

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 15 de diciembre de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Cesar Augusto Barreiro Otálora, con C.C. No. 7.686.531, autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado, Evaluación y tendencias de los efectos del cambio y la variabilidad climática en los recursos hídricos de la cuenca del Río Neiva, en el departamento del Huila, Colombia, presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de Magister en ecología y gestión de ecosistemas estratégicos.

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA					   	
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Evaluación y tendencias de los efectos del cambio y la variabilidad climática en los recursos hídricos de la cuenca del Río Neiva, en el departamento del Huila, Colombia.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
BARREIRO OTÁLORA	CESAR AUGUSTO

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
IZQUIERDO BAUTISTA	JAIME

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magister en ecología y gestión de ecosistemas estratégicos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Maestría en ecología y gestión de ecosistemas estratégicos

CIUDAD: NEIVA **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2017 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 96

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___
 Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___
 Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

	Español	Inglés		Español	Inglés
1	WEAP	WEAP	6	Estrategias de gestión	Management strategies
2	Recurso Hídrico	water resource	7		
3	Cambio y variabilidad climática	Changing and climate variability	8		
4	Cuenca del Río Neiva	Basin of the Neiva River Neiva	9		
5	Disponibilidad de agua	water availability	10		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La investigación se desarrolló en la cuenca hidrográfica del Río Neiva, en el departamento del Huila, con el objetivo fundamental de evaluar el impacto del cambio y la variabilidad climática sobre el recurso hídrico en el área de la cuenca y así conocer la disponibilidad del recurso y plantear criterios de gestión integral para un manejo adecuado por medio de



sistemas y herramientas computacionales que apoyan la toma de decisiones robustas, incorporando estrategias de gestión del recurso hídrico que contribuyen a la adaptación al cambio y variabilidad climática, incluyendo líneas de acción que pueden ser desarrolladas.

Se identificaron como incertidumbre, el clima con tres variaciones (clima histórico, clima mínimo, clima máximo) y el incremento poblacional con tres alternativas (bajo, medio y alto) y una sola estrategia (no hay estrategia) y con ello se realizó nueve corridas en WEAP con las cuales se consiguió como resultado que el mayor impacto al cambio y variabilidad climática se presenta en la incertidumbre del clima y la afectación que presenta la incertidumbre poblacional es mínima debido a la concentración poblacional en dos centros urbanos menores en un área grande que tiene la cuenca hidrográfica.

Por lo anterior se ha propuesto cinco estrategias de gestión del recurso hídrico y así contribuir a la preservación y conservación del recurso; dichas estrategias se han denominado bosques, suelos y sistemas productivos sostenibles, calidad y administración del agua, gestión del riesgo y educación, organización y articulación institucional para ser tenidas en cuenta, fortalecidas para su posterior desarrollo por los tomadores de decisiones robustas de la Cuenca del Río Neiva.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The research was developed in the basin area of the Neiva River, in the department of Huila with the objective of assessing the impact of climate change and variability on water resources in the area, aiming at knowing the availability of the resource and outlining an integral management criteria by means of an adequate management system and computational tools that supports important decision-making, integrating strategies of water resource management that contribute to the changing and adaptation to climate variability, including lines of action that can be developed.

Are identified as uncertainty, the weather with three variations (historical weather, minimum weather and maximum weather) and the population growing with three choices (low, medium and high) and a single strategy (there is no strategy) and with this nine runs in WEAP were made, they achieved as a result that the largest impact to weather variability and change occurs in the weather uncertainty and the affectation that presents the population uncertainty is minimal due to the concentration of the population in two smaller urban centers in a large area of the water basin.

For all of the above reasons five strategies for water resource management have been



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

proposed, this is done to Principio del formulario contribute to the preservation and conservation of the resource; these strategies have been called forests, soils and sustainable production systems, quality and water management, risk management and education, organization and institutional articulation to be taken into account, strengthened for further development by the important decision-makers of the basin of the Neiva River Neiva.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Mauricio Duarte Toro

Firma:

Nombre Jurado: Ofelia Angel

Firma:

EVALUACIÓN Y TENDENCIAS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO Y LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO NEIVA, EN EL
DEPARTAMENTO DEL HUILA, COLOMBIA

CESAR AUGUSTO BARREIRO OTÁLORA

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD D EINGENIERIA
MAESTRIA EN ECOLOGIA Y GESTION DE ECOSISTEMAS ESTRATEGICOS
NEIVA – HUILA
2017

EVALUACIÓN Y TENDENCIAS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO Y LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO NEIVA, EN EL
DEPARTAMENTO DEL HUILA, COLOMBIA

CESAR AUGUSTO BARREIRO OTÁLORA

Tesis de grado presentada a la
Facultad de Ingeniería como
requisito parcial para optar el
título de Magister en Ecología y
Gestión de Ecosistemas
Estratégicos

Director
JAIME IZQUIERDO BAUTISTA, IA, IC, M.Sc

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN ECOLOGIA Y GESTION DE ECOSISTEMAS ESTRATEGICOS
NEIVA – HUILA
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

IA, M.Sc. MAURICIO DUARTE TORO
JURADO

M.Sc OFELIA ANGEL OVIEDO
JURADO

IA, IC, MSc. JAIME IZQUIERDO BAUTISTA
Director

Neiva, septiembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

Expreso gratitud a

MSc. JAIME IZQUIERDO BAUTISTA, maestro de la Universidad Surcolombiana por su orientación y dedicación en el desarrollo de la investigación.

MSc. MAURICIO DUARTE TORO y MSc. OFELIA ANGEL, por sus aportes, revisión y sugerencias dadas gracias a su experiencia y formación académica de rigor científica.

Dr. DAVID PURKEY, MARISA ESCOBAR, FRANCISCO FLOREZ Y LUISA CUSGUEN, por su acompañamiento, asesoría en el modelamiento de los escenarios y resultados en WEAP, del STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE.

Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM por el apoyo en el suministro de la información.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico:

A Dios, por brindarme la salud y fortaleza necesaria para sobrellevar la adversidad e inspirar mi espíritu para la conclusión de esta tesis de Maestría en Gestión de Ecosistemas Estratégicos, a mis padres por brindarme todo el tiempo su apoyo y sabios consejos. A mi esposa Yaneth García Sánchez quien me brindo su amor, su cariño y su respaldo e impulso para continuar, cuando parecía que me iba a rendir. A mi hijo Santiago Barreiro García quien me prestó el tiempo que le pertenecía y me dio el último aliento para concluir con esta meta.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	133
SUMMARY	155
1. INTRODUCCION.....	17
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1 Objetivo General.....	200
1.3.2 Objetivos Específicos.	200
1.4 IMPORTANCIA Y APLICABILIDAD DE LOS RESULTADOS	211
2. ANTECEDENTES	222
2.1 PROYECTO WEAP INTERNACIONAL	222
2.2 WEAP EN COLOMBIA	22
3. REFERENTES TEORICOS	255
3.1 CAMBIO CLIMÁTICO	255
3.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA	266
3.3 LEGISLACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN COLOMBIA	27
3.4 MODELOS HIDROLOGICOS	28
3.4.1 Modelo WEAP	28
3.4.1.1 Aspectos principales de WEAP.....	311
3.4.1.2 WEAP opera en varias capacidades:.....	32
3.4.1.3 Enfoques del modelo	322
4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	344
4.1 ÁREA DE ESTUDIO	344
4.2 METODOLOGÍA.....	355
4.2.1 Definición del estudio.....	366
4.2.1.1 Hidrología	366
4.2.1.2 Topología de la red.....	377
4.2.2 Cuenta corrientes	37
4.2.2.1 Datos de Entrada	37
4.2.2.1.1 Clima.	37
4.2.2.1.2 Caudales de Aforo.	39
4.2.2.1.3 Cobertura Vegetal.....	39
4.2.2.1.4 Demandas.	400
4.2.3 Calibración del Modelo	411
4.2.4 Escenarios.....	422
4.2.4.1 Incertidumbres.....	433
4.2.4.1.1 Generalidades.	433
4.2.4.1.2 Descripción.....	433
4.2.4.1.2.1 Clima.	433

4.2.4.1.2.2 Población.....	455
4.2.4.1.3 Escenarios de cambio climático.....	455
4.2.4.2. Estrategias.....	477
4.2.4.2.1 Generalidades.....	47
4.2.4.2.2 Descripción.....	47
4.2.4.2.2.1 Base.....	47
4.2.4.3 Caracterización en WEAP de incertidumbres y estrategias	47
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1 OFERTA HIDRICA EN LA ESTACIÓN DE AFORO EL CASIL:	521
5.2 OFERTA HIDRICA EN LA ESTACIÓN DE AFORO PUENTE MULAS	56
5.3 OFERTA HIDRICA DE LAS MICROCUENCAS.....	622
5.4 OFERTA HÍDRICA EN LA CABECERAS DE LAS MICROCUENCAS.....	67
5.5 DEMANDAS URBANAS Y RURALES	722
5.6 SATISFACCIÓN DE LA COBERTURA DE LAS DEMANDAS URBANAS Y RURALES	76
5.7 CURVA DE GASTOS DE LA ESTACIÓN DE AFORO EL CASIL	811
5.8 CURVA DE GASTOS EN LA ESTACIÓN DE AFORO PUENTE MULAS	855
6. PROPUESTA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO NEIVA	911
7. CONCLUSIONES.....	933
BIBLIOGRAFÍA	955

LISTAS DE TABLAS

TABLA 1. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE IDEAM CONSIDERADAS EN LA CUECA DE RIO NEIVA	38
TABLA 2. ESTACIONES DE VELOCIDAD DEL VIENTO Y HUMEDAD RELATIVA DE IDEAM CONSIDERADAS EN LA CUECA DE RIO NEIVA	39
TABLA 3. ESTACIONES DE AFORO DE IDEAM.....	39
TABLA 4. TIPO DE COBERTURA Y CULTIVOS EN EL ÁREA DE LA CUENCA RIO NEIVA	40
TABLA 5. DEMANDA URBANA PARA LA CUENCA RIO NEIVA	40
TABLA 6. DEMANDA TOTAL PROYECTADA POR SECTORES SOCIECONOMICOS.....	41
TABLA 7. LISTA DE ESCENARIOS DE INCERTIDUMBRE SELECCIONADOS PARA MODELAR EN WEAP.	43
TABLA 8. LISTA DE MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL EVALUADOS PARA ADOPTAR ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO NEIVA. ..	45
TABLA 9. LISTA DE ESCENARIOS DE ESTRATEGIAS SELECCIONADOS PARA MODELAR EN WEAP.	47
TABLA 10. LISTA DE INCERTIDUMBRES Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN CARACTERIZADAS EN WEAP.....	48
TABLA 11. PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN EN WEAP	50
TABLA 12. CAUDAL PROMEDIO DE LAS ESTACIONES DE AFORO DE IDEAM.....	50
TABLA 13. LISTA DE FAVORITOS EN WEAP.....	51

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Escenarios de Cambio Climático 2011 – 2100. Tercera Comunicación de Cambio Climático IDEAM (2015).....	18
Figura 2. Esquema modelo hidrológico integrado en WEAP.	29
Figura 3. Esquema del desarrollo del modelo WEAP en la Cuenca del Río Neiva.	36
Figura 4. Humedad Relativa y Velocidad del Viento empleada en el modelo Río Neiva.	38
Figura 5. Modelo hidrológico y de gestión del agua para la Cuenca del Río Neiva.....	49
Figura 6. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la Cuenca del Río Neiva.	51

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Localización de la cuenca del Río Neiva. Fuente SIG CAM.	20
Mapa 2. Localización geográfica dela subzona geográfica 2110. Río Neiva. Fuente SIG-CAM	34

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Demanda proyectada por sectores socioeconómicos.....	41
Grafica 2. Escenarios Climáticos futuros	44
Gráfica 3. Clima histórico con un incremento en la población bajo	52
Gráfica 4. Clima histórico con un incremento en la población medio	52
Gráfica 5. Clima histórico con un incremento en la población alto	53
Gráfica 6. Clima mínimo con un incremento en la población bajo.....	53
Gráfica 7. Clima mínimo con un incremento en la población medio	54
Gráfica 8. Clima mínimo con un incremento en la población alto	54
Gráfica 9. Clima máximo con un incremento en la población bajo	55
Gráfica 10. Clima máximo con un incremento en la población medio	55
Gráfica 11. Clima máximo con un incremento en la población alto	56
Gráfica 12. Clima histórico con un incremento en la población bajo	57
Gráfica 13. Clima histórico con un incremento en la población medio	57
Gráfica 14. Clima histórico con un incremento en la población alto	58
Gráfica 15. Clima mínimo con un incremento en la población bajo.....	58
Gráfica 16. Clima mínimo con un incremento en la población medio	59
Gráfica 17. Clima mínimo con un incremento en la población alto	59
Gráfica 18. Clima máximo con un incremento en la población bajo	60
Gráfica 19. Clima máximo con un incremento en la población medio	60
Gráfica 20. Clima máximo con un incremento en la población alto	61
Gráfica 21. Clima histórico con un incremento en la población bajo	62
Gráfica 22. Clima histórico con un incremento en la población medio	62
Gráfica 23. Clima histórico con un incremento en la población alto	63
Gráfica 24. Clima mínimo con un incremento en la población bajo.....	63
Gráfica 25. Clima mínimo con un incremento en la población medio	64
Gráfica 26. Clima mínimo con un incremento en la población alto	64
Gráfica 27. Clima máximo con un incremento en la población bajo	65
Gráfica 28. Clima máximo con un incremento en la población medio	65
Gráfica 29. Clima máximo con un incremento en la población alto	66
Gráfica 30. Clima histórico con un incremento en la población bajo	67
Gráfica 31. Clima histórico con un incremento en la población medio	67
Gráfica 32. Clima histórico con un incremento en la población alto	68
Gráfica 33. Clima mínimo con un incremento en la población bajo.....	68
Gráfica 34. Clima mínimo con un incremento en la población medio	69
Gráfica 35. Clima mínimo con un incremento en la población alto	69
Gráfica 36. Clima máximo con un incremento en la población bajo	70
Gráfica 37. Clima máximo con un incremento en la población medio	70
Gráfica 38. Clima máximo con un incremento en la población alto	71

Gráfica 39. Clima histórico con un incremento en la población bajo	72
Gráfica 40. Clima histórico con un incremento en la población medio	72
Gráfica 41. Clima histórico con un incremento en la población alto	73
Gráfica 42. Clima mínimo con un incremento en la población bajo	73
Gráfica 43. Clima mínimo con un incremento en la población medio	74
Gráfica 44. Clima mínimo con un incremento en la población alto	74
Gráfica 45. Clima máximo con un incremento en la población bajo	75
Gráfica 46. Clima máximo con un incremento en la población medio	75
Gráfica 47. Clima máximo con un incremento en la población alto	76
Gráfica 48. Clima histórico con un incremento en la población bajo	76
Gráfica 49. Clima histórico con un incremento en la población medio	77
Gráfica 50. Clima histórico con un incremento en la población alto	77
Gráfica 51. Clima mínimo con un incremento en la población bajo	78
Gráfica 52. Clima mínimo con un incremento en la población medio	78
Gráfica 53. Clima mínimo con un incremento en la población alto	79
Gráfica 54. Clima máximo con un incremento en la población bajo	79
Gráfica 55. Clima máximo con un incremento en la población medio	80
Gráfica 56. Clima máximo con un incremento en la población alto	80
Gráfica 57. Clima histórico con un incremento en la población bajo	81
Gráfica 58. Clima histórico con un incremento en la población medio	81
Gráfica 59. Clima histórico con un incremento en la población alto	82
Gráfica 60. Clima mínimo con un incremento en la población bajo	82
Gráfica 61. Clima mínimo con un incremento en la población medio	83
Gráfica 62. Clima mínimo con un incremento en la población alto	83
Gráfica 63. Clima máximo con un incremento en la población bajo	84
Gráfica 64. Clima máximo con un incremento en la población medio	84
Gráfica 65. Clima máximo con un incremento en la población alto	85
Gráfica 66. Clima histórico con un incremento en la población bajo	85
Gráfica 67. Clima histórico con un incremento en la población medio	86
Gráfica 68. Clima histórico con un incremento en la población alto	86
Gráfica 69. Clima mínimo con un incremento en la población bajo	87
Gráfica 70. Clima mínimo con un incremento en la población medio	87
Gráfica 71. Clima mínimo con un incremento en la población alto	88
Gráfica 72. Clima máximo con un incremento en la población bajo	88
Gráfica 73. Clima máximo con un incremento en la población medio	89
Gráfica 74. Clima máximo con un incremento en la población alto	89

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la cuenca hidrográfica del Río Neiva, en el departamento del Huila, con el objetivo fundamental de evaluar el impacto del cambio y la variabilidad climática sobre el recurso hídrico en el área de la cuenca y así conocer la disponibilidad del recurso y plantear criterios de gestión integral para un manejo adecuado por medio de sistemas y herramientas computacionales que apoyan la toma de decisiones robustas, incorporando estrategias de gestión del recurso hídrico que contribuyen a la adaptación al cambio y variabilidad climática, incluyendo líneas de acción que pueden ser desarrolladas.

La metodología consistió en comprender la problemática asociada al manejo del recurso hídrico en la cuenca, en donde se identificaron las incertidumbres y estrategias de adaptación que fueron analizadas con la herramienta de planificación del recurso hídrico WEAP - Water Evaluation And Planning, en un taller realizado por La CAM para la Modelación de todo el departamento del Huila y en cual se realizó un close up a la Cuenca del Río Neiva. Para el desarrollo de la modelación se sigue 4 fases; la primera fase es la definición del estudio, en donde el área de estudio y el sistema de los componentes espaciales de la zona de interés se definen y el horizonte de tiempo del análisis se establece. La segunda fase es la definición de las “cuentas corrientes (current accounts)”, que es una representación de la línea base del sistema - incluyendo las reglas de operación vigentes para ambas ofertas y demandas. Otra forma de interpretar las “cuentas corrientes” es la representación espacial y temporal del sistema como una fotografía, la cual es implementada en el modelo WEAP. La Tercera fase se centra en la comparación de los resultados del modelo con los datos históricos que representan las medidas claves de rendimiento del sistema. La cuarta fase toma como punto de partida las cuentas corrientes para el desarrollo de escenarios, que caracterizan conjuntos alternativos de supuestos futuros en relación a las políticas, los costos y los factores que afectan la demanda, cargas de contaminantes y suministros.

En dicho taller se identificaron como incertidumbre, el clima con tres variaciones (clima histórico, clima mínimo, clima máximo) y el incremento poblacional con tres alternativas (bajo, medio y alto) y una sola estrategia (no hay estrategia) y con ello se realizó nueve corridas en WEAP con las cuales se consiguió como resultado que el mayor impacto al cambio y variabilidad climática se presenta en la incertidumbre del clima y la afectación que presenta la incertidumbre poblacional es mínima debido a la concentración poblacional en dos centros urbanos menores en un área grande que tiene la cuenca hidrográfica. La oferta hídrica es afectada directamente por el clima, no más con el clima histórico la disponibilidad

del recurso hídrico para el año 2050 se ve disminuida para la estación de aforo El Casil a 2,5 m³/seg y en la estación de aforo Puente Mulas a 5,1m³/seg.

Por lo anterior se ha propuesto cinco estrategias de gestión del recurso hídrico y así contribuir a la preservación y conservación del recurso; dichas estrategias se han denominado bosques, suelos y sistemas productivos sostenibles, calidad y administración del agua, gestión del riesgo y educación, organización y articulación institucional para ser tenidas en cuenta, fortalecidas para su posterior desarrollo por los tomadores de decisiones robustas de la Cuenca del Río Neiva.

Palabras Claves: WEAP, Recurso Hídrico, Cambio y Variabilidad Climática, Cuenca del Río Neiva, Disponibilidad de Agua, Estrategias de Gestión.

SUMMARY

The research was developed in the basin area of the Neiva River, in the department of Huila with the objective of assessing the impact of climate change and variability on water resources in the area, aiming at knowing the availability of the resource and outlining an integral management criteria by means of an adequate management system and computational tools that supports important decision-making, integrating strategies of water resource management that contribute to the changing and adaptation to climate variability, including lines of action that can be developed.

The methodology consisted in understanding the problems associated to the water resource management in the river basin, these problems, were identified the uncertainties and adaptation strategies that were analyzed with the tool for water resource planning WEAP – Water and Evaluation Planning, in a workshop held by the CAM for the modeling of all the department of Huila and in which a close up to the basin of the Neiva River. For the modeling development 4 stages are followed; the first stage is the study definition, where study area and the system of the special components of the interest zone are defined and the time horizon of the analysis is established. The second stage is the definition of the "current accounts ", which is a representation of the base line of the system - including the rules of operation for both offers and demands. Another way of interpreting the "current accounts" is the space and time of the system as a photograph, which is implemented in the WEAP model. The third stage is focused on the comparison of the model results with the historical data that represent the key measurement of the system performance. The fourth stage takes as its starting point the current accounts for the development of the settings that characterize alternative sets of future assumptions in relation to the policies, costs, and the factors that affect the demand, pollutant loads and supplies.

In the previously mentioned workshop are identified as uncertainty, the weather with three variations (historical weather, minimum weather and maximum weather) and the population growing with three choices (low, medium and high) and a single strategy (there is no strategy) and with this nine runs in WEAP were made, they achieved as a result that the largest impact to weather variability and change occurs in the weather uncertainty and the affectation that presents the population uncertainty is minimal due to the concentration of the population in two smaller urban centers in a large area of the water basin. The water supply is directly affected by the weather, no longer with the historical weather the availability of the water supply for the year 2050 is diminished for the reserve station El Casil to 2,5 m3/sec and in the reserve station Puente Mulas to 5,1m3/Sec.

For all of the above reasons five strategies for water resource management have been proposed, this is done to Principio del formulario contribute to the preservation and conservation of the resource; these strategies have been called forests, soils and sustainable production systems, quality and water management, risk management and education, organization and institutional articulation to be taken into account, strengthened for further development by the important decision-makers of the basin of the Neiva River Neiva.

Key Words: WEAP, Water Resource, Climate Change and Variability, Neiva River Basin, Water Availability, Management Strategies.

1. INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En el departamento del Huila se tiene como base de estudios hidricos el POMAM, Plan de Ordenamiento y Manejo de la Zona Norte, Estudio Plan de Ordenamiento y Manejo de las cuencas de los ríos Pata y Cabrera, que fueron utilizados en el diagnóstico del recurso hídrico del departamento en el Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR 2011 – 2023), a partir del Plan Nacional de Desarrollo – PND, se reconoce al agua como el factor esencial de la biodiversidad y los ecosistemas, es una determinante para los sistemas productivos agropecuarios, energeticos, mineros y la calidad de vida de los habitantes. Las diferentes demandas de agua deben ser analizadas y estudiadas a fin de prever un sobreuso, considerando ademas, los posibles impactos de cambio climático sobre este recurso esencial.

A nivel Nacional, se tienen diversas instituciones, planes y programas de planificación que intervienen en la gestión del agua, como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y el Plan Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico - PNGIRH hasta el orden regional con los planes operativos de las Corporaciones Autónomas Regionales -CARs.

Las CARs, son las encargadas de administrar el medio ambiente y los recursos naturales renovables dentro del área de su jurisdicción y velar por el desarrollo sostenible; por tal razón, las CARs cuentan con instrumentos de planificación como el Plan de Gestión Ambiental Regional - PGAR, el Plan de Acción Institucional – PAI, los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA, los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico – PORH, el Plan General de Ordenación Forestal – PGOF, los Planes de Manejo – PM de los ecosistemas estratégicos de su jurisdicción y el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS.

Una de las limitantes para la gestión integral del recurso hídrico en las regiones es el vacío en el conocimiento del recurso en mención en terminos de oferta, demanda, calidad, riesgos y la reducida información respecto a la gobernabilidad, planeación, administración, seguimiento, monitoreo y normatividad que apoye la toma de decisiones.

1.2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El término de cambio climático es utilizado para referirse a las alteraciones en el medio ambiente producto de la acción humana, y ocasionado por el incremento en las emisiones de los gases de efecto invernadero. El estudio “III Comunicación Nacional de Cambio Climático” realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2015)¹, pronostica para la temperatura lo siguiente: **“Para el fin de siglo, el Departamento en promedio podrá presentar elevaciones de temperatura promedio de 2,1°C según el modelo multiescenario. En particular los Valles de Neiva, Aipe y Villavieja podrán ser los de mayor aumento con valores de hasta 2,5 °C”** y para la precipitación: **“En general para fin de siglo el Huila podrá incrementar el promedio de las precipitaciones anuales en un 17,2% según el modelos multiescenario. Particularmente los municipios de Aipe y Villavieja podrán incrementar entre 30% y 40% el valor de precipitación respecto al actual”**. Como se muestra en la Figura 1.

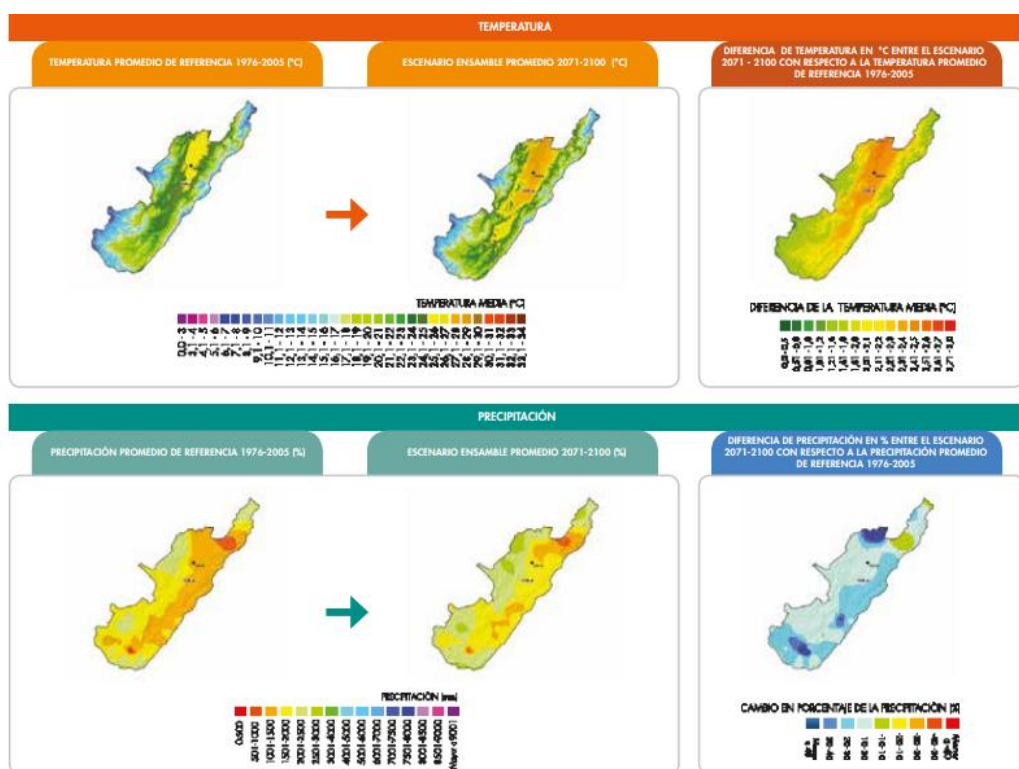


Figura 1: Escenarios de Cambio Climático 2011 – 2100. Tercera Comunicación de Cambio Climático IDEAM (2015).

En cuencas hidrológicas bajo el efecto del cambio climático, las actividades agropecuarias y el agua para el consumo humano son entre otras actividades, las que mayormente se ven afectadas por la disposición de los recursos hídricos. Estas actividades son consideradas

¹ IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. 2015. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

como factores de gran importancia para el desarrollo de una región y es ahí en donde radica la relevancia de estudiar los posibles efectos que puede tener el cambio climático en una cuenca hidrológica.

La cuenca del Río Neiva tiene una extensión de 107.331 ha. Su nacimiento se localiza en el municipio de Algeciras, en las estribaciones de la cordillera oriental, en la región de la Siberia, aproximadamente a 3.100 msnm y su desembocadura es en el Río Magdalena a 460 msnm (Mapa 1). En ella se encuentran las bocatomas de los acueductos municipales de Algeciras y Campoalegre que abastecen de agua potable a 15.208 habitantes y 25.485 habitantes respectivamente.

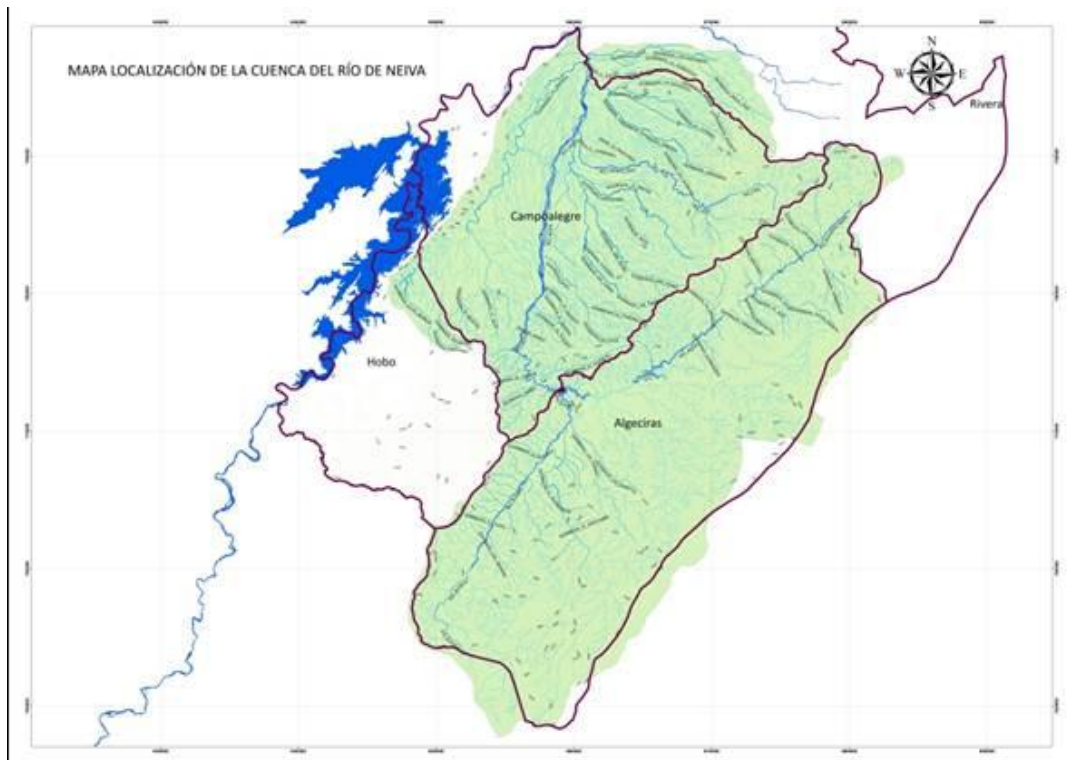
La parte alta de la cuenca hace parte del Parque Natural Regional La Siberia. De igual forma, se tiene que los municipios de la zona con el fin de proteger los recursos hídricos y la biodiversidad, crearon los parques municipales de La Perdiz en el municipio de Algeciras a través del Acuerdo No 029 del 30 de noviembre de 2005 y el Parque Natural Municipal de Campoalegre según el Acuerdo No 037 del 27 de noviembre de 2008.

Un factor que reviste gran importancia es la presión que ejerce los productores agropecuarios en la captación de agua para riego de cultivos y potreros en la parte baja de la cuenca del Río Neiva. Su corriente principal recorre los municipios de Algeciras, Campoalegre y Rivera (Mapa 1).

Está corriente reglamentó sus usos y aprovechamiento a través de la Resolución 3660 del 27 de Diciembre de 2007 de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena -CAM. Para el Río Neiva se adoptó: Una demanda de 13.216 m³/seg; para una oferta de 8.845 m³/seg, correspondiente al caudal mínimo de los caudales medios– 1967-2003 (Fuente IDEAM – Estación Puente Mulas). Determinando: Caudal Ecológico (mantenimiento y conservación del cauce) de 0,4 m³/seg, Caudal Remanente de 0,82 m³/seg para atender eventualmente usuarios que no quedaron incluidos en la reglamentación (demandas imprevistas en este proyecto), y Caudal Distribuido 8.362 m³/seg.

Con lo anterior es posible orientar el proceso investigativo a través de los siguientes interrogantes:

- ✓ Si la cuenca Río Neiva mantiene las condiciones actuales ¿Cuál será el escenario de su recurso hídrico para el año 2050?
- ✓ ¿Cuáles serán los daños potenciales, al no evaluar las tendencias de los efectos del cambio y la variabilidad climática en los recursos hídricos de la cuenca del Río Neiva?
- ✓ ¿En qué medida el análisis de modelos hidrológicos de lluvia-escurrentía pueden representar en el tiempo el cambio y la variabilidad climática en la cuenca del Río Neiva?
- ✓ ¿Qué escenario de planificación y gestión integral del recurso hídrico se construye para la adaptación al cambio y variabilidad climática en la cuenca del Río Neiva usando como soporte de decisiones el Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP)?



Mapa 1: Localización de la cuenca del Río Neiva. Fuente SIG CAM.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo General.

- Modelar el impacto del cambio y la variabilidad climática sobre el recurso hídrico en la cuenca del Río Neiva con el fin de conocer la disponibilidad del recurso y plantear criterios de gestión integral para un manejo adecuado.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Proponer un modelo de gestión integral de recursos hídricos para la cuenca del Río Neiva usando la plataforma de modelación WEAP, con el fin de evaluar y dimensionar las tendencias de los efectos del cambio y la variabilidad climática en la disponibilidad de los recursos hídricos de la región.
- Identificar las posibles tendencias de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Neiva del Departamento del Huila con proyección al año 2050, con el fin de dimensionar sus estrategias de planificación y gestión integral.
- Plantear criterios de gestión integral de los recursos hídricos para su adecuado manejo en la cuenca del Río Neiva.

1.4 IMPORTANCIA Y APLICABILIDAD DE LOS RESULTADOS

El agua es determinante en la calidad de vida de los habitantes, del sector agropecuario, energético, minero e industrial, debido a que todos dependen de un suministro permanente en cantidad y calidad. Por consiguiente, dicho recurso es reconocido como factor esencial en la sostenibilidad de la biodiversidad y los ecosistemas.

Uno de los principales inconvenientes en las regiones para desarrollar e implementar la Gestión Integral del Recurso Hídrico, es el insuficiente conocimiento del recurso hídrico en términos de oferta, demanda, calidad, riesgos y la reducida información respecto a la gobernabilidad, normatividad, planeación, administración, seguimiento y monitoreo que apoye la toma de decisiones.

WEAP, es una herramienta que permite evaluar una subzona hidrográfica o una pequeña cuenca a través de unidades de análisis hídrico espacial y temporal; representando las condiciones actuales del agua y al mismo tiempo explora una amplia gama de opciones de suministro y demandas en distintos escenarios, incluyendo el cambio climático. Es así, como la sólida base de datos numéricos y gráficos de WEAP y la aplicación del marco XLRM han permitido conocer el comportamiento espacial, temporal y el estado del agua en términos de oferta, disponibilidad y demandas, considerando además las incertidumbres asociadas a la variabilidad climática y la dinámica poblacional. Con estos insumos se delinearon los posibles escenarios futuros que se constituyen en un soporte fundamental en el proceso de planificación y apoyo a las decisiones robustas y por consiguiente a la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

En ese contexto, la información generada en el proceso de apoyo a las decisiones robustas consolida y fortalece los instrumentos de planificación, facilita la toma de decisiones más coherentes y pertinentes en el orden local, regional y nacional, afianzando de esta manera la planificación integral de acciones y estrategias de adaptación al cambio climático.

2. ANTECEDENTES

2.1 PROYECTO WEAP INTERNACIONAL

En el año 2006², el estudiante, Constance L Danner desarrolló y presentó a la Univeridad de Texas at Austin, un proyecto llamado “Documentación y pruebas de Modelo WEAP para la Cuenca del Río Grande/ Bravo” con el fin de obtener el título de Magister en ciencias e ingeniería.

El Proyecto de Evaluación Física promueve la cooperación regional entre los EE.UU. y México para trabajar en pro de la gestión más eficaz del Río Grande / Bravo. Este informe corresponde a la documentación y prueba de la cuenca modelo construido con software WEAP. La documentación del modelo aborda todos los insumos para la demanda y la oferta para el río.

Los suministros en el modelo incluyen las entradas tributarias, así como depósito y almacenamiento de aguas subterráneas. Este informe es el primero de muchas fases de prueba. Los dos elementos que fueron evaluados aquí, comparándolos con los registros históricos fueron los volúmenes de almacenamiento de depósito y el caudal de seis medidores CILA. Esta prueba demostró que el modelo tiene la lógica derecha y patrón de flujo sin embargo necesitan ajustes que deben introducirse en los comunicados de depósito con el fin de representar completamente el sistema existente.

2.2 WEAP EN COLOMBIA

En el año 2009³, los investigadores J.E. Ospina-Norela, Carlos Gay García, Ana Cecilia Conde Álvarez, G. Sánchez-Torres Esqueda presentaron en la revista Atmosfera los resultados del proyecto *Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú-Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios*, en el cual se analiza la relación de oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú-Caribe, Colombia, teniendo en cuenta los valores actuales y proyectados a los años 2015 y 2025 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

² Constance L Danner. (2006). Documentación y pruebas de Modelo WEAP para la Cuenca del Río Grande/ Bravo. Univeridad de Texas at Austin.

³ J.E. Ospina-Norela, Carlos Gay García, Ana Cecilia Conde Álvarez, G. Sánchez-Torres Esqueda (2009). Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú-Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios. Revista Atmósfera vol.22 no.4 México oct. 2009.

Se incluyeron los posibles cambios que puede experimentar dicha relación, debidos al cambio climático estimado por algunos modelos de circulación general, bajo escenarios A2 de emisiones de gases de efecto de invernadero. Se aplicó el Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés), para analizar y simular sistemas del agua y orientar políticas de manejo, con lo que se buscó brindar herramientas, criterios y elementos de juicio que permitieran elaborar estrategias adaptativas ante condiciones adversas.

Por otro lado, el Stockholm Environment Institute (SEI) ha desarrollado y propuesto el uso de la herramienta computacional WEAP para representar las condiciones actuales del agua en una cuenca de estudio y al mismo tiempo explorar una amplia gama de opciones de suministros, demanda y calidad en los diferentes escenarios, incluyendo el cambio climático. Es así que en acuerdo cooperativo con U.S. Agency for International Development (USAID) con un grupo de colaboradores conformado por el Grupo de Investigación en Ecología, Ingeniería y Sociedad (EIS); el grupo de investigación Desarrollo y Estudio del Recurso Hídrico y Ambiente (CIDERA); el Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (CINARA); la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP); La Universidad del Quindío (UQ); la Universidad del Valle (UniValle); y el Grupo de Investigación de Aguas y Aguas de Pereira desde junio de 2012 a junio de 2015 desarrollaron el proyecto “Ríos del Páramo al Valle, por Urbes y Campiñas” en el cual se adelantó la modelación de las Cuencas de los Ríos Otún y La Vieja, las fuentes de abastecimiento más importantes de las ciudades y poblados de los departamentos de Risaralda y Armenia.

Por ser el ecosistema de páramo un regulador de la frecuencia y cantidad de agua para los ríos; en la Cuenca del Río Otún se modeló los efectos del cambio climático de dicho ecosistema, localizado entre los 3.000 y 5.000 m.s.n.m., y con una superficie aproximada de 10.120 hectáreas. De igual forma se cuantificó la oferta hídrica del área entre la zona alta (4.500 m.s.n.m.) y el punto de captación de la Empresa de Energía de Pereira ($5\text{m}^3/\text{s}$) situado a (1.500 m.s.n.m.), y la demanda mensual de agua para consumo humano de los municipios de Pereira y Dos Quebradas ($2,35\text{ m}^3/\text{s}$), además del caudal ambiental necesario después de la captación ($3\text{m}^3/\text{s}$). El total de las demandas ($10,35\text{ m}^3/\text{s}$) constituye el caudal mínimo que debe ofertar la cuenca en el punto de captación para así no afectar al ecosistema acuático ni a los usuarios.

Con los actores de la Cuenca se adelantó el proceso de análisis participativo a través del taller XLRM (X significa incertidumbres externas, L estrategias de gestión, R relaciones y M medidas).

Para la calibración del modelo del comportamiento hidrológico, se modificó la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces y el factor de resistencia a la escorrentía, entre otros parámetros, obteniéndose un modelo calibrado.

No obstante, se continua estudiando el impacto del cambio climático con un enfoque prospectivo, se analiza la relación oferta-demanda en la cuenca, integrando las estrategias de gestión definidas por los actores institucionales e incluyendo las automatizaciones de la modelación y la visualización de los resultados. De esta manera se identifican las

estrategías de adaptación que proporcionen mayor resiliencia a la gestión del agua y a la sociedad en conjunto.

En la Cuenca del Río La Vieja el proyecto se centra en la calidad del agua en donde se identificaron las principales fuentes de carga contaminantes a través de la integración de dos herramientas (WEAP y QUAL 2K) y del análisis participativo XLRM, en donde se estudiaron 12 fuentes hídricas tributarias al cauce principal que recorre los departamentos del Quindío en un 68%, Valle del Cauca en un 22% y Risaralda en un 10%; asentándose 21 municipios en una superficie de 2.880 Km² y por lo cual se tienen varias autoridades ambientales: CARDER, CVC, CRQ y Parques Nacionales Naturales.

Dichas autoridades ambientales desarrollaron la metodología a seguir en el año 2012 y la evaluación de la calidad del agua se realizó con la integración de las herramientas (WEAP y QUAL 2K) habilitando el desarrollo de un análisis dendrítico en las 12 fuentes hídricas tributarias al cauce principal de la cuenca. Así, se identificaron los aportes de carga contaminante que corresponden a fuentes puntuales de vertimientos, en función de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que equivalen a 15 ton/día; de las cuales el 55 % proviene del sector doméstico, 30% del sector industrial y 15% del sector agropecuario (Cafero y Porcícola).

3. REFERENTES TEORICOS

3.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Con el pasar de los años, la humanidad se ha concentrado en inventar multiples formas de vivir en el planeta Tierra, para ello han creado e inventado objetos, artefactos, edificaciones y vías que dan la sensación de bienestar y confort. Sin embargo, ante esta realidad de inventos y desarrollo tecnológico ha sido la naturaleza quien ha tenido que sufrir las consecuencias negativas. Nuestro ritmo de vida ha venido generando un cambio en el clima, cuyas consecuencias no alcanzamos a comprender en su totalidad.

Con el crecimiento de la población mundial se incrementó el consumo individual y dio origen a una red de oferta y demanda que cada vez se hace más grande. Por esta razón, se han creado un sinnúmero de empresas e industrias encargadas de satisfacer las necesidades del ser humano. Algunas de estas industrias se han dedicado a la explotación de los recursos naturales, otras se han encargado del procesamiento de materiales y otras a la producción de artefactos. Unas y otras han contribuido a la modificación del paisaje natural.

No obstante, la llegada del desarrollo tecnológico fue el detonante que llevo a la humanidad a generar impactos en el planeta. Las emisiones de gases de efecto invernadero ha sido el impacto más grande y negativo para La Tierra, debido a que ha generado un calentamiento inusual en la misma.

Según Vicente Barros (2005)⁴ el efecto invernadero se presenta de la siguiente manera: “La energía que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnetica proveniente del sol en parte es reflejada hacia el espacio exterior y en parte es retenida en el planeta. Poca de la radiación solar que ingresa es absorvida por los gases de la atmosfera: la mayor parte la atravieza, siendo absorvida o reflejada en la superficie de la Tierra y en las nubes. La atmósfera que es transparente a la radiación solar, no lo es a la radiación terrestre, así la mayor parte de esta última queda atrapada en la atmósfera, excepto la que es emitida en una banda de longitudes de onda conocida como Ventana de la radiación. Por su casi transparencia a la radiación solar y su casi opacidad a la radiación terrestre, se dice que la atmósfera actúa como un invernadero, pues estas son precisamente las propiedades del vidrio y de otros materiales que se usan para construir estos sitios. Este efecto hace que la temperatura de la superficie de la Tierra sea mayor que la que sería si careciera de atmósfera”.

⁴ Barros, Vicente (2005). El cambio climático global. 2° edición. Libros del Zorzal. Buenos Aires. Pág. 11 y 12

A la problemática que generan los gases de efecto invernadero (GEI) se le ha denominado Calentamiento Global, dicho calentamiento esta provocando cambios en los patrones del clima (temperatura, la precipitación, los vientos y la humedad del planeta) por periodos extendidos, siendo estos patrones fundamentales para la conservación de la vida y la producción agrícola.

La preocupación más sentida con este fenomeno se debe a que las emisiones de gases tienen un efecto acumulativo, razón por la cual la manifestación de estos efectos se pueden sentir varias decadas después. De allí que sea indispensable empezar a realizar acciones en pro del medio ambiente que nos ayuden a reducir el efecto invernadero y ha heredar a las futuras generaciones un planeta lleno de vida, sano y saludable.

3.2 VARIABILIDAD CLIMÁTICA

En el presente trabajo, la variabilidad climática se entenderá como una medida del rango en que los elementos climáticos como la temperatura, precipitación, vientos y humedad varían de un periodo de tiempo a otro. Esta variación puede ser mayor a nivel local que a nivel global.

Dicha variabilidad esta condicionada por forzamientos externos que se pueden presentar de forma natural o pueden ser generados por el hombre. Según Vicente Barros (2005)⁵ los forzamientos externos pueden ser producidos por las siguientes causas:

- **Causas naturales:** Este tipo de forzamiento tiene en cuenta las afectaciones que suscita la energía que llega del sol y la que sale del planeta, las modificaciones químicas en la atmósfera y los cambios en las propiedades de la superficie.
- **Causas antrópicas:** Teniendo en cuenta el impacto ambiental que ha generado la humanidad en su camino hacia la modernización los forzamientos antrópicos tienen que ver con la modificación de las propiedades de la superficie terrestre o de la composición física y química de la atmósfera.
- **Causas astronómicas:** Hace referencia a las variaciones que se han presentado en la emisión de energía solar a lo largo de la vida terrestre y a las incidencias que tiene el movimiento de translación de la Tierra, así como la inclinación de su eje de rotación respecto al plano de la orbita.
- **Causas geológicas:** Tiene en cuenta la afectación que ejerce la posición relativa de los continentes respecto con los polos, ya que esta posición determina la eficiencia en la absorción de la radiación solar entrante.

⁵ Barros, Vicente (2005). El cambio climático global. 2° edición. Libros del Zorzal. Buenos Aires. Pág. 39 a 43

La variabilidad climática nos permite reconocer que el clima no es un fenómeno estático sino que cambia dependiendo de factores naturales o antropicos y que este proceso no es nuevo sino que ha sido constante durante millones de millones de años.

3.3 LEGISLACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN COLOMBIA

Colombia se ha caracterizado por ser un país rico en fuentes hídricas, razón por la cual a lo largo de la historia ha propendido por legislar frente al uso productivo del recurso y ha promovido la protección del mismo.

En el año 1928 con la ley 113 se reglamentó la gestión del agua, el aprovechamiento de acueductos y la generación de energía. En 1963 se crea la ley 200 la cual prohíbe la tala de bosques, lo cual conllevaría a la preservación del agua. En 1953 se promulga el decreto 1371 (Código de Saneamiento) por medio del cual se buscaba controlar las aguas residuales.

En 1954 con el decreto 3110 se crea la primera CAR (*Corporación Autónoma Regional*) en el Valle del Cauca. La misión de esta entidad era administrar los recursos naturales y realizar las tareas de control de inundaciones, saneamiento básico y descontaminación del agua. Entre los años 1960 y 1988 se crean en Colombia otras 18 CAR departamentales.

En 1966 se funda el Instituto Nacional de Desarrollo de los Recursos Naturales (*INDERENA*) con el objetivo de planificar el desarrollo integral de las cuencas hidrográficas. En 1974 se promulga el Decreto Ley 2811, el cual es considerado el primer código normativo de manejo de aguas en América Latina y en 1991 se da origen a la nueva Constitución Política de Colombia la cual es considerada como la constitución ambiental por dedicar 49 artículos a la protección del medio ambiente y los recursos naturales.

En 1981, el Decreto 2857 establece las finalidades de ordenación de cuencas y la Ley 56 permite la generación de recursos financieros para proteger las cuencas. El Decreto 103 de 1982 crea la “Comisión Permanente para la cuenca del río Magdalena” encargada de elaborar el Plan maestro de Manejo y el acuerdo 0041 de 1983 define las competencias del INDERENA para la ordenación de las cuencas. En 1987 se redefinen las funciones de las CARs como entidades públicas autónomas, administradoras y tomadoras de decisiones sobre el medio ambiente y los recursos naturales renovables en su jurisdicción.

En 1992 el INDERENA vio la necesidad de cambiar las estrategias de manejo de recursos naturales comprometiendo a las comunidades en la gestión del agua. En 1993 se creó por Ley 99 el Sistema Nacional Ambiental (*SINA*), ente articulador de las CARs con respaldo técnico y científico de cinco institutos de investigación, cinco autoridades ambientales urbanas y una Unidad de Parques Nacionales Naturales, y bajo la tutela del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (*MADS*)

Por mandato de las leyes 60 de 1993 y 142 de 1994 se organizan los actores institucionales relacionados con el agua y el saneamiento y se aprueban políticas a favor del recurso hídrico:

- ✓ En 1995 se aprueban las Políticas de Biodiversidad.
- ✓ En 1996 se aprueba el Manejo Integral del Agua y los Bosques
- ✓ En 1997 se aprueba la Gestión Integral de Residuos Sólidos y la Producción más Limpia.
- ✓ En 1998 se aprueba los lineamientos para la participación ciudadana en la Gestión Ambiental y para la Política Nacional de Ordenamiento Ambiental del Territorio.

En 2002 el IDEAM estableció las finalidades, principios y directrices de la Política de Planificación, Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas y Acuíferos (POMCA, Decreto 1729) y ajustó la Guía Técnico Científica (GTC) para su elaboración. En 2010 se aprobó la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) con objetivos y directrices unificadas, y en 2012 se reglamentó la normativa POMCA a fin de armonizarla con la PNGIRH (Decreto 1640)⁶.

3.4 MODELOS HIDROLOGICOS

Los modelos son utilizados para comunicar un punto de vista sobre el mundo, no siendo esta la realidad, en el mejor de los casos como producto se obtiene una buena aproximación de ésta. Por esta característica de proximidad diversos de ellos son valiosos para comprender un problema específico o para predecir el comportamiento de un sistema. En cualquiera de los dos casos, el usuario debe ser cuidadoso con las limitantes del modelo.

3.4.1 Modelo WEAP

WEAP⁷ (sistema de “Water Evaluation and Planning”) es una herramienta computacional desarrollada por Stockholm Environment Institute que provee un enfoque integral a la planificación de recursos hídricos. Fue creado en 1988, con el objetivo de ser una herramienta de planeación flexible integral y transparente para evaluar la sostenibilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance.

El modelo hidrológico WEAP se basa en un esquema de dos tanques capaces de reproducir distintas componentes de flujo subterráneos y superficiales.

⁶ Este aparte ha sido tomado del Resumen de Discusión “El desarrollo legislativo para la gestión del agua en Colombia” elaborado por el instituto SEI (Stockholm Environment Institute), el cual hace parte del proyecto “Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas” elaborado en el año 2012.

⁷ <http://www.weap21.org/>

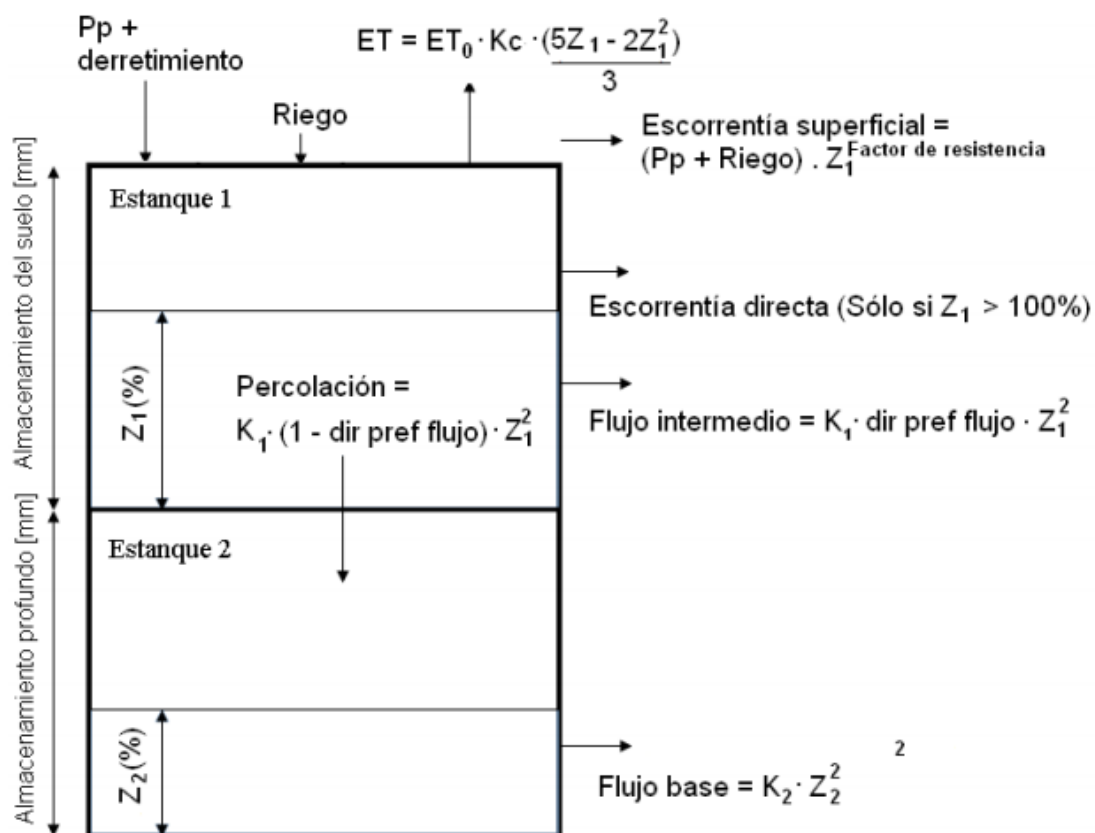


Figura. 2. Esquema modelo hidrológico integrado en WEAP.

Fuente: WEAP User Guide

De donde:

Pp = Precipitación líquida

ET = Evapotranspiración real

ET_0 = Evapotranspiración potencial

Z_1 = Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada

Z_2 = Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada

K_1 = Conductividad del estanque superior

K_2 = Conductividad del estanque inferior

Dir pref flujo = Dirección preferencial del flujo. Determina la fracción de flujo vertical y horizontal.

WEAP permite dividir la cuenca en “n” subcuencas o áreas más pequeñas, y a través de las ecuaciones realiza un balance de masa para calcular la escorrentía total proveniente de cada una de ellas. El método de humedad del suelo considera que en la capa superior se incluyen los aportes de precipitación y derretimiento de hielo, además de la irrigación, y se consideran como pérdidas desde la cuenca o área la evapotranspiración y los flujos de caudal. Además, existe percolación hacia la capa más profunda la cual se calibra para mejorar la simulación del flujo base en la cuenca. La escorrentía total se define como la suma de la escorrentía directa y la superficial, la escorrentía sub-superficial representada por el modelo y el flujo base derivado de las capas de suelo más profundas. Otra característica importante de WEAP es que no hay trasvase de agua entre áreas distintas.

Por ejemplo, los flujos generados en una banda de elevación pasará directamente a un cauce imaginario, y no contribuirá a la banda de elevación inferior. La metodología de bandas de elevación para WEAP21 fue propuesta en otros trabajos (Purkey et al., 2008) y será puesta a prueba en el presente trabajo.

Al interior el modelo utiliza numerosos parámetros para representar los fenómenos físicos de las diferentes variables (Área de la Cuenca, Coeficiente de cultivo, Almacenamiento del suelo, Almacenamiento profundo, Conductividad de la zona radicular, conductividad de la zona profunda, Factor de resistencia al escurrimiento, Dirección preferencial del flujo, Almacenamiento inicial en los estanques, Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa, Viento, Radiación media, series historicas de caudal, entre otros) y los balances de masas planteados en cada estanque son resumidos en las siguientes ecuaciones:

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - P_e(t) Z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_2 (1 - f) Z_1^2$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2 (1 - f) Z_1^2 - K_2 Z_2^2$$

De donde:

Pe= Precipitación más derretimiento

f= Dirección preferencial del flujo

El cálculo de la evapotranspiración (ET₀) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, compendiado en la siguiente ecuación:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia;

R_n = Radiación neta;

G = Densidad de flujo de calor del suelo;

T = Temperatura media diaria;

u_2 = Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo;

e_s = Presión de saturación de vapor de agua;

e_a = Presión de vapor;

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor;

γ = Constante psicométrica;

El modelo WEAP considera que la evapotranspiración se presenta en el estanque superior, por lo tanto, el volumen de agua almacenado allí influye directamente en la satisfacción de la demanda evapotranspirativa y debe ser tenido en cuenta en el proceso de calibración.

La primera aplicación importante de WEAP fue en la región del Mar de Aral en 1989 con el auspicio del recién formado Stockholm Environment Institute (SEI). SEI continuó apoyando el desarrollo de WEAP a través de su Centro en los Estados Unidos (SEI-US), el cual se estableció en 1989 y fue organizado por el Tellus Institute hasta 2006. A través de los años WEAP se aplicó en muchos países y sistemas fluviales. El software ha sido transferido a planificadores de recursos hídricos alrededor del mundo.

Este modelo es utilizado para proyectos relacionados con el manejo del agua dulce, la asignación de recursos hídricos limitados, las preocupaciones respecto a la calidad ambiental, la planificación frente a la variabilidad e incertidumbre del clima, y la necesidad de desarrollar e implementar estrategias sostenibles del uso del agua. Todo esto dentro de un marco de cambio climático global y/o regional.

3.4.1.1 Aspectos principales de WEAP

- Enfoque integrado: Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
- Proceso de participación: Una estructura transparente que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.

- Balance de Agua: Base de datos que mantiene la información de demanda y oferta de agua para realizar balances de masa en arquitectura conexión-nodo.
- Basado en Simulación: Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas.
- Escenarios de políticas de uso de agua: Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.
- Interfaz amigable: Interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de agarrar-y-arrastrar ("drag-and-drop") con flexibles resultados como mapas, gráficos y tablas.
- Integración de Modelos: Conexión dinámica con otros modelos y programas como QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST, Excel y GAMS.

3.4.1.2 WEAP opera en varias capacidades:

- Base de datos de balance de agua: WEAP proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.
- Herramienta de generación de escenarios: WEAP simula la demanda, oferta, escorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos.
- Herramienta de análisis de políticas: WEAP evalúa una gama completa de las opciones del desarrollo y manejo del agua, y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

3.4.1.3 Enfoques del modelo

WEAP funciona usando el principio básico de balance de masa pudiendo ser utilizado para sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o complejos sistemas de cuencas transfronterizas.

Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo escorrentía por precipitación, flujos base, y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses; generación de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad de las aguas; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas. Un módulo de análisis financiero también permite que el usuario investigue comparaciones de costo-beneficio para los proyectos. (*Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009*)

El analista representa el sistema en términos de sus varias fuentes de agua (ej. ríos, arroyos, agua subterránea, embalses, y plantas de desalinización); instalaciones de descarga, transmisión y tratamiento de agua; demandas del agua; generación de

contaminantes; y requisitos de los ecosistemas. La estructura de datos y el nivel de detalle se pueden modificar fácilmente para satisfacer los requisitos y la disponibilidad de datos para un sistema y un análisis particular. (*Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009*).

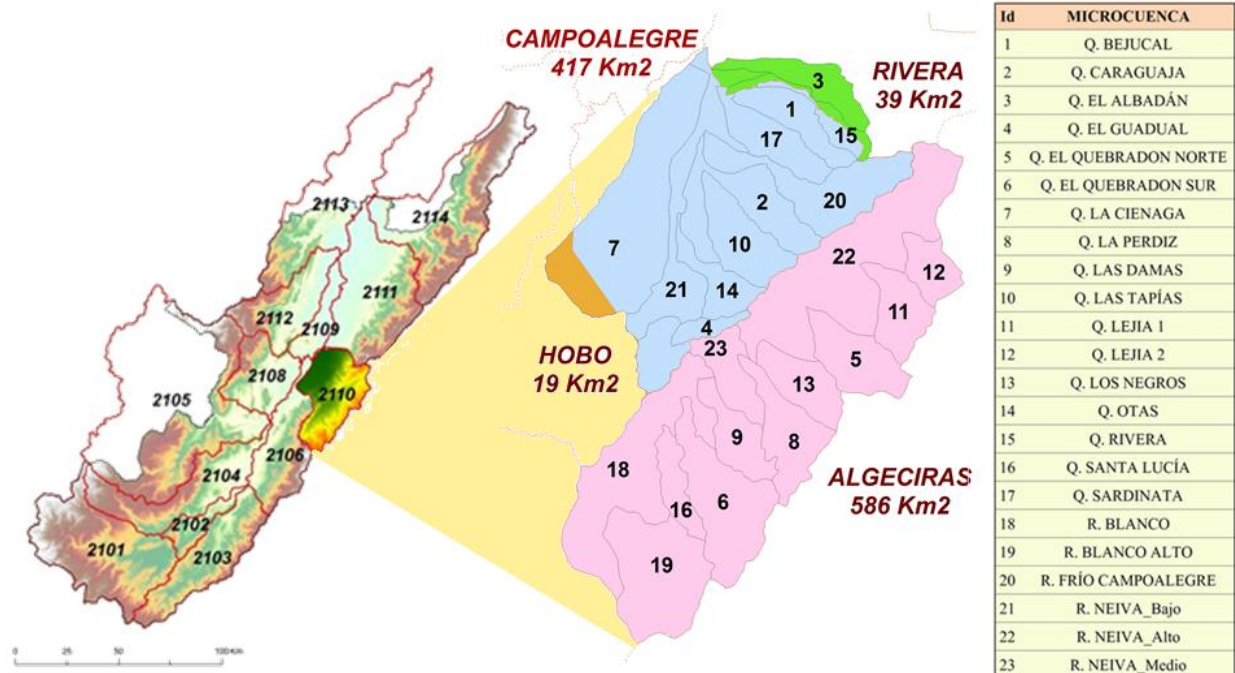
Los usos de WEAP incluyen generalmente varios pasos.

- Definición del Estudio: Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema, y la configuración del problema.
- Cuentas Actuales: Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- Escenarios: Se pueden explorar los impactos que tendría, un sistema de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y del clima, por ejemplo, en la demanda del agua, oferta de agua, hidrología, y contaminación. (Las oportunidades para la generación de escenarios se presentan en la siguiente sección).
- Evaluación: Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables dominantes.

4 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Neiva nace en las estribaciones de la cordillera oriental del departamento del Huila, en la región de la Siberia, aproximadamente a 3,100 msnm y su desembocadura es en el Río Magdalena a 460 msnm (Mapa 2), cubriendo diversos climas, desde el cálido seco hasta el muy frío, su ubicación geográfica está georeferenciada por las coordenadas 2°18'31.481" y 2°47'23.636" de Latitud Norte 75°28'11.852" y 75°7'22.977" de Longitud Oeste. En su recorrido desde la parte alta, atraviesa los municipios de Algeciras y Campoalegre y su área de influencia se extiende parcialmente a los municipios de Gigante, Hobo y Rivera, tiene una superficie de 1062.74 km², de las cuales el 1.79% pertenece al municipio de Hobo (19.03 km²), el 3.68% a Rivera (39.06 km²), el 39.30% a Campoalegre (417.68 km²) y el 55.23% a Algeciras (417.68 km²). La Cuenca está conformada por 23 micro-cuencas.



Mapa 2. Localización geográfica de la Subzona Hidrográfica 2110 Rio Neiva.
Fuente SIG-CAM

La parte alta de la cuenca hace parte del Parque Natural Regional La Siberia. De igual forma, se tiene que los municipios de la zona con el fin de proteger los recursos hídricos y la biodiversidad, crearon los parque municipales de La Perdiz en el municipio de Algeciras a través del Acuerdo No 029 del 30 de noviembre de 2005 y el Parque Natural Municipal de Campoalegre según el Acuerdo No 037 del 27 de noviembre de 2008.

Está corriente reglamentó sus usos y aprovechamiento a través de la Resolución 3660 del 27 de Diciembre de 2007 de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena -CAM. En promedio su rendimiento hídrico promedio es de 15.79 lt/s-Km², registra una oferta hídrica máxima de 33.06 m³/s y una oferta mínima de 8.845 m³/s durante la época seca, según datos reportados por el IDEAM durante el periodo 1967-2003 en la Estación Puente Mulas código 2110702 ubicado en el municipio de Campoalegre a una altura de 760 m.s.n.m.

4.2 METODOLOGÍA

El desarrollo del presente estudio contempla la aplicación de un modelo de gestión integral de los recursos hídricos denominado WEAP (Water Evaluation And Planning system (www.weap21.org)). WEAP, es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas hidrológicas.

Para el desarrollo de modelación se sigue 4 fases que se presenta en la Figura 3. La primera fase es la definición del estudio, en donde el área de estudio y el sistema de los componentes espaciales de la zona de interés se definen y el horizonte de tiempo del análisis se establece. La segunda fase es la definición de las “cuentas corrientes (current accounts)”, que es una representación de la línea base del sistema - incluyendo las reglas de operación vigentes para ambas ofertas y demandas. Otra forma de interpretar las “cuentas corrientes” es la representación espacial y temporal del sistema como una fotografía, la cual es implementada en el modelo WEAP. La Tercera fase se centra en la comparación de los resultados del modelo con los datos históricos que representan las medidas claves de rendimiento del sistema. La cuarta fase toma como punto de partida las cuentas corrientes para el desarrollo de escenarios, que caracterizan conjuntos alternativos de supuestos futuros en relación a las políticas, los costos y los factores que afectan la demanda, cargas de contaminantes y suministros. La quinta fase, los escenarios son evaluados con respecto a la disponibilidad de agua, costos y beneficios, la compatibilidad con los objetivos ambientales y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables claves.

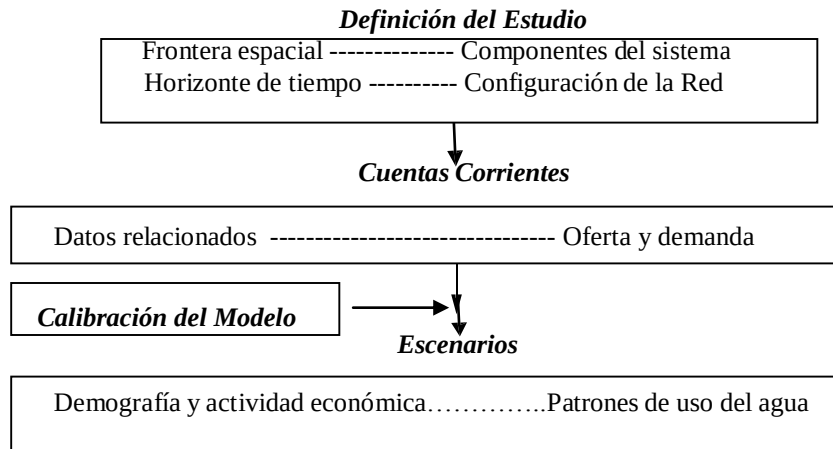


Figura 3. Esquema del desarrollo del modelo WEAP en la Cuenca del Río Neiva

4.2.1 Definición del estudio

El área de estudio que comprende la implementación del modelo WEAP para la cuenca hidrológica del Río Neiva, está definida por el área de drenaje al Río Neiva hasta el punto de cierre sobre la desembocadura al Río Magdalena. Esta área de drenado total es de 1062.74 km² abarcando los municipios de Algeciras, Campoalegre, Hobo y Rivera en el Departamento del Huila.

4.2.1.1 Hidrología

La cuenca hidrográfica del Río Neiva está compuesta por las corrientes hídricas que drenan sus aguas desde el flanco occidental de la cordillera Oriental hacia el valle del Río Magdalena, se ha sectorizado en 23 microcuencas hidrográficas, que poseen una oferta hídrica media de 15.79 lt/s-Km² y crítica de 8.845 m³/s, frente a una demanda creciente para consumo humano, agrícola e industrial.

La infraestructura presente en la cuenca del Río Neiva comprende las obras hidráulicas del sistema de riego ISOIGUA, la cual suministra agua a los cultivos de arroz en la parte baja. Esta corriente reglamentó sus usos y aprovechamiento a través de la Resolución 3660 del 27 de Diciembre de 2007 de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena -CAM. Para el Río Neiva se adoptó: Una demanda de 13.216 m³/seg; para una oferta de 8.845 m³/seg, correspondiente al caudal mínimo de los caudales medios– 1967-2003 (Fuente IDEAM – Estación Puente Mulas). Para cubrir el déficit entre la demanda y la oferta en la reglamentación se establecieron dos estrategias; la primera asignó un caudal de 60.47 lt/s para los lotes regables y 95.54 lt/s para los lotes ganaderos y la segunda estrategia fue adoptar un factor de distribución correspondiente al 65.14 % el cual se aplica a cada uno de los usuarios y por lo tanto a todos los canales de manera proporcional.

Determinando: Caudal Ecológico (mantenimiento y conservación del cauce) de 0.4 m³/seg, Caudal Remanente de 0.82 m³/seg para atender eventualmente usuarios que no quedaron incluidos en la reglamentación (demandas imprevistas en este proyecto), y Caudal Distribuido 8.362 m³/seg.

4.2.1.2 Topología de la red

Se tienen identificadas 23 microcuencas aforadas que reproducen los escurrimientos hidrológicos de toda la Cuenca del Río Neiva, y con el objetivo de desarrollar una modelación hidrológica que permita generar mejores resultados en la calibración, se subdividen los catchments de acuerdo a las bandas de elevación cada 500 metros, que se construyeron a partir del DEM de 30m suministrado por La CAM y con el uso del software ArcGis 10.0 que tiene licenciado la Corporación, de esta manera se obtiene áreas de captación que son espacialmente uniformes, respecto a sus características topológicas y climatológicas.

4.2.2 Cuenta corrientes

Las cuentas corrientes representan la definición básica del sistema hídrico existente. El establecimiento de cuentas corrientes requiere que el usuario "calibre" los datos del sistema y los supuestos, a un punto que reflejen con precisión la operación observada del sistema. En las cuentas corrientes se incluyen las especificaciones de los datos relacionados a la oferta y la demanda.

Las cuentas corrientes, son las representaciones espaciales y temporales del sistema, como si fuera una fotografía del sistema en el modelo WEAP. Para lograr esto, una serie de datos de entrada que alimente al modelo tienen que ser suministrados, los cuales se describen a continuación.

4.2.2.1 Datos de Entrada

Los datos que alimentan al modelo se pueden clasificar como datos climáticos, hidrológicos, caudales, requerimiento de demandas, operación de sistema(s), reservorios, y caudales ecológicos.

4.2.2.1.1 Clima.

WEAP utiliza datos climáticos como motor de los procesos de control de caudal (suministro de agua) y de la evapotranspiración (la demanda de agua). En este contexto se tiene que la Cuenca del Río Neiva se caracteriza por poseer grandes variaciones altimétricas que va desde los 3.100 m.s.n.m. a los 456 m.s.n.m. y de relieve, lo que influye altamente en el régimen de distribución de lluvias, temperatura, condiciones de humedad ambiental y acción de los vientos locales, permitiendo contar con una alta variación climática. La temperatura

oscila entre los 10°C en las partes altas de la cordillera oriental, y 28°C o más en el valle del Magdalena, pasando por climas muy fríos a cálido secos.

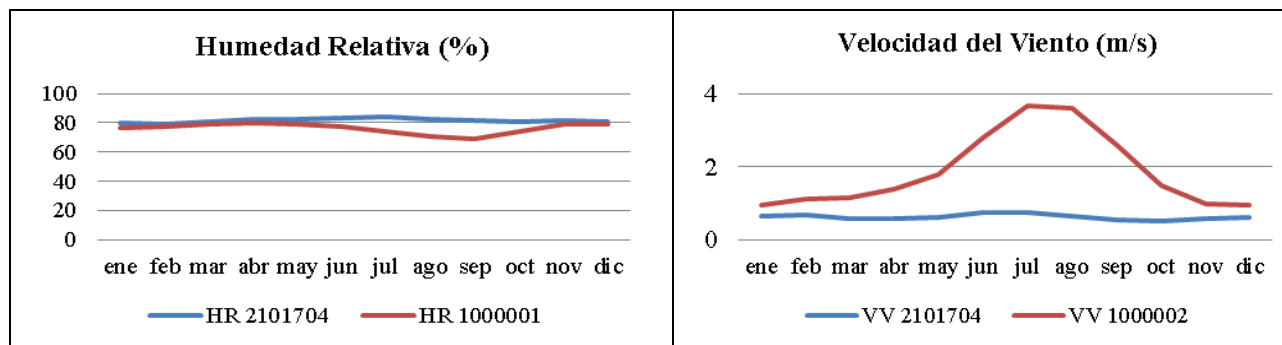
Se emplearon 15 estaciones pluviométricas de IDEAM cuyos rangos de elevación van desde 429 msnm hasta 2100 msnm. El periodo de información es de Enero de 1970 a Julio del 2011 con un intervalo de tiempo diario, se aplicó el método de polígono de Thiessen y de isoyetas para determinar la precipitación media mensual para cada catchment del modelo. De igual forma se utilizaron 15 estaciones climatológicas del IDEAM con datos de temperatura para un período de 1970 al 2010, a partir de estos se obtuvieron los promedios mensuales, para cada estación y con procedimientos geo-estadísticos de interpolación (Inverse Distance Weight-IDW), se les aplicó el gradiente de temperatura para cada uno de los catchments implementados. En la Tabla 1 se presentan las diferentes estaciones de IDEAM consideradas en la Cuenca del Río Neiva.

Estación		P media anual multianual (mm)
Código	Nombre	
21100070	Finca Sta Barbara	1503.89
21100080	Nuevo Paraiso	1208.25
21100120	El Palco	1303.16
21105050	Los Rosales	1229.60
21060090	El Hobo	1285.71
21090040	Hda Papagayo	1401.18
21105030	Algeciras	1080.77
21105040	Hda Potosi	1215.64
21090060	Casa Bombas 1 Juncal	1447.64
21100140	La Arcadia	1531.91
21100010	Campoalegre	1377.71

Tabla 1. Estaciones pluviométricas de IDEAM consideradas en la cueca de Rio Neiva

Para humedad relativa y velocidad del viento son los valores brutos de las estaciones consideradas en el modelo del Alto Magdalena para esta región. (Figura 4, Tabla 2)

Figura 4. Humedad Relativa y Velocidad del Viento empleada en el modelo Rio Neiva



Fuente: Instituto Ambiental de Estocolmo, 2013

Tabla 2. Estaciones de Velocidad del Viento y Humedad Relativa de IDEAM consideradas en la cuenca de Río Neiva

Parámetro	Código	Serie Histórica	Promedio
Humedad Relativa – HR (%)	2101704	1976 - 2013	81.56
	1000001	1986 – 2013	76.23
Velocidad del Viento – VV (m/s)	2101704	1974 - 2013	0.62
	1000002	1974 - 2011	1.82

Fuente: Instituto Ambiental de Estocolmo - SEI, 2013

4.2.2.1.2 Caudales de Aforo.

Los registros de caudales históricos son a menudo la entrada directa en WEAP a cuantificaciones del sistema hídrico en consideración. Para el caso de la Cuenca del Río Neiva, los puntos de aforo existentes en ella determinaron las áreas de captación o drenaje. Estos puntos de aforo fueron obtenidos de las bases de datos del IDEAM y se cuenta con dos (2) puntos de aforo distribuidos a lo largo de la red hídrica, que se traducen por consiguiente en dos (2) catchments en el modelo WEAP de la Cuenca del Río Neiva, los cuales fueron subdivididos en bandas de elevación. El periodo histórico de información de estos dos (2) puntos de monitoreo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones de aforo de IDEAM

Estación		Serie Histórica	Promedio (m ³ /s)
Código	Nombre		
21107030	El Casil	1973 - 2008	5.12
21107020	Puente Mulas	1970 - 2007	15.28

Fuente: IDEAM 2011

4.2.2.1.3 Cobertura Vegetal.

La cobertura vegetal de la cuenca fue incluida de acuerdo al mapa de uso y cobertura – Corine Land Cover - del año 2010 para el departamento del Huila, suministrado por la CAM. El cual fue reclasificado en siete (7) coberturas vegetales, a través de exportar la información del shape file de uso y cobertura a Excel y la posterior construcción de una tabla dinámica. Las coberturas que se encuentran definidas en la Tabla 4.

Tabla 4. Tipo de cobertura y cultivos en el área de la cuenca Río Neiva

Cobertura	Área (km ²)	Área (%)
Aguas Abiertas	3.38	0.31
Arroz	105.35	9.78
Bosque	489.49	45.46
Café	2.11	0.20
Cultivos Agrícolas	164.20	15.25
Páramo	2.04	0.19
Pastos	305.76	28.39
Zona Urbana	4.50	0.42
Total	1076.83	100.00

Fuente: Autor de la Tesis, 2015

Para cada catchments se incluyó el área total de la cobertura correspondiente espacialmente, de igual forma para cada banda de elevación.

4.2.2.1.4 Demandas.

Hay muchas maneras de estimar la demanda de agua dentro de WEAP. Esto puede depender de la población y/o el área de riego y de una tasa de uso del agua asociado con estas entidades. Estos datos pueden ser estimados usando registros históricos, cambios de uso del suelo, distribución de la población, censos, etc. En el presente estudio se toma como referencia la demanda proyectada por sectores socioeconómicos de la evaluación realizada por Fundispro del estudio en desarrollo “Reajuste a la Reglamentación del Río Neiva”.

El modelo presenta dos demandas de agua, la primera para consumo humano o doméstico de la zona urbana de sus dos municipios abastecedores, Algeciras con una demanda actual de 37,5 l/s y el municipio de Campoalegre con 111,09 l/s, junto con 23 demandas para consumo humano rural disperso en cada una de las microcuencas, por consiguiente se le determinó la ecuación de crecimiento (Tabla 5) teniendo en cuenta las estimaciones de población 1985 - 2005 y proyecciones de población 2005 - 2020 del total municipal según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. La segunda demanda es la agropecuaria entre las que se destacan el cultivo de arroz; con una demanda proyectada de 157.808,50 l/s y con una extensión que abarca aproximadamente el 10% del área total de la cuenca del Río Neiva, representado en zonas de captación, a estos catchments se les activa el sistema de riego en prioridad de segundo orden.

Tabla 5. Demanda urbana para la Cuenca Río Neiva

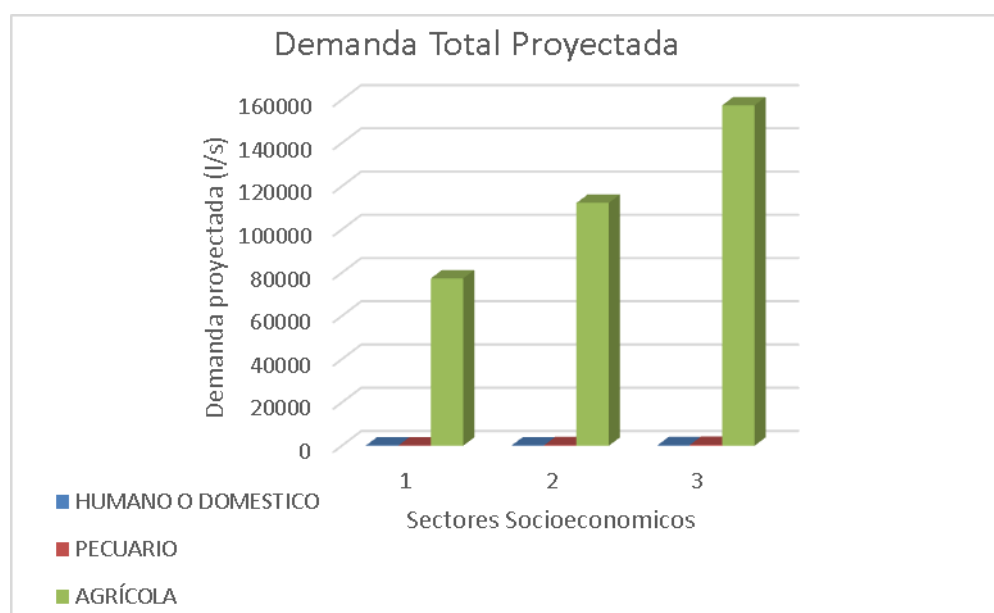
Municipio	Población Actual (hab)	Ecuación crecimiento poblacional
Algeciras	15,415	$y = -3.7987x^2 + 382.37x + 7277.3$
Campoalegre	25,828	$y = -4.105x^2 + 422.91x + 16837$

Fuente: Autor de la Tesis, 2017

Tabla 6. Demanda total proyectada por sectores socioeconomicos.

SUB ZONA	SECTOR SOCIECONOMICO	DEMANDA PROYECTADA TOTAL POR MUNICIPIOS (l/s)					
		CAMPOALEGRE			ALGECIRAS		
		PERIODOS (AÑOS)					
		0 — 2	2 — 5	5 — 10	0 — 2	2 — 5	5 — 10
RIO NEIVA	HUMANO O DOMESTICO	115.19	119.23	123.86	44.04	46.61	48.78
	PECUARIO	93.36	187.27	329.74	9.18	11.23	13.81
	AGRÍCOLA	46121.52	61155.52	77859.35	31269.11	51144.28	79605.59

Fuente: FUNDISPROS, 2016.



Grafica 1. Demanda proyectada por sectores socioeconómicos.

Fuente: FUNDISPROS, 2016.

4.2.3 Calibración del Modelo

Esta sección está destinada a justificar el uso del modelo WEAP como una herramienta para evaluar el sistema de gestión del agua a la mano. Este se centra en la comparación de los resultados del modelo con los datos históricos que representan las medidas claves de rendimiento del sistema. Para lograr este objetivo, la calibración hidrológica tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- **Área:** área que debe tener cada catchment dentro de WEAP. Se determina el área de cada catchment y las áreas correspondientes a los siete tipos de coberturas generales determinados para la cuenca.
- **Kc:** Es el coeficiente de cultivo, que ayuda a calcular la evapotranspiración de la

cobertura vegetal usando la evapotranspiración Potencial de Referencia.

- *Soil Water Capacity*: Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces en mm, la cual está ubicada en el primer balde o primer estrato. Este parámetro se refiere al estrato ocupado por las raíces de las plantas.
- *Deep Water Capacity*: Capacidad de almacenamiento de agua en el segundo balde o el estrato inferior del perfil del suelo en mm. Este estrato es el mismo para todo el catchment y no toma en cuenta las coberturas vegetales dentro del catchment. Se puede definir como el almacenamiento en el subsuelo de agua de la microcuenca por unidad de área.
- *Runoff Resistance Factor*: Este factor controla la respuesta de la microcuenca a la escorrentía superficial. Está relacionada ya sea con el índice de área foliar y/o la pendiente del terreno.
- *Root Zone Conductivity*: Es la conductividad hidráulica en estado de saturación del estrato superior (mm/mes). Este parámetro controla el flujo sub-superficial.
- *Deep Conductivity*: Es la conductividad hidráulica en estado de saturación del estrato inferior (mm/mes). Este parámetro controla el flujo base.
- *Preferred Flow Direction*: Este parámetro controla el flujo preferente en el estrato superior. Con este parámetro se puede indicar que flujo hay dentro de este estrato si es horizontal (1.0), vertical (0.0) o la combinación de ambos (entre 0 y 1).
- *Initial Z1*: Es el porcentaje de humedad del suelo del estrato superior con el que se empieza la simulación.
- *Initial Z2*: Es el porcentaje de humedad del suelo del estrato inferior con el que empieza la simulación.

4.2.4 Escenarios

Evaluar el estado del recurso hídrico en cuanto a oferta y demanda, y evaluar su posible cambio a partir de posibles escenarios futuros, entre los cuales, se encuentran escenarios de cambio climático. A partir de esta evaluación, se proyectan estrategias de adaptación, que podrán ser evaluadas por medio de WEAP y su desempeño a corto, mediano y largo plazo.

Por tal razón, es necesario identificar los escenarios con respecto a las condiciones futuras potenciales de la Cuenca del Río Neiva, para ello se tomó como fuente de información base los datos obtenidos del taller XLRM realizado por La CAM los días 1 y 2 de agosto de 2013, donde se reunieron los actores claves, quienes tienen competencia en la toma de decisiones con respecto a la gestión de recurso hídrico para apoyar la identificación de una serie de factores externos (incertidumbres), y estrategias de gestión referentes al agua de acuerdo al contexto actual.

De la lista obtenida durante el XLRM se realizó una selección de los escenarios y casos relevantes para la Cuenca del Río Neiva, para definir las variables claves a incorporar en el ejercicio del diseño experimental. Así se construyó los escenarios futuros, las variables involucradas y los posibles casos como parte de la implementación del modelo de gestión del agua WEAP, a partir de información suministrada por autoridades ambientales, entes territoriales, sectores productivos, y con el criterio de expertos que hacen parte del equipo WEAP de La CAM. Las corridas de este modelo generaran la información necesaria para evaluar las posibles estrategias de adaptación.

Los escenarios y casos fueron evaluados para definir las variables de entrada al modelo, los elementos WEAP, el número de escenarios por cada combinación de incertidumbres y estrategias.

4.2.4.1 Incertidumbres

4.2.4.1.1 Generalidades.

Son todos los factores inciertos que se salen del control de los gestores del recurso hídrico y de los usuarios de agua – es la base para formular “Escenarios”, y tiene injerencia sobre el éxito de las estrategias aplicadas.

Incertidumbres "X"				
Xn	Nombre_X	ID_X	Descripción_X	No Escenarios_X
X1	Clima	0	Histórico	3
		1	Minimo	
		2	Maximo	
X2	Población	1	Bajo	3
		2	Medio	
		3	Alto	
Combinación de incertidumbres				9

Tabla 7. Lista de escenarios de incertidumbre seleccionados para modelar en WEAP. A continuación, se describe cada incertidumbre priorizada.

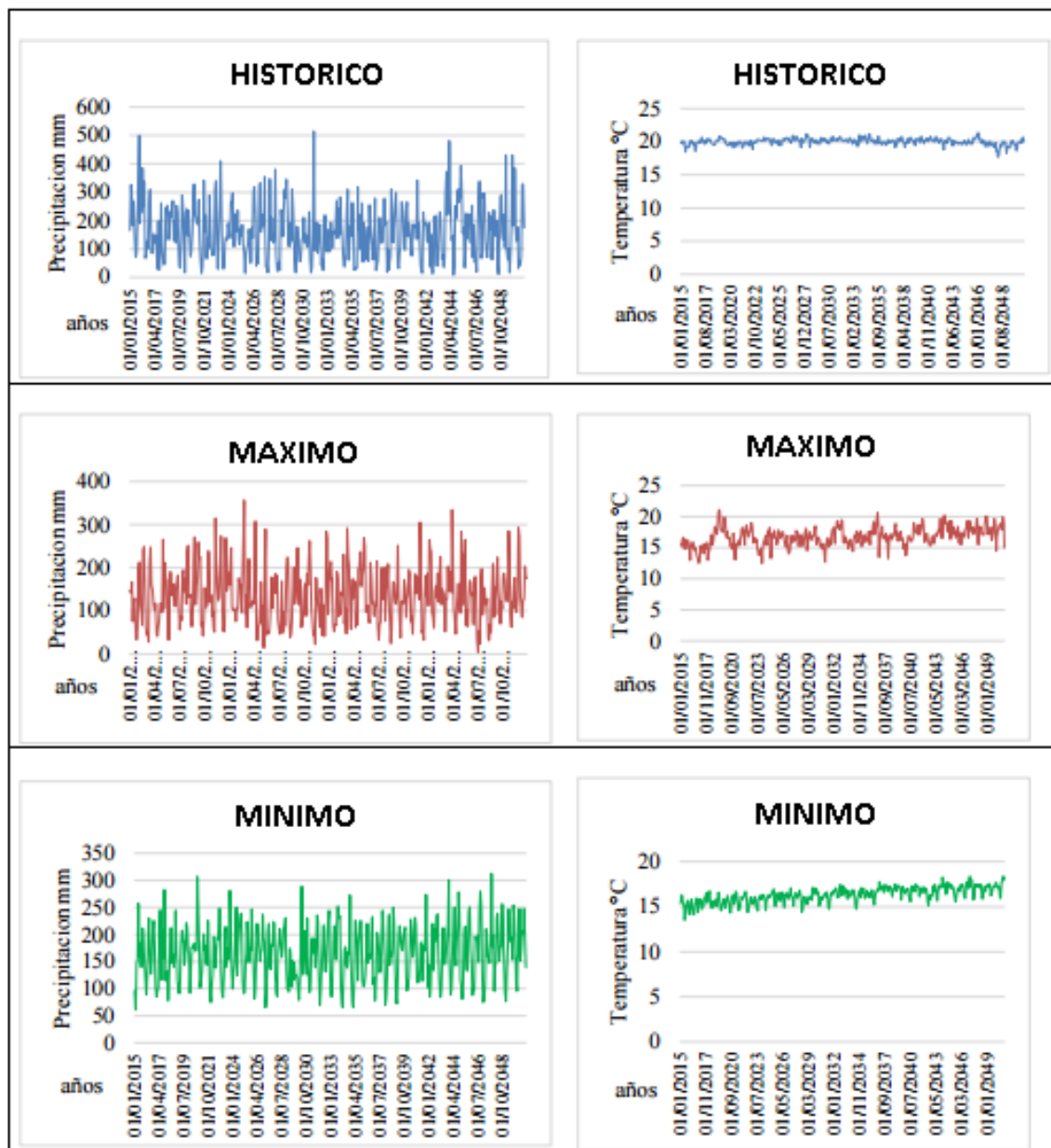
4.2.4.1.2 Descripción

4.2.4.1.2.1 Clima.

Esta incertidumbre se relaciona directamente con la planificación, ya que ésta tiene como objetivo, brindar un marco de planeación para prepararse y adaptarse al cambio climático. En donde se ha clasificado en tres categorías, la primera designada Histórico hace referencia a la información base suministrada por el IDEAM, la segunda Mínimo hace reseña al escenario MPI-ESM-MR y la tercera categoría denominada Máximo por tener la mayor variabilidad y su correspondencia al escenario CanESM2 R3.

Para las categorías Mínimo y Máximo fueron obtenidas de la metodología del modelo

WEAP de la macro cuenca del Río Magdalena desarrollado por (Angarita 2014), que incluyo los escenarios de cambio climático y la variabilidad climática y de acuerdo a dicha metodología se tiene que para el Escenario Mínimo (MPI-ESM-MR) en el horizonte del tiempo futuro se consideró incrementar la temperatura media en el orden +0,9 a 2° C y en 1.05% el promedio de la precipitación histórica y para el escenario de mayor variabilidad denominado Máximo (CanESM2 R3) el enfoque es acrecentar los valores extremos, esta descripción se aprecia en la gráfica 2.



Gráfica 2. Escenarios Climáticos futuros
Fuente: Angarita 2014

4.2.4.1.2.2 Población.

Esta incertidumbre es inherente a la dinámica poblacional y a los aspectos relacionados con abastecimiento de asentamientos humanos tanto urbanos como rurales. En la Cuenca de Río Neiva se evaluó el aspecto del cambio demográfico, en donde se proyectan crecimientos poblacionales bajo, medio y alto.

4.2.4.1.3 Escenarios de cambio climático.

Los escenarios de cambio climático se extraen a partir de resultados compilados por el proyecto CMIP5; son 61 modelos de circulación global, desarrollados por 36 instituciones internacionales, reportados a escala global, de diferentes conjuntos de resultados. Los conjuntos de resultados empleados para la Cuenca del Río Neiva corresponden a 9 modelos de circulación, para los experimentos históricos (1850 - 2005) y RCP 8.5 (2005 - 2100), a paso de tiempo diario, para variables de precipitación y temperatura media. La extracción de los datos se efectuó a través un código en R, desarrollado por NCAR y TNC⁸. (Angarita, H., 2014)

Tabla 8. Lista de modelos de circulación global evaluados para adoptar escenarios de cambio climático en la Cuenca del Río Neiva.

CENTRO DE MODELACIÓN	INSTITUCIÓN	MODELO	REALIZACIONES
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CanESM2	R5
NCAR	National Center for Atmospheric Research	CCSM4	R2
NSF-DOE-NCAR	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research	CESM1(CAM5)	R1
CNRM-CERFACS	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique	CNRM-CM5	R1
CSIRO-QCCCE	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	CSIRO-MK3	R10
CENTRO DE MODELACIÓN	INSTITUCIÓN	MODELO	REALIZACIONES
MOHC (additional realizations by INPE)	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	HadGEM2	R1
MPI-M	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	MPI-ESM-MR	R1
MRI	Meteorological Research Institute	MRI-ESM1	R1
NCC	Norwegian Climate Centre	NorESM1-M	R1

“De acuerdo a la metodología de extracción de las series de cambio climática, se evalúan los modelos globales, en términos de su capacidad de representar los atributos del clima para la zona de estudio. Estos atributos ocurren en diferentes escalas de tiempo (diarias,

⁸ ANGARITA, H. (2014). *Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo WEAP de la macro cuenca del magdalena y resultados de las simulaciones*. TNC - USAID

anuales, decadales) y pretenden caracterizar el clima y su variabilidad. De esta forma, se comparan los resultados de los modelos globales a paso de tiempo diario con el promedio histórico regional observado a diferentes escalas de agregación temporal. La metodología tiene en cuenta 8 indicadores (cualitativos y cuantitativos):

- Sesgo (Bias)
- Longitud de rachas secas
- Media diaria
- Magnitud de eventos extremos (percentil 95)
- Fracción de días con lluvia
- Longitud media de rachas húmedas
- Estacionalidad mensual (reproduce o no el patrón estacional – un máximo o dos máximos)
- Oscilaciones de baja frecuencia y teleconexiones macroclimáticas

Para la extracción y generación de series se emplea un método no paramétrico, como los métodos de reordenamiento o *bootstrapping* (Gangopadhyay et al. 2005; Yates et al. 2003, citados por Angarita, H., 2014) construyen series sintéticas como secuencias de observaciones históricas, utilizando reglas probabilísticas que buscan preservar algunos atributos presentes en las series históricas, como la estacionalidad, la variabilidad, la correlación espacial, etc., y que a su vez, se modifican en función de los cambios predichos por la señal del modelo climático. El método k-NN bootstrapping (por sus siglas en inglés: *K Nearest Neighbor*), genera secuencias diarias de estado del tiempo (precipitación y temperatura) informadas a partir de la salida específica de un GCM. Este proceso se repite para diferentes GCM priorizados (por ejemplo CCSM4, MPI), para crear un conjunto de proyecciones a escala local, con las que es posible examinar el rango de los cambios potenciales en los atributos del clima.

El método KNN para generar series aleatorias de precipitación que preservan la probabilidad conjunta de los estados de humedad consecutivos – del clima regional a paso de tiempo diario, definidos como: *Seco (Dry)*, Precipitación media diaria regional menor a 0.3 mm P0.05, *Húmedo (Wet)*, Precipitación media regional entre 0.3mm y P95 y Extremadamente húmedo (*Extremely wet*), Precipitación media regional > P95. Luego las secuencias de precipitación son evaluadas en términos de tendencias en las magnitudes de eventos extremos. Estas magnitudes son corregidas mediante un mapeo de cuantiles sobre la función de distribución de extremos corregida.

Las series sintéticas generadas por el método kNN no incluyen señal de cambio de temperatura debido a que se basan en las magnitudes del periodo histórico. En el método la señal de incremento de temperatura se estima como:

$\Delta T(t) = T_{agcm}(t) - \tilde{T}_{agcm}[T]$, donde T_{agcm} es la media móvil de W días de la señal de temperatura del modelo para el día t y $\tilde{T}_{agcm}[T]$ lo es pero para el periodo histórico de referencia". (Angarita, H., 2014).

4.2.4.2. Estrategias

4.2.4.2.1 Generalidades.

Las estrategias constituyen acciones, estrategias y alternativas que los tomadores de decisiones consideran explorar y que afectarán el estado del sistema de la Cuenca. El análisis de las estrategias permitirá identificar como hacerle frente a las incertidumbres identificadas, y en particular a la incertidumbre climática. A continuación (Tabla 9), se describe cada estrategia contemplada:

Estrategias "L"			
Ln	Nombre_L	Descripción_L	No Escenarios_L
L1	Base	Sin cambios en el sistema	1
Numero de Estrategias			1

Tabla 9. Lista de escenarios de estrategias seleccionados para modelar en WEAP.

4.2.4.2.2 Descripción

4.2.4.2.2.1 Base.

Para el modelo de la Cuenca del Río Neiva se planteó una sola estrategia "L", el escenario base o de referencia, es decir un escenario sin cambios en el sistema. El sistema se corre con la serie histórica de información meteorológica a paso de tiempo mensual desde el año de 1970 hasta el año 2010. Dicha serie histórica se proyecta al futuro comenzando el año 2010 hasta el año 2050 y que define el escenario de simulación con las incertidumbres "X" planteadas.

4.2.4.3 Caracterización en WEAP de incertidumbres y estrategias

Se identificaron el número de corridas que permitirá la combinación de variables para el análisis de Escenarios. Se obtuvieron en total 9 incertidumbres y 1 estrategias.

A continuación (Tabla 10), se presenta un resumen de cada una de las incertidumbres y estrategias seleccionadas, su conexión con WEAP y el número de escenarios y casos definidos para cada una de ellas. Debido a que las incertidumbres por su naturaleza pueden suceder de forma combinada en el futuro, el enfoque de definición de escenarios busca que se combinen todas las posibles incertidumbres de forma multiplicativa ($3 \times 3 = 9$) y que se observe el efecto de cada estrategia en contraste con estas incertidumbres de forma aditiva ($1(\text{Base}) = 1$). De esta forma, el número total de corridas del modelo es Incertidumbres por el número de estrategias es 9 ($(3 \times 3) \times 1 = 9$).

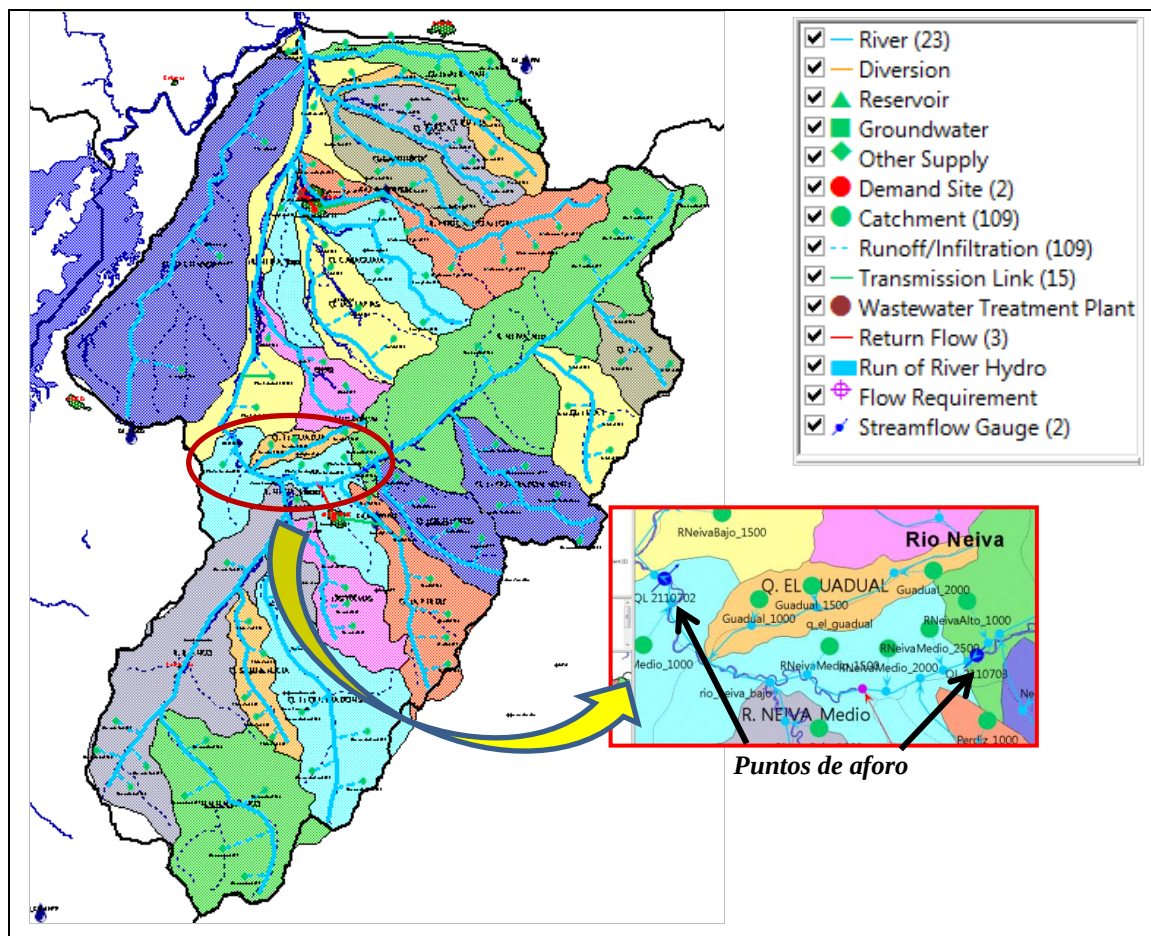
Dimensión de cambio	identificación	Descripción	Comentarios	Rangos	Niveles	Fuente de información	Variables en WEAP	Objetos en WEAP	Métricas de desempeño
	Corrida Histórica base	Corridas a futuro sin estrategia			1				
	Clima	Escenarios de cambio climático	Precipitación Temperatura	X	3	NCAR	Climate / Temp; Precip	Catchments	Cambios en caudales – Oferta Hídrica
	Urbano Rural	Cambio demográfico Cambio demográfico	Crecimiento Alto Crecimiento Medio Crecimiento Bajo Crecimiento Alto Crecimiento Medio Crecimiento Bajo	% % % % % %	3	DANE	Water use/Annual Activity Level Water use/Annual Activity Level	Demand nodes Demand nodes	

Tabla 10. Lista de incertidumbres y estrategias de adaptación caracterizadas en WEAP

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información de entrada en la herramienta WEAP, se generó el Modelo hidrológico y de gestión del agua para la Cuenca del Río Neiva que representa las condiciones históricas y actuales (Figura 5).

Figura 5. Modelo hidrológico y de gestión del agua para la Cuenca del Rio Neiva



Fuente: Autor de la Tesis, 2017

Como los modelos son una representación de la realidad, y específicamente en hidrología simulan el ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica, se obtiene así, la representación de caudales y operaciones de obras de infraestructura hídrica que sean similares a series

históricas. Para que esto se logre con éxito, se recurre a ajustar parámetros hidrológicos de calibración.

Los parámetros ajustados en el modelo hidrológico son (Tabla 11): coeficiente de cultivo (kc), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad hidráulica en la zona de raíces (RZC), la conductividad hidráulica en la zona profunda (DC), la dirección preferencial del flujo (PDF), capacidad de retención de humedad en la capa superior (SWC) y en la capa profunda (DWC).

Tabla 11. Parámetros de calibración en WEAP

Cobertura	Kc	RRF		RZC (mm/mes)		PDF		SWC (mm)	
	Rango	Rango Oriental	Rango Valle	Rango Oriental	Rango Valle	Oriental	Valle	Oriental	Valle
Aguas Abiertas	1 - 1.2	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.6	0.6	280	320
Arroz	0.8 - 1.2	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0	0	320	360
Bosque	0.8 - 1.2	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.4	0.4	360	400
Cafe	1.2 - 1.2	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.5	0.5	320	360
Cultivos Agrícolas	0.8 - 1.1	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.5	0.5	280	320
Paramo	0.8 - 1.1	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	15	15	380	420
Pastos	1 - 1	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.6	0.6	320	360
Zona Urbana	1 - 1	3.3 - 4	3 - 4	180 - 202.5	202.5 - 225	0.55	0.55	392	432

Parámetro	Oriental	Valle
DC	360 mm/mes	360 mm/mes
DWC	1540 mm	1540 mm
Z1	35%	40%
Z2	35%	30%

La calibración fue evaluada a través de tres métricas estadísticas de desempeño: el índice de Nash Sutcliffe - que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos observados, el BIAS - que calcula el sesgo de los datos simulados con respecto a los datos observados y el Error Cuadrático Medio (RMSE) el cual mide la diferencia residual agregada entre observados y simulados.

Las métricas de desempeño aplicadas al modelo hidrológico de la Cuenca del Río Neiva, muestran la correlación entre los caudales simulados y observados en las estaciones analizadas. Los índices estadísticos de Nash = 97.07 y PBIAS = 3.46 evidencian dicha correlación en las dos estaciones de aforo del IDEAM, las cuales fueron utilizadas para la calibración del modelo. (Figura 6).

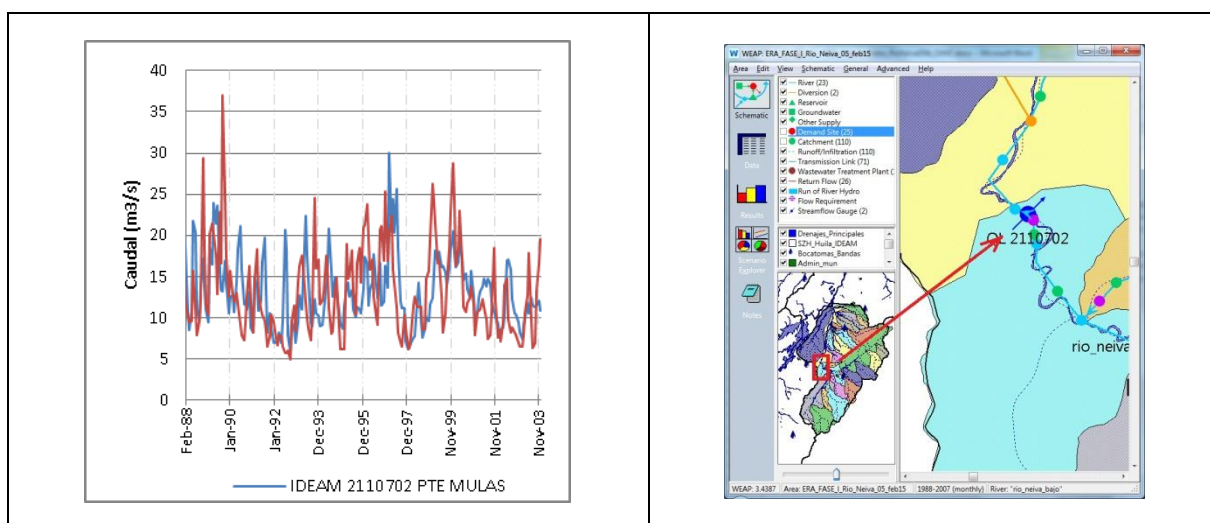
Tabla 12. Caudal promedio de las estaciones de aforo de IDEAM

Estación		Serie Histórica	Promedio (m ³ /s)
Código	Nombre		
21107030	El Casil	1973 - 2008	5.12
21107020	Puente Mulas	1970 - 2007	15.28

Fuente: IDEAM – Estaciones de aforo.

En el proceso de obtención de los resultados de los escenarios planteados, se generaron unos favoritos en WEAP y una macro en Excel que activo en WEAP el efecto de la estrategia en contraste con las incertidumbres, desarrollándose nueve (9) corridas en total y creando una pestaña denominada salidas en la macro de Excel con la información de los resultados de las nueve corridas.

Figura 6. Caudales simulados y observados del modelo hidrológico para la Cuenca del Río Neiva



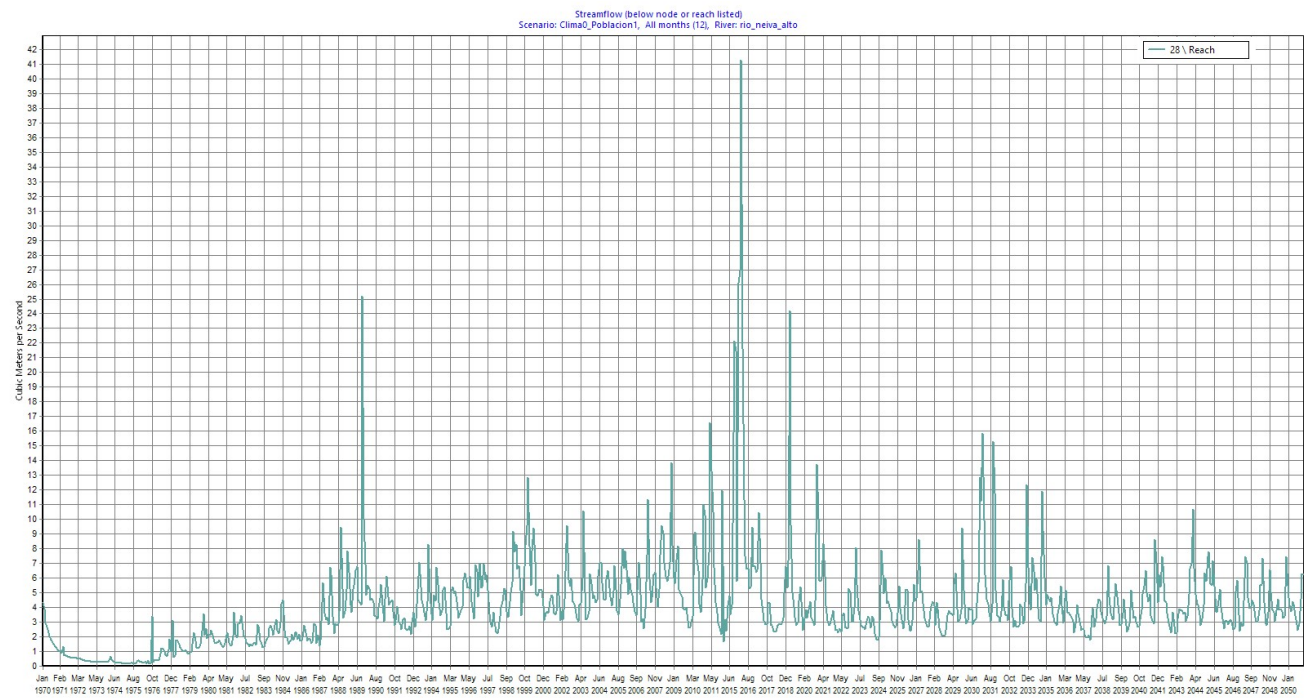
Se realizó la selección de unos favoritos dentro de WEAP, para la obtención de las gráficas de mayor relevancia dentro de la Cuenca del Río Neiva, en donde se evaluó la oferta hídrica y la satisfacción de la demanda tanto urbana y rural.

Tabla 13. Lista de favoritos en WEAP

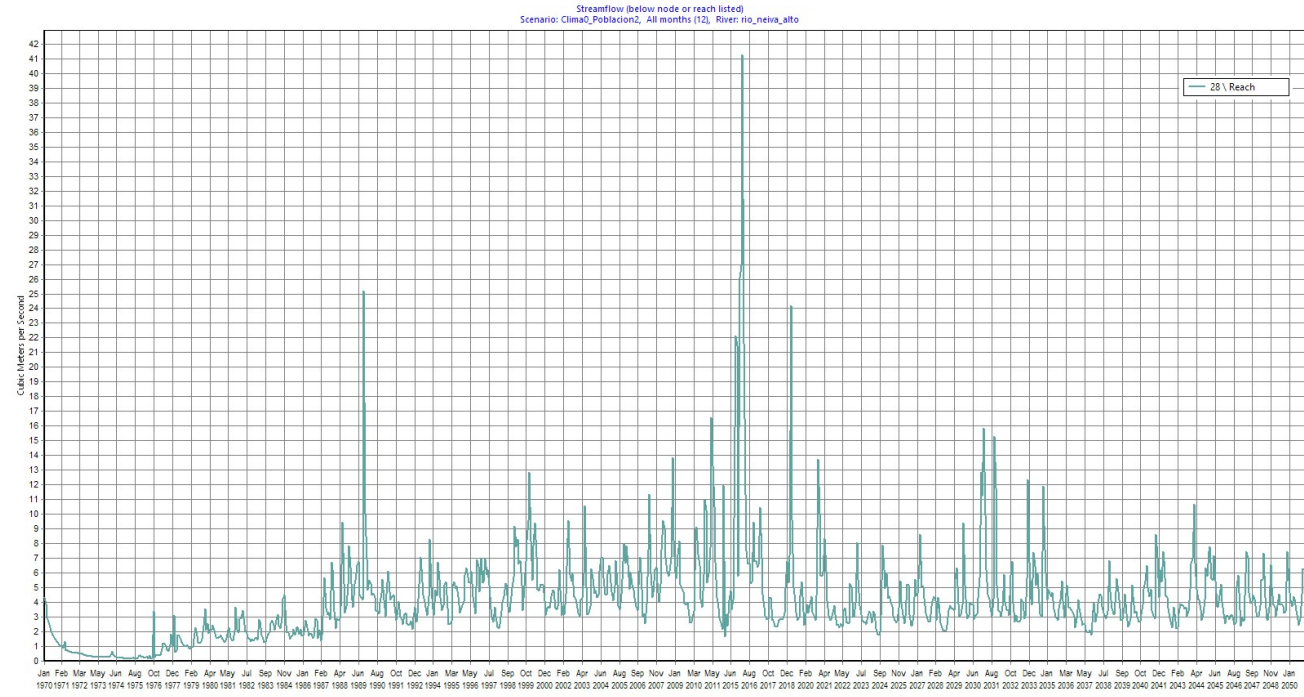
Aspecto a evaluar	Favoritos (WEAP)	Numero Filas
Oferta Hídrica	001 El Casil 2110703	1
Oferta Hídrica	002 Puente Mulas 2110702	1
Oferta Hídrica	003 Q Microcuencas	23
Oferta Hídrica	004 Q Cabecera	24
Satisfacción Demanda Urbana y Rural	005 Demandas Urbanas y Rurales	26
Satisfacción Demanda Urbana y Rural	0061 Cobertura Demandas Urbanas y Rurales	27
Oferta Hídrica	007 Curva Gastos El Casil 2110703	1
Oferta Hídrica	008 Curva Gastos Pte Mulas 2110702	1

A continuación se presenta las gráficas (de la Gráfica 3 a la Gráfica 74) que muestran los resultados de la modelación realizada en WEAP, de acuerdo a los escenarios planteados y a la generación de los favoritos establecidos en la tabla 12.

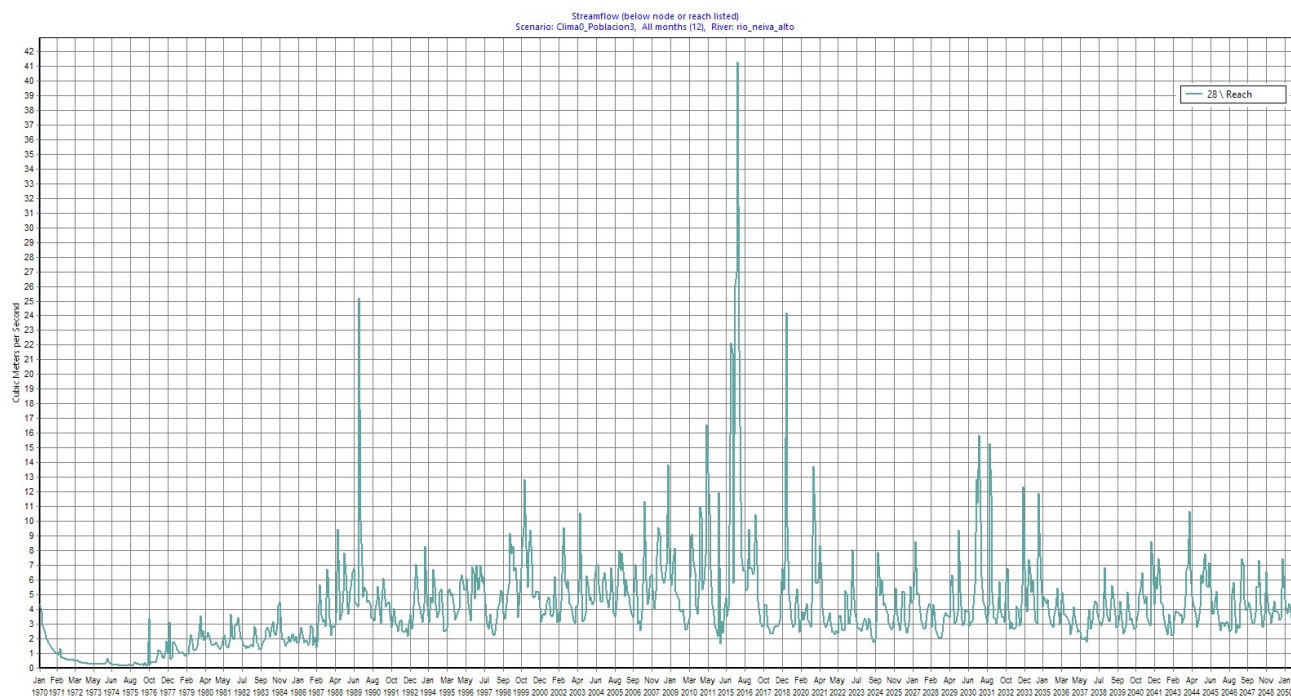
5.1 OFERTA HIDRICA EN LA ESTACIÓN DE AFORO EL CASIL:



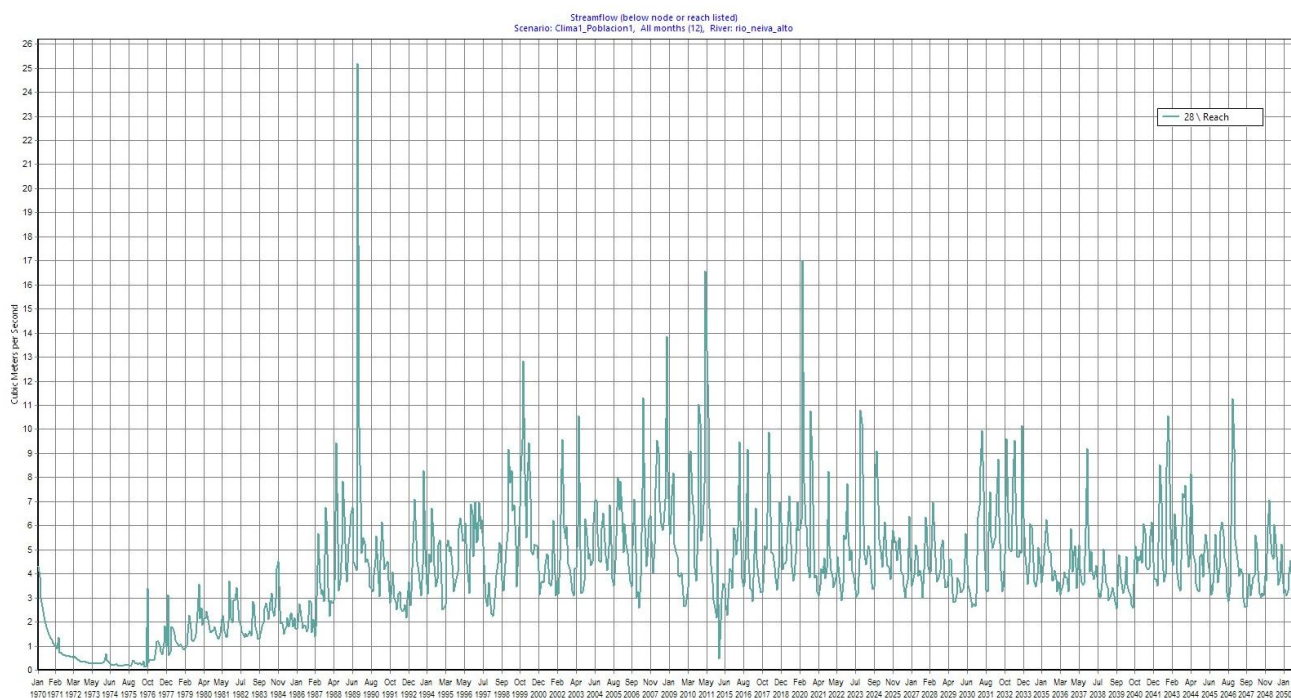
Gráfica 3. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.



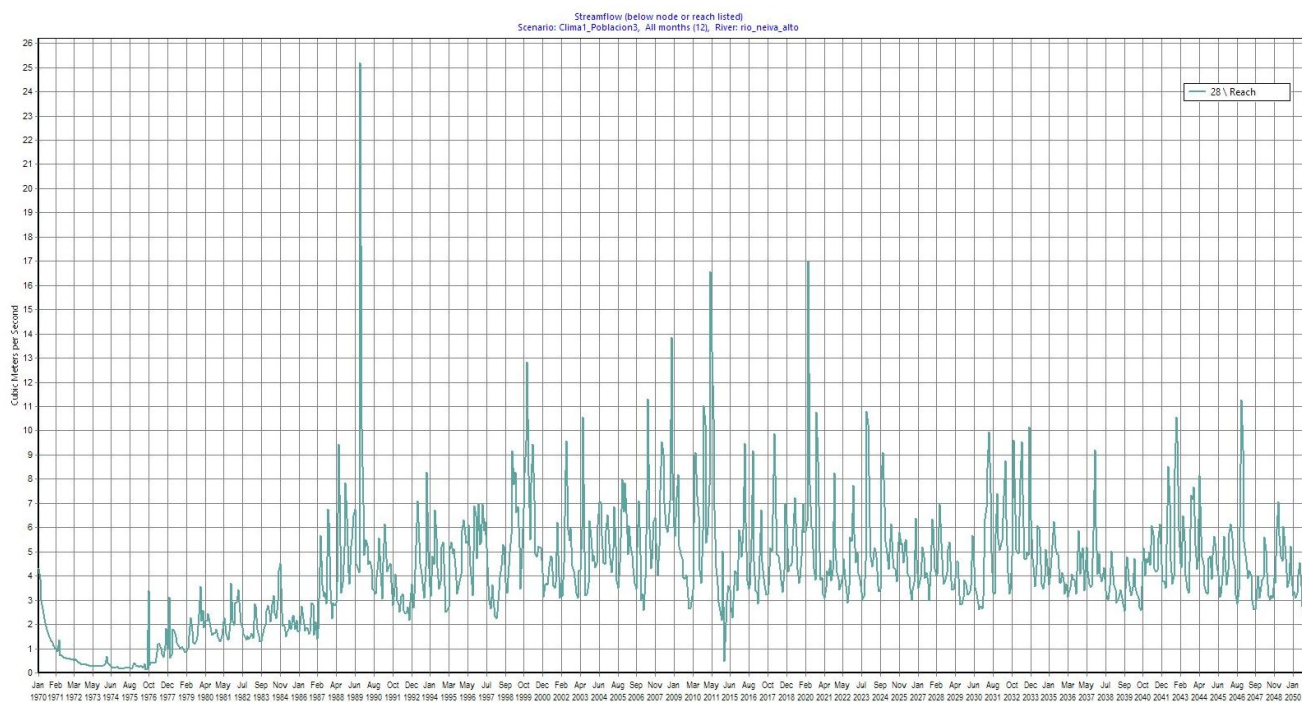
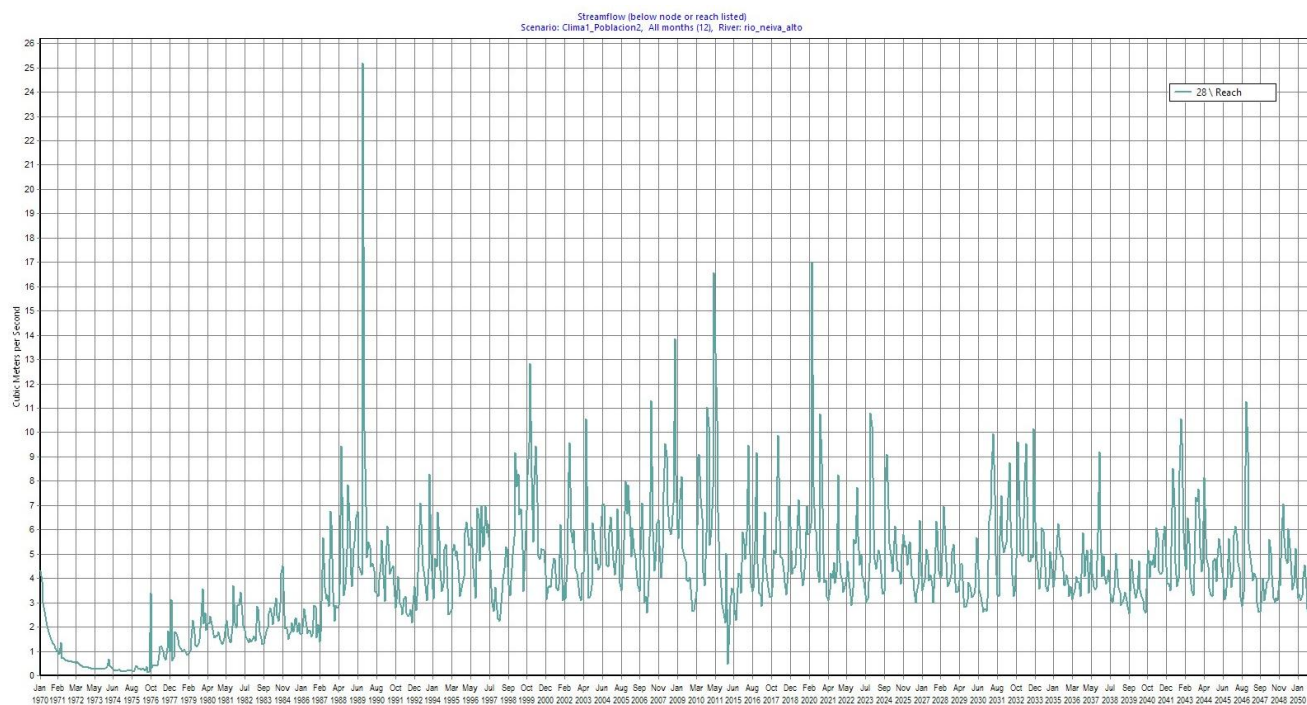
Gráfica 4. Clima histórico y con un incremento en la población medio.

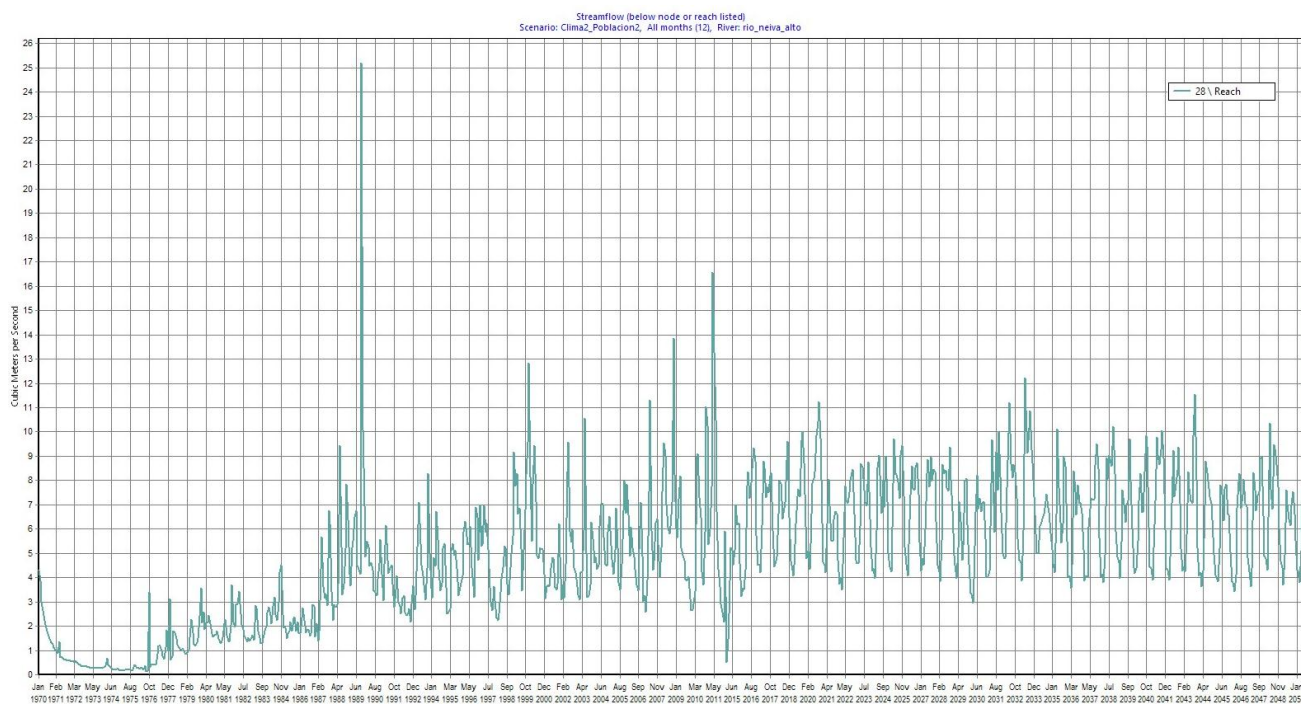
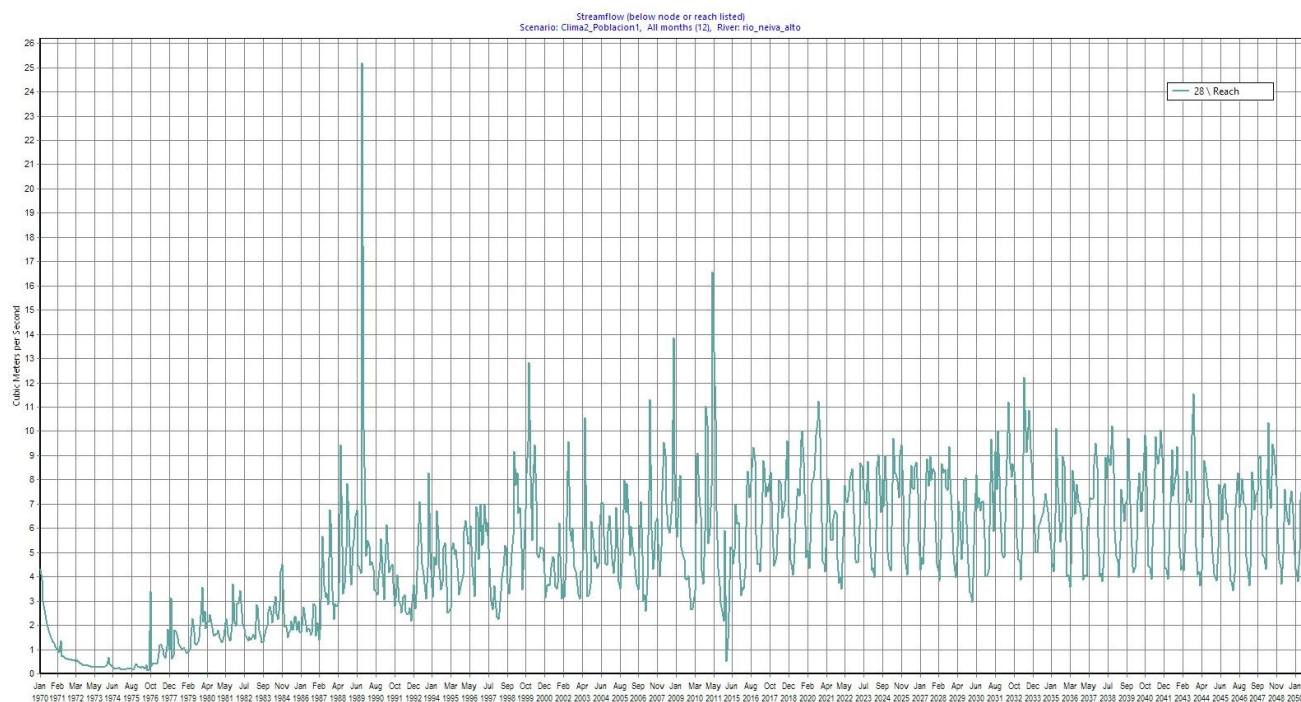


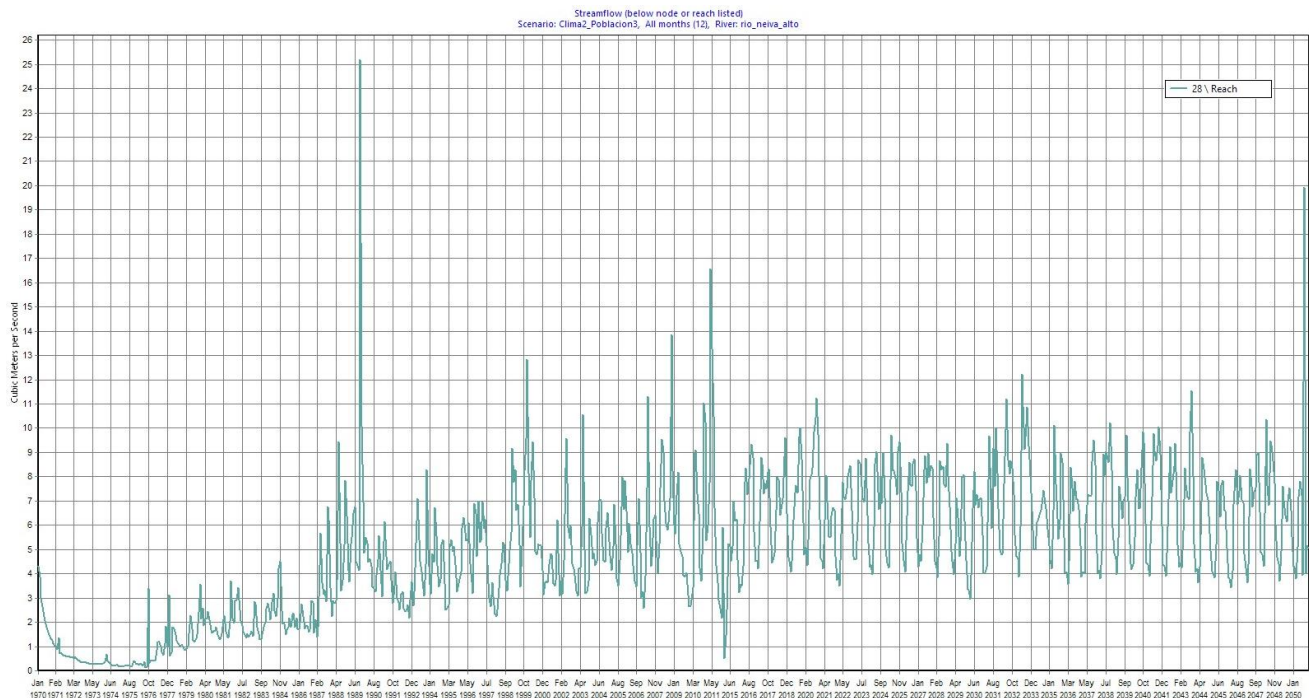
Gráfica 5. Clima histórico y con un incremento en la población alto.



Gráfica 6. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



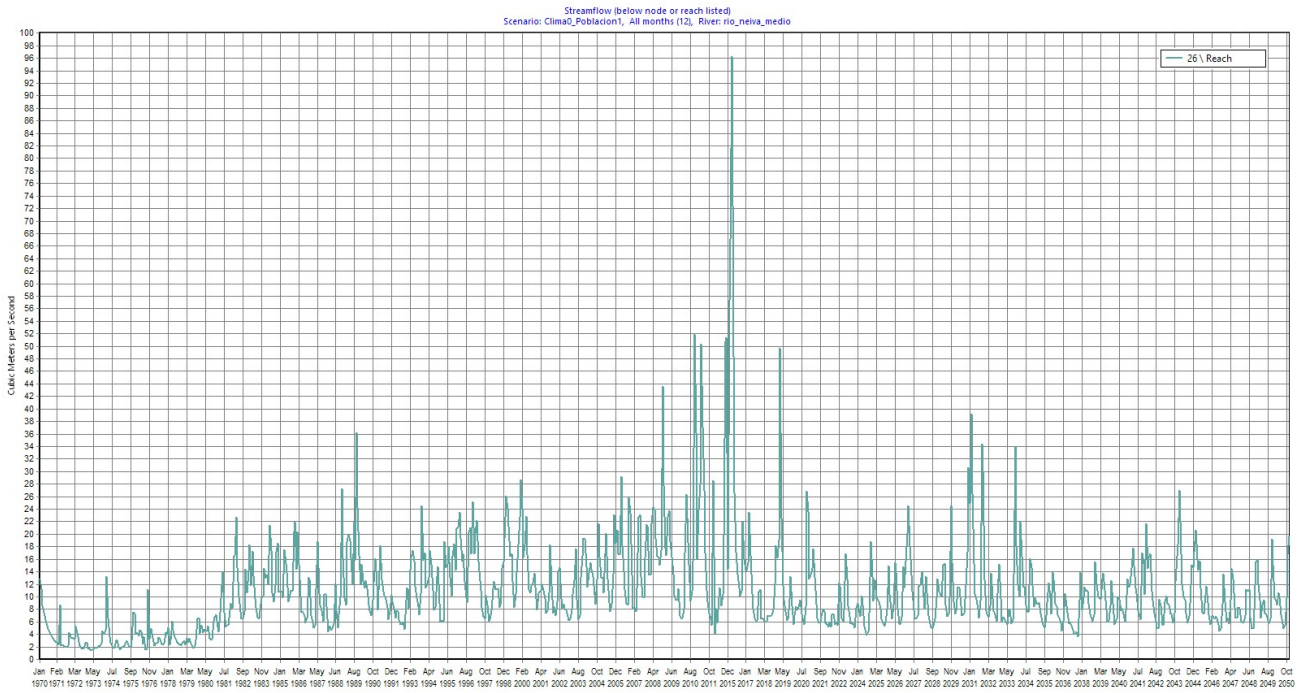




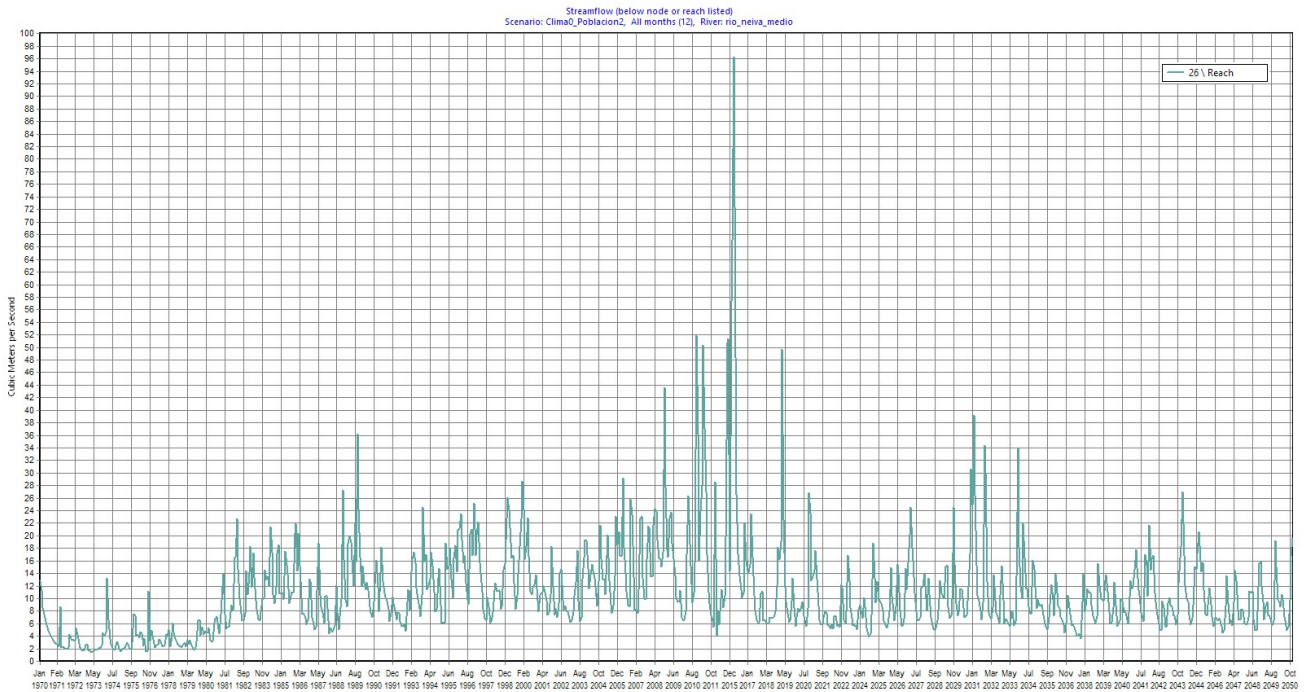
Gráfica 11. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

En las gráficas (de la Gráfica 3 a la Gráfica 11) de favorito de la oferta hídrica en la estación de aforo El Casil se puede observar perturbación en la disponibilidad del recurso hídrico que se presenta en los escenarios de clima y en el escenario poblacional la variación es mínima. Para el clima histórico se establece una fluctuación de la oferta de $25 \text{ m}^3/\text{seg}$ a $2 \text{ m}^3/\text{seg}$, con unos vértices distribuidos en forma similar y a medida que se desplaza en el tiempo, dichos vértices de oferta se disminuyen. Para el clima mínimo se presenta una oscilación en la oferta hídrica de $25 \text{ m}^3/\text{seg}$ a $1 \text{ m}^3/\text{seg}$, con unos picos que se condensan y al igual que el clima histórico se va cerrando la brecha diferencial de la oferta hídrica a medida que se desplaza en el tiempo. En el clima máximo se estableció una irregularidad en la oferta hídrica entre los $25 \text{ m}^3/\text{seg}$ a $1 \text{ m}^3/\text{seg}$, con unos límites que se condensan en forma similar y conservando la fluctuación en promedio entre los $10.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ a $4 \text{ m}^3/\text{seg}$.

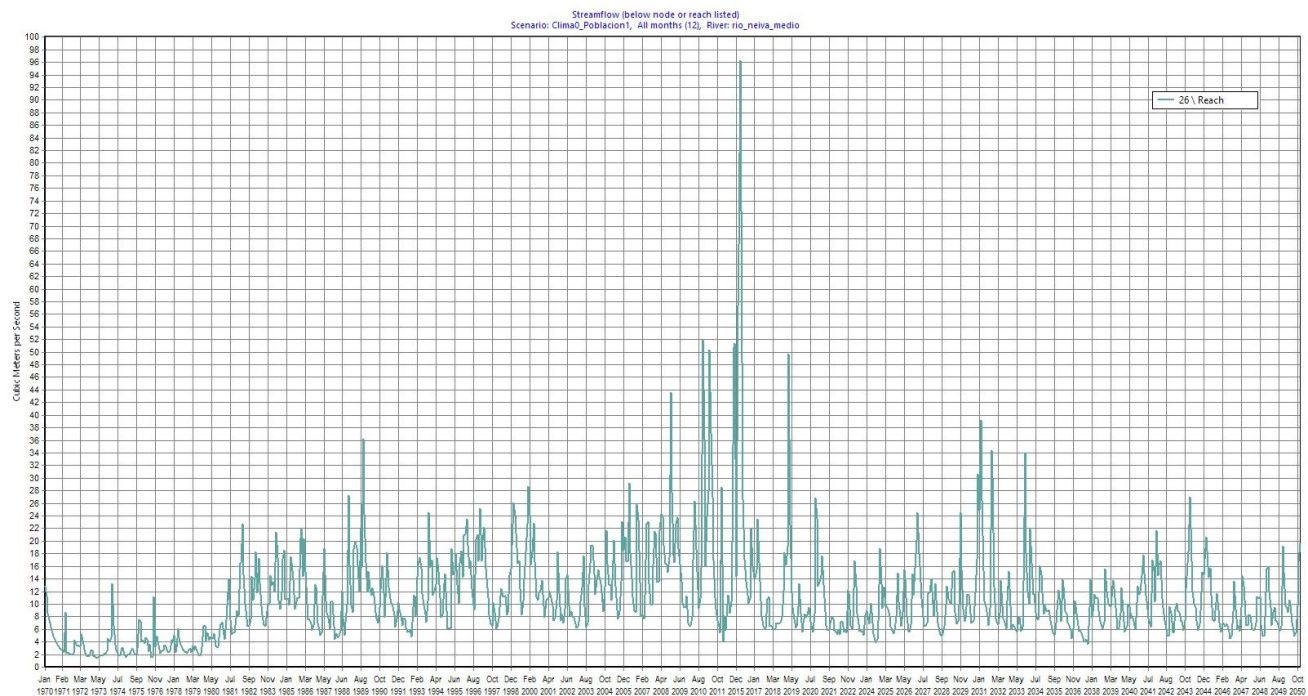
5.2 OFERTA HIDRICA EN LA ESTACIÓN DE AFORO PUENTE MULAS



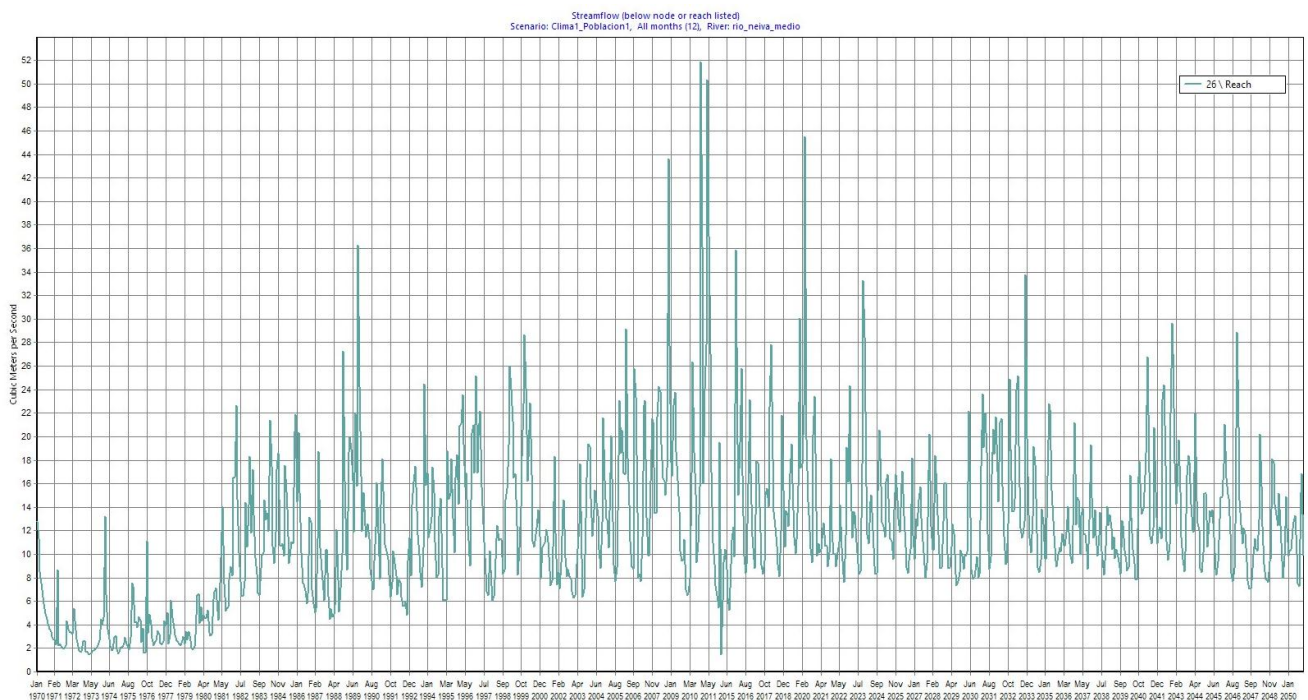
Gráfica 12. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.



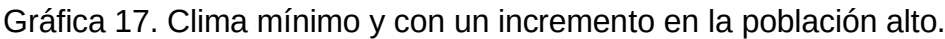
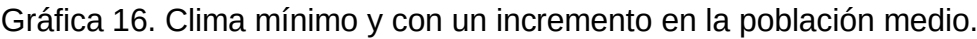
Gráfica 13. Clima histórico y con un incremento en la población medio.

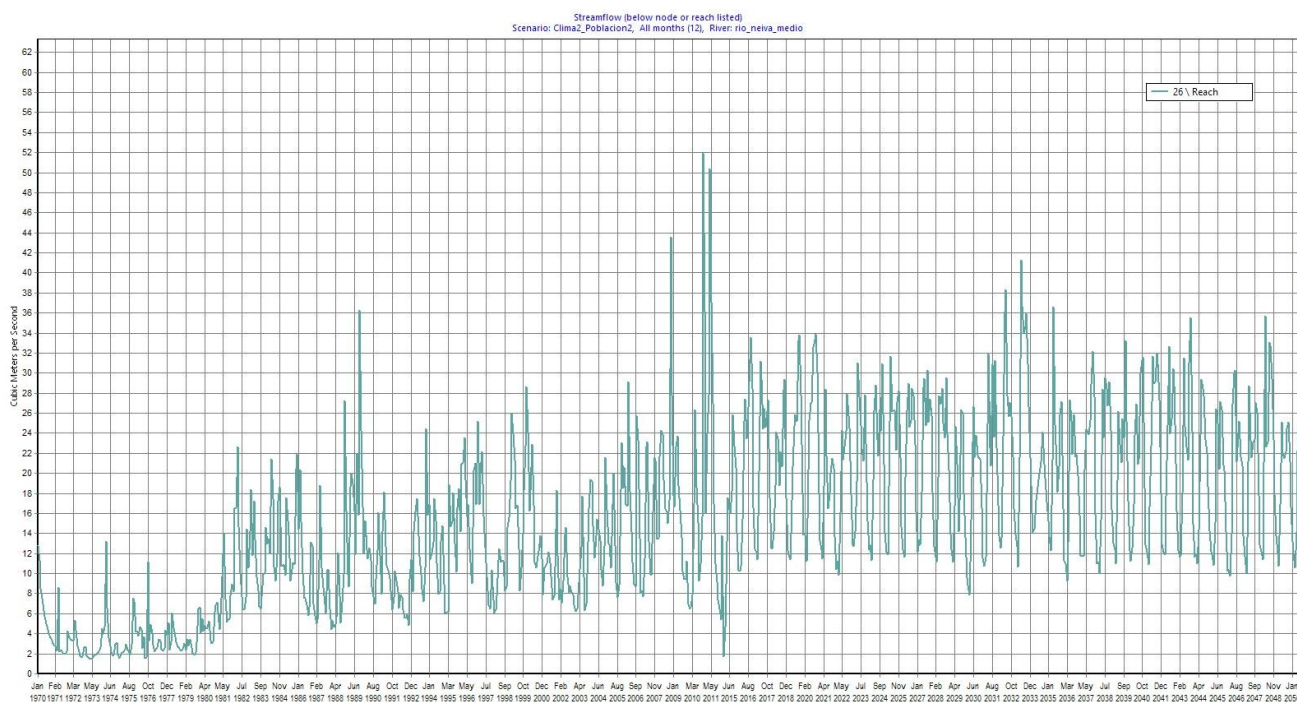
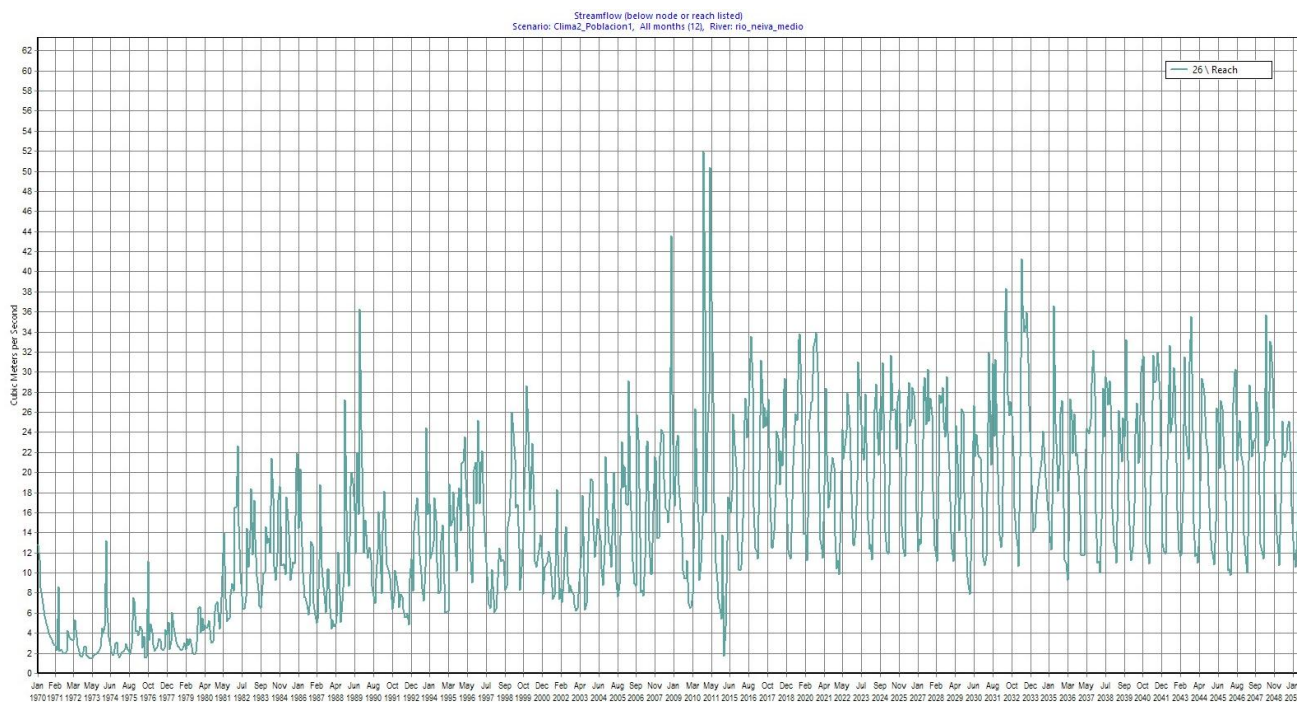


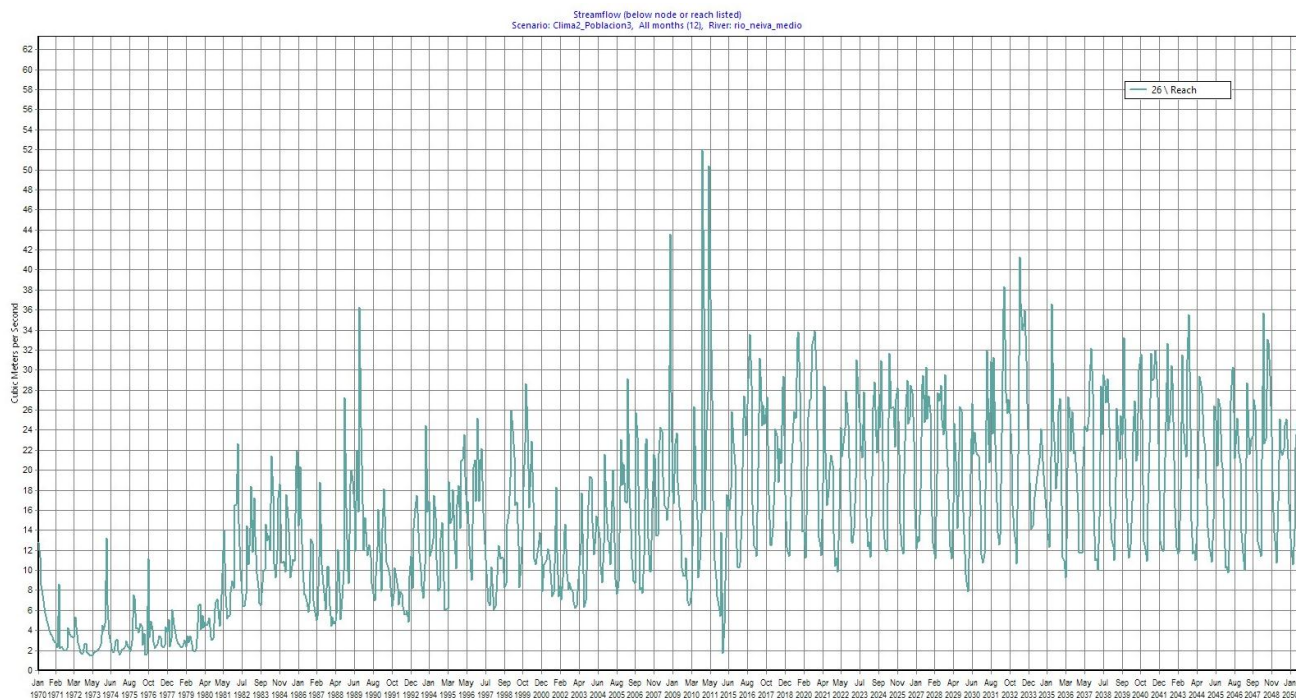
Gráfica 14. Clima histórico y con un incremento en la población alto



Gráfica 15. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



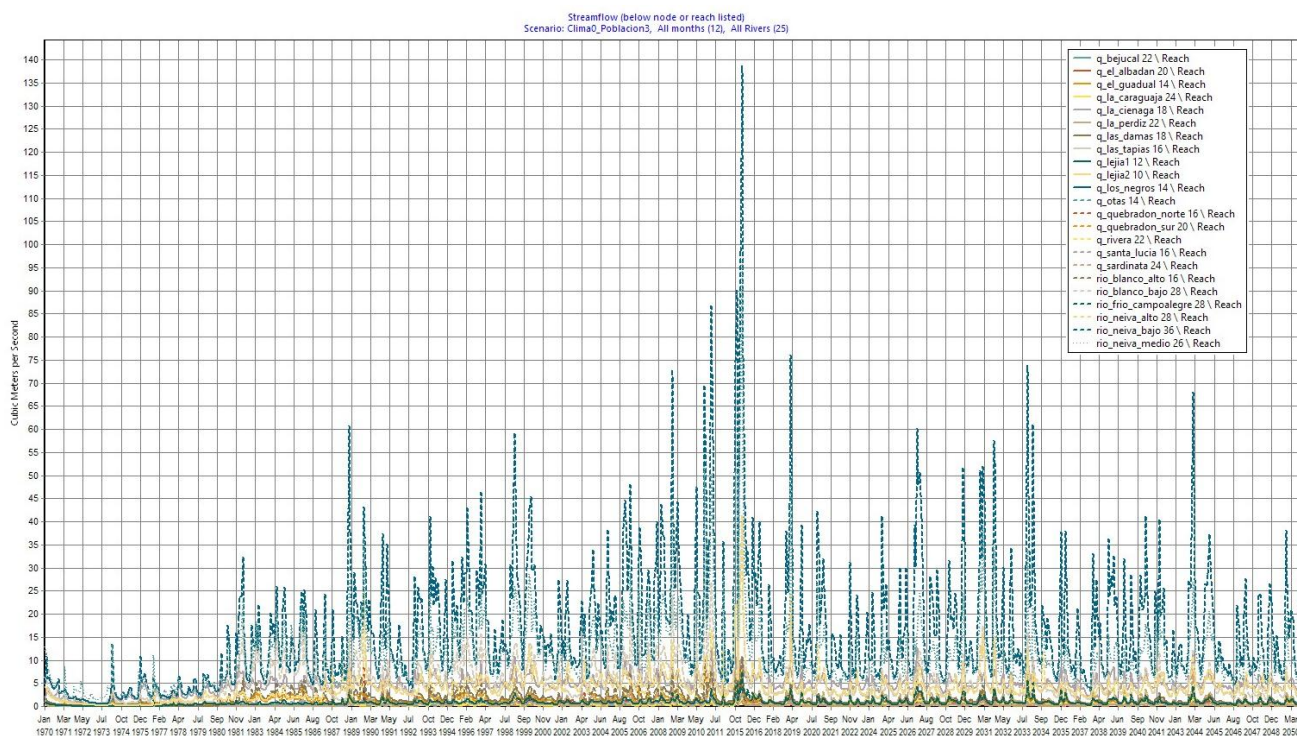




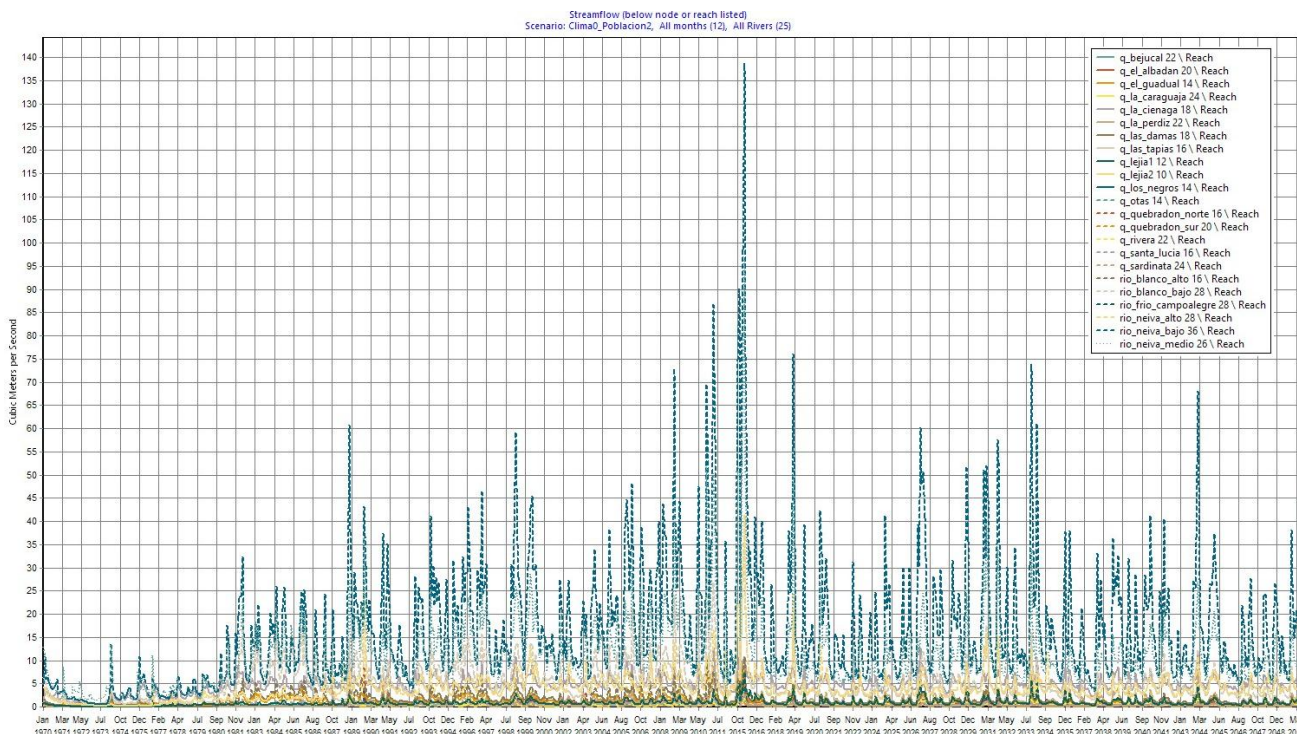
Gráfica 20. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

En el favorito de la oferta hídrica en la estación de aforo Puente Mulas se determinó en las gráficas (de la Gráfica 12 a la Gráfica 20) una irregularidad en la disponibilidad del recurso hídrico que se presenta en los escenarios de clima y en el escenario poblacional la variación es menor. Para el clima histórico se establece una fluctuación de la oferta de 94 m³/seg a 4 m³/seg, con unos límites distribuidos en forma similar y a medida que se desplaza en el tiempo, dichos límites de oferta se disminuyen. Para el clima mínimo se presenta una variación en la oferta hídrica de 50 m³/seg a 7.5m³/seg, con unos vértices que se condensan y al igual que el clima histórico se va cerrando la brecha diferencial de la oferta hídrica a medida que se desplaza en el tiempo. En el clima máximo se estableció una fluctuación en la oferta hídrica entre los 50 m³/seg a 8.3m³/seg, con unos límites que se condensan en forma similar y conservando la fluctuación en promedio entre los 35.0 m³/seg a 8.5m³/seg.

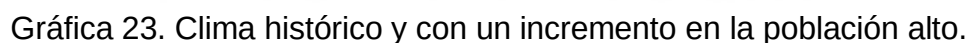
5.3 OFERTA HIDRICA DE LAS MICROCUENCAS

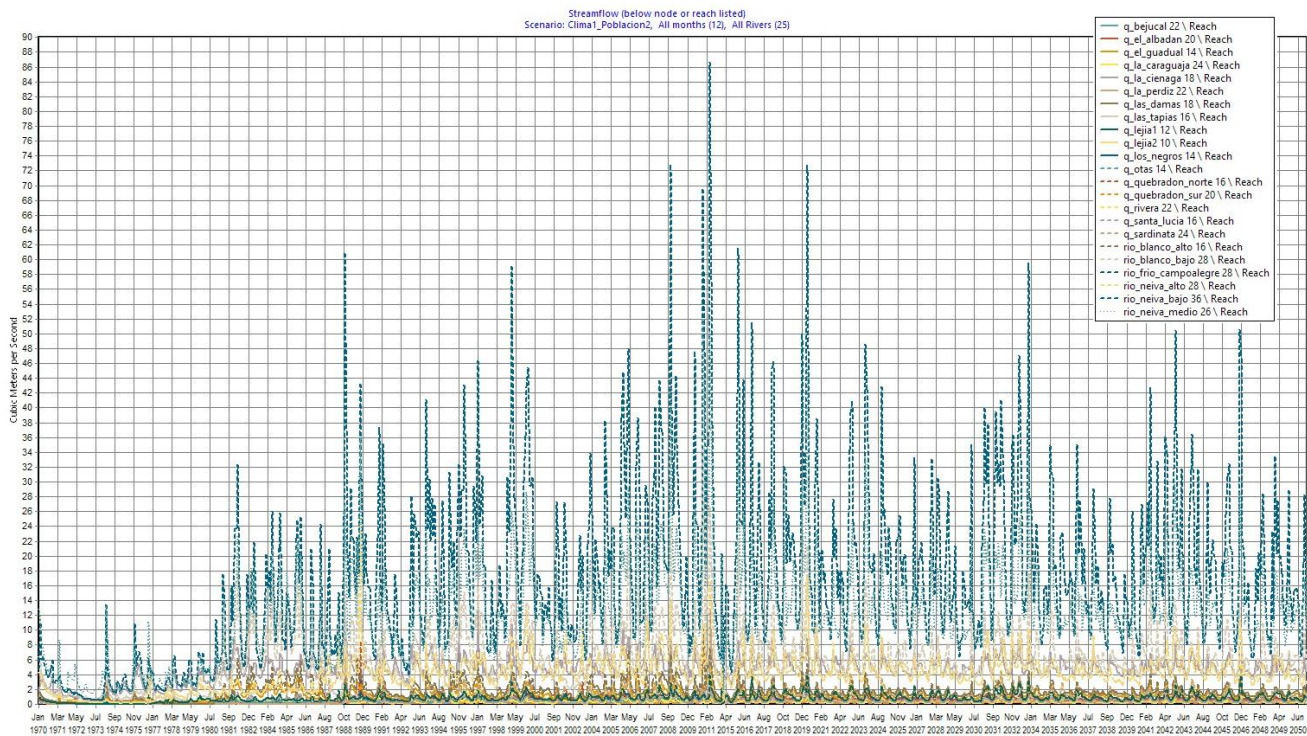


Gráfica 21. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.

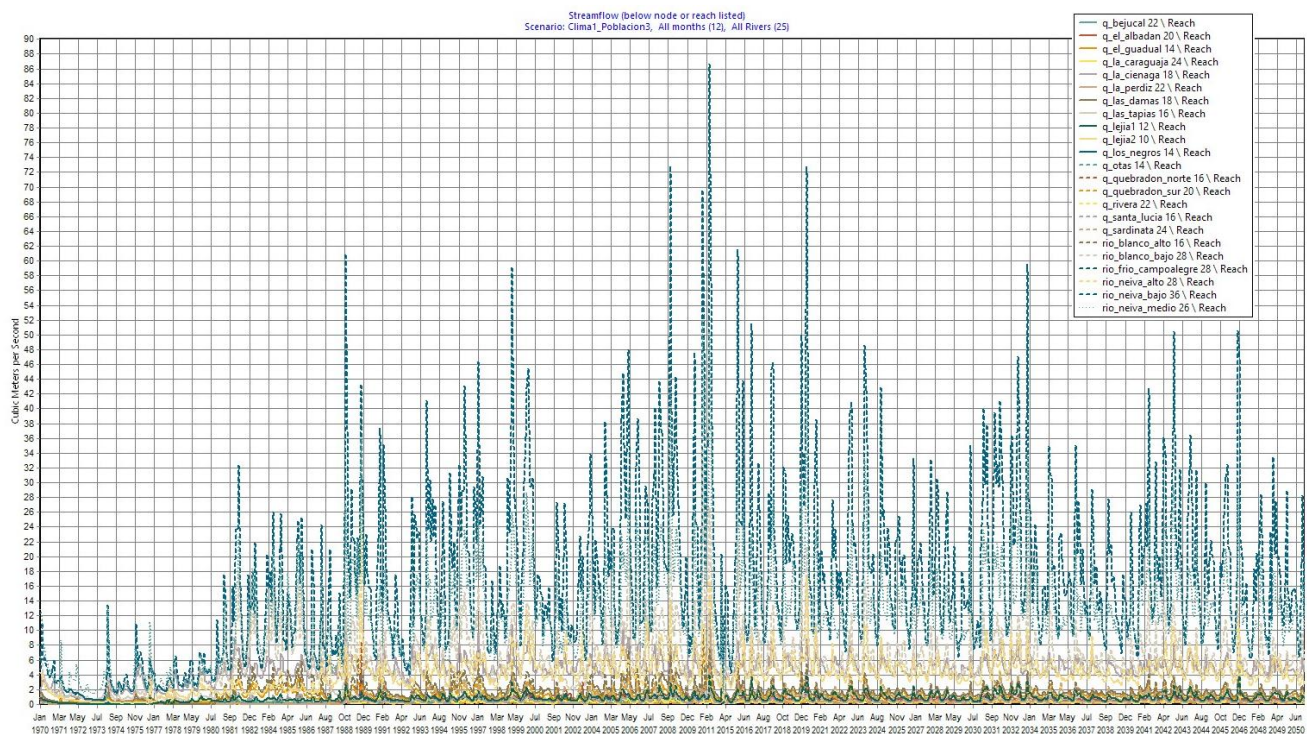


Gráfica 22. Clima histórico y con un incremento en la población medio.

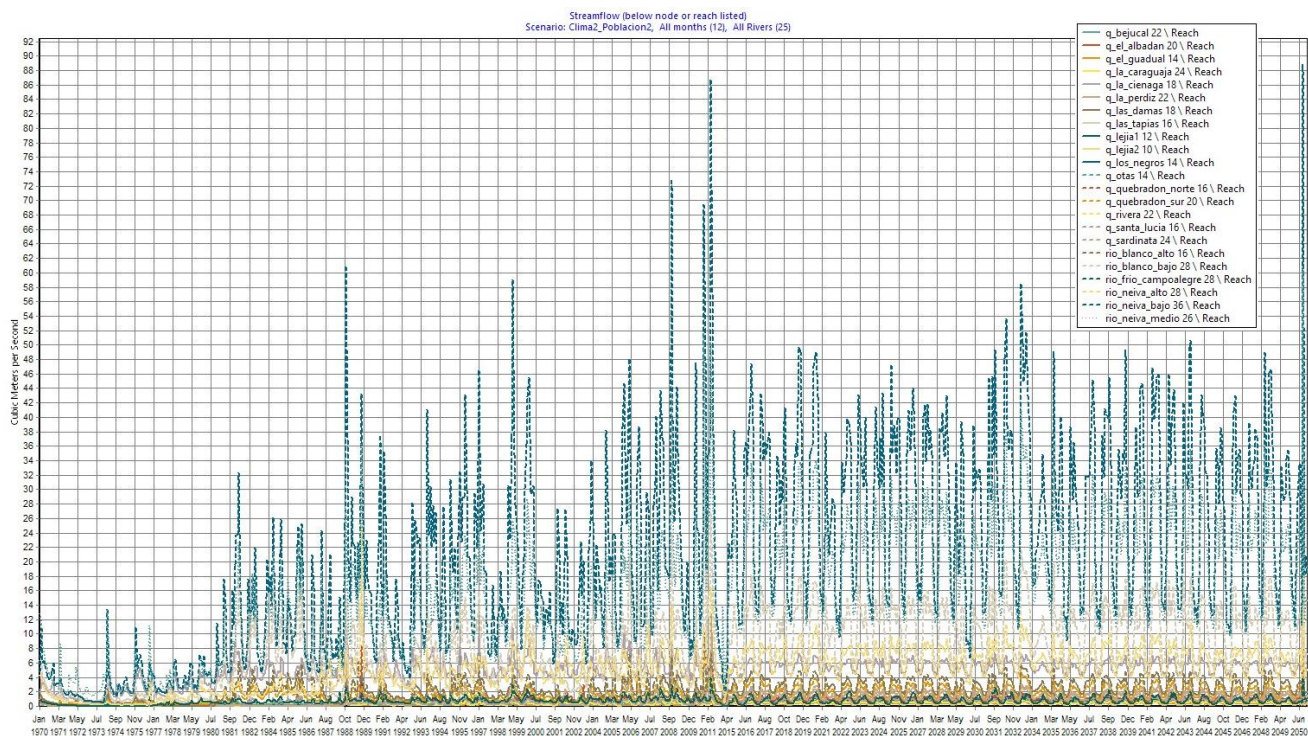
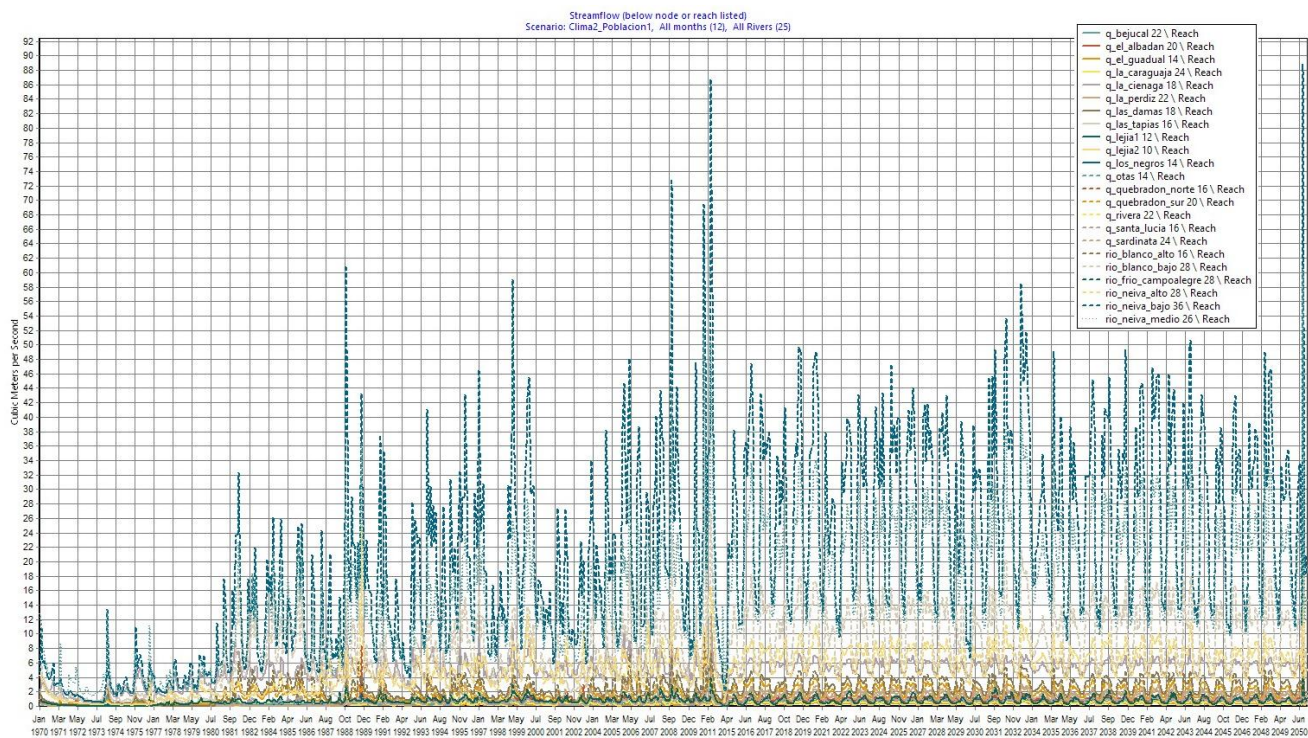


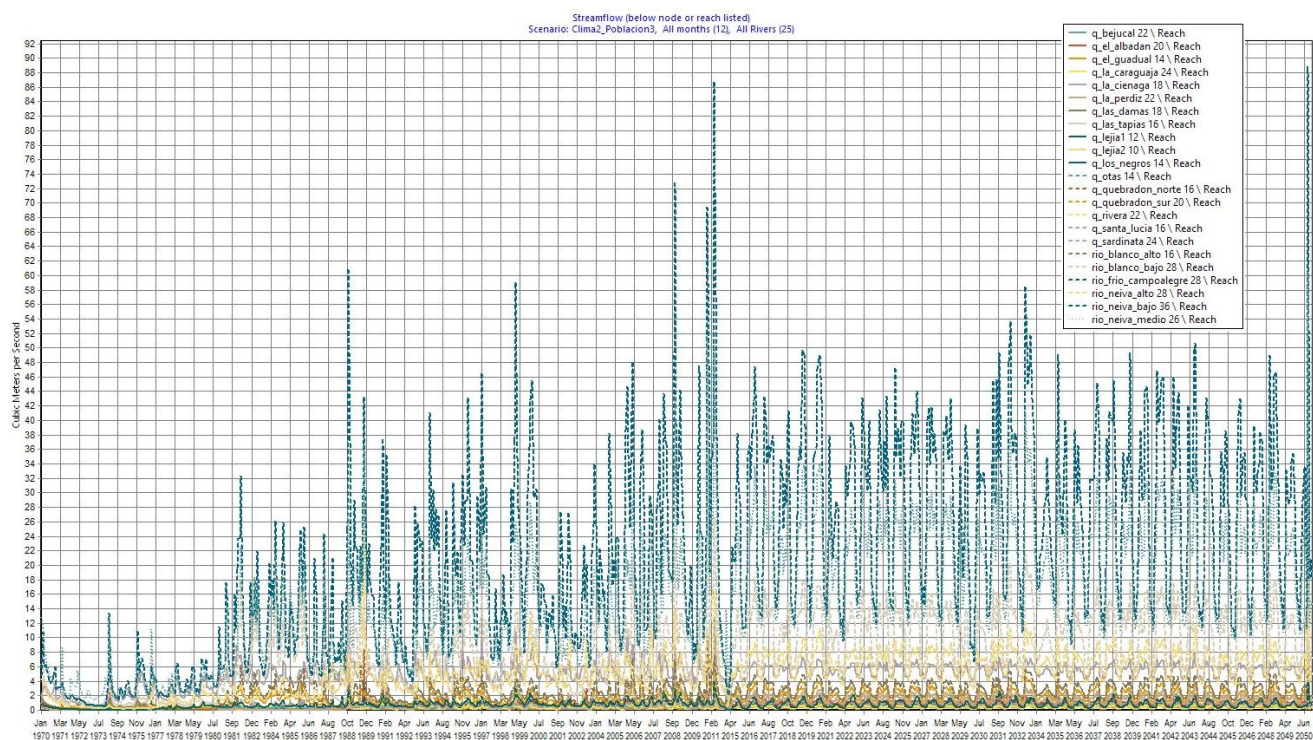


Gráfica 25. Clima mínimo y con un incremento en la población medio.



Gráfica 26. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.





Gráfica 29. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

En las gráficas (de la Gráfica 21 a la Gráfica 29) del favorito de oferta hídrica en las microcuencas del Río Neiva se estableció los diferentes ofrecimientos de cada una de las microcuencas del Río Neiva, en donde se observa el comportamiento irregular de la disponibilidad del recurso hídrico que se presenta en los escenarios de clima y en el escenario poblacional la alteración es mínima. Para el clima histórico se establece las diferentes fluctuaciones de oferta hídrica con unos linderos distribuidos en forma similar y a medida que se desplaza en el tiempo dichas fronteras de oferta hídrica se disminuyen. Para el clima mínimo se presenta una oscilación en la oferta hídrica con unos vértices que se condensan y al contrario del clima histórico se va ampliando la brecha diferencial de la oferta hídrica a medida que se desplaza en el tiempo. En el clima máximo se estableció una variación con unos picos que se condensan en forma similar y conservando las fluctuaciones.

Streamflow (below node or reach listed)
Scenario: Reference, All months (12), All Rivers (25)

Cubic Mts per Second

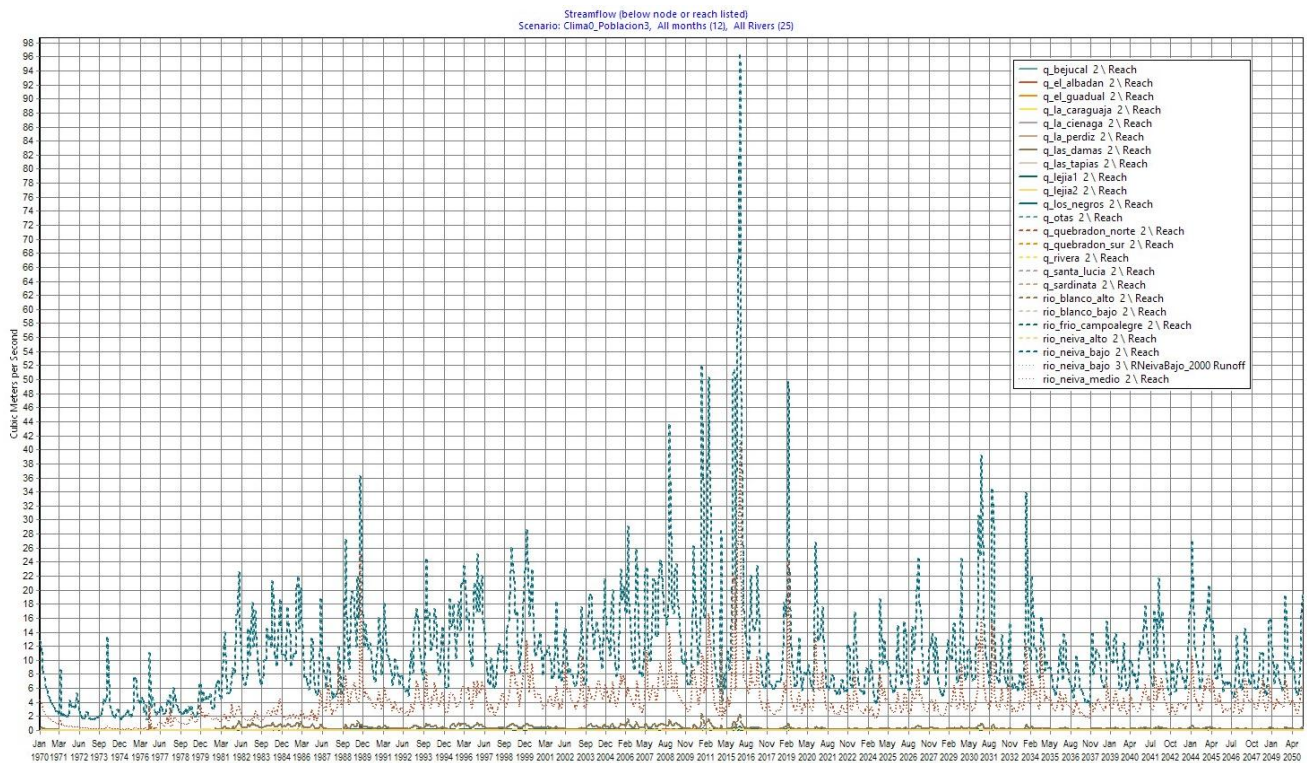
Jan Mar Jun Sep Dec
1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2006 2007 2008 2009 2011 2015 2016 2017 2019 2020 2021 2022 2024 2025 2026 2027 2029 2030 2031 2032 2034 2035 2036 2037 2039 2040 2041 2042 2044 2045 2046 2047 2049 2050

Legend:

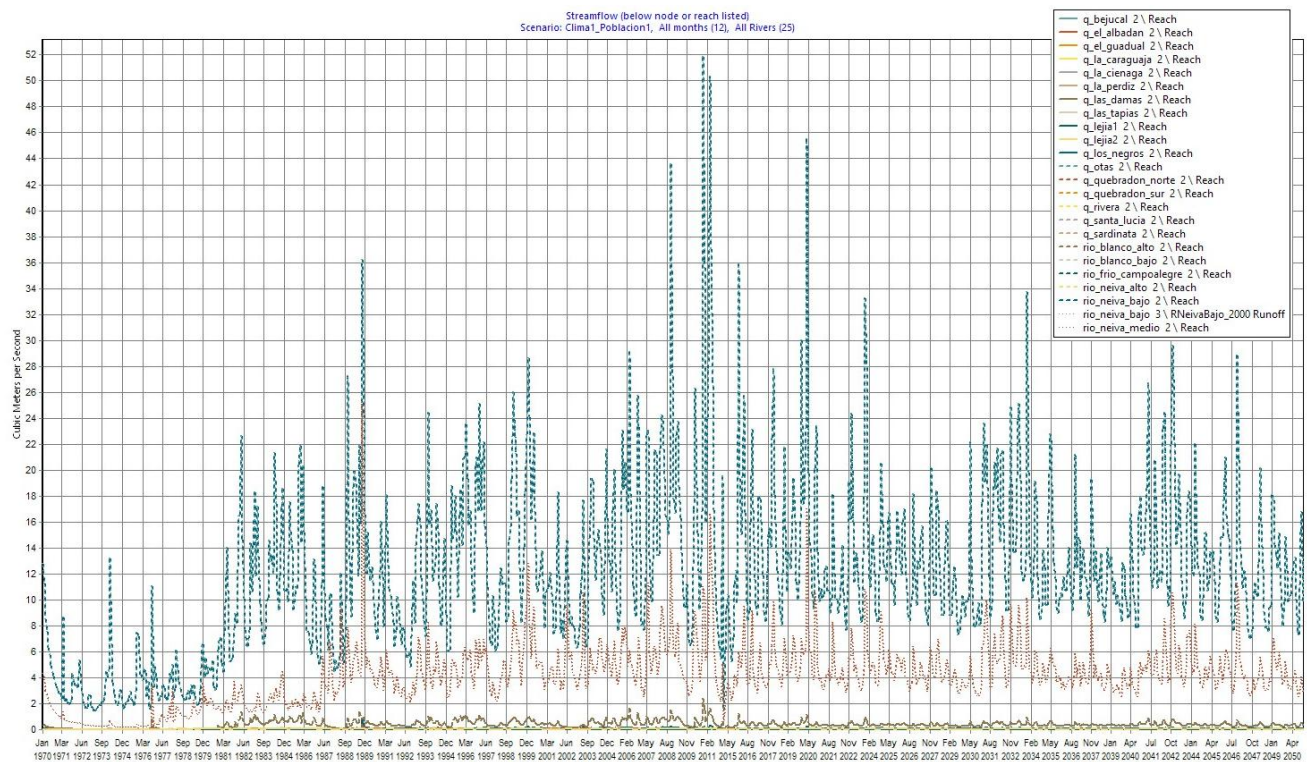
- q.bejucal 2 \ Reach
- q.el_albadan 2 \ Reach
- q.el_guadalupe 2 \ Reach
- q.la_caraguaja 2 \ Reach
- q.la_cienaga 2 \ Reach
- q.la_perdiz 2 \ Reach
- q.las_damas 2 \ Reach
- q.las_tapias 2 \ Reach
- q.leja1 2 \ Reach
- q.leja2 2 \ Reach
- q.los_negros 2 \ Reach
- q.otaz 2 \ Reach
- q.quiebradonorte 2 \ Reach
- q.quiebradonsur 2 \ Reach
- q.rivera 2 \ Reach
- q.santa_jucia 2 \ Reach
- q.sardinata 2 \ Reach
- rio_blanco_alto 2 \ Reach
- rio_blanco_bajo 2 \ Reach
- rio_frio_campoalegre 2 \ Reach
- rio_neiva_alto 2 \ Reach
- rio_neiva_bajo 2 \ Reach
- rio_neiva_bajo_3 \ RNeivaBajo_2000 Runoff
- rio_neiva_medio 2 \ Reach

[illegible]

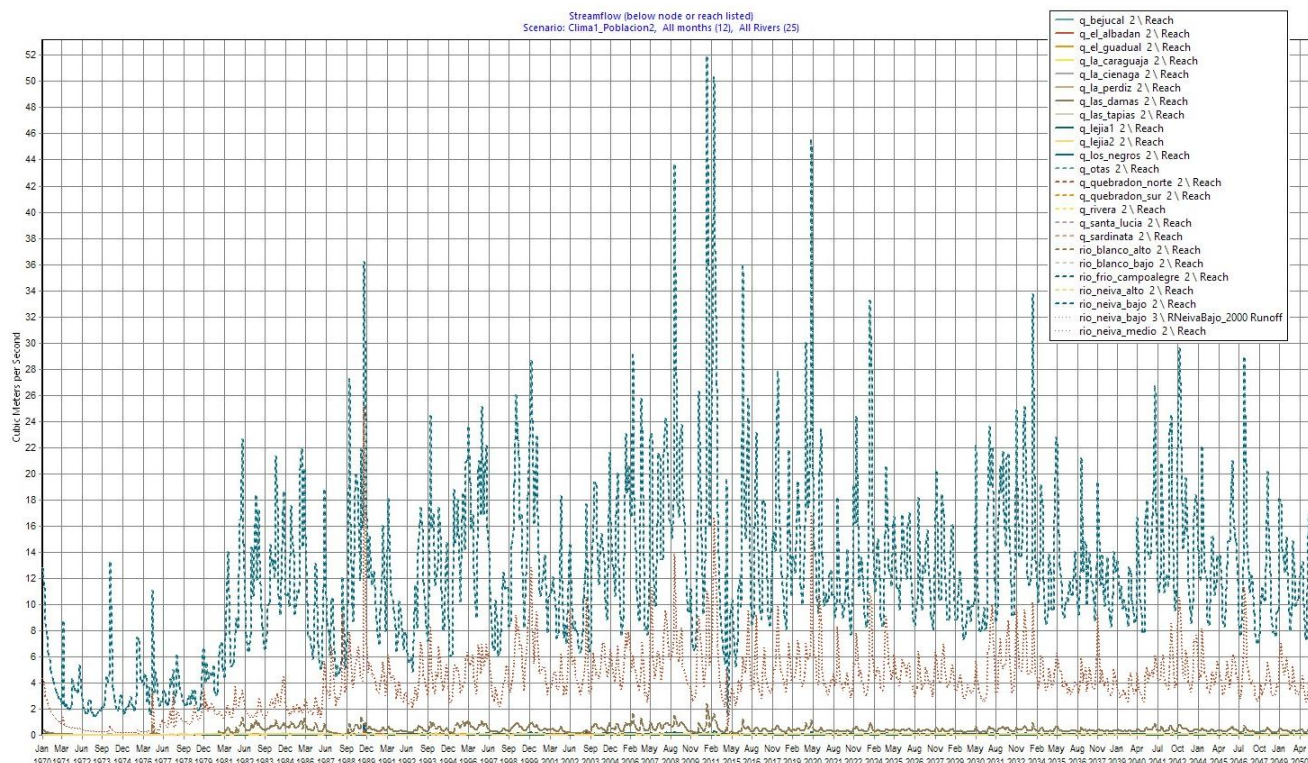
67



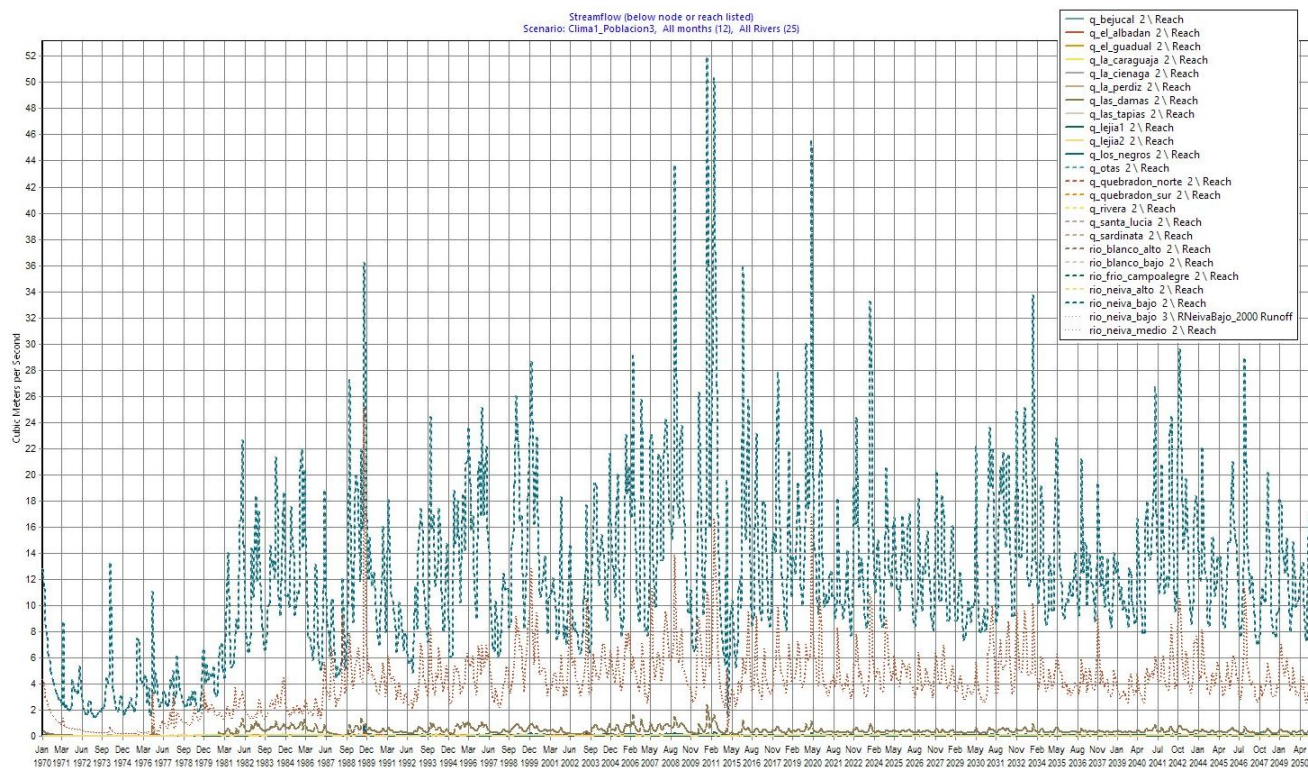
Gráfica 32. Clima histórico y con un incremento en la población alto.



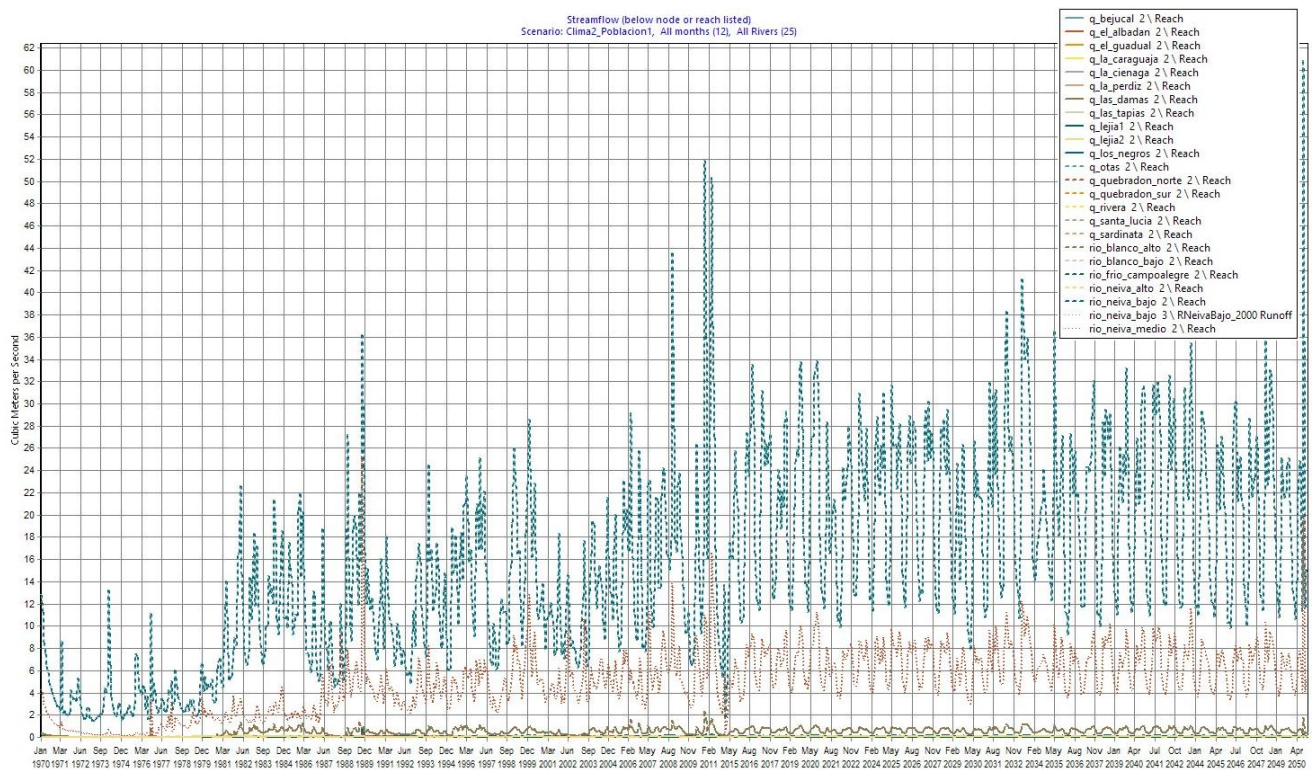
Gráfica 33. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



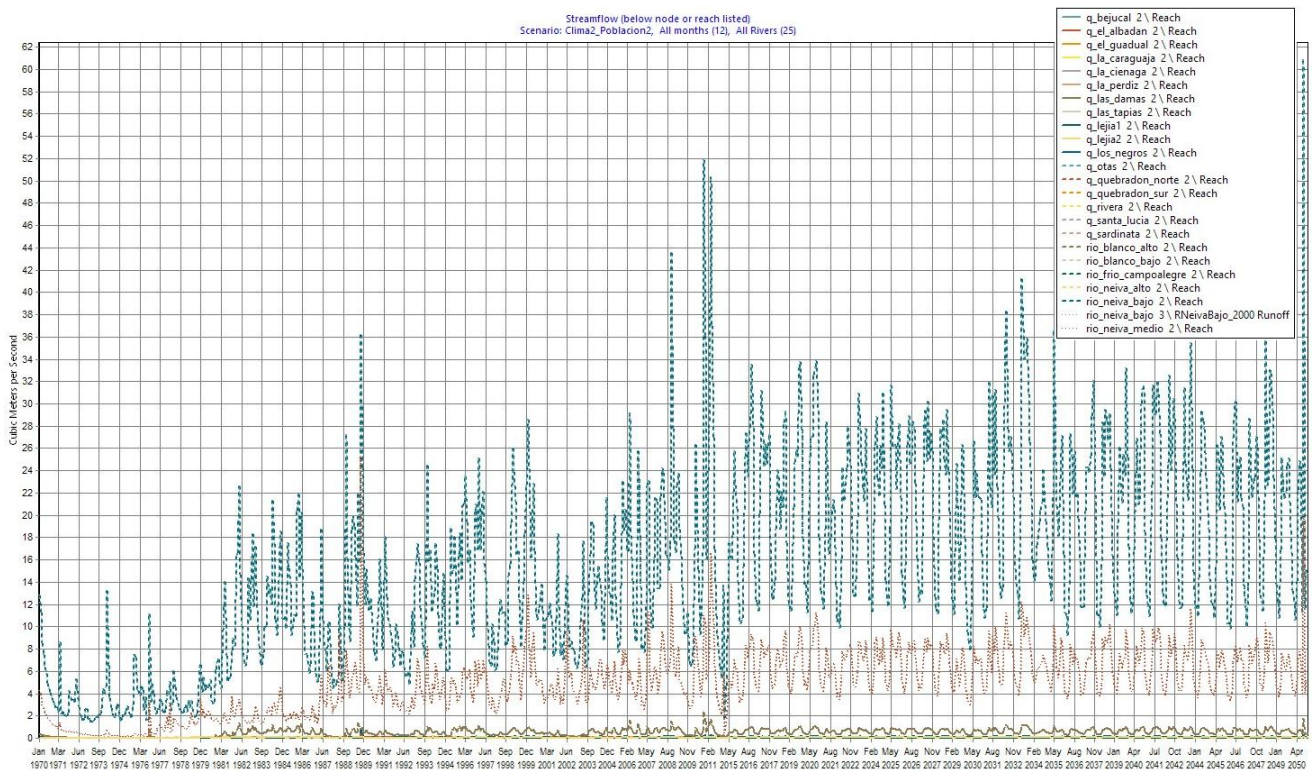
Gráfica 34. Clima mínimo y con un incremento en la población medio.



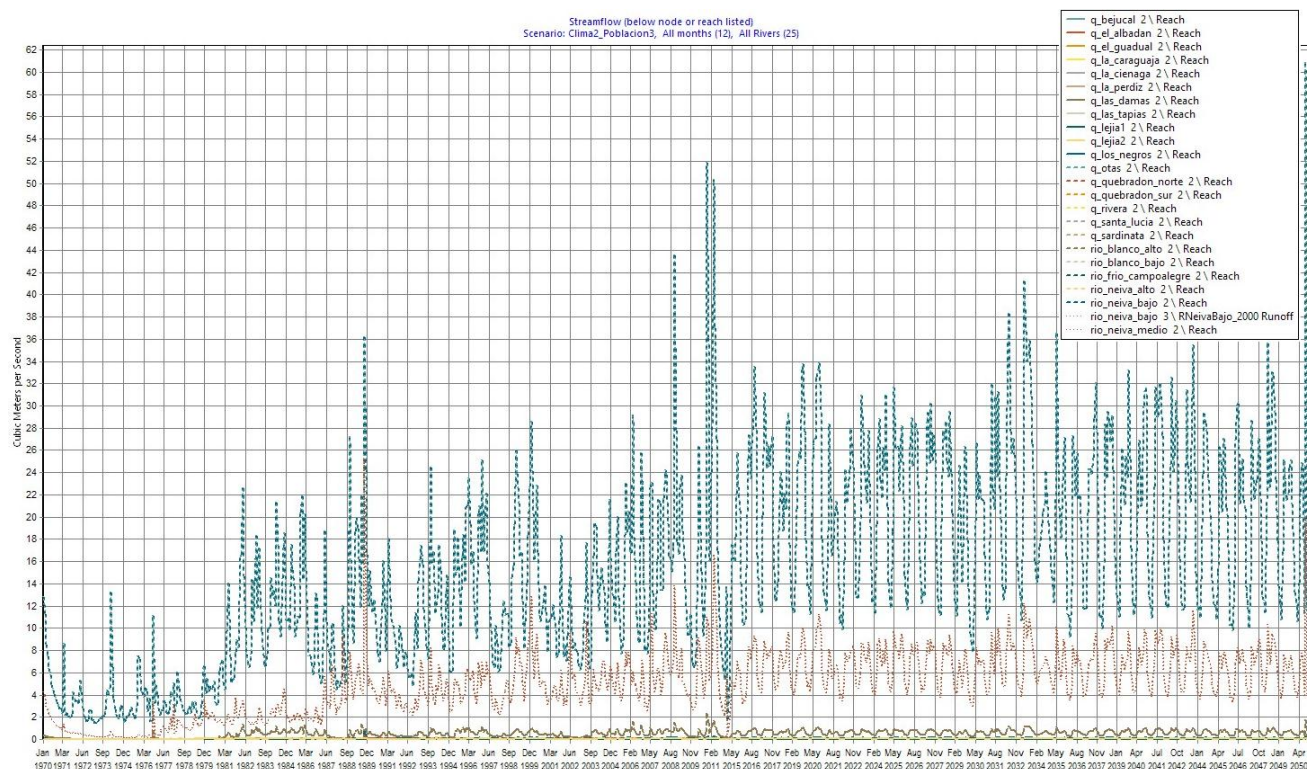
Gráfica 35. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.



Gráfica 36. Clima máximo y con un incremento en la población bajo.



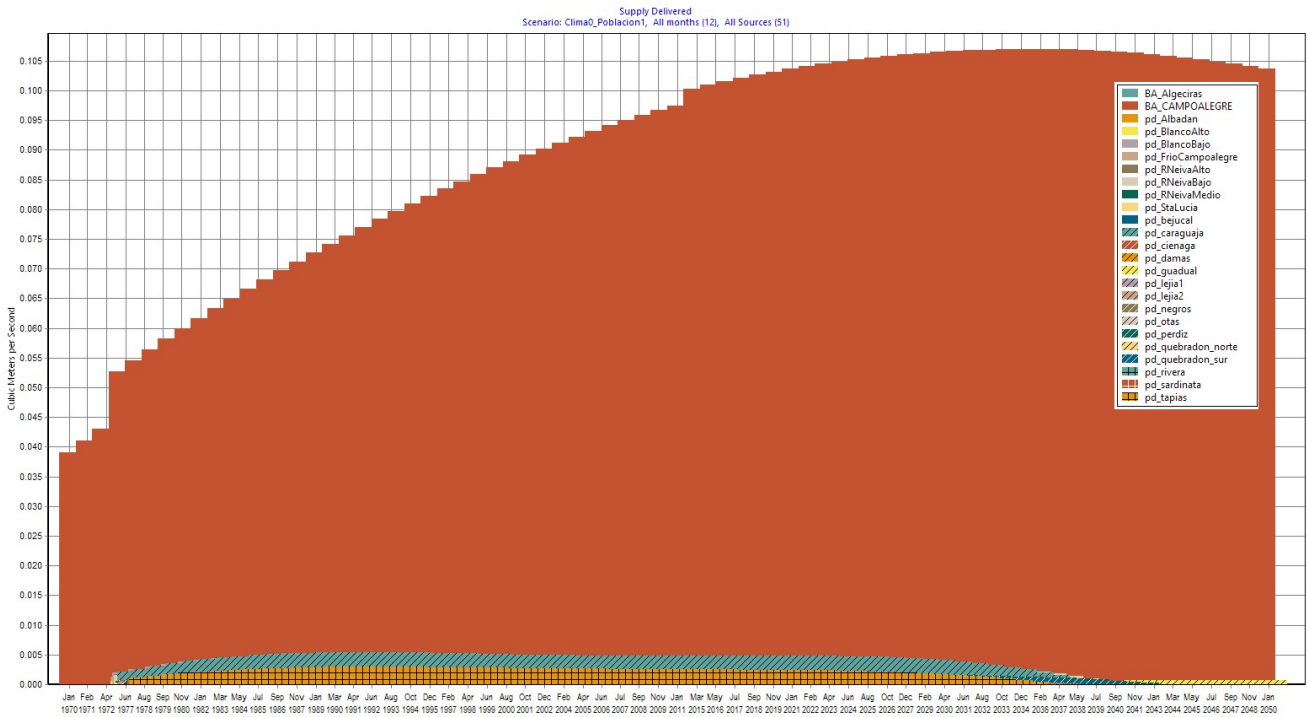
Gráfica 37. Clima máximo y con un incremento en la población medio.



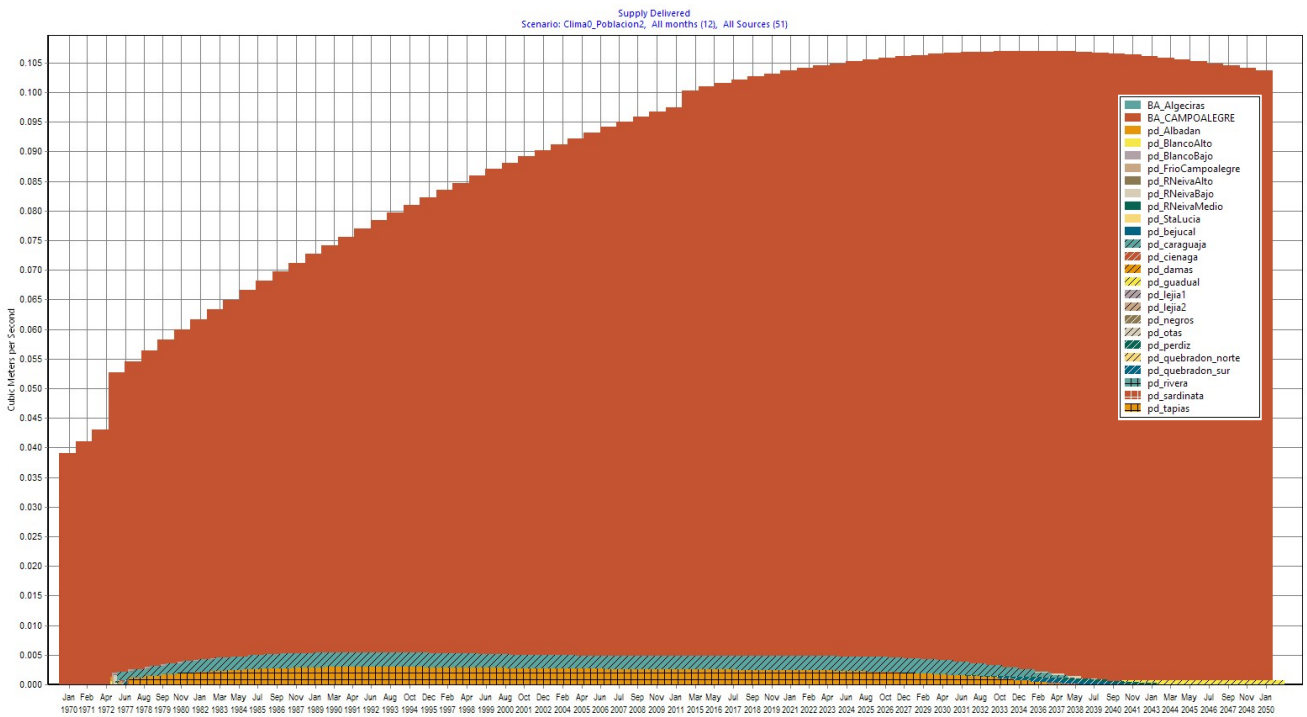
Gráfica 38. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

En el favorito de oferta hídrica en las cabeceras de las microcuencas del Río Neiva se determinó en las gráficas (de la Gráfica 30 a la Gráfica 38) los diferentes ofrecimientos de cada una de las microcuencas del Río Neiva en las cabeceras, en donde se estableció que el comportamiento variable de la disponibilidad del recurso hídrico que se presenta en los escenarios de clima y en los escenarios poblacional la diferenciación es mínima. Para el clima histórico se establece las diferentes fluctuaciones de oferta hídrica con unas fronteras distribuidas en forma similar y a medida que se desplaza en el tiempo dichos bordes de oferta hídrica se disminuyen. Para el clima mínimo se presenta una ondulación en la oferta hídrica con unos vértices que se condensan y al contrario del clima histórico se va ampliando la brecha diferencial de la oferta hídrica a medida que se desplaza en el tiempo. En el clima máximo se estableció una oscilación con unos picos que se condensan en forma similar y conservando las fluctuaciones.

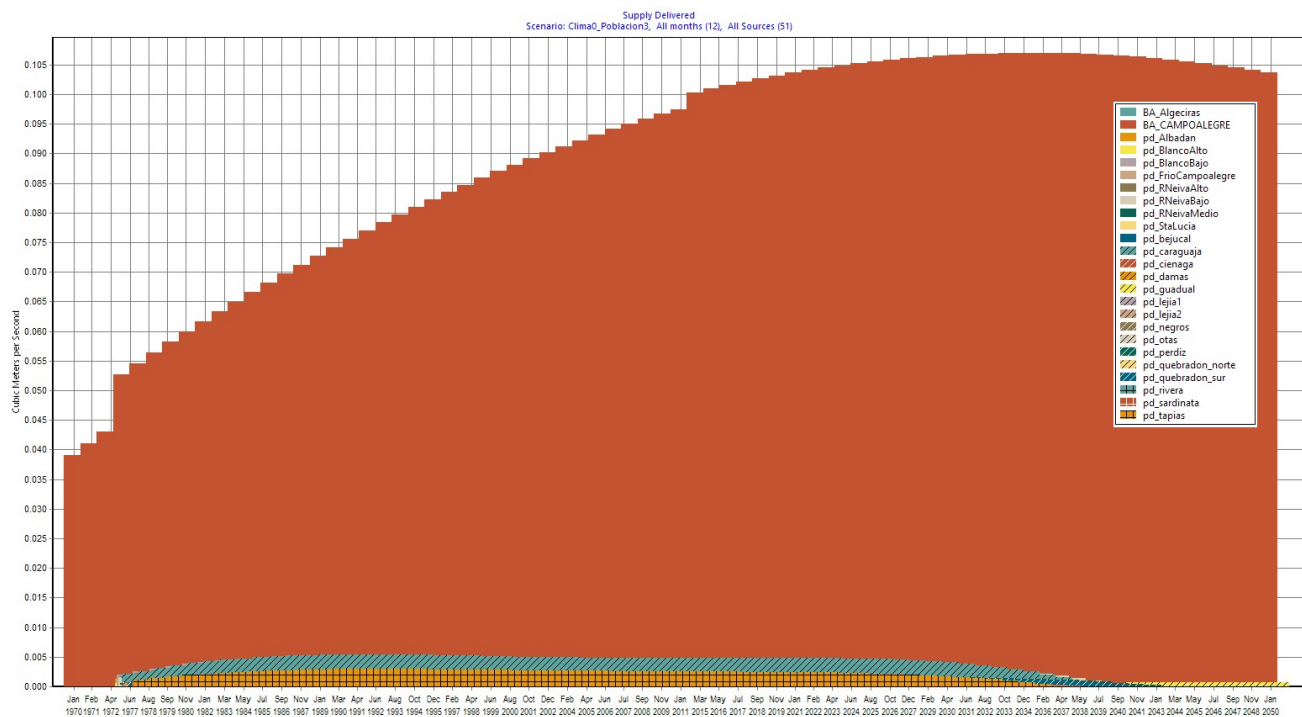
5.5 DEMANDAS URBANAS Y RURALES



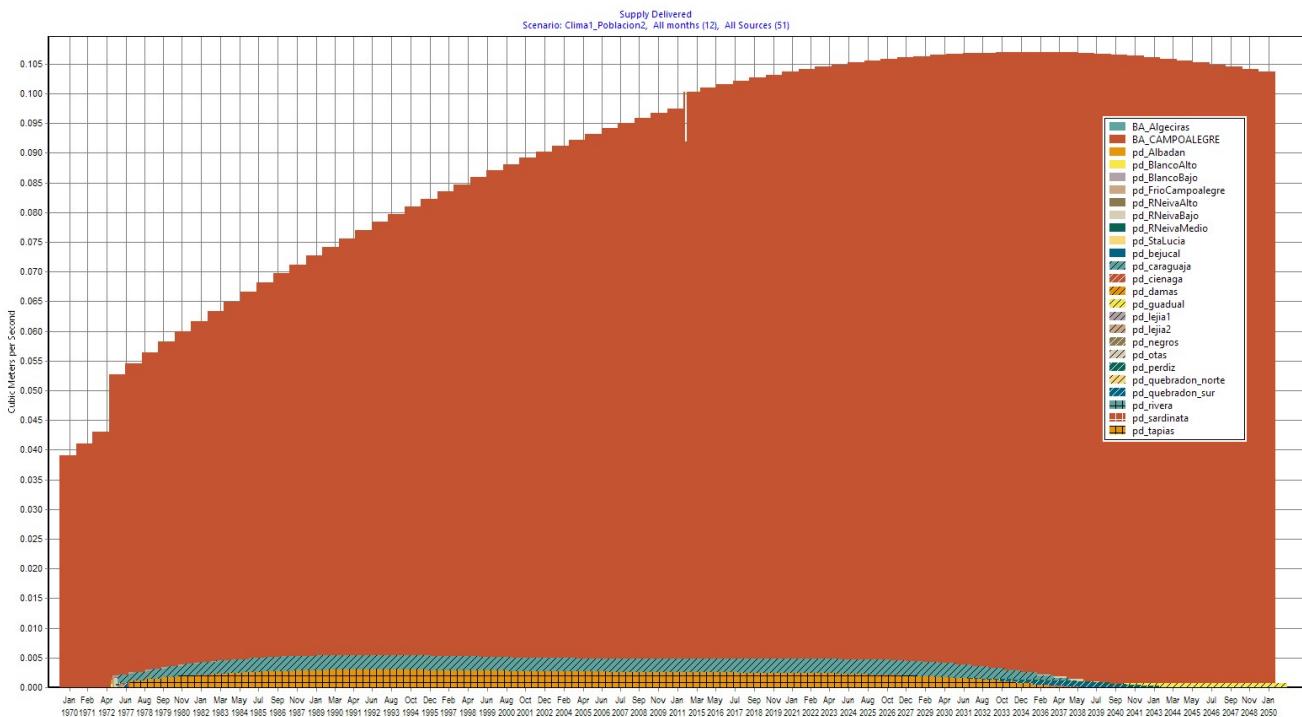
Gráfica 39. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.



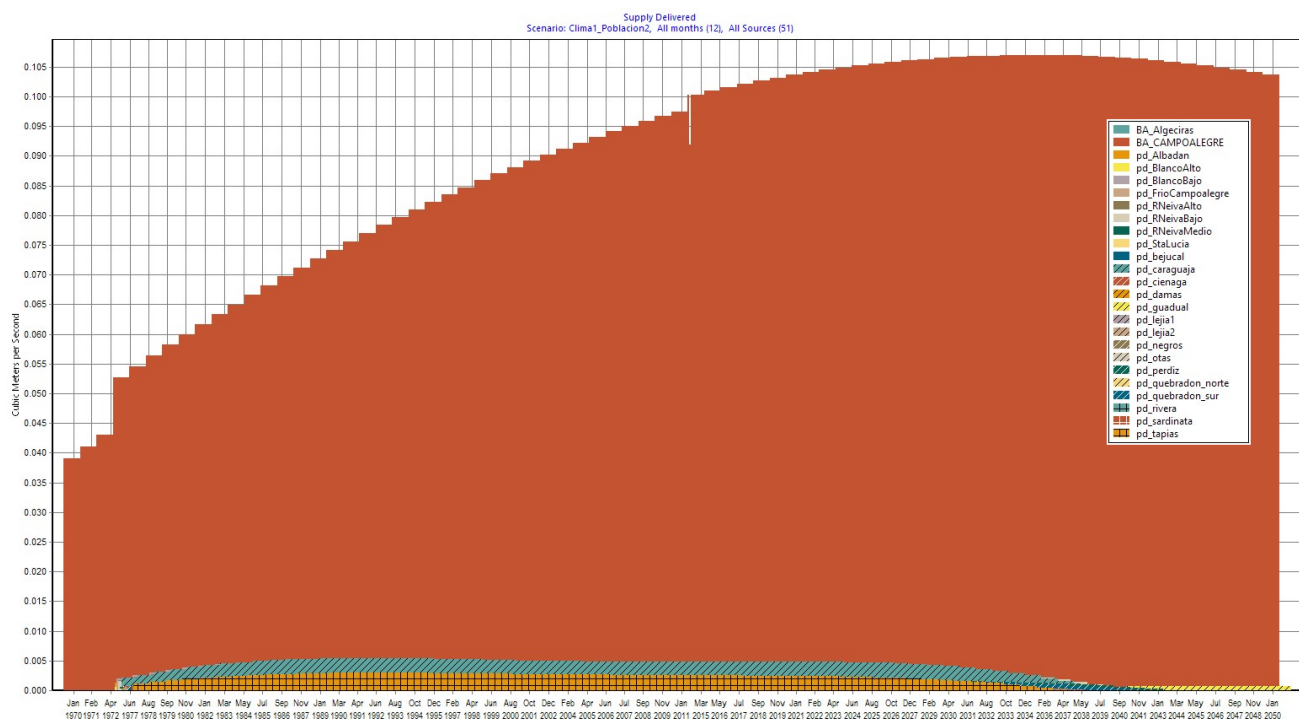
Gráfica 40. Clima histórico y con un incremento en la población medio.



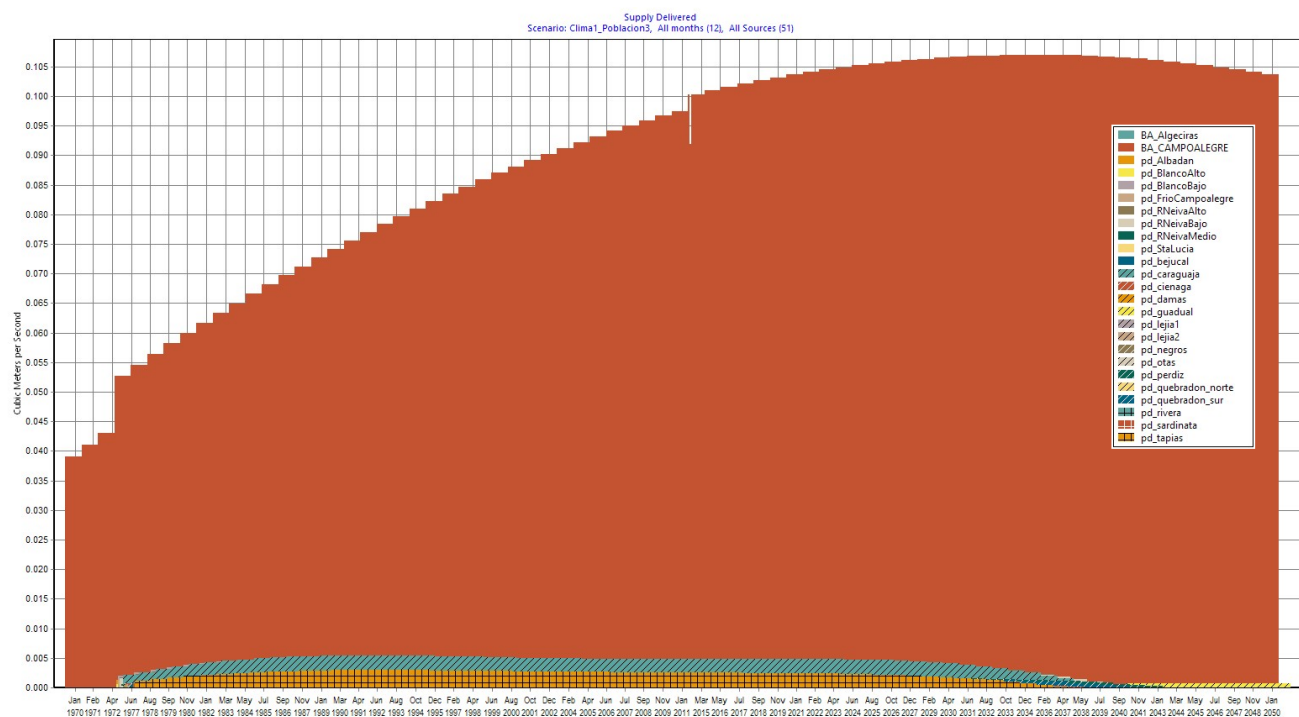
Gráfica 41. Clima histórico y con un incremento en la población alto.



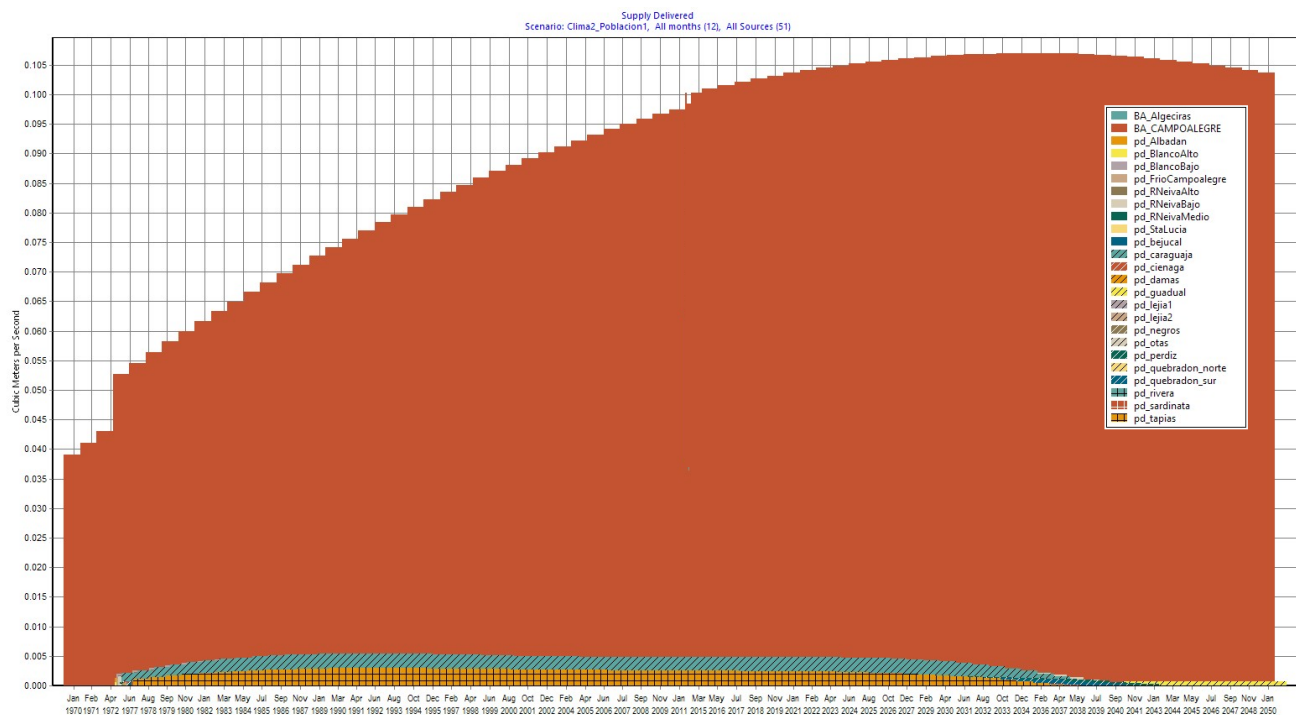
Gráfica 42. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



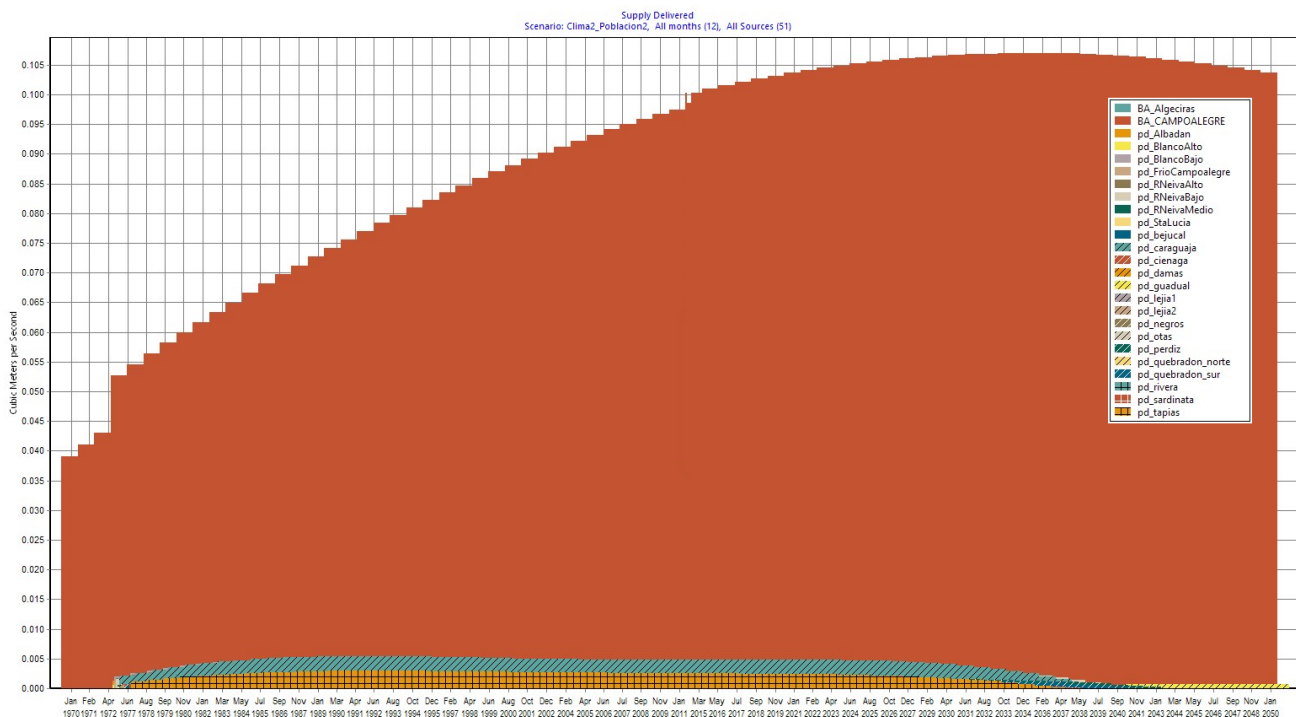
Gráfica 43. Clima mínimo y con un incremento en la población medio.



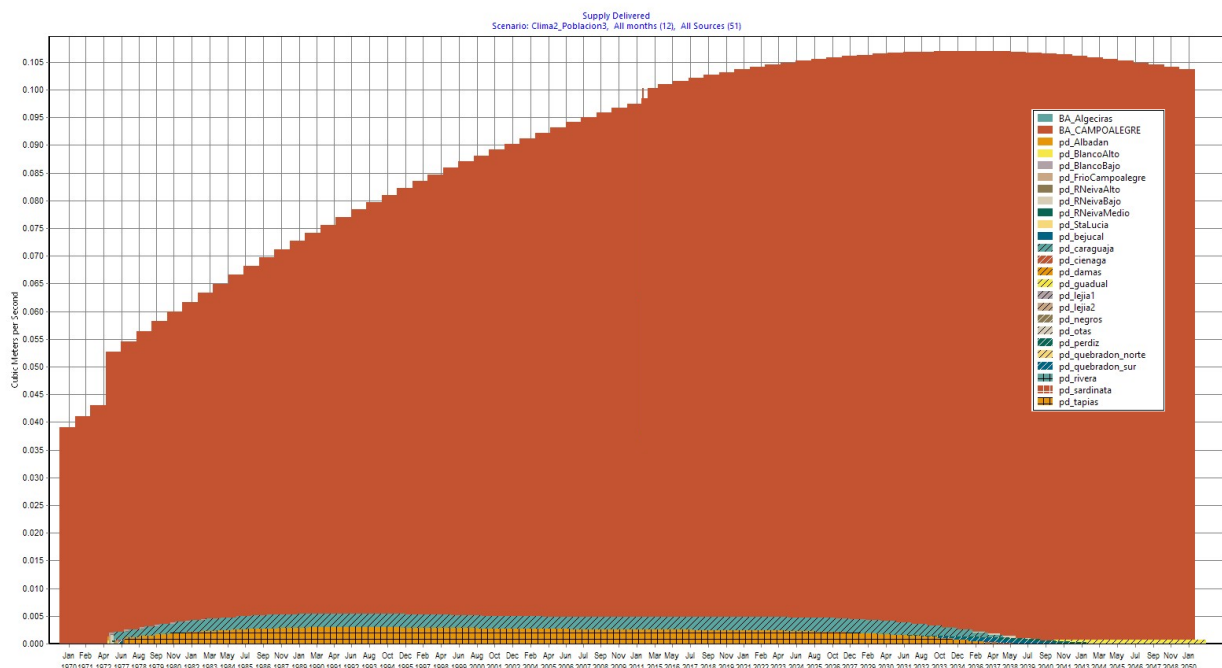
Gráfica 44. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.



Gráfica 45. Clima máximo y con un incremento en la población bajo.



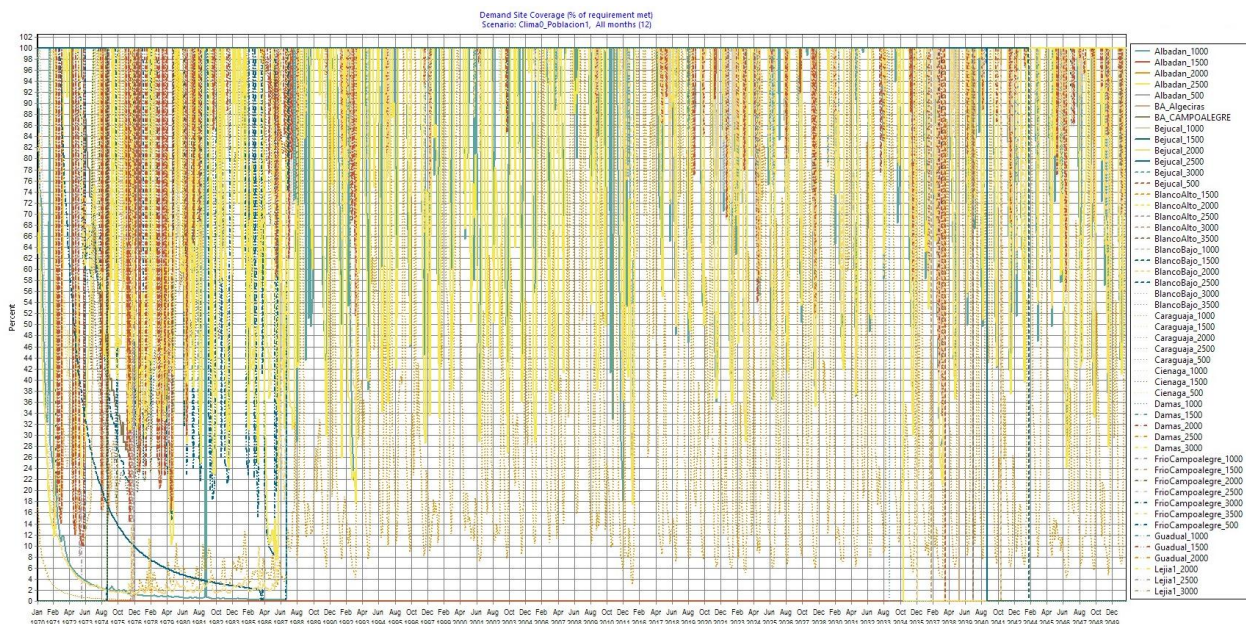
Gráfica 46. Clima máximo y con un incremento en la población medio.

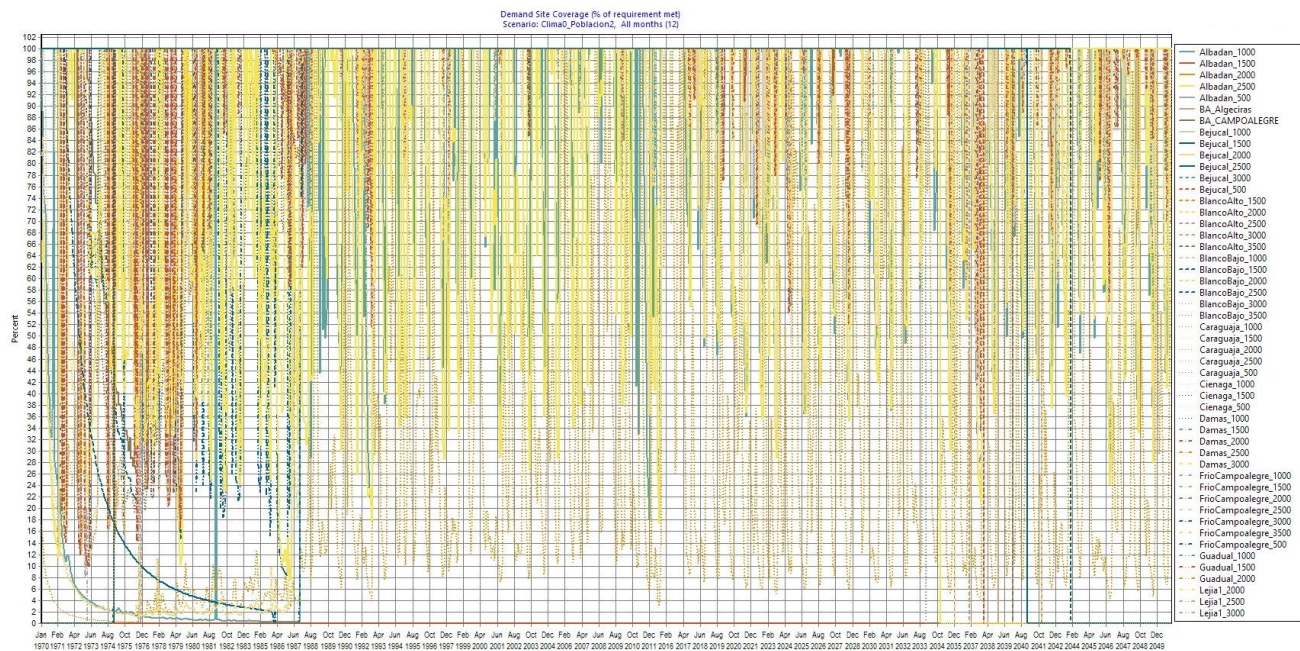


Gráfica 47. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

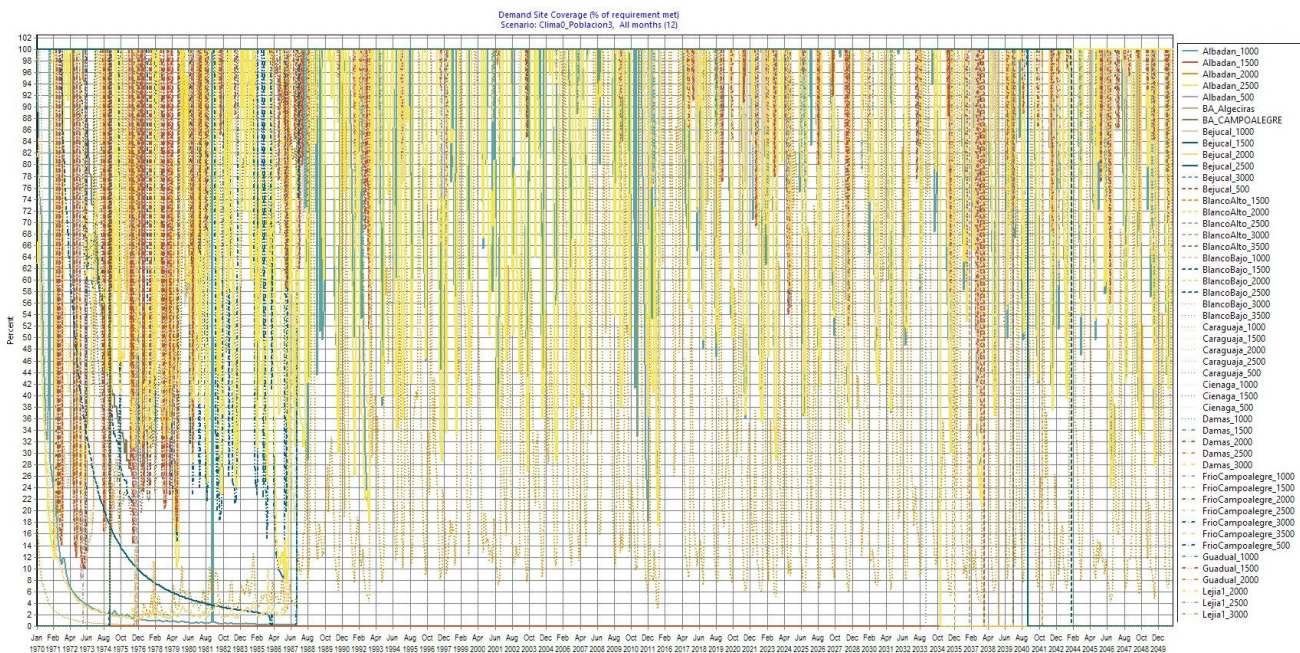
En las gráficas (de la Gráfica 39 a la Gráfica 47) del favorito demandas urbanas y rurales, se determinó que la mayor demanda se tiene para el área urbana del centro poblado del municipio de Campoalegre, seguido del área urbana del municipio de Algeciras, para el escenario de clima mínimo con un crecimiento poblacional alto se presentó la mayor demanda tanto para el área urbana con 324,5 l/s como para el área rural con 66,5 l/s.

5.6 SATISFACCIÓN DE LA COBERTURA DE LAS DEMANDAS URBANAS Y RURALES

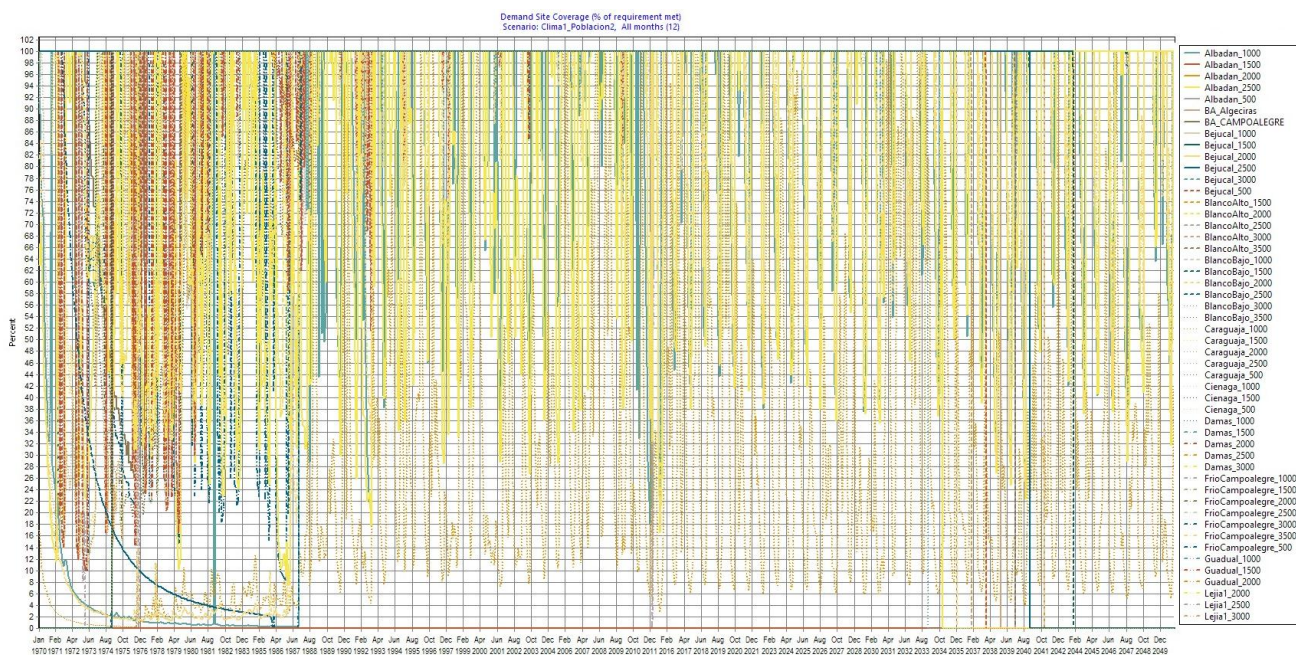
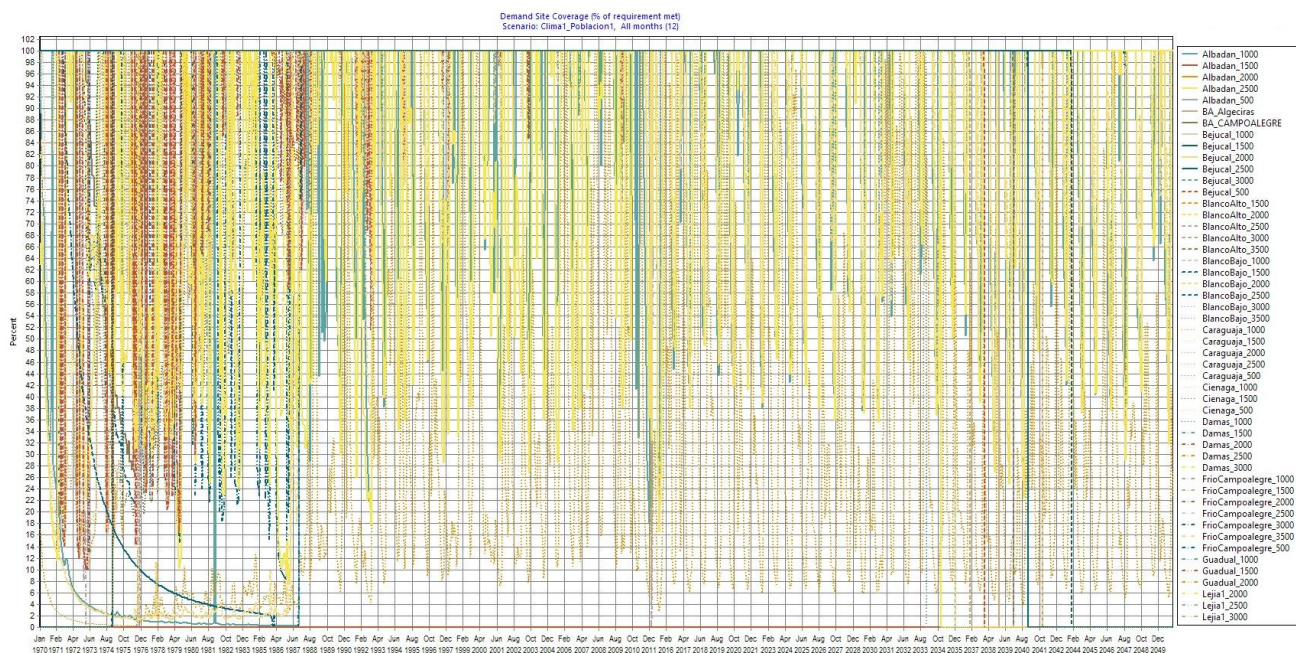


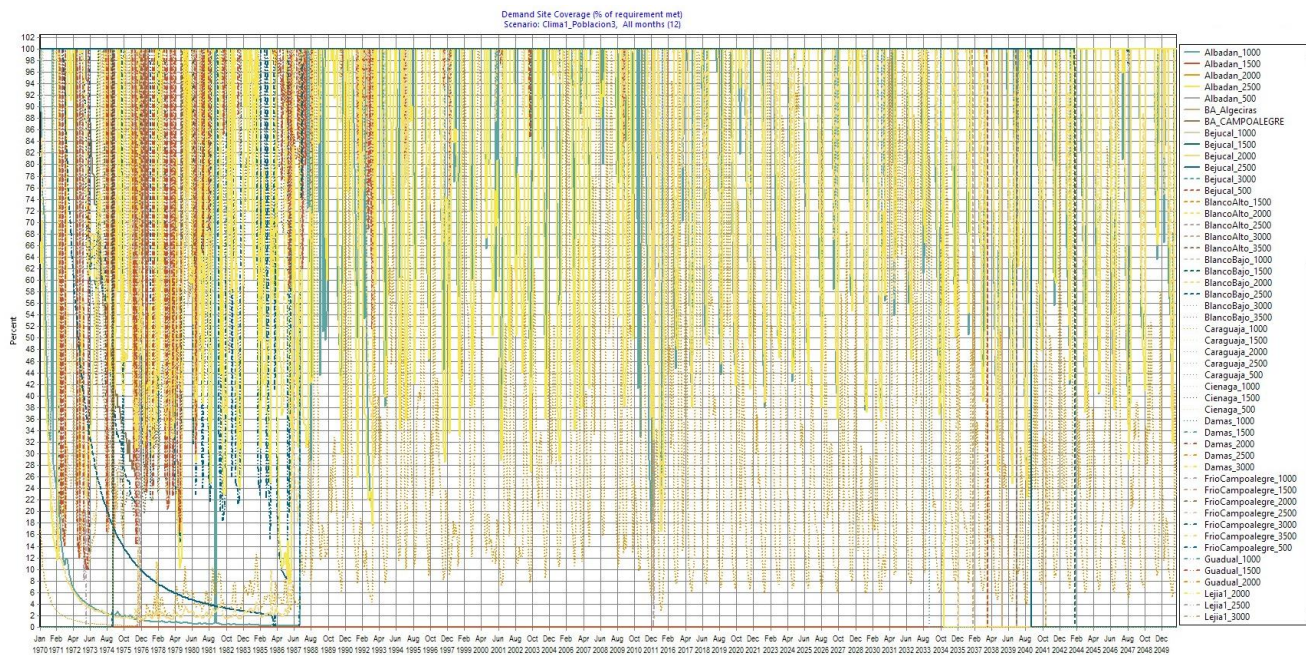


Gráfica 49. Clima histórico y con un incremento en la población medio.

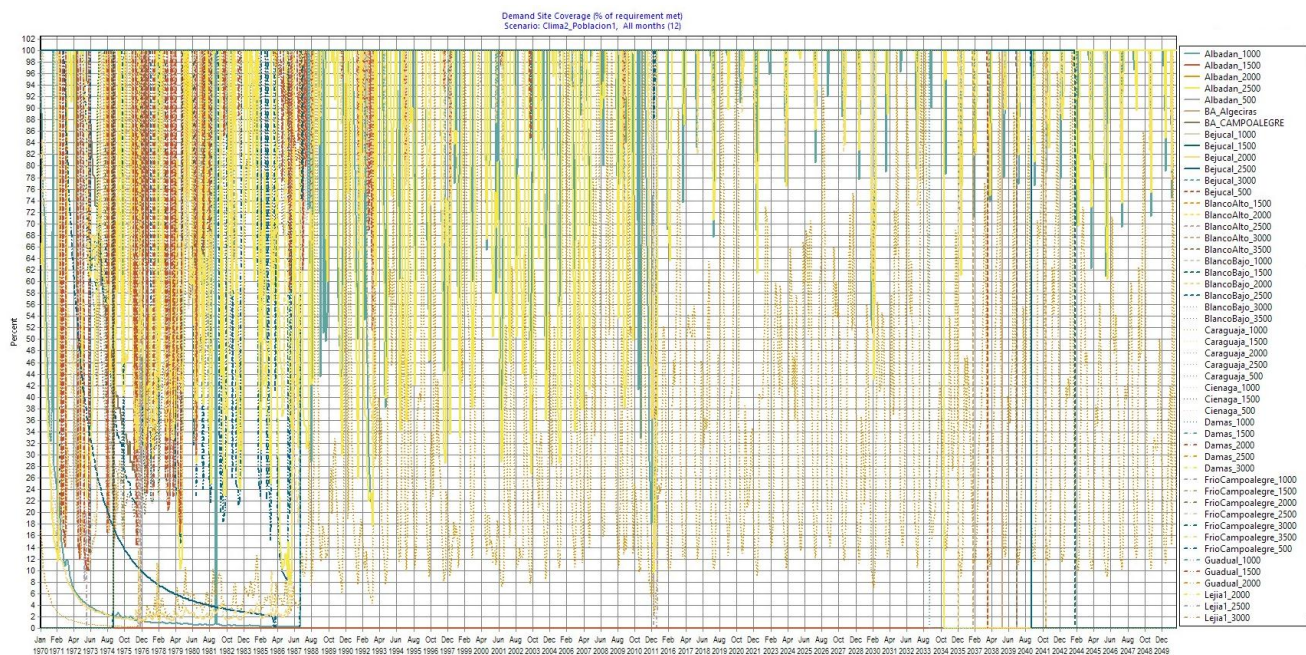


Gráfica 50. Clima histórico y con un incremento en la población alto.

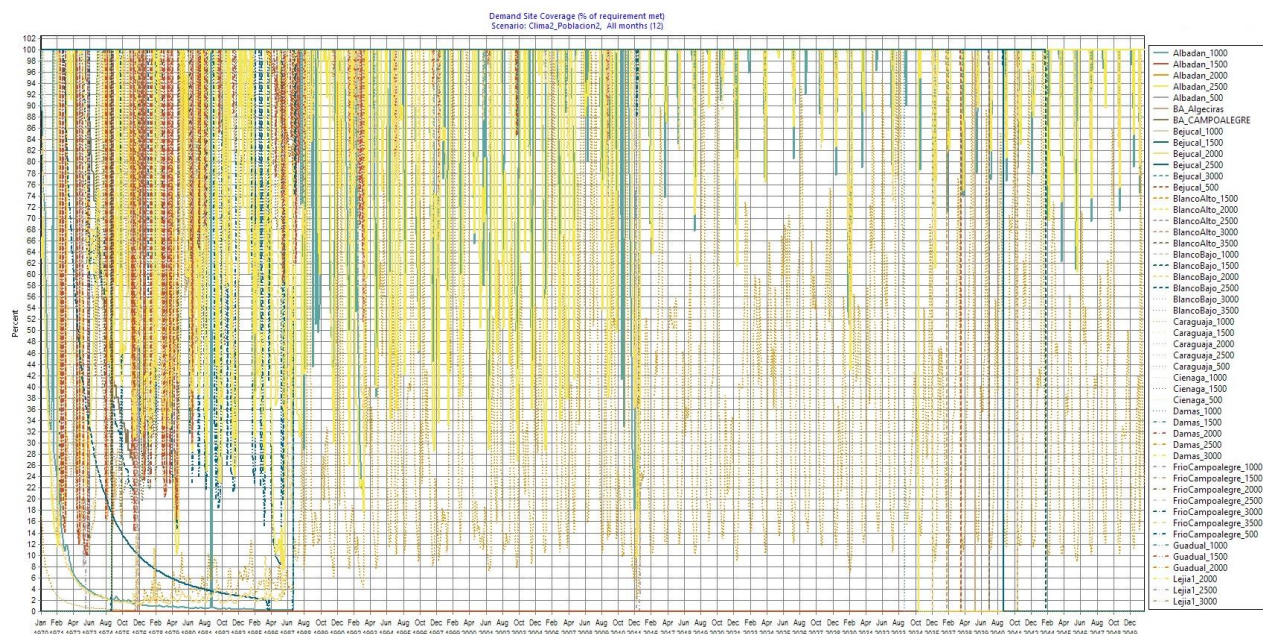




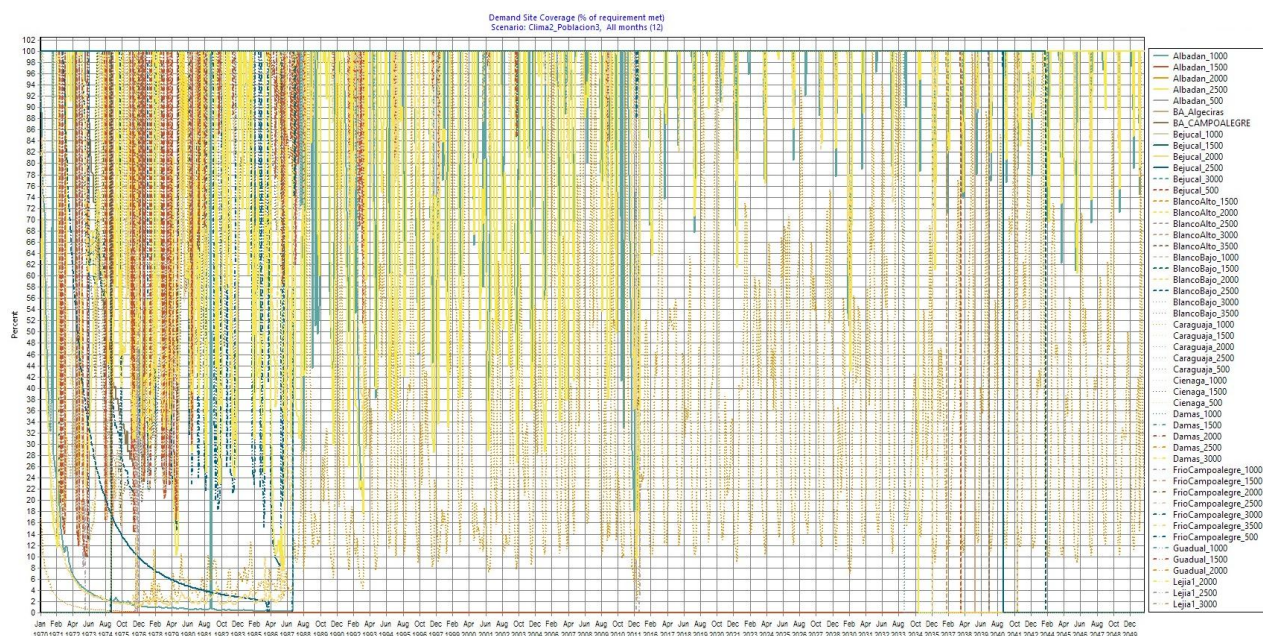
Gráfica 53. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.



Gráfica 54. Clima máximo y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 55. Clima máximo y con un incremento en la población medio.

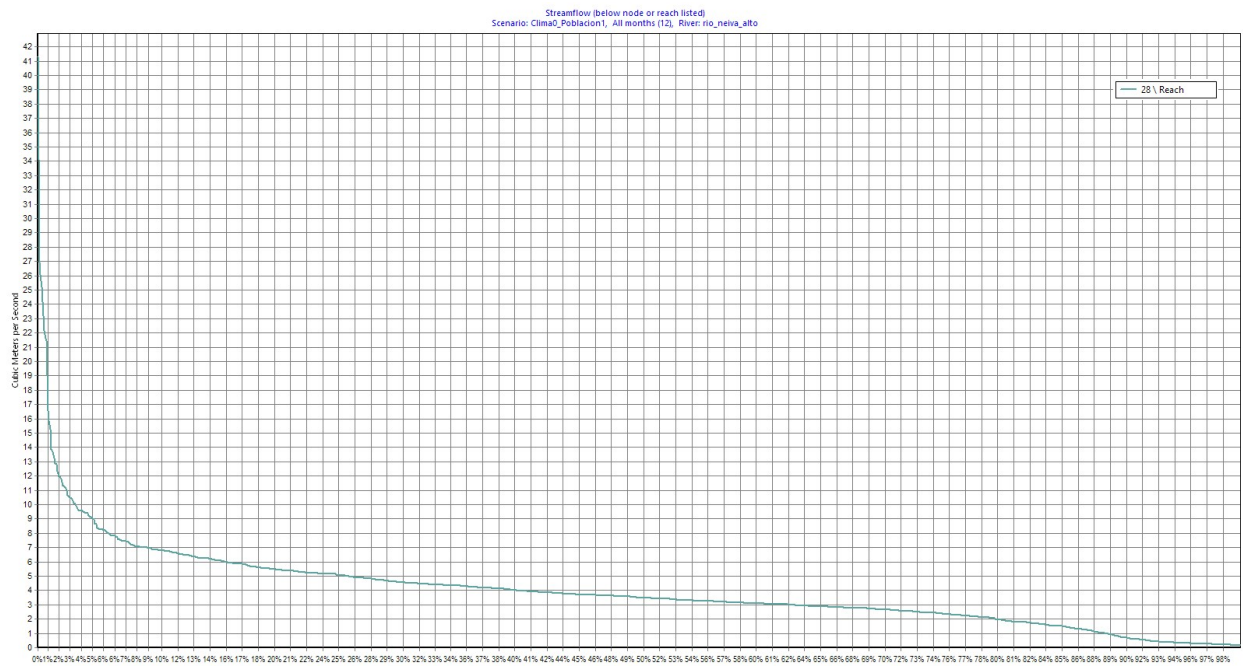


Gráfica 56. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

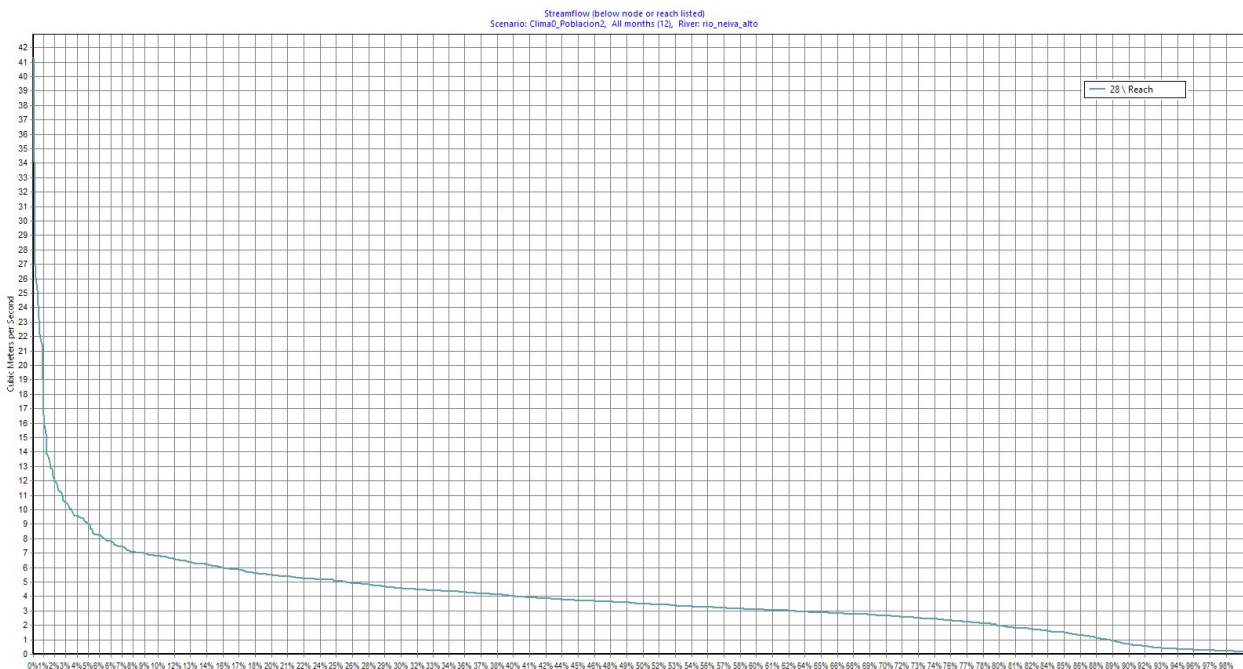
En el favorito de satisfacción de la cobertura de las demandas urbanas y rurales se determinó en las gráficas (de la Gráfica 48 a la Gráfica 56) que de manera integral para la Cuenca del Río Neiva se tiene el 100% de satisfacción de la cobertura de las demandas tanto urbanas como rurales, debido a que la mayor demanda se presenta en el escenario de clima mínimo con un crecimiento poblacional alto en donde para el área urbana la demanda es de 324,5 l/s y de 66,5 l/s para el área rural y la menor oferta hídrica se presenta para el escenario del clima actual con 1.392,6 l/s para el área urbana y de 55,3 l/s para el área rural. Pero al desagregar esta información entre las diferentes microcuencas que conforman la

Cuenca del Río Neiva, se observa numerosas variaciones en el tiempo que van desde un nivel mínimo a un nivel máximo de satisfacción; lo que demuestra la complejidad de la interrelación en el sistema hídrico de una cuenca.

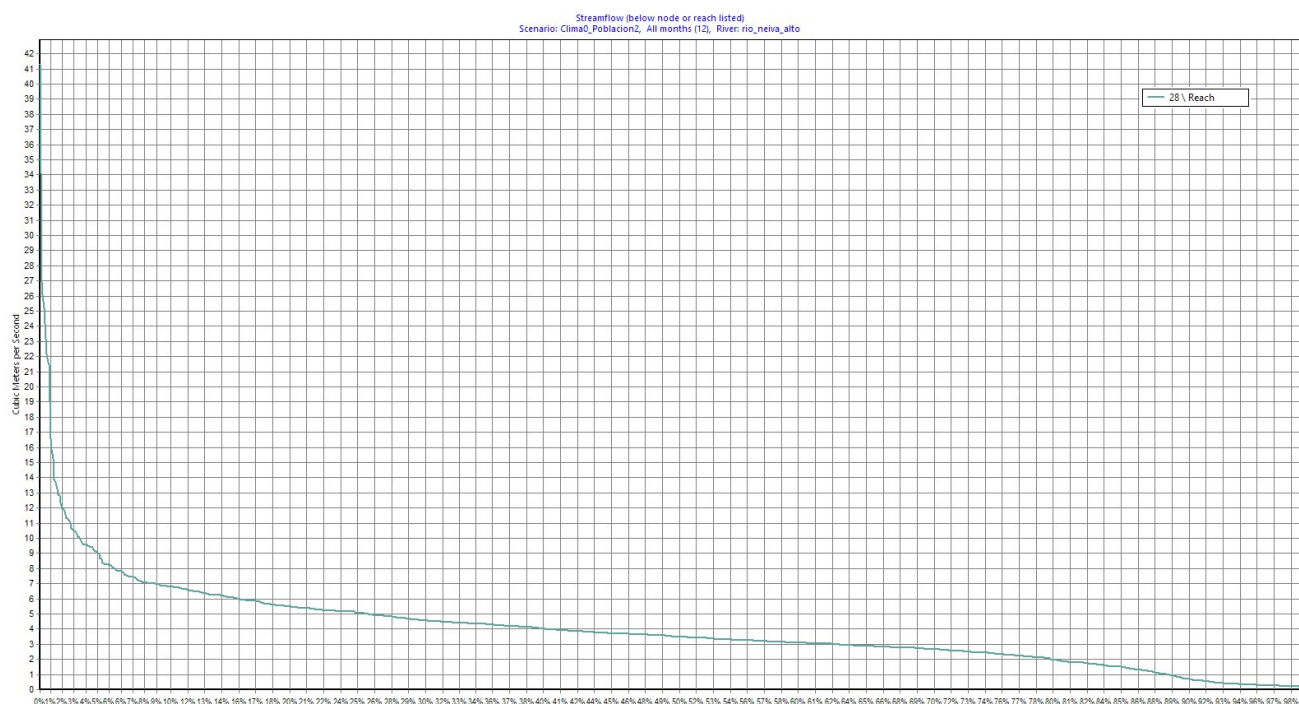
5.7 CURVA DE GASTOS DE LA ESTACIÓN DE AFORO EL CASIL



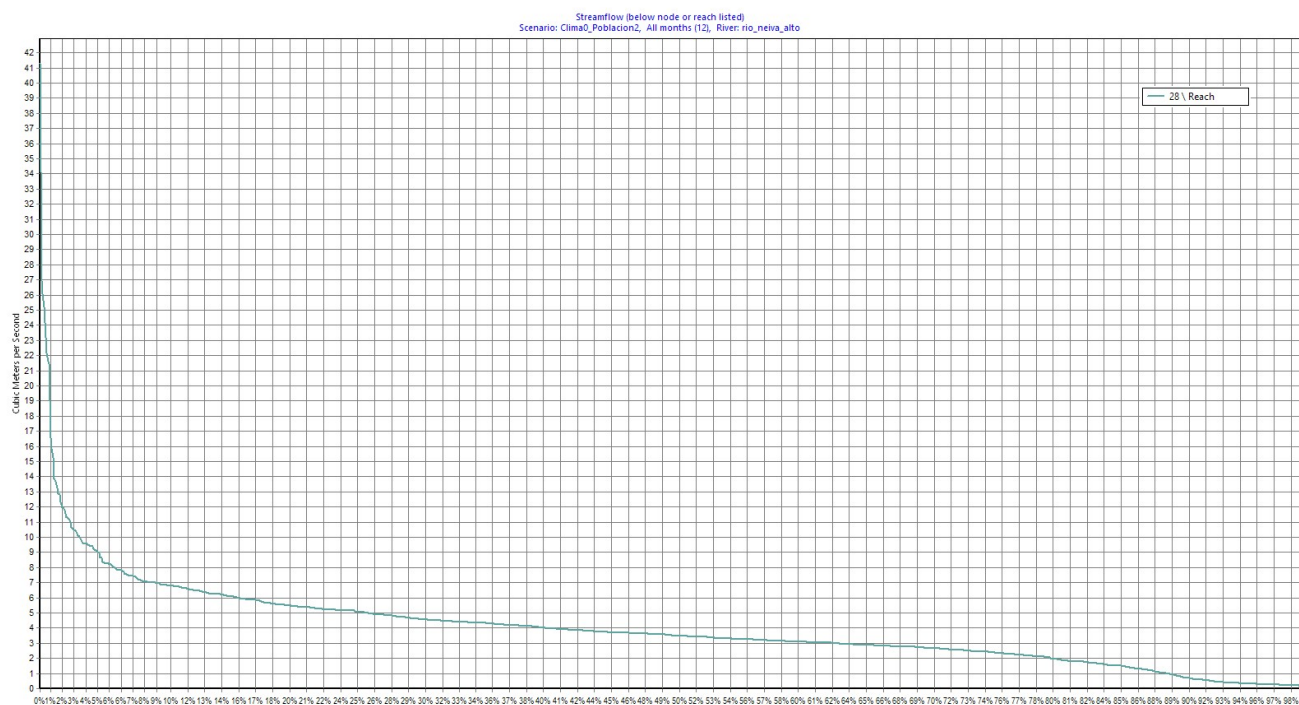
Gráfica 57. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 58. Clima histórico y con un incremento en la población medio.



Gráfica 59. Clima histórico y con un incremento en la población alto.



Gráfica 60. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 61. Clima mínimo y con un incremento en la población medio.



Gráfica 62. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.



Gráfica 63. Clima máximo y con un incremento en la población bajo.



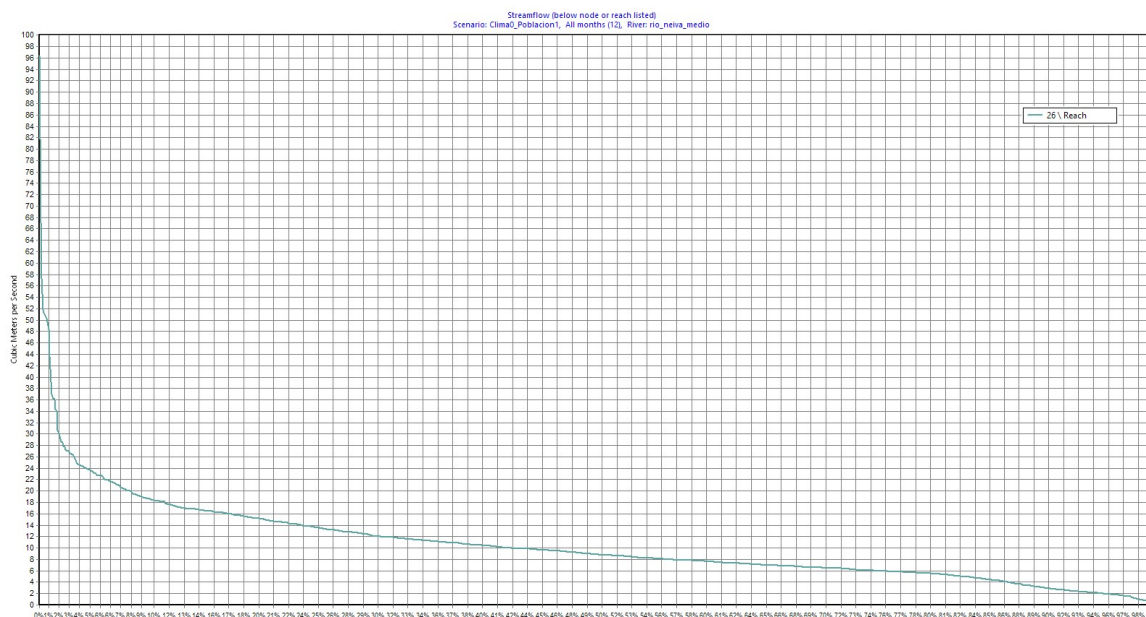
Gráfica 64. Clima máximo y con un incremento en la población medio.



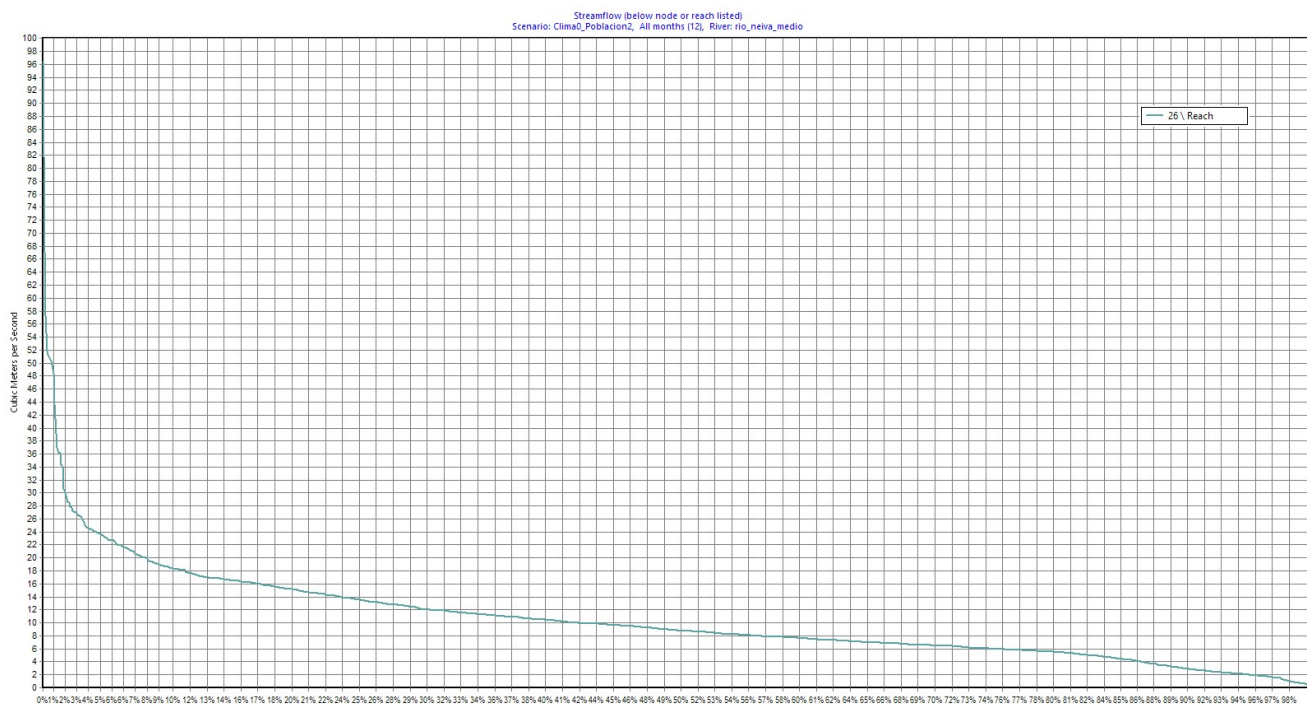
Gráfica 65. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

En las gráficas (de la Gráfica 57 a la 65) del favorito, curva de gastos en la estación de aforo El Casil, es el producto de un seguimiento a los aforos por el periodo de tiempo (1970 a 2011), describiendo la relación que existe entre el caudal circundante y el nivel de la lámina de agua en una sección determinada (El Casil). En las gráficas se muestra la curva de gastos – duración – periodo del estudio (%); en las que se estableció una disminución uniforme hasta el 70% y a partir de este porcentaje se acelera dicho decrecimiento de los caudales.

5.8 CURVA DE GASTOS EN LA ESTACIÓN DE AFORO PUENTE MULAS



Gráfica 66. Clima histórico y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 67. Clima histórico y con un incremento en la población medio.



Gráfica 68. Clima histórico y con un incremento en la población alto.



Gráfica 69. Clima mínimo y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 70. Clima mínimo y con un incremento en la población medio.



Gráfica 71. Clima mínimo y con un incremento en la población alto.



Gráfica 72. Clima máximo y con un incremento en la población bajo.



Gráfica 73. Clima máximo y con un incremento en la población medio.



Gráfica 74. Clima máximo y con un incremento en la población alto.

La curva de gastos en la estación de aforo Puente Mulas, es el producto de un seguimiento a los aforos por el periodo de tiempo desde el año 1970 a 2011, describiendo la relación que existe entre el caudal circundante y el nivel de la lámina de agua en una sección determinada (Puente Mulas) del cauce del Río Neiva. En las gráficas (de la Gráfica 66 a la

Gráfica 74) se muestra la curva de gastos – duración – periodo del estudio (%); por lo cual se estableció para el clima histórico un decrecimiento uniforme hasta el 79% con un caudal aproximado de $6\text{m}^3/\text{seg}$ y a partir de este porcentaje se incrementa la reducción de los caudales. Para el clima mínimo se determinó una disminución similar hasta el 80% con un caudal aproximado de $8.25\text{m}^3/\text{seg}$ y desde allí se acelera la disminución de los caudales. Por ultimo para el clima máximo se observa que a partir del 12% se disminuye en forma uniforme con una pendiente aproximada de 30 grados.

6. PROPUESTA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO NEIVA

Con los resultados obtenidos en el modelo de la Cuenca del Río Neiva en donde se muestra las capacidades de la plataforma de manejo integral de recursos hídricos WEAP, ayudando a comprender la dinámica de cuenca con información relevante de la oferta hídrica bajo escenarios de crecimiento poblacional, que señalará y guiará las acciones de planificación con instrumentos regionales e integrales del recurso hídrico. En este orden de ideas, solo puede entenderse como la apuesta para el futuro de la Cuenca con la que se busca asegurar la oferta hídrica especialmente para el abastecimiento de agua potable y el desarrollo de las actividades productivas al igual que para la protección, manejo y recuperación del recurso, con el fin de beneficiar a las presentes y futuras generaciones de la Cuenca.

Dentro del proceso de la toma de decisiones robustas para la gestión integral del recurso hídrico de la Cuenca del Río Neiva, se propone los criterios e identifican las estrategias de manejo y adaptación que pueden reducir la vulnerabilidad a la variabilidad y cambio climático. Estableciéndose cinco estrategias que se describen a continuación:

Una primera estrategia que se denominará Bosques, basados en la tipificación de la cuenca en la que se identificaron áreas de parques naturales regionales, municipales y de reserva forestal de la amazonia – Ley segunda de 1959, en dichas áreas se encuentran establecidos bosques densos altos y bajos, los cuales se deben conservar. De igual forma se encuentran bosques fragmentados por pastos y cultivos los cuales se deben recuperar. Lamentablemente el municipio de Algeciras no cuenta con información cartográfica predial y por lo cual se debe realizar una caracterización predial en las áreas de parques naturales y de reserva forestal. De acuerdo al decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible los Parques Naturales Regionales se equiparan a los Parques Nacionales Naturales y por lo tanto sus áreas son de estricta conservación, razón por la cual la CAM se encuentra rediseñando y convalidando sus áreas protegidas regionales y los predios que queden inmersos dentro de los Parques Naturales Regionales de Miraflores y Siberia – Ceibas deberán ser adquiridos por la Corporación. Así mismo el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 permite a las gobernaciones y alcaldías realizar la compra de predios para la conservación y protección del recurso hídrico, por lo tanto las alcaldías de Algeciras y Campoalegre pueden proyectar la compra de predios estratégicos para la conservación y protección del recurso hídrico.

La segunda estrategia se denominara Suelos y Sistemas Productivos Sostenibles, debido a las malas prácticas agrícolas que se realizan en los procesos de producción agropecuarias,

en donde se realizan quemas, sobrepastoreo y sobremecanización, dichas prácticas se deben erradicar y adelantar acciones técnicas apropiadas que permitan adelantar los procesos de producción ambientalmente sostenibles. Para ello los tomadores de decisiones en el área de la Cuenca del Río Neiva deberán adelantar capacitaciones, brindar asistencia técnica, realizar giras tecnológicas, establecimientos de cercas vivas y motivar la implementación de alternativas sostenibles y económicamente viables para el aprovechamiento de los recursos no maderables del bosque.

La tercera estrategia que se denominará calidad y administración del agua, con la cual se pretende realizar seguimiento a las concesiones de agua, revisar las reglamentaciones, examinar y proponer obras de infraestructuras que permitan mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico y disminuir las pérdidas en los acueductos rurales, definir puntos de monitoreo teniendo en cuenta principalmente las actividades productivas que puedan causar el mayor impacto negativo a la calidad del agua y en ellos realizar los análisis físico-químicos y microbiológicos del agua.

La cuarta estrategia se denominará Gestión del Riesgo, la cual debe tener en cuenta los estudios de amenazas realizados por las alcaldías en sus Planes y/o Esquemas de Ordenamiento Territorial en donde se tienen identificadas las zonas de amenazas por inundación, por avenidas torrenciales y por deslizamientos y en donde se tienen planteadas las zonas de protección y la reubicación de los habitantes vulnerables al riesgo.

La quinta estrategia que se plantea se denomina Educación, Organización y Articulación Institucional, en donde la comunidad de la Cuenca del Río Neiva se debe organizar y conformar comités locales para fortalecer la participación y desempeño de las comunidades y así poder ejercer un seguimiento y evaluación a las estrategias de gestión del recurso hídrico. A través de esta organización la comunidad de la cuenca puede llegar a empoderarse en la preservación y conservación del recurso hídrico y establecer una agenda de gestión comunitaria en donde puede articular con las autoridades de la cuenca propuestas en cobertura de salud, recreación, mejoramiento de vías, electrificación y encuentros culturales; en busca de mejorar la calidad de vida de los habitantes de la Cuenca del Río Neiva. Aprovechar la ventaja de la ubicación del SENA Agroindustrial La Angostura en la cuenca para que se capaciten los presidentes de juntas, fontaneros de los acueductos veredales, asociados del distrito de riego ISOIGUA en los diferentes cursos de formación en las áreas agrícolas, pecuaria, agroindustrial y ambiental; para que después ellos la repliquen a los demás habitantes de la cuenca. De igual forma las Instituciones Educativas presentes en la cuenca, deben tomar la iniciativa de desarrollar sus proyectos ambientales escolares (PRAE) con el objetivo de proteger y conservar la Cuenca del Río Neiva.

7. CONCLUSIONES

El proceso de modelación del recurso hídrico de la Cuenca del Río Neiva a través de la herramienta WEAP permitió evaluar el impacto del cambio y la variabilidad climática durante el periodo 2011 al 2050 en los atributos del clima que modifican la disponibilidad del agua en la cuenca y como consecuencia se producen alteraciones en los sectores hidro-dependientes como son la menor disponibilidad del recurso hídrico para los acueductos, la agricultura y los ecosistemas sensibles al deterioro hídrico en la cuenca. El análisis de los resultados del proceso de modelación, brinda herramientas para la planeación a los tomadores de decisiones robusta que permitirá prepararse y adaptarse al cambio y variabilidad climática.

El uso de la plataforma de manejo integral de recursos hídricos WEAP, contribuye al conocimiento de las dinámicas de un sistema complejo e interconectado como lo es la Cuenca del Río Neiva y fortalece el apoyo a la toma de decisiones robustas, especialmente en instrumentos de planeación regional e integral del recurso hídrico, dando respuesta a los cambios potenciales.

Se determinó el comportamiento de la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca del Río Neiva para el periodo comprendido entre los años 2011 al 2050, presenta una satisfacción en el cubrimiento de la demanda tanto urbana como rural del 100 % para el escenario de clima mínimo con un crecimiento poblacional alto en donde para el área urbana la demanda es de 324,5 l/s y de 66,5 l/s para el área rural y la menor oferta hídrica se presenta para el escenario del clima actual con 1.392,6 l/s para el área urbana y de 55,3 l/s para el área rural. Sin embargo, se presenta un comportamiento para los escenarios de clima histórico y mínimo en la oferta hídrica, el cual es de 10,96 m³/s y 13,73m³/s respectivamente, mientras que la demanda agropecuaria es de 15,78 m³/s, ante esta problemática en donde la demanda es mayor a la oferta, es conveniente conservar la restricción actual de la Reglamentación 3660 del 2007 del Río Neiva y así equilibrar la ecuación entre demanda – oferta y caudal ecológico.

El desarrollo del modelo de la Cuenca del Río Neiva demostró las potencialidades de la plataforma de manejo integral de recursos hídricos WEAP, favoreciendo la comprensión de la dinámica de la Cuenca y permitiendo dar alcance al propósito de identificar y plantear criterios de gestión integral de los recursos hídricos para su adecuado manejo en la cuenca del Río Neiva. De esta manera se plantearon cinco estrategias para su adecuado uso que guiará las acciones de planificación del recurso hídrico que permitirá asegurar la oferta hídrica especialmente para el abastecimiento de agua potable y el desarrollo de las

actividades productivas al igual que para la protección, manejo y recuperación del recurso hídrico, de la misma manera que la adaptación a la variabilidad y cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- Barros, Vicente (2005). El cambio climático global. 2° edición. Libros del Zorzal. Buenos Aires.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.
- Constance L Danner. (2006) *Documentación y pruebas de Modelo WEAP para la Cuenca del Río Grande/ Bravo*. Univeridad de Texas at Austin
- Desarrollada con contribuciones del PACC (Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador), Ministerio del Ambiente de Ecuador, y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.
- J.E. Ospina-Norela, Carlos Gay García, Ana Cecilia Conde Álvarez, G. Sánchez-Torres Esqueda (2009). Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú-Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios. Revista Atmósfera vol.22 no.4 México oct. 2009.
- SEI, Stockholm Environment Institute. (2011). User Guide WEAP.
- SEI, Stockholm Environment Institute. (2012). Water Evaluation And Planning. Recuperado el 10 de octubre de 2013, de WEAP21: <http://www.weap21.org/>
- Universidad de Chile, Ayala Ramos Álvaro, 2011. Impactos Del Cambio Climático Sobre la Operación del Sistema Hídrico de la Laguna Laja.
- Universidad de Chile, Reyes Benavides Christian Ariel, 2012. Proyección de Variables Hidrológicas Diarias a Largo Plazo en la Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones, Bajo Escenarios A1B y A2 de Cambio Climático.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2010). Colombia frente al cambio climático: Diálogo Nacional Interministerial sobre cambio climático en el sector agrícola.

- Recuperado de [http://www.pnud.org.co/img_upload/36353463616361636163616361636163/2%C2%AA Comunicaci%C3%B3n Preliminares.pdf](http://www.pnud.org.co/img_upload/36353463616361636163616361636163/2%C2%AA%20Comunicaci%C3%B3n%20Preliminares.pdf) el 15 de febrero de 2013