

**Estudio de prospectivas de consumo hídrico de la microcuenca del Río Suratá Bajo
para el año 2030 por medio del software WEAP.**

Andrey Yuranddy Gamboa Rueda

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Marlon Leonardo Rodríguez Sierra

Magister en Ingeniería Civil

Codirector

Ing. Carlos Fernando Arenas Jiménez

Magister en Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2023

Contenido

Introducción.....	13
1. Estudio de prospectivas de consumo hídrico de la microcuenca del Río Suratá Bajo para el Año 2030 por medio del Software WEAP	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Pregunta de investigación	16
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
2. Marco referencial.....	19
2.1 Marco contextual.....	19
2.1.1 Oferta hídrica en Colombia.....	19
2.1.2 Hidroclimatología de Colombia.....	20
2.1.2.1 Variación de la oferta hídrica superficial anual.	21
2.1.2.2 Indicadores hidroclimatológicos.	21
2.1.3 Descripción de la zona de estudio.....	24
2.1.3.1 Subcuenca del Río Suratá.....	24
2.1.3.2 Oferta hídrica..	26
2.2 Marco Teórico.....	27
2.2.1 Prospectivas	27
2.2.2.1 Definiciones.	27

2.2.2.1 Metodologías.....	28
2.2.2 Software WEAP.....	29
2.2.2.1. Funcionalidades y Usos.....	30
3. Metodología.....	31
3.1 Metodología de los Escenarios	31
3.1.1 Objetivos de la metodología	31
3.1.2 Fases.....	32
3.1.2.1 Construcción de la base analítica.	32
3.1.2.1.1 Análisis estructural.	32
3.1.2.1.2 Análisis de juego de actores:	33
3.1.2.2 Elaboración de escenarios.....	34
3.1.2.2.1 Método de impactos cruzados (SMIC)..	35
4. Resultados.....	35
4.1 Análisis estructural.....	35
4.1.1 Listado de variables	35
4.1.2 Matriz de influencias.....	36
4.1.3 Método MICMAC.....	38
4.2 Análisis de juego de Actores.....	42
4.2.1 Método MACTOR	42
4.3 Elaboración de escenarios.....	48
4.3.1 Escenario #1: Tendencial.	48
4.3.2 Escenario #2: Crecimiento poblacional inusualmente acelerado.....	49

4.3.3 Escenario #3: Expansión agrícola.....	50
4.4 Modelación en el Software.....	50
4.4.1 Construcción del modelo	50
4.4.2 Modelación de los escenarios	58
4.4.3 Resultados generados en el software WEAP	60
5. Conclusiones.....	73
Referencias.....	76

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Oferta total por área hidrográfica.....</i>	19
Tabla 2. <i>Cálculo de la oferta hídrica de la Subcuenca del Río Suratá.....</i>	26
Tabla 3. <i>Listado de variables definidas.</i>	36
Tabla 4. <i>Matriz de influencias.....</i>	37
Tabla 5. <i>Parámetros de la matriz de influencia en el software MICMAC.....</i>	39
Tabla 6. <i>Volúmenes de consumo mensual y cálculo de la tasa anual de uso de agua.</i>	55
Tabla 7. <i>Variación mensual de consumo de la agricultura.</i>	57
Tabla 8. <i>Valores totales anuales de demanda de agua en los tres escenarios planteados.....</i>	62
Tabla 9. <i>Valores mensuales promedio de demanda de agua de los tres escenarios planteados.</i>	62
Tabla 10. <i>Diferencias relativas al Escenario #1 de la demanda de agua total anual.....</i>	63
Tabla 11. <i>Porcentaje de cobertura de la demanda de cada escenario en los meses de enero, julio y noviembre del periodo de estudio para el sitio de demanda Bucaramanga.....</i>	67
Tabla 12. <i>Porcentaje de cobertura de la demanda de cada escenario en el mes de julio del periodo de estudio para el sitio de demanda Agricultura.....</i>	70
Tabla 13. <i>Tabla de valores numéricos de la demanda no cubierta total anual de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.....</i>	72
Tabla 14. <i>Tabla de valores numéricos de la demanda no cubierta mensual promedio de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.....</i>	73

Lista de figuras

Figura 1. <i>Distribución por área hidrográfica de la oferta total.</i>	20
Figura 2. <i>Escorrentías medias anuales por área hidrográfica.</i>	21
Figura 3. <i>Distribución de índice de aridez por área hidrográfica.</i>	22
Figura 4. <i>Mapa nacional multianual de índice de aridez.</i>	23
Figura 5. <i>Distribución del índice de regulación hídrica por área hidrográfica.</i>	24
Figura 6. <i>Distribución de microcuencas en la Subcuenca del Río Suratá.</i>	25
Figura 7. <i>Definición de las variables.</i>	38
Figura 8. <i>Variable de influencias adaptada al software MICMAC.</i>	39
Figura 9. <i>Mapa de influencia/dependencia directa.</i>	40
Figura 10. <i>Gráfico de influencias directas.</i>	41
Figura 11. <i>Mapa de influencia/dependencia indirecta.</i>	42
Figura 12. <i>Definición de los actores.</i>	43
Figura 13. <i>Definición de objetivos.</i>	43
Figura 14. <i>Matriz de influencias directas.</i>	44
Figura 15. <i>Matriz de posiciones valoradas.</i>	45
Figura 16. <i>Plano de influencia-dependencia entre actores.</i>	46
Figura 17. <i>Histograma vector de fuerzas entre actores.</i>	46
Figura 18. <i>Plano de correspondencias actores/objetivos.</i>	47
Figura 19. <i>Gráfico de convergencia de actores.</i>	48
Figura 20. <i>Área de estudio modelada en WEAP.</i>	51
Figura 21. <i>Configuración temporal del modelo.</i>	52
Figura 22. <i>Asignación de caudal de cabecera mensual del Río Suratá.</i>	53

Figura 23. <i>Datos de nivel de actividad anual introducido en WEAP.</i>	54
Figura 24. <i>Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida</i>	55
Figura 25. <i>Datos de la tasa de uso de agua introducidos en WEAP.</i>	56
Figura 26. <i>Valores de variación mensual para el sitio de demanda Agricultura en WEAP.</i>	57
Figura 27. <i>Valores de consumo para sitios de demanda en WEAP</i>	58
Figura 28. <i>Modelación del Escenario #1 aplicando la función GROWTH.</i>	59
Figura 29. <i>Modelación de Escenario #2 aplicando la función GROWTH.</i>	60
Figura 30. <i>Modelación de Escenario #3 aplicando la función GROWTH.</i>	60
Figura 31. <i>Demanda de agua en los tres escenarios planteados</i>	61
Figura 32. <i>Variación total anual del sitio de demanda Bucaramanga para los tres escenarios planteados</i>	64
Figura 33. <i>Variación total anual del sitio de demanda Agricultura para los tres escenarios planteados</i>	65
Figura 34. <i>Graficas de la cobertura de la demanda para los tres escenarios en el sitio de demanda Bucaramanga.</i>	66
Figura 35. <i>Cobertura mensual promedio para los tres escenarios para el sitio de demanda Bucaramanga.</i>	67
Figura 36. <i>Graficas de la cobertura de la demanda para los tres escenarios en el sitio de demanda Agricultura</i>	69
Figura 37. <i>Cobertura mensual promedio para los tres escenarios para el sitio de demanda Agricultura</i>	70

Figura 38. *Gráfica de la demanda no cubierta total anual de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados..... 72*

Figura 39. *Gráfica de la demanda no cubierta mensual promedio de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados..... 73*

Dedicatoria

Dedico este logro a mi familia, un pilar fundamental en mi vida. A mis tías Adriana Rueda y Yamile Román, cuyas palabras de aliento y apoyo inquebrantable me impulsaron a lo largo de este camino. A mi tío Javier Román, cuyo aliento y compañía fueron invaluableles. A mi madre, Lida Rueda, cuya fuerza y ánimo constante me recordaron que podía lograrlo. A mi novia, Laura Pedraza, mi fuente inagotable de motivación en los momentos más desafiantes. A mi amigo, Carlos Camargo, cuyos consejos y apoyo incondicional fueron un faro en los momentos difíciles. Pero, sobre todo, dedico este logro a mi abuela, Elsa Román, mi inspiración constante, quien me enseñó el valor de la perseverancia y la pasión por el conocimiento. Este logro es un tributo a su amor y legado inolvidable.

Agradecimientos

A Dios, quien iluminó mi camino y me brindó fuerza y sabiduría en cada paso de este viaje. A mi familia, mi pilar fundamental, quienes han sido mi apoyo constante. A mis tías Adriana Rueda y Yamile Román, a mi tío Javier Román, mi madre Lida Rueda, mi abuela Elsa Román y mi novia Laura Pedraza, quienes han estado a mi lado en cada paso de este camino. A mis primos, quienes han compartido risas y apoyo. Su amor y apoyo han sido invaluable en mi formación, tal como lo mencioné en la dedicatoria.

A mis amigos, quienes han sido faros en mi camino. A Carlos Camargo, cuyos consejos y apoyo incondicional han sido invaluable, y a mi amigo Oscar García, cuya amistad ha sido un refugio de confianza y aliento inquebrantable.

Y al Ing. Carlos Arenas, mi guía incansable hasta el último minuto de este trabajo, cuyo conocimiento y orientación han sido cruciales en mi formación. A todos ustedes, les agradezco de corazón por ser parte de mi vida y por haberme apoyado en esta travesía. Sus contribuciones han sido el motor que me impulsó a alcanzar este logro.

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo principal que el análisis de la disponibilidad y demanda de las cuencas hidrográficas abastecedoras de agua para las poblaciones sea utilizado como herramientas en la planificación de la gestión del recurso hídrico usando como medio la creación de prospectivas, mediante escenarios probables utilizando como herramienta el software WEAP, especializado en gestión presente y futura del recurso hídrico. Se planteó un estudio prospectivo donde se definieron variables y actores clave para la determinación de tres escenarios probables definidos como tendencia, crecimiento poblacional inusualmente acelerado y expansión agrícola que posteriormente fueron modelados en el software. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación de los resultados considerando la oferta y la demanda, arrojando así que el escenario que representaba un crecimiento poblacional acelerado fue el que mostró mayores déficits de demanda cubierta en función de la oferta inicial planteada, mientras que los otros dos escenarios mantuvieron un déficit equivalente entre ellos. Lo que nos lleva a concluir, que la oferta planteada al inicio del estudio no sería capaz de cubrir la demanda total de los escenarios propuesto, especialmente si se da un aumento poblacional acelerado.

Palabras clave: oferta, demanda, recurso hídrico, prospectivas, escenarios, microcuenca Río Surata Bajo.

Abstract.

The main objective of this work is that the study of the supply and demand of the hydrographic basins that supply water to the populations is used as tools in the planning of the management of water resources, using as a means the creation of prospects through probable scenarios using the WEAP software as a tool. Specialized in present and future management of water resources. A prospective study was proposed where key variables and actors were defined for the determination of three probable scenarios defined as trend, unusually accelerated population growth and agricultural expansion that were later modeled in the software. Finally, an analysis of results was developed in terms of supply and demand, thus concluding that the scenario that represented an accelerated population growth was the one that showed the greatest deficits of demand covered according to the initial supply proposed, while the other two scenarios maintained an equivalent deficit between them. This leads us to conclude that the supply proposed at the beginning of the study would not be able to cover the total demand of the proposed scenarios, especially if there is an accelerated population increase.

Keywords: supply, demand, water resources, prospects, scenarios, lower Suratá River microbasin.

Introducción

El agua constituye un recurso esencial para el crecimiento y desarrollo de las comunidades, ya que se emplea en diversos sectores como la agricultura, la industria, entre otros, y es un recurso de consumo humano primordial. Los cambios en los sectores económicos, demográficos e incluso en las políticas públicas pueden afectar la forma de distribuir este recurso y su disponibilidad. Por eso, es importante planificar el consumo hídrico de las ciudades partiendo de su disponibilidad, lo cual se puede lograr mediante estudios prospectivos que permitan determinar escenarios futuros según variables establecidas.

Según Calapiña, Et all en [1], La prospectiva se conceptualiza como una contemplación del futuro anhelado, lo cual implica que se fundamenta en la realidad actual para guiar la trayectoria que una entidad debe emprender con el propósito de alcanzar un destino futuro deseado.

Esta herramienta se vuelve crucial en el contexto de la presente investigación, ya que la falta de planificación o la planificación inadecuada en el uso del recurso hídrico de una zona podría dar lugar a escasez y racionamientos, generando un impacto adverso tanto en el sector comercial e industrial, que depende de este recurso para sus actividades productivas, como en la calidad de vida de los habitantes que confían en dicho recurso en esa área. Incluso podría generar desestabilización social en el caso de que no se tenga fácil acceso al agua.

En el marco de la presente investigación, se propone realizar un estudio prospectivo sobre el consumo hídrico en la subcuenca del río Suratá para el año 2030, utilizando el software de modelado WEAP. Este programa, creado en 1988, es una herramienta informática que proporciona una perspectiva integral para la planificación de los recursos hídricos. Su propósito inicial consistió en ofrecer una herramienta de planificación que fuera flexible, completa y transparente, con el fin de evaluar la sostenibilidad de los actuales patrones de demanda y suministro de agua, además de

explorar posibles escenarios alternativos a largo plazo. En la actualidad, el Instituto de Ambiente de Estocolmo es responsable de gestionar su desarrollo y distribución.

1. Estudio de prospectivas de consumo hídrico de la microcuenca del Río Suratá Bajo para el Año 2030 por medio del Software WEAP

1.1 Planteamiento del problema

El agua desempeña un papel fundamental en la sustentación de la vida y el progreso. Además, se emplea en diversas industrias que van desde la producción de materias primas hasta la elaboración de productos complejos. Asegurar el suministro eficiente de este recurso puede tener un impacto significativo en el mantenimiento y desarrollo económico y social de un país, ciudad y/o comunidad.

Sin embargo, la ONU [2] ha señalado, mediante estadísticas y datos globales, diversos problemas que aún persisten en lo que respecta al manejo y acceso al agua potable, un tema que forma parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos en la Agenda 2030 (sexto objetivo). Estas cifras [2] señalan que aproximadamente el 40% de la población global se ve afectada por la escasez de agua, y se anticipa un aumento en este porcentaje. Asimismo, el acceso a servicios seguros de agua potable está ausente para tres de cada diez personas; y más de 1700 millones de individuos habitan en cuencas fluviales donde el consumo de agua excede la tasa de recarga.

En Colombia, según Buitrago [3], existen diversos conflictos por el agua que se reflejan en el modelo de modernidad asumido por el Estado en los últimos siglos, manifestándose en la disputa por el uso y posesión del agua entre la minería, la agricultura y la expansión urbana. Además, también hay problemas que reducen aún más la disponibilidad de este recurso, como la contaminación de las fuentes hídricas que abastecen a las urbanizaciones cercanas. Esto se debe tanto al manejo deficiente de residuos y la filtración de lixiviados de los rellenos sanitarios a los

ríos y quebradas que las componen, así, como a la disminución en la calidad del agua liberada a los afluentes debido a las plantas de tratamiento de aguas residuales. A estos problemas se suman la corrupción, que a menudo impide la ejecución o conclusión de proyectos destinados a mejorar la gestión del recurso, y la disparidad en la demanda del recurso entre sectores como el agrícola y la demanda para el consumo poblacional en algunas zonas del país.

La mala gestión del recurso y los diversos problemas pueden conducirnos a consecuencias muy graves, según el Banco Mundial [4]. Estas consecuencias podrían incluir el riesgo de escasez debido al desajuste entre la disponibilidad de agua dulce y la demanda concentrada, así como el riesgo de una disponibilidad reducida del agua debido a la disminución de la dotación de este recurso en algunas de las microcuencas del país, situación derivada del crecimiento poblacional y el cambio climático, factores que tienen un impacto significativo en el país.

1.2 Pregunta de investigación

¿En qué estado se presentará la gestión del agua en la subcuenca del Río Suratá Bajo en el 2030 si las variables demográficas, socioeconómicas y hábitos de consumo de las comunidades que se abastecen y aprovechan de esta experimentan variaciones en los próximos años?

1.3 Justificación

Existen estudios que analizan la deficiencia del recurso hídrico a nivel mundial, enfocándose en el consumo excesivo por parte del sector industrial [5]. Estos estudios desarrollan análisis prospectivos utilizando el método de construcción de escenarios, el cual es abordado en el presente trabajo. En estos análisis se evalúan variables como la demanda generada por el

crecimiento poblacional y el uso industrial del recurso, así como el impacto de estas variables en el precio del agua a nivel global.

En Latinoamérica, se ha observado una considerable cantidad de estudios realizados en Brasil utilizando la metodología prospectiva. Un ejemplo de ello es el trabajo de Welintom da Silva y otros [6], centrado en la identificación de variables socioeconómicas y climáticas que influyen en el consumo per cápita de agua. Este estudio propone un modelo estadístico para proyectar la demanda de agua en la región de Cuiabá.

De manera similar, en México se evidencia el uso de la metodología prospectiva en estudios como el de Nieto y Rodríguez Peñaloza [7], tratando asuntos relacionados con la gestión y gobernanza del agua, considerando aspectos económicos, sociales, ambientales, entre otros. Este enfoque resulta en la creación de un escenario teórico hipotético en una zona específica basado en la utilización del recurso hídrico.

Otro estudio relevante fue llevado a cabo por Patricia Puebla [8] en la provincia de Mendoza, Argentina, donde el objetivo principal fue resaltar la importancia del uso de la prospectiva en procesos de gestión de recursos, como el hídrico en este caso. Se desarrolló un modelo prospectivo del estado hídrico de la provincia hasta el 2030.

En el contexto de nuestro país, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [9] realizó un estudio de proyecciones de uso de agua para el periodo 2017-2030. Esto se realizó mediante la evaluación de tres escenarios posibles para evaluar la situación de algunas cuencas nacionales en función de la demanda de recurso y su capacidad.

En conclusión, se observa que se han llevado a cabo diversos estudios basados en esta metodología prospectiva. Esto se debe a que es posible obtener una visión del futuro que puede ser utilizada en la planificación eficiente del manejo del recurso hídrico. Este enfoque permite

mitigar efectos negativos como la escasez, los conflictos sociales por el control y la propiedad, y la demanda excesiva por parte de sectores de producción industrial o agrícola del recurso hídrico, presentando planes de acción en caso de que tales situaciones se produzcan.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Establecer prospectivas de consumo hídrico de la microcuenca del Rio Suratá Bajo para el año 2030 basadas en el planteamiento de escenarios probables de gestión del agua por medio del software WEAP que permita ver la relación oferta demanda como instrumento de la planificación del recurso hídrico en los años posteriores a su publicación.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables esenciales para la construcción de prospectivas sobre el uso del agua en la microcuenca del Rio Suratá Bajo a partir de un análisis MICMAC de la información demográfica, socioeconómica y ambiental.
2. Modelar el escenario actual de consumo de agua en la microcuenca del Río Suratá Bajo por medio del software WEAP a partir de las variables esenciales previamente definidas.
3. Generar una prospectiva del consumo de agua en la zona de estudio por medio de la metodología de construcción de escenarios para determinar la relación entre oferta y demanda de agua.

2. Marco referencial

2.1 Marco contextual

En relación con la prospectiva hídrica, se presentan conceptos básicos de la situación hidrológica en actual documentada en Colombia.

2.1.1 Oferta hídrica en Colombia

La oferta hídrica superficial se refiere a la cantidad de agua que fluye por la superficie en un lapso determinado, sin infiltrarse o evaporarse [2]; además, forma parte del agua empleada por los ecosistemas y los usuarios para llevar a cabo sus actividades esenciales [3]. Aunque el país cuenta con abundantes recursos hídricos, su distribución no es homogénea en términos temporales y espaciales. Por ende, se emplean valores medios anuales a lo largo de varios años para destacar la diversidad espacial de la disponibilidad de agua en superficie, resaltando las disparidades entre las distintas regiones del país [4]. En la Tabla 1 se muestra la oferta hídrica de cada área hidrográfica del país.

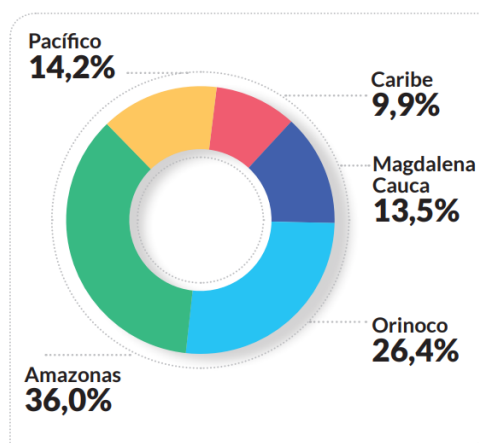
Tabla 1. *Oferta total por área hidrográfica.*

Área Hidrográfica	Oferta total (Mm ³)	Caudal medio (m ³ /s)
Caribe	200280	6350,8
Magdalena Cauca	273338	8667,4
Orinoco	533843	16928,0
Amazonas	728247	23092,5
Pacífico	287405	9113,5

Nota: Mm³: Millones de metros cúbicos. Tomada y adaptada del Estudio Nacional del Agua 2018 [4].

Se muestra en la Figura 1 la distribución de la oferta anual, de modo que nos permite observar que las áreas con mayor oferta hídrica son la zona Pacífica y Caribe, respectivamente.

Figura 1. Distribución por área hidrográfica de la oferta total.



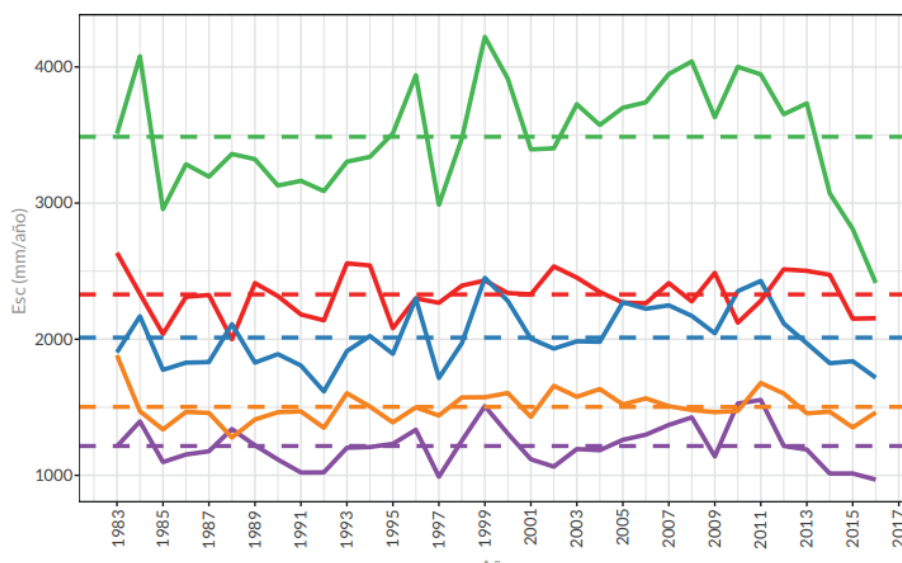
Nota: Tomado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4].

2.1.2 Hidroclimatología de Colombia

La variabilidad climática interanual en nuestro país está predominantemente influenciada por la presencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). Este evento conlleva efectos hidroclimáticos, como la reducción de la precipitación y los caudales medios mensuales de los ríos, así como una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal [5]. El mayor impacto de las consecuencias del Niño se ven reflejadas en el periodo de junio a febrero; además, Otras variaciones en las precipitaciones, la humedad del suelo y la temperatura en el país se explican por la influencia de la corriente de chorro de bajo nivel de los vientos alisios tropicales en la región occidental de Colombia [6].

2.1.2.1 Variación de la oferta hídrica superficial anual. La variación temporal anual de la oferta hídrica superficial promedio del país se expresan en la Figura 2 dividida en las cinco principales áreas hidrográficas del país. Estas variaciones se producen debido a los efectos presentados en el punto anterior y las temporadas invernales y de sequías que el país ha experimentado a lo largo del tiempo.

Figura 2. *Escorrentías medias anuales por área hidrográfica.*



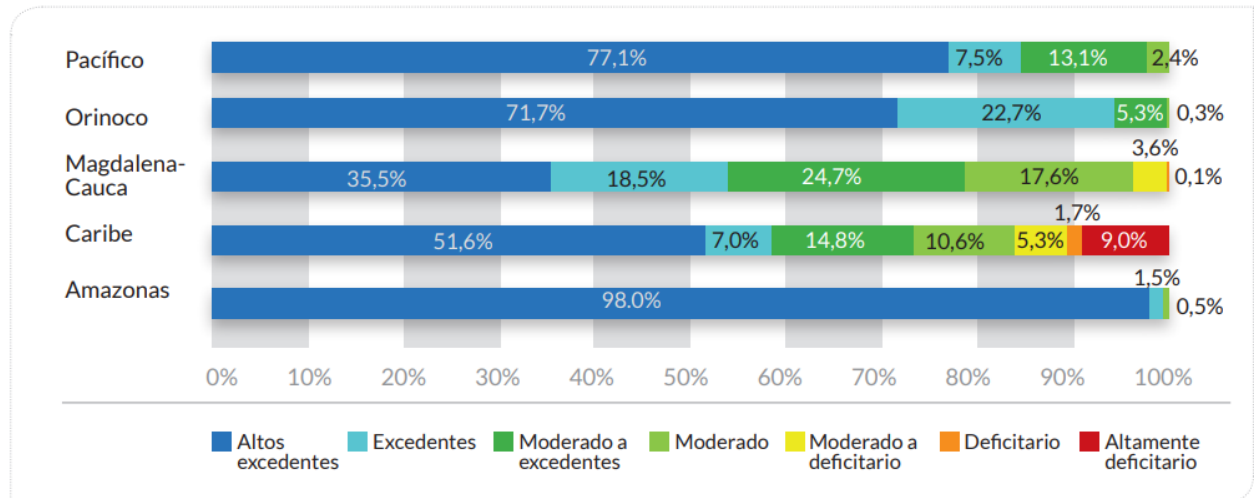
Nota: La grafica representa la variación con respecto a la media anual multianual (líneas horizontales punteadas) de cada una de las áreas hidrográficas del país. Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4].

2.1.2.2 Indicadores hidroclimatológicos. En el Estudio Nacional del Agua 2018, especifica el uso de una serie de indicadores que evalúan las características del clima y las regulaciones de caudales, los cuales son el índice de aridez y el índice de regulación hídrica [4].

El índice de aridez constituye un marcador que evalúa de manera cualitativa las condiciones naturales de sequedad, cuantificando el nivel de adecuación o inadecuación de las precipitaciones

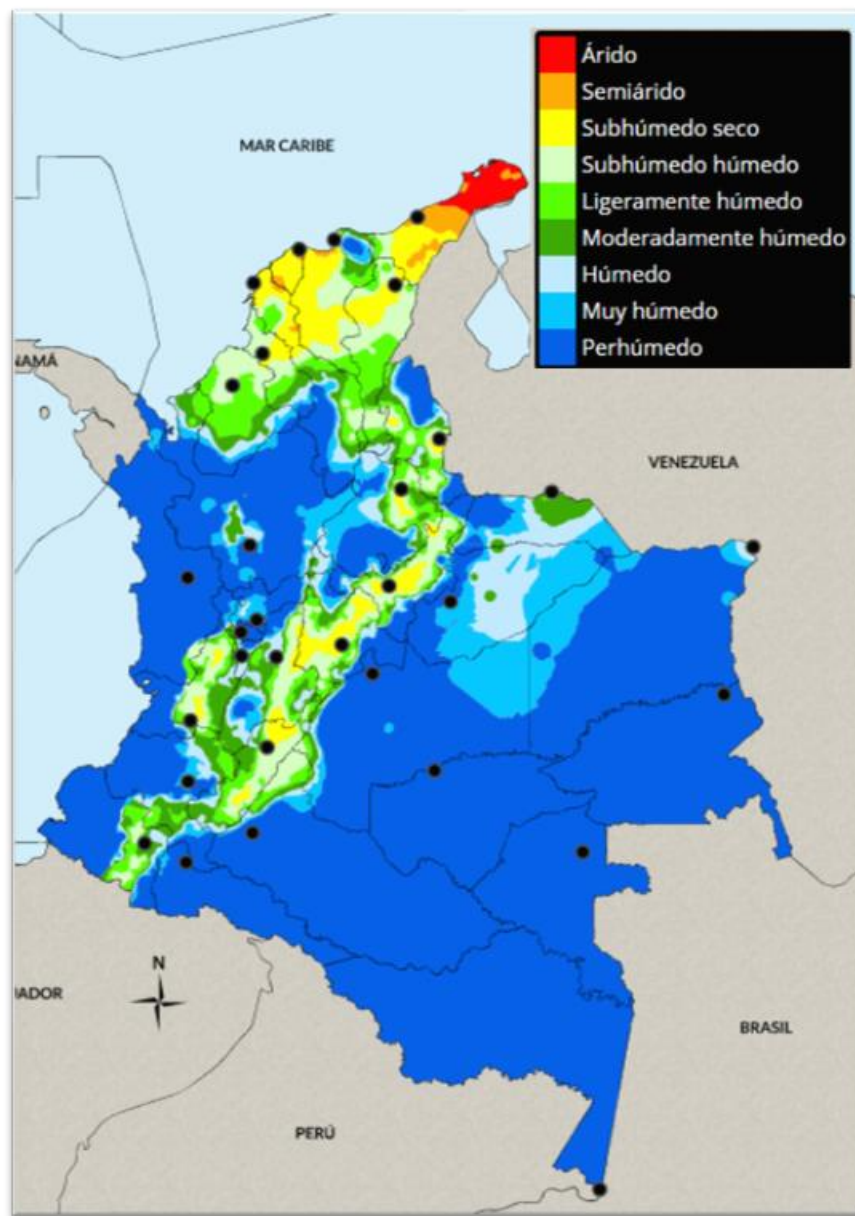
para mantener los ecosistemas de la zona [4]. La mayor parte del territorio colombiano presenta zonas de excedencia de agua a largo plazo tal como se puede ver en la Figura 3 y la Figura 4.

Figura 3. Distribución de índice de aridez por área hidrográfica.



Nota: Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4].

Figura 4. Mapa nacional multianual de índice de aridez.

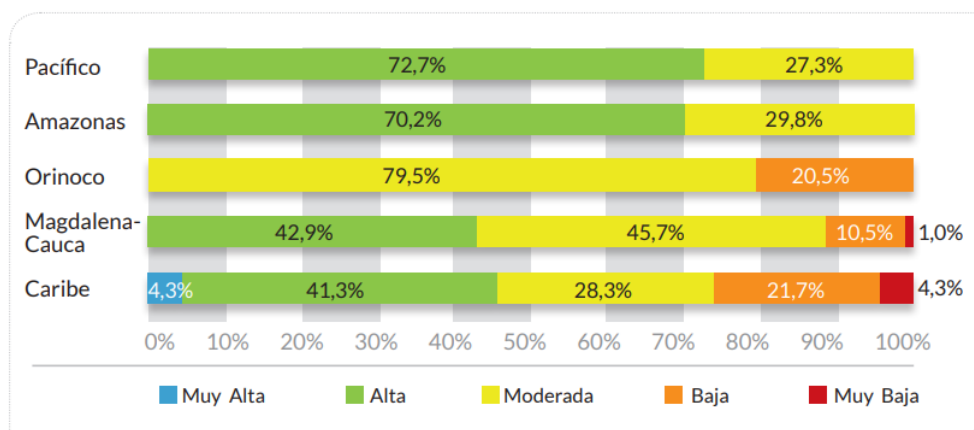


Nota: Tomado y adaptado de Atlas Interactivo IDEAM [7].

Por otro lado, el índice de regulación hídrica, que se muestra en la Figura 5, evalúa de manera cualitativa la capacidad de retención y regulación hídrica de las cuencas para señalar las

Áreas que presentan un flujo más constante y la presencia de niveles de caudal excepcionales, según el análisis de los promedios diarios de caudal [4].

Figura 5. Distribución del índice de regulación hídrica por área hidrográfica.



Nota: Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4].

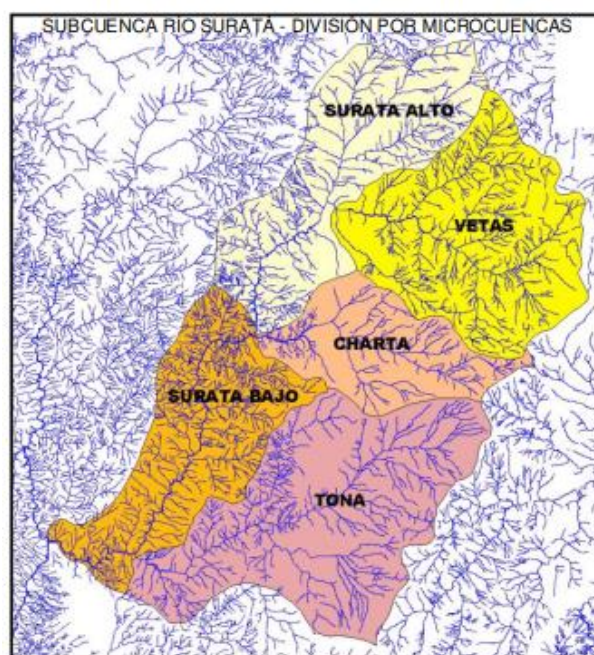
2.1.3 Descripción de la zona de estudio

2.1.3.1 Subcuenca del Río Suratá. La Subcuenca del Río Suratá se ubica al norte de la ciudad de Bucaramanga y es abastecedora de su área metropolitana. Posee una extensión de 68461 hectáreas, ocupa relieves escarpados o empinados con un rango de pendientes que va desde 7% hasta 75%; su cota mínima parte desde los 550 m.s.n.m. y la máxima a 4200 m.s.n.m. Se compone de ecosistemas que incluyen el bosque inferior tropical, el bosque subandino, andino, alto andino y la región de páramo. [8].

Hidrológicamente está constituida por cinco microcuencas: Río Vetas, Río Suratá Alto, Río Charta, Río Tona y Río Suratá Bajo. Posee un rendimiento hídrico estimado de 10-20 lps/km², se categoriza, según la metodología del IDEAM, como baja demanda no presentando problemas en

la cantidad de agua; por el contrario, Si experimenta ciertos inconvenientes en términos de calidad, ello se debe a la presencia de contaminación por sedimentos generados a partir de las operaciones de extracción de oro en la región superior de la subcuenca, particularmente en la microcuenca del Río Vetas [8]. La figura 6 muestra la división de las microcuencas que conforman la subcuenca del Río Surata.

Figura 6. *Distribución de microcuencas en la Subcuenca del Río Surata.*



Nota: Tomado de Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental: Subcuenca del Río Surata [8].

Entre otros datos generales también presentados por la CDMB, en la cuenca se estiman valores de temperatura que van desde cercanías de los 0°C en las zonas altas de los páramos de Tasajero, Monsalve, Vetas y Ramírez influencia del páramo de Berlín hasta 35°C para la parte baja de la desembocadura del Río Surata. Una humedad relativa media multianual de 81%. Evaporación media multianual que varía entre los 700 mm/año y los 1500mm/año, donde los picos

de mayor evaporación se presentan en el periodo de diciembre-marzo y los picos de menor evaporación en el periodo de septiembre-noviembre [8].

2.1.3.2 Oferta hídrica. El cálculo de la oferta hídrica realizado por la CDMB y divulgado en el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental (POMCA) se basó en el rendimiento hídrico de las microcuencas dando así un resultado de 9660,7 L/s, lo que representa una oferta hídrica total de 304,4 Mm³ [8].

Después, fueron llevados a cabo dos cálculos para el análisis de la oferta neta. En el primero, se implementó una reducción del 25% en la oferta de cada microcuenca, tanto por caudal ecológico como por calidad, resultando en una oferta neta equivalente al 50% de la oferta total. En el segundo cálculo, se aplicó de manera similar para las microcuencas de Vetás, Suratá Alto y Suratá Bajo, debido a problemas de calidad de agua derivados de residuos de la explotación minera de oro en el Río Vetás. Para las microcuencas de Charta y Tona, solo se aplicó una reducción del 10% por calidad, ya que no presentan mayores problemas de contaminación del agua [8]. Los resultados de dichos cálculos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de la oferta hídrica de la Subcuenca del Río Suratá.

Microcuencas	Área [Ha]	Rend. Hídrico [L/s]	Oferta Total [m ³]	%	Oferta Neta 1 [m ³]	Oferta Neta 2 [m ³]
Vetás	15559,9	2243,2	70742185,9	23,2	35371092,9	35371092,9
Suratá Alto	13762,6	2098,7	66184603,2	21,7	33092301,6	33092301,6
Charta	7090	1619,8	50835401	16,7	25417700,5	33043010,6
Suratá Bajo	12599	810	25544160	8,4	12772080	12772080
Tona	19357,5	2889	91107504	30	45553752	59219877,6
Total	68369	9660,7	304413854,1	100	152206927	173498362,7

Nota: Tomado y Adaptado de Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental [8].

2.2 Marco Teórico

2.2.1 *Prospectivas*

La predicción del futuro ha sido siempre una habilidad que la humanidad admira; en la antigüedad se enaltecía a ciertas personas con esta capacidad los llamados profetas, quienes lograron entre otras cosas dirigir grandes masas de seguidores debido a la credibilidad que lograron demostrar con la precisión y exactitud de sus predicciones. La prospectiva es un método actual de “profecía” que, no tiene nada que ver en sí con lo que conlleva el término en sí, pero tiene un objetivo similar, el de conocer los diferentes caminos que puede traer el futuro en base a las características propias de una situación presente. [9].

2.2.1.1 Definiciones. Según Mojica [10] la prospectiva, como disciplina, se le atribuye su fundación al filósofo francés Gastón Berger en 1964; y grandes aportes por parte de otros individuos como Bertrand de Jouvenel, politólogo y economista francés que dio la propuesta de los futuros posibles. Y a su vez encontramos en [11] algunas definiciones dadas por estos y otros personajes que han aportado al desarrollo de esta disciplina, así que:

- Gastón Berger la define como la disciplina que se dedica al estudio del futuro con el propósito de comprenderlo y ejercer influencia sobre él.
- Bertrand de Jouvenel plantea que hay dos enfoques para considerar el futuro: la primera es concebirlo como una realidad única, propia de oráculos, profetas y adivinos; la segunda es entenderlo como una realidad múltiple, a la cual Jouvenel denomina futuros "futuribles".

2.2.1.2 Metodologías. Existen varias metodologías distintas a la hora de realizar estudios de prospectivas, pero las más empleadas, de acuerdo con Rodríguez [9], son las siguientes:

- *Paneles de expertos:* Se compone de no más de diez o quince miembros con equilibrio de orígenes profesionales en función de un área temática determinada. Su principal peligro radica en generar una ardua identificación cultural o de intereses por parte de sus miembros, lo que resulta en un filtro en los resultados que se van a conseguir.
- *El método Delphi:* Es la metodología más empleada en los estudios prospectivos, implica la creación de cuestionarios que contienen un conjunto de suposiciones sobre el futuro, las cuales son evaluadas por expertos según variables predefinidas; las respuestas se procesan estadísticamente y se envían por segunda vez a quienes respondieron, para que en base a la opinión de la mayoría consideren si desean, o no, revisar su opinión. Este proceso se puede repetir al menos 3 veces, pero generalmente no se lleva a cabo más de una segunda vuelta, debido que es un método costoso en tiempo y recursos. Sus principales ventajas son el anonimato asegurado a los participantes y que es una herramienta que propicia consenso entre las opiniones.
- *Las tecnologías críticas:* Implica la creación de inventarios de tecnologías que se perciben como fundamentales para el desarrollo de una sociedad específica, siguiendo un esquema como el siguiente: 1) Se establecen criterios de selección de tecnologías; 2) Se crean paneles de expertos centrados en diversas áreas temáticas relacionadas con las dos dimensiones, Market Pull y Technology Push. 3) Cada panel elabora una lista de tecnologías siguiendo los criterios de selección establecidos; 4) Un comité director coordina y fusiona las listas elaboradas por los diversos grupos; 5) Por último, se seleccionan las tecnologías críticas de la lista final.

- *Construcción de escenarios:* Los escenarios son narrativas que delinean trayectorias alternativas hacia un futuro potencial basadas en suposiciones plausibles. Se puede simplificar el proceso de construcción de escenarios de la siguiente manera: 1) Plantear y fijar objetivos; 2) Identificar de variables o “fuerzas directoras” en relación con los objetivos; 3) Determinar factores influyentes que se puedan extraer; 4) Aplicar a estos factores un análisis importancia/incertidumbre. 5) La conjunción de estos elementos posibilita la elaboración de dos o tres narrativas alternativas. 6) Elaborar las secuencias de eventos que llevan a cualquiera de los escenarios mencionados. 7) Plasmar cada escenario de manera esquemática, asignándole un nombre, y identificar las amenazas y oportunidades que influyen en la probabilidad de su materialización, así como los indicadores que permiten anticipar su aproximación. Estos escenarios deben ser plausibles, estructuralmente diferentes entre sí, útiles para ayudar a la toma de decisiones y desafiantes respecto a la visión tradicional del futuro.

2.2.2 Software WEAP

WEAP, por sus iniciales en inglés (Water Evaluation and Planning), es una herramienta de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute con el propósito de colaborar y enriquecer el trabajo de los planificadores expertos [20].

Según el SEA (Stockholm Environment Institute) [20], el manejo de los recursos hídricos representa un desafío creciente en muchas regiones. La asignación de recursos limitados, la preservación de la calidad del medio ambiente, la planificación ante la variabilidad climática e incertidumbre, y la adopción de estrategias sostenibles para el uso del agua son cuestiones apremiantes para los planificadores de recursos hídricos. Los modelos convencionales enfocados

en el suministro de agua a menudo resultan insuficientes para explorar la amplia gama de opciones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos.

En la última década, ha surgido una perspectiva integral en el ámbito del desarrollo del agua, que sitúa los proyectos de suministro hídrico dentro del marco de la demanda, la preservación y protección de la calidad del agua, así como la conservación de los ecosistemas. WEAP incorpora estos principios en una herramienta práctica para la planificación de recursos hídricos y el análisis de políticas. La distinción de WEAP radica en su enfoque holístico, ya que simula tanto los componentes naturales (como la evapotranspiración, la escorrentía y el flujo base) como los elementos de infraestructura (como embalses y el bombeo de agua subterránea) de los sistemas hídricos. Esto permite a los planificadores acceder a una visión más completa de los factores que deben considerarse en la gestión de los recursos hídricos, tanto actuales como futuros. El resultado final es una herramienta eficaz para evaluar alternativas en el desarrollo y la administración de los recursos hídricos.

2.2.2.1 Funcionalidades y Usos. WEAP ofrece una variedad de funcionalidades clave:

- *Base de Datos del Balance Hídrico:* Ofrece un sistema completo para monitorear y mantener información acerca de la oferta y la demanda de agua.
- *Generación de Escenarios:* WEAP tiene la capacidad de simular diversos aspectos, como la demanda, el suministro, la escorrentía, los caudales, el almacenamiento, la generación, el tratamiento y la calidad del agua en los cursos de agua.
- *Análisis de Políticas:* Evalúa una amplia variedad de opciones vinculadas al desarrollo y la gestión de los recursos hídricos, considerando usos múltiples y competencias en los sistemas hídricos.

3. Metodología

Para el presente trabajo, se aplicó la metodología estándar de escenarios para estudios prospectivos, la cual se encuentra explicada en el punto anterior. Luego, se realizó el modelamiento de los escenarios en el software WEAP para obtener datos cuantitativos de consumo hídrico basados en las variables e hipótesis de cada escenario.

3.1 Metodología de los escenarios

La metodología de los escenarios se detalla exhaustivamente en el documento 'Metodología de los Escenarios para Estudios Prospectivos' de Cely (1999) [19]. El contenido presentado a continuación se basa completamente en esta referencia. La metodología de escenarios tiene como propósito examinar el fenómeno objeto de estudio desde una perspectiva retrospectiva y contemporánea, considerando la influencia de los grupos sociales responsables de su evolución. Luego, se busca proyectar la realidad futura mediante la creación de escenarios.

3.1.1 Objetivos de la metodología

Esta metodología posee 3 objetivos fundamentales, los cuales deben cumplirse a cabalidad; los cuales son:

- Identificar y establecer las conexiones entre las variables fundamentales que definen el sistema objeto de estudio a través de un análisis integral explicativo.
- A partir de las variables esenciales, identificar a los actores principales y los recursos de los que disponen para llevar a cabo sus proyectos.

- Describir, a través de la creación de escenarios, la posible evolución del sistema en estudio, fundamentándose en la observación y análisis de las variables esenciales, así como en los comportamientos de los actores en relación con un conjunto de hipótesis.

3.1.2 Fases

Con el fin de alcanzar estos objetivos, la metodología de escenarios se desarrolla en dos fases principales: la construcción de la base analítica y la elaboración de escenarios.

3.1.2.1 Construcción de la base analítica. En esta primera fase se pretende realizar una imagen de la situación actual del sistema y su entorno. Esta fase, a su vez, se dividió en dos fases: El análisis estructural y el análisis de juego de actores.

3.1.2.1.1 Análisis estructural. Su relevancia reside en la capacidad para destacar de manera precisa las conexiones entre las variables que definen el sistema analizado. Asimismo, facilita la identificación de las variables clave o fundamentales que deben ser la base prioritaria para la reflexión sobre el futuro. Esta fase se desarrolló en tres pasos:

1. *Identificación de variables y delimitación del sistema:* Se generó una lista, tan completa como fuera posible, de las variables que describen el sistema que abarca el fenómeno de estudio y su entorno. En esta lista se buscó englobar los principales sectores que podrían afectar el consumo y la oferta-demanda hídrica, como son sector demográfico, político, ambiental y socioeconómico. Posteriormente la lista fue revisada y analizada por diferentes expertos en cada uno de estos sectores.

2. *Localización de las relaciones en la matriz del análisis estructural:* En esta matriz, se establecieron relaciones entre las variables, indicando la influencia que pueden tener entre sí. La influencia que una variable puede tener sobre otra se puede clasificar como directa, indirecta o potencial. De igual manera la asignación de influencias entre variables de esta matriz fue supervisada por los mismos expertos del punto anterior.
3. *Búsqueda de las variables clave a través del método MICMAC:* Para este paso, se hizo uso del software MICMAC que permitió simplificar el desarrollo y análisis de las relaciones entre variables, con el propósito de identificar las variables claves del sistema que son las más dependientes y motrices, que se determinan en base al tipo de relación que tengan unas con respecto a otras.

3.1.2.1.2 Análisis de juego de actores: Método MACTOR. En un estudio prospectivo se entiende que el futuro no puede determinarse únicamente por tendencias probabilísticas provenientes del pasado, dado que los actores involucrados en este sistema cuentan con diversas vías para llevar a cabo sus acciones, alcanzar sus metas y ejecutar sus proyectos, el principal desafío de un estudio prospectivo radica en determinar el número óptimo de actores que deben ser considerados.

El análisis de juego de actores se desarrolla en tres etapas:

1. *Etapas 1:* Se realizar un cuadro que permita relacionar los actores con las variables clave obtenidas en la fase anterior. La información presentada en esta tabla se relacionará con los objetivos o comportamientos, así como con los mecanismos de acción de cada actor. Estos elementos se manifestarán en los proyectos, aspiraciones y preocupaciones que los actores tienen con respecto a cada variable.

2. *Etapas 2:* Se analiza la posición adoptada por cada uno de los actores frente a las conductas de los demás en relación con una variable específica, empleando una matriz de actores por objetivos (MAO). Este método posibilita la clasificación de la posición que cada actor adopta frente a las acciones u objetivos de otros, calificándola como favorable, neutra o desfavorable.
3. *Etapas 3:* Se exploran las dinámicas de poder entre los actores, un aspecto crucial ya que las posibles alianzas y conflictos se derivan en gran medida de la capacidad de un actor para influir en las prioridades de los demás. Para identificar estas relaciones de poder, se utilizan dos matrices: la matriz de los medios de acción directos (MAD) y la matriz de los medios de acción indirectos (MAI).

3.1.2.2 Elaboración de escenarios. La etapa de creación de escenarios tiene como objetivo reconocer los diversos futuros potenciales y clasificarlos según su probabilidad de realización. El enfoque metodológico para desarrollar escenarios implica, en primera instancia, convertir las variables clave en hipótesis. Estas hipótesis deben redactarse de manera que faciliten la medición de las respectivas variables en términos de su comportamiento actual y su situación futura. Es crucial que cada hipótesis cumpla con las siguientes características:

- Contar con un indicador de la situación actual de la variable, preferiblemente cuantificable.
- Tener un horizonte futuro.
- Presentar una condición futura formulada a modo de hipótesis.

Existen varios métodos para la elaboración de escenarios de entre los cuales se profundiza en uno de los más utilizados, el método de impactos cruzados (SMIC).

31.2.2.1 Método de impactos cruzados (SMIC). El método SMIC (Sistema de Modelización de Impactos y Consecuencias) calcula la probabilidad de que ocurra una hipótesis, teniendo en cuenta las relaciones entre los diversos elementos de un sistema. Este método se fundamenta en la evaluación de los cambios en las probabilidades de ocurrencia de un conjunto de hipótesis (escenarios), como consecuencia de la aparición de una de ellas.

Jerarquía de los escenarios: En base a los resultados obtenidos de las probabilidades del método SMIC, se ordena de forma descendente las hipótesis o escenarios iniciando por aquel que posea la mayor probabilidad de ocurrencia.

4. Resultados

A continuación, se exponen los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología previamente propuesta para la generación de perspectivas de oferta y demanda de la microcuenca del Río Suratá Bajo para el año 2030.

4.1 Análisis estructural

4.1.1 Listado de variables

En la Tabla 3 se presenta la lista de variables que podrían tener influencia en el consumo y demanda hídrica de la zona de estudio.

Tabla 3. *Listado de variables definidas.*

Demográficas	Políticas	Ambientales	Sociales	Económicas
Crecimiento poblacional.	Políticas de gestión el agua.	Cambio climático.	Cambio en los patrones de consumo.	Cambio en el precio del servicio.
Migración.	Políticas ambientales.	Cambio en los patrones de temperatura.		Inversión en infraestructura.
Cambio en el uso del suelo.	Acuerdos internacionales.	Cambio en la cobertura de la tierra.		
		Escasez de agua.		
		Contaminación del agua.		

Nota: Las variables fueron propuestas por el autor y revisadas y valoradas por expertos.

4.1.2 Matriz de influencias

Se realizó un examen de las influencias entre las variables mencionadas anteriormente mediante el uso de una matriz de influencias. Las variables se comparan en términos de filas versus columnas, y los valores de la matriz indican el tipo de influencia que cada variable tiene sobre la que está siendo comparada, siendo: Nula (0), Directa (D), Indirecta (I) y Potencial (P). Esta relación se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. *Matriz de influencias.*

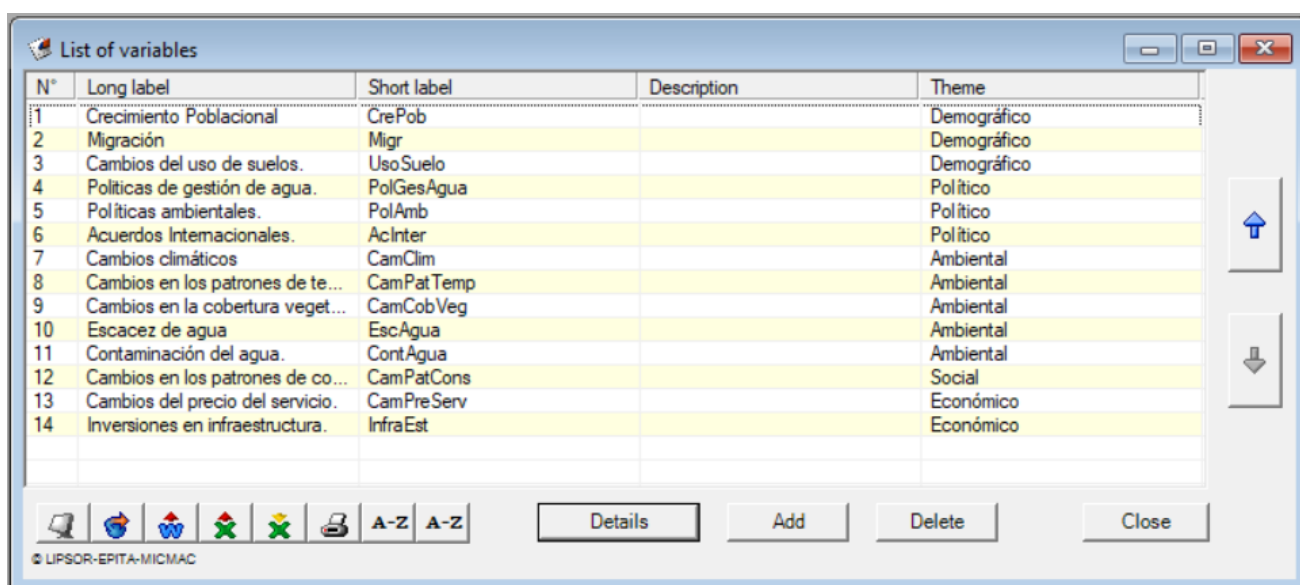
	CrePob	Migr	UsoSuelo	PolGesAgua	PolAmb	AcInter	CamClim	CamPatTemp	CamCobVeg	EscAgua	ContAgua	CamPatCons	CamPreServ	InfraEst
CrePob	0	D	I	P	P	P	I	I	I	I	P	D	I	D
Migr	D	0	I	I	P	I	P	P	I	P	P	D	I	D
UsoSuelo	D	I	0	P	P	P	I	I	D	D	I	D	D	D
PolGesAgua	P	P	P	0	D	P	I	I	P	D	D	D	P	P
PolAmb	P	P	P	D	0	D	P	P	P	P	D	I	P	P
AcInter	0	P	0	0	0	0	P	0	0	P	0	P	0	0
CamClim	P	P	P	0	I	P	0	0	I	P	P	D	0	0
CamPatTemp	P	P	I	P	I	P	D	0	P	P	0	D	0	0
CamCobVeg	I	I	D	P	D	0	I	I	0	D	P	0	P	0
EscAgua	I	I	D	D	I	P	I	I	I	0	0	D	0	D
ContAgua	D	I	I	D	D	0	I	P	I	D	0	D	0	P
CamPatCons	D	D	D	D	P	P	I	I	P	D	P	0	0	I
CamPreServ	P	P	I	D	D	P	I	I	0	D	P	D	0	I
InfraEst	D	I	D	D	I	P	P	P	P	D	D	P	I	0

Nota: Las relaciones de las variables fueron definidas por el autor y revisadas y valoradas por expertos.

4.1.3 Método MICMAC

Se aplicó el método MICMAC con el objetivo de definir las variables clave, aquellas que poseen mayor motricidad y dependencia. Para llevar a cabo este método, se utilizó el software del mismo nombre, MICMAC. Como primer paso, se definieron las variables previamente mencionadas en los puntos anteriores en el software, tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Definición de las variables.



N°	Long label	Short label	Description	Theme
1	Crecimiento Poblacional	CrePob		Demográfico
2	Migración	Migr		Demográfico
3	Cambios del uso de suelos.	UsoSuelo		Demográfico
4	Políticas de gestión de agua.	PolGesAgua		Político
5	Políticas ambientales.	PolAmb		Político
6	Acuerdos Internacionales.	AcInter		Político
7	Cambios climáticos	CamClim		Ambiental
8	Cambios en los patrones de te...	CamPatTemp		Ambiental
9	Cambios en la cobertura veget...	CamCobVeg		Ambiental
10	Escasez de agua	EscAgua		Ambiental
11	Contaminación del agua.	ContAgua		Ambiental
12	Cambios en los patrones de co...	CamPatCons		Social
13	Cambios del precio del servicio.	CamPreServ		Económico
14	Inversiones en infraestructura.	InfraEst		Económico

Nota: Realizada por el autor en el software MICMAC.

Posteriormente, se adaptaron los datos de la matriz de influencias al software, siguiendo los parámetros de la Tabla 5, y se ajustaron conforme a la interpretación del programa, como se ilustra en la Figura 8.

Tabla 5. *Parámetros de la matriz de influencia en el software MICMAC.*

Influencias en la matriz.	Valor en la matriz de influencia.	Influencias en el MICMAC.	Valores en el MICMAC.
Nula	0	No influence	0
Indirecta	I	Weak	1
Directa	D	Moderate	2
Potencial	P	Strong	3
		Potencial	p

Figura 8. *Variable de influencias adaptada al software MICMAC.*

	1 : CreP	2 : Migr	3 : UsoS	4 : PolGes	5 : Pol	6 : Acl	7 : Cam	8 : Cam	9 : Cam	10 : Esc	11 : Con	12 : Ca	13 : Cam	14 : InfraEst
1 : CrePob	0	3	2	P	P	P	1	1	1	2	P	3	1	3
2 : Migr	3	0	1	1	P	P	P	P	1	P	P	3	1	3
3 : UsoSuelo	3	1	0	P	P	P	2	1	3	3	2	3	3	3
4 : PolGesAqua	P	P	P	0	3	P	2	1	P	3	3	3	P	P
5 : PolAmb	P	P	P	3	0	3	P	P	P	P	3	1	P	P
6 : AclInter	0	P	0	0	0	0	P	0	0	P	0	P	0	0
7 : CamClim	P	P	P	0	1	P	0	0	2	P	P	3	0	0
8 : CamPatTemp	P	P	1	P	1	P	3	0	P	P	0	3	0	0
9 : CamCobVeg	2	1	3	P	3	0	2	1	0	3	P	0	P	0
10 : EscAgua	2	1	3	3	1	P	2	1	1	0	0	3	0	3
11 : ContAgua	3	2	2	3	3	0	2	P	1	3	0	3	0	P
12 : CamPatCons	3	3	3	3	P	P	2	1	P	3	P	0	0	1
13 : CamPreServ	P	P	1	3	3	P	1	1	0	3	P	3	0	2
14 : InfraEst	3	1	3	3	1	P	P	P	P	3	3	P	2	0

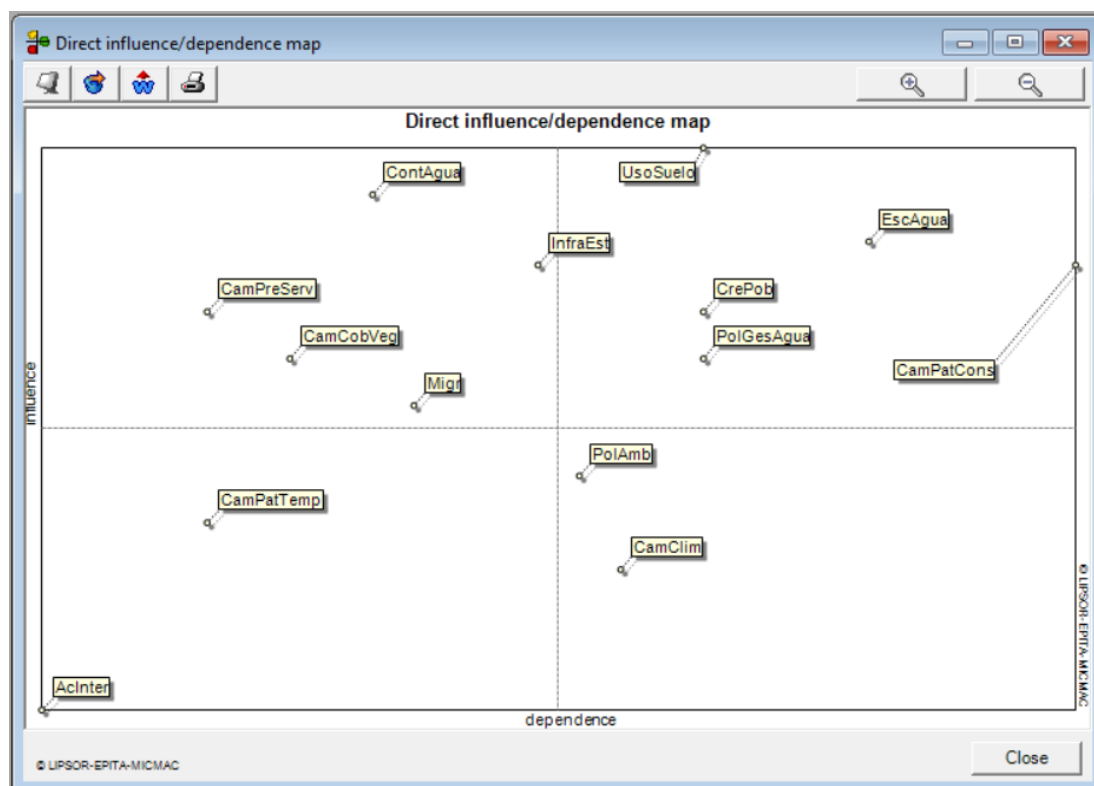
Influences range from 0 to 3, with the possibility to identify potential influences:
0: No influence
1: Weak
2: Moderate influence
3: Strong influence
P: Potential influences

© UPSOR-EPITA-MICMAC

Nota: Realizado por el autor en el software MICMAC.

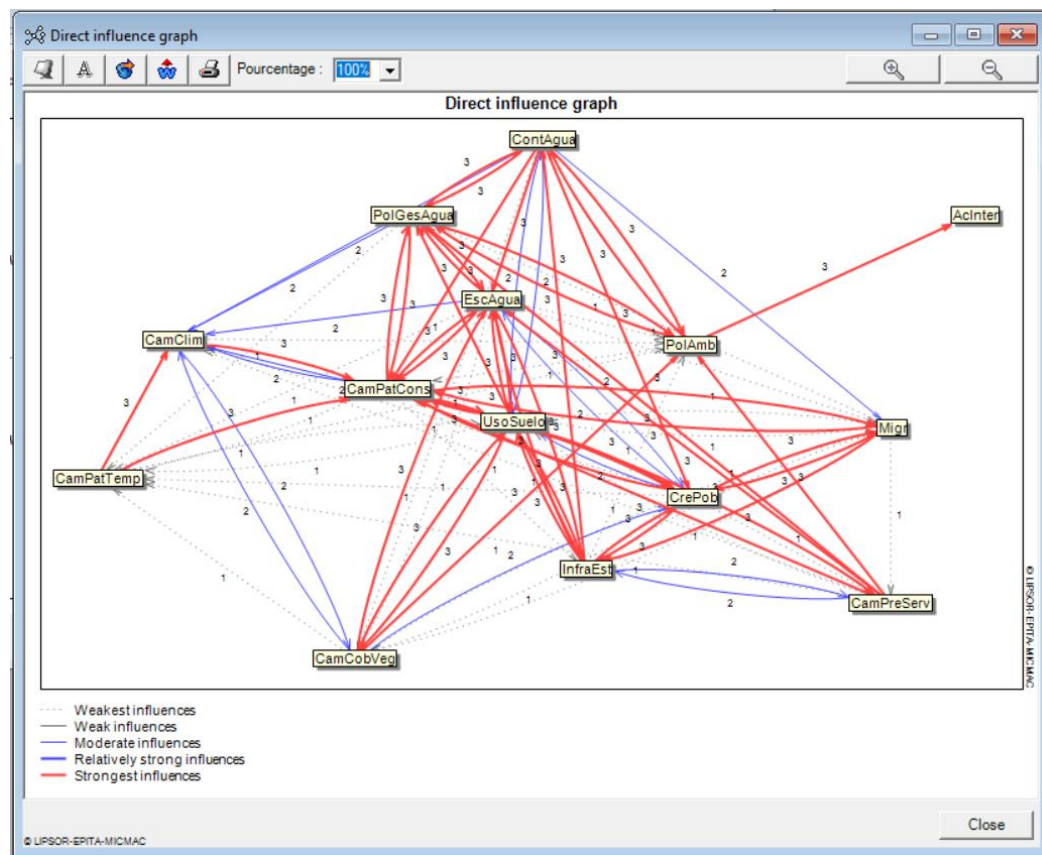
Una vez que los datos fueron ingresados y se revisó su adecuada consignación en el software, se presentan los siguientes resultados. En la Figura 9 se muestra el mapa de influencias directas entre las variables, donde se analiza la relación de influencia (eje vertical) y dependencia (eje horizontal) entre las variables. Las variables con mayor motricidad se encuentran en el cuadrante superior derecho.

Figura 9. Mapa de influencia/dependencia directa.



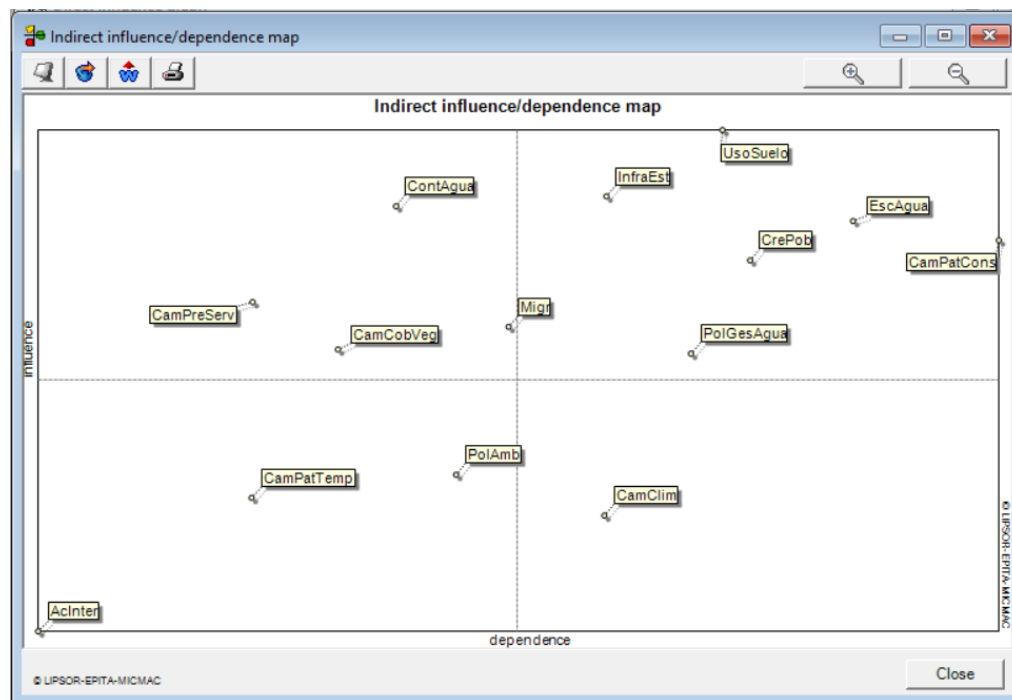
Nota: Realizado por el autor en el software MICMAC.

Estas variables son las que proporcionan mayor motricidad al sistema debido a las relaciones de influencia que tienen con las demás variables. Esto se evidencia de manera más visual en la Figura 10, que se presenta a continuación, donde se muestran las relaciones de mayor influencia con flechas de color rojo.

Figura 10. Gráfico de influencias directas.

Nota: Realizada por el autor en el software MICMAC.

De igual manera, se presentan las relaciones de influencia indirecta en la Figura 11, las cuales son influencias que dependen de otras variables para ejercer su influencia sobre una o varias de estas.

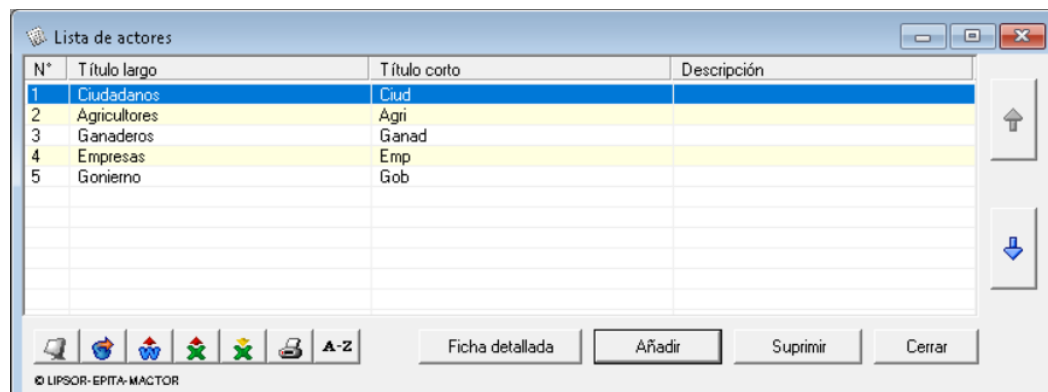
Figura 11. Mapa de influencia/dependencia indirecta.

Nota: Realizado por el autor en el software MICMAC.

4.2 Análisis de juego de Actores

4.2.1 Método MACTOR

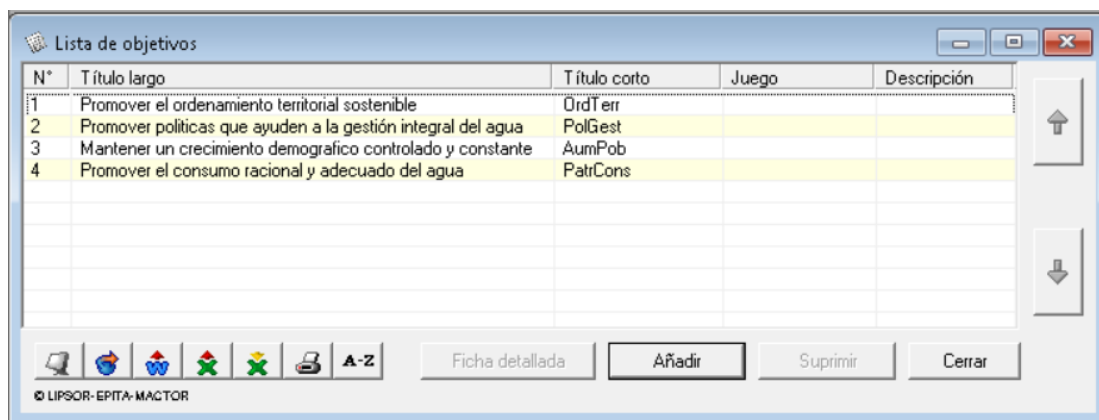
Se aplicó el método MACTOR para relacionar las variables previamente definidas en el método MICMAC en función de los actores que puedan influir en ellas. Este método se implementó mediante el uso del software del mismo nombre, MACTOR. En primer lugar, se definieron los actores que podrían tener influencia en las probabilidades de ocurrencia de las variables delimitadas en el paso anterior, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Definición de los actores.


N°	Título largo	Título corto	Descripción
1	Ciudadanos	Ciud	
2	Agricultores	Agri	
3	Ganaderos	Ganad	
4	Empresas	Emp	
5	Gobierno	Gob	

Nota: Realizada por el autor en el software MACTOR.

Como segundo paso, se definieron objetivos en función de las variables definidas en el método MICMAC, los cuales están relacionados con los actores propuestos, como se ilustra en la Figura 13.

Figura 13. Definición de objetivos.


N°	Título largo	Título corto	Juego	Descripción
1	Promover el ordenamiento territorial sostenible	OrdTerr		
2	Promover políticas que ayuden a la gestión integral del agua	PolGest		
3	Mantener un crecimiento demográfico controlado y constante	AumPob		
4	Promover el consumo racional y adecuado del agua	PatrCons		

Nota: Realizada por el autor en el software MACTOR.

A continuación, se desarrolló una matriz de influencias directas, que indica la influencia que tiene un actor sobre otro, según se muestra en la Figura 14. También se pueden observar los parámetros de asignación para los valores de influencias.

Figura 14. Matriz de influencias directas.

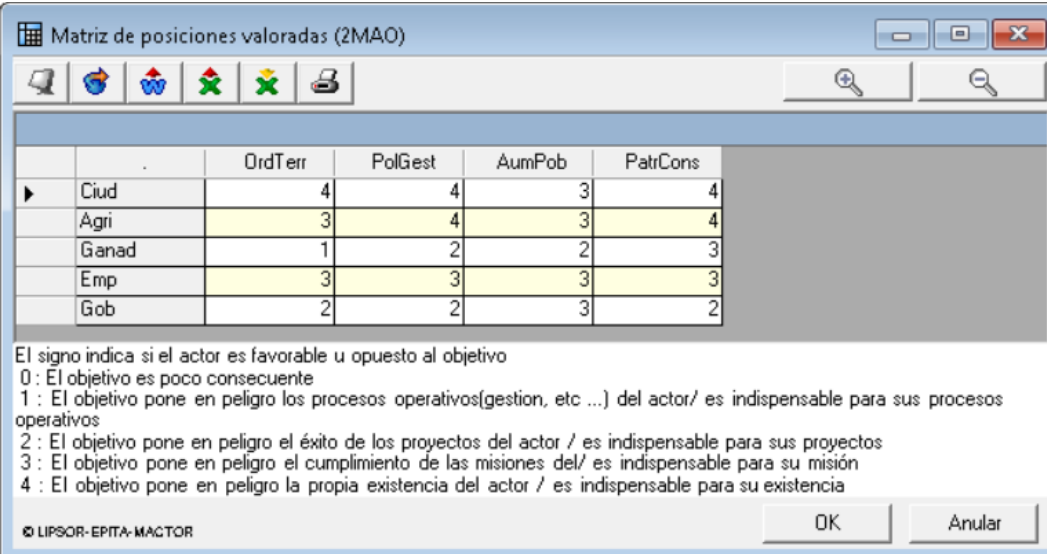
	Ciud	Agri	Ganad	Emp	Gob
Ciud	0	3	3	4	4
Agri	4	0	4	2	4
Ganad	2	2	0	1	2
Emp	2	1	1	0	2
Gob	2	2	2	2	0

Las influencias se puntúan de 0 a 4 teniendo en cuenta la importancia del efecto sobre el actor :
 0 : Sin influencia
 1 : Procesos
 2 : Proyectos
 3 : Misión
 4 : Existencia

© LIPSOR-EPITA-MACTOR

Notas: Realizada por el autor en el software MACTOR.

Por último, se elaboró la matriz de posiciones valoradas, en la cual se analiza la influencia de los actores en función de los objetivos propuestos basados en las variables definidas en el análisis MICMAC. Este análisis se presenta en la Figura 15.

Figura 15. Matriz de posiciones valoradas.


		OrdTerr	PolGest	AumPob	PatrCons
►	Ciud	4	4	3	4
	Agri	3	4	3	4
	Ganad	1	2	2	3
	Emp	3	3	3	3
	Gob	2	2	3	2

El signo indica si el actor es favorable u opuesto al objetivo
 0 : El objetivo es poco consecuente
 1 : El objetivo pone en peligro los procesos operativos(gestion, etc ...) del actor/ es indispensable para sus procesos operativos
 2 : El objetivo pone en peligro el éxito de los proyectos del actor / es indispensable para sus proyectos
 3 : El objetivo pone en peligro el cumplimiento de las misiones del/ es indispensable para su misión
 4 : El objetivo pone en peligro la propia existencia del actor / es indispensable para su existencia

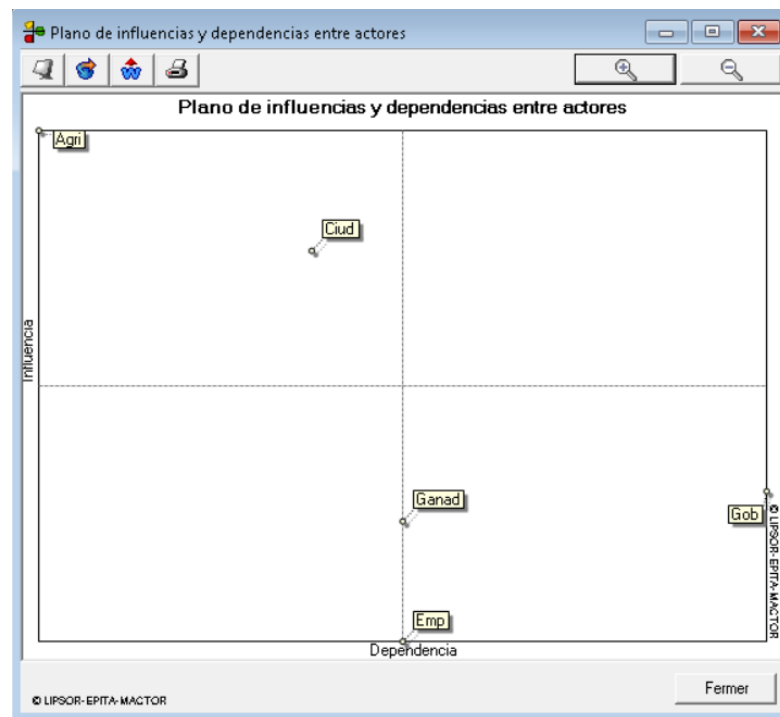
© LIPSOR-EPITA-MACTOR

OK Anular

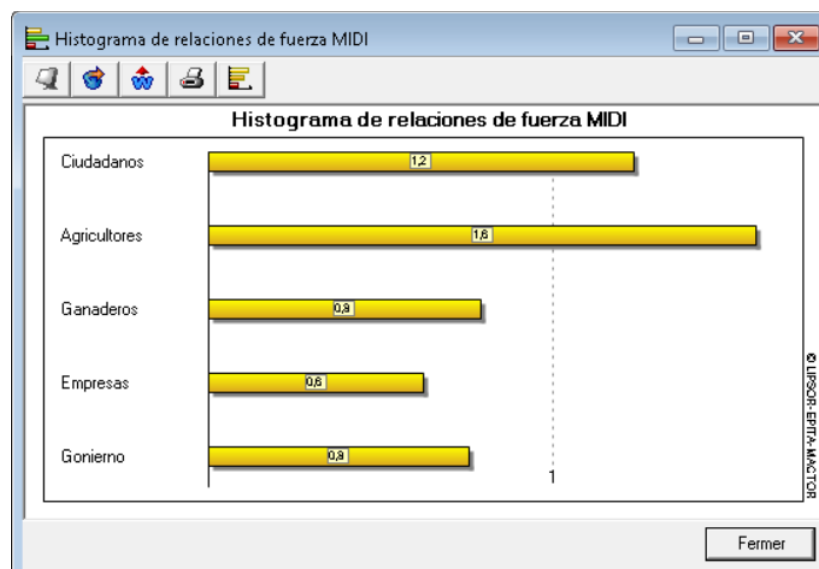
Nota: Realizada por el autor en el software MACTOR.

A partir de estos datos, el programa arrojó los siguientes resultados, los cuales evidencian las relaciones entre los actores y sus interacciones con los objetivos planteados. En los resultados se presentan las relaciones de dependencia, influencia y poder de los actores, así como su contribución hacia los objetivos planteados, con el fin de determinar los actores principales del estudio.

Basado en la Figura 16, se determina que los actores con mayor influencia fueron los ciudadanos y los agricultores. Asimismo, en el histograma de poder, se observa que los agricultores y los ciudadanos, respectivamente, fueron los que poseían el mayor índice.

Figura 16. *Plano de influencia-dependencia entre actores.*

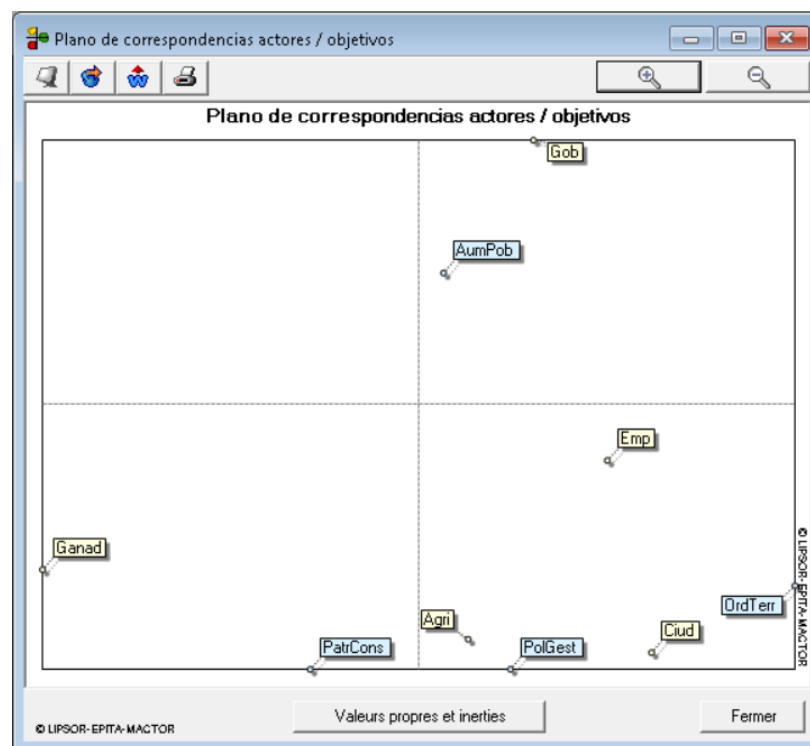
Nota: Realizada por el autor en el software MACTOR.

Figura 17. *Histograma vector de fuerzas entre actores.*

Nota: Realizada por el actor en el software MACTOR.

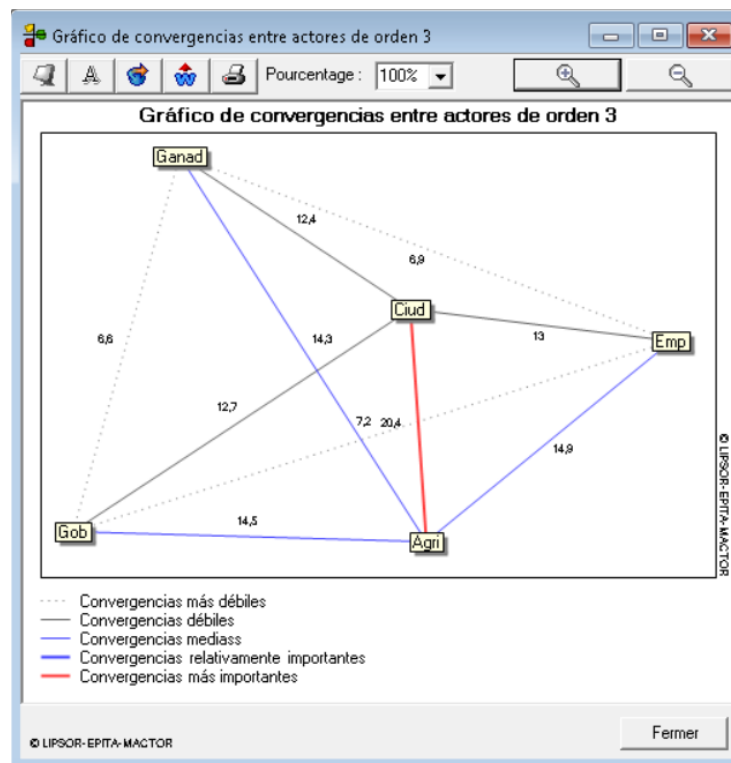
En la Figura 18, se presenta el gráfico de correspondencia entre actores y objetivos, observándose que los ciudadanos, agricultores y empresarios coinciden en el cuadrante con el mayor número de objetivos presentes. Sin embargo, se destaca una mayor proximidad entre los ciudadanos y los agricultores con respecto a los objetivos, siendo estos dos grupos los más cercanos entre sí.

Figura 18. Plano de correspondencias actores/objetivos.



Notas: Realizada por el autor en el software MACTOR.

De igual manera, en la Figura 19, expresada gráficamente, se evidenció una convergencia fuerte entre los ciudadanos y agricultores en función de los objetivos en los que son más influyentes.

Figura 19. *Gráfico de convergencia de actores.*

Nota: Realizada por el autor en el software MACTOR.

4.3 Elaboración de escenarios

4.3.1 Escenario #1: *Tendencial.*

No hay ninguna variación en las condiciones actuales de la subcuenca del Río Suratá, se mantuvo un crecimiento poblacional promedio anual de 2,64% en la ciudad de Bucaramanga.

Como primer escenario, se buscó analizar la situación de la demanda y su cobertura sin hacer cambios en el modelo, lo cual implica que la condición del área de investigación se mantenga tal como se encuentra en el año base. El dato que determinó los resultados de este escenario fue la tasa de crecimiento poblacional calculada a partir de datos del DANE correspondientes a los censos

poblacionales de 2005 y 2018, entre los cuales se definió una tasa del 2,64%, que, para efectos prácticos, fue la utilizada en el modelo.

4.3.2 Escenario #2: Crecimiento poblacional inusualmente acelerado.

El crecimiento poblacional de Bucaramanga sufrió un cambio considerable debido al aumento en los índices de natalidad y los elevados niveles de migración hacia la ciudad, lo cual provocó que la tasa de crecimiento poblacional anual se duplicara pasando de un 2,64% a un 5,28%.

Según el Banco Mundial [21], el escenario global actual se caracteriza por una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos. El rápido crecimiento de la población mundial, junto con las prácticas actuales, pronostica que para 2030, la discrepancia entre la demanda prevista y la oferta proyectada de agua alcanzará el 40%. Escenarios de escasez de agua crónica, incertidumbre hidrológica y fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones y sequías, emergen como amenazas destacadas para la estabilidad y el bienestar global.

Con base en lo anterior, se optó por definir un escenario que presente un aumento acelerado de la población en el periodo de tiempo del estudio, siendo los principales factores propuestos los elevados niveles de migración hacia la ciudad de Bucaramanga y el aumento en los índices de natalidad tanto de habitantes nativos de la ciudad como de aquella población considerada en la migración. Por tanto, se propuso un caso extremo que permita mostrar la influencia del crecimiento de la población en la disponibilidad del agua. Se determinó duplicar la tasa de crecimiento poblacional anual del escenario tendencial, por lo cual, la tasa de crecimiento aplicada a este escenario equivale al 5,28%.

4.3.3 Escenario #3: Expansión agrícola.

Debido a que la población de la ciudad continúa aumentando también es necesario un aumento de la actividad agrícola y por tanto la expansión del área de cultivos de la zona, por lo que se estimó un crecimiento de la actividad agrícola de un 1,85%.

El crecimiento demográfico es un factor determinante en gran medida para las actividades agrícolas, como se expresa en el trabajo de Andrade titulado 'Los Desafíos de la Agricultura' [22]. Según este trabajo, la población actual de 7,300 millones en 2016 aumentará a aproximadamente 9,700 millones para el año 2050 y alcanzará cerca de 11,000 millones a finales de siglo, con el mayor incremento esperado en países en vías de desarrollo. También se estima que la expectativa de vida aumentará de 70 años entre 2010-2015 a 77 años en 2050 y a 83 años en 2100.

Con el fin de garantizar que esta población mantenga una dieta moderada y adecuada, se determinó que la actividad agrícola debe aumentar en un 70% para el año 2050, según datos iniciales estimados por las Naciones Unidas en 2012 [23]. Basándonos en esta premisa, para el presente trabajo se tomó como base la tasa de crecimiento determinada del 70% y se calculó una tasa de crecimiento anual que, entre el periodo de 2012 a 2050, corresponde a un 1.85% anual. Dicho valor fue el utilizado en este escenario.

4.4 Modelación en el Software.

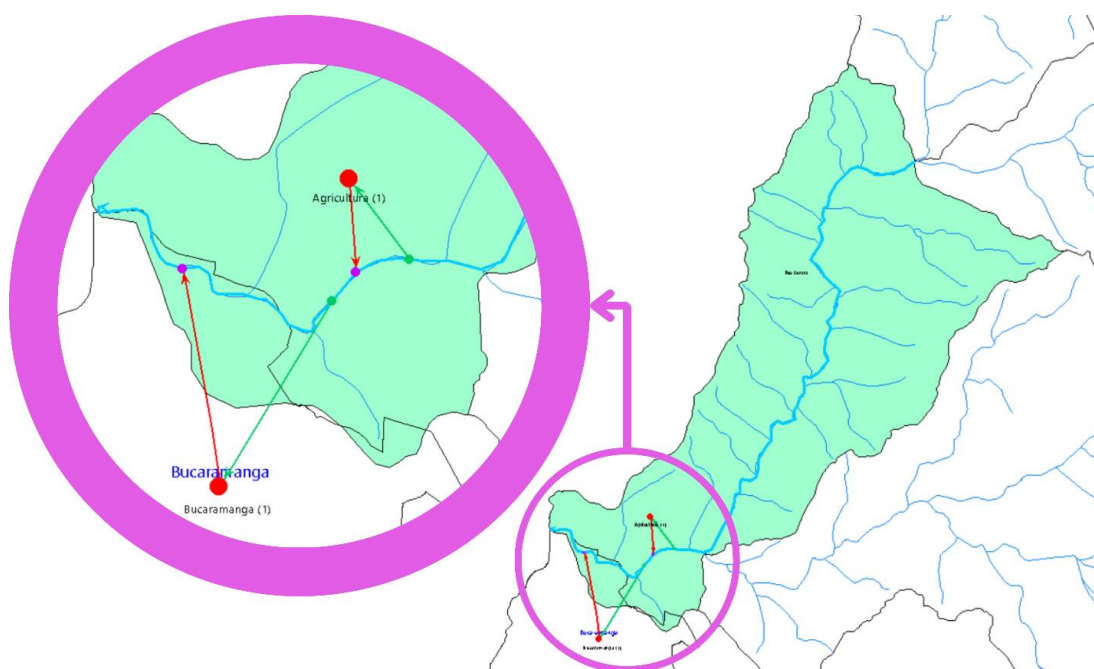
4.4.1 Construcción del modelo

El software WEAP, utilizado para la modelación de escenarios, opera a partir de un esquema de datos base en el que se debe agregar un modelo esquemático de la zona de estudio que incluya elementos como ríos, zonas de demanda, flujos de retorno, embalses, lagunas, medidores

de caudal, entre otros. Este modelo base es denominado por el software con el nombre de 'Cuentas Corrientes'.

En la Figura 20 se muestra el esquema realizado para las cuentas corrientes de nuestro estudio. Este modelo estaba compuesto por tres elementos principales: el Río (representado por una línea celeste), los Puntos de Demanda (ubicados como puntos rojos bajo los nombres de Bucaramanga y Agricultura) y los indicadores de consumo y retorno (señalados con flechas verdes y rojas, respectivamente).

Figura 20. Área de estudio modelada en WEAP.



Se definió el año base, correspondiente al año en el cual se asignaron los datos iniciales, es decir, el año de cuentas corrientes. Además, se estableció el período de modelación que se extendía desde el año referente a cuentas corrientes hasta el año objetivo definido en el estudio. También se configuró el paso de tiempo, que representaba la frecuencia con la que el software solicitaba y

proporcionaba información. Era posible asignar pasos de tiempo mensuales, trimestrales, semestrales y anuales.

En la Figura 21 se presenta la configuración temporal de nuestro modelo, en la cual se fijó el año de cuentas corrientes en 2019, el período de modelación hasta el año 2030 y el paso de tiempo mensual.

Figura 21. Configuración temporal del modelo.

Incrementos de años y tiempos

Horizonte de tiempo

Año de Cuentas corrientes: 2019

Último Año de Escenarios: 2030

Pasos de Tiempo por Año

12

☒ ¿Agregar Días Bisiestos?

Límite del incremento de tiempo

☒ Basado en un calendario mensual

☐ Todos los pasos de tiempo son de igual longitud

☐ Establezca la longitud del incremento de tiempo

Año de Inicio del Agua.

Enero

#	Título	Abreviar	Longitud	Inicio	Final
1	Enero	Ene	31	1 Ene	31 Ene
2	Febrero	Feb	29	1 Feb	29 Feb
3	Marzo	Mar	31	1 Mar	31 Mar
4	Abril	Abr	30	1 Abr	30 Abr
5	May	May	31	1 May	31 May
6	Junio	Jun	30	1 Jun	30 Jun
7	Julio	Jul	31	1 Jul	31 Jul
8	Agosto	Ago	31	1 Ago	31 Ago
9	Septiembre	Set	30	1 Set	30 Set

Formato Nombre Paso de Tiempo: Octubre / Oct

El periodo de estudio será de Enero, 2019 a Diciembre, 2030.

Ayuda

Cerrar

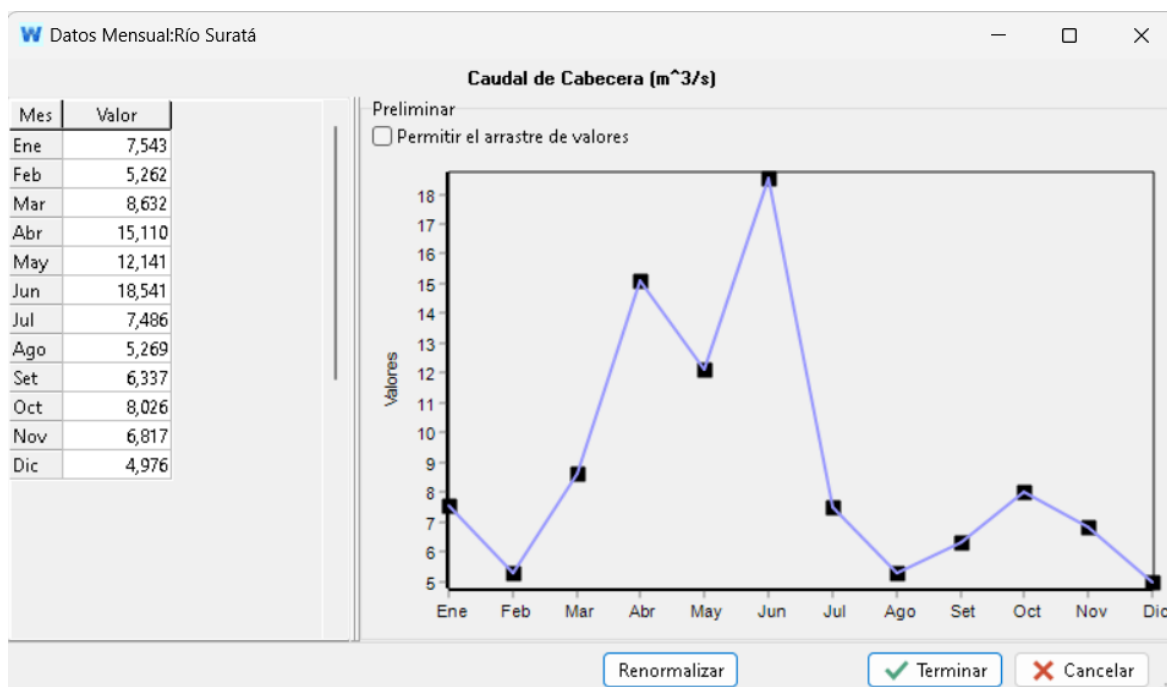
Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

El siguiente paso fue asignar los datos de los elementos. Cabe mencionar que los datos utilizados para el presente trabajo fueron proporcionados por el Semillero de Investigación GESAT (Gestión Ambiental, Agua y Territorio) de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga y también del trabajo de Bohórquez y Vanegas [24], titulado 'Evaluación de la

Huella Hídrica Agropecuaria de la Microcuenca Río Suratá Bajo en el Municipio de Bucaramanga'.

El primer elemento al que se le asignaron datos fue el Río Suratá, que corresponden al caudal de cabecera mensual, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. *Asignación de caudal de cabecera mensual del Río Suratá.*



Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

Luego se asignaron los datos correspondientes a los sitios de demanda. Estos elementos en el modelo se presentan como unidades puntuales unidas a las fuentes hídricas mediante flechas que indican conducción (de color verde) y flujo de retorno (color rojo), como se aprecia anteriormente en la Figura 20. Los sitios de demanda requieren cuatro parámetros de datos: Nivel de actividad anual, Tasa anual de uso de agua, Variación mensual y Consumo.

El nivel de actividad anual se define en el software como 'Nivel de actividad anual impulsado por la demanda, como el área utilizada para la agricultura, la población que consume agua para fines domésticos o producción industrial'. Por lo tanto, en nuestro modelo se añadieron datos sobre la cantidad de habitantes que consumen agua de la microcuenca del Río Suratá Bajo, basándonos en la población total de Bucaramanga que, según la Alcaldía de Bucaramanga [25], contaba con 528,610 habitantes en el año 2019, y las hectáreas de cultivos agrícolas de la región de la microcuenca, que según Bohórquez y Vanegas [24], son de 710 ha. Estos datos fueron introducidos al modelo, como se muestra a continuación en la Figura 23.

Figura 23. Datos de nivel de actividad anual introducido en WEAP.

Sitios de Demanda	2019	Escala	Unidad
Bucaramanga	528610		per cá...
Agricultura	710		ha

Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

La tasa anual de uso de agua es definida por el software como 'Tasa anual de uso de agua por unidad de actividad'. Para este dato, se calcularon los valores de la siguiente manera:

Para la población de Bucaramanga, se calculó a partir de la dotación máxima por habitante dada en la Resolución 0330 de 2017 [26], la cual proporciona un valor de dotación máxima diaria por habitante en función de la altura sobre el nivel del mar de la ubicación de estudio, como se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida.

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
> 2000 m.s.n.m	120
1000 – 2000 m.s.n.m	130
< 1000 m.s.n.m	140

Nota: Tomado y adaptado de la Resolución 0330 de 2017 [12].

Bucaramanga se encuentra ubicada a 959 m.s.n.m. [27], por lo cual se eligió el valor de la dotación de 140 L/HabDía, que equivale a $0,14 \text{ m}^3/\text{Habdía}$. Este último se multiplicó por los 365 días del año para obtener un valor de $51,1 \text{ m}^3/\text{hab}$. Por otro lado, el cálculo de la tasa anual por uso de agua en la agricultura se realizó a partir del trabajo de Bohórquez y Vanegas [24], en el que se encuentran las cantidades de agua utilizadas por los diversos cultivos de la zona para cada mes. Con base en estos valores, se pudo calcular la tasa anual de uso de agua, que en este caso resultó ser de $57,16 \text{ m}^3/\text{Ha}$. En la Tabla 6 se muestran los valores mensuales de consumo de la agricultura en 2019 y el cálculo de la tasa anual de uso de agua. Estos datos fueron incluidos en el modelo como se muestra en la Figura 25.

Tabla 6. Volúmenes de consumo mensual y cálculo de la tasa anual de uso de agua.

Mes	Consumo mensual (m3)
Ene	6582,95977
Feb	126694,074
Mar	0
Abr	0
May	0
Jun	101128,386

Mes	Consumo mensual (m3)
Jul	108478,026
Ago	16048,7118
Sep	93077,8173
Oct	35016,1478
Nov	0
Dic	0
Promedio	40585,5102
Hectareas	710
Tasa anual	
Uso	57,1626904
(m3/ha)	

Nota: Realizada por el autor en base a los datos de Bohórquez y Vanegas [13].

Figura 25. Datos de la tasa de uso de agua introducidos en WEAP.

Sitios de Demanda	2019	Escala	Unidad	
Bucaramanga	51,1		m3	/persona
Agricultura	57,16		m3	/hectarea

Nota: Recorte realizado por el autor en el Software WEAP.

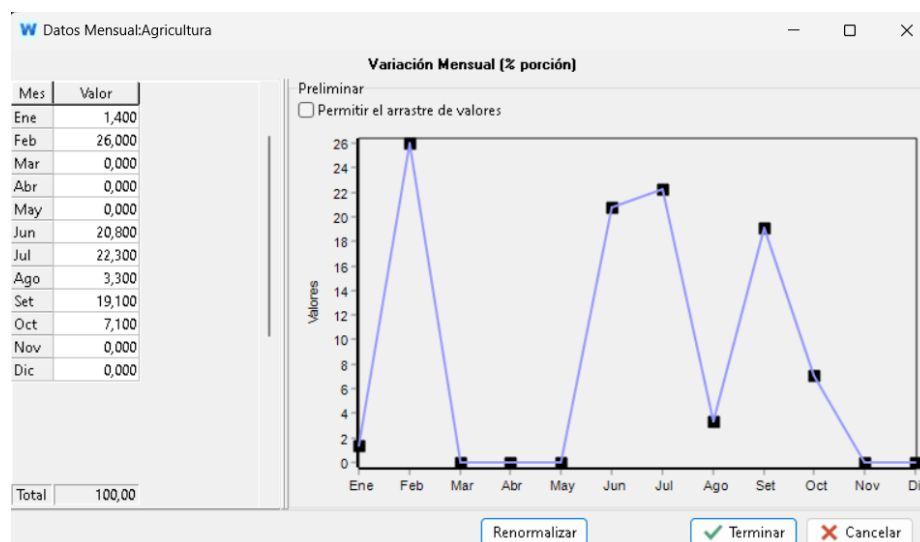
La variación mensual es definida por el software como 'Proporción mensual de la demanda anual. Si es proporcional a los días de cada mes, dejar en blanco.' Con base en lo anterior, se determinó que al sitio de demanda Bucaramanga no se le asignaría una variación mensual, ya que el cálculo de su tasa de uso anual es proporcional a los días de cada mes. Por otro lado, la variación mensual de la agricultura se calculó a partir de los datos de la Tabla 6, cambiando los valores de volumen a porcentajes proporcionales de estos mismos. Se muestra a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Variación mensual de consumo de la agricultura.

Mes	Consumo mensual (m3)	Porcentaje
Ene	6582,95977	1,4%
Feb	126694,074	26,0%
Mar	0	0,0%
Abr	0	0,0%
May	0	0,0%
Jun	101128,386	20,8%
Jul	108478,026	22,3%
Ago	16048,7118	3,3%
Sep	93077,8173	19,1%
Oct	35016,1478	7,2%
Nov	0	0,0%
Dic	0	0,0%

Nota: Realizada por el autor en base a los datos de Bohórquez y Vanegas [13].

Estos valores porcentuales fueron trasladados al software WEAP como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Valores de variación mensual para el sitio de demanda Agricultura en WEAP.

Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

Como último dato, se tiene el consumo, definido por el software como '% de caudal afluente consumido (pérdidas del sistema)'. Dado que no se obtuvo información detallada para este trabajo, se optó por utilizar los valores de referencia que incluye el ejemplo demo del software para explicar su uso. Estos valores fueron del 15% para el sitio de demanda Bucaramanga y del 90% para el sitio de demanda Agricultura, como se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Valores de consumo para sitios de demanda en WEAP.

Sitios de Demanda	2019	Escala	Unidad
Bucaramanga	15	Porcentaje	
Agricultura	90	Porcentaje	

Nota: Recorte realizado por el autor en WEAP.

Con esto se finalizó la configuración del año base “Cuentas Corrientes” y luego se procedió a configurar los escenarios previamente descritos en el punto 4.3 del presente trabajo en el software.

4.4.2 Modelación de los escenarios

La modelación de los escenarios en el software es muy similar a la creación de cuentas corrientes, pero en apartados diferentes. El software por defecto crea dos espacios para la inserción de datos, uno llamado 'Cuentas Corrientes', que como se explicó anteriormente es el año base del modelo donde se ingresan los datos iniciales ya conocidos. El otro espacio tiene por nombre 'Reference', este es un escenario creado por defecto en el cual se hacen las modificaciones deseadas y que modelará los datos en el periodo de estudio definido anteriormente (que para el estudio actual es hasta el 2030). Se pueden agregar diferentes escenarios más en los cuales se pueden modelar

diversas variaciones para ver todos los resultados superpuestos y realizar un análisis comparativo entre ellos.

Los escenarios propuestos en el punto 4.3 del presente trabajo fueron modelados de la siguiente manera:

Para el escenario #1, que corresponde a la continuación de la tendencia actual con un crecimiento poblacional normal con una tasa definida del 2,64%, se hizo uso de las herramientas que integra el software para el enfoque de proyecciones y prospectivas, específicamente el editor de ecuaciones. En este editor, se encuentra una lista de funciones diversas, de las cuales se utilizó la fórmula 'Growth' (utilizada en los tres escenarios planteados), que permite hacer una proyección de crecimiento exponencial año a año de los datos suministrados en 'Cuentas Corrientes', suministrando una tasa porcentual específica para ese escenario.

Para este escenario, se aplicó esta función con la tasa de crecimiento ya definida en el apartado 'Nivel de Actividad Anual' del sitio de demanda Bucaramanga, como se muestra a continuación en la Figura 28.

Figura 28. Modelación del Escenario #1 aplicando la función GROWTH.

Sitios de Demanda	2019	2020-2030	Escala	Unidad
Bucaramanga	528610	Growth(2,64%)		per cá...
Agricultura	710	710		ha

Nota: Recorte realizado por el autor del software WEAP. El software muestra en rojo los valores cambiados para hacer saber al usuario que está modificando el valor en un escenario y no en Cuentas Corrientes.

Para el escenario #2, en el cual se planteó un crecimiento poblacional inusualmente acelerado con una tasa de crecimiento que duplicaba la del primer escenario (5,28%), también

fue necesario utilizar la función 'Growth', modificando el valor de 'Nivel de Actividad Anual' del sitio de demanda Bucaramanga, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Modelación de Escenario #2 aplicando la función GROWTH.

Sitios de Demanda	2019	2020-2030	Escala	Unidad
Bucaramanga	528610	Growth(5,28%)		per cá...
Agricultura	710	710		ha

Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

Y, por último, en el escenario #3, donde se planteó un crecimiento anual del 1,85% de la actividad agrícola para suplir la alimentación de la población creciente, se aplicó la función 'Growth' en el apartado 'Nivel de Actividad Anual' del sitio de demanda Agricultura, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Modelación de Escenario #3 aplicando la función GROWTH.

Sitios de Demanda	2019	2020-2030	Escala	Unidad
Bucaramanga	528610	Growth(2,64%)		per cá...
Agricultura	710	Growth(1,85%)		ha

Nota: Recorte realizado por el autor en el software WEAP.

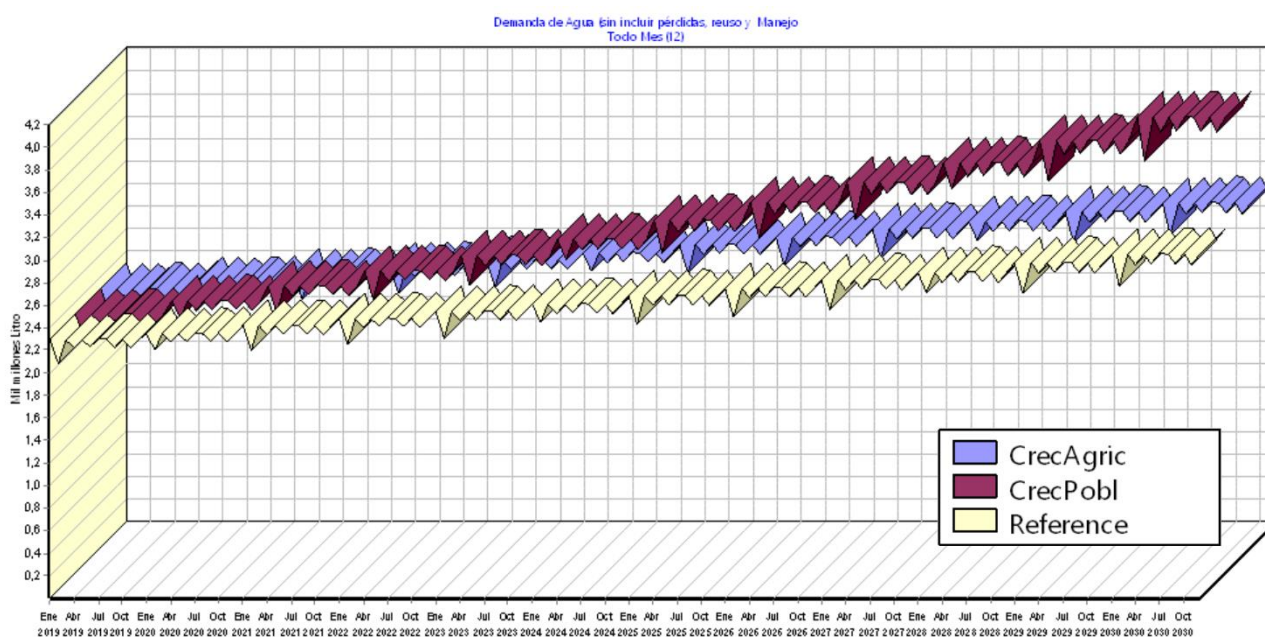
Una vez los escenarios fueron modelados correctamente se procede a correr el software para apreciar los resultados de los escenarios planteado.

4.4.3 Resultados generados en el software WEAP

Los resultados generados por el software WEAP se pueden visualizar de diferentes maneras, ya sea como gráficas de líneas, barras y circulares. También permite modificar las

unidades en las que se muestran, ofreciendo una amplia variedad, como m³, galones, pies cúbicos, km³, etc., y diversas escalas, como mil, millón, miles de millones, billón. Además, permite mostrar todos los escenarios y sitios de demanda a la vez o cada uno por separado, con el fin de poder ver gráficamente las comparaciones entre ellos en diferentes parámetros, como la demanda de agua, el requerimiento de suministro, la demanda no cubierta, la cobertura, el suministro entregado, entre muchos otros. A continuación, se comienza mostrando la demanda de suministro para los tres escenarios, en los que se puede observar una clara similitud entre los escenarios #1 y #3; por otro lado, hay una clara diferencia del escenario #2 con los anteriormente mencionados para ambos sitios de demanda. Esta comparación se presenta en la Figura 31.

Figura 31. Demanda de agua en los tres escenarios planteados.



Nota: Tomado y adaptado del software WEAP. El escenario presentado como Reference representa el Escenario #1, el escenario CrecPobl representa el Escenario #2 y el escenario CrecAgric representa el Escenario #3.

Se puede observar cómo el nivel de demanda aumenta significativamente en el Escenario #2 en comparación con los otros dos, lo cual se puede visualizar en la Tabla 8 y la Tabla 9. Estas tablas muestran los valores totales anuales y los promedios mensuales, respectivamente, de la Figura 31.

Tabla 8. *Valores totales anuales de demanda de agua en los tres escenarios planteados.*

Año	CrecAgric	CrecPobl	Reference
2019	27,05	27,05	27,05
2020	27,77	28,48	27,77
2021	28,5	29,98	28,5
2022	29,25	31,56	29,25
2023	30,02	33,23	30,02
2024	30,82	34,98	30,81
2025	31,63	36,82	31,62
2026	32,46	38,76	32,46
2027	33,32	40,81	33,31
2028	34,2	42,96	34,19
2029	35,1	45,23	35,09
2030	36,03	47,61	36,02

Nota: Tabla exportada del software WEAP. Los datos se presentan en millón de m³.

Tabla 9. *Valores mensuales promedio de demanda de agua de los tres escenarios planteados.*

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
CrecAgric	2,66	2,43	2,66	2,57	2,66	2,58	2,67	2,66	2,58	2,66	2,57	2,66
CrecPobl	3,09	2,83	3,09	2,99	3,09	3	3,1	3,09	3	3,09	2,99	3,09
Reference	2,66	2,43	2,66	2,57	2,66	2,58	2,67	2,66	2,58	2,66	2,57	2,66

Nota: Tabla exportada del software WEAP. Los datos se presentan en millón de m³.

A partir de estos valores, se observó que mientras el Escenario #2 presentó una notoria diferencia con respecto a los Escenarios #1 y #3, estos dos últimos se mantuvieron prácticamente iguales a lo largo del tiempo de modelación. La disparidad entre los valores se refleja en la Tabla 10, que muestra estas diferencias de manera numérica en relación con el Escenario #1.

Tabla 10. *Diferencias relativas al Escenario #1 de la demanda de agua total anual.*

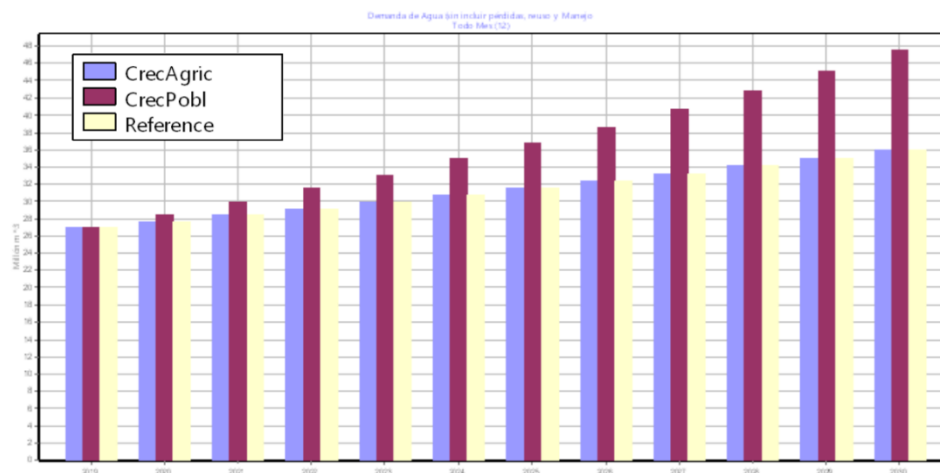
Año	CrecAgric	CrecPobl	Reference
2019	0	0	0
2020	0	0,71	0
2021	0	1,48	0
2022	0	2,31	0
2023	0	3,21	0
2024	0	4,17	0
2025	0	5,2	0
2026	0,01	6,31	0
2027	0,01	7,5	0
2028	0,01	8,77	0
2029	0,01	10,13	0
2030	0,01	11,59	0

Nota: Tabla exportada del software WEAP. Los datos se presentan en millón de m³.

Lo anterior confirma que, mientras el Escenario #2 presenta una variación bastante considerable, el Escenario #1 y el Escenario #3 se mantienen prácticamente idénticos hasta el año 2025 y, a partir del año 2026, se produce una mínima variación en la demanda del Escenario #3. Por otra parte, al analizar la demanda de agua de cada sitio de demanda por separado, se pueden observar comportamientos más acordes a los esperados cuando fueron planteados los escenarios.

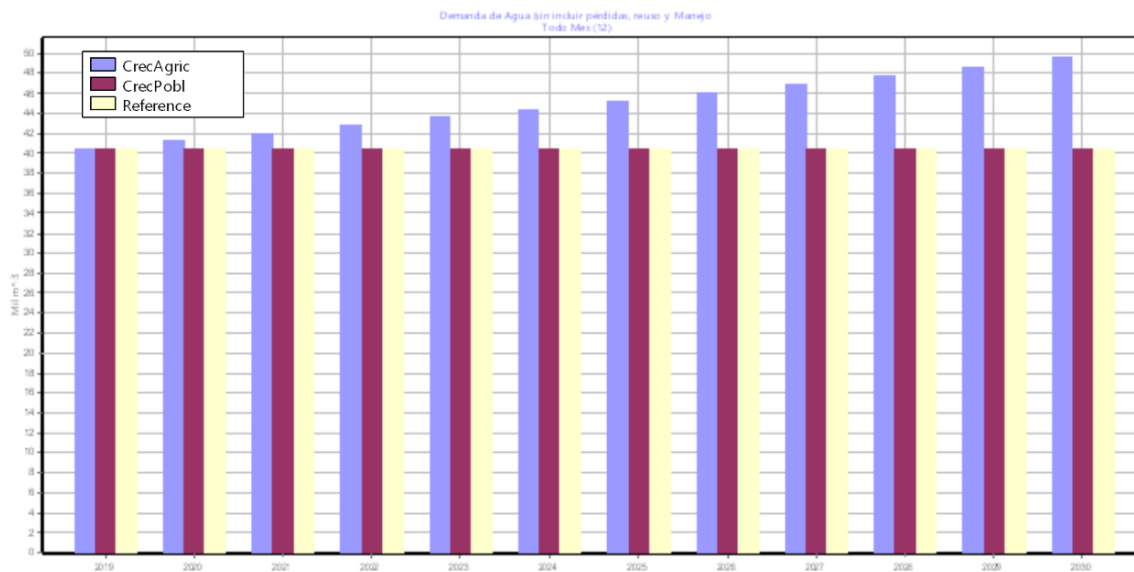
En la Figura 32, se pudo apreciar la variación de la demanda de los tres escenarios para el sitio de demanda Bucaramanga, y se observó que el escenario de mayor aumento es el Escenario #2, correspondiente a una tasa de crecimiento poblacional inusualmente acelerada, mientras que el Escenario #1 y el Escenario #3 presentaron un aumento equivalente en el periodo de modelación del estudio. Por otro lado, en la Figura 33, se observó que la variación de la demanda en el sitio de demanda agricultura es mayor en el Escenario #3, correspondiente a un aumento de la actividad agrícola en la zona, mientras que el Escenario #1 y el Escenario #2 se mantuvieron iguales en todos los periodos de tiempo.

Figura 32. Variación total anual del sitio de demanda Bucaramanga para los tres escenarios planteados.



Nota: Tomado del software WEAP.

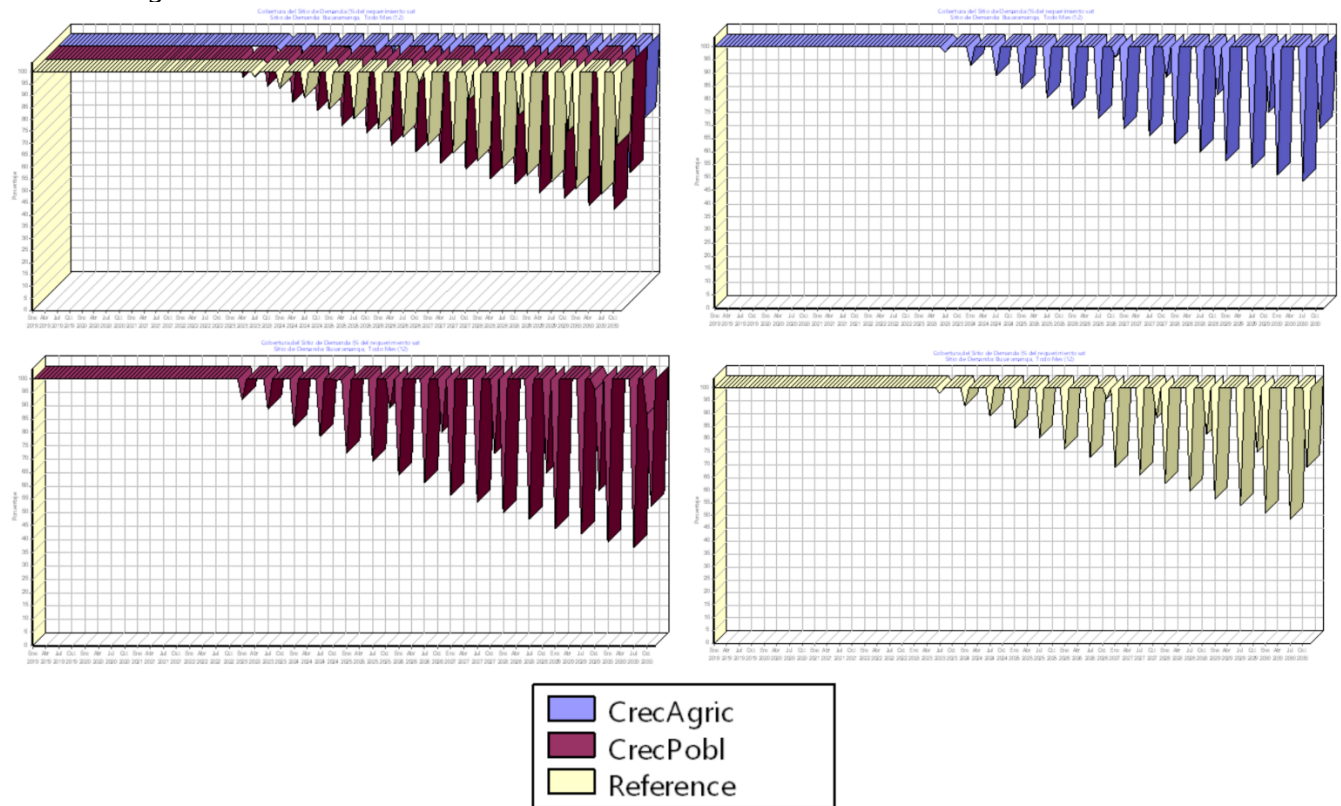
Figura 33. Variación total anual del sitio de demanda Agricultura para los tres escenarios planteados.



Nota: Tomado del software WEAP.

Por otro lado, otro punto de evaluación fue la cobertura de la demanda de suministro en cada uno de los escenarios. En la Figura 34, se puede observar un panorama general de los tres escenarios en cuanto a la cobertura de la demanda, así como un gráfico comparativo de los tres escenarios para el sitio de demanda Bucaramanga.

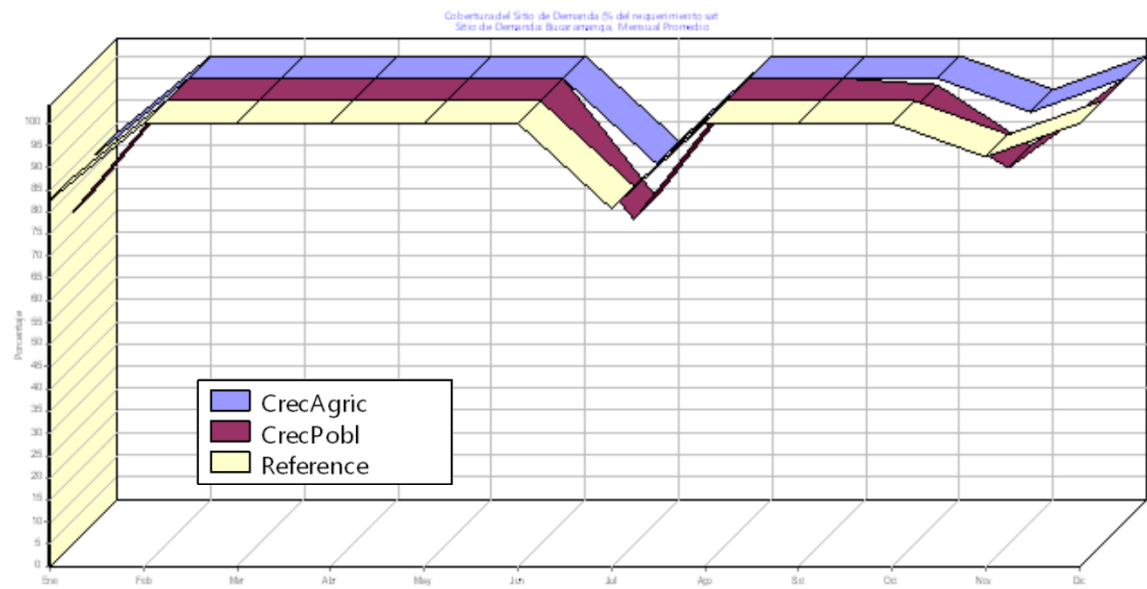
Figura 34. Graficas de la cobertura de la demanda para los tres escenarios en el sitio de demanda Bucaramanga.



Nota: Adaptado del software WEAP.

Se pudo apreciar que, para el sitio de demanda Bucaramanga, la cobertura se mantuvo en un 100% desde el periodo 2019-2022 y que a partir del año 2023 empezó a tener picos de caídas en ciertos meses del año, principalmente enero, julio y noviembre; siendo el Escenario #2 el primero en presentar una caída en el mes de enero de 2023. En la Figura 35 se muestra la cobertura mensual promedio de todo el periodo de modelación.

Figura 35. Cobertura mensual promedio para los tres escenarios para el sitio de demanda Bucaramanga.



Nota adaptado del software WEAP.

Por otro lado, la Tabla 11 muestra los valores de la cobertura de demanda del sitio de demanda para los meses de enero, julio y noviembre de todos los años que conforman el periodo de estudio.

Tabla 11. Porcentaje de cobertura de la demanda de cada escenario en los meses de enero, julio y noviembre del periodo de estudio para el sitio de demanda Bucaramanga.

Mes	Ene			Jul			Nov		
Escenario	CrecAgric	CrecPobl	Referencia	CrecAgric	CrecPobl	Referencia	CrecAgric	CrecPobl	Referencia
2019	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2020	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2021	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2022	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2023	100	92,26	100	97,93	88,5	97,96	100	100	100
2024	92,92	81,84	92,92	89	78,43	89,01	100	99,44	100
2025	84,03	72,15	84,03	80,39	69,07	80,42	100	89,21	100d

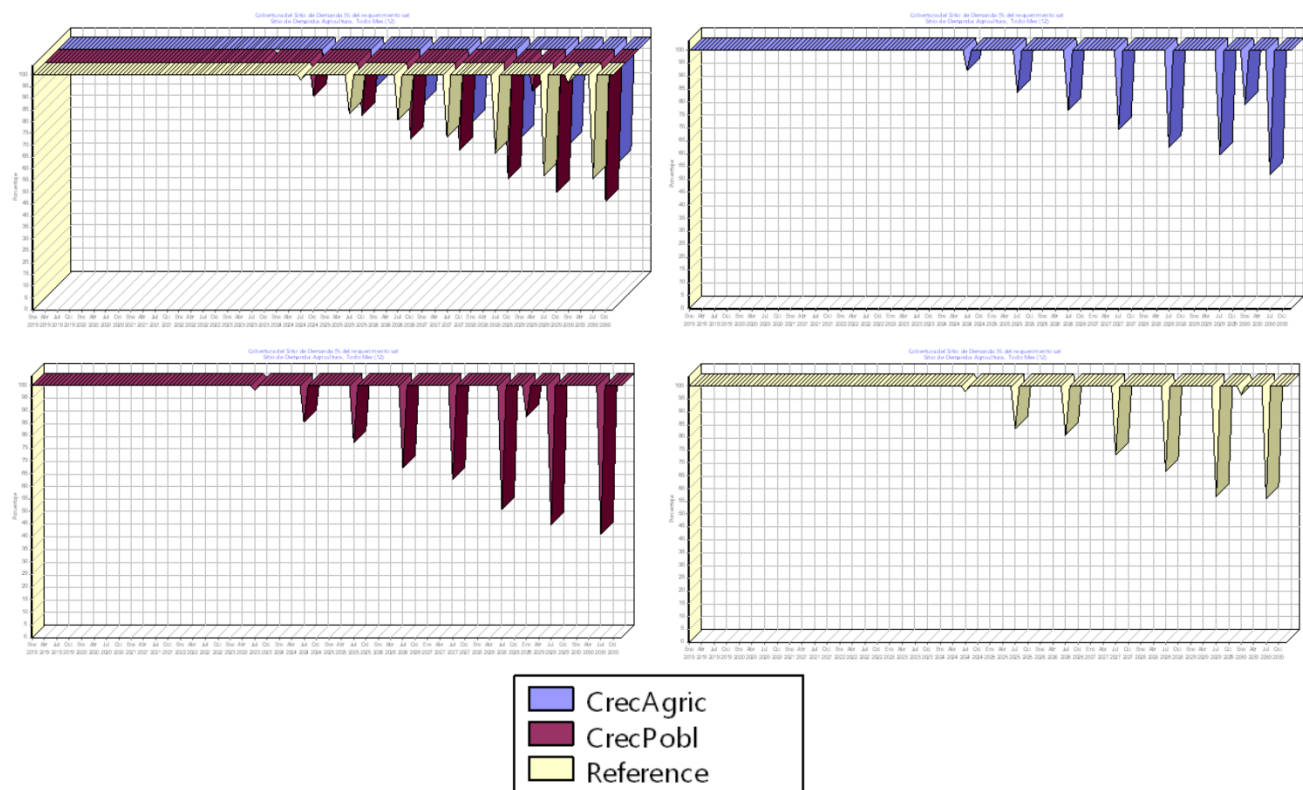
Mes	Ene			Jul			Nov		
2026	76,14	63,75	76,15	72,76	60,96	72,78	95,8	80,2	95,8
2027	68,96	56,28	68,96	65,82	53,76	65,84	88,3	72,06	88,3
2028	62,58	49,8	62,59	59,67	47,53	59,69	81,56	64,9	81,56
2029	56,46	43,8	56,46	53,76	41,76	53,8	74,9	58,1	74,9
2030	51,05	38,61	51,05	48,56	36,77	48,58	68,93	52,13	68,93

Nota: Tabla desarrollada por el autor a partir de los datos del software WEAP.

Se determinó lo siguiente a partir de estos valores: 1) El mes más afectado en cuanto a la cobertura de la demanda para los tres escenarios es julio. 2) El Escenario #2 experimentó el mayor déficit a lo largo de los años, oscilando entre un 8% y un 11% de diferencia cada año en los meses mostrados. 3) Tanto el Escenario #1 como el Escenario #3 presentaron un comportamiento similar, con una diferencia mínima en el valor porcentual de sus déficits. Además, ambos comparten una disminución anual entre el 7% y el 9% en los meses señalados.

De manera similar al sitio de demanda Bucaramanga, a continuación, se presenta la información sobre la cobertura de suministro de los tres escenarios planteados para el sitio de demanda Agricultura. En la Figura 36 se muestra la cobertura de la demanda de cada uno de los escenarios por separado, así como una vista comparativa de las tres gráficas superpuestas.

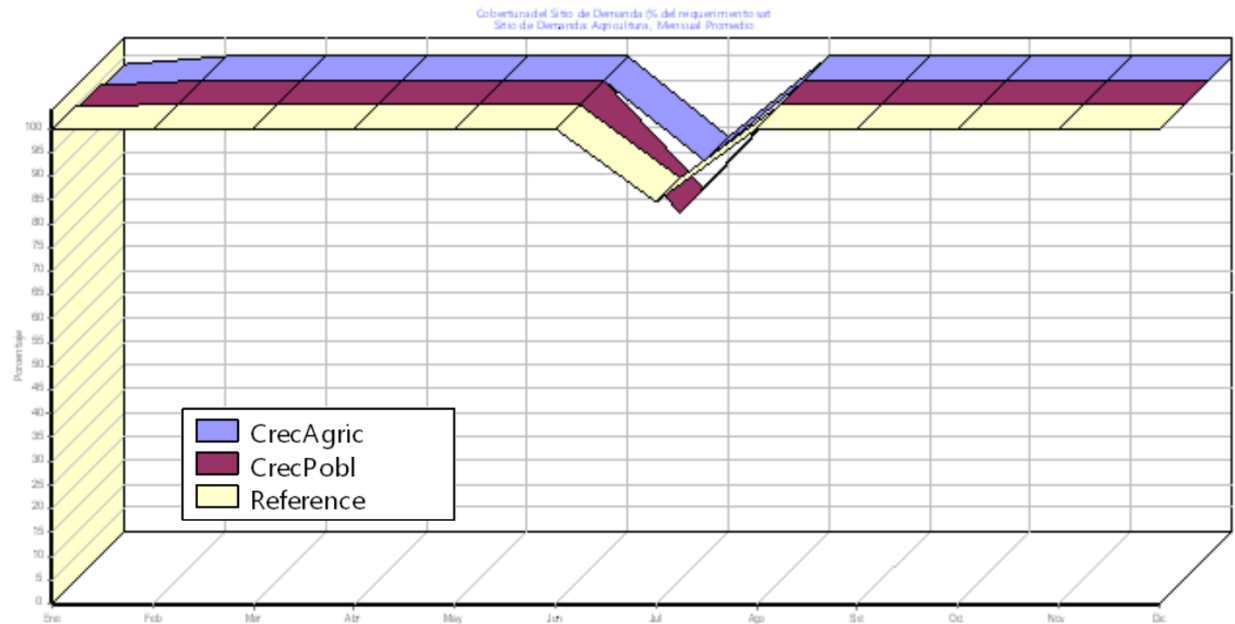
Figura 36. Graficas de la cobertura de la demanda para los tres escenarios en el sitio de demanda Agricultura



Nota: Adaptado del software WEAP.

Asimismo, se evidencia que las caídas en la cobertura comienzan en el año 2023, siendo el Escenario #2 el primero en presentar esta disminución, pero en este caso, el primer pico se dio en el mes de julio. Otra diferencia con respecto al sitio de demanda Bucaramanga fue que los picos se presentaron en su mayoría en el mes de julio, y el mes de enero no se vio afectado hasta el penúltimo año del periodo modelado, en 2029. La Figura 37, que muestra la cobertura mensual promedio, detalla este aspecto con mayor claridad.

Figura 37. Cobertura mensual promedio para los tres escenarios para el sitio de demanda Agricultura.



Nota: Adaptado del software WEAP.

Como se mencionó anteriormente, en promedio, el mes con mayor afectación, y prácticamente el único, a la cobertura de agua para el sitio de demanda Agricultura es julio. A continuación, la Tabla 12 muestra los valores numéricos del porcentaje de cobertura de la demanda del mes de julio en el periodo de estudio.

Tabla 12. Porcentaje de cobertura de la demanda de cada escenario en el mes de julio del periodo de estudio para el sitio de demanda Agricultura.

Escenario	jul-2019	jul-2020	jul-2021	jul-2022	jul-2023	jul-2024	jul-2025	jul-2026	jul-2027	jul-2028	jul-2029	jul-2030
CrecAgric	100	100	100	100	100	92,26	83,61	77,04	69,2	62,48	59,57	51,79
CrecPobl	100	100	100	100	98,12	85,48	77,3	67,37	62,49	50,51	44,68	40,84
Reference	100	100	100	100	100	97,92	83,45	80,82	73,19	66,59	56,93	55,86

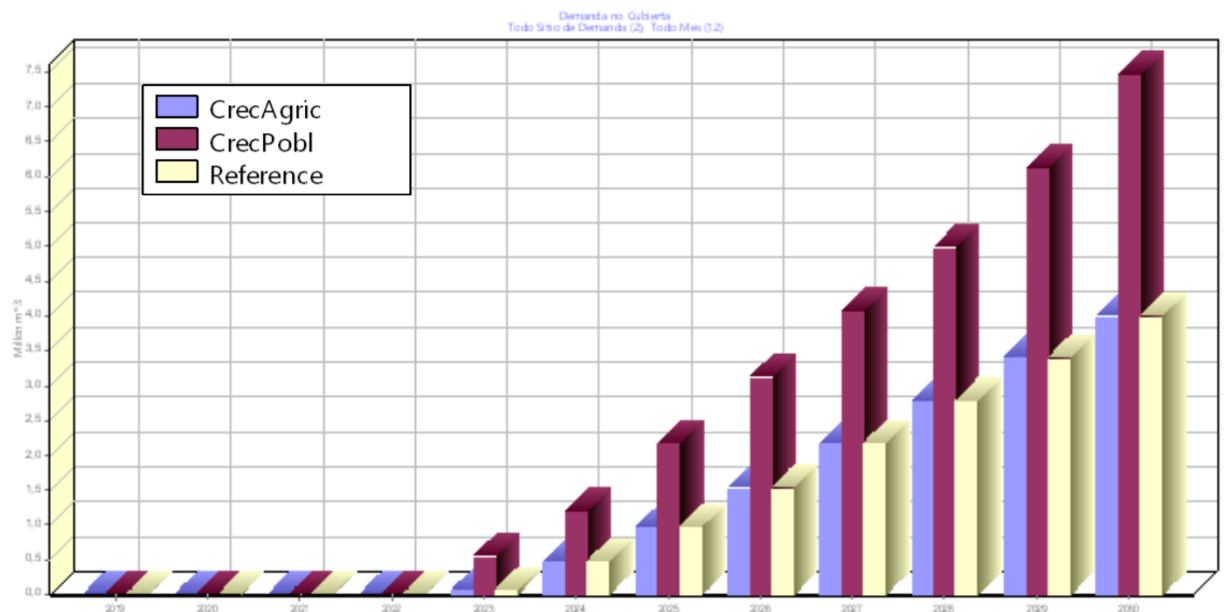
Nota: Tabla exportada del software WEAP.

Estos datos permitieron definir que: 1) El Escenario #2 se ve afectado en mayor medida por las caídas de cobertura. 2) Si bien en este caso el Escenario #1 y el Escenario #3 también presentan una similitud en su comportamiento, se puede ver una mayor diferencia entre sus valores en el pasar de los años, pero ambos mantienen una variación anual de entre 3% a 13%.

A partir del punto anterior, se consideró importante analizar la demanda no cubierta en ambos sitios de demanda. Por lo cual se revisó la cantidad cuantificada de demanda no cubierta total en ambos sitios de demanda para cada escenario, datos que el software nos provee tanto de manera gráfica como numérica.

En la Figura 38 se muestra la gráfica de la demanda no cubierta total anual y los valores numéricos correspondientes a esta misma en la Tabla 13. De igual manera, en la Figura 39 se muestra la gráfica de la demanda no cubierta promedio mensual y sus respectivos valores numéricos en la Tabla 14.

Figura 38. Gráfica de la demanda no cubierta total anual de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.



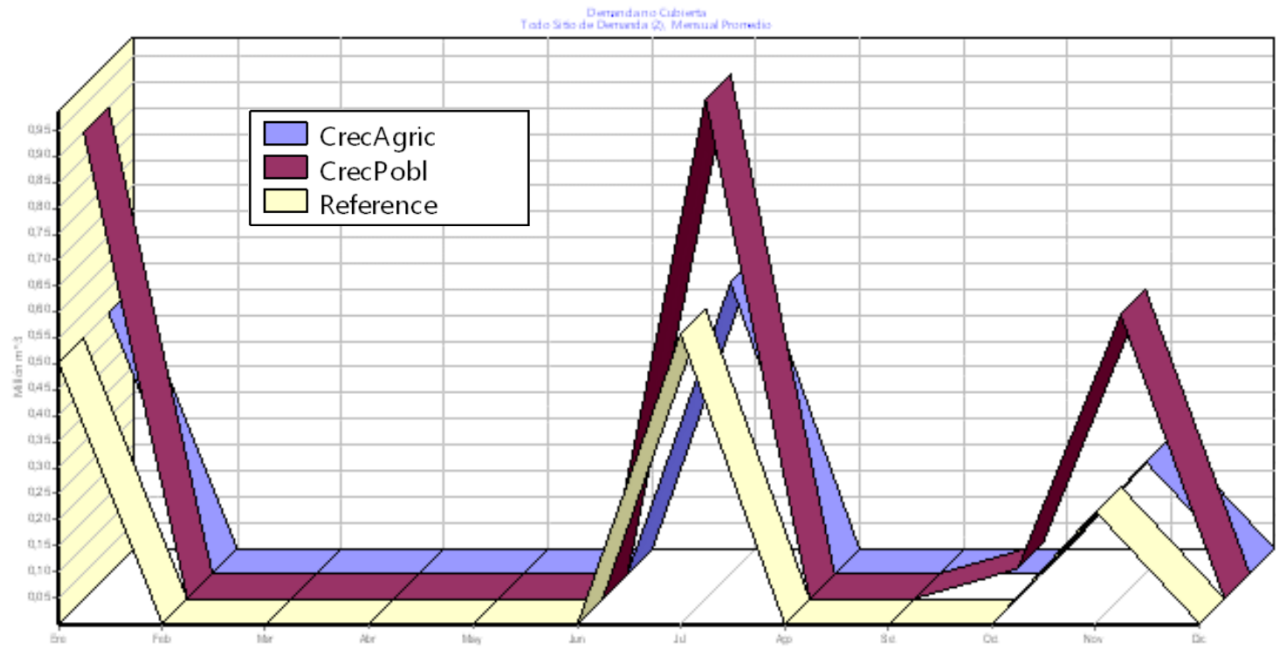
Nota: Tomado y adaptado del software WEAP.

Tabla 13. Tabla de valores numéricos de la demanda no cubierta total anual de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.

Escenario	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
CrecAgric	0	0	0	0	0,05	0,47	0,96	1,52	2,17	2,77	3,4	3,99
CrecPobl	0	0	0	0	0,54	1,19	2,16	3,11	4,05	4,97	6,11	7,45
Reference	0	0	0	0	0,05	0,47	0,96	1,52	2,17	2,77	3,4	3,99

Nota: Tabla exportada del software WEAP. Los datos se presentan en millón de m³.

Figura 39. Gráfica de la demanda no cubierta mensual promedio de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.



Nota: adaptada del software WEAP.

Tabla 14. Tabla de valores numéricos de la demanda no cubierta mensual promedio de ambos sitios de demanda para los tres escenarios planteados.

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
CrecAgric	0,5	0	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0,22	0
CrecPobl	0,9	0	0	0	0	0	0,96	0	0	0,06	0,55	0
Reference	0,5	0	0	0	0	0	0,56	0	0	0	0,22	0

Nota: Tabla exportada del software WEAP. Los datos se presentan en millón de m³.

5. Conclusiones

El propósito principal de este trabajo es destacar el estudio de la oferta y demanda de agua en las cuencas hidrográficas que abastecen a poblaciones como una herramienta clave en la gestión

de este recurso. Se utiliza la creación de prospectivas a través de escenarios probables como medio principal.

La metodología empleada busca mostrar cómo este enfoque puede desempeñar un papel clave en la creación de planes de ordenamiento territorial y gestión de recursos. El objetivo es prevenir posibles situaciones de escasez que puedan afectar la calidad de vida de las poblaciones y/o generar problemas de orden público.

Con respecto al trabajo presentado en este documento, se determinó lo siguiente: se realizó un modelo simplificado de la microcuenca del Río Surata Bajo, lo que permitió la simulación de escenarios futuros probables basados en problemas vistos en años posteriores e incluso en la actualidad. La oferta hídrica, se mantuvo como una constante para su posterior comparación con la demanda de los escenarios, fue calculada por el software a partir de los valores de caudales ingresados en los datos del año inicial 2019. Se tomó esta decisión con el propósito de mostrar un panorama extremo de cómo las variables expuestas pueden modificar la demanda del agua si no se implementan planes de gestión que busquen siempre el aumento de la oferta hídrica para evitar déficits en situaciones hipotéticas como las planteadas en los escenarios.

De estos escenarios se observó la gran demanda de suministro que conlleva abastecer a la población y su influencia en otras áreas. Esto se evidenció en que el Escenario #2 aumentaba la demanda de agua hacia la población del sitio de demanda Bucaramanga de manera inusualmente acelerada. Por consiguiente, la demanda del sitio de demanda Agricultura también aumentaba ligeramente, mientras que el Escenario #3, que aumentaba la actividad agrícola anual y, por ende, la demanda de agua para esta actividad, al menos en este modelo y con los datos obtenidos, tuvo una influencia casi nula en la demanda del sitio de demanda Bucaramanga. Se determinó que se debe tener en cuenta, en mayor grado de importancia, las proyecciones poblacionales a la hora de

crear planes de gestión de recursos hídricos, seguidas de las actividades que generan alimentos y materias primas para su subsistencia.

También se observó que la demanda va en aumento a medida que avanza el tiempo. Por lo tanto, se deben buscar maneras de aumentar la oferta hídrica propia, ya sea de los afluentes principales que abastecen a las regiones o buscar alternativas que permitan añadir más suministros del recurso. Por ejemplo, en el caso propio de la microcuenca del Río Suratá, según lo visto en el apartado 2.1.3.2., la oferta hídrica del tramo del Río Suratá perteneciente a la microcuenca se ve reducida un 25% por caudal ecológico y otro 25% por calidad del agua debido a contaminación por actividad minera de extracción de oro aguas arriba. Una estrategia que podría implementarse para esta situación es la de aplicar técnicas como la utilizada por Pérez y Tello (2020) en su trabajo titulado “Bioadsorción de mercurio utilizando cáscaras de arroz (*Oryza Sativa*) en agua contaminada” [28], en la que se puede mejorar la calidad del agua mediante la aplicación de un bioadsorbente, que en última instancia ayudaría a aumentar un poco más la oferta hídrica del afluente.

Por último, a modo de sugerencia, si se desea continuar a partir de este trabajo una investigación más amplia, se recomienda lo siguiente: 1) en el juego de actores del presente trabajo solo se analizó su nivel de influencia, no los conflictos que puedan tener con relación a los objetivos planteados. 2) Ampliar el alcance del trabajo abarcando otras microcuencas de la zona como la del Río Tona, que es una gran contribuyente de recurso hídrico para el consumo de las poblaciones aledañas y actividades agrícolas, ganaderas e industriales de la zona. 3) Sesgar de manera más detallada los sitios de demanda que en el presente trabajo fueron englobados en dos grandes demandantes de recurso para obtener resultados aún más precisos.

Referencias

- [1] E. Calapiña, J. Chuquilla y J. Taopanta, «LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA Y LA PROSPECTIVA, SEMEJANZAS Y DIFERENCIAS: UNA REVISIÓN DE LITERATURA DE LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS,» *Revista Tambara*, nº 54, pp. 742-759, 2019.
- [2] Organización de Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>. [Último acceso: 10 2022].
- [3] O. Buitrago Bermúdez, «LA GESTION DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN COLOMBIA Y SU PAPEL EN LA SOLUCIÓN DE CONFLICTOS POR EL USO DEL AGUA,» *Cuaderno Prudentino*, vol. 1, nº 36, pp. 106-125, 2014.
- [4] Banco Mundial;, «COLOMBIA: UN CAMBIO DE RUMBO,» Washington DC, 2020.
- [5] M. T. Rodríguez Montequín, C. A. Glez Fanjul, F. Rodríguez Pérez y L. A. Rodríguez Loredó, «ESTUDIO PROSPECTIVO AL USO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA CON FINES INDUSTRIALES,» de *X CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA DE PROYECTOS* , Valencia, España, 2006.
- [6] W. T. P. d. Silva, L. M. d. Silva y J. F. Chichorro, «Gestão de recursos hídricos: perspectivas do consumo per capita de água em Cuiabá,» *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 13, nº 1, pp. 8-14, 2008.

- [7] M. Nieto y M. Rodríguez Peñaloza, «Gobernanza y gobernabilidad de los recursos hídricos en México imbricaciones, matices y modelos conceptuales: ecos, implicaciones y visiones prospectivas paradigmáticas en la Cuenca del Alto Lerma,» *Anuario de Administración y Tecnología para el Diseño*, nº 22, pp. 43-67, 2021.
- [8] P. L. Puebla, *La prospectiva como herramienta de gestión. Su aplicación en el recurso hídrico. Tesis M.S.*, Mendoza: Universidad Nacional de General Sarmiento, 2014.
- [9] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Estudio Nacional del Agua 2018,» Bogotá D.C., 2019.
- [10] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Estudio Nacional del agua 2014,» Bogotá D.C., 2015.
- [11] M. Falkenmark y J. Rockstrom, *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*, London: Earthscan, 2004.
- [12] G. Poveda, «La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis de la escala inter-decadal hasta la escala diurna.,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.*, vol. 28, nº 107, pp. 201-222, 2004.
- [13] G. Poveda, G. Marta María y N. Quiceno, «El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO.,» *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, vol. 27, nº 3, pp. 721-731, 1998.
- [14] IDEAM, «Atlas Interactivo - Climatológico,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>. [Último acceso: 5 Junio 2023].

- [15] Coorporación Autonoma Regional par la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, «Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental: Subcuenca del Río Suratá,» Bucaramanga, 2006.
- [16] J. Rodríguez Cortezo, «Introducción a la Prospectiva: Metodologías, Fases y Explotación de Resultados.,» *Revista Economía Industrial*, nº 342, pp. 13-20, 2001.
- [17] F. J. Mojica, «Concepto y Aplicación de la Prospectiva Estrategica,» *Revista Med*, vol. 14, nº 1, pp. 122-131, 2006.
- [18] C. Mera Rodríguez, «Pensamiento prsopectivo: Visión sistémica de la construcción del futuro.,» *Revista Colombiana de Humanidades*, vol. 46, nº 84, pp. 89-104, 2014.
- [19] A. V. Cely B., «Metodología de los Escenarios para Estudios Prospectivos,» *Ingeniería e Investigación*, nº 44, pp. 26-35, 199.
- [20] Stockhlom Environment Instiitute, «WEAP: Water Evaluation And Planning,» Stockhlom Environment Instiitute, [En línea]. Available: <https://www.weap21.org/index.asp?action=201>.
- [21] Banco Mundial, «Gestión del Recurso Hídrico,» 05 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement#1>.
- [22] F. H. Andrade, «Los desafios de la agricultura,» International Plant Nutrition Institute, 2016.
- [23] United Nations, «United Nations Population Division. World Population Prospects. The 2008 Revision,» 2012.

- [24] S. A. Bohórquez Vanegas y A. F. Vanegas Rincón, «Evaluación de la Huella Hídrica Agropecuaria de la Microcuenca Río Suratá Bajo en el Municipio de Bucaramanga,» Universidad Santo Tomás, 2023, 2023.
- [25] Alcaldía de Bucaramanga, «Informe de Gestion de Bucaramanga 2016-2019. Primera infancia, infancia, adolescencia y juventud.,» Bucaramanga, 2021.
- [26] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Resolucion 0330 de 2017. Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento - RAS, Bogotá D.C., 2017.
- [27] Área Metropolitana de Bucaramanga, «AMB - Bucaramanga,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.amb.gov.co/bucaramanga/>.
- [28] K. W. Perez Saldaña y D. G. Tello Tineo, «Bioadsorción de mercurio utilizando cascaras de arroz (Oryza Sativa) en agua contaminada,» Universidad Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2020.
- [29] UPME, «PLAN ENERGÉTICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050,» UPME, Bogotá, 2015.