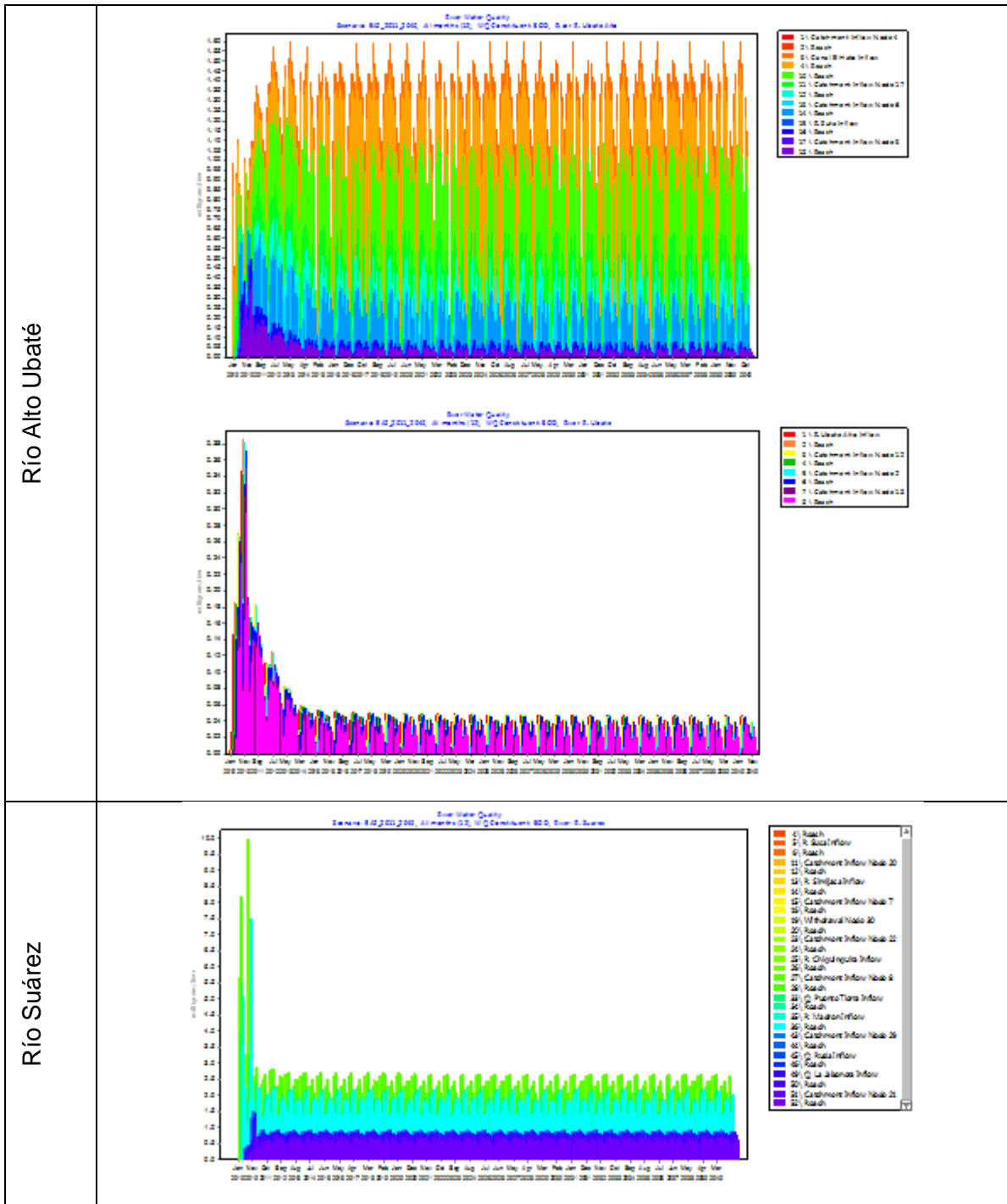
Por lo tanto, el enfoque de este análisis se centra en el cambio de la tendencia y la diferencia de las magnitudes registradas para escenarios futuros y no en la magnitud propiamente dicha.

Los resultados para la simulación de años históricos se presentan en las siguientes figuras.

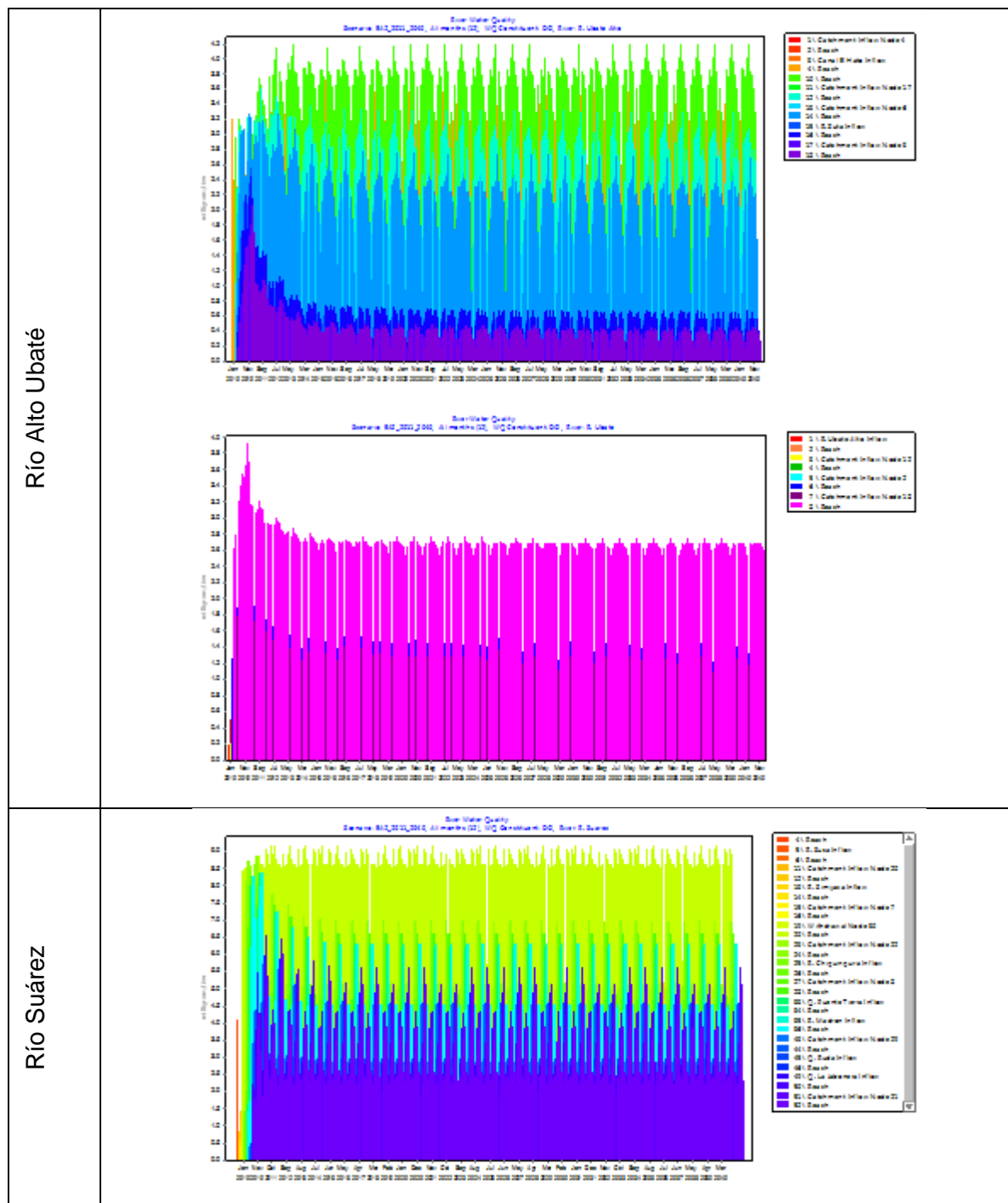
- **Periodo 2011 a 2040**

**Figura 5-10.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

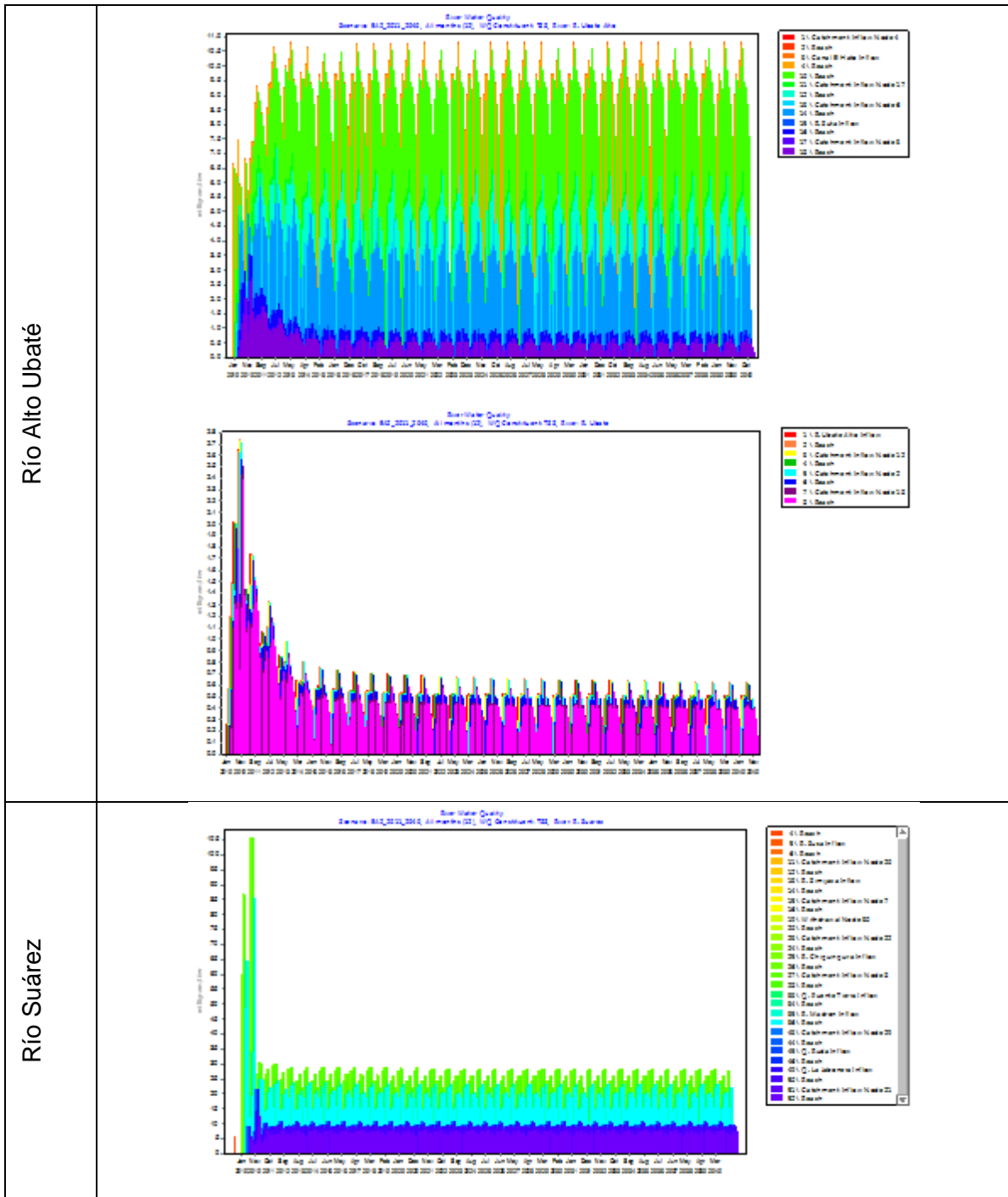




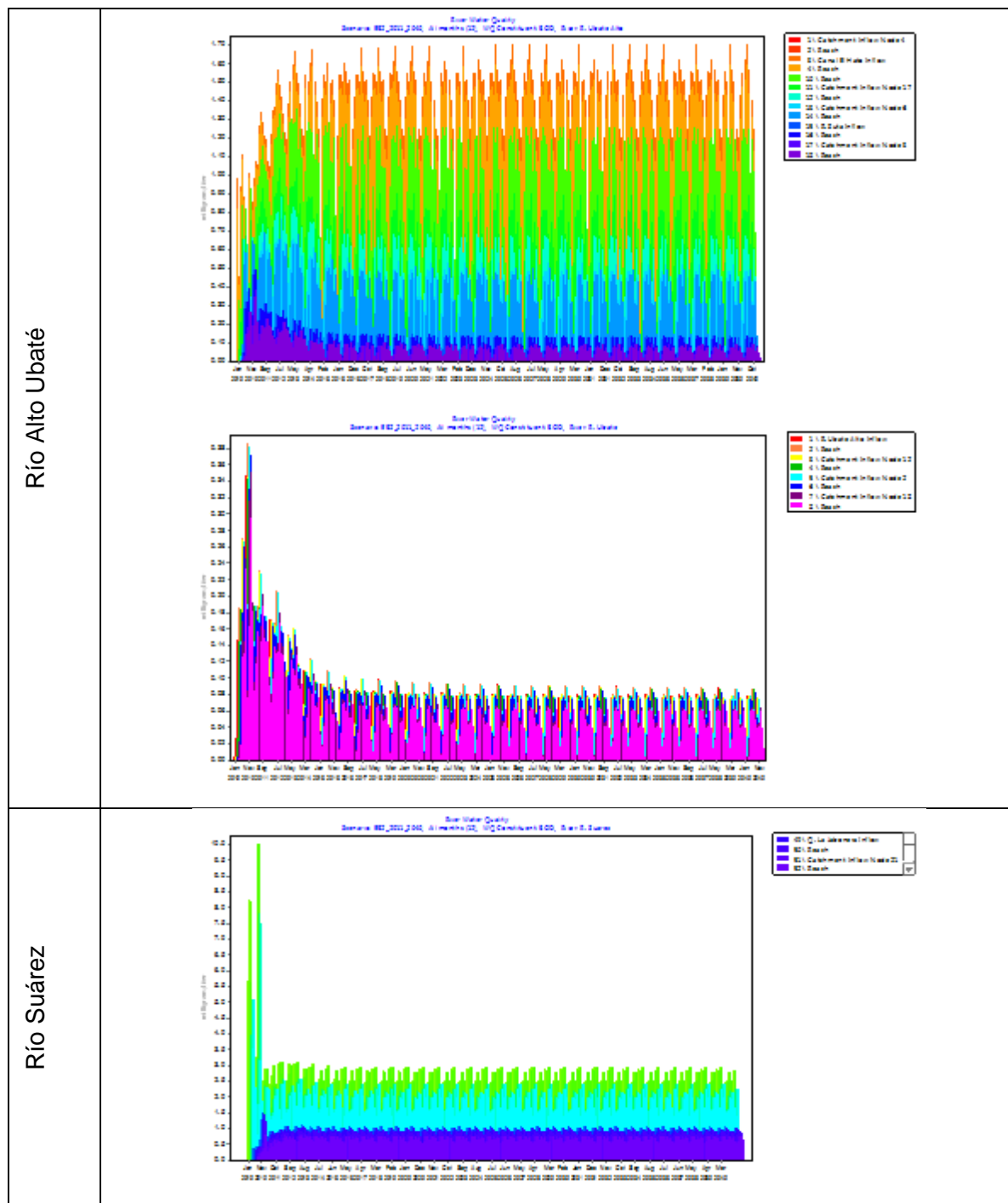
**Figura 5-11.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



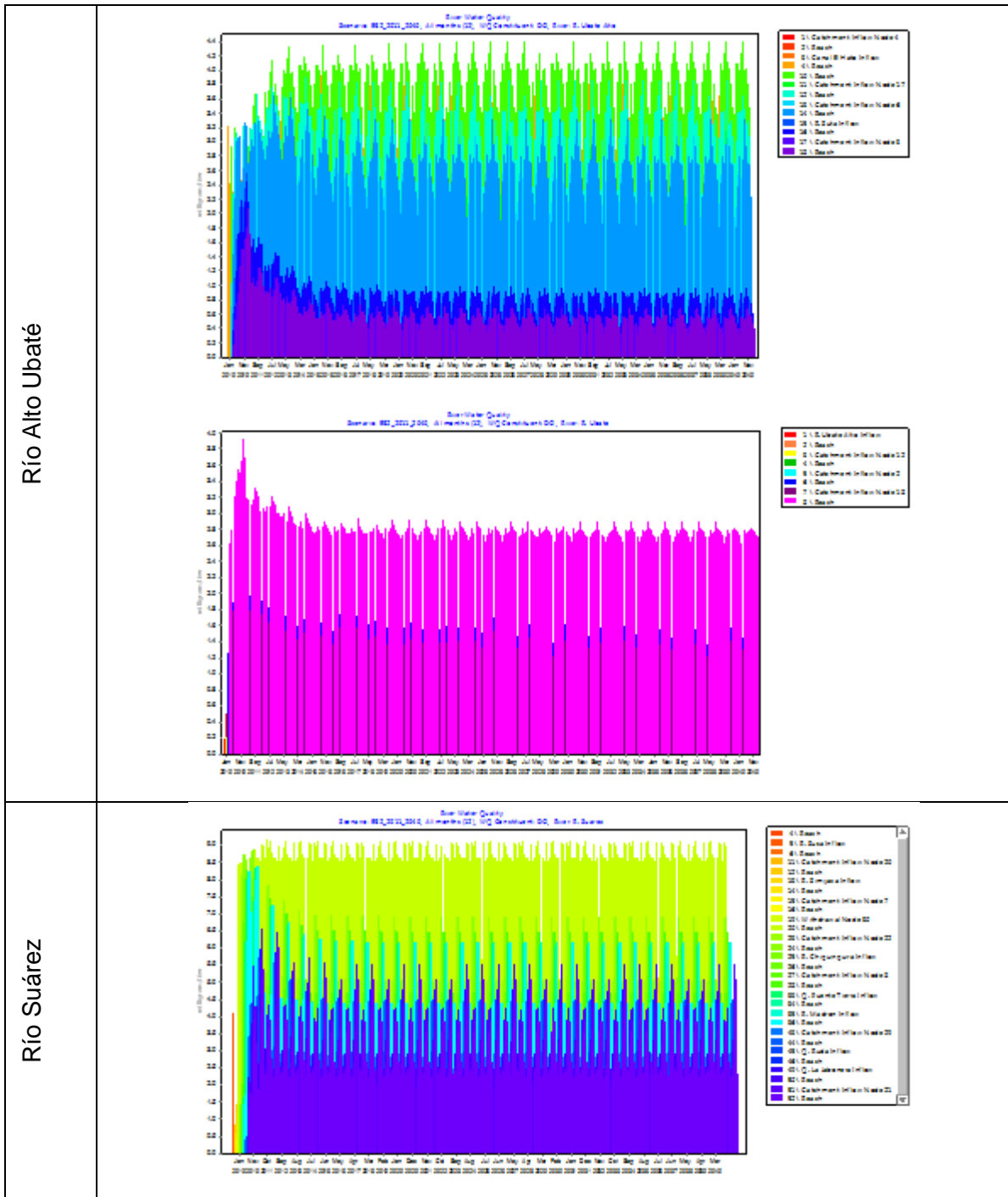
**Figura 5-12.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



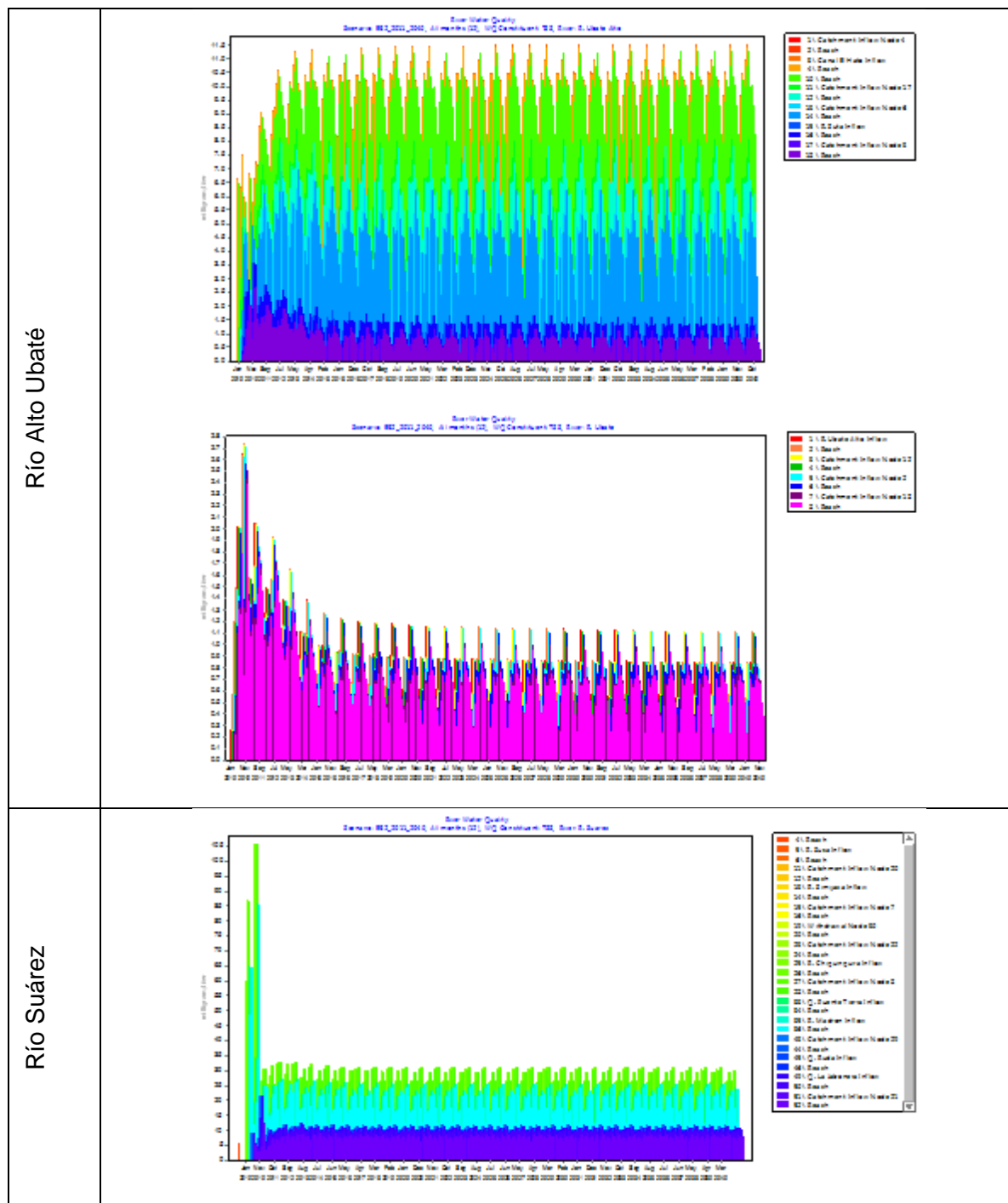
**Figura 5-13.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



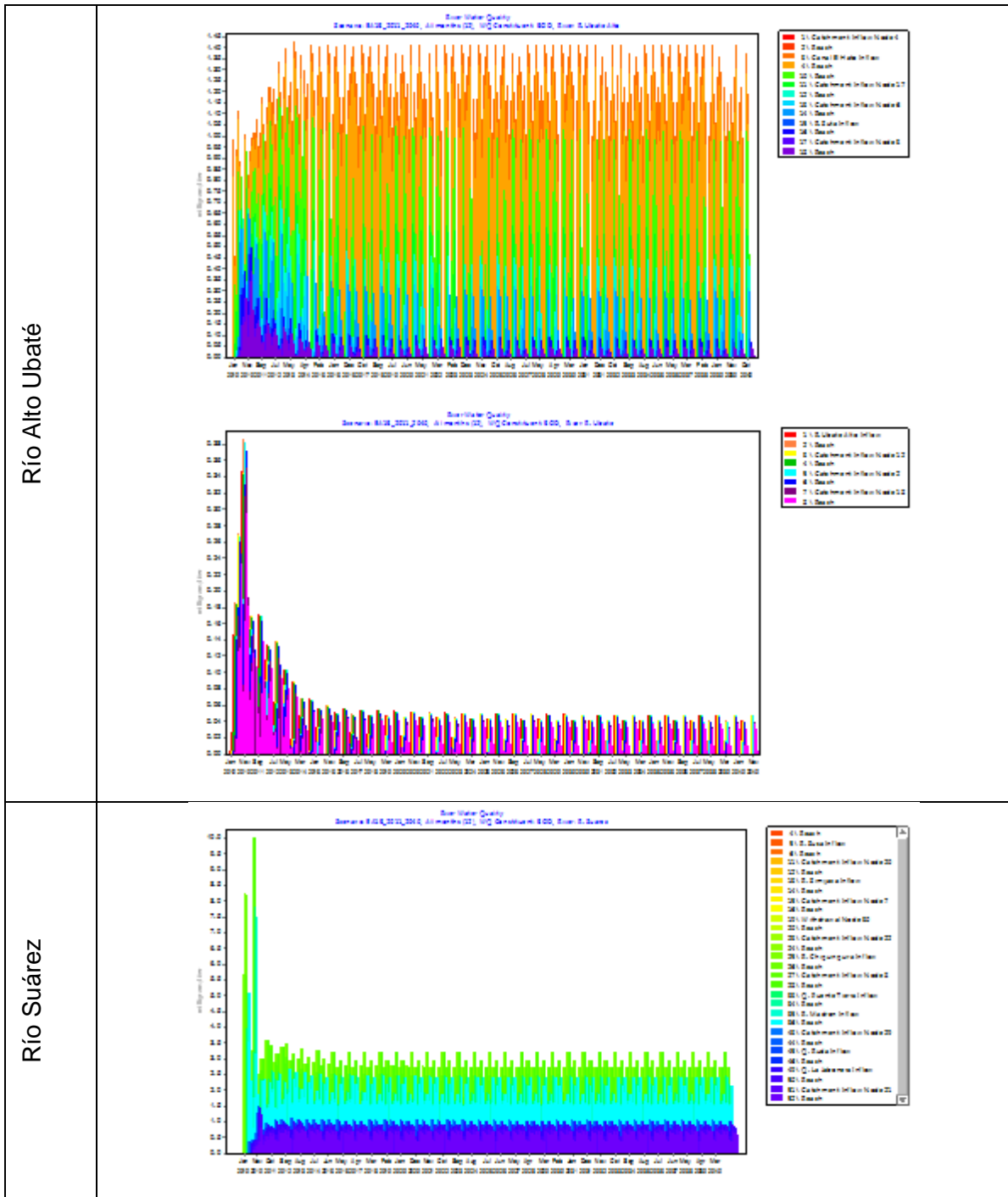
**Figura 5-14.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



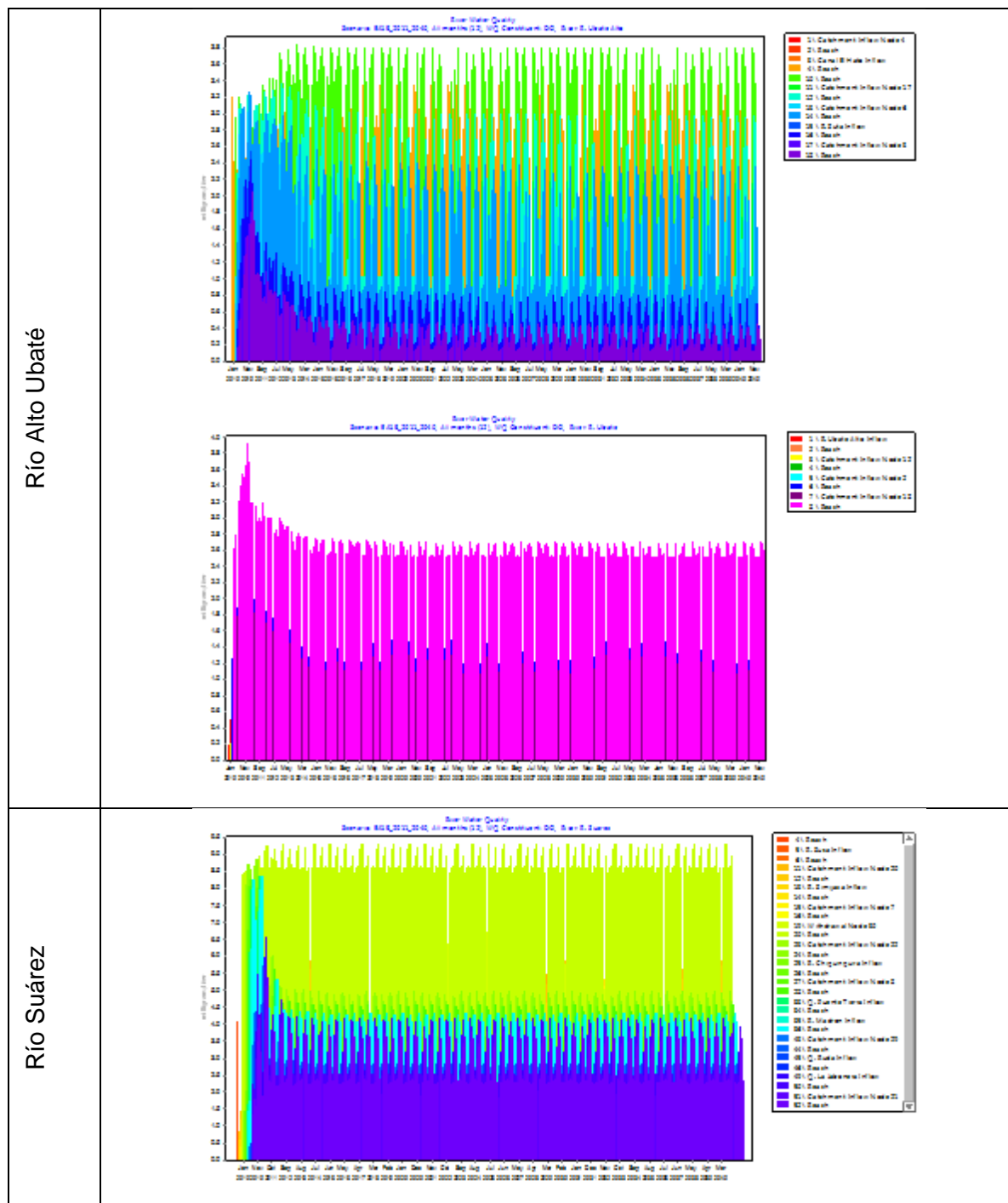
**Figura 5-15.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-16.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

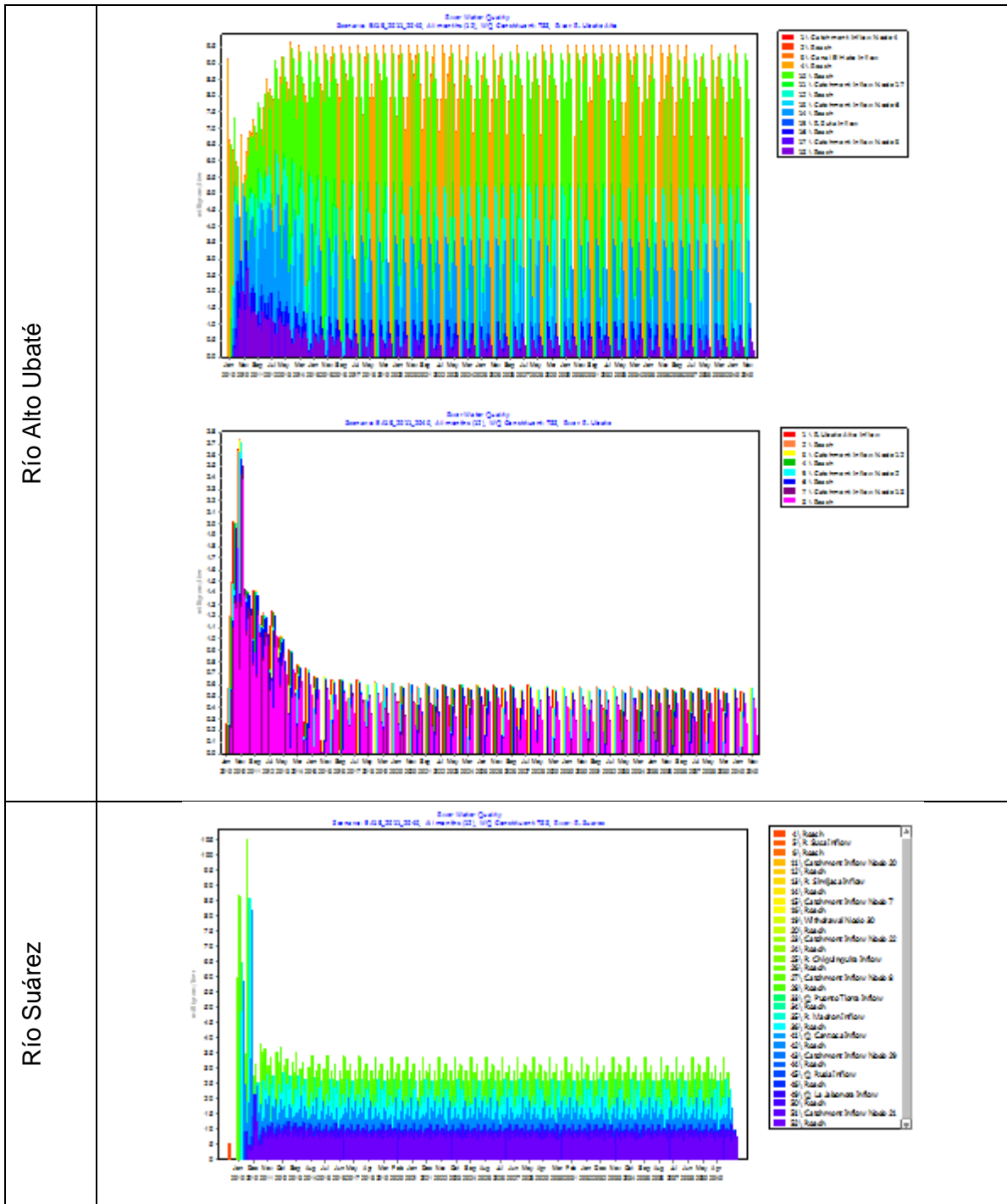


**Figura 5-17.** Resultados modelo de calidad de agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



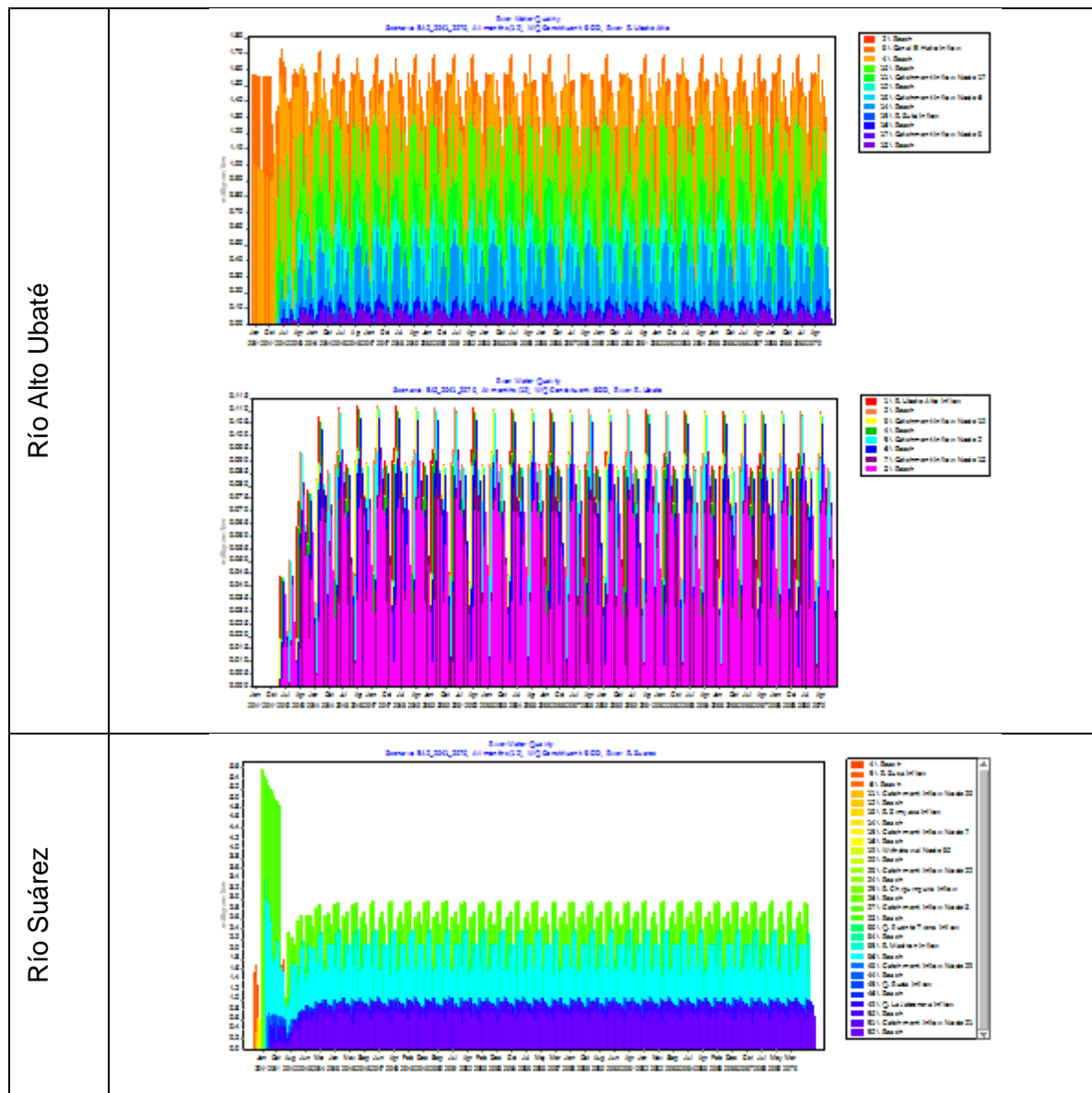
**Figura 5-18.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro A1B en el periodo 2011 – 2040 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



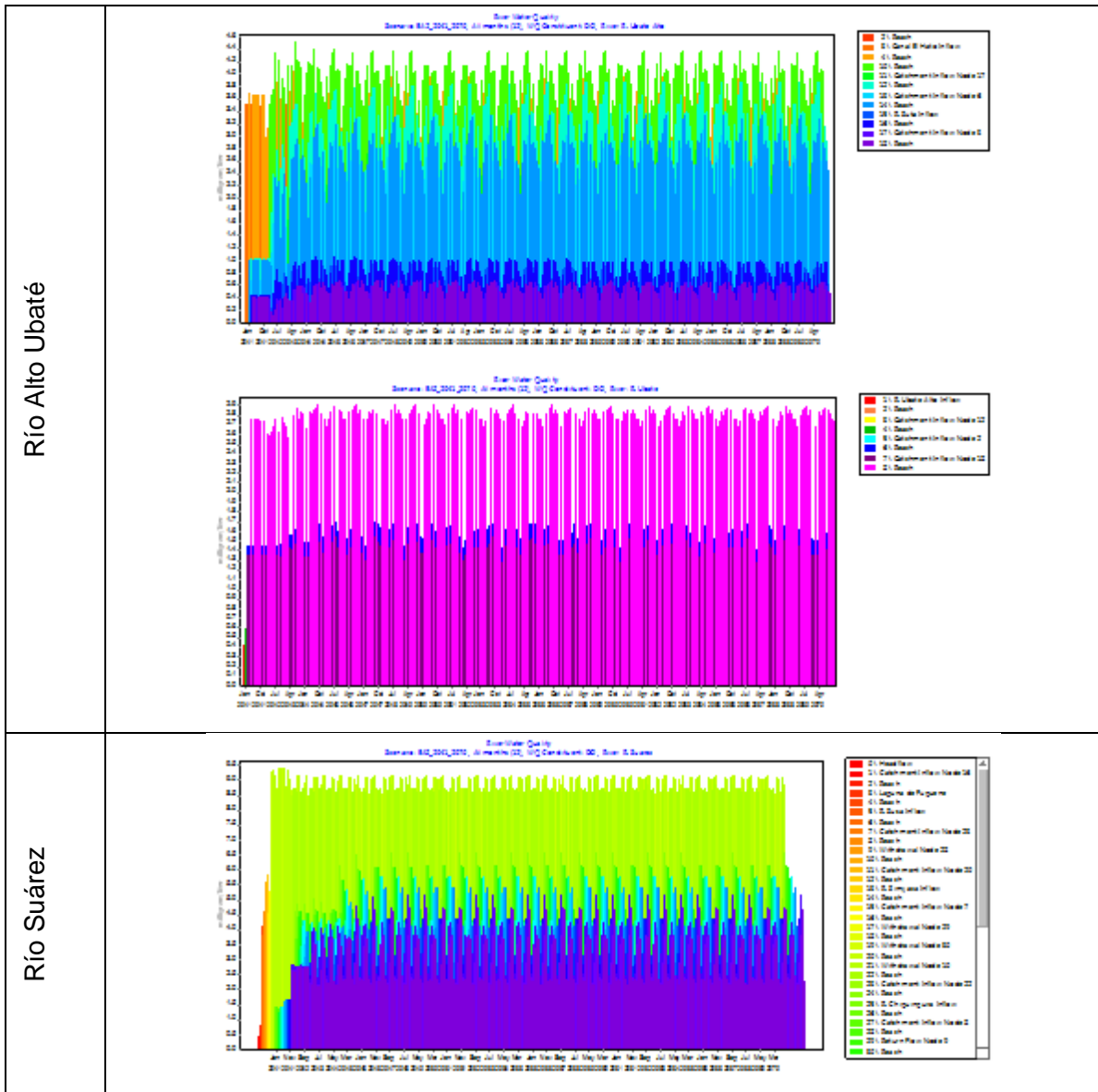


- Periodo 2041 a 2070

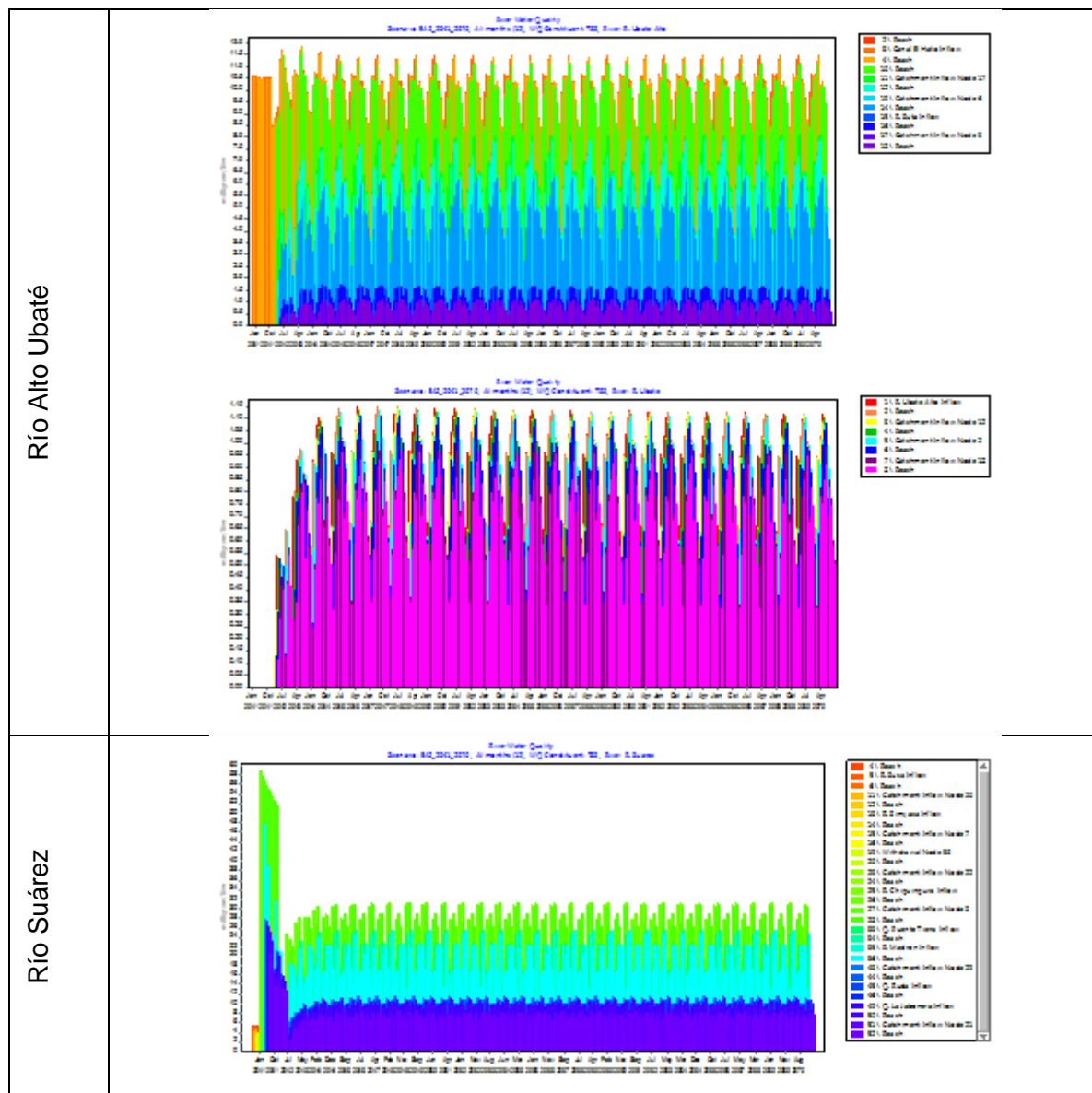
**Figura 5-19.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



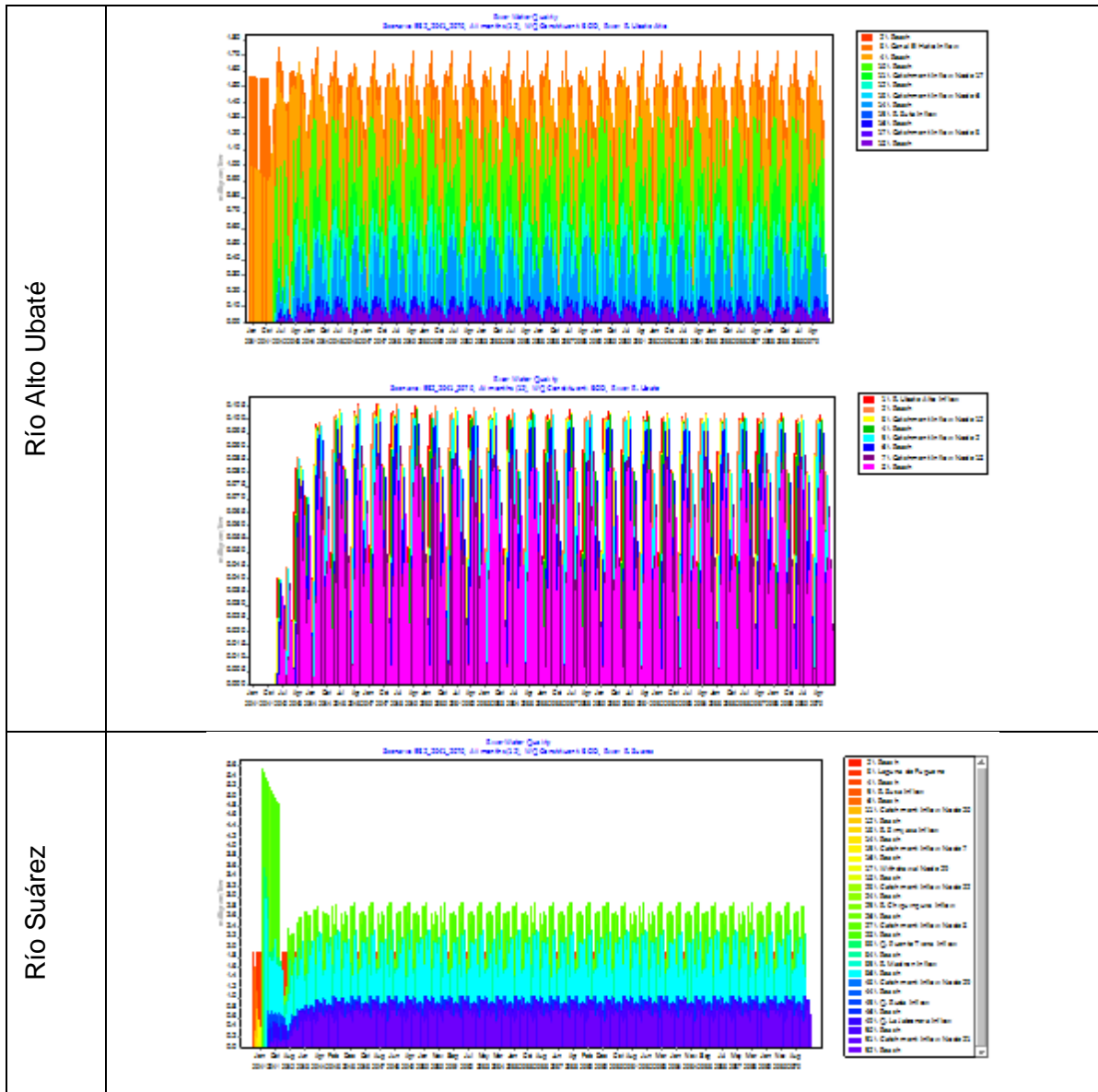
**Figura 5-20.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



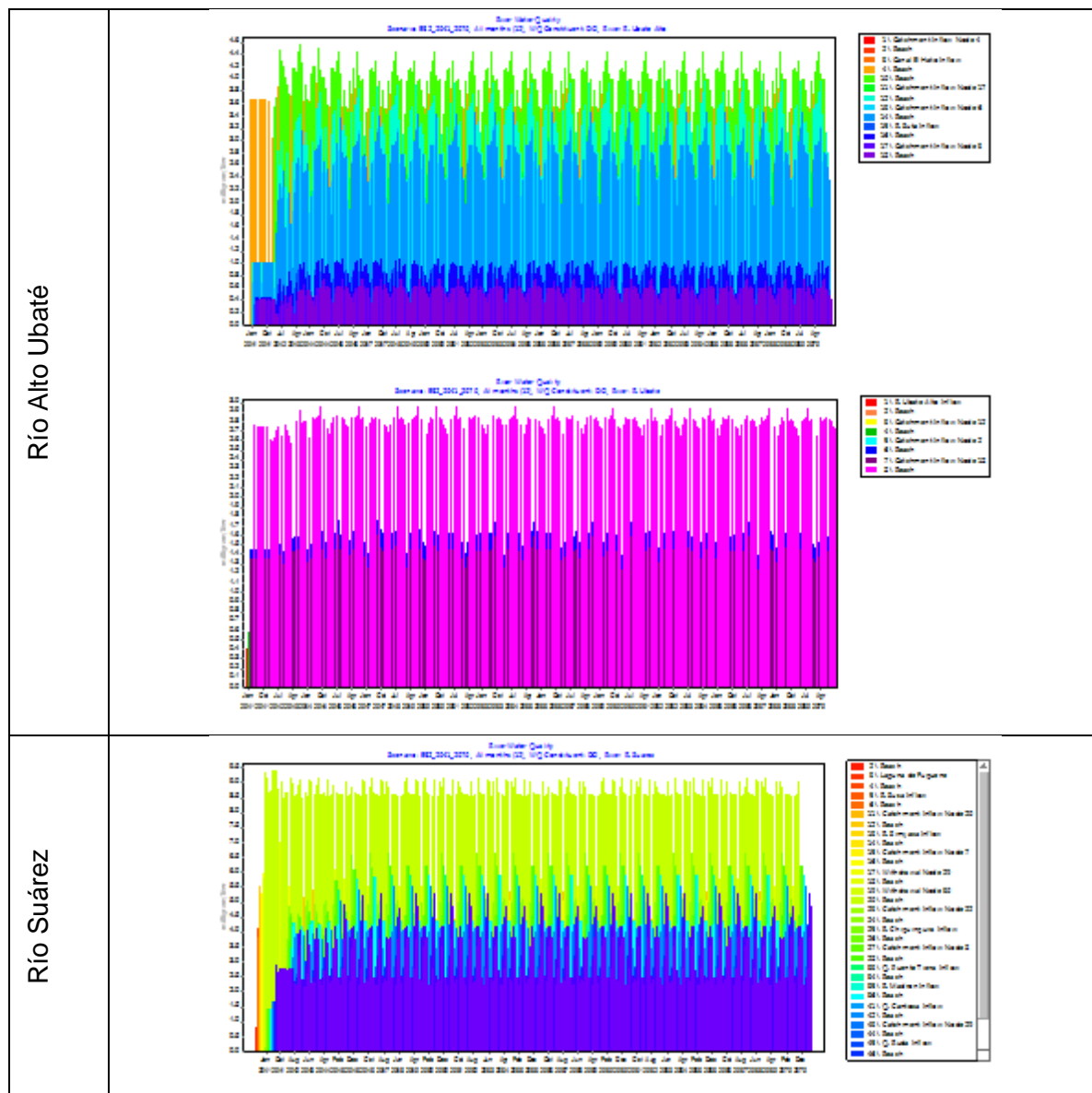
**Figura 5-21.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



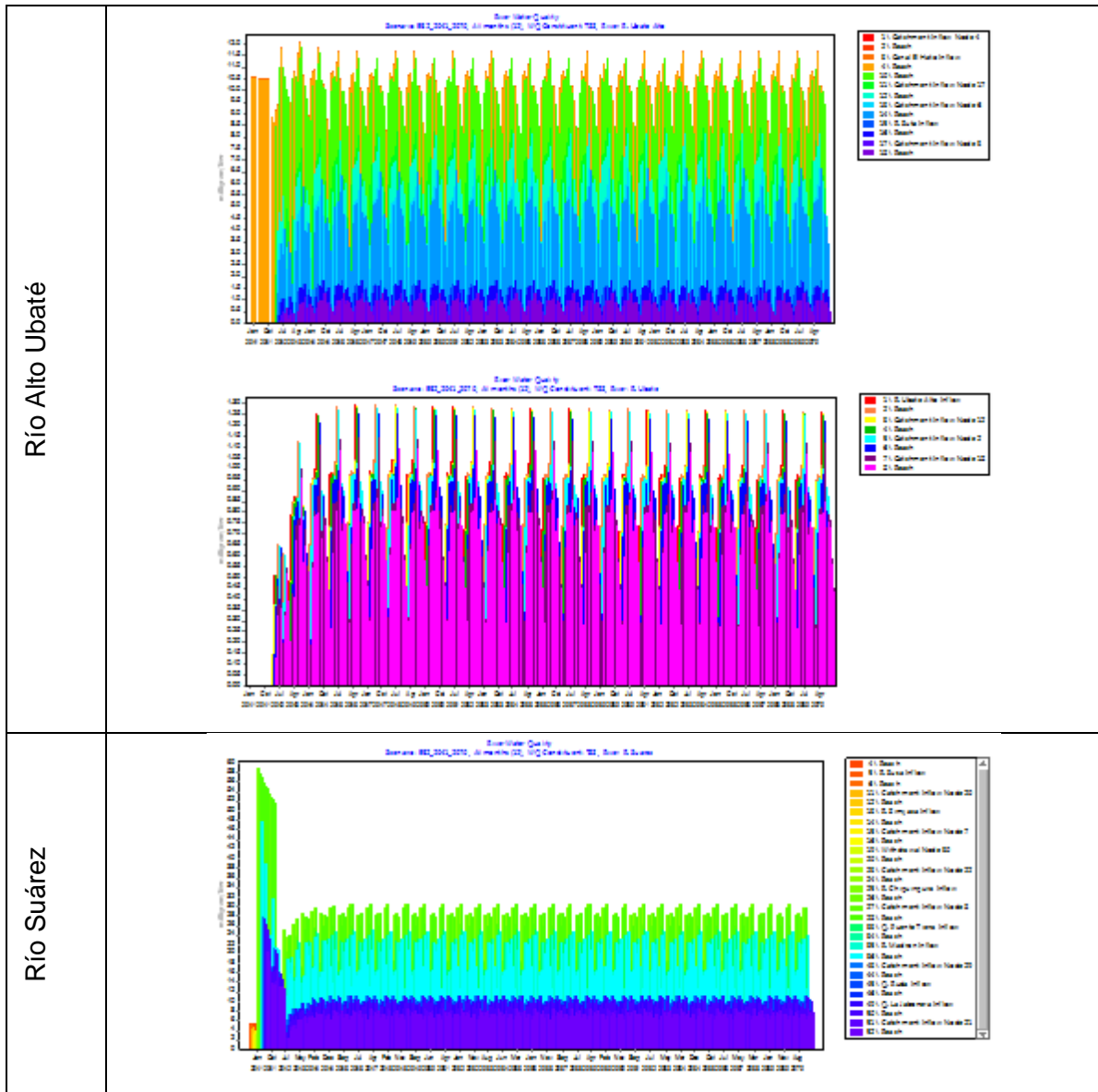
**Figura 5-22.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



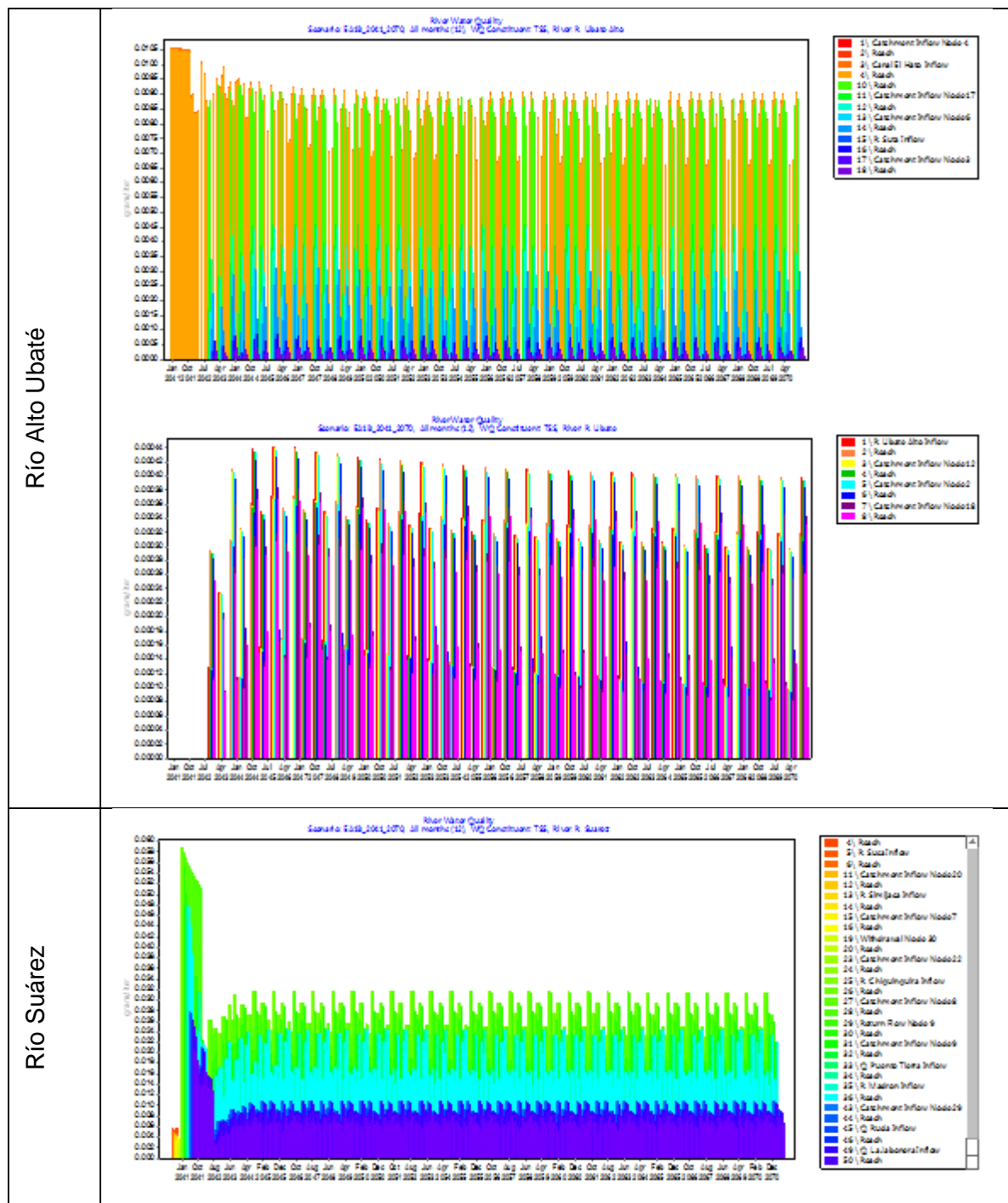
**Figura 5-23.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-24.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

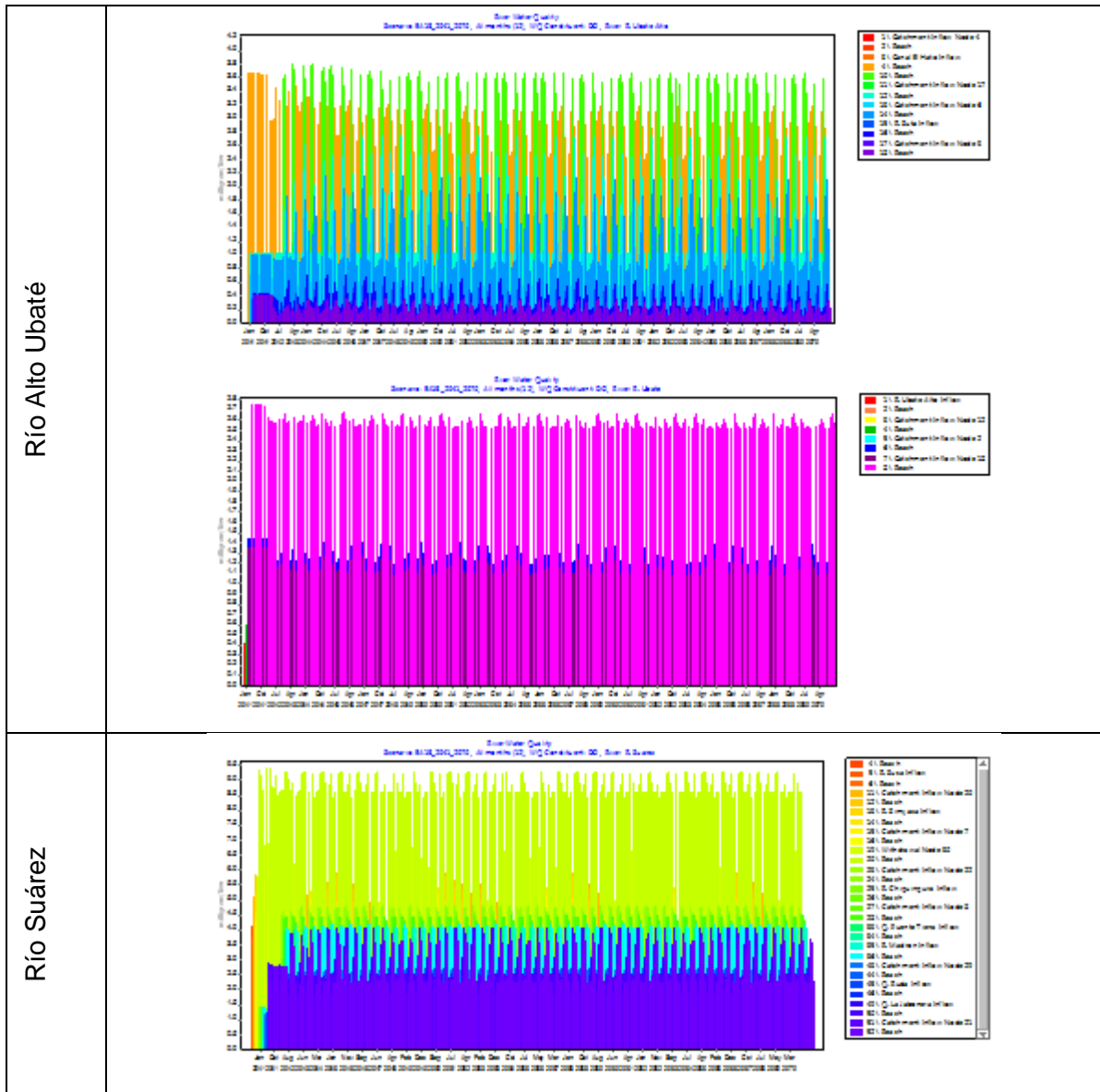


**Figura 5-25.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

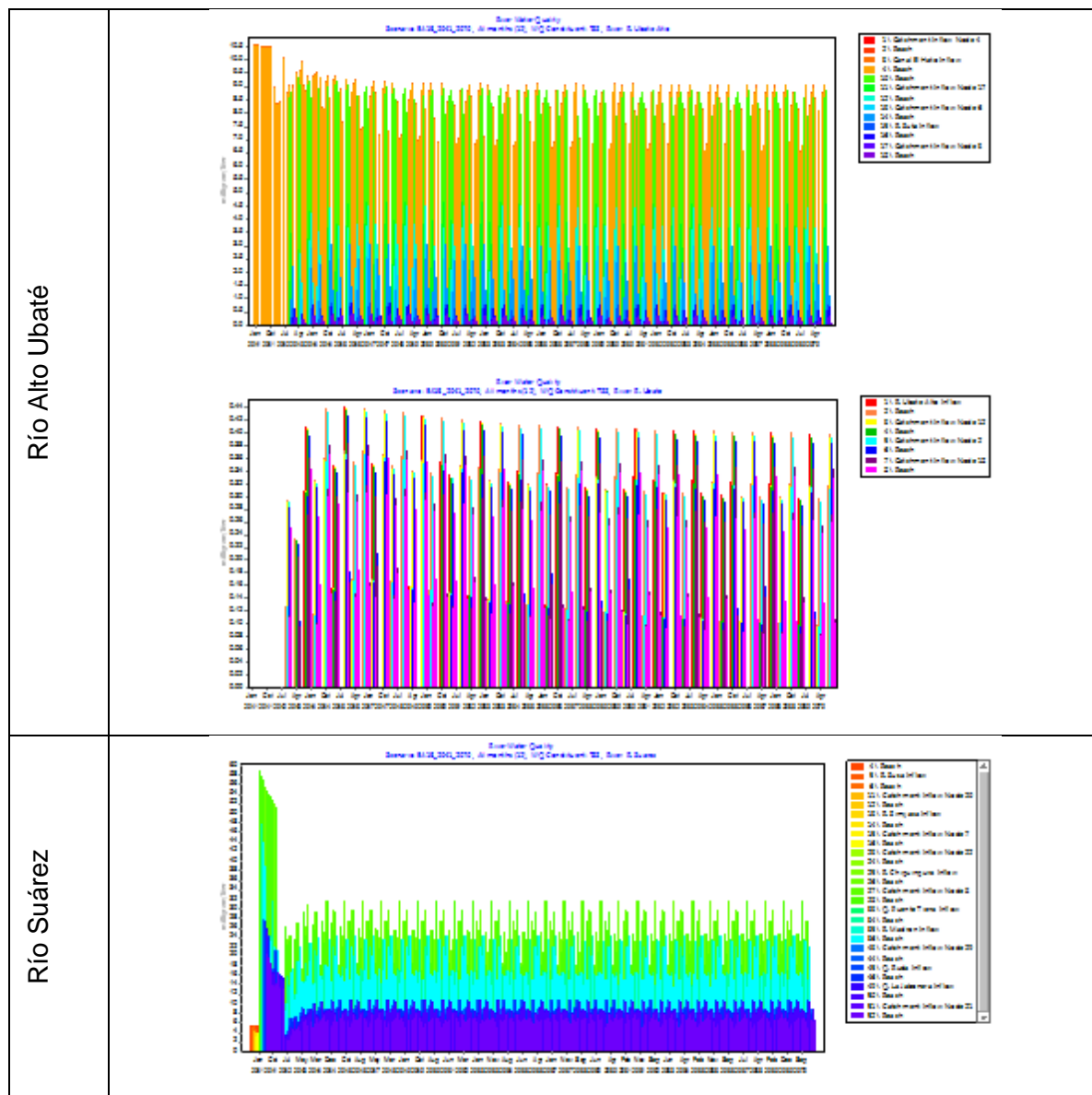


**Figura 5-26.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



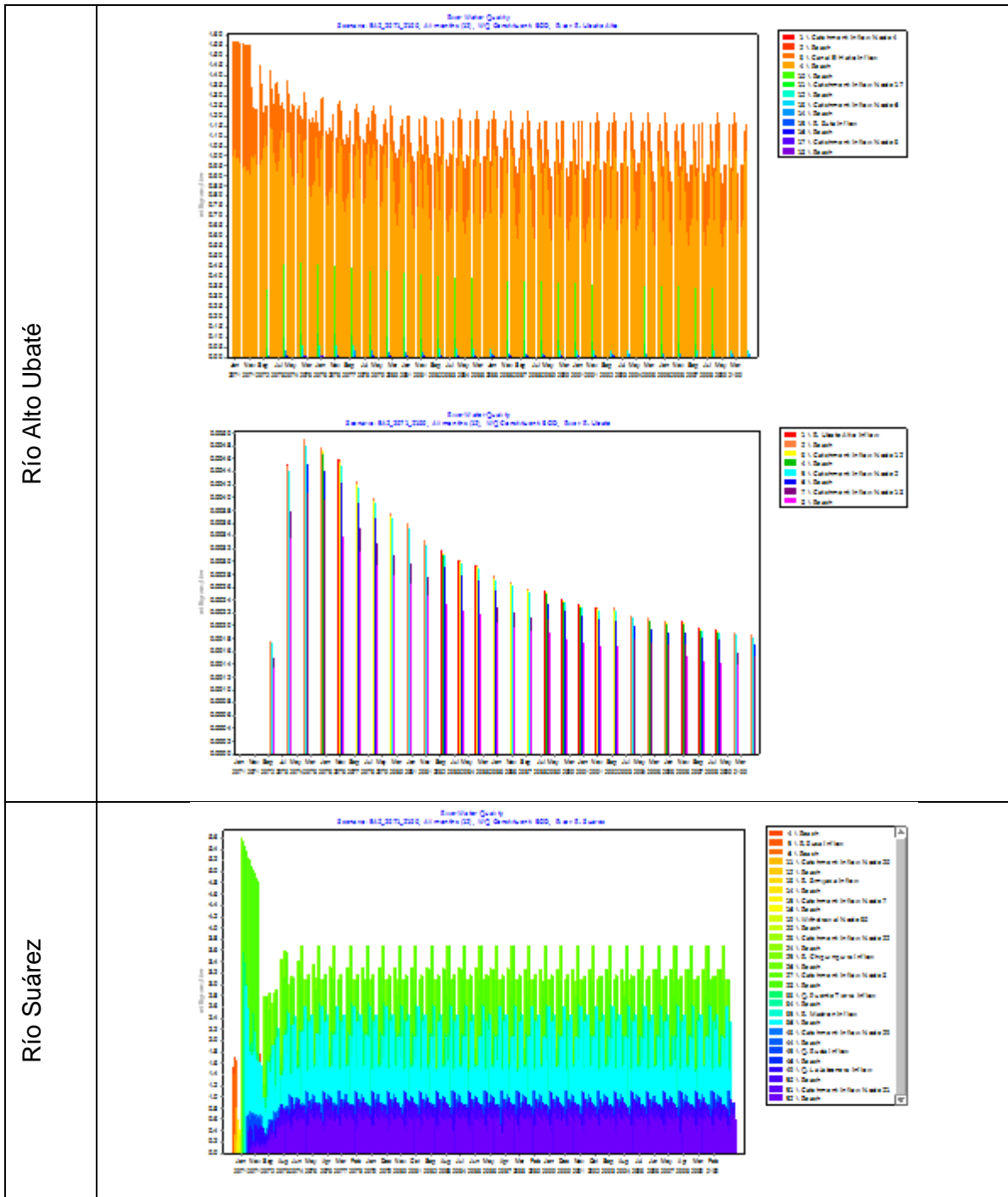


**Figura 5-27.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspended Totales (SST) para el escenario futuro A1B en el periodo 2041 – 2070 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

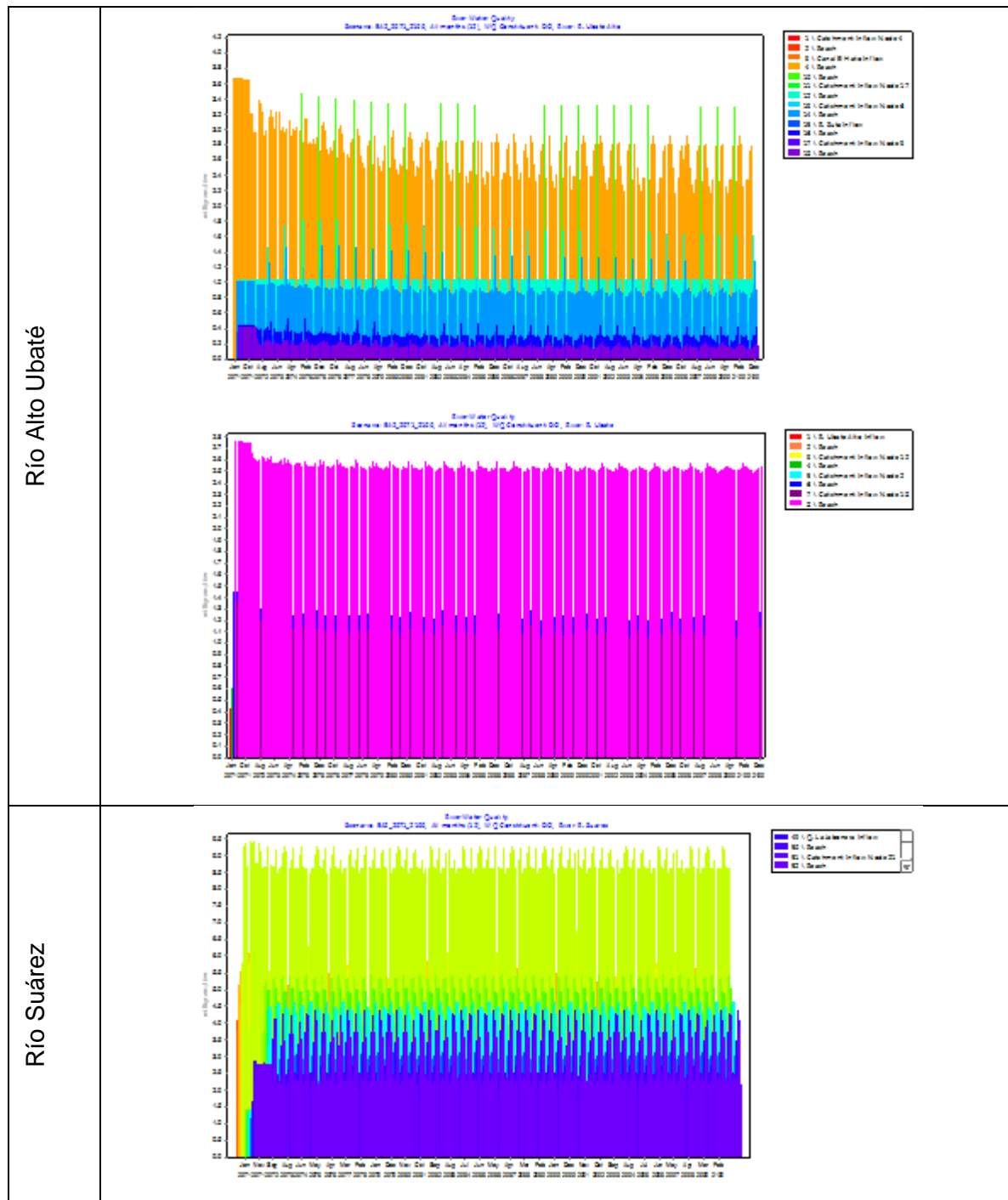


- **Periodo 2071 a 2100**

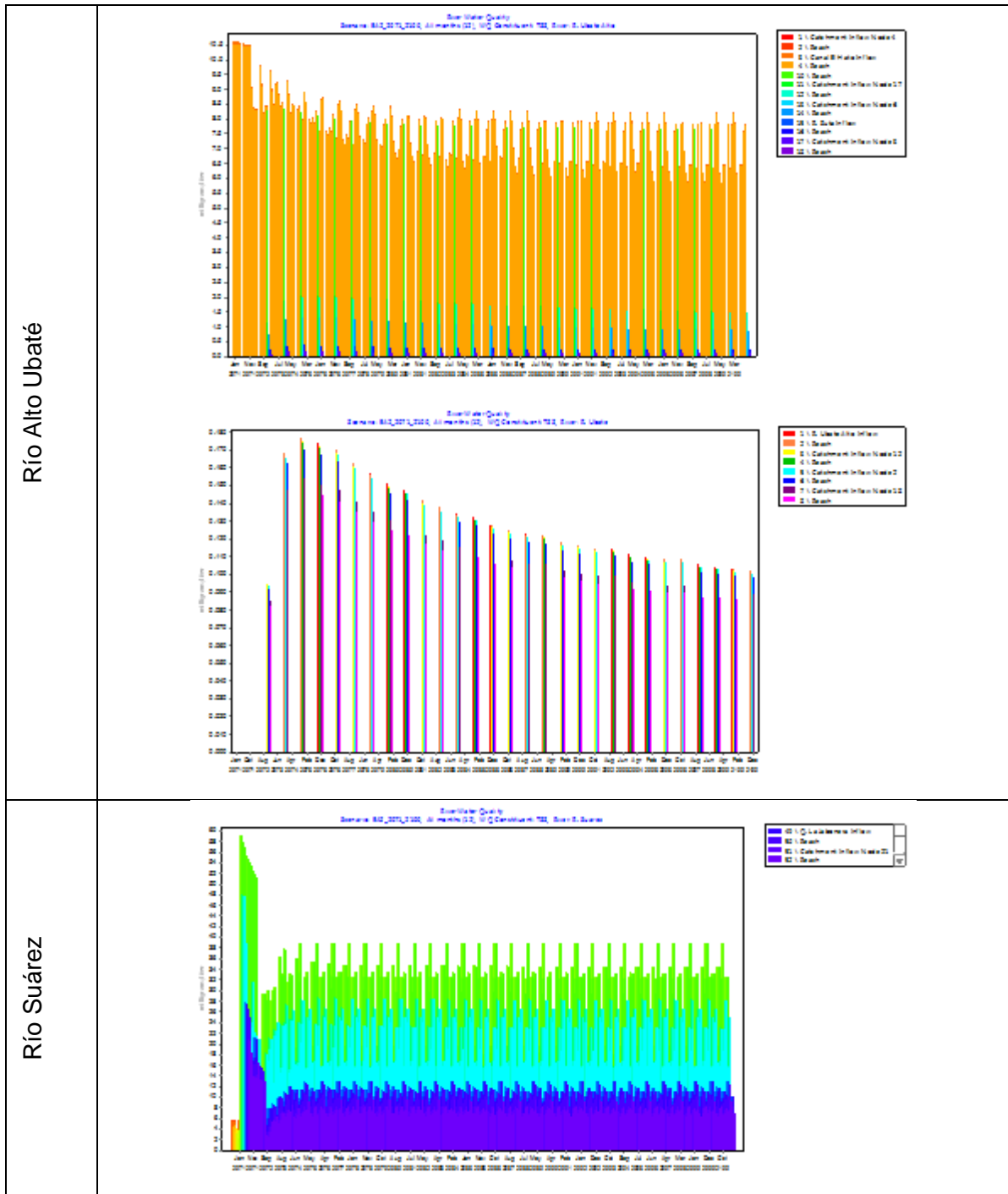
**Figura 5-28.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



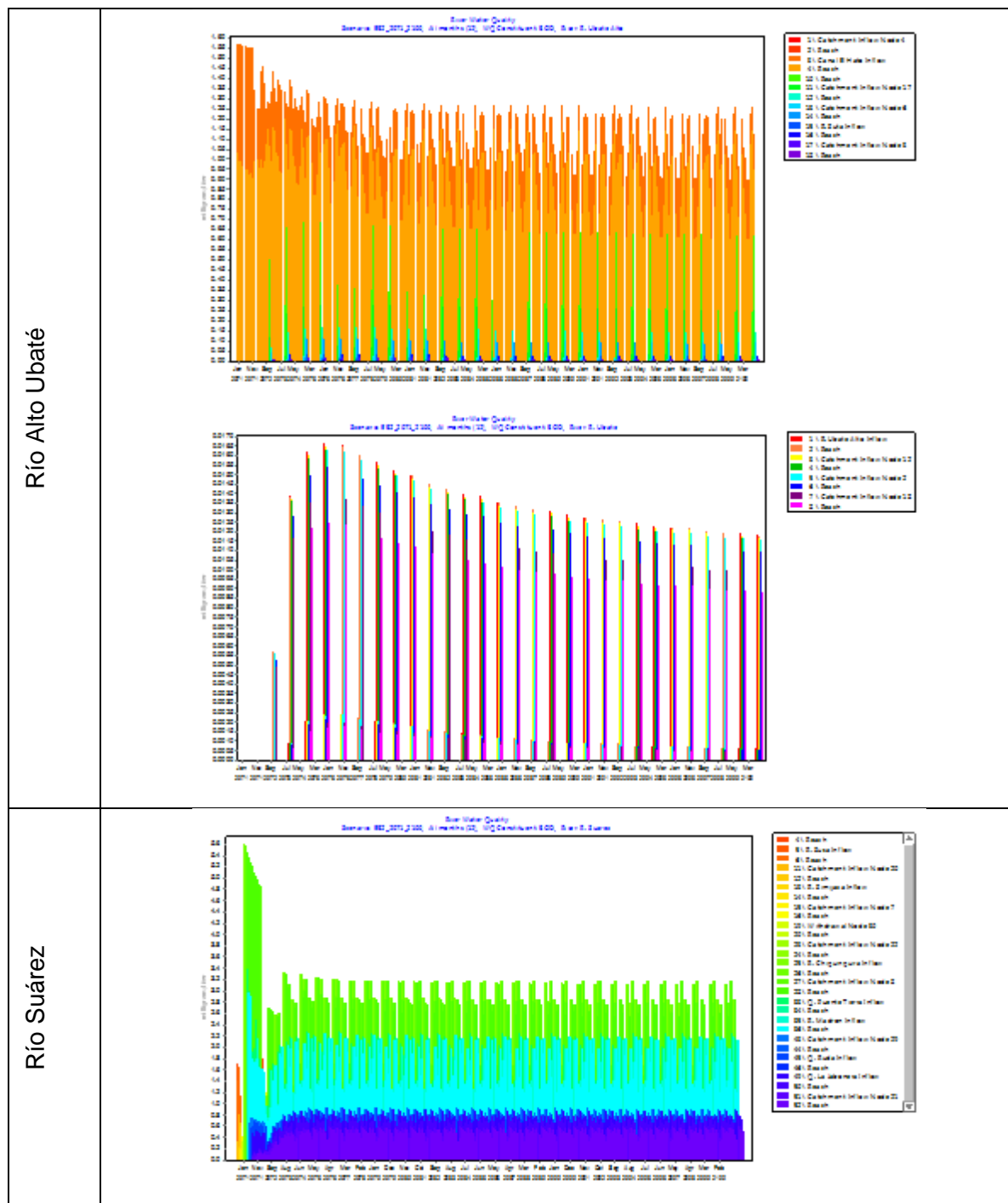
**Figura 5-29.** Resultados modelo de calidad de agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



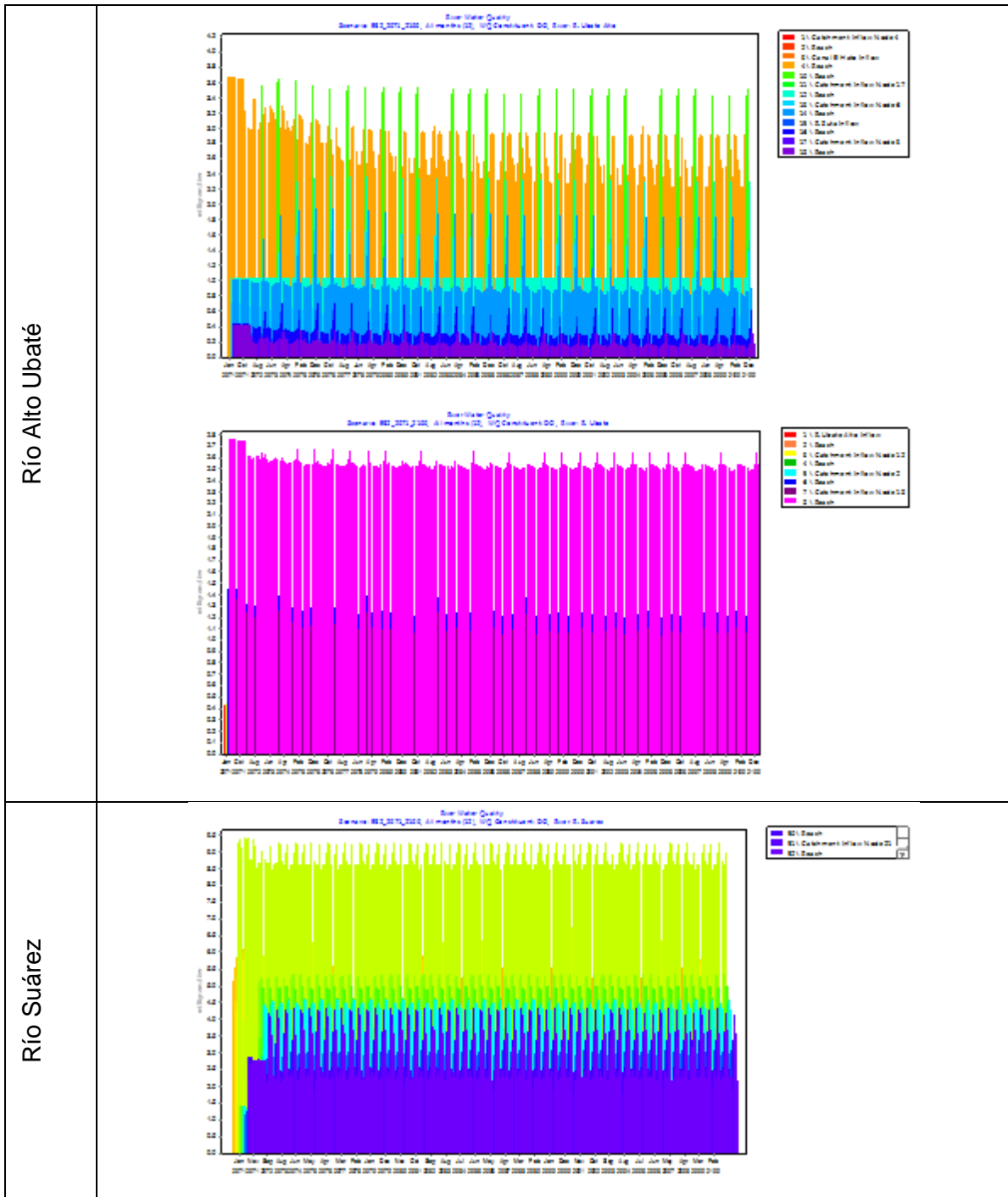
**Figura 5-30.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro A2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



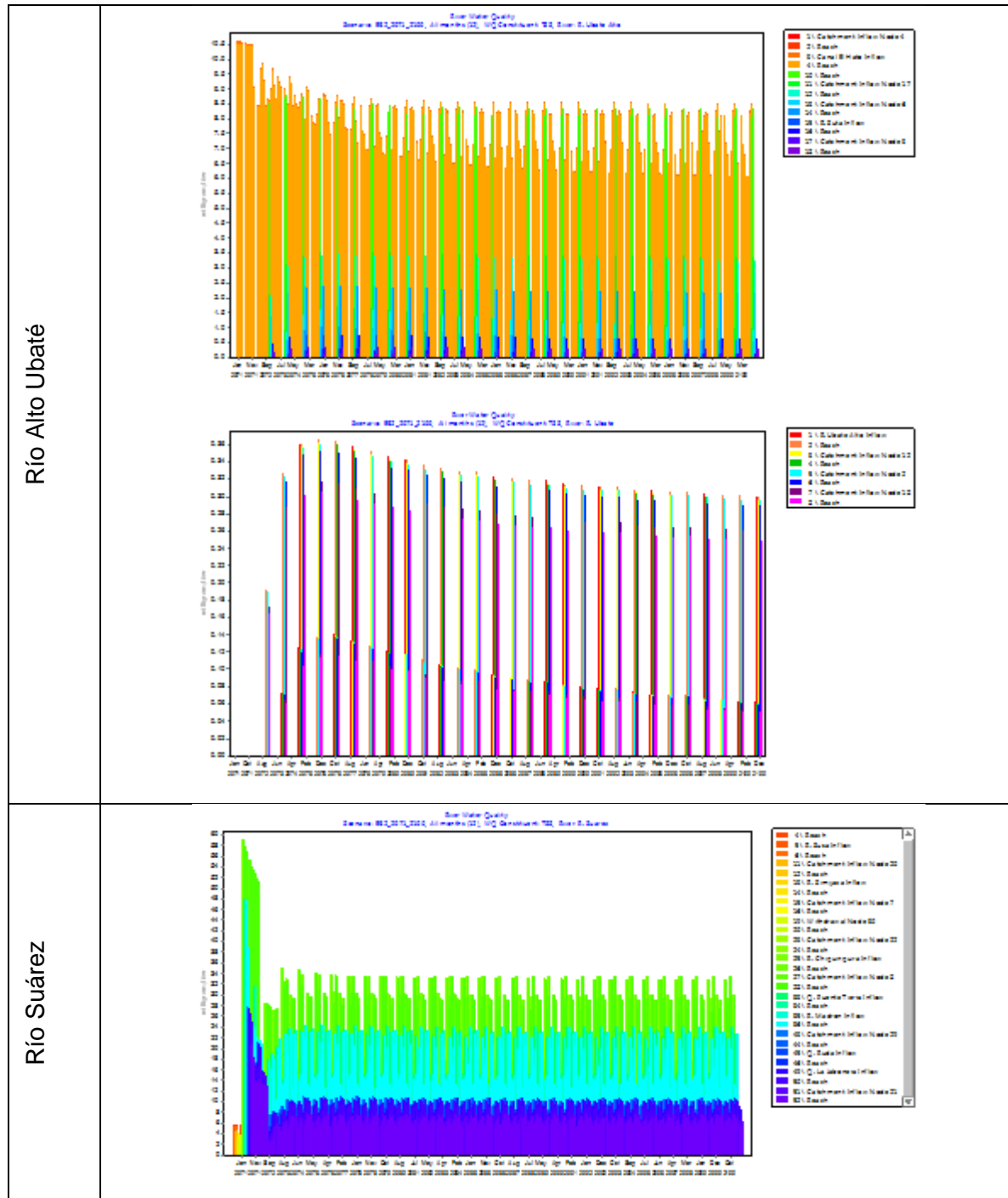
**Figura 5-31.** Resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), para escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-32.** Resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD) para el escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura 5-33.** Resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST) para el escenario futuro B2 en el periodo 2071 – 2100 de la corriente principal de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.





## 5.4.1 Análisis de Resultados

Para realizar un análisis de resultados detallado, se establecen dos enfoques: un análisis respecto al periodo histórico simulado previamente, y un análisis de comparación entre escenarios.

### 5.4.1.1 Análisis respecto al histórico de referencia

- De modo general, se puede observar que el comportamiento de los determinantes de calidad del agua evaluados para los diferentes escenarios y periodos, sigue la misma tendencia del comportamiento de los determinantes, a diferencia de su magnitud.
- Así, por ejemplo, se observa que para el río Ubaté en la parte alta se presenta una tendencia de descenso en la Demanda Biológica de Oxígeno, a lo largo de la corriente, presentando valores muy similares en los puntos monitoreados hacia la esclusa El Cubio.

Por su parte, el oxígeno disuelto a lo largo del tramo presenta un ligero ascenso, hasta a la altura de la estación la Boyera, y posteriormente en la desembocadura del río Suta, donde la tendencia cambio moderadamente.

Finalmente, los sólidos suspendidos totales se mantienen, hasta que empiezan a descender en la estación la Boyera, y luego, después del río Suta, se mantienen cercanos, hasta que vuelve a descender a la altura de la esclusa el Cubio, producto de estancamiento de las aguas.

- Por su parte, en el río Suárez, se observa que al inicio del tramo la DBO va en descenso, hasta que llega al punto donde recibe aguas residuales del río Chiquinquirá, ya partir de allí, y con las descargas subsiguientes de la quebrada Puente Tierra y Madrón, aunque tiende a descender, se mantiene en valores altos. Luego, sigue en descenso más marcado, aunque conserva una base.

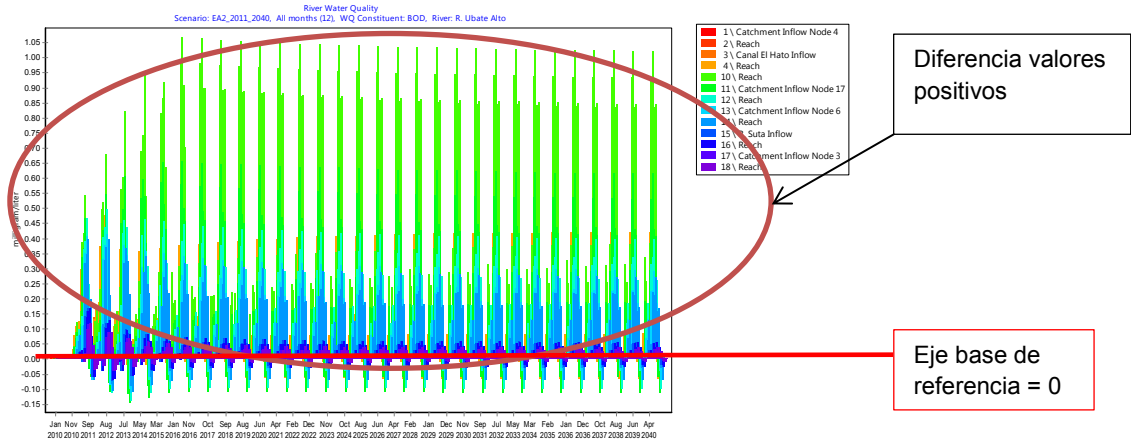
El oxígeno disuelto tiende a ascender a lo largo del tramo hasta la altura de las compuertas Tolón, donde empieza a descender, tal vez producto de estancamiento de las aguas, seguido del vertimiento del río Chiquinquirá, lo cual acentúa la tendencia de descenso, la cual no está marcada hasta la altura de la esclusa Merchan; luego la tendencia cuenta con un pequeño cambio por la descarga de la quebrada Jabonera; sin embargo a la altura de la estación Garavito, el oxígeno disuelto vuelve a descender.

Respecto a los sólidos suspendidos, estos son bajos al inicio del tramo, gracias al efecto de sedimentación de la Laguna de Fúquene. Esta tendencia cambia con el aporte del río Chiquinquirá, el cual a partir de este punto sigue una tendencia de descenso marcada hasta el canal Madrón, de donde sigue descendiendo paulatinamente.

#### 5.4.1.2 Análisis entre escenarios

Se emplea la comparación de valores de magnitud entre escenarios, tomando como base el A2, con el fin de evaluar diferencias. Esto se efectúa por medio de las siguientes gráficas, en las cuales, se tiene un valor cero, como valor del escenario base y se observan valores por encima o por debajo de este.

**Figura 5-34.** Ejemplo comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



En la anterior gráfica, se observa que la mayor parte de la diferencia es positiva, por lo cual se puede inferir, que el escenario A2 presenta mayor Oxígeno Disuelto que el escenario A1B. También se observa que en algunos meses, con poca magnitud, la diferencia es negativa, siendo el Oxígeno Disuelto en el escenario A2 menor.

- **Escenarios del 2011 al 2040**

- En el río Ubaté alto en la parte alta y media, se observa que el escenario A2 en las concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales son más bajas que en el B2, y el A1B las concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales son menores respecto al A2.
- Para el río Ubaté en la parte baja, comparando el escenario A2, se observa que este escenario tiene diferencias acentuadas con menores de concentración que en el B2 y el A1B registra concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales que oscilan en algunos meses mayores y otras menores, respecto a A2, siendo el comportamiento más frecuente y de mayor magnitud el de concentraciones más bajas.
- Para el río Suárez, se observa que en el escenario A2 en algunos meses presenta concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales más altas y en otros casos, más bajas que el B2, siendo los de menor cuantía, los presentados en puntos posteriores al río Chiquinquirá.

Para el escenario A1B las concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales, varían entre menor y mayor respecto al escenario A2, presentando menor diferenciación los puntos del tramo más bajo.

- **Escenarios del 2041 al 2070**

- En el río Ubaté alto en la parte alta y media, se observa que el escenario A2 en algunos meses presentan concentraciones de DBO, DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales más altos y en otros más bajas que el B2, y el A1B las concentraciones de DBO son considerablemente menores respecto al A2.
- Para el río Ubaté en la parte baja, comparando el escenario A2, se observa existen diferencias con mayores y menores concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales, respecto a B2, dependiendo del mes, y el A1B registra concentraciones de DBO menores respecto al A2.
- Para el río Suárez, se observa que en el escenario A2 en algunos meses presenta concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales más altas y en otros, más bajas que el B2, siendo más cercanas las del oxígeno disuelto. Para el escenario A1B, las concentraciones de DBO son menores respecto al A2.

- **Escenarios del 2071 al 2100**
- En el río Ubaté alto en la parte alta y media, se observa que el escenario A2 en algunos meses presenta concentraciones de DBO, OD y Sólidos Suspendidos Totales más altas y en otros más bajas que el B2, con amplia variabilidad, lográndose identificar una tendencia de concentraciones menores en el escenario A2, respecto a puntos bajos del cauce.
- Para el río Ubaté en la parte baja, comparando el escenario A2, se observa que el escenario A2 registran diferencias más acentuadas con menores concentraciones que en el B2.
- Para el río Suárez, se observa una tendencia inversa, respecto al río Ubaté en el caso del OD y DBO. Se presentan mayores concentraciones en las zonas altas, para el escenario B2. En contraste, pasa algo similar al río Suárez para SST.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Por medio de la herramienta de modelación hidrológica WEAP, se pudo incluir en el esquema de la cuenca, puntos de captación para riego, abastecimiento de agua para consumo humano, el uso del suelo y la cobertura vegetal, entre otros; dichas variables que fueron incluidas en el esquema de modelación, como la demografía, el crecimiento poblacional y planeación, y el cambio en las coberturas vegetales, agregan incertidumbre al resultado de la modelación. Sin embargo, también permite evaluar la modelación bajo un enfoque de gestión integral de cuencas, lo cual permite concluir que es una herramienta apropiada, para ser empleada en cuencas hidrográficas mediana a altamente intervenidas.
- Se puede concluir que la calibración hidrológica fue más eficiente en las cuencas altas de los ríos principales y en algunos tributarios. En contraste en las zonas bajas de las cuencas estudiadas y específicamente en el río Lenguazaque (Lenguazaque y su conexión con las compuertas Cartagena), y en el río Suárez, se presentan deficiencias en la calibración, debido a la conexión hidráulica no monitoreada por distrito de riego, operación de compuertas.
- Además, se concluye que las variables climatológicas incluidas en el esquema de modelación definen el éxito y la sensibilidad de la respuesta hidrológica, por lo cual se recomienda ingresar los datos lo más completos posibles.

De igual forma, la modelación hidrológica en WEAP, puede ofertar mejores resultados y versatilidad en la calibración, si se emplean catchments (o subcuencas) en el esquema de modelación, por bandas de elevación, ya que se

pueden aplicar diferentes valores a las variables a calibrar, de acuerdo a la altura, y por ende, a la posible grado de intervención y tipo de coberturas vegetales. Sin embargo, para el presente estudio, no se llegó a este nivel de detalle.

- Sin embargo, para casos de representación de eventos extremos (tormentas de alta intensidad), debido al paso de tiempo del modelo, y a que el modelo hidrológico es de planeación, no responde adecuadamente a la representación de caudales pico o caudales extremos.
- La simulación de caudales bajo los escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B, presentan variedad de respuesta hidrológica para los tres periodos modelados (2011 2040, 2041 – 2070, 2070 a 2100). Se puede afirmar de modo general, que el escenario que generó mayor reducción en la oferta de caudales hidrológicos fue el A1B. Por su parte, el que generó mayores eventos extremos fue el A2, con mayor frecuencia de oscilación y magnitud en la oferta de caudales. Por su parte el escenario B2 ofertó mayor caudal, pero con menores frecuencias de eventos extremos.

Respecto a los periodos modelados, a medida que los años aumentan, se reduce notoriamente el caudal sobretodo en el último periodo simulado, posiblemente producto además de aumento en presión por aumento poblacional.

- Se puede concluir que el posible efecto en la calidad del agua en la cuenca Ubaté Suárez, presenta dos patrones de comportamiento diferente. En la corriente Ubaté y en la corriente Suárez se presentan diferentes tendencias, específicamente del oxígeno disuelto. Este tiende a reducirse en la corriente Ubaté, y este tiende a aumentarse en la corriente Suárez, respecto a los años de referencia. Sin embargo, a lo largo de los años de cada uno de los escenarios, su valor se mantiene; presenta cambios más marcados para el escenario A2.

El comportamiento a lo largo del paso de los años, para el escenario A2 tiende a reducir el valor de la DBO y el OD, aunque este tiende a oscilar en un mismo rango. Respecto a los sólidos suspendidos, se registran valores más extremos, mínimos y máximos.

El escenario B2 tiene cambios menos marcados, especialmente en el OD. Con el paso de tiempo, los SST aumentan ligeramente en el Ubaté, y se mantienen el río Suárez. En ambos cauces, la DBO se reduce ligeramente.

Para el escenario A1B los cambios a lo largo del tiempo son mucho más acentuados y definidos: la DBO aumenta marcadamente con el paso del tiempo, y los sólidos suspendidos y el OD disminuyen, siendo más notorio en la corriente Ubaté que en la Suárez.

De acuerdo con lo anterior, para cada escenario y cada caso, los efectos son diferentes, adversos y favorables, dependiendo de los posibles usos consuntivos que pueda tener el agua de la cuenca.

Se puede concluir que el escenario más crítico a nivel de oferta y calidad del agua sería el A1B, y el más difícil de gestionar (por sus eventos extremos) el A2.

- Es importante resaltar que en el presente estudio no se logró incluir un estudio económico y social, que permitiese establecer una proyección futura que incluyera dinámica migracional, proyecciones de desarrollo con obras y actividades económicas que se posicionarían en la cuenca, e influencia de grandes ciudades (por su cercanía, expansión y demanda de servicios ambientales) como Bogotá.

## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda actualizar el presente estudio, con una red de estaciones meteorológica más completa, con series continuas. Además, se recomienda contar con registros de operación de embalses y de apertura de compuertas o sistemas de control de la cuenca.

Es importante poder establecer el esquema de modelación incluyendo catchments por bandas de elevación, con el fin de poder establecer una mejor calibración, teniendo en cuenta alturas, coberturas y por ende, de forma indirecta, grado de intervención en las subcuencas.

De igual forma, se recomienda realizar un seguimiento del cambio de coberturas por medio de imágenes satelitales, con el fin de enriquecer esta información histórica, y así poder establecer una tendencia clara en cambio y uso del suelo. Para evaluar la expansión urbana y el crecimiento demográfico, se debe retroalimentar la información a medida que pase el tiempo, ya que una proyección a 100 años de esta variable, presenta una alta incertidumbre. De igual forma, se debe tener en cuenta la influencia económica y social que puede ejercer una gran ciudad como Bogotá, ya que es posible que esta demande mayores servicios ambientales de esta cuenca y puede que su expansión urbana e industrial llegue a abarcar zonas de esta cuenca.

Además, se recomienda calibrar las tasas de reacción de los módulos de calidad del agua, para que pueda ser evaluada, además de la tendencia, la magnitud de las concentraciones de determinantes de calidad del agua simuladas.



## A. Anexo: Estaciones Climatológicas e Hidrológicas

### ANEXO A.1. Estaciones Climatológicas e Hidrológicas en la Cuenca Ubaté – Suárez

Tabla 6.1: Estaciones Climatológicas en la cuenca de los ríos Ubaté - Suárez

ESTACIÓN	TP	ENTIDAD	CUENCA 3ER ORDEN	ENCONTRADA	AÑO INICIO	AÑO FIN	% FALTANTES
2401055	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	1998	35.70%
2401056	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	1998	34.30%
2401057	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	2012	26.10%
2401054	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	1998	34.60%
2401058	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	2012	18.60%
2401053	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	2012	20.40%
2401059	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	1998	28.90%
2120189	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1992	1994	26.80%
2401052	PM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1973	2012	22.40%
2401035	PG	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1966	1999	22.10%

ESTACIÓN	TP	ENTIDAD	CUENCA 3ER ORDEN	ENCONTRADA	AÑO INICIO	AÑO FIN	% FALTANTES
2401534	CP	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	2002	2012	31.80%
2401002	PG	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1966	2013	33.20%
2401538	CP	IDEAM	2401-02- Río Ubaté	SI	2011	2011	34.20%
2401115	PG	IDEAM	2401-02- Río Ubaté	SI	2008	2012	10.20%
2401511	CO	IDEAM	2401-02- Río Ubaté	NO	1960	2012	5.50%
2401049	PM	CAR	2401-03- Río Suta	SI	1966	2012	22.40%
2401027	PG	CAR	2401-03- Río Suta	SI	1966	2012	19.90%
2401521	CO	CAR	2401-03- Río Suta	SI	1965	2007	14.50%
2401116	PM	CAR	2401-03- Río Suta	SI	2009	2012	16.60%
2401519	CO	CAR	2401-03- Río Suta	SI	1966	2012	9.40%
2401030	PM	CAR	2401-01 Laguna de Suesca	SI	1966	2012	18.10%
2401515	CO	CAR	2401-01 Laguna de Suesca	SI	1960	2012	12.50%
2120168	PG	CAR	2401-04 Laguna de Cucunubá	SI	1987	2012	8.10%
2401108	PM	IDEAM	2401-04 Laguna de Cucunubá	NO	-	-	-
2401014	PM	IDEAM	2401-04 Laguna de Cucunubá	NO	-	-	-
2401007	PM	IDEAM	2401-05- Río Lenguazaque	NO	-	-	-
2401028	PG	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1966	2000	29.60%
2401533	CP	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	2000	2010	77.50%
2401535	CP	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	2000	2009	70.20%
2401033	PG	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1966	2012	32.30%
2401038	PG	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1966	2012	23.30%
2401039	PG	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1966	2012	21.50%
2401036	PM	CAR	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	SI	1966	2012	23.60%
2401051	PM	CAR	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	SI	1966	2013	33.40%
2401017	PM	IDEAM	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	NO	-	-	-
2401512	CP	IDEAM	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	NO	-	-	-

ESTACIÓN	TP	ENTIDAD	CUENCA 3ER ORDEN	ENCONTRADA	AÑO INICIO	AÑO FIN	% FALTANTES
2401110	PG	IDEAM	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	SI	1966	2012	25.30%
2401106	PM	IDEAM	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	NO	-	-	-
2401044	PM	CAR	2401-04- Ubaté - Laguna de Fúquene	SI	1966	2012	16.10%
2401037	PM	CAR	2401-08- Río Simijaca	SI	1966	2012	18.60%
2401513	CP	CAR	2401-08- Río Simijaca	SI	1980	2012	26.30%
2401015	PG	IDEAM	2401-08- Río Simijaca	NO	-	-	-
2401042	PM	CAR	2401-09- Río Chiquinquirá	SI	1966	2012	20.20%
2401524	ME	CAR	2401-09- Río Chiquinquirá	NO	-	-	-
2401518	CP	CAR	2401-10- Río Suárez	SI	1966	2010	28.40%
2401031	PM	CAR	2401-10- Río Suárez	SI	1966	2012	23.20%
2401043	PG	CAR	2401-10- Río Suárez	SI	1966	2012	20.00%
2401094	PM	FNC	2401-10- Río Suárez	NO	-	-	-
2401068	PG	CAR	2401-10- Río Suárez	SI	1966	2012	20.10%
2401536	CO	IDEAM	2401-10- Río Suárez	SI	1998	2011	62.90%

Las estaciones sombreadas en rojo, no fueron empleadas para el presente estudio, debido a que no fue posible obtener sus registros históricos.

**Tabla 6.2:** Estaciones Hidrológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez, con sus respectivos análisis de datos faltantes, datos atípicos, aleatoriedad, homogeneidad y tendencia.

ESTACIÓN	TP	ENTIDAD	CUENCA 3ER ORDEN	ENCONTRADA	AÑO INICIO	AÑO FIN	% FALTANTES	% ATÍPICOS	ALEATORIEDAD	Homogeneidad y Consistencia		TENDENCIA
										Test T	Test Chi cuadrado	
2401755	LG	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1967	2011	7.70%	8.30%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Creciente
2401780	LM	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1966	2011	7.50%	10.03%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente
2120913	LG	CAR	2401-02- Río Ubaté	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
2401710	LG	CAR	2401-02- Río Ubaté	SI	1952	2011	10.80%	9.22%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente
2401715	LM	IDEAM	2401-02- Río Ubaté	SI	1966	2011	0.20%	8.99%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente
2401718	LG	CAR	2401-01- Laguna de Suesca	SI	2007	2009	25.30%	10.38%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Creciente
2401787	LM	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
2401785	LG	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
2401784	LM	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
2401726	LM	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	SI	2011	2012	-	-	-	-	-	-
2401708	LM	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	SI	2011	2012	-	-	-	-	-	-
2401709	LM	CAR	2401-04- Laguna de Cucunubá	SI	2011	2012	-	-	-	-	-	-
2401761	LG	IDEAM	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1961	2010	-	-	-	-	-	-
2401714	LG		2401-05- Río Lenguazaque	SI	1960	2011	6.50%	11.31%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Creciente
2401733	LG	CAR	2401-05- Río Lenguazaque	SI	1966	2011	12.80%	9.65%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente



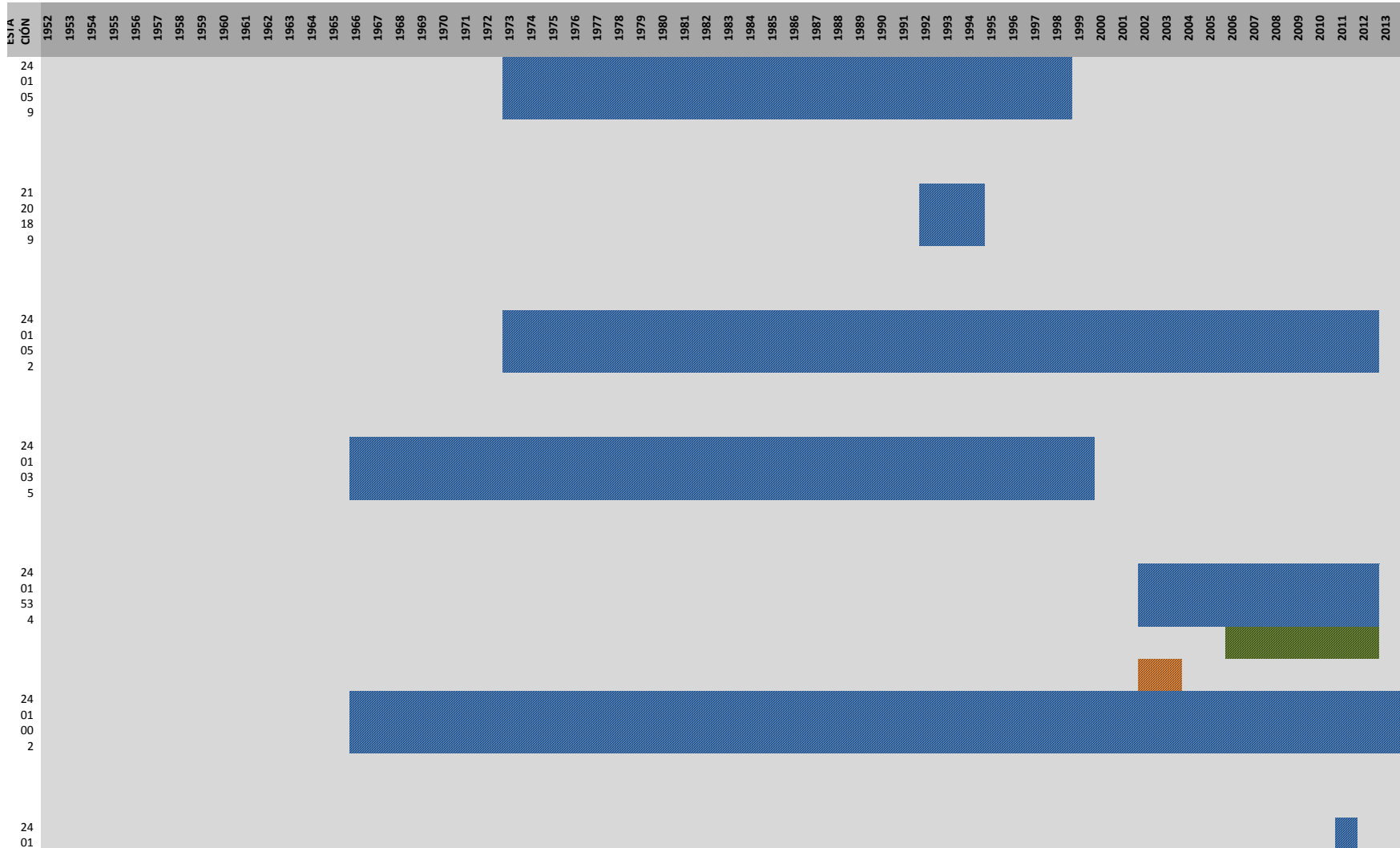
ESTACIÓN	TP	ENTIDAD	CUENCA 3ER ORDEN	ENCONTRADA	AÑO INICIO	AÑO FIN	% FALTANTES	% ATÍPICOS	ALEATORIEDAD	Homogeneidad y Consistencia		TENDENCIA
										Test T	Test Chi cuadrado	
2401713	LM	CAR	2401-10- Río Suárez	SI	1966	2011	2.60%	7.68%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente
2401759	LG	IDEAM	-	NO	-	-	-	-	-	-	-	-
2401723	LM	CAR	No fue posible ubicarlas sobre una corriente - verificar en campo	SI	1966	2010	3.10%	9.70%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Decreciente
2401731	LG	CAR	No fue posible ubicarlas sobre una corriente - verificar en campo	SI	1971	2011	14.40%	9.57%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Creciente
2401738	LG	CAR	No fue posible ubicarlas sobre una corriente - verificar en campo	SI	1965	2011	4%	13.10%	Aprueba hipótesis de no aleatoriedad	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la media	Aprueba la hipótesis de homogeneidad en la varianza	Creciente

Las estaciones sombreadas en rojo, no fueron empleadas para el presente estudio, debido a que no fue posible obtener sus registros históricos.

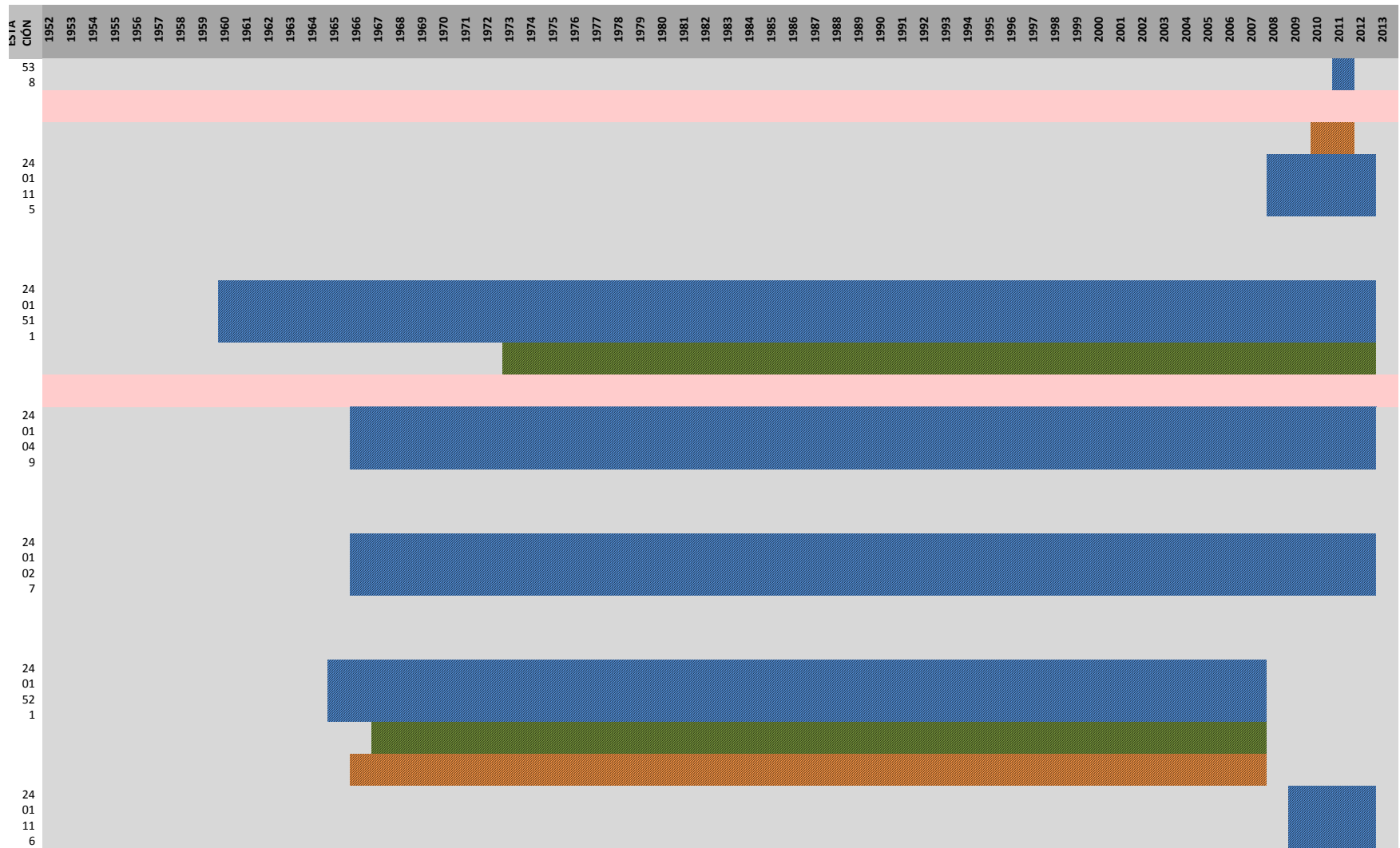
# ANEXO A.2. Ventana de tiempo de estaciones Climatológicas

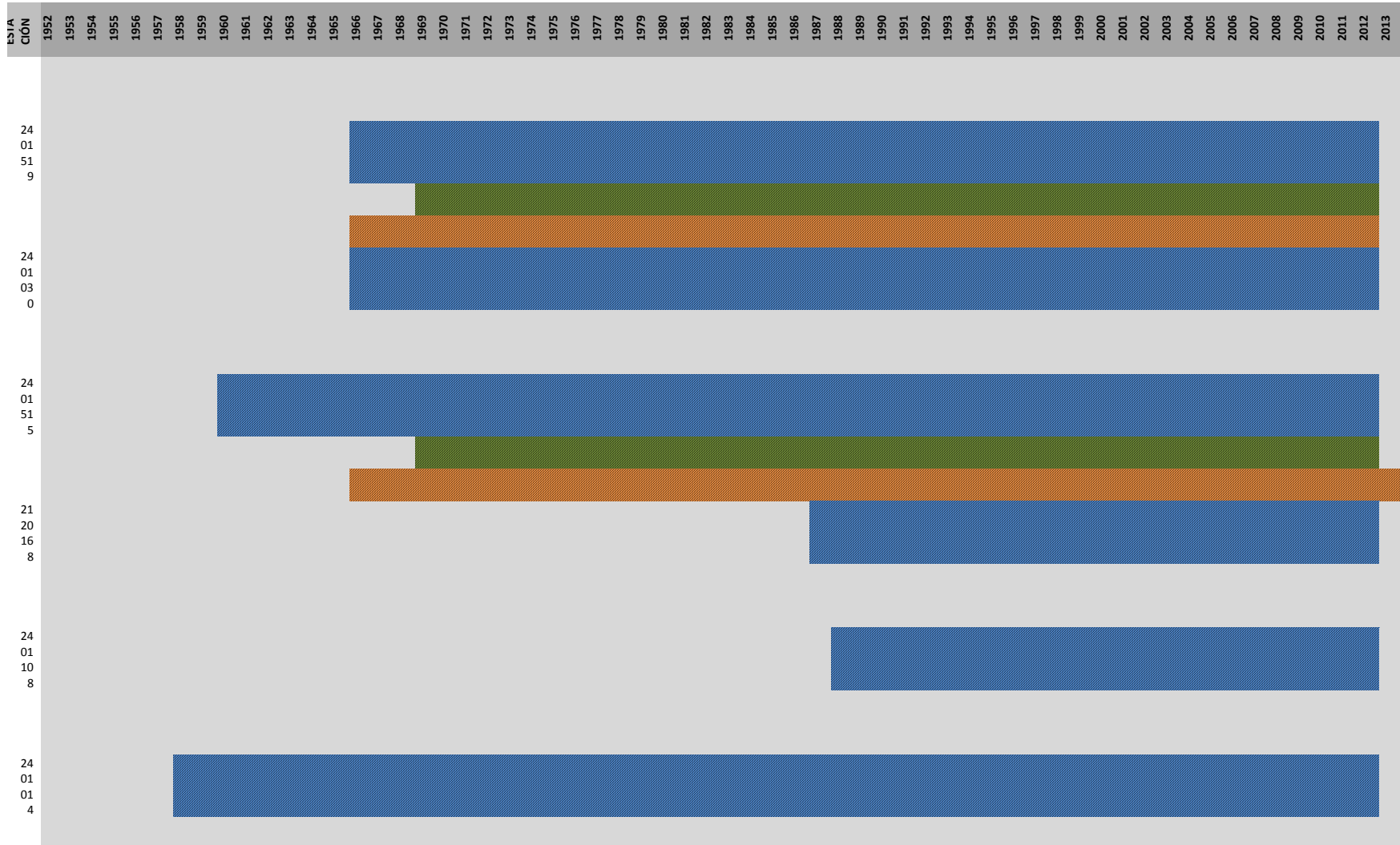
**Tabla 6.3:** Ventana de tiempo de estaciones Climatológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez.



















**Tabla 6.4:** Ventana de tiempo de estaciones Hidrológicas en la cuenca de los ríos Ubaté – Suárez.



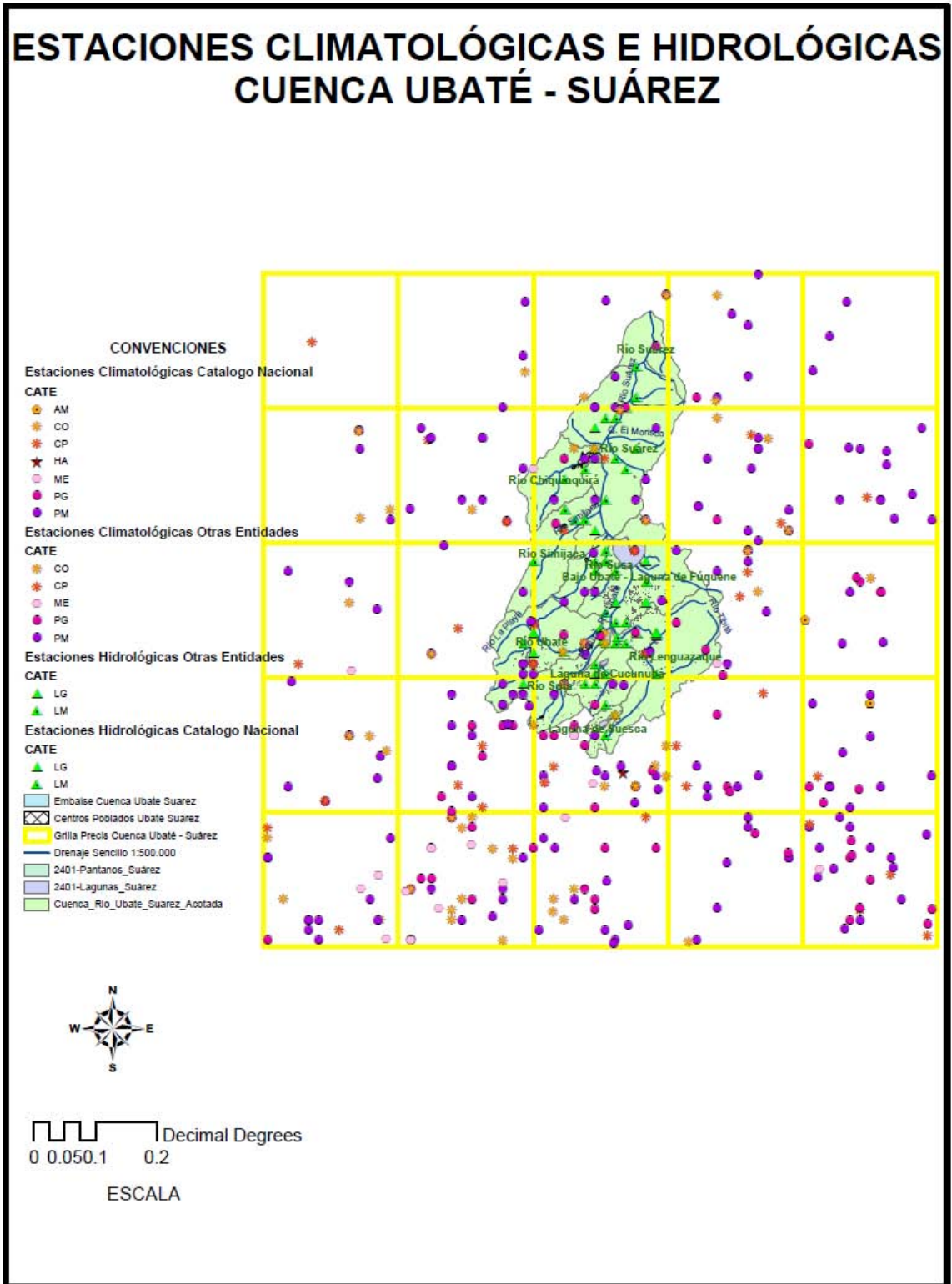




## **A. Anexo: Mapas**

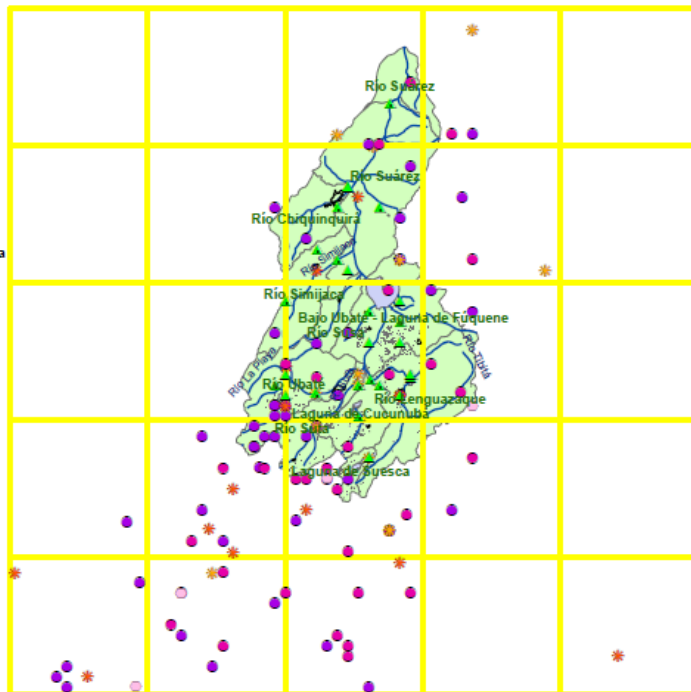
### **ANEXO B.1.Cuenca Ubaté - Suárez**





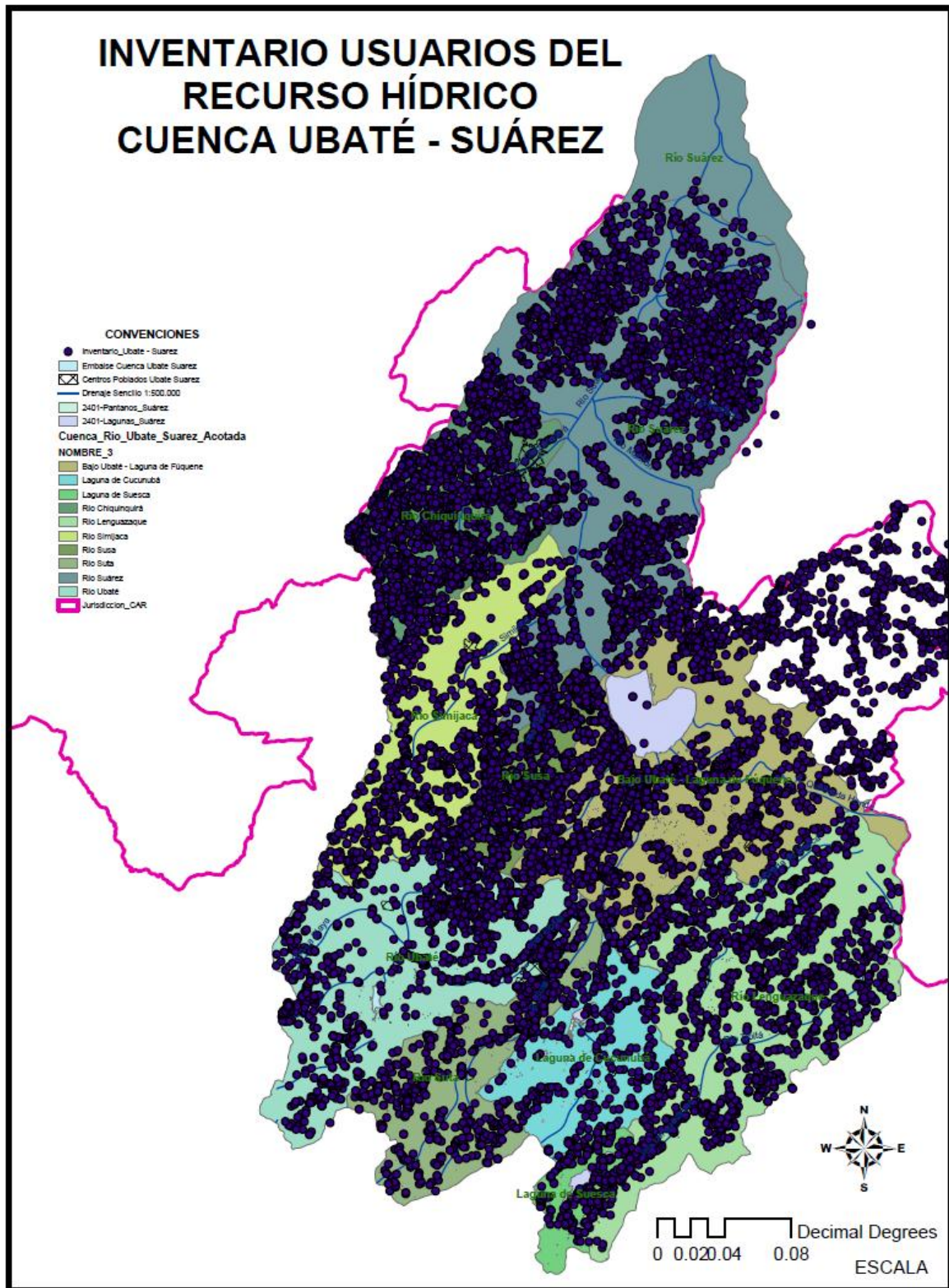
# ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS CON DATOS HISTÓRICOS CUENCA UBATÉ - SUÁREZ

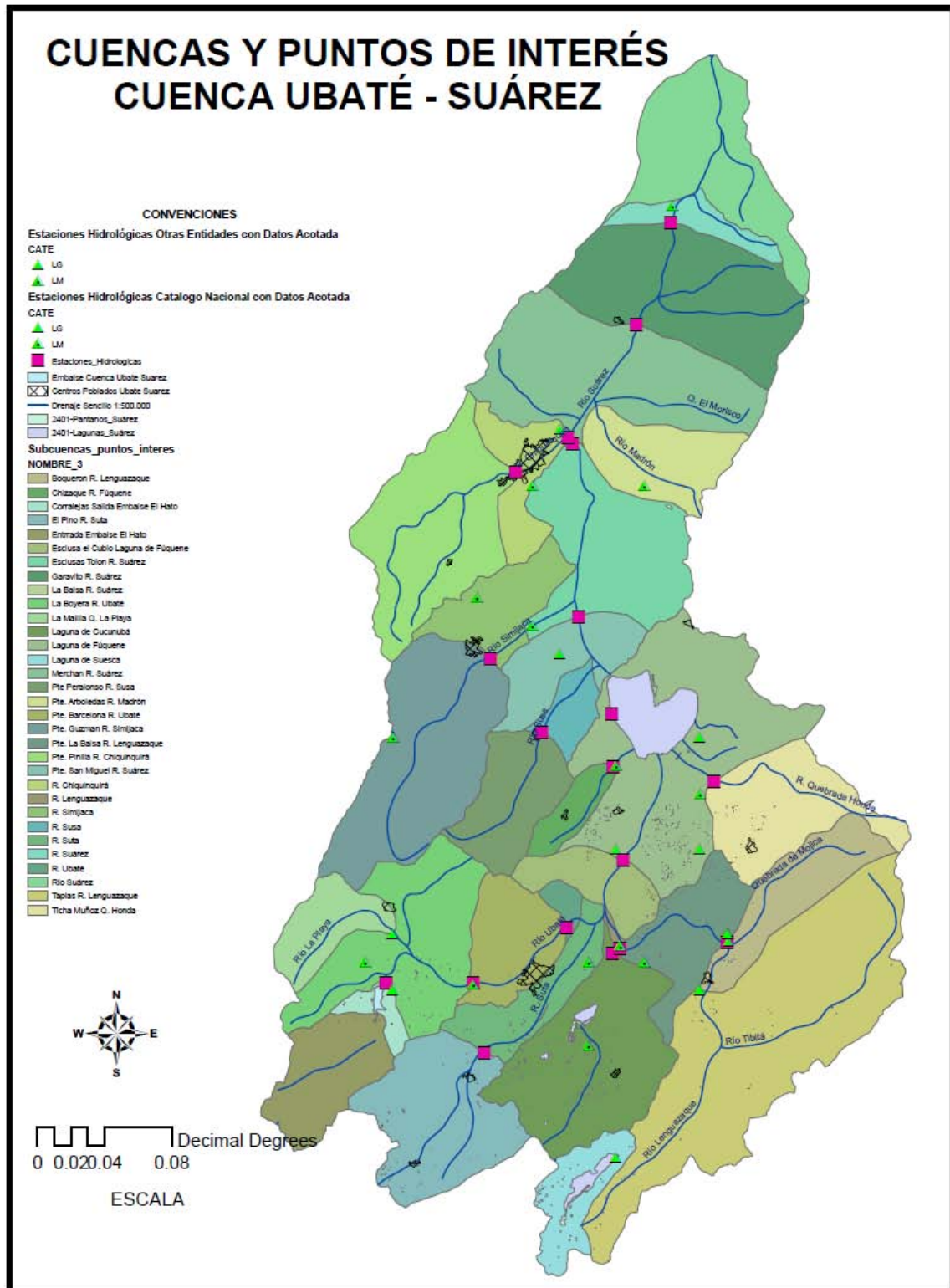
- CONVENCIONES**
- Estaciones Hidrológicas Otras Entidades con Datos Acotada
  - CATE
    - ▲ LG
    - ▲ LM
  - Estaciones Hidrológicas Catalogo Nacional con Datos Acotada
  - CATE
    - ▲ LG
    - ▲ LM
  - Estaciones Climatológicas Otras Entidades con Datos
  - CATE
    - ★ OO
    - ★ CP
    - ME
    - PG
    - PM
  - Estaciones Climatológicas Catalogo Nacional con Datos
  - CATE
    - ★ OO
    - ★ CP
    - ME
    - PG
    - PM
  - Embalse Cuenca Ubaté - Suárez
  - Centros Floreados Ubaté - Suárez
  - Grilla Precis Cuenca Ubaté - Suárez
  - Drenaje Semelle 1:500.000
  - 2401-Pantanos\_Suárez
  - 2401-Lagunas\_Suárez
  - Cuenca\_Rio\_Ubaté\_Suárez\_Acotada

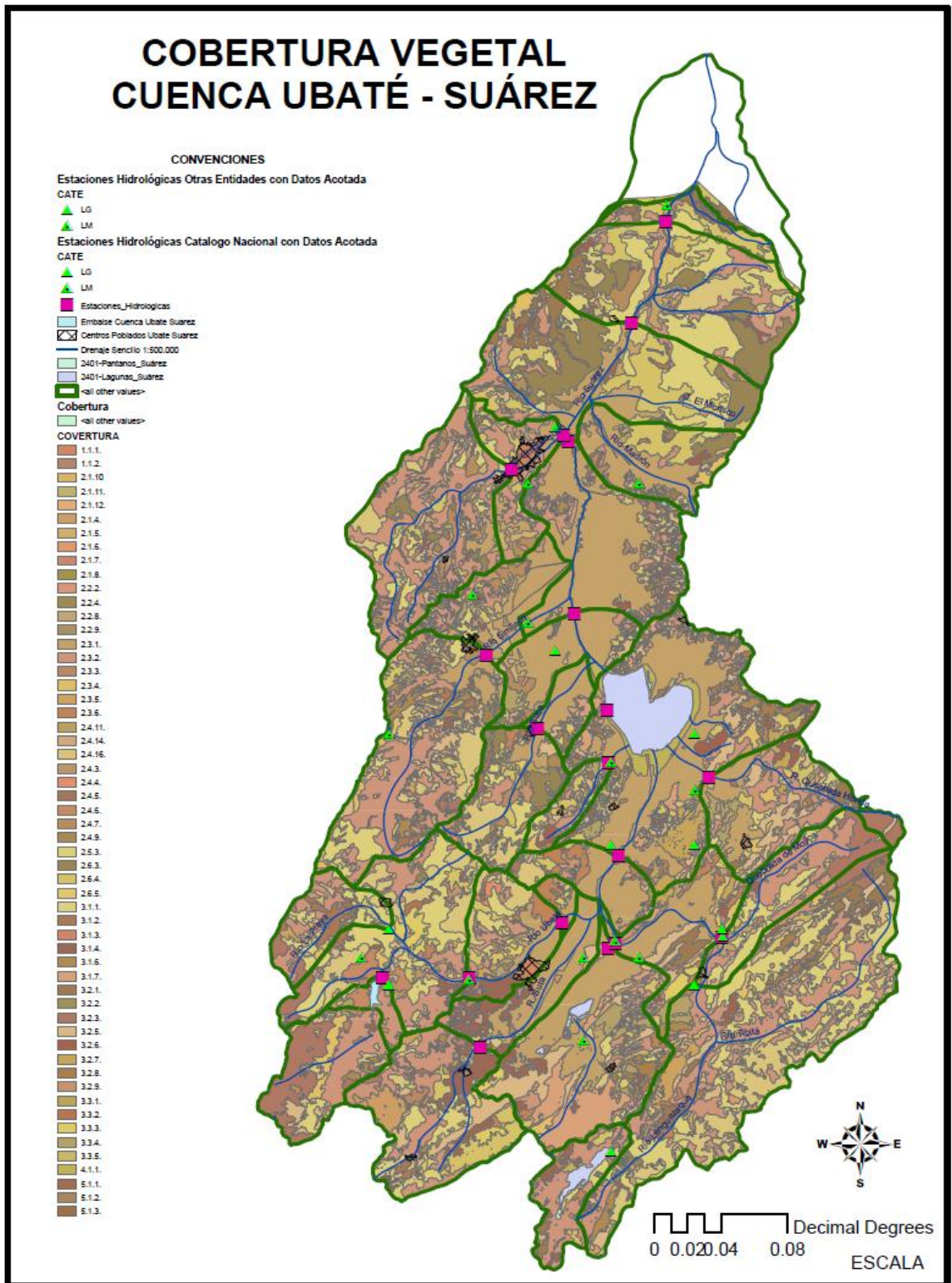


0 0.05 0.1 0.2 Decimal Degrees

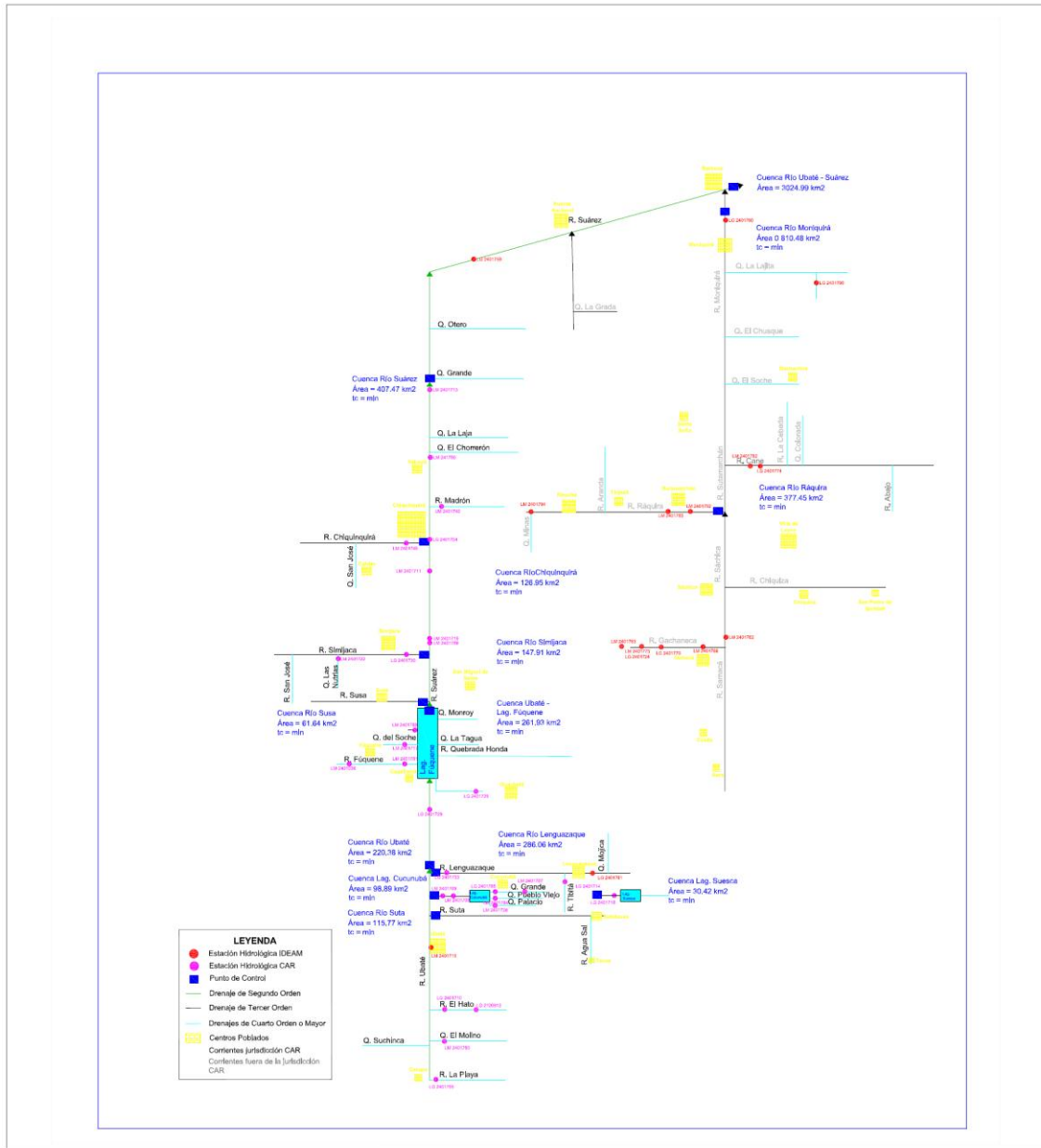
ESCALA







# ANEXO B.2. Topología Cuenca Ubaté - Suárez



TÍTULO DE TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA:  
EVALUACIÓN DEL POSIBLE EFECTO DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA UBATÉ - SUÁREZ  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - FACULTAD DE INGENIERÍA

PRESENTADO POR:  
LUISSA F. CUSGÜEN CASTRO  
PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

DIRIGIDO POR:  
NELSON OBREGÓN NEIRA  
CODIRIGIDO POR:  
MARTHA C. BUSTOS LÓPEZ

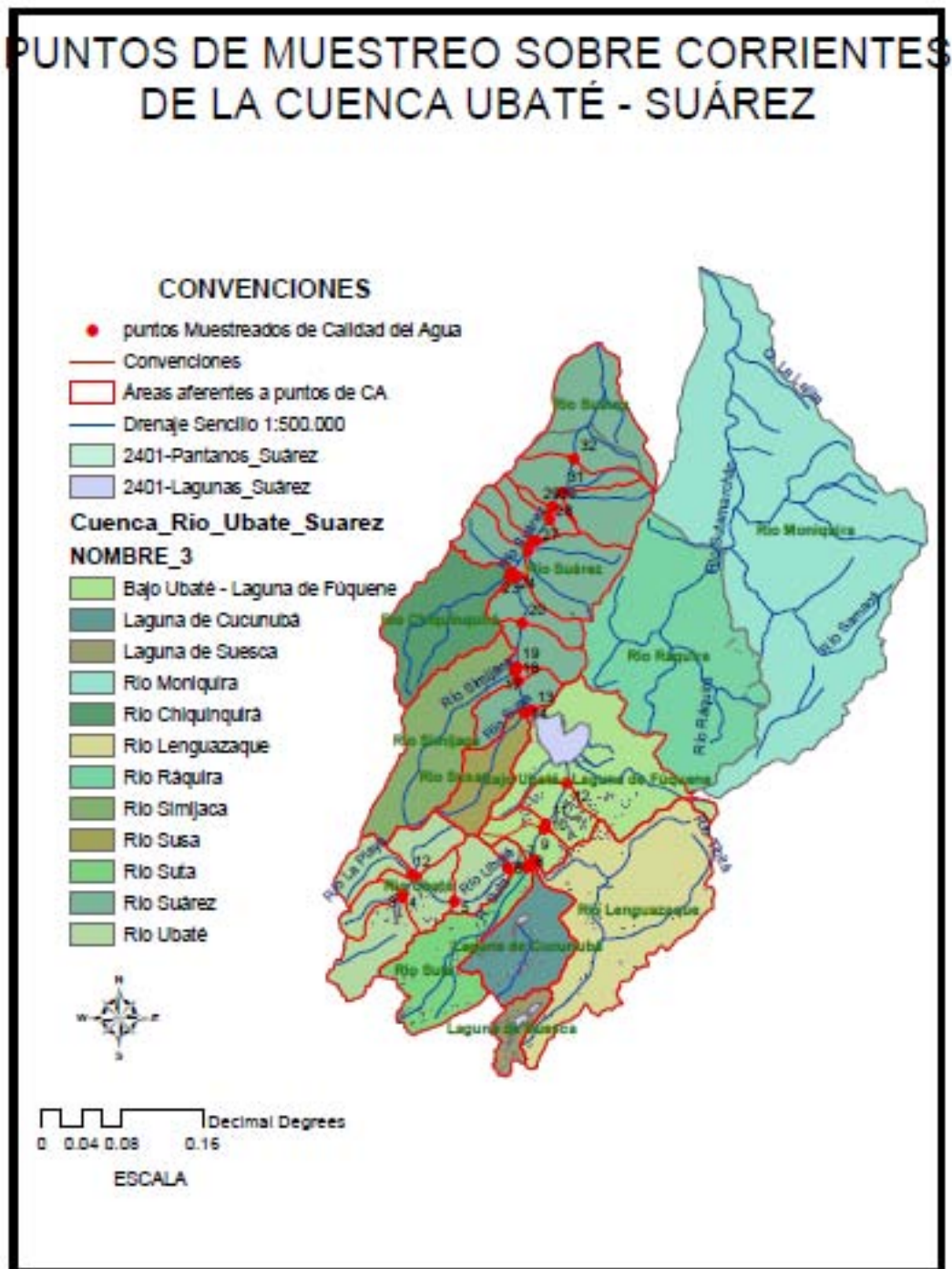
NOMBRE DEL PLANO:  
TOPOLOGÍA CUENCA RÍO UBATÉ - SUÁREZ

ESCALA:  
1:  
FECHA:  
JUNIO DE 2013



## **ANEXO B.3.Espacialización de variables climatológicas e hidrológicas en la Cuenca Ubaté - Suárez**

## **ANEXO B.4.Resultados de Campañas de Muestreo de Calidad del Agua en la Cuenca Ubaté - Suárez**

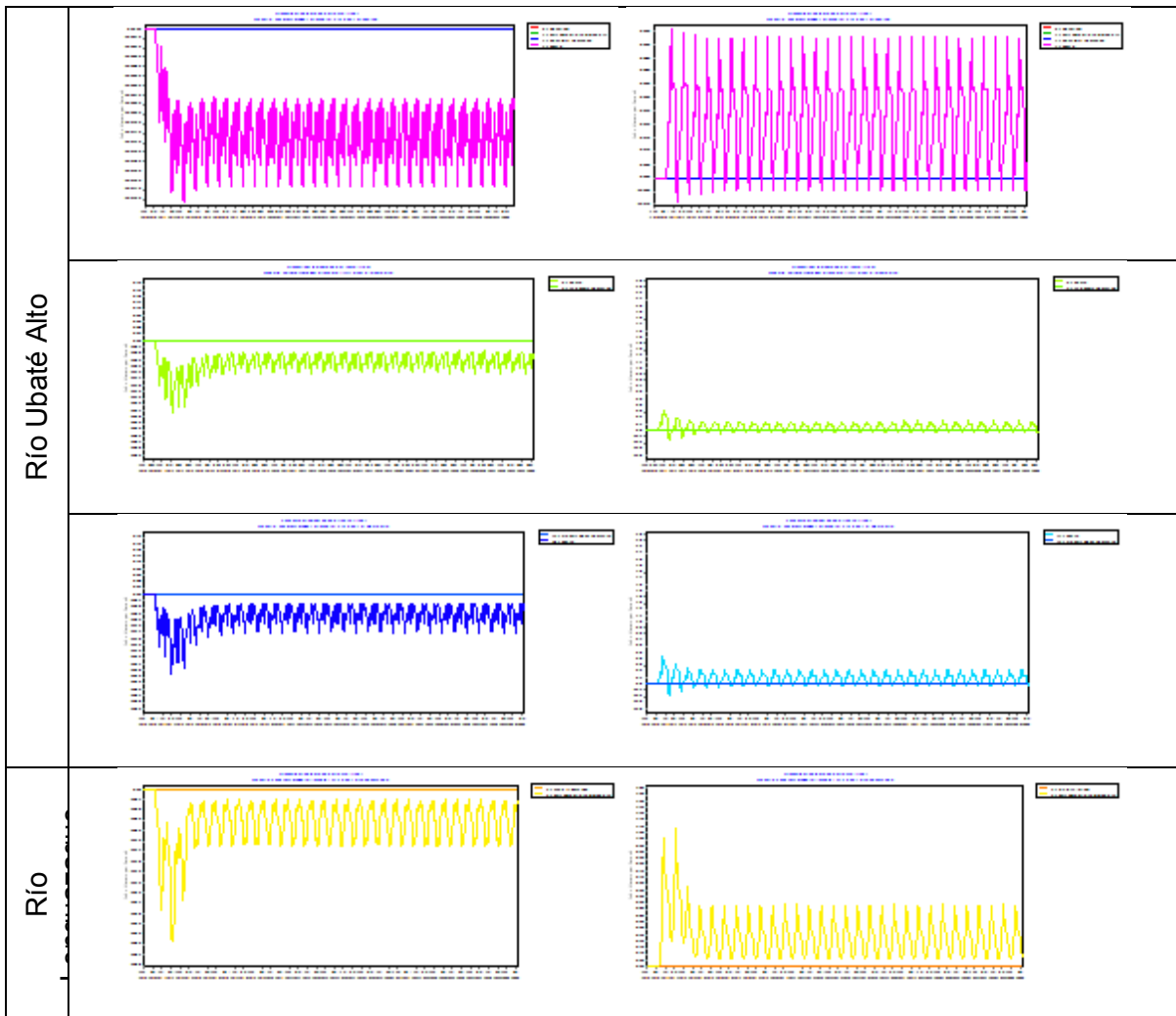


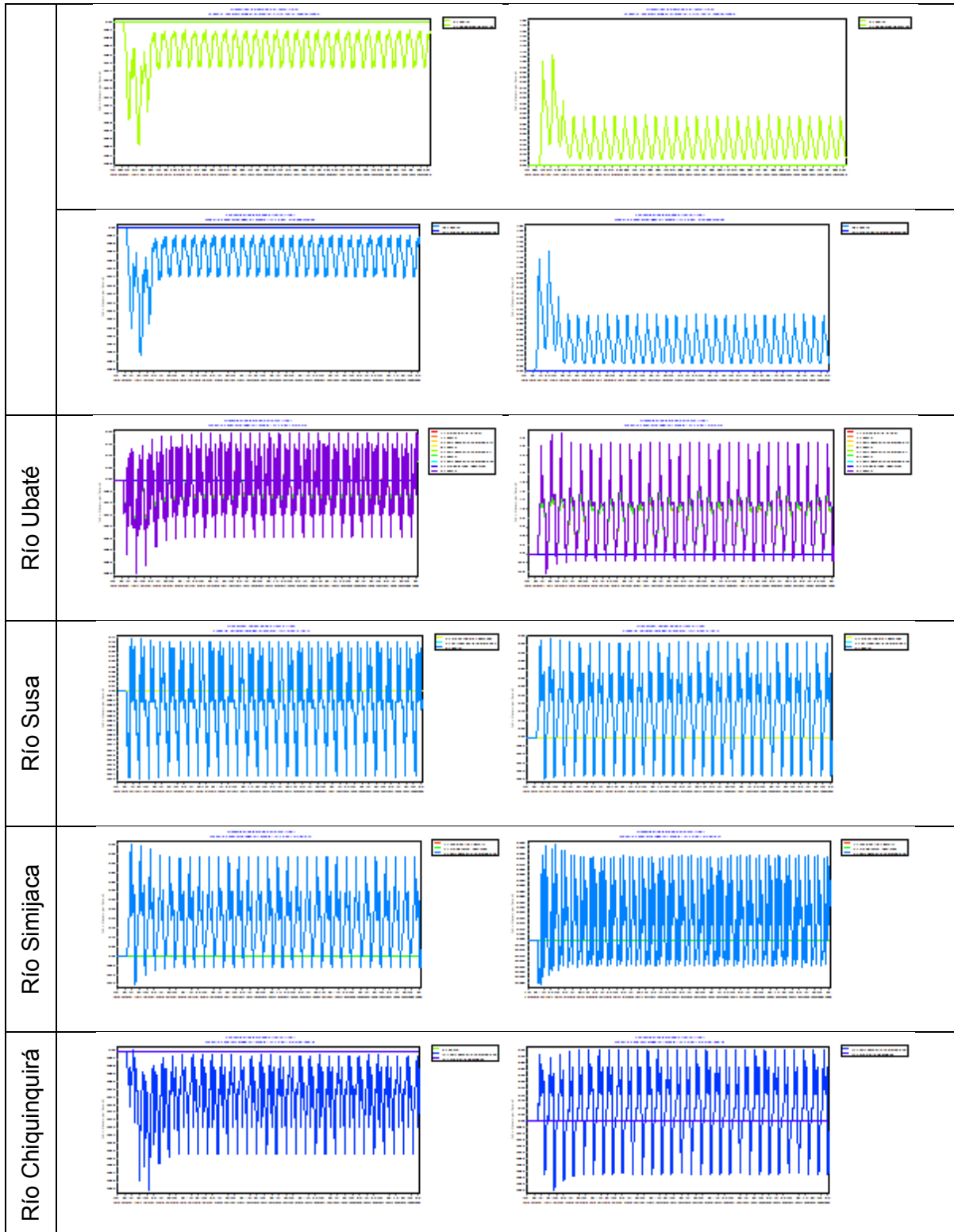
## **ANEXO C.1.Resultados de Modelación Hidrológica en la Cuenca Ubaté - Suárez**

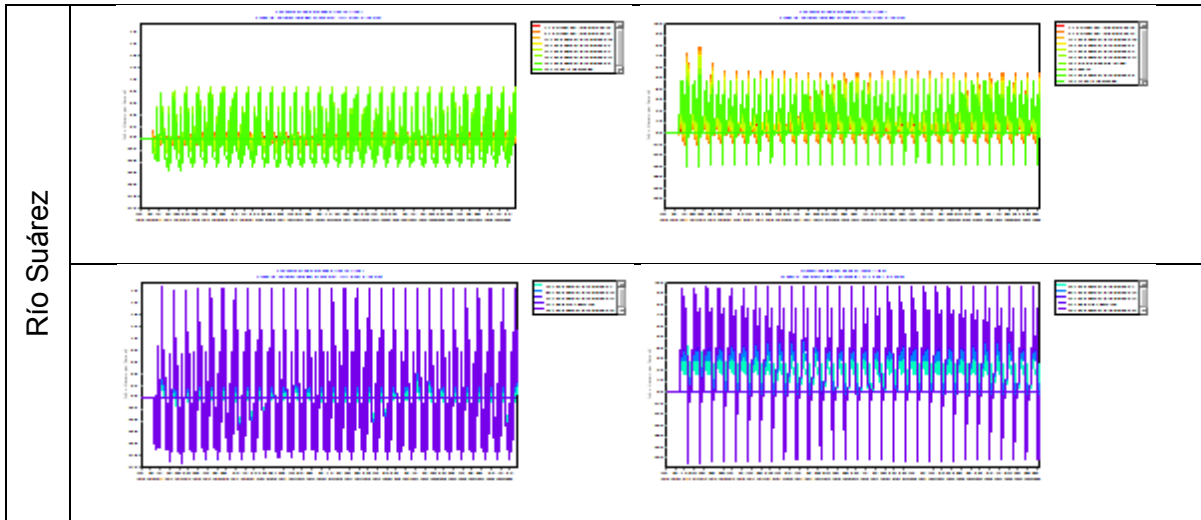
**ANEXO C.2.Métricas de Desempeño de Calibración  
de los Resultados de Modelación Hidrológica en la  
Cuenca Ubaté - Suárez**

## ANEXO D.1.Comparación de los Resultados de Modelación Hidrológica en la Cuenca Ubaté – Suárez por subcuencas, bajo Escenarios de Cambio Climático

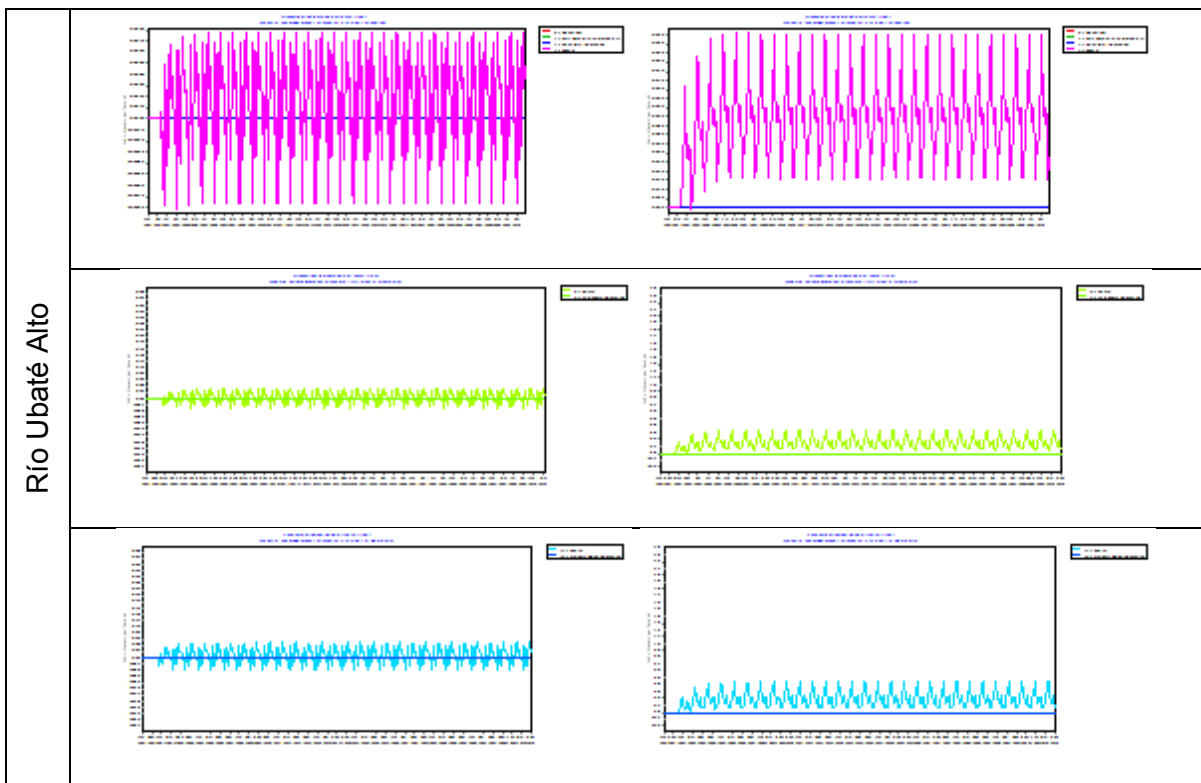
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-1. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



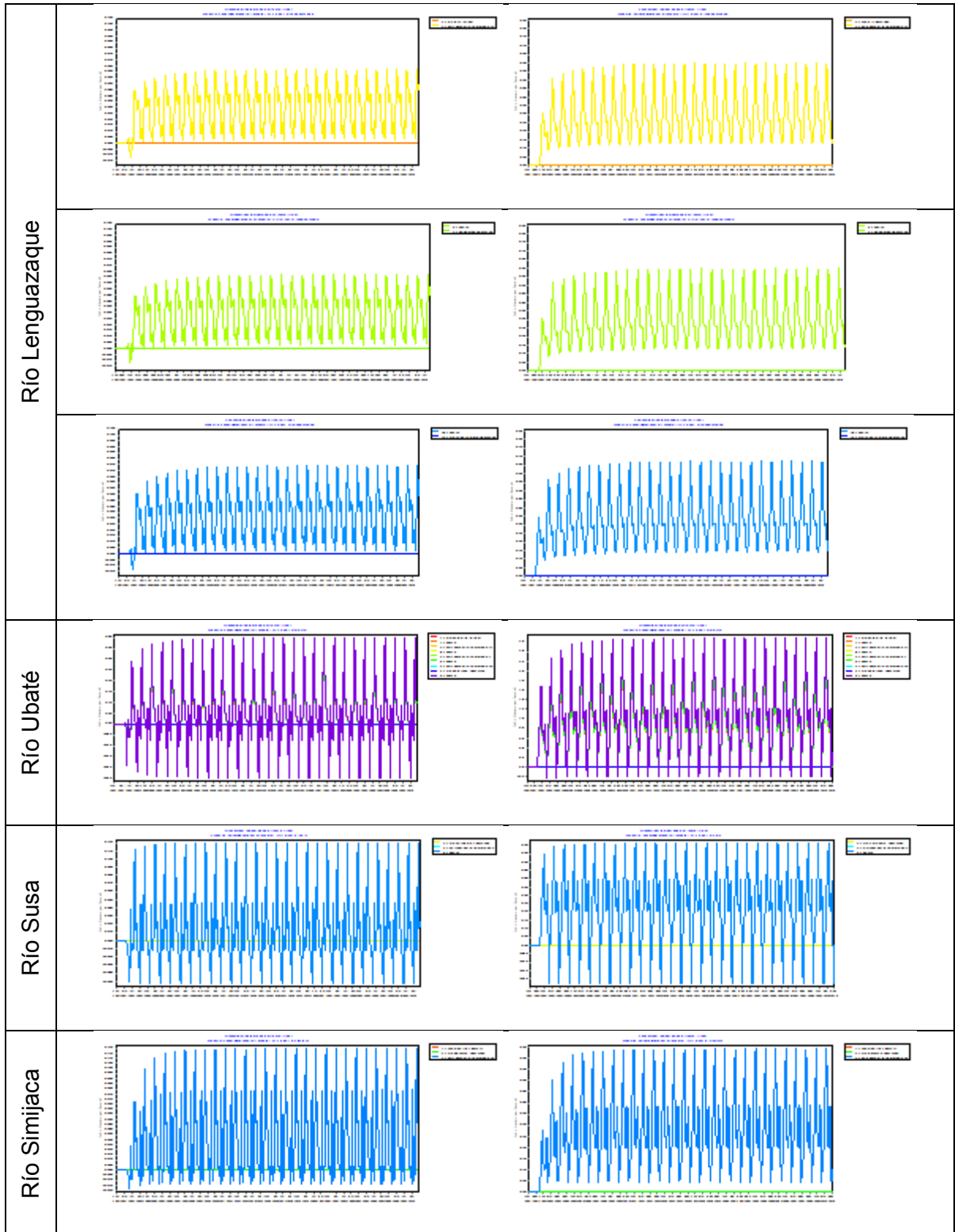




**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-2. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.







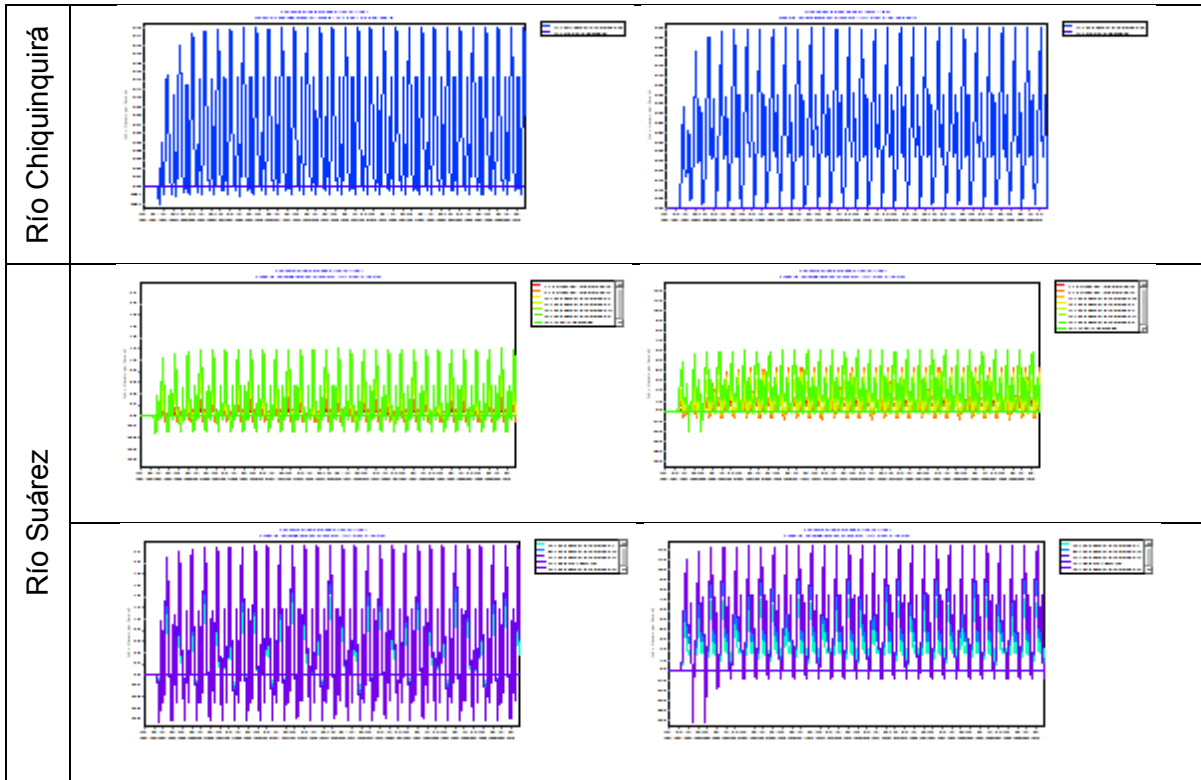
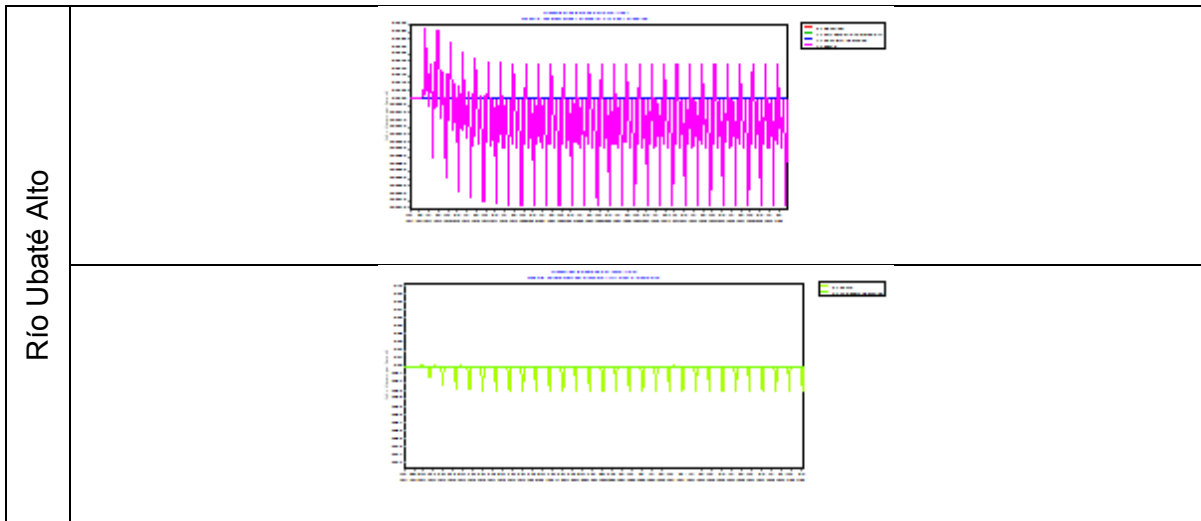
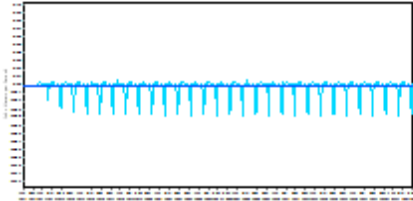
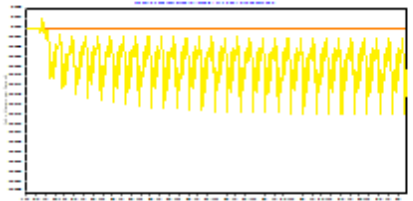
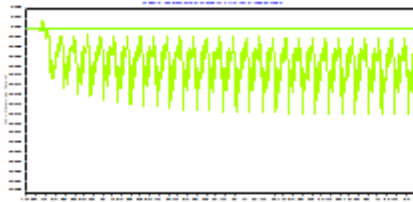
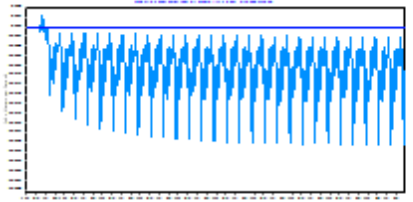
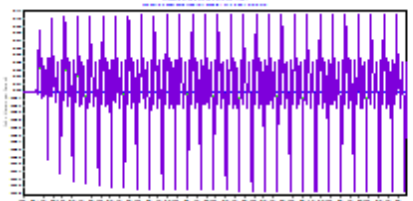
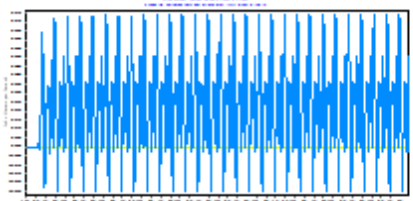
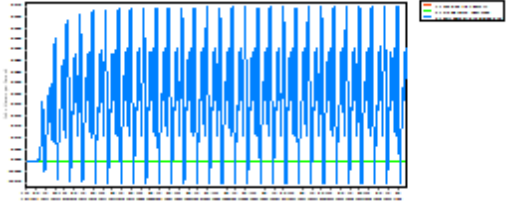
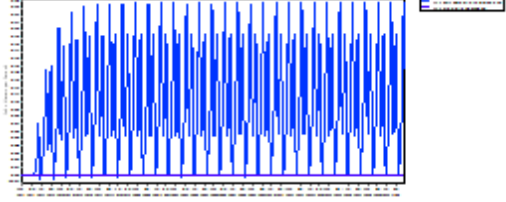
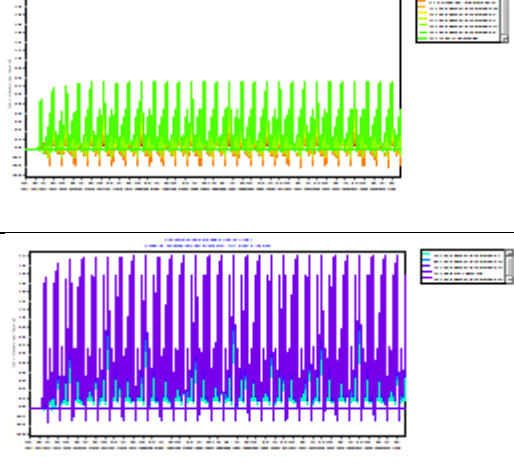


Figura 3. Comparación de resultados modelo hidrológico por subcuencas, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

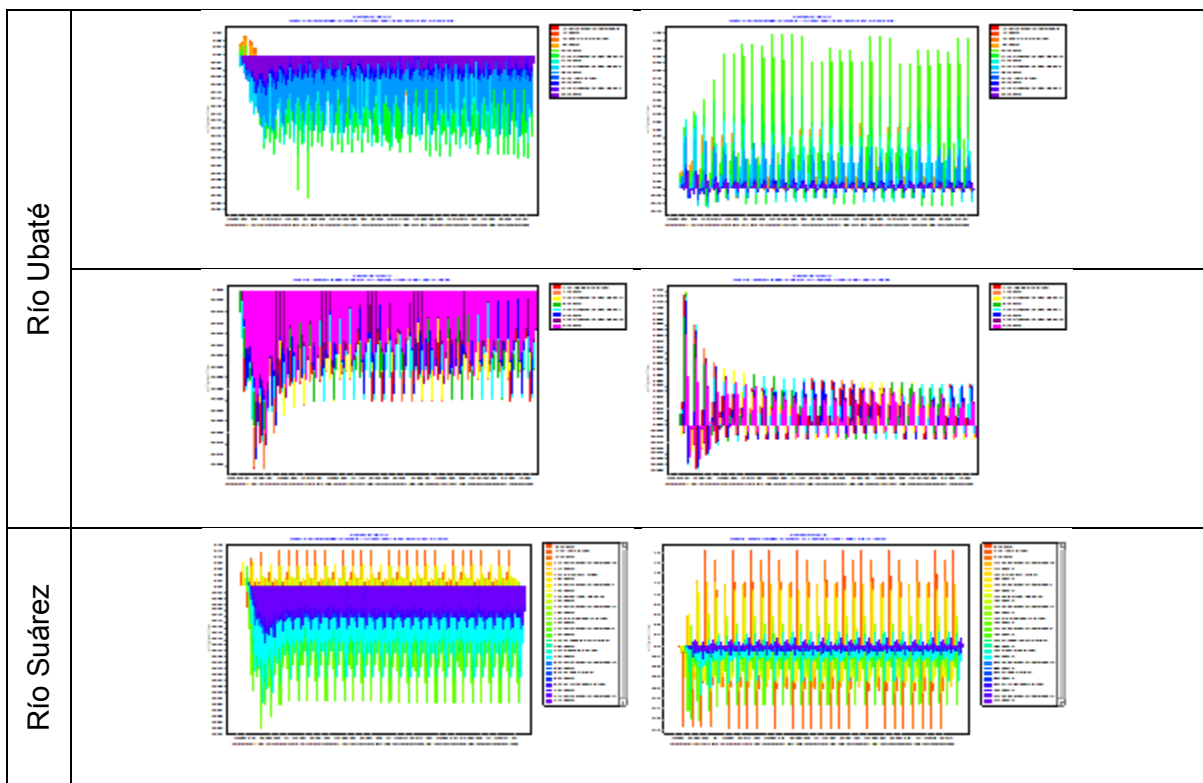


	
Río Linguazaque	
	
	
Río Ubaté	
Río Susa	

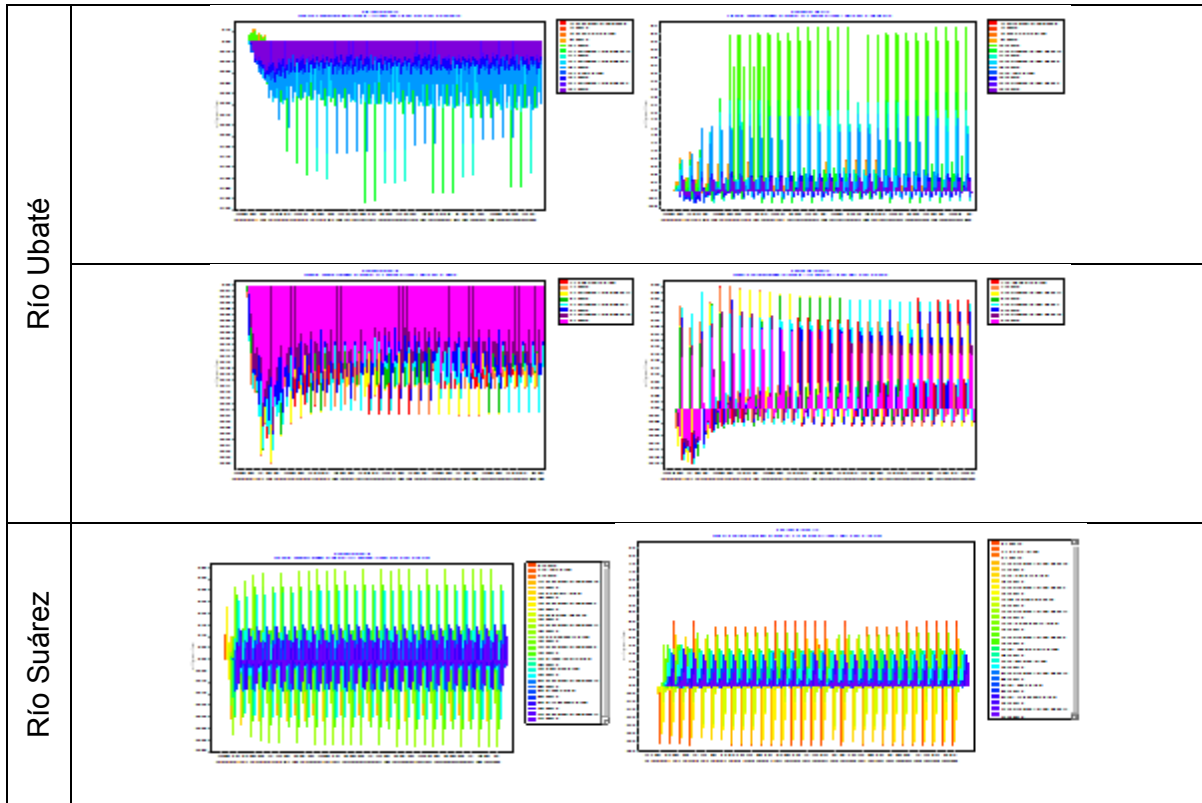
Río Simijaca	
Río Chiquinquirá	
Río Suárez	

## ANEXO D.2.Comparación de los Resultados de Modelación Calidad del Agua en la Cuenca Ubaté – Suárez por subcuencas, bajo Escenarios de Cambio Climático

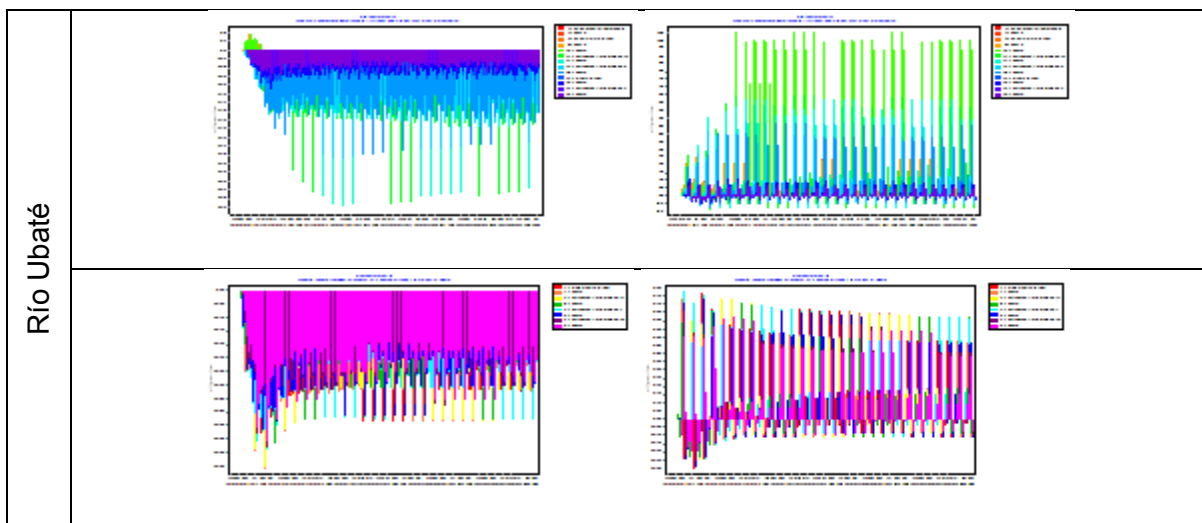
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-4. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

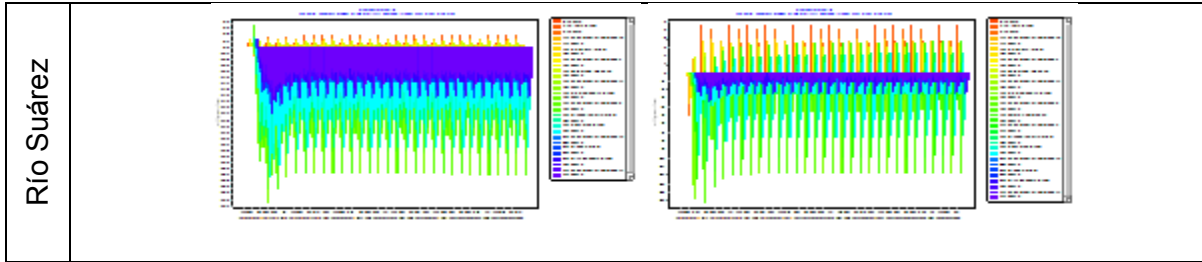


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-5. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

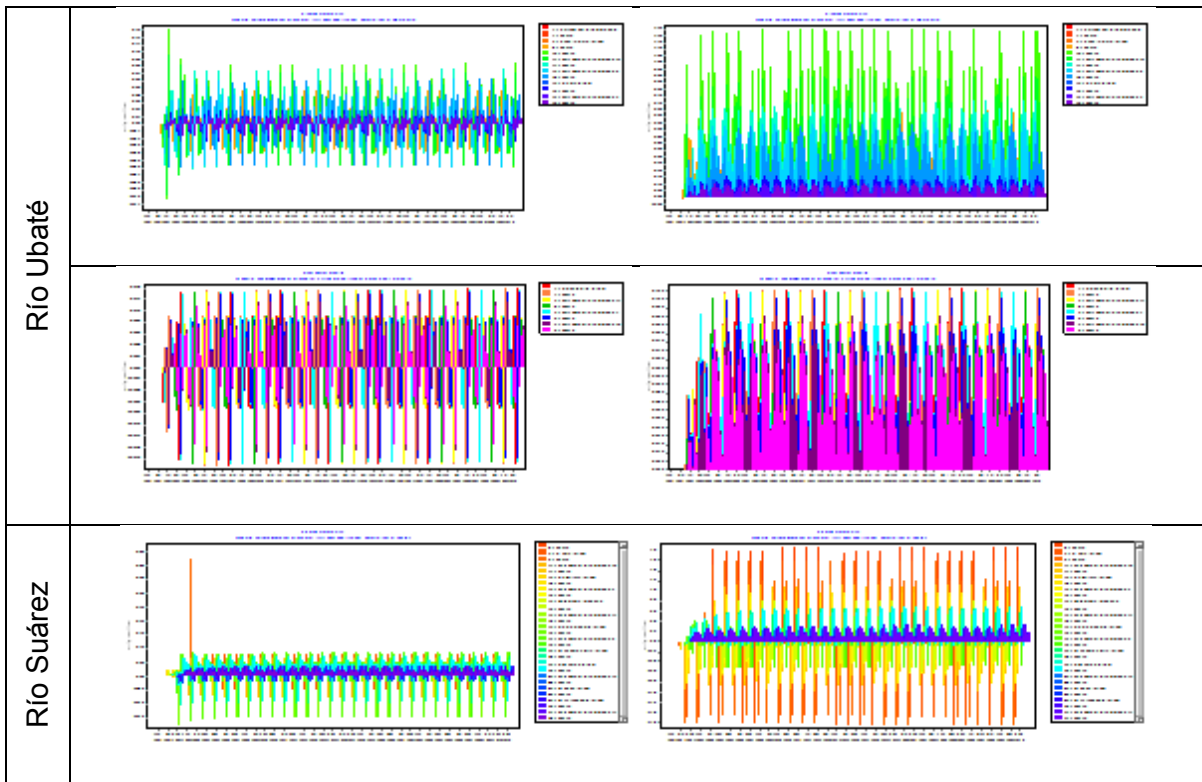


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-6. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2011 a 2040 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

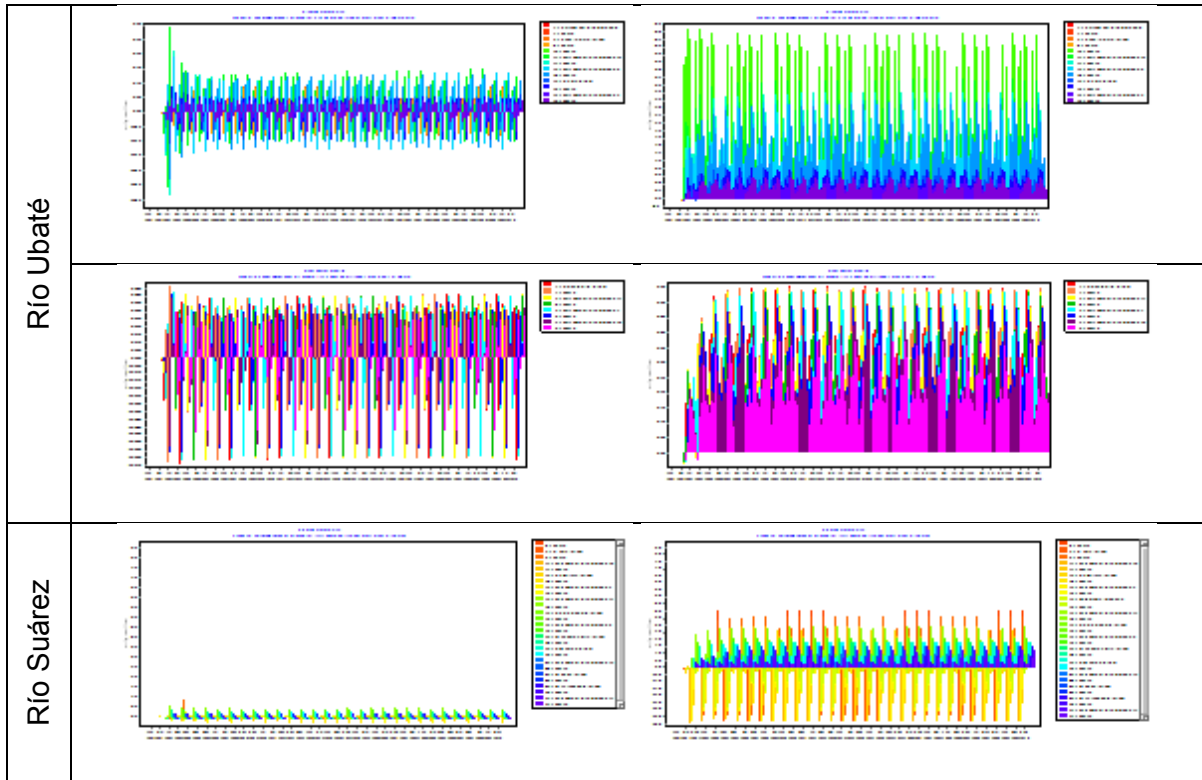




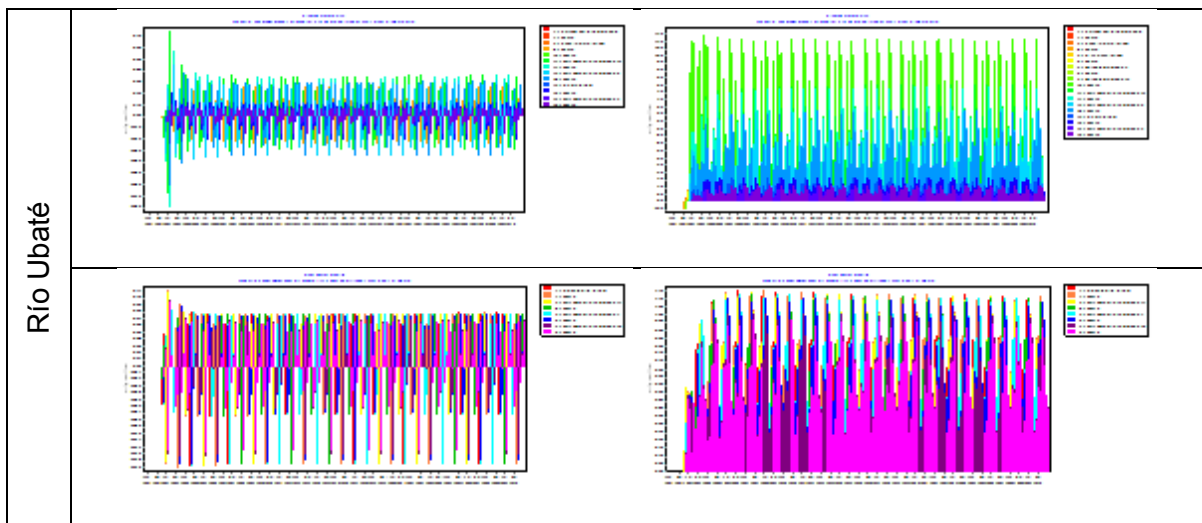
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-7. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



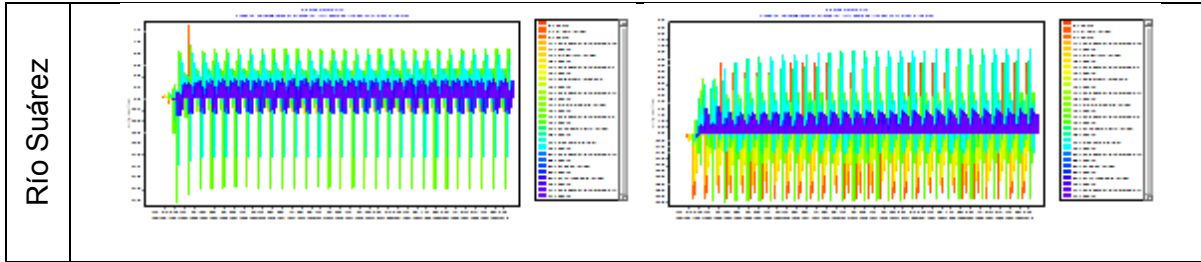
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-8. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



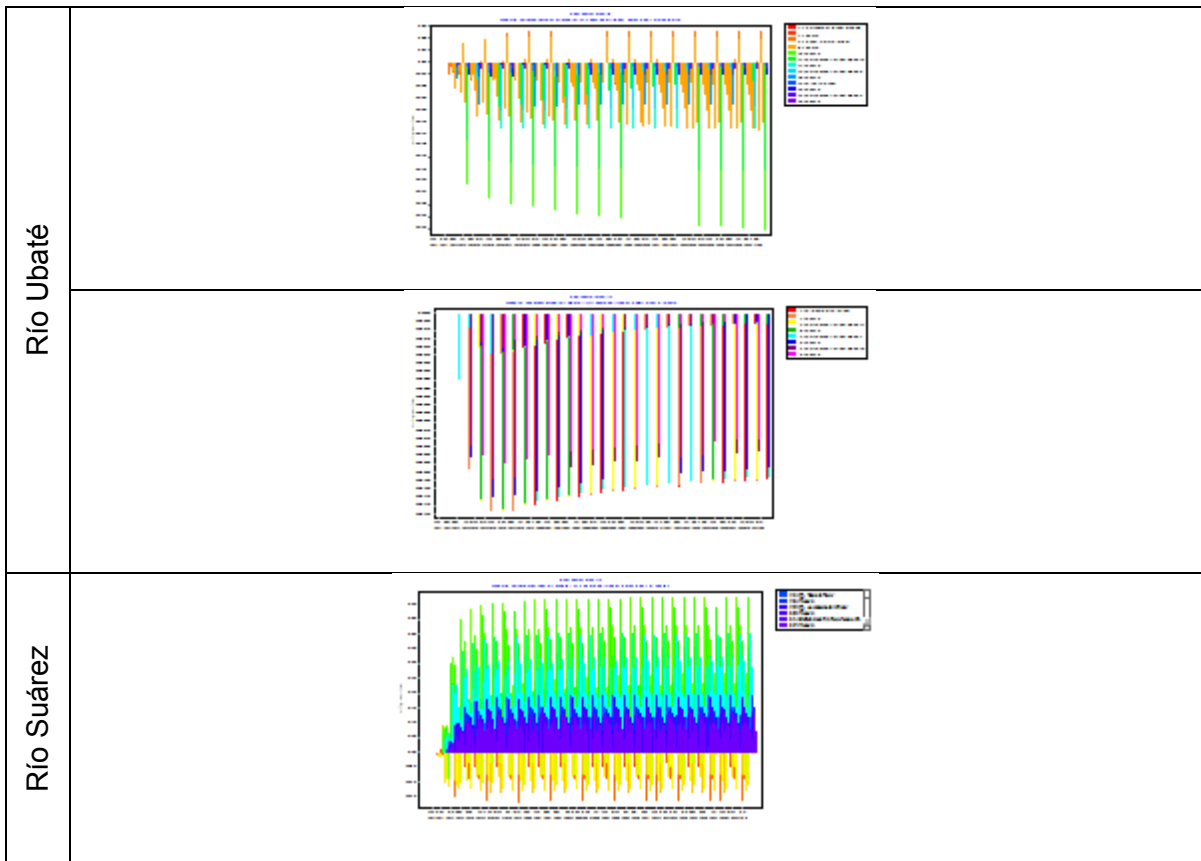
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-9. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2, B2 y A1B para el periodo de 2041 a 2070 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



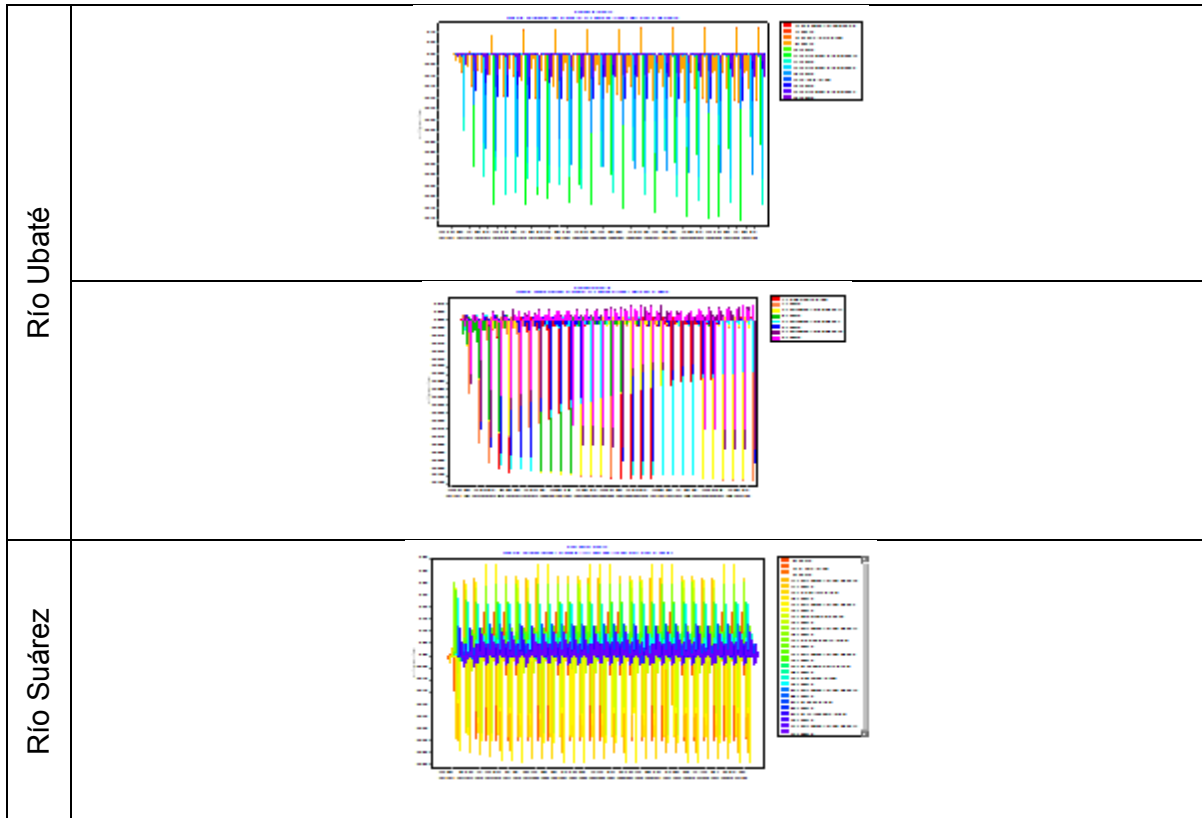




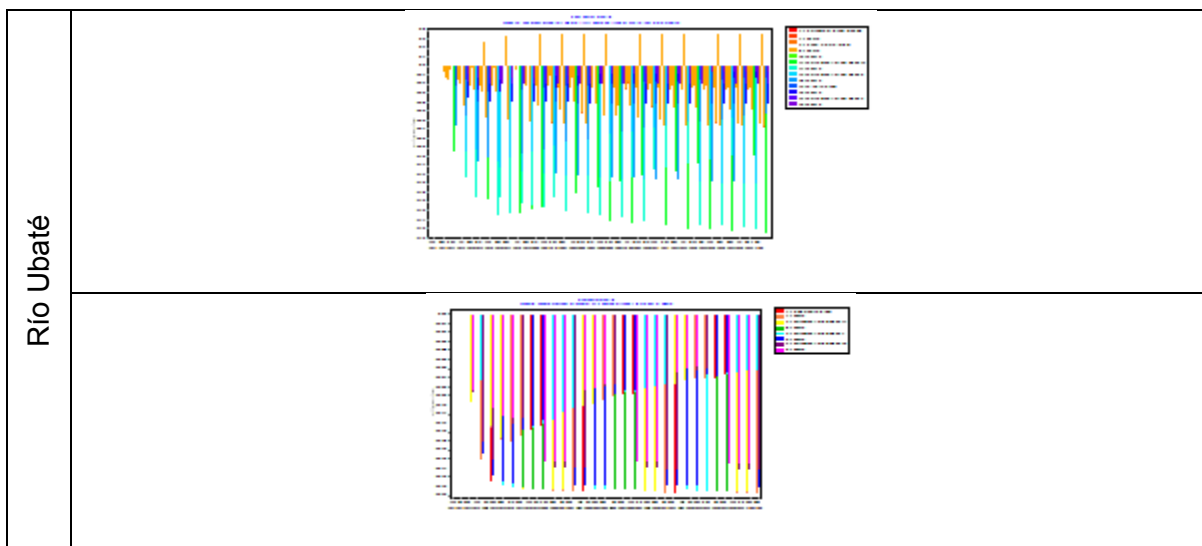
**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-10. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.

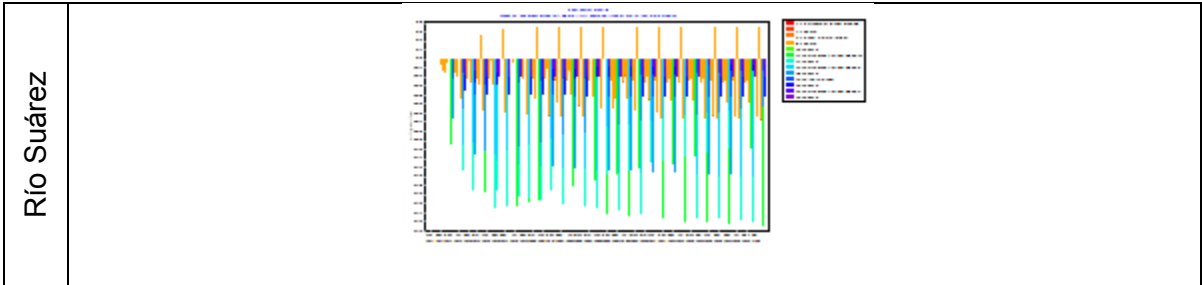


**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.-11. Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Oxígeno Disuelto (OD), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.



**Figura** ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento. **-12.** Comparación de resultados modelo de calidad del agua para Sólidos Suspendedos Totales (SST), en corrientes principales, bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 para el periodo de 2071 a 2100 de la cuenca Ubaté – Suárez, realizado con WEAP.







## Bibliografía

AETS (2007). *Proyecto de Transferencia de Tecnología sobre las Herramientas de Manejo de Cuencas Hidrográficas – Eje Agua Gestión Hidráulica de las Aguas Superficiales del Sistema Lacustre de Ubaté.*

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.*

UNIÓN TEMPORAL AUDICON - AMBIOTEC, LTDA. (2006). *Diagnóstico Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Ubaté y Suárez.* Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR.

BARUFFI, F. *et al.* (2012). *Climate Change Impact Assessment on Veneto and Friuli plain Groundwater Part I: An Integrated Modeling Approach for Hazard Scenario Construction.* J, Science of the Total Environment 440.

BLACKMAN, A. (2005). *Colombia's Discharge Fee Program: Incentives for Polluters or Regulators. Resources for the Future.*

CANDELA, L. *et al.* (2012). *Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain).* Science of Total Environment 440.

CAMACHO, L., DÍAS, M., LOMBANA, C. (2006). *Diseño y Desarrollo del Marco Jerárquico de Modelación de Flujo, Transporte de Solutos y Calidad del Agua para el Manejo Integral del Río Magdalena.* Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

CAMACHO, L., DÍAS, M. (2003). *Metodología para la Obtención de un Modelo Predictivo de Transporte de Solutos y de Calidad del Agua en Ríos – Caso Río Bogotá. Seminario Internacional: La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos - Universidad del Valle / Instituto Cinara.*

CAR (2006). *Diagnóstico Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Ubaté Suárez.*

CAR (2010). *Censo de Usuarios del Recurso Hídrico para las Corrientes Principales y Secundarias de las Cuencas y Subcuencas de la Jurisdicción CAR.*

CASTILLO, C., CEPEDA, E., DÍAZ, A., DOMINGUEZ, E., GARCÍA, P., GUERRERO, F., HASSIDOFF, A., SAAVEDRA, L., SEGURA, A. (2009). *Evaluación del Nivel de Aplicación de Protocolos de Modelación en Trabajos sobre Simulación del Proceso de Lluvia Escorrentía. Avances en Recursos Hídricos No. 19.*

CENTRO DE CAMBIO GLOBAL-UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.* Santiago, Boston.

CHAPRA, S. C., PELLETIER, G.J., TAO, H. (2012). *A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.12: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.*

CHAPRA, S.C. (1997). *Surface water quality modeling.* McGraw-Hill. New York. U.S.

CONPES – consejo Nacional de Política Económica y Social (2006). *Estrategia para el Manejo Ambiental de la Cuenca Ubaté – Suárez – Documento CONPES 3451.*

CONSORCIO CUENCAS (2006) *Modelación De La Calidad De Las Corrientes Hídricas Principales De Las Cuencas De Segundo Orden De La Jurisdicción De La CAR.*

DAWSON, C.W., ABRAHART, R.J., SEE, L.M., (2007). *HydroTest. A web-based toolbox of Evaluation Metrics for the Standardised Assessment of Hydrological Forecasts*. Environment Modelling & Software.

DOMÍNGUEZ, E., (2000). *Protocolo para la Modelación Matemática de Procesos Hidrológicos*. Meteorología Colombiana No. 2.

DOMÍNGUEZ, E. (2013). Notas de Clase. Modelación Matemática. Una Introducción al Método.<[www.mathmodelling.org](http://www.mathmodelling.org)>

FRANCO, L., DELGADO, J., ANDRADE, G., HERNÁNDEZ, S., VALDERRAMA, J. (2011). *Evaluación de la Vulnerabilidad y estrategias de Adaptación en un Complejo de Humedales de la Cordillera Oriental Colombiana: Lagunas Fúquene, Cucunubá y palacio*. Fundación de Humedales & Ecopetrol.

IDEAM (2010). *Estudio Nacional del Agua*.

JIMÉNEZ, R (2013). *Apuntes de clase: Contaminación Atmosférica – Crecimiento poblacional*. Universidad Nacional sede Bogotá.

LALLANA, V., LALLANA, M. (2004). *Crecimiento*. Oro Verde, Paraná

LOGREIRA, A. (2008) *Componente: Estructurar y consolidar metodologías técnicas en el ámbito biofísico para determinar y monitorear servicios ambientales relacionados con la regulación hídrica y calidad del agua; así como para establecer la relación existente entre esos servicios con el uso del suelo que los genera, mantiene o incrementa*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, y Patrimonio Natural – Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas.

MARQUEZ, A. (2013). *Evapotranspiración*. Grupo de Geología - ESCET - Univ. Rey Juan Carlos. Móstoles, Madrid.

<<http://www.escet.urjc.es/~amarquez/HIDRO/Tema%203%20Evapotranspiracion.pdf>>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (2009). *Resolución 2320 de 2009.*

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Sección I Título A. Aspectos Generales de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Básico.*

PABÓN C., J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.* Corporación Autónoma Regional CAR - Cundinamarca

POUGET L., et al., (2012). *Global Change adaptation in water resources management: The Water Change Project.* J. Science of the Total Environment 440.

OBREGÓN, N., et al. (2002) *Implementación del Modelo Thomas en la Cuenca Alta del Río Checua para la Estimación de la Recarga (Sabana de Bogotá, Cundinamarca)* XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Medellín.

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE (2009). *WEAP Water Evaluation and Planning System Tutorial: A Collection of Stand-alone Modules to Aid in Learning the WEAP software.*

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA (2010) *Actualización y Complementación de la Oferta Hídrica Superficial para Cuencas hasta Quinto Orden para la Jurisdicción de la CAR.*

MARTÍN, M., MARZAL, P. (2002) *Modelación Calidad del Agua.* Universidad Politécnica de Valencia. España.