

UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**Análisis de la disponibilidad hidroeconómica futura del agua en la cuenca del río
Tomebamba usando el modelo WEAP.**

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Ambiental

Autora:

Kely Alexandra Baculima Cabrera

CI: 0107431934

Correo electrónico: Kelybaculima99@hotmail.com

Director:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco

CI: 0102247186

Asesor:

Ing. Luciano Agustín Galán Montero

CI: 0105349310

Cuenca – Ecuador

21 de noviembre del 2022

Resumen

La subcuenca del Tomebamba es una de las cuatro subcuencas más grandes de la ciudad de Cuenca, con una extensión de 38041 ha. El río nace en las “tres cruces”, zona perteneciente al Parque Nacional Cajas y termina en la unión con el río Machángara formando el río Cuenca. La cuenca ha sufrido grandes alteraciones a lo largo de las últimas décadas por actividades antropogénicas, las mismas que deterioran la capacidad hídrica y la calidad de agua, asimismo la variabilidad climática ha jugado un rol importante en este sentido. Lo que ha provocado grandes pérdidas tanto económicas y materiales. En este aspecto, con el propósito de solucionar esta problemática se ha implementado diferentes modelos hidroeconómicos en cuencas similares con la finalidad de generar evidencia científica para la toma de decisiones. En este estudio, se analizó la disponibilidad hidroeconómica futura del agua en la cuenca del río Tomebamba usando el modelo WEAP. Para el desarrollo del modelo se utilizó datos de teledetección, climáticos, hidrológicos, demanda hídrica, de diversas bases digitales. En base los resultados generados por el modelo, se obtuvo datos necesarios para determinar el comportamiento futuro de la cuenca del río Tomebamba en los años 2021 – 2050, las mismas que dependieron de las variaciones climatológicas e hidrológicas ocurridas en los años base (1998 - 2014).

En base a distintos escenarios climáticos y demográficos se generó información de análisis de oferta y demanda de agua en cuenca del río Tomebamba, basándose en distintos escenarios climáticos y demográficos. Finalmente, se realizó un análisis económico de la disponibilidad del agua, poniendo en evidencia las demandas de agua insatisfechas en los distintos escenarios actuales y futuros.

Palabras clave: Cambio climático. Modelo climático. Escenarios climáticos. Análisis hidroeconómico. Demanda y oferta del agua.

Abstract

The Tomebamba sub-basin is one of the four largest sub-basins in the city of Cuenca, with an area of 38,041 ha. The river is born in the "three crosses", an area belonging to the Cajas National Park and ends at the junction with the Machángara River forming the Cuenca River. The basin has suffered great alterations over the last decades due to anthropogenic activities, the same ones that deteriorate the hydric capacity and the quality of the water, as well as the climatic variability that has played an important role in this sense. This has caused great economic and material losses. In this aspect, with the purpose of solving this problem, different hydroeconomic models have been implemented in similar basins in order to generate scientific evidence for decision making. In this study, the future hydroeconomic availability of water in the Tomebamba river basin was analyzed using the WEAP model. For the development of the model, remote sensing data, climatic, hydrological, water demand, from various digital databases were used. Based on the results generated by the model, the necessary data was obtained to determine the future behavior of the Tomebamba river basin in the years 2021 - 2050, which depended on the climatological and hydrological variations that occurred in the base years (1998 - 2014).

Based on different climatic and demographic scenarios, information was generated on the analysis of water supply and demand in the Tomebamba river basin, based on different climatic and demographic scenarios. Finally, an economic analysis of water availability was carried out, highlighting the unsatisfied demands for water in the different current and future scenarios.

Keywords: Climate change. Climate model. Climate scenarios. Hydroeconomic analysis. Demand and supply of water.

UCUENCA

Índice de contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Índice de contenido.....	4
Índice de tablas.....	7
Índice de figuras.....	9
Agradecimiento	14
Dedicatoria.....	15
1. Introducción	16
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo General	19
2.2 Objetivo Específico	19
3. Marco teórico	20
3.1 Variabilidad climática	20
3.2 Calentamiento global	20
3.3 Cambio climático.....	20
3.4 Efecto invernadero y sus escenarios de emisión	21
3.5 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ..	22
3.6 Escenarios Climáticos.....	22
3.7 Forzamiento radiativo.....	22
3.8 Escenarios climáticos del IPCC	23
3.9 Modelos de circulación global.....	25
3.10 Modelos Climático Regionales	25
3.11 Proyecto ENSEMBLES.....	25
3.12 Recursos hídricos	26
3.13 Gestión integral de los recursos hídricos (GIRH).....	26
3.14 Demanda Hídrica	26
3.15 Vulnerabilidad hídrica.....	26
3.16 Modelación hidrológica para la gestión del recurso hídrico	27

UCUENCA

3.17 El Modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System).....	27
3.17.1 Unidad hidrológica (U.H.)	27
3.17.2 Métodos hidrológicos en WEAP	28
3.17.3 Balance hídrico en WEAP	30
3.17.4 Elementos del modelo WEAP	30
3.18 Eficiencia del sistema de riego	31
3.19 Análisis hidroeconómico	33
4. Línea Base.....	33
4.1 Caracterización de la Zona de Estudio.....	33
4.2 Características topográficas de la zona de estudio	36
4.3 Características Climatológicas	37
4.3.1 Clima	37
4.3.2 Temperatura	38
4.3.3 Precipitación	38
4.3.4 Humedad Relativa	38
4.3.5 Viento	38
4.4 Características hidrológicas.....	39
4.4.1 Hidrografía	39
4.4.2 Áreas de aporte	39
4.4.3 Inventario hídrico	40
4.5 Caracterización socioeconómica de la subcuenca	41
4.5.1 Densidad poblacional	41
4.5.2 Crecimiento poblacional	41
4.5.3 Uso de suelo	42
5. Metodología.....	44
5.1 Selecciones de escenarios climáticos.....	45
5.2 Obtención de los modelos climáticos futuros	46
5.3 Modelo de gestión de recursos hídricos.....	46
5.3.1 Escurrimiento de lluvia (método de la humedad del suelo)	46

UCUENCA

5.4	Análisis de la situación futura	48
5.5	Análisis hidroeconómico	49
6.	Modelación hidrológica con WEAP	49
6.1	Datos generales	49
6.2	Recopilación y preparación de los datos	50
6.2.1	Información Hidrometeorológica	50
6.2.2	Información tipo Shape.....	55
6.3	Desarrollo del modelo	55
6.3.1	Construcción del esquema	55
6.4	Información económica.....	65
6.4.1	Plantas de tratamiento de agua potable	65
6.4.2	Juntas de agua de riego	66
6.5	Calibración	66
6.5.1	Tiempo de calibración.....	66
6.5.2	Método de calibración.....	67
6.6	Índices de bondad de ajuste	69
6.7	Validación.....	69
6.8	Creación de escenarios	69
6.8.1	Variables climáticas	69
6.8.2	Crecimiento poblacional	72
6.8.3	Cambio en el uso del suelo	73
6.8.4	Demandta futura	75
7.	Resultados	80
7.1	Calibración del modelo hidrológico.....	80
7.2	Validación del modelo hidrológico	82
7.3	Proyección del caudal.....	84
7.3.1	U.H. Surucucho.....	84
7.3.2	U.H. Matadero de Sayausí	85
7.4	Demandta futura.....	86

UCUENCA

7.4.1	Plantas de tratamiento de agua.....	86
7.4.2	Juntas de agua de riego	87
7.4.3	Suministro demandado según los escenarios climáticos	88
7.5	Cobertura de la demanda	89
7.5.1	Plantas de tratamiento de agua.....	89
7.5.2	Juntas de agua de riego	91
7.6	Resultado hidroeconómico	93
7.6.1	Escenario RCP 4,5	94
7.6.2	Escenario RCP 8,5	97
8.	Conclusiones	103
9.	Bibliografía.....	105

Índice de tablas

Tabla 1.	Escenarios RCPs y su forzamiento radiativo.....	24
Tabla 2.	Elementos del modelo WEAP	30
Tabla 3.	Criterios de eficiencia de riego.....	32
Tabla 4.	Microcuenca presentes en la Subcuenca del río Tomebamba	36
Tabla 5.	Clasificación altitudinal de la subcuenca del río Tomebamba.....	37
Tabla 6.	Platas de tratamiento de agua potable ubicadas en la cuenca Tomebamba.....	41
Tabla 7.	Clasificación de uso de suelo de la subcuenca del río Tomebamba	42
Tabla 8.	Porcentaje de cambio en cada cobertura del suelo	43
Tabla 9.	Períodos de simulación	50
Tabla 10.	Resumen de las estaciones que son usadas en el estudio.	51
Tabla 11.	Porcentaje de uso de suelo y Kc por cada unidad hidrológica.	57
Tabla 12.	Capacidad de dotación de la PTAP Cebollar	58
Tabla 13.	Capacidad de dotación de la PTAP Sayausí.....	59
Tabla 14.	Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 1996	59
Tabla 15.	Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 2009	59

UCUENCA

Tabla 16. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 2015	60
Tabla 17. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro – Proyecto Culebrillas <td>60</td>	60
Tabla 18. Juntas de agua presentes en la cuenca del Tomebamba y su capacidad de dotación.....	61
Tabla 19. Eficiencia de riego en el periodo 1998 – 2014.....	62
Tabla 20. Variación mensual del consumo de agua de riego en función a la precipitación.....	64
Tabla 21. Uso de agua destinado a las piscícolas pertenecientes al río Tomebamba.	
65	
Tabla 22. Valor del agua potable en diferente periodo de tiempo.....	65
Tabla 23. Costo de la dotación de agua de riego según la junta de agua.	66
Tabla 24. Valores de parámetros de uso de suelo usados en la calibración.....	68
Tabla 25. Cambio de uso de suelo según el escenario pesimista.	73
Tabla 26. Cambio de uso de suelo según el escenario óptimo.....	74
Tabla 27. Cambio de uso de suelo según el escenario tendencial.	74
Tabla 28. Dotación futura de agua en la subcuenca del río Tomebamba	75
Tabla 29. Dotación máxima de las PTAP.	75
Tabla 30. Eficiencia de riego para el periodo 2015 - 2050	76
Tabla 31. Variación mensual del consumo de agua de riego en función de la precipitación simulada por el escenario RCP 4,5.	78
Tabla 32. Variación mensual del consumo de agua de riego en función de la precipitación simulada por el escenario RCP 8,5.	79
Tabla 33. Parámetros de suelo empleados en la calibración del modelo.....	80
Tabla 34. Valores de índices de eficiencia en el periodo de calibración.....	81
Tabla 35. Valores de índices de eficiencia en el periodo de validación.....	83
Tabla 36. Número de déficits presentes por cada PTAP.....	89
Tabla 37. Número de déficits presentes por cada junta de agua de riego.....	91
Tabla 38. Coste escasez para las PTAP del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5.	99
Tabla 39. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 con respecto al área agrícola.	100

UCUENCA

Tabla 40. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 con respecto al área Ganadera.....	102
--	-----

Índice de figuras

Figura 1. Escenarios climáticos del IPCC	24
Figura 2. Mapa de las microcuenca del río Tomebamba.....	34
Figura 3. Mapa topográfico de la subcuenca del río Tomebamba	37
Figura 4. Áreas de aporte de la Subcuenca del Tomebamba	39
Figura 5. Crecimiento poblacional de la subcuenca Tomebamba.....	42
Figura 6. Mapa del uso de suelo de la subcuenca del río Tomebamba.....	43
Figura 7. Metodología para el análisis hidro-económico de la subcuenca del río Tomebamba.....	45
Figura 8. Diagrama conceptual y ecuaciones incorporadas en el método de humedad del suelo.....	48
Figura 9. Función económica de demanda y déficit.	49
Figura 10. Ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio dentro y fuera de la subcuenca Tomebamba	52
Figura 11. Mapa de Isoyetas de la subcuenca del río Tomebamba.....	53
Figura 12. Mapa de Isotermas de la subcuenca del río Tomebamba	54
Figura 13. Estaciones hidrológicas de la cuenca del Tomebamba	54
Figura 14. Esquema de la subcuenca del río Tomebamba	56
Figura 15. Ventana de la herramienta PEST Calibration.....	67
Figura 16. Simulación de la temperatura de la cuenca hidrográfica Surucucho en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.	70
Figura 17. Simulación de la temperatura de la cuenca hidrográfica Matadero de Sayausí en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.	71
Figura 18. Simulación de la precipitación de la cuenca hidrográfica Surucucho en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.	71
Figura 19. Simulación de la precipitación de la cuenca hidrográfica Matadero de Sayausí en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.	72
Figura 20. Crecimiento poblacional de la subcuenca Tomebamba al 2050.....	73

UCUENCA

Figura 21. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Surucucho en el periodo de calibración.....	82
Figura 22. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Matadero de Sayausí en el periodo de calibración.	82
Figura 23. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Surucucho en el periodo de validación.....	83
Figura 24. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Matadero de Sayausí en el periodo de validación.....	84
Figura 25. Proyección del caudal de la unidad hidrológica Surucucho.....	85
Figura 26. Proyección del caudal de la unidad hidrológica Matadero.	86
Figura 27. Demanda proyectada de las PTAP en el periodo 2015 – 2050.....	87
Figura 28. Demanda proyectada de las juntas de agua de riego en el periodo 2015 – 2050.....	88
Figura 29. Demanda promedio mensual del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5.....	89
Figura 30. Cobertura de PTAP en el escenario RCP 4,5.	90
Figura 31. Cobertura de PTAP en el escenario RCP 8,5.	91
Figura 32. Cobertura de junta de agua de riego en el escenario RCP 4,5.	92
Figura 33. Cobertura de junta de agua de riego en el escenario RCP 8,5.	93
Figura 34. Costo generada por la demanda no cubierta de las plantas de tratamiento de agua potable del escenario RCP 4,5.	94
Figura 35. Costo generado por la demanda no cbierta en la agricultura de las juntas de agua de riego del escenario RCP 4,5.	95
Figura 36. Costo generado por la demanda no cubierta en la producción de leche de las juntas de agua de riego del escenario RCP 4,5.....	96
Costo generada por la demanda no cubierta de las plantas de tratamiento de agua potable del escenario RCP 4,5.	97
Figura 37.....	97
Figura 38. Costo generado por la demanda no cbierta en la agricultura de las juntas de agua de riego del escenario RCP 8,5.	98
Figura 39. Costo generada por la demanda no cubierta en la producción de leche de las juntas de agua de riego del escenario RCP 8,5.....	99

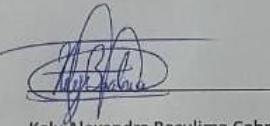
UCUENCA

Figura 40. Comparación de coste escasez del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 de las PTAP.....	100
Figura 41. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 de las juntas de agua de riego en el sector agrícola.	101
Figura 42. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 de las juntas de agua de riego, en el sector ganadero.	102

Cláusula de Propiedad Intelectual

Kely Alexandra Baculima Cabrera, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de la disponibilidad hidroeconómica futura del agua en la cuenca del río Tomebamba usando el modelo WEAP", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 noviembre del 2022



Kely Alexandra Baculima Cabrera

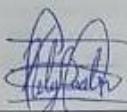
C.I: 0107431934

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Kely Alexandra Baculima Cabrera en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de la disponibilidad hidroeconómica futura del agua en la cuenca del río Tomebamba usando el modelo WEAP", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de noviembre del 2022



Kely Alexandra Baculima Cabrera

C.I: 0107431934

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme la sabiduría, salud y perseverancia para culminar con éxito esta meta importante en mi vida. De igual manera, a mis padres Miguel y Zoila por su fortaleza y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, y a mi hermana Lizbeth por siempre apoyarme en todo momento.

De manera especial agradezco infinitamente a mi director Ing. Alex Aviles, PhD por su guía, apoyo, paciencia y conocimiento compartido, ya que, gracias a ello fuí capaz de finalizar este proyecto de la mejor manera. A mi asesor, Ing. Luciano Galán por guiarme en cada paso requerido para la culminación de este proyecto.

Dedicatoria

A mis padres en especial a mi madre que ha sido un pilar fundamental en mi formación durante toda mi existencia, por su amor y apoyo incondicional. De igual forma, a mi hermana por siempre apoyarme en cada paso de mi vida, mi compañera de vida. Por último, a mi esposo David y a mi querida hija Amelia por su comprensión, amor y todas las alegrías obsequiadas.

UCUENCA

1. Introducción

En las últimas décadas, los cambios en el clima han acarreado consigo un sin número de efectos al ambiente, un claro ejemplo de ello son los cambios de caudales en los ríos a nivel mundial. Según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), expresa que uno de los riesgos claves que genera mayor preocupación son menores precipitaciones en los próximos años, con sequías más largas y más frecuentes, lo que conlleva a una disminución de la disponibilidad del recurso hídrico (Martínes & Pesántez, 2015).

La subcuenca del río Tomebamba es una de las más representativas y simbólicas de la ciudad de Cuenca, debido a los servicios ecosistémicos que ofrece, de los cuales los servicios hidrológicos son primordiales para la población a lo largo de su trayecto. La subcuenca suministra agua al 30% de la población de la ciudad de Cuenca y a la vez provee agua a 2000 agricultores de las parroquias de San Joaquín y Sayausí por medio de juntas de agua de riego (Martínes and Pesántez 2015).

La subcuenca ha sufrido grandes alteraciones a lo largo de las últimas décadas por actividades antropogénicas, las mismas que deterioran la capacidad hídrica y la calidad de agua (Ministerio del Ambiente, 2015). La contaminación por fuentes difusas (agricultura y ganadería) es un problema que afecta al suelo de la subcuenca y es muy poco estudiado en nuestro medio (Vintimilla, 2016), además, los propietarios de predios ubicados a orillas del río talan la vegetación nativa con la finalidad de cambiarla en cultivos, pastizales u otros usos no compatibles con la conservación. Estas alteraciones a la cuenca del río Tomebamba son alarmantes debido a que la dotación de agua para la ciudad de Cuenca y las comunidades aledañas es absolutamente dependiente de la precipitación que se almacena y/o regula los páramos y suelos andinos (Segarra, 2016).

El Ministerio del Ambiente del Ecuador menciona, que en el periodo 1990 – 2000 la deforestación promedio fue de 89,944 ha/año, con una tasa de deforestación de -0,71% mientras tanto que para el periodo 2000 – 2008 la deforestación promedio fue de 77,47 ha/año con una tasa de -0,66% y en el período 2008 – 2012 la deforestación alcanzó alrededor de 65.880 ha/año y una tasa de -0,54%. La pérdida de la cobertura vegetal de las cuencas hidrográficas deja suelos desprotegidos degradando estos ecosistemas que actúan como una esponja hídrica, consecuentemente también reduce la regulación hídrica (Segarra, 2016).

La sobreexplotación del recurso hídrico y el constante deterioro de los ecosistemas, conjetura la disminución de los servicios medioambientales que este proporciona a la

UCUENCA

sociedad, es por ello que la constante y creciente preocupación de la sociedad ante la destrucción de medio ambiente ha inducido a la creación de nuevas metodológicas que evalúen los impactos de la degradación de los recursos hídricos sobre el medio ambiente, con el fin de poder integrar la información en la toma de decisiones creando una gestión sostenible (D. Crespo et al., 2020).

Los modelos hidrológicos y económicos son herramientas de gran importancia para la gestión integrada del recurso hídrico, conlleva varios aspectos como su distribución espacial, infraestructura de almacenaje, transporte, actividades económicas establecidas en el uso del recurso y ecosistemas dependientes del agua. La ventaja de usar estos modelos es que permite identificar interrelaciones entre la hidrología, economía y el medio ambiente, lo que va a facilitar la valoración de las distintas alternativas de la política del recurso hídrico (Crespo et al., 2020; Lozano, 2010).

En las últimas décadas, a nivel mundial se ha realizado varios estudios donde se proyectaron y analizaron diversas cuencas hidrográficas con el propósito de realizar una gestión integral de los recursos hídricos mediante su análisis económico; por ejemplo, en Pakistán se desarrolló la proyección con el modelo hidroeconómico WEAP teniendo en cuenta 8 años de información (2006 – 2014) proyectándolo hasta el año 2050, tras el análisis del escenario de gestión se reveló que el 80% de la cobertura de demanda de agua se logrará hasta el año 2023, al incluir represas que se ha propuesto en el estudio se reducirá la demanda de agua insatisfecha en un 60% (Amin et al., 2018); otro estudio realizado en la cuenca del río Dureo (España), simuló la cuenca durante un periodo de 38 años relacionando el cambio climático, se utilizó el modelo hidrológico AQUATOOL, los resultados obtenidos muestran reducciones en la distribución de agua para el sector de la agricultura y perdidas de empleo generando un promedio de bajas que varía de -4% y -12% (Pérez et al., 2021). En la cuenca del río Apulo (Bogotá) se usó el modelo WEAP basándose en los datos recopilados en los años de 1992 - 2012 proyectado hasta el año 2025, se evidenció que en los tres escenarios se tiene una disminución de los caudales resultantes en la cuenca, siendo el escenario más desfavorable el de aumento de las áreas agrícolas heterogéneas (disminución de los caudales en el 32% respecto a la línea base) y el de menos el aumento de áreas urbanas (disminución de los caudales en el 22% respecto a la línea base) (González & Hernández, 2020). Por otra parte, un estudio evalúa los índices de incertidumbre en el desempeño del embalse de Namrood-Dam (Irán) afectados por el cambio climático por medio del modelo WEAP, se proyectó los escenarios de emisión RCP4,5 y RCP8,5 utilizando el método de reducción de escala estadística en los períodos futuros (2021-2040) a partir de los datos base recolectados en los años 1986-

UCUENCA

2016, se pudo predecir que la reducción de la entrada en un 8,36% y un 12,64% bajo los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, respectivamente, resultó en una disminución de los índices de desempeño; además, la reducción del 30% de la demanda agrícola bajo el RCP4,5 tuvo los valores más altos del índice de sostenibilidad (SI) y su rango para la agricultura Firouz Kouh y Garmsar disminuyó en un 20,64% y 34,2%, respectivamente (Hakami-Kermani et al., 2020).

Es necesario centrar nuestra atención en los posibles impactos futuros donde los potenciales cambios acelerados en el clima, podrían afectar gravemente el ecosistema andino y a su economía. Es por ello que la presente investigación está enfocada en la introducción de análisis económicos de las actividades productivas que utilizan el agua, cuyos resultados servirán para una evaluación integral de la repartición de agua de la cuenca tropical Andina del río Tomebamba. Esto representará un aporte científico de gran valor para la región, ya que se incluirá la evaluación económica de los usos del agua con el fin de aportar información para la optimización de la gestión futura de los recursos hídricos, tomando en cuenta la oferta y demanda del agua (Ramón, 2015).

UCUENCA

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la disponibilidad hidroeconómica actual y futura del agua en la cuenca del río Tomebamba usando el modelo WEAP.

2.2 Objetivo Específico

1. Determinar la variabilidad hidrometeorológica actual y futura de la cuenca (2021-2050).
2. Evaluar el comportamiento de la oferta y demanda del agua bajo escenarios de cambio climático, cambios demográficos y cambios en las actividades productivas.
3. Desarrollar un análisis económico de la disponibilidad de agua futura de los usuarios del agua en la cuenca del Tomebamba.

3. Marco teórico

3.1 Variabilidad climática

La variabilidad climática son fluctuaciones de las condiciones predominantes de la zona y otros datos estadísticos del clima en escalas temporales y espaciales, más allá de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad depende de varios factores como procesos internos naturales dentro del sistema climático o variaciones en los forzamientos extremos antropogénicos (Thornton et al., 2014).

3.2 Calentamiento global

El calentamiento global se puede definir como el incremento gradual de la temperatura del planeta como consecuencia del cambio de concentración de los gases de efecto invernadero y aerosoles, en radiación y en las propiedades superficiales del suelo, afectan la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y en la superficie terrestre (Escriva-Bou, 2012).

El término de calentamiento global es muy utilizada en dos aspectos: Aquel fenómeno que se puede visualizar en el aumento del promedio de la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en los últimos años. De igual forma, como una teoría que anuncia, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computarizadas, un futuro aumento de las temperaturas (Benavides & León, 2007).

3.3 Cambio climático

El cambio climático es una variación global del estado del clima medible en variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, persistiendo durante períodos largos como décadas. Este fenómeno puede ser fruto de forzamientos externos o varios procesos internos naturales: erupciones volcánicas, modulaciones de ciclos solares, cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera y uso del suelo (Pachauri et al., 2014).

En el artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define al cambio climático como la variación del clima atribuido indirectamente o directamente a la actividad humana que modifica la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural observada en el transcurso de tiempos equiparables. La CMNUCC diferencia, el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (Aparicio, 2019).

UCUENCA

El cambio climático afecta a los humanos como a los sistemas biológicos en varias formas, debido a la heterogeneidad espacial de los impactos. Los cambios de la frecuencia, la severidad de los eventos climáticos extremos y la variabilidad de los patrones climáticos tendrán consecuencias importantes para los sistemas naturales y humanos, ya que se proyecta eventos mayores de estrés por calor, sequías e inundaciones (Thornton et al., 2014).

3.4 Efecto invernadero y sus escenarios de emisión

La atmósfera terrestre se encuentra compuesta por distintos gases como: dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2) y algunos compuestos halogenados (CFC), actuando directamente en los procesos de intercambio de radiación que definen características relevantes del clima terrestre. Sin la presencia de dichos gases, la temperatura media global de la atmósfera en las proximidades de la superficie descendería de su valor actual de 15 °C a próximamente 18 °C. Este proceso es un efecto natural que hace posible la vida como se manifiesta en el planeta (Escriva-Bou, 2012).

Las emisiones producidas por las actividades humanas tienden a incrementar progresivamente sus concentraciones en la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y ocasionando un aumento de temperatura media global de la superficie de la tierra, designado “calentamiento global” (Benavides & León, 2007).

Se han diseñado escenarios de emisión para estudios acerca del cambio climático conforme sea el área de interés de los mismos. Los escenarios explican los futuros cambios en el uso de la tierra, socioeconómico y ambientales, para poder identificar la sensibilidad que atravesará por el cambio climático.

- Escenarios socio-económicos:

Los escenarios socio-económicos se puede identificar por varios campos como la población o actividad humana, factores de fondo, como valores sociales, estructura de gobierno y cambio tecnológico. Dichos escenarios se han utilizado para proyectar las emisiones de gases de efecto invernadero con la finalidad de analizar la vulnerabilidad y la capacidad de los sistemas socio-económicos frente a los efectos del clima futuro (Escriva-Bou, 2012).

- Escenarios de cambio en el uso de la tierra:

Es fundamental conocer el cambio de uso de la tierra y su cobertura, ya que comprende varios procesos para la estimación del cambio climático y sus impactos. Estos escenarios van a influir en el flujo de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales alteran directamente la

UCUENCA

composición atmosférica. Se toma en cuenta las características de la superficie terrestre debido a un posible cambio de la cobertura vegetal que pudiera alterar las propiedades de los ecosistemas y su vulnerabilidad al cambio climático (Escriva-Bou, 2012).

- Escenarios ambientales:

Se refiere a los cambios de los factores ambientales que se producirán en el futuro sin referenciar al cambio climático. Dichos escenarios mostrarán las posibles condiciones ambientales como: la composición del dióxido de carbono (CO₂) y la disponibilidad de agua (uso y calidad) (Escriva-Bou, 2012).

3.5 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

El IPCC es un grupo internacional delegado a valorar el entendimiento científico referente al cambio climático. Fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para facilitar a las instancias normativas evaluaciones periódicas. La Construcción de planta se realizó en el año 2010, iniciando su funcionamiento en abril del 2011, su capacidad de tratamiento es de 14 l/s sobre la base científica del cambio climático, sus repercusiones y futuros riesgos, así como las opciones que existen para adaptarse al mismo y atenuar sus efectos (Bernstein, L. et al., 2008).

3.6 Escenarios Climáticos

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y simplificada del clima del futuro, basados en un conjunto coherente de las relaciones climatológicas, se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y sirven a menudo como insumo de las simulaciones de los impactos que ayudan al desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático (Conde & Gay, 2008).

3.7 Forzamiento radiativo

El forzamiento radiativo es una medida de influencia, denota la variación del equilibrio entre la radiación solar incidente y la radiación infrarroja saliente en el sistema atmósfera – Tierra, indicado por una variación en la irradiancia neta provocada en la tropopausa y representado en vatios por metro cuadrado (W/m²).

Las perturbaciones se debe a cambios internos o forzamientos externos de sistema climático como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) o la radiación emitida por el sol (Benavides & León, 2007).

3.8 Escenarios climáticos del IPCC

Según el Quinto informe de Evaluación establece cuatro escenarios del cambio climático, nombrados como las Trayectorias Representativas de Concentración (RCP). Los escenarios exponen los diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, desde la actualidad hasta el año 2100, en el calentamiento global. El IPCC no incluye la política y la conducta que podría adoptar la sociedad para dar lugar a estos escenarios (Carabine & Lemma, 2014).

La IPCC reconoce cuatro escenarios de concentración de efecto invernadero (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5) a continuación se define cada uno de ellos:

Escenario RCP 2,6, su finalidad es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a finales del siglo con emisiones de CO₂ bajas, esto se podrá lograr con el forzamiento radiativo hasta el 2100 alcanza valores de 3W/m². Para este escenario se supuso que el forzamiento radiativo ascienda a 3,1 W/m² a mediados del siglo y después descender a un valor de 2,6 W/m² (CIIFEN, 2014).

Escenario RCP 4,5, es denominado escenario de estabilización, cuyo objetivo es tener un forzamiento radiativo de 4,5 W/m² para el año 2100. Para este escenario se considera que la población mundial llegue a 9 mil millones en el año 2065 y se reduzca 8,7 mil millones en 2100; también que las emisiones de gas de efecto invernadero lleguen a su máximo alrededor del año 2040 y empiecen a disminuir en el año 2080, siendo ese año donde se estabilizan (CIIFEN, 2014).

Escenario RCP 6,0, se predice un forzamiento radiativo de 6W/m² para el año 2100, con una mayor emisión de gases de efecto invernadero y cambio en el uso del suelo referente al escenario RCP 4,5. Para este escenario se espera disminuciones de emisiones desde el año 2060 que se pueden lograr a través de distintas imposiciones políticas climáticas y con una población de 9,8 billones en el año 2100 (CIIFEN, 2014).

Por último, el escenario RCP 8,5 es un forzamiento muy alto de gases de efecto invernadero, con una trayectoria de forzamiento radiativo ascendente hasta 8,5 W/m² en el año 2100 y un alto crecimiento poblacional. Como se puede observar en la tabla 1 las tendencias de forzamiento radiativo y concentraciones de CO₂ para el año 2100 (CIIFEN, 2014).

UCUENCA

Tabla 1. Escenarios RCPs y su forzamiento radiativo

Escenarios	Forzamiento Radiativo (FR)	Tendencia del Forzamiento Radiativo (FR)	[CO ₂] para el año 2100
RCP 2,6	2,6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4,5	4,5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6,0	6,0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8,5	8,5 W/m ²	Creciente	936 ppm

Elaborado por: Baculima K., 2022

Fuente: CIIFEN, 2014.

A continuación la figura 1, representa gráficamente el comportamiento de cada uno de los escenarios climáticos en función del aumento de temperatura hasta el año 2100. Se puede observar el escenario RCP 8,5 posee el mayor aumento de temperatura, ya que para el año 2100 presenta un aumento de temperatura mundial de 5°C; mientras, el escenario óptimo RCP 2,6 presenta un aumento de temperatura menor a 2°C.

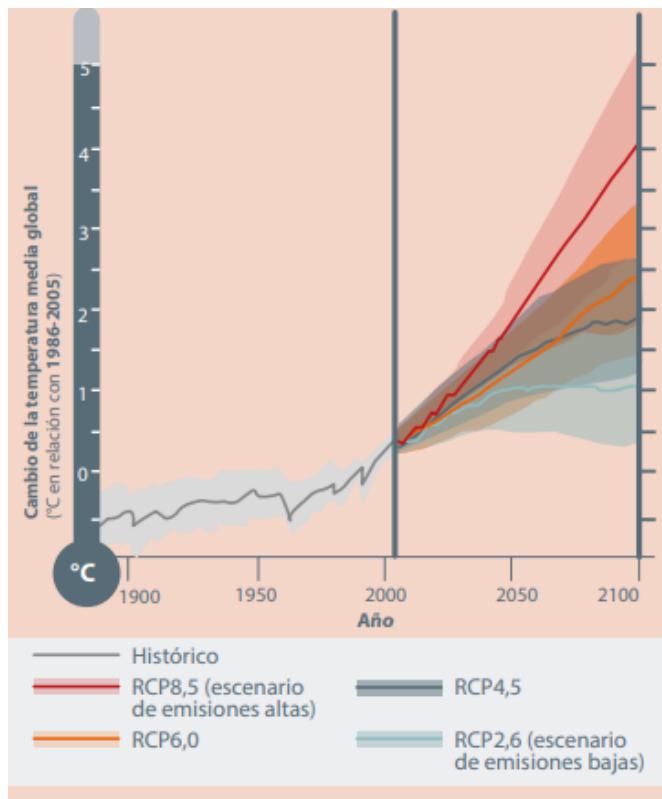


Figura 1. Escenarios climáticos del IPCC

Fuente: CIIFEN, 2014.

UCUENCA

3.9 Modelos de circulación global

Los modelos de circulación globales (MCGs) son una herramienta básica para realizar proyecciones del cambio climático, acoplados de atmósfera y océano, que resuelven numéricamente las ecuaciones matemáticas fundamentales y describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que se dan en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre (Escriva-Bou, 2012).

Los MCGs resuelven ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), continuidad, termodinámica y estado (sólido, líquido y gaseoso). Las variables como presión, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica y temperatura necesarias para describir el estado de los subsistemas que integran el sistema climático se proporcionan en una red de puntos que cubre el globo, habitualmente con una resolución horizontal para la atmósfera entre 100 y 300 km, y aproximadamente el doble para el océano, con el fin de poder resolver la dinámica de corrientes oceánicas. Esta separación de puntos de red está limitada con frecuencias por la disponibilidad de recursos computacionales (Escriva-Bou, 2012).

3.10 Modelos Climático Regionales

Los modelos climáticos regionales (MCR) son modelos físicos generalmente de atmósfera y superficie terrestre, contiene procesos importantes en el sistema climático como nubes, radiación, precipitación, humedad en suelo, etc. Los MCR no incluyen el componente oceánico, debido a que podría aumentar su complejidad y su necesidad de recursos informáticos, son la mejor herramienta para reducir de la escala global a la escala regional las características del clima, ya que se obtiene información más detallada de una región en particular (Carbajal et al., 2009).

3.11 Proyecto ENSEMBLES

El proyecto Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts (ENSEMBLES) forma parte del 6° Programa Marco, que fue realizado entre los años 2004 y 2009; busca generar un sistema probabilístico de predicción estacional y climática, que permita la cuantificación de las incertidumbres asociadas a la evolución del clima (ENSEMBLES, 2009). ENSEMBLES trabaja con los escenarios RCP cuyas series de control oscilan entre 1981 a 2005, las series futuras se encuentran desde los años 2011 hasta 2050. Posee una resolución espacial para las variables de escala mensual de 50 x 50 km o 25 x 25 km. Opera con una amplia gama de variables de temperatura, precipitación, velocidad del viento, evapotranspiración, radiación, dirección del viento y humedad (Escriva-Bou, 2012).

UCUENCA

3.12 Recursos hídricos

Los recursos hídricos son bienes naturales que forman parte del patrimonio natural del Estado, de dominio público y de libre acceso para satisfacer la necesidad de la población. Este recurso agua es preciso para fines recreativos, agrícolas, comerciales, domésticos e industriales. Las naciones desarrolladas tienen un historial de grandes inversiones en la infraestructura hídrica, instituciones y la capacidad de gestionar integralmente el recurso agua, al contrario, las naciones subdesarrolladas se caracterizan por una infraestructura hídrica inadecuada. La demanda sobre el recurso agua se encuentra en constante requerida, por lo que es necesario conocer cómo se podrá administrar los recursos hídricos para facilitar el desarrollo de las naciones (Ngene et al., 2021).

3.13 Gestión integral de los recursos hídricos (GIRH)

La asociación Mundial para el Agua (GWP) indica que la GIRH es un paso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado del suelo, agua u otros recursos que se encuentran relacionados, ya sea directa o indirectamente, con la finalidad de maximizar los beneficios económicos y sociales de forma objetiva sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (ONU-DAES, 2015). La GIRH desea orientar el progreso de las políticas públicas acerca de los recursos hídricos, por medio de una concordancia en el desarrollo económico, social y protección de los ecosistemas (Y. Martínez & Villalejo, 2018).

3.14 Demanda Hídrica

La demanda hídrica hace referencia a la cantidad de agua disponible para satisfacer las necesidades productivas, económicas y sociales del ser humano. Este comprende el volumen de agua utilizado como materia prima, insumos, así como el retorno del mismo (Guerrero, 2015).

3.15 Vulnerabilidad hídrica

La vulnerabilidad hídrica hace referencia a las limitaciones del sistema hídrico para evitar o apaciguar una amenaza, como alguna modificación negativa dentro del sistema que sufren frente a un disturbio puntual en el recurso agua o en el acceso a él. La vulnerabilidad hídrica se encuentra en un punto decisivo que requiere la toma de decisiones respecto a su desarrollo, tiene una relación directa con la construcción social debido a que todo grupo social requiere el acceso a estos recursos e influyen de tal manera que le afectan los desastres o amenazas atribuidas al ambiente (Urquiza & Cadenas, 2015).

3.16 Modelación hidrológica para la gestión del recurso hídrico

La modelación hidrológica tiene el objetivo de conocer la oferta hídrica de una zona con el fin de gestionar los recursos de una manera sostenible entre los distintos servicios que se demanda, para ello se necesita modelos que sostengan una relación de varios procesos físicos y químicos que ocurren en diferentes escalas como temporales y espaciales (González & Hernández, 2020). Las relaciones se pueden observar por medio del balance de agua en la zona, el mismo que es afectado por usos del suelo, condiciones climáticas, procesos que determinan los caudales máximos del efluente, infiltración, percolación, regulación hídrica y humedad del suelo (Brujinzeel, 2004). La elección del modelo es crucial, se requiere tener en cuenta el propósito del estudio y disponibilidad de datos que puedo obtener, además de la exactitud de los resultados y el análisis de las respuestas de la subcuenca hidrográfica (González & Hernández, 2020).

3.17 El Modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System)

Es una herramienta de modelación integrada de recursos hídricos, desarrollada por el Stockholm Environment Institute en 1988. El modelo es de libre acceso, puede ser utilizado para modelar zonas pequeñas de captación hasta zonas grandes (Palacios, 2017).

El modelo WEAP es un instrumento computacional usado para la planificación integrada de los recursos hídricos, se basa en principio fundamental del balance hídrico de una subcuenca teniendo en cuenta que las entradas totales de agua van a ser igual a las de salida y al cambio de almacenamiento neto como son los embalse, acuífero y el suelo. WEAP nos simboliza de una forma específica la subcuenca hidrográfica representada: su demanda, suministros, nodos y las relaciones entre ellos, permitiéndonos una visualización numérica como gráfica del comportamiento de ella (González & Hernández, 2020).

El modelo hidrológico evalúa el régimen hidrológico en el futuro, ya sea por alteraciones en el suelo o el clima, estimando la oferta y la demanda del sistema hidrológico; además, permite la comparación de escenarios futuros por la variación climática y variación en las condiciones hidrológicas en la subcuenca (Palacios, 2017).

3.17.1 Unidad hidrológica (U.H.)

El Centro de Cambio Global de la Universidad Católica de Chile y Stockholm Environment Institute (CCGUCC & SEI, 2009) indican que para desarrollar un modelo hidrológico en WEAP es necesario dividir las subcuencas a modelar en unidades hidrológicas. Una unidad hidrológica es un área definida por el usuario en la que se

UCUENCA

especifican procesos como precipitación, evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve.

Según CCGUCC & SEI (2009), sugieren siete pasos para dividir la subcuenca en unidades hidrológicas cuando se va a desarrollar un modelo hidrológico:

- Identificar puntos de interés, debe incluir puntos de medición de caudal, adicional se puede incluir bocatomas, vertimientos, etc.
- Delimitación de áreas aferentes a los puntos de interés definidos y a la desembocadura de drenajes a modelar.
- Definir bandas de elevación, si se incluyen, tener en cuenta que en caso de que las áreas delimitadas en el paso anterior tengan una gran extensión y que la variación del clima espacialmente sea considerable, vale la pena definir bandas de elevación de tal forma que se capture la variabilidad espacial del clima. Para ello, se requiere un modelo digital del terreno y analizar la distribución espacial de la precipitación, temperatura, etc.

Dividir áreas aferentes según bandas de elevación definidas en el punto anterior. Esa intersección entre bandas de elevación y áreas aferentes, esas porciones de área se representan mediante polígonos en shapefile, son lo que WEAP denomina “Unidad hidrológica o catchments”.

Hasta este paso se define la extensión y delimitación de las unidades hidrológicas, en los siguientes pasos se relaciona la estructura de datos que se definen en WEAP para caracterizar adecuadamente los diferentes procesos hidrológicos.

- Denotar desagregación al interior de la unidad hidrológica para representar procesos como evapotranspiración, escorrentía, infiltración, percolación. Por ejemplo, la unidad hidrológica se puede dividir por la combinación suelo – cobertura de tierra.
- Estimar área total y distribución porcentual según desagregación definida.
- Procesar variables climáticas por unidad hidrológica.

3.17.2 Métodos hidrológicos en WEAP

WEAP contiene cinco métodos para la simulación de procesos hidrológicos y de demandas de riego en unidades hidrológicas. El método por usar depende del nivel de complejidad deseado para representar los procesos en la unidad hidrológica y la disponibilidad de datos (CCGUCC & SEI, 2009).

CCGUCC & SEI (2009) indican los siguientes métodos presentes en WEAP para la simulación de procesos hidrológicos y de demandas:

UCUENCA

- Solo demandas de riego (método del coeficiente simplificado): Es el método más simple, los datos de entrada son precipitación, evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo (K_c). Con ello se realiza el balance de agua para simular la demanda de riego en los cultivos, cabe recalcar que no simula los procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad del suelo.
- Escurrimiento de lluvia (método del coeficiente simplificado): Es exactamente parecido al método anterior, con la única diferencia que la lluvia no consumida por evapotranspiración se simula como escorrentía hacia un río o se puede distribuir entre escorrentía y flujo al agua subterránea.
- Escurrimiento de lluvia (método de la humedad del suelo): Este método divide las unidades hidrológicas en dos capas: la capa superior del suelo, los procesos de evapotranspiración considerando la lluvia, riego, escorrentía, infiltración, interflujo y percolación; mientras que en la capa profunda simula el fujo base, ambas capas incluyen la modelación de los cambios en la humedad del suelo. La percolación se puede transmitir directamente a un nodo de agua subterránea mediante la creación de un enlace de escorrentía / infiltración desde la unidad hidrológica al nodo de agua subterránea, en este caso la unidad hidrológica solo simularía los procesos de la capa superior del suelo. Este método requiere una parametrización más detallada del suelo y del clima para simular estos procesos, WEAP calcula la evapotranspiración siguiendo el reporte de riego y drenaje 56 de la FAO. El método Penman-Monteith utiliza datos climáticos como: precipitación, temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento, duración solar relativa o fracción de nubosidad.
- MABIA (FAO56, doble K_c , diario): es una simulación diaria de transpiración, evaporación, requisitos y programación de riego, crecimiento y rendimiento de cultivos. De igual forma, incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua del suelo. Este método divide el coeficiente de cultivo en dos, uno para la traspiración del cultivo y otro para la evaporación del suelo.
- Desarrollo de Plantas (diario, CO_2 , efecto de estrés por agua y temperatura): este método simula el crecimiento de las plantas, el uso de agua y el rendimiento aun paso de tiempo diario. Permite estudiar los impactos sobre el empleo del agua de las plantas y en el rendimiento de los cultivos producto de la concentración alterada de CO_2 atmosférico, el estrés por temperatura, la viabilidad de la duración de los ciclos y el estrés hídrico.

UCUENCA

3.17.3 Balance hídrico en WEAP

Para realizar el balance hidrológico usando el modelo WEAP se utiliza varios componentes como: escorrentía superficial, evapotranspiración, escorrentía sub-superficial, infiltración, y flujo base. WEAP necesita como entrada datos de cobertura vegetal y climatológicos para estimar cada uno de los componentes del balance hidrológico mencionados anteriormente, con la finalidad de que cada una de las unidades espaciales básicas sean identificadas por el modelo. Dichas unidades básicas se denominan catchments, indicando las zonas de captación. Por medio de la delimitación de la subcuenca tienden a ser definidos los catchments, por medio del proceso de la caracterización de la cobertura vegetal dentro de la zona en estudio. Los datos climáticos requeridos para modelar son: temperatura, precipitación, humedad, viento y latitud. De igual forma, se requiere datos de caudales, ya que son necesarios para comparar los resultados del modelo y las respectivas calibraciones. Finalmente, para realizar el análisis de oferta de agua se requiere agregar información acerca de la infraestructura física del control y demanda presente en la subcuenca (CCGUCC & SEI, 2009).

3.17.4 Elementos del modelo WEAP

Según la guía metodológica de WEAP para la implementación del modelo, se requiere de una gran cantidad de datos (González & Hernández, 2020). En la tabla 2 se puede observar la figura y nombre que designa WEAP a cada uno de los datos requeridos.

Tabla 2. *Elementos del modelo WEAP*

Categoría	Símbolo	Nombre	Descripción
Elementos de suministro		Cathment	Zona donde se indica procesos como evapotranspiración, irrigación, precipitación, escorrentía y los suelos agrícolas y no agrícolas.
		Groundwater	Agua subterránea que pudo tener infiltración natural o a través de trasmisiones, interacción de ríos, infiltración de cuenca y capacidad de almacenamiento.
		Other supply	Indica cantidad de agua disponible y no tienen capacidad de almacenamiento.

UCUENCA

Categoría	Símbolo	Nombre	Descripción
Elementos de demanda	●	Demand site	Corresponde a las demandas de recurso hídrico, como: ciudades, distritos de riego e industrias.
	▲	Reservoir	Corresponden a embalses presentes.
	⊕	Flow requirement	Indican los caudales ecológicos necesarios en una posición del río.
	■	Run of river hydropower	Corresponden a las estaciones de generación hidroeléctrica.
Elementos de transmisión	—	River	Representan a ríos y quebradas.
	—	Diversión	Bifurcación de los ríos a tuberías o canales.
	---	Runoff/infiltration Links	Figura la escorrentía o infiltración de las cuencas a los ríos o elementos de agua subterráneas.
	—	Transmission Links	Corresponde la transmisión.
	—	Return Flow links	Representa los caudales de retorno luego de ser usados por los sitios de demanda.
Tratamiento de aguas	●	Wastewater treatment plants	Corresponde a las plantas de tratamiento de agua, remueven los contaminantes en las porciones requeridas para regresar el agua a los ríos.
Elementos de calibración	●	Stream Flow gauges	Indica lugares de medición de caudales.

Fuente: González and Hernández, 2020.

3.18 Eficiencia del sistema de riego

La eficacia del sistema de riego relaciona la cantidad de agua usada por las plantas y la cantidad de agua suministrada desde la bocatoma, la cantidad de agua captada de una fuente natural conducida por un canal principal y luego distribuida por un canal de distribución (MINAGRI, 2015).

UCUENCA

Para poder calcular la eficacia del sistema de riego se divide en tres eficiencias: conducción (el canal principal), distribución (canales laterales) y aplicación (en la parcela), el resultado de su producto se obtiene la eficacia del sistema de riego (MINAGRI, 2015).

$$Ef_r = Ef_c \times Ef_d \times Ef_a$$

Ecuación 1. Eficacia de un sistema de riego

Donde:

Ef_r = Eficacia de riego

Ef_c = Eficacia de conducción

Ef_d = Eficacia de distribución

Ef_a = Eficacia de aplicación

El porcentaje de cada una de las eficiencias utilizadas en la ecuación 5 se puede observar en la tabla 8.

Tabla 3. Criterios de eficiencia de riego

Criterio de eficiencia de riego		Eficiencia (%)
Eficiencia de conducción	Canal	
	Revestido	80
Eficiencia de distribución	Acequia	
	Revestido	90
Eficiencia de aplicación	Método de riego	
	Superficial	
	Riego tradicional y tendido	10. - 30
	Riego en curvas de nivel (CN)	30 - 60
	Riego por bordes	40 - 80
Riego por surcos		40 – 85

Método de riego	
Presurizado	
Riego por aspersión	50 - 90
Riego por microjet	60 - 95
Riego por goteo	65 – 95

Fuente: MINAGRI, 2015.

3.19 Análisis hidroeconómico

Un elemento de gran importancia para el desarrollo sostenible es el agua, apoya a la mayoría de las actividades económicas y a los servicios de los ecosistemas. La gestión del agua tiene grandes retos como: contaminación, escasez del agua y los efectos del cambio climático que perjudica al ser humano y a la biodiversidad (Baccour et al., 2021).

El análisis hidroeconómico hace referencia a la modelación de la economía del agua, basada en la red hidrológica de distintas cuencas, cuya ventaja es la valoración política y estrategias de adaptación para el cambio climático, ya que genera una eficaz asignación del agua y una menor contaminación en el uso de agua y sus ubicaciones (Baccour et al., 2021).

4. Línea Base

4.1 Caracterización de la Zona de Estudio

La Subcuenca del río Tomebamba posee una superficie de 38041,83 ha, se encuentra ubicada en la provincia del Azuay del cantón Cuenca, cinco parroquias: Paccha, Sinnincay, Valle, San Joaquin, Sayausí y Cuenca. La subcuenca se encuentra formada por cinco microcuencas: Culebrillas, Llaviuco, Mazán, Matadero alto, Matadero Bajo, Pinchishana y Tomebamba (Fig. 2) (Rincón et al., 2017).

La zona alta de la subcuenca se encuentra el páramo con un gran sistema de lacustre que generan agua para la población cuencana. Su extensión ocupa una considerable parte del Parque Nacional Cajas. La subcuenca posee relevantes coberturas de bosque nativo en las zonas de Llaviucu, Mazan, Culebrillas y parte del cerro Cabogana (Gomezcoello, 2020).

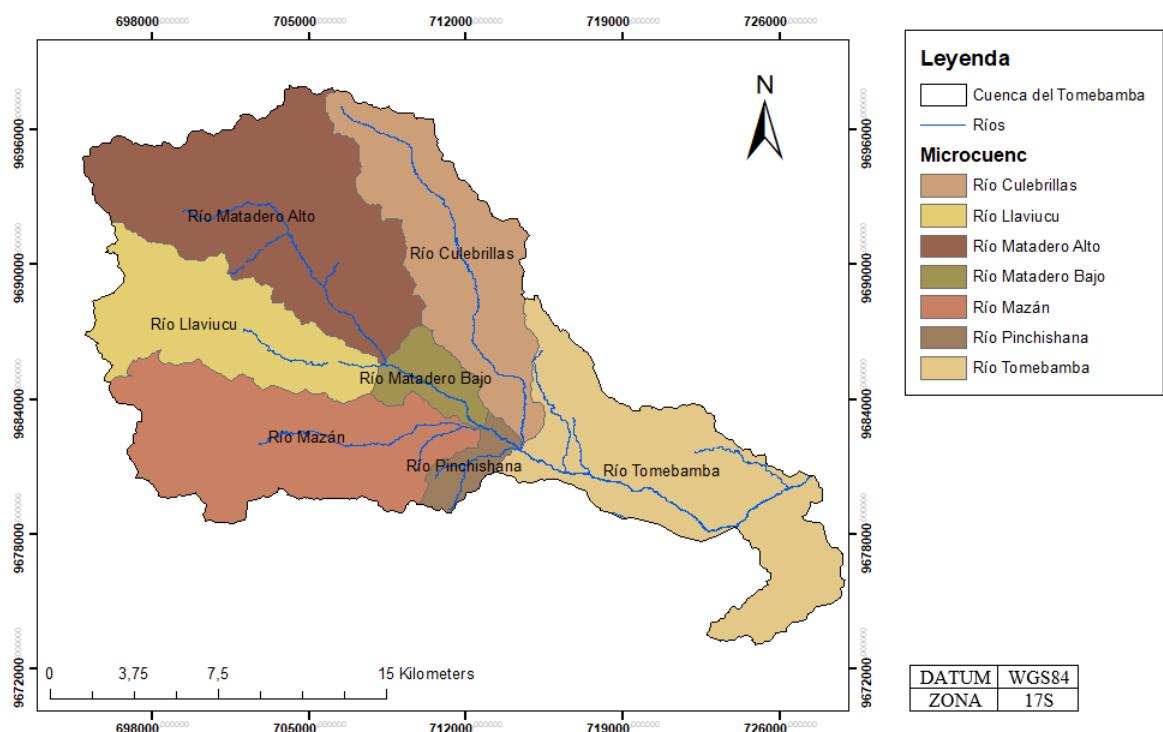


Figura 2. Mapa de las microcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

- **Microcuenca Culebrillas**

Hidrográficamente, se encuentra en la parte superior derecha de la subcuenca, con una extensión de 6077,45 ha la cual representa el 16% de la subcuenca, se ubica dentro de la parroquia de Sayausí, en ella, se encuentran localizadas principalmente las comunidades de Buenos Aires y Bellavista (Galarza & Chicaiza, 2008).

En el año 2001, la microcuenca presenta el 67,89% páramo y el 13,79% vegetación leñosa. La importancia de la zona radica en la provisión de servicios ecosistémicos, principalmente agua para el consumo humano para la ciudad de Cuenca, como para comunidades cuya mayor relevancia potencial hace referencia a la producción agropecuaria (Galarza & Chicaiza, 2008).

- **Microcuenca Llaviuco**

Se encuentra en la parte media alta de la subcuenca en estudio, cerca de la microcuenca del río matadero, anexándose al mismo. Posee una superficie de 5137,10 ha la cual representa el 13% de la subcuenca, situándose en la parroquia de Sayausí.

UCUENCA

En esta microcuenca específicamente junto con la microcuenca de Mazan y el Matadero, se encuentra una zona compleja de transición, entre los bosques de alta montaña tropical y páramos, estos bosques montanos están localizados aproximadamente de 2800 a 3500 m.s.n.m. En el caso de la microcuenca del Llaviuco, el bosque se encuentra en un estado de sucesión, pero persisten focos de actividades humanas que son el pastoreo de animales y actividades turísticas (Rincón et al., 2017).

- **Microcuenca Mazán**

La microcuenca se ubica en la parte media de la subcuenca en estudio, tiene una extensión de 7327,16 ha pertenecido el 19% de la subcuenca. La distribución de la comunidad vegetal es de 90,6% pajonal de páramo, su estructura y fisonomía es homogénea; además, presenta gran cantidad de pequeños arbustos. Históricamente, la principal actividad en la zona era ganadera y agrícola, pero a partir del año 2000 aumenta la agricultura en comparación a la ganadería (Bermeo, 2014).

- **Microcuenca Matadero alto**

Posee una superficie de 9315,89 ha, representa el 25% de la subcuenca, hidrográficamente se encuentra en la parte alta de la subcuenca. Está constituida por un sistema lagunar que regula escurrimientos generando la formación del río Quínoas de pendiente moderada y caudales pequeños, recibiendo mayor caudal aguas abajo constituyendo el río Matadero. La microcuenca del río Matadero alto constituye grandes extensiones de páramos, bosques naturales y abundantes lagunas (A. Crespo, 2014).

- **Microcuenca Matadero bajo**

Posee una superficie de 1244,27 ha, representa el 3% de la subcuenca en estudio, en su mayoría se encuentra ubicado dentro de la parroquia de Sayausí. Cerca de la Piscícola Chirimichay, presenta grandes sectores dedicados a la agricultura, con pequeñas áreas que conservan la vegetación natural (A. Crespo, 2014).

- **Microcuenca Pinchishana**

La microcuenca cuenta con un área de 829,23 ha representado el 2% de la subcuenca, pertenece en su gran mayoría a la parroquia de San Joaquín, Se encuentra ubicada en la parte media baja de la zona en estudio.

- **Microcuenca Tomebamba**

UCUENCA

Finalmente, el último tramo de la subcuenca donde desembocan todos los ríos de las microcuencas antes mencionadas, posee una superficie de 8110,74 ha que representa el 21% de la subcuenca en estudio, se encuentra localizada dentro de las parroquias de Paccha, Sinincay y Cuenca; además, esta área corresponde a urbanizaciones y sembríos.

En la tabla 4 se puede apreciar de una forma más resumida las microcuencas presentes en esta área:

Tabla 4. Microcuencas presentes en la Subcuenca del río Tomebamba

Microcuenca	Área (ha)	Río Principal
Matadero alto	9315,89	Quinuas y Taquiurco
Culebrillas	6077,45	Culebrillas
Llaviuco	5137,10	Llaviuco
Mazán	7327,16	Mazán
Matadero bajo	1244,27	Tomebamba o Matadero
Pinchisana	829,23	Pinchisana
Tomebamba	8110,74	Tomebamba o Matadero

Fuente: ETAPA EP, 2014; Pesántez, 2015.

4.2 Características topográficas de la zona de estudio

El uso de la topografía es de vital importancia, nos sirve para enmarcar el contexto de las áreas y completar la descripción física de la subcuenca. Con el fin de realizar el análisis de relieve se realizó un Modelo de Elevación Digital (DEM). El DEM nos ayuda a representar la distribución espacial de la elevación del terreno en datos numéricos. Se utilizó el programa ArcGIS14.1 para la generación del DEM de la subcuenca del río Tomebamba (Fig. 3).

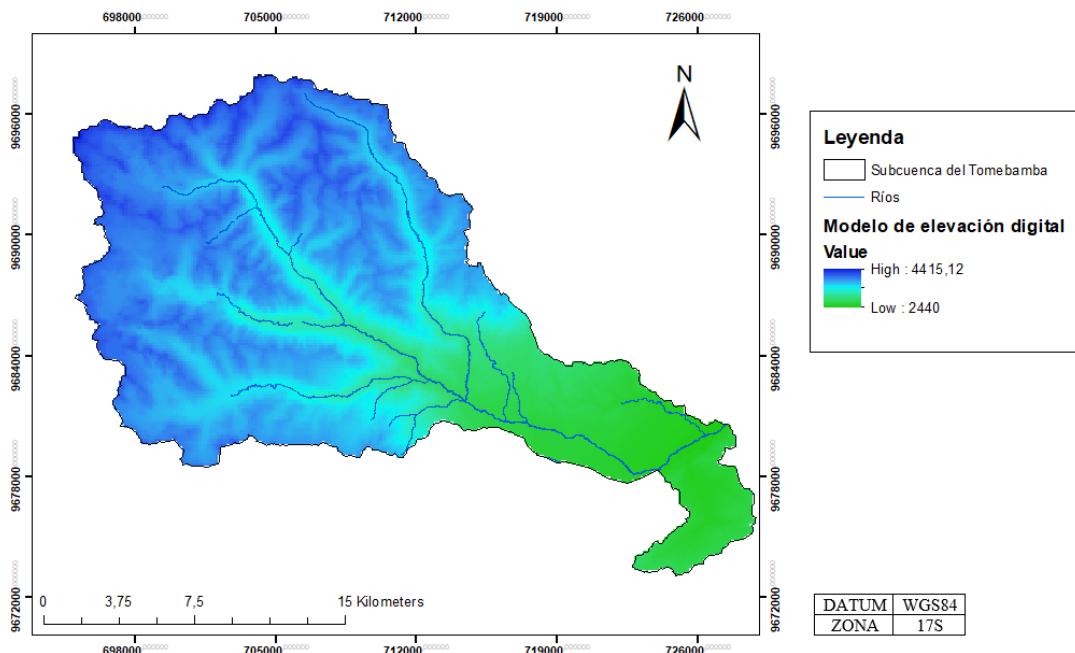


Figura 3. Mapa topográfico de la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

El relieve de la subcuenca del río Tomebamba es muy irregular, se clasificó tres grupos, los cuales presentan diferentes características hidrometeorológicas, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación altitudinal de la subcuenca del río Tomebamba

Subcuenca	Altura promedio (m.s.n.m.)
Zona alta	4420 a 3760
Zona media	3760 a 3100
Zona baja	3100 a 2440

Elaboración propia

4.3 Características Climatológicas

4.3.1 Clima

El clima en la zona baja de la subcuenca del río Tomebamba es lluvioso – húmedo, mientras que en parte alta es especialmente húmedo, ya que la zona se encuentra cubierta de páramo en donde son muy frecuentes las lluvias (Salinas & Sarmiento, 2019).

UCUENCA

La subcuenca presenta un régimen estacional biomodal, dos estaciones húmedas con una precipitación media mensual de 118,17 mm en los meses de marzo – abril – mayo y en septiembre – octubre – noviembre; también, presenta dos estaciones secas con una precipitación media mensual de 100,5 mm, en los meses de diciembre – enero – febrero y junio – julio – agosto.

4.3.1.1 Pisos climáticos

Según Pesántez (2015), indica que en el cantón Subcuenca presenta cuatro pisos climáticos, mientras que en la subcuenca del río Tomebamba posee de dos de ellos: el piso climático Frío Andino y el piso Templado interandino.

- **Piso climático frío andino:** Este piso comprende aquellos lugares que se encuentran desde los 3200 m.s.n.m. hasta los 4700 m.s.n.m., con una temperatura que varía entre 1 °C y 10 °C. presenta neblina espesa, lloviznas casi constantes y lluvia. Este clima es característico de los páramos de la región andina.
- **Templado interandino:** Este piso comprende puntos que van desde los 2500 m.s.n.m. hasta 3200 m.s.n.m., con una temperatura de 10 °C a 15 °C. Este piso climático presenta de lluvia templada, vientos fuertes, aire seco y cálido.

4.3.2 Temperatura

La temperatura media anual de la subcuenca del río Tomebamba, se encuentra desde los 4°C a 8°C en las zonas altas, ubicadas al noreste. De igual forma, la temperatura media anual de la zona más baja varía de los 12°C a 15°C (Pesántez, 2015).

4.3.3 Precipitación

La subcuenca del río Tomebamba presenta una precipitación promedio anual de 1081,98 mm de lluvia durante 10 años, esta información se ha obtenido de la Red Hidrometeorológica Unificada de la subcuenca del río Paute – RHUP – cuya estación se ubica en el sector del matadero (Pesántez, 2015).

4.3.4 Humedad Relativa

Según Pesántez (2015), indica que la humedad relativa media anual para el periodo de registro 2003 – 2013 es del 68%, siendo los meses de precipitación los que poseen el valor más alto. Asimismo, la variación estacional de la humedad relativa es importante, variando el valor de 55% a 80%.

4.3.5 Viento

El régimen de vientos dentro de la Subcuenca varía de acuerdo a las estaciones, entre los meses julio y septiembre (verano) poseen valores de velocidad media entre 1,3 y

UCUENCA

2,2 m/s, teniendo valores máximos instantáneos que puede alcanzar a 24m/s (Pesántez, 2015).

4.4 Características hidrológicas

4.4.1 Hidrografía

La Subcuenca del río Tomebamba es exorreica, dicho de otra forma, sus aguas son captadas en su territorio y tienen una salida al final de la subcuenca. El río principal de la subcuenca es denominado Tomebamba, nace en una cota de 4000 m.s.n.m. de los humedales del Parque Nacional Cajas (páramo) y desemboca en la ciudad de Cuenca, ubicada a 2500 m.s.n.m. El río recorre de oeste a este, finalmente juntándose con los ríos Yanuncay, Machángara y Tarqui, formando así el río Cuenca (Pesántez, 2015).

4.4.2 Áreas de aporte

En la Subcuenca del Tomebamba, se puede observar dos áreas de aporte, conjuntamente con las captaciones de agua realizada por la empresa ETAPA EP (Fig. 4). La primera llamada “Tomebamba” con una extensión de 28,44 hectáreas y la segunda llamada “Culebrillas” que posee una extensión de 5,24 hectáreas.

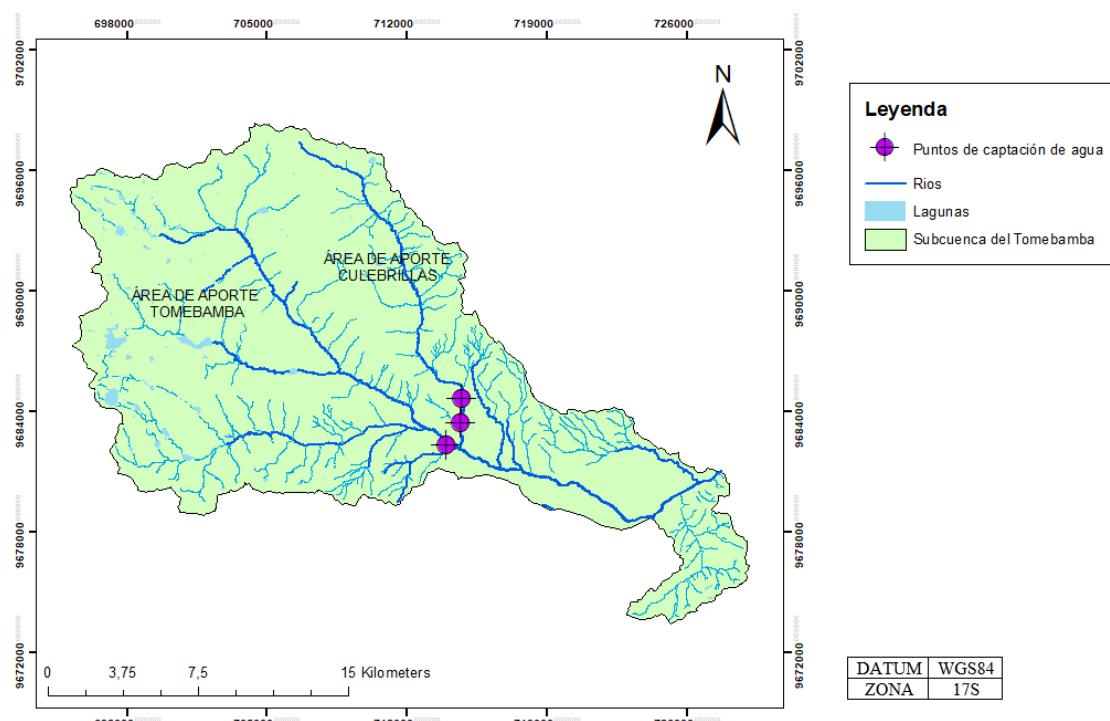


Figura 4. Áreas de aporte de la Subcuenca del Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

Según la estación hidrometeorológica ubicada en el sector del Matadero perteneciente a la parroquia de Sayausí, presenta un caudal promedio anual de 6,33 m³/s con un

UCUENCA

caudal promedio anual máximo de 14,5 m³/s y un caudal promedio anual mínimo de 1,28 m³/s (Pesáñez, 2015).

4.4.3 Inventario hídrico

El inventario se ejecutó mediante el levantamiento de información de las juntas de agua de riego, plantas de tratamiento de agua potable, piscicultura y abrevaderos. Para dicho estudio se requiere toda información que se relacione con las fuentes hídricas, en particular las captaciones de dicha fuente hídrica y el uso para el cual va a ser destinado.

Uso del agua

Según la información recopilada por SENAGUA y ETAPA EP, el principal empleo del agua es para consumo humano, siendo la principal fuente las aguas superficiales, ya que el uso de las fuentes subterráneas es casi nulo (Pesáñez, 2015).

De igual forma, existen otros empleos de agua:

- Pecuario
- Agrícola y riego
- Industrial (cerámicas)
- Piscicultura
- Estético
- Pesca deportiva

Agua potable

En la subcuenca del Tomebamba es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para el sistema de agua potable del área urbana de la ciudad de Cuenca.

Existen dos proyectos de agua potable en la cuenca del río Tomebamba según la empresa ETAPA-EP, presentan dos zonas de captación Tomebamba y culebrillas, cada zona se establece varías plantas de tratamiento de agua como se puede observar en la siguiente tabla (tabla 6).

UCUENCA

Tabla 6. Platas de tratamiento de agua potable ubicadas en la cuenca Tomebamba

Zona de captación	Planta de tratamiento de agua potable	Caudal utilizado (lt/s)
Tomebamba	Sayausí	15
Tomebamba y Culebrillas	Cebollar	950
Culebrillas	San Pedro – proyecto culebrillas	115
Tomebamba	San Pedro	115

Fuente: Piedra, 2017.

Riego, industrial y recreación

En la subcuenca hidrográfica se identifica distintos empleos para el agua, ya sea para riego o uso doméstico. El número de usuarios que aprovechan este recurso es de 2.200 personas, las cuales pertenecen a distintas comunidades como: Corazón de Jesús, Bellavista, San Vicente, Ramales, Libertad, San Miguel, Buenos aires, otros (Pesántez, 2015).

Según el inventario de recursos hídricos en la provincia del Azuay, indica que el número de sistemas presente en la cuenca es de 26 y 2128,5 hectáreas regadas, obteniendo la demanda de agua de riego de 264 l/s y la demanda de caudal ecológico de 541 l/s (J. Martínez, 2012).

4.5 Caracterización socioeconómica de la subcuenca

4.5.1 Densidad poblacional

La densidad poblacional se puede cuantificar conociendo el área total de la subcuenca, la densidad poblacional bruta según el censo 2010 es de 325 h/km², lo que quiere decir una densidad de 59 h/km² para la provincia del Azuay y con una densidad bruta de la ciudad de cuenca de 4567 h/km²; tener en cuenta que el Parque Nacional Cajas con un área de 130 km² se encuentra dentro de las zonas de exclusión desde 1976, que ocupa el 39% de la subcuenca (Pacheco et al., 2019).

4.5.2 Crecimiento poblacional

El crecimiento de poblacional de la cuenca del Tomebamba se ha incrementado en el trámite de los años, como se puede observar en la figura 5, la población en el año 1990 es de 62206 habitantes, mientras que para el año 2010 es de 107608, lo que genera una tasa de crecimiento poblacional positiva.

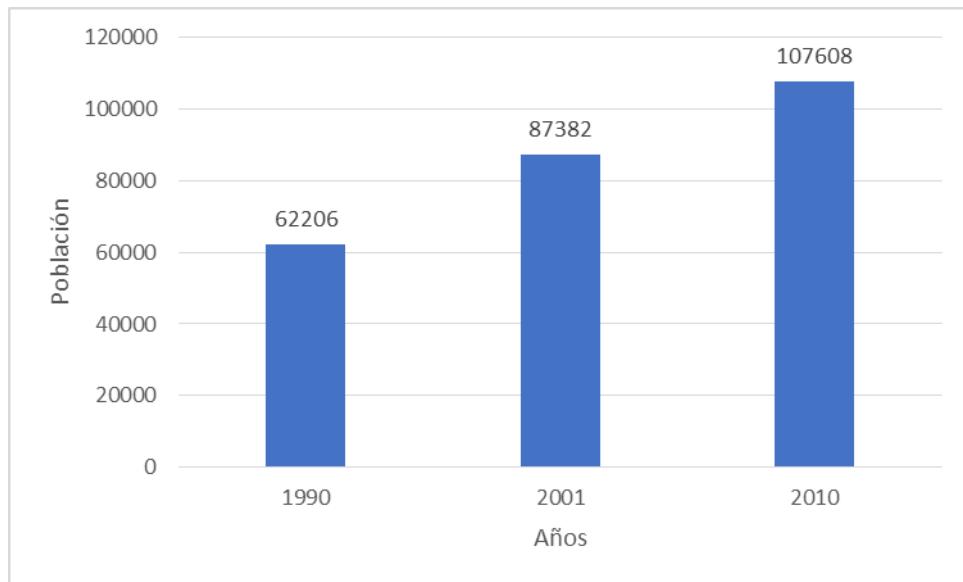


Figura 5. Crecimiento poblacional de la subcuenca Tomebamba.

Fuente: Pacheco *et al.*, 2019.

4.5.3 Uso de suelo

En el año 2000 la subcuenca del río Tomebamba se encuentra constituido por 8 clasificaciones de uso de suelo, donde predomina en un 31,57% el páramo (tabla 7). En la zona alta de la subcuenca se encuentra conformada por paramo y bosques, donde se encuentran las zonas de protección y conservación. En la zona media de la subcuenca se localiza las zonas agrícolas y ganaderas, finalmente, la zona urbana se encuentra en la parte baja de la subcuenca.

Tabla 7. Clasificación de uso de suelo de la subcuenca del río Tomebamba

Uso de suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
Áreas degradadas	17893,6794	3,49
Bosque (Vegetación Leñosa)	109621,539	21,36
Cultivos Mixtos	101683,398	19,82
Humedales	12506,6253	2,44
Lagunas	741,563431	0,14
Paramo	162003,731	31,57
Pasto	87707,8907	17,09
Zonas urbanas	20940,4367	4,08

Fuente: Elaboración propia

UCUENCA

En el siguiente mapa se puede observar la clasificación del uso de suelo de la subcuenca del río Tomebamba.

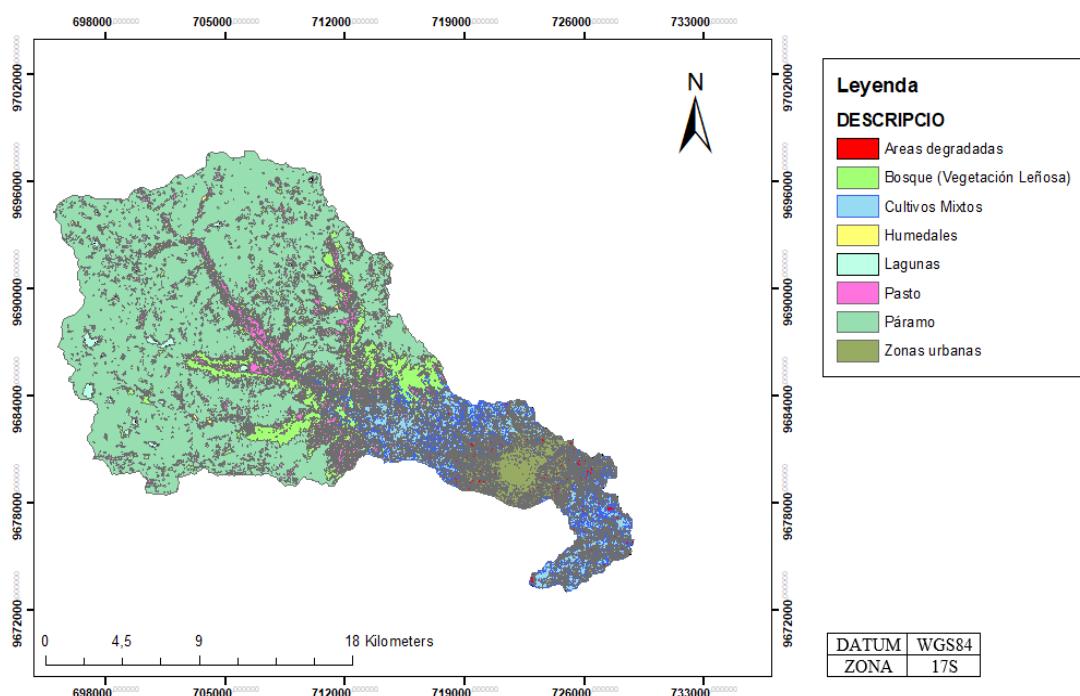


Figura 6. Mapa del uso de suelo de la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

4.5.3.1 Cambio en el uso del suelo

Pacheco et al., (2019) ha calculado el porcentaje de suelo respecto a cada cobertura (tabla 8), notar que números negativos hace referencia a la perdida de cobertura, como: bosques, humedales, lagunas, páramo y pasto; mientras que se ha incrementado una gran cantidad de área en los cultivos, áreas degradadas y zonas urbanas, obteniendo como resultado una gran degradación de la subcuenca del Tomebamba en estos 19 años estudiados.

Tabla 8. Porcentaje de cambio en cada cobertura del suelo

Uso de suelo	2000-2008 (%)	2008 – 2018 (%)
Áreas degradadas	40	1
Bosque	-1	-10,3
Cultivos Mixtos	72	8,1
Humedales	-0,5	0,1
Lagunas	-2,2	-5,1
Páramo	-0,8	0,1

Uso de suelo	2000-2008 (%)	2008 – 2018 (%)
Pasto	-6,6	-8,3
Zonas urbanas	22,4	6,3

Fuente: Pacheco *et al.*, 2019.

5. Metodología

El proceso para la evaluación integral de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos complejos, se requiere el empleo de modelos de simulación colocados en forma secuencial, debido al nivel de complejidad e interacción de los distintos elementos que conforman la subcuenca en estudio como es la parte ambiental y socioeconómica.

La metodología que se utilizará en este trabajo abarca de los siguientes pasos:

1. Análisis de la situación actual (línea base).
2. Selección de los escenarios climáticos.
3. Obtención de los modelos climáticos futuros
4. Estructuración del modelo estocástico para la generación de series sintéticas de aportaciones futuras, se realizará a partir del modelo de gestión de recursos hídricos (método humedad del suelo).
5. Análisis de la situación futura (comportamiento de la oferta y demanda futura).
6. Análisis hidroeconómico (perdidas económicas por no cubrir el 100% de la demanda futura).

A continuación, en la figura 2 se puede observar un diagrama donde especifica a detalle los pasos a seguir que se utilizará al realizar análisis hidroeconómico de la subcuenca del río Tomebamba.

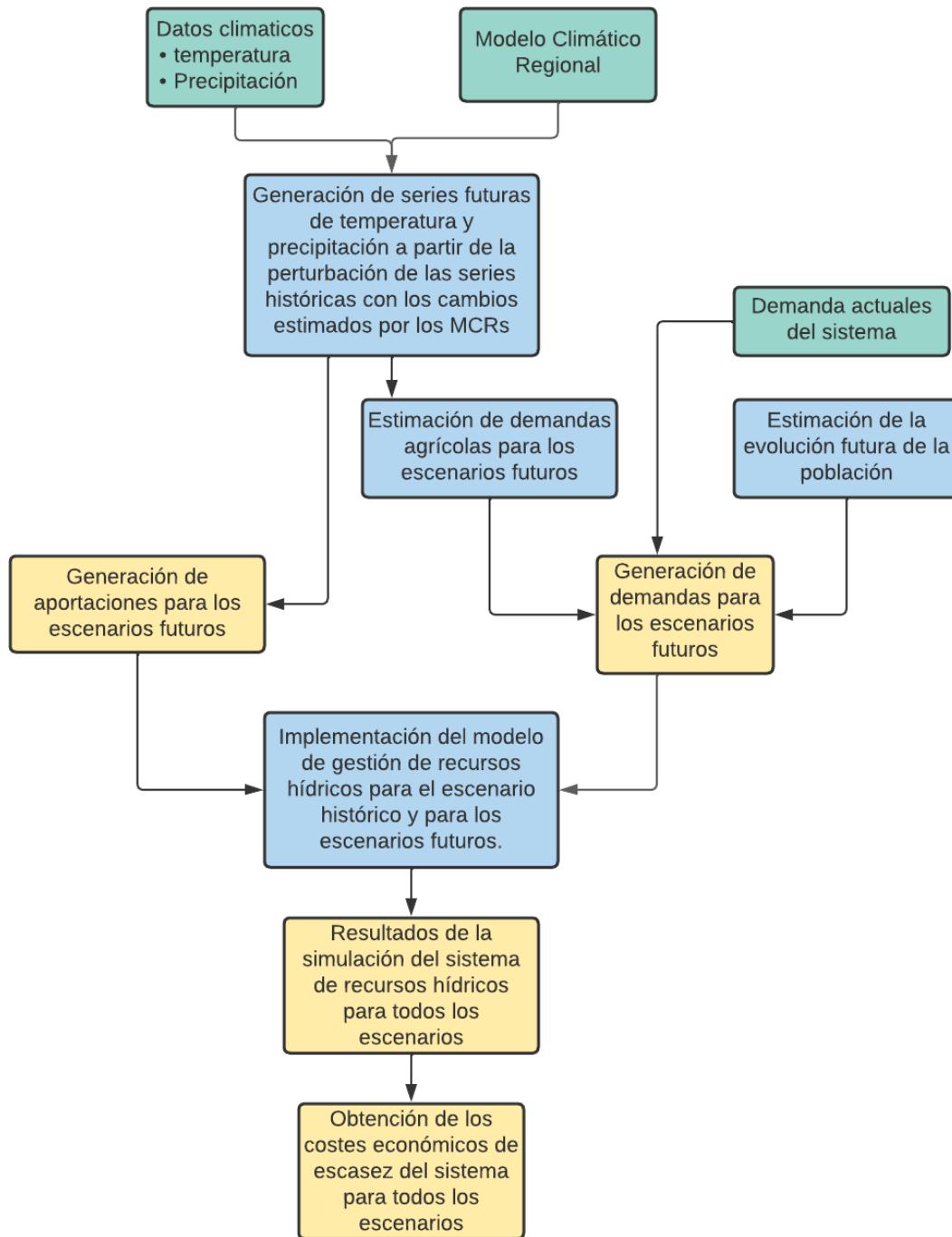


Figura 7. Metodología para el análisis hidro-económico de la subcuenca del río Tomebamba.

Fuente: Elaboración propia

5.1 Selecciones de escenarios climáticos.

Para poder realizar la evaluación de los impactos del cambio climático en la subcuenca del río Tomebamba se requiere disponer de datos base, es decir,

UCUENCA

escenarios históricos y escenarios climáticos regionales futuros para poder realizar la estimación de los impactos según los escenarios de emisión RCP 4.5 Y RCP8.5.

La información histórica ha sido recopilada de la base de datos de ETAPA e INHAMI, a partir de las cuales se cons precitaciones y temperatura mensuales e históricas de 1998 a 2014. También, se solicitó datos del Ministerio del Ambiente pertenecientes a la Tercera Comunicación de Cambio Climático del Ecuador, donde se obtuvo las proyecciones de precipitación y temperatura del modelo climático regional ENSAMBLE para los escenarios RCP 4.5 Y RCP 8.5.

El modelo climático regional tiene la data de salida en formato netCDF (Network Common Data Form), es un archivo estándar para el intercambio de datos científicos en arreglos como al conjunto de software de código abierto que permite la creación y el acceso a información. Se utilizó el software Rstudio para la extracción de esta data.

5.2 Obtención de los modelos climáticos futuros

Con el objetivo de conocer el efecto del cambio climático en la subcuenca del río Tomebamba, se requirió caracterizar la hidrología y las demandas esperadas en los escenarios propuestos, con el fin de analizarlas mediante el modelo de gestión WEAP.

Se obtuvo los datos del Ministerio del Ambiente de la Tercera Comunicación de Cambio Climático del Ecuador de los dos escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5 para cada una de las coordenadas de las estaciones meteorológicas empleadas en el estudio. Hay que tomar en cuenta que el periodo de estudio se realizó hasta el año 2050.

5.3 Modelo de gestión de recursos hídricos

Para llevar a cabo la modelación de los recursos hídricos se empleó el método de humedad del suelo, debido a que es más efectivo y por ello se requiere de mayor información de la subcuenca. La simulación se ejecuta a nivel mensual-anual y se reproduce a escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema (Escriva-Bou, 2012).

5.3.1 Escurrimiento de lluvia (método de la humedad del suelo)

El método de humedad del suelo es un modelo de dos tanques para representar la hidrológica de la subcuenca en estudio. En el tanque superior existe un balance entre la evapotranspiración, la escorrentía, el interflújo al tanque inferior y los cambios de humedad del suelo (González & Hernández, 2020). Para una cuenca subdividida en varias subcuencas con diferente uso fraccional de la tierra o áreas de tipo de suelo, la fórmula matemática para calcular el cambio de almacenamiento en las primeras capas

UCUENCA

de tierra se expresa en términos de balance hídrico (Fig3) (Ahmadaali et al., 2018), de la siguiente manera:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Ecuación 2. Balance hídrico para el cálculo del cambio de almacenamiento en las primeras capas de la tierra.

Siendo $z_{1,j}$ es el almacenamiento relativo de agua del suelo, una fracción del almacenamiento de agua efectivo total en la capa de la zona de la raíz en el área j (adimensional); Rd_j es la capacidad de retención de agua del suelo del área j (mm); P_e es la precipitación efectiva (mm); $PET(t)$ es la evapotranspiración potencial de referencia (mm/día, la evapotranspiración potencial se obtiene utilizando una formulación de Penman-Monteith); K_c, j es el coeficiente de cultivo para el área j; y RRF_j es el factor de resistencia a la escorrentía de la cobertura terrestre. Valores más altos de RRF_j conducen a una menor escorrentía superficial. $P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j}$ es la escorrentía superficial; $f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$ es el interflujo de la primera capa de suelo para el área j; f_j es el coeficiente de participación relacionado con el tipo de cobertura terrestre, el suelo y la tipografía del área j, que divide el flujo en flujos horizontales f_j y verticales $(1-f_j)$; y $K_{s,j}$ es la conductividad hidráulica saturada de la capa de la zona de la raíz para el área j (mm/tiempo)(Ahmadaali et al., 2018).

A continuación en la figura 8 se representa gráficamente el balance hídrico entre las dos capas del suelo por lo que se le denomina método de los dos baldes. Cada balde es un subsistema del esquema, ya que cada uno presenta sus entradas y salidas definidas.

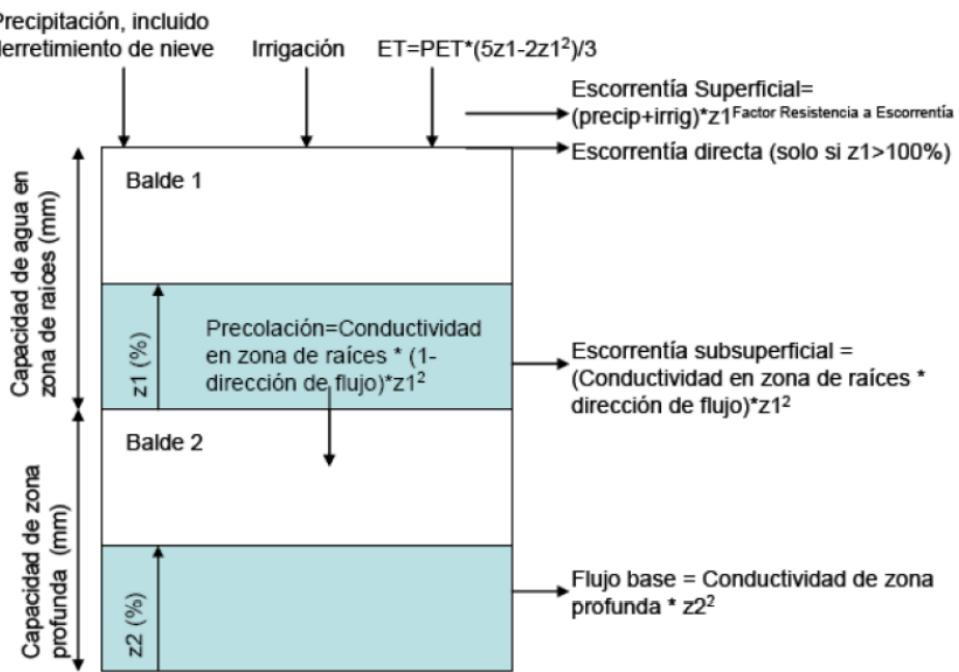


Figura 8. Diagrama conceptual y ecuaciones incorporadas en el método de humedad del suelo.

Fuente: Ahmadaali et al., 2018.

El cambio de almacenamiento en la segunda capa (dz_2 / dt) se calcula mediante:

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2$$

Ecuación 3. Balance hídrico del cambio de almacenamiento en la segunda capa de la tierra.

Donde S_{max} es la percolación profunda del almacenamiento de la capa superior; k_{s2} es la conductividad hidráulica saturada del almacenamiento inferior (mm/tiempo)(Ahmadaali et al., 2018).

5.4 Análisis de la situación futura

El modelo WEAP es muy manejable, ya que nos permite obtener información simulada, del caudal de demandas satisfechas o insatisfechas y otra información de la cuenca en estudio.

5.5 Análisis hidroeconómico

Después de haber obtenido los resultados del modelo de simulación de la gestión de los recursos hídricos (WEAP) para cada uno de los escenarios planteados, se debe realizar el análisis hidroeconómico.

Inicialmente, se debe caracterizar los diferentes usos de agua que influyan en la economía del recurso hídrico, para este caso, el análisis hidroeconómico de la cuenca en estudio se tomó en cuenta las Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) y juntas de agua de riego, ya que ellas son las más representativas de la economía del recurso hídrico.

La aplicación de las funciones económicas o curvas de demanda para el empleo de agua es una tarea muy compleja, ya que debe existir precisión en la creación de las curvas de demanda, con la finalidad de obtener resultados fiables (Fig. 4). La curva de demanda facilita el beneficio para el volumen de agua disponible, equivale al área bajo la curva hasta el nivel de suministro, dando como resultado el valor total a pagar por la cantidad de recurso otorgado. Al integrar el agua disponible hasta el nivel de suministro máximo, obtiene como resultado la expresión del coste económico de escasez versus el nivel de suministro (Escriva-Bou, 2012).

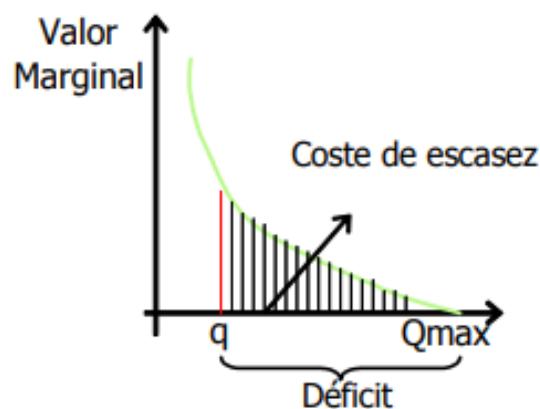


Figura 9. Función económica de demanda y déficit.

Fuente: Escriva-Bou, 2012.

6. Modelación hidrológica con WEAP

6.1 Datos generales

- Período de simulación

En la tabla 9 se puede observar los datos ingresados en WEAP para la creación de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Tener en cuenta que el año de cuenta corriente se elige para servir como año base para el modelo, se introduce toda la información del

UCUENCA

sistema (demanda y suministro). Los escenarios se construyen a partir de las cuentas corrientes. Los escenarios exploran posibles cambios en el sistema de los próximos años posteriores al año de la Cuenta Corriente. Hay un escenario de referencia que sirve como escenario estándar para utilizar la información de la Cuenta Corriente en los años restantes del proyecto y permite comparaciones con otros escenarios que muestran cambios en los datos del sistema.

Tabla 9. Períodos de simulación

Tipo	Cálculo	Periodo	Número de años
Periodo de modelación	Total	1998 – 2014	17
Año base	Cuentas corrientes	1998	1
Calibración	4/5 del total, fuera de cuentas corrientes	1999-2010	12
Año base	Cuentas corrientes	2011	1
Tipo	Cálculo	Periodo	Número de años
Validación	1/5 de total, fuera de cuentas corrientes	2012-2014	3
Año base	Cuentas corrientes	2014	1
Futuro	Horizonte definido	2015 – 2050	36

Fuente: Elaboración propia

- Paso de tiempo: mensual-anual

6.2 Recopilación y preparación de los datos

6.2.1 Información Hidrometeorológica

Se realizó una recopilación de información disponible de las empresas: INAMHI y ETAPA EP las cuales cuentan con datos de estaciones hidrometeorológicas e hidrológicas. Los registros que se ocupan en este estudio son los siguientes:

UCUENCA

- Precipitación mensual desde el año 1998 a 2014.
- Temperatura media mensual desde el año 1998 a 2014.
- Caudal medio mensual desde el año 1998 a 2014.

Esta información es una de las más importantes requeridas para la modelación de la subcuenca del río Tomebamba, ya que es la información climática base ingresada en los catchments o unidades hidrológicas que definen el periodo de simulación.

La información base son registros mensuales anuales de precipitación obtenidos por las empresas INAMHI y ETAPA EP, consta de 6 estaciones meteorológicas: Ucubamba, Matadero de Sayausí, Chirimachay, Quinuas, Surucucho y Toreadora, las cuales se encuentran dentro de la subcuenca en estudio.

De igual forma, la información mensual-anual de la temperatura consta de 6 estaciones meteorológicas: Ucubamba (UCU), Matadero de Sayausí (MAS), Toreadora (TOR), y Quinuas (QUI). Estas estaciones se encuentran dentro de la subcuenca de estudio a excepción de labrado que se encuentra a sus alrededores.

Por último, la información mensual-anual acerca del caudal consta de 2 estaciones hidrológicas: Matadero de Sayausí y Surucucho. Todas estas estaciones pertenecen a la subcuenca en estudio.

Cabe señalar que el sistema de coordenadas que se utilizó en el estudio es el sistema de coordenadas universal transversal de Mecator (UTM), se utiliza para refenciar cualquier punto en la superficie terrestre, utilizando para ello un tipo de proyección cilíndrica para representar la tierra sobre el plano.

El resumen de las estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas en el estudio, se detallará en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen de las estaciones que son usadas en el estudio.

Código	Estación	X_UTM	Y_UTM	Elevación	Variables
TOR	Toreadora	697351.05	9692591.64	3955	Pr tas
SUR	Surucucho	709379	9685883	2800	Pr
QUI	Quinuas	699536	9692436	3795	Pr tas
PIC	Piscícola de Chirimachay	705703	9688895	3298	Pr

UCUENCA

Código	Estación	X_UTM	Y_UTM	Elevación	Variables
LLA	Llaviucu	705966	9685615	3150	Tas
MAS	Matadero de Sayausí	714618	9681633	2780	Pr tas
UCU	Ucubamba	728342.01	9681529.58	2422	Tas pr

Fuente: Elaboración propia

Las siete estaciones seleccionadas se han tomado en cuenta debido a la cantidad de datos que poseen, siendo de 16 años, con un periodo de información de 1998 – 2014. Con respecto ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas se muestran en la figura 10.

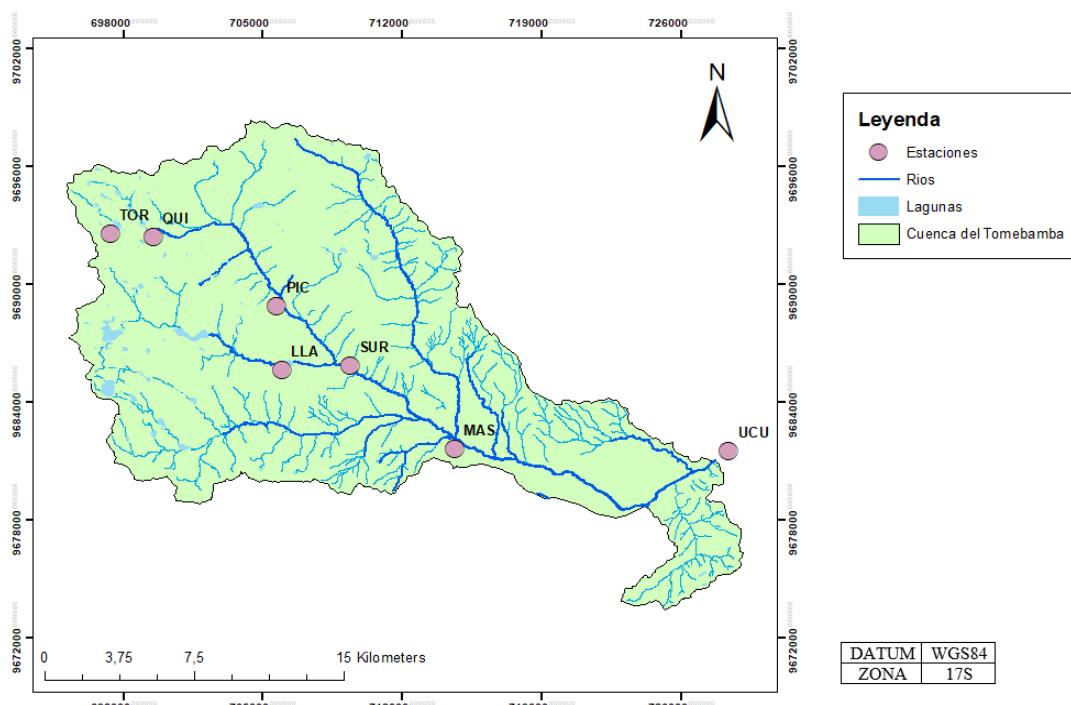


Figura 10. Ubicación de las estaciones utilizadas en el estudio dentro y fuera de la subcuenca Tomebamba.

Elaboración propia

6.2.1.1 Series de precipitación

La representación de la precipitación del área de estudio se realizó por medio de isoyetas (Figura 11), empleando información de las seis estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente. Las series de tiempo de precipitación se obtuvieron por medio de la interpolación IDW (distancia inversa ponderada), describiendo la variabilidad espacial con la variabilidad de su precipitación anual normal. Las series de precipitación mensual-anual observadas pertenecen al periodo 1998 a 2014.

UCUENCA

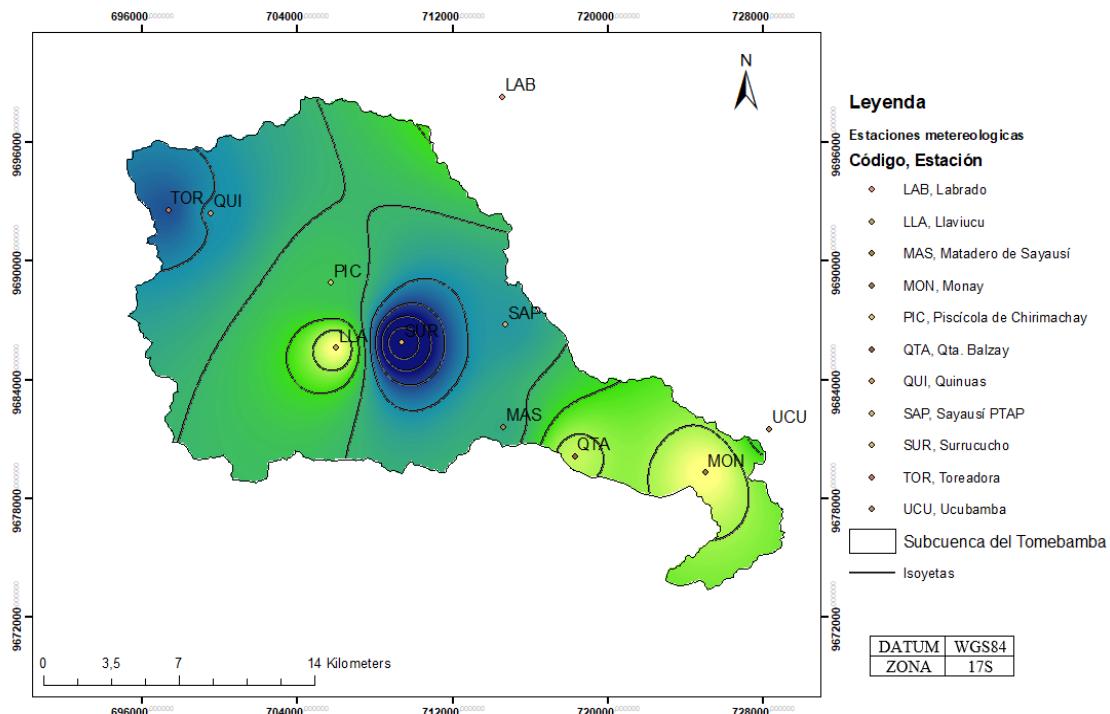


Figura 11. Mapa de Isoyetas de la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.2 Series de temperatura

El proceso para la elaboración de las isotermas fue la misma que se aplicó para la obtención de las isoyetas, se hizo una interpolación IDW para crear el mapa de la isoterma según la información observada, empleando información de las seis estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente. Las series de precipitación mensual-anual observadas pertenecen al periodo 1998 a 2014 (Fig. 12).

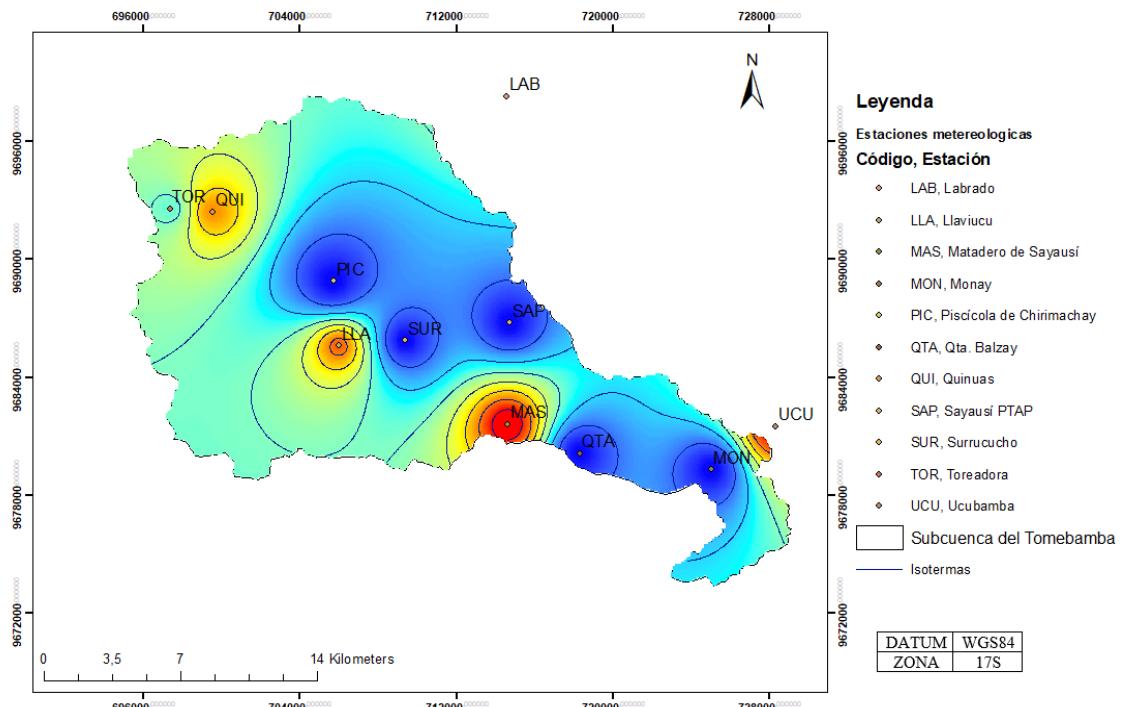


Figura 12. Mapa de Isotermas de la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.3 Caudales

Los caudales mensuales anuales fueron obtenidos de dos estaciones hidrológicas: Matadero de Sayausí y Surucucho; con un periodo de 1998 – 2014. En la figura 13. Se puede observar cada una de las estaciones dentro de la subcuenca en estudio.

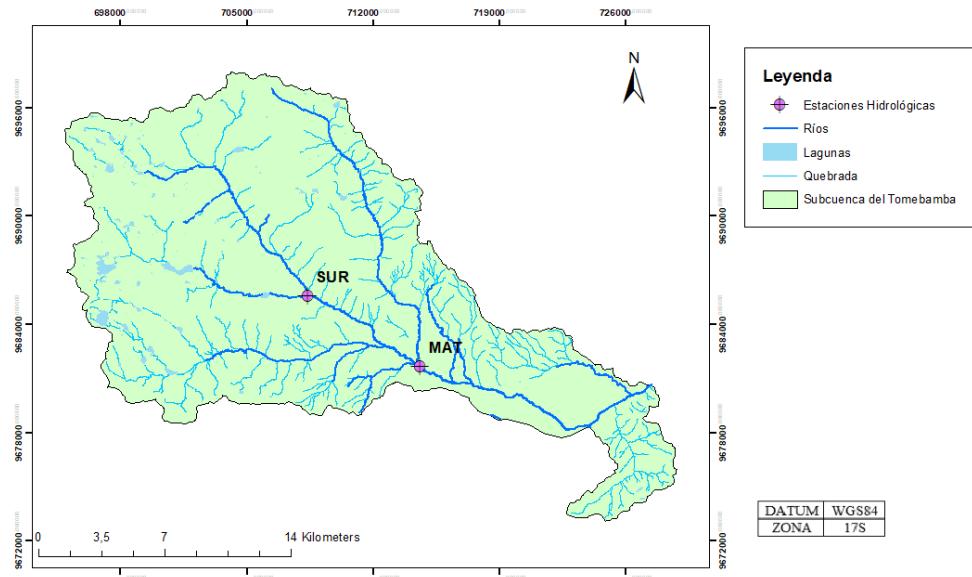


Figura 13. Estaciones hidrológicas de la cuenca del Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Información tipo Shape

La información tipo shape se encuentra georreferenciada en el sistema de coordenadas geográficas GCS_WGS_1984; Datum: D_WGS_1984. La información utilizada fue la siguiente:

- Límite de la subcuenca del Tomebamba
- Ríos
- Lagunas
- Ubicaciones de las estaciones hidrológicas y meteorológicas
- Ubicaciones de las captaciones para juntas de agua de riego
- Ubicaciones de las captaciones para las PTAP

6.3 Desarrollo del modelo

6.3.1 Construcción del esquema

En la etapa del desarrollo del modelo se desea representar la subcuenca tomando como base los datos históricos; para ello, se rellena el modelo con una gran cantidad de información acerca de la oferta de agua, demanda de agua y otra información requerida. En la figura 14 se observa el esquema desarrollado para la modelación de la subcuenca del Tomebamba, utilizando de los siguientes elementos:

- Uso de archivos shape
- Ríos y canales
- Medidor de caudal
- Sitios de demanda
- Unidades hidrológicas (U.H.)
- Otros

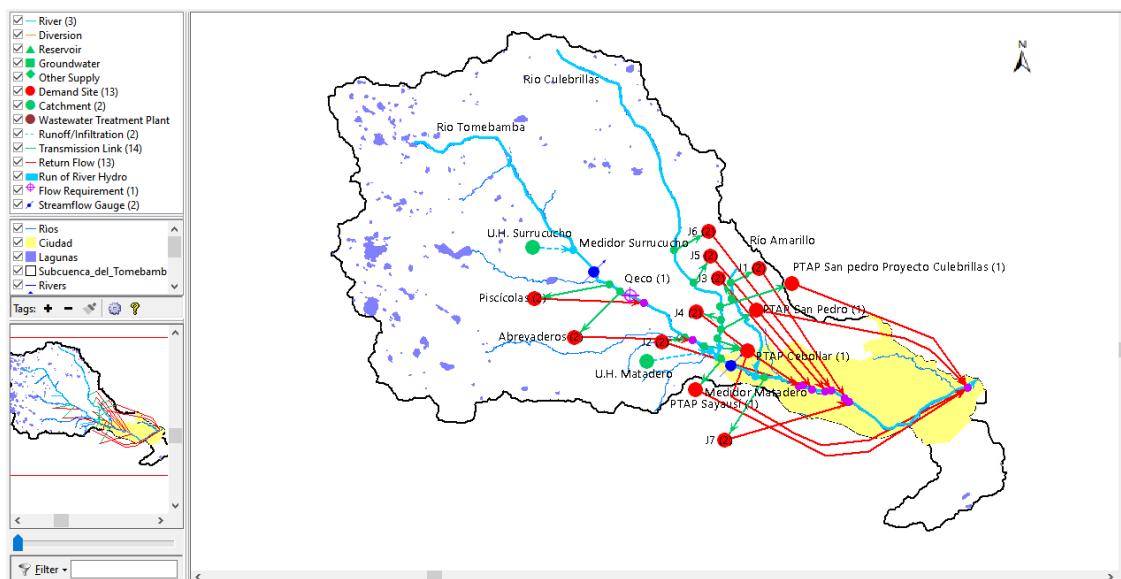


Figura 14. Esquema de la subcuenca del río Tomebamba

Fuente: Elaboración propia

6.3.1.1 Unidades hidrológicas

Se creó dos unidades hidrológicas pertenecientes a cuenca a modelar: Surucucho y Matadero de Sayausí (ver Fig. 14). Se ingresó la información de uso de suelo y clima correspondiente al área que relaciona cada uno de ellas.

6.3.1.1.1 Clima y caudal

La información de clima y caudal se ingresó de las estaciones cercanas a la zona para cada una de las unidades hidrológicas. Como se explicó anteriormente, el clima relaciona varias variables como: precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, presentando un periodo mensual-anual para todos los escenarios modelados.

6.3.1.1.2 Uso de suelo

Para cada unidad hidrológica se calculó el porcentaje de área de uso de suelo (tabla 11), dicha información se obtuvo de los shape de uso de suelo dispuestos por los archivos de información geográfica dispuestos por el Sistema Nacional de Información del año 2000, para la variación de cobertura del suelo se va calculando de acuerdo a la información dispuesta en la 5.5.3.1.

El coeficiente de cultivo (K_c) se obtuvo de los valores de referencia del estudio de riego y drenaje dispuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el K_c fue tomado como un valor constante para toda la simulación debido a la inexistencia de estudios que nos permita cambiar el K_c a través del tiempo(tabla 11).

Tabla 11. Porcentaje de uso de suelo y Kc por cada unidad hidrológica.

Uso de suelo	Porcentaje de área de la cuenca Tomebamba		Kc
	Surucucho	Sayausí	
Áreas degradadas	3,49	3,49	0,3
Bosque	20,36	21,36	0,90
Cultivos mixtos	19,82	19,81	0,85
Humedales	2,44	2,43	0,90
Lagunas	0,14	0,14	1,1
Páramo	31,57	31,57	0,50
Pasto	17,09	17,09	0,70
Zonas urbanas	7,08	4,08	0,2

Fuente: FAO56, 2006.

6.3.1.2 Demanda actual

La ley orgánica de recursos hídricos usos y aprovechamiento de agua según el art. 94, designa el orden de prioridad para las actividades productivas, aplicando el siguiente orden:

1. Agua para consumo humano;
2. Riego para la producción agropecuaria, agricultura y agro industria de exportación;
3. Actividades turísticas;
4. Generación de hidroelectricidad y energía hidrotérmica;
5. Proyectos de sectores estratégicos e industriales;
6. Otras actividades productivas.

De igual manera, para priorizar las actividades productivas en el modelo WEAP se baso en varios estudios realizados a nivel mundial y nacional; por mencionar algunos los proyectos realizados en la cuenca del Machangará por Parra (2015) y Galán (2019) priorizan el agua portable seguido de la producción agrícola y ganadera, al igual que Admin (2018) en la cuenca del río Alto Indo en Pakistán designa la misma prioridad.

En el modelo WEAP es posible priorizar la repartición de agua según las prioridades de la demanda, se ha designado los siguientes valores:

UCUENCA

- Planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se ha designado el valor de prioridad de 1, debido a gran importancia de dotación continua de agua potable para la población.
- Juntas de sistema de riego, piscícolas y abrevaderos se designó el valor de prioridad de 2, debido ya que el requerimiento de agua no es continuo y varía según precipitación de la zona.

6.3.1.2.1 Plantas de tratamiento de agua potable

En la sección 5.4.3 se detalla el consumo de agua. A continuación, en las tablas 12,13,14,15 y 16 se puede apreciar la capacidad de dotación a través del tiempo que posee cada una de las plantas de tratamiento de agua potable dispuestas en la cuenca en estudio.

Planta de tratamiento del Cebollar

Su última ampliación y mejoras fue en 1993 con una capacidad de 1200 l/s, pero en la actualizada el caudal utilizado es de 950 l/s (tabla 12), esta planta es de tipo convencional.

- Captación del río Tomebamba

La captación tiene una capacidad de 800 l/s, se ubica en el margen izquierdo del río a 1800 m agua arriba de la confluencia con el río Culebrillas (Piedra, 2017).

- Captación del río Culebrillas

Se ubica en el río Culebrillas a 3.5 km agua arriba de la confluencia del río Tomebamba, tiene una capacidad de 427 l/s (Piedra, 2017).

Tabla 12. Capacidad de dotación de la PTAP Cebollar

Capacidad de dotación de la PTAP Cebollar	
950	l/s
Consumo por habitante	
194,27	l / habitante / día
Población abastecida	204326 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

Planta de tratamiento Sayausí

UCUENCA

La planta de tratamiento de Sayausí se creó en el año 2000, es de tipo convencional, la captación se encuentra en el río Tomebamba. En la tabla 13 se observa la capacidad de dotación de la PTAP de Sayausí.

Tabla 13. Capacidad de dotación de la PTAP Sayausí

Capacidad de dotación de la PTAP Sayausí	
15	l/s
Consumo por habitante	
194,27	L / habitante / día
Población abastecida	3200 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

Planta de tratamiento San Pedro

La planta de tratamiento de San Pedro está situada en la zona de Racar, es de tipo convencional, abastece de agua a la zona noroccidente de la ciudad de cuenca. La planta se encuentra conformada por 3 plantas de tratamiento: la primera planta se construyó en 1996 con una capacidad de 30 l/s de tipo convencional, la segunda planta es metálica prefabricada construida en el 2009 con una capacidad de 15 l/s, finalmente la tercera planta es metálica prefabricada con una capacidad de 150 l/s construida en 2014 y 2015 (Piedra, 2017).

Actualmente, su producción es de 100.000 m³ por mes dotando de agua potable alrededor de 25000 habitantes. En las tablas 14, 15 y 16 se puede observar la dotación de agua al pasar de los años.

Tabla 14. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 1996

Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro	
30	l/s
Consumo por habitante	
194,27	L / habitante / día
Población abastecida	6450 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

Tabla 15. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 2009

Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro
--

UCUENCA

45	I/s
Consumo por habitante	
194,27	L / habitante / día
Población abastecida	96786 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

Tabla 16. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro en 2015

Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro	
114,15	I/s
Consumo por habitante	
194,27	L / habitante / día
Población abastecida	25000 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

Planta de tratamiento San Pedro – Proyecto Culebrillas (en construcción)

La planta de tratamiento abastece de agua a las poblaciones del noroccidente de la ciudad de Cuenca, situada en la zona de Racar. Está compuesta con un módulo de DAFFI, tiene una producción de 300000 m³ por mes dotando de agua a 25000 personas con una proyección de 50000 personas (ETAPA EP, 2021). Su capacidad de dotación se puede observar en la tabla 17.

Tabla 17. Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro – Proyecto Culebrillas

Capacidad de dotación de la PTAP San Pedro – Proyecto Culebrillas	
114.15	I/s
Consumo por habitante	
194,27	I / habitante / día
Población abastecida	25000 habitantes
Tasa Anual de uso del agua	70.81 m ³ / habitante

Fuente: Piedra, 2017.

6.3.1.2.1.1 Eficiencia en la distribución de Agua Potable

Según la Secretaría del agua, (2016) las pérdidas de las dotaciones de agua potable se basan en el documento “Criterios y parámetros de diseño de los sistemas de agua potable y alcantarillado”, creados en la Segunda Fase de los Planes Maestros de la

UCUENCA

ciudad de Cuenca, indica que las pérdidas en la distribución pueden llegar hasta el 25%.

6.3.1.2.2 Agua de riego

El agua de riego tiene muchas funcionalidades en la cuenca de Tomebamba con mayor énfasis en la parroquia de Sayausí, una gran población usa el agua para consumo humano y otra parte la utiliza para riego e industria. La información de los sistemas de agua de riego se obtuvo a partir de distintas entrevistas realizadas al GAD parroquial de Sayausí, GAD parroquial de San Joaquín y a distintos usuarios de cada una de las juntas de agua de riego con la finalidad de obtener el costo del servicio (tabla 18).

Tabla 18. Juntas de agua presentes en la cuenca del Tomebamba y su capacidad de dotación.

Junta de agua de riego		Número de usuarios	Comunidades servidas	Hectáreas regadas (ha)	Capacidad de dotación (l/s)	Tasa anual de uso del agua (m^3/ha)
Cabogana	J1	1200	San Miguel, La Libertad y Buenos Aires.	670	105	4942,21
Minas – San Vicente	J2	170	San Vicente, Corazón de Jesús, Ramales	95	15	4979.36
Dudahuyco	J3	200	La Hermita, Ingapirca	112	18	5068,28
Chulag Yacu	J4	76	Bellavista alto	42	8	6006,86
Sayausí – Bellavista	J5	450	Bellavista, San Vicente, Sayausí	250	40	5045,76

UCUENCA

Junta de agua de riego		Número de usuarios	Comunidades servidas	Hectáreas regadas (ha)	Capacidad de dotación (l/s)	Tasa anual de uso del agua (m^3/ha)
Sistema de riego Minas	J6	71	Bellavista	40	6	4730,4
Sistema de riego Las Rosas	J7	600	San Joaquín	350	100	9010,31

Fuente: GAD Sayausí, 2015; GAD San Joaquín, 2015.

6.3.1.2.2.1 Eficiencia del sistema de riego

La eficiencia de riego ha sido calculada según el procedimiento indicado en la sección 4.4. La información de la conducción, distribución y aplicación del sistema de riego ha sido brindada por el GAD parroquia de Sayausí y el GAD parroquial de San Joaquín (ver tabla 19).

Tabla 19. *Eficiencia de riego en el periodo 1998 – 2014*

Periodo	Disyunción de los componentes de Eficiencia de riego (Efr)	Medio de utilidad	Eficiencia	Eficiencia de riego (Efr)	Perdida del sistema
1998 - 2014	Eficiencia de conducción (Efc)	Tubería Revestido	0.9	0,50	0,50
	Eficiencia de distribución (Efd)	Tubería	1		
	Eficiencia de aplicación (Efa)	Tradicional - bordes – CN	0,55		

Fuente: (MAGAP, 2014)

6.3.1.2.3 Variación en la capacidad de dotación tanto para el agua potable como para el agua de riego.

La dotación de agua potable cambia mes a mes de acuerdo con la variación climática mensual, la variación es calculada automáticamente por WEAP; en el modelo WEAP

UCUENCA

se deja con su valor determinado cero, provocando que calcule el porcentaje de agua diarias y mensual.

La variación del uso de agua de riego esde acuerdo a la precipitación de la zona, cuando existe una mayor precipitación menor será el consumo de agua, por ende, cuando menor sea la precipitación mayor será el consumo de agua. En la tabla 20 se puede observar la variación del consumo de agua de riego, según los meses observados (1998-2014).

Tabla 20. Variación mensual del consumo de agua de riego en función a la precipitación.

Mes	Estaciones Meteorológicas (1998 - 2014)			Suma (mm/mes)	Porcentaje (%)	Análisis		Variación mensual del consumo (%)
	Surucucho	Matadero	Monay			Precipitación	Consumo	
ENE	127,76	80,67	66,49	147,16	7,33	Media	Media	10,2
FEB	146,11	109,18	95,50	204,68	10,20	Alta	Baja	7,33
MAR	194,63	127,86	138,82	266,69	13,28	Alta	Baja	3,98
ABR	191,38	151,04	120,27	271,30	13,51	Alta	Baja	3,2
MAY	146,04	116,84	89,26	206,10	10,27	Alta	Baja	6,33
JUN	118,95	72,56	54,44	127,00	6,33	Baja	Alta	10,27
JUL	82,83	43,25	36,57	79,83	3,98	Baja	Alta	13,28
AGO	54,90	36,61	27,70	64,31	3,20	Baja	Alta	13,51
SEP	63,93	59,86	45,87	105,73	5,27	Baja	Alta	10,31
OCT	98,39	85,38	72,37	157,75	7,86	Media	Media	8,46
NOV	96,68	88,59	81,33	169,93	8,46	Media	Media	7,33
DIC	103,63	108,91	98,08	206,98	10,31	Alta	Baja	5,27
			TOTAL	2007,48	100			

Fuente: Elaboración propia.

6.3.1.2.4 Piscícolas

Por último, el consumo de agua de las piscícolas abarca el mayor número de concesiones con un 83% del caudal concedido, representando un caudal total de 196 l/s (Avilés, 2011). En la tabla 21 se detallan el número de vertientes y su aprovechamiento.

Tabla 21. Uso de agua destinado a las piscícolas pertenecientes al río Tomebamba.

Nombre del Aprovechamiento	Piscinas	Caudal (l/s)
Laguna de Llaviucu	-	0.60
Río Tomebamba y quebrada Verde Cocha	6	100
Quebrada Gallo Canta	5	70
Vertiente Avilahuayco	4	2
Vertiente Tarquihurco	8	4
Vertientes y lagunas: Patococha Chico, Patococha Grande, Barrancos y Verdecocha	5	17,50
Río Quinoas	1	0.60
Vertiente Cucheros	11	9,40

Fuente: Avilés, 2011.

6.3.1.2.5 Abrevaderos para ganado

El caudal que utiliza el uso de abrevaderos de ganado no es muy representativo, ya que consume un caudal de 1,26 l/s (Avilés, 2011).

6.4 Información económica

6.4.1 Plantas de tratamiento de agua potable

Según ETAPA EP (2021), el costo de agua potable en la ciudad de Cuenca se ha ido incrementando según el paso de tiempo (tabla 22).

Tabla 22. Valor del agua potable en diferente periodo de tiempo

Año	Valor (USD/m³)
2003	0,23
2015	0,35
2021	0,41

Fuente: Ordóñez, 2004; ETAPA EP, 2021.

UCUENCA

6.4.2 Juntas de agua de riego

Para conocer el valor a pagar por el servicio de agua de riego se ha realizado una entrevista con los miembros de las distintas juntas de agua de riego, el pago se realiza anualmente y el precio varía según la junta de agua en estudio (ver tabla 23).

Tabla 23. Costo de la dotación de agua de riego según la junta de agua.

Junta de agua de riego		Número de usuarios	Capacidad de dotación (l/s)	Pago por consumo anual (\$/usuario)
Cabogana	J1	1200	105	24
Minas – San Vicente	J2	170	15	20
Dudahuyco	J3	200	18	18
Chulag Yacu	J4	76	8	12
Sayausí – Bellavista	J5	450	40	22
Sistema de riego Minas	J6	71	6	15
Sistema de riego Las Rosas	J7	600	100	20

Fuente: Elaboración propia

6.5 Calibración

La calibración del modelo es un proceso que identificamos los valores de los parámetros del modelo (en este caso valores de uso de suelo), obteniendo una serie de datos simulados que mayor ajuste tenga con los datos históricamente observados (caudales); cuya finalidad es obtener un modelo confiable para la proyección futura de la cuenca del Tomebamba en diferentes escenarios climáticos.

6.5.1 Tiempo de calibración

El tiempo de calibración designado de nuestra base de datos es desde el año 1999 hasta el 2010, corresponde a 12 años de calibración más un año de cuentas corrientes (1998).

6.5.2 Método de calibración

Para poder calibrar se escogió el método automático PEST Calibration, pertenece a un complemento avanzado del software WEAP y particularmente es muy útil al usar en el método de humedad del suelo de hidrología de cuencas. En la siguiente imagen se puede observar la herramienta PEST Calibration (Fig. 15).

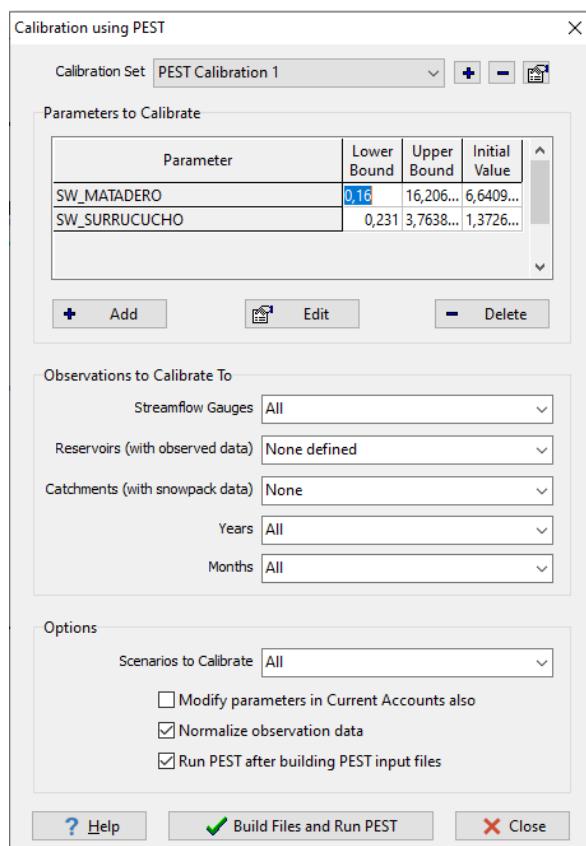


Figura 15. Ventana de la herramienta PEST Calibration

Fuente: Sofware WEAP

Los límites ingresados en los parámetros de suelo (edafológicas y geográficas) se han obtenido de estudios de la cuenca a modelar y diferentes cuencas cercanas a ella, como es el caso de la subcuenca de río Machángara. Los valores son diferentes para las dos unidades hidrológicas debido a las características del suelo presentes en cada una de ellas (tabla 24).

UCUENCA

Tabla 24. Valores de parámetros de uso de suelo usados en la calibración

Parámetros	Rango (WEAP)	Uso de suelo	Unidad hidrológica Surucucho	Unidad hidrológica Matadero de Sayusí
Sw	0 - >	Áreas degradadas	400	400
		Bosque	1500	500
		Cultivos mixtos	1500	340
		Humedales	400	300
		Lagunas	1200	600
		Páramo	1800	650
		Pasto	350	390
		Zonas urbanas	700	400
Dw	0 - 20000	No influye	9450	18000
RRF	0 – 1000	Áreas degradadas	7	3
		Bosque	10	5
		Cultivos mixtos	10	2
		Humedales	5	1
		Lagunas	9	0.5
		Páramo	12	6
		Pasto	7	2
		Zonas urbanas	8	2
Ks	0 – 350	Áreas degradadas	130	150
		Bosque	90	150
		Cultivos mixtos	90	150
		Humedales	130	150
		Lagunas	130	150
		Páramo	90	300
		Pasto	100	150
		Zonas urbanas	100	150
Kd	0 – 100	No influye	24	78
F	0-1	Áreas degradadas	1	0,9
		Bosque	0,50	0,9
		Cultivos mixtos	0,25	0,85
		Humedales	0,80	0,85

Parámetros	Rango (WEAP)	Uso de suelo	Unidad hidrológica Surucucho	Unidad hidrológica Matadero de Sayusí
			Lagunas	0,20
F	0-1	Páramo	0,1	0,9
		Pasto	0,20	0,9
		Zonas urbanas	0,5	1

Fuente: Lema and Plaza, 2009; Palacios, 2017; CCGUCC and SEI, 2009.

6.6 Índices de bondad de ajuste

Para conocer la eficacia del modelo se usó índices de bondad de ajuste, en este caso: porcentaje de sesgo (PBIAS), Nash – Sutcliffe (normal y logarítmico) y correlación de Pearson (R²), la finalidad es evaluar el ajuste que tengan los caudales simulados con los caudales observados.

6.7 Validación

En la validación se analiza el comportamiento del modelo calibrado, el periodo de validación fue desde el año 2012 a 2014 teniendo en cuenta el año de cuentas corrientes (2011). Para conocer que tan eficiente es el modelo se analiza los índices de bondad de ajuste, al igual que en la calibración.

6.8 Creación de escenarios

En cada unidad hidrológica (Surucucho y Matadero de Sayausí) se creó dos escenarios del cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) para su proyección desde el año 2015 hasta el año 2050. Al momento de ingresar los datos a el modelo se modificó variables climáticas, uso de suelo y socioeconómicas indicadas a continuación.

6.8.1 Variables climáticas

Las variables climáticas se han obtenido del modelo climático regional ENSAMBLE, las variables que se ha podido descargar son: la precipitación y la temperatura de los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 (Fig. 16,17,18 y 19). Con respecto a las variables de velocidad del viento y humedad relativa se ha mantenido constantes a través del tiempo debido a la falta de acceso de estas variables.

En la U.H. Surucucho presenta una temperatura promedio de 8,89°C para el escenario RCP 4,5 y 8,88°C para el escenario RCP 8,5. También, exhibe una temperatura mínima promedio de 7,57°C para el escenario RCP 4,5 y 7,58°C para el escenario

UCUENCA

RCP 8,5, por último, muestra una temperatura máxima promedio de 10,36°C para el escenario RCP 4,5 y 9,90°C para el escenario RCP 8,5 (ver figura 16).

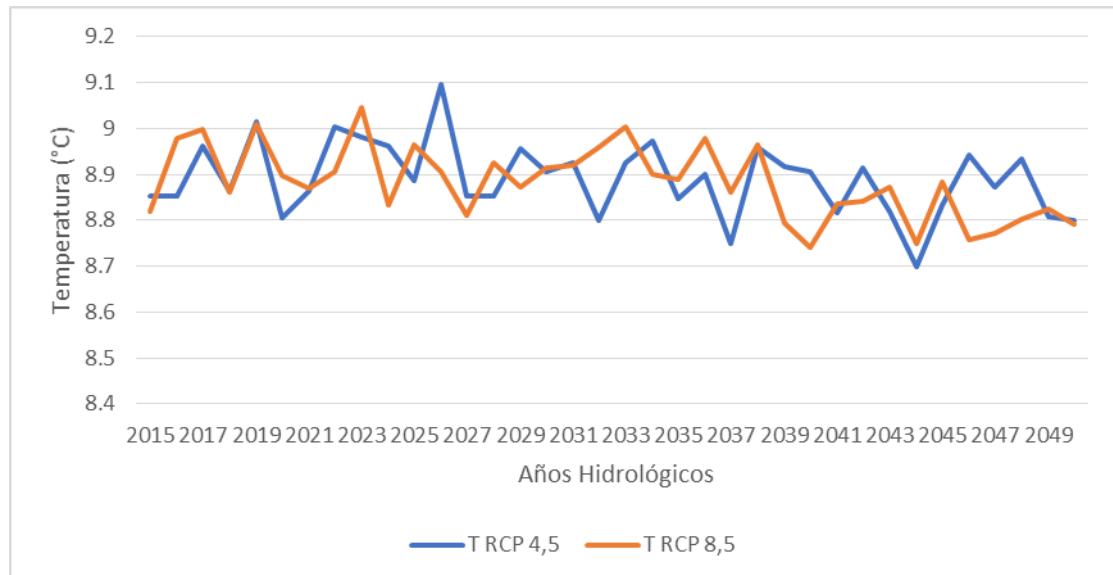
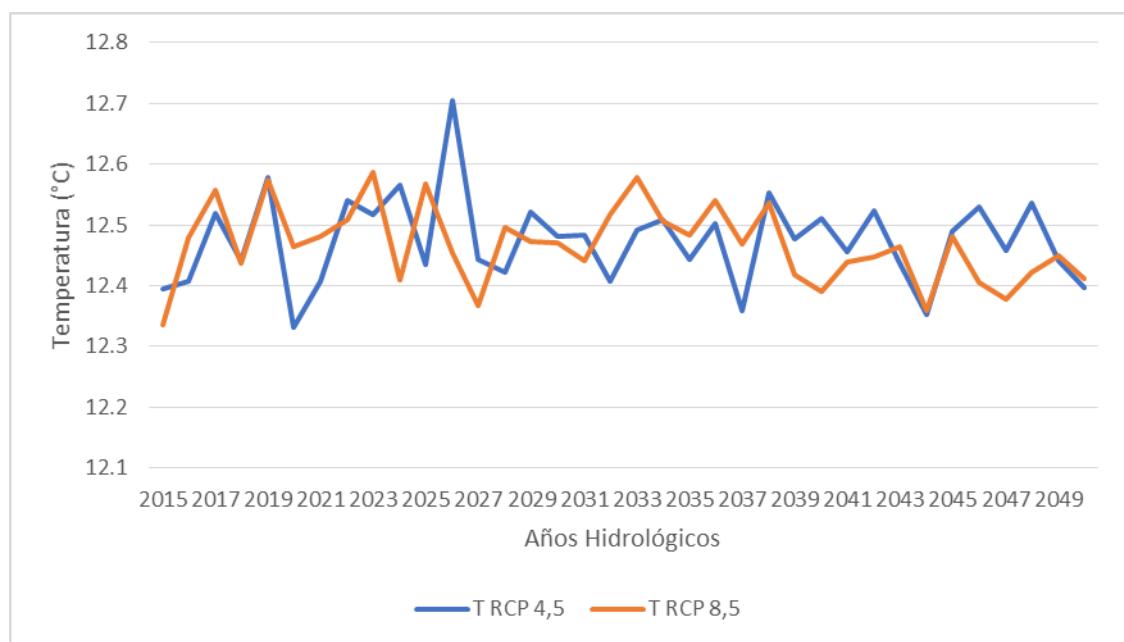


Figura 16. Simulación de la temperatura de la cuenca hidrográfica Surucucho en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

En la U.H. Matadero de Sayausí presenta una temperatura promedio de 12,47°C para el escenario RCP 4,5 y 12,47°C para el escenario RCP 8,5. También, exhibe una temperatura mínima promedio de 11,24°C para el escenario RCP 4,5 y 11,22°C para el escenario RCP 8,5, por último, muestra una temperatura máxima promedio de 13,91°C para el escenario RCP 4,5 y 13,45°C para el escenario RCP 8,5 (ver figura 17).



UCUENCA

Figura 17. Simulación de la temperatura de la cuenca hidrográfica Matadero de Sayausí en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

En la U.H. Surucucho presenta una precipitación promedio de 75,70 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 89,44 mm/mes para el escenario RCP 8,5. También, exhibe una precipitación mínima promedio de 0,91 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 29,77 mm/mes para el escenario RCP 8,5, por último, muestra una precipitación máxima promedio de 122,11 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 117,34 mm/mes para el escenario RCP 8,5 (ver figura 18).

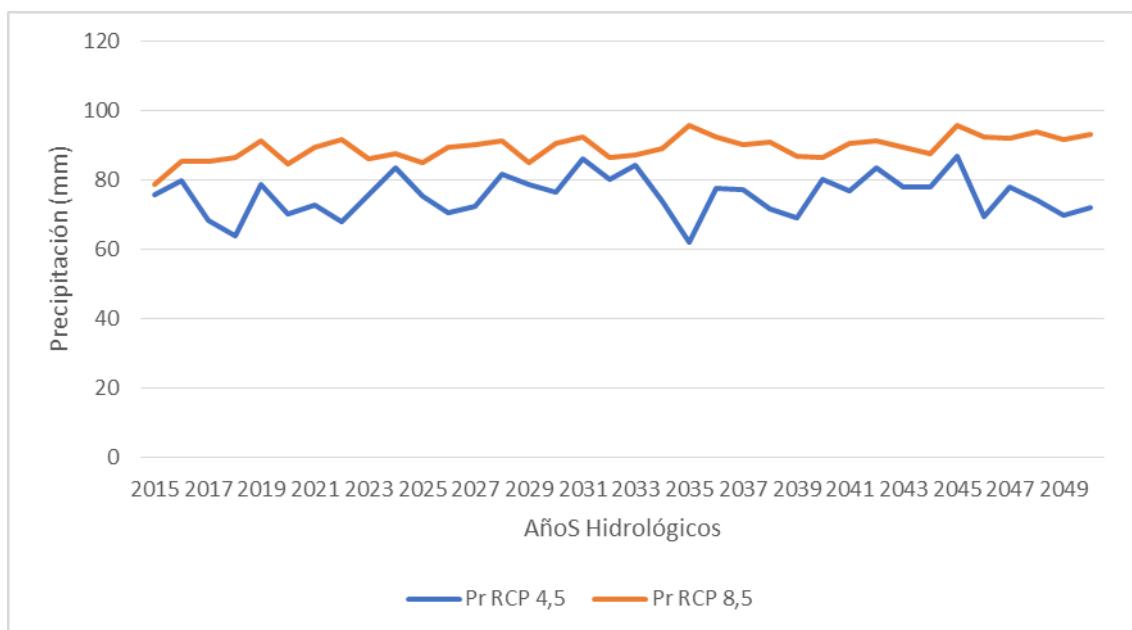


Figura 18. Simulación de la precipitación de la cuenca hidrográfica Surucucho en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

En la U.H. Matadero de Sayausí presenta una precipitación promedio de 76,06 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 70,82 mm/mes para el escenario RCP 8,5. También, exhibe una precipitación mínima promedio de 27,91 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 12,99 mm/mes para el escenario RCP 8,5, por último, muestra una precipitación máxima promedio de 138,72 mm/mes para el escenario RCP 4,5 y 131,02 mm/mes para el escenario RCP 8,5 (ver figura 19).

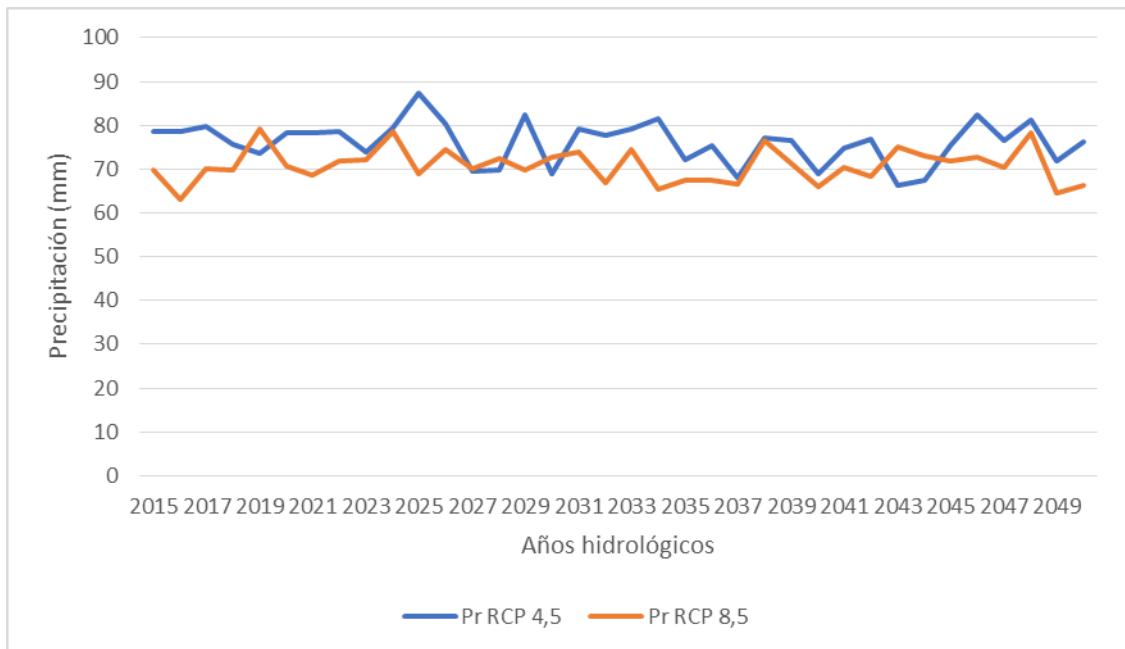


Figura 19. Simulación de la precipitación de la cuenca hidrográfica Matadero de Sayausí en dos escenarios climáticos RCP 4,5 Y RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

6.8.2 Crecimiento poblacional

Según Pacheco et al., (2019) indica la población en la subcuenca del Tomebamba varía según los años transcurridos, realizaron una estimación poblacional a partir de los años 1990, 2001, 2010 para el año 2050, los resultados se puede observar en figura10.

Para poder pronosticar la población de la subcuenca se basaron en la información del año 1990 con un crecimiento promedio anual de 3,10%, a comparación de la década siguiente (2001 a 2010) que posee un crecimiento anual de 1,93%, obteniendo como resultado una disminución del índice de crecimiento poblacional de 1,17 puntos porcentuales. Haciendo una relación lineal entre los dos datos poblacionales totales se tiene que en 11 años existe un crecimiento de un 38.24%, o sea una tasa de crecimiento anual de 3.48%. Este valor se utilizará para la proyección de la población de uso doméstico en la subcuenca para el año 2050. Es necesario indicar que la estimación no se encuentra sectorizada ni se ha tomado en cuenta cambio económicos y políticos (Pacheco et al., 2019).

Teniendo en cuenta la densidad poblacional y el crecimiento demográfico se puede proyectar el crecimiento poblacional y ubicarlo en el espacio, conocido como ordenamiento territorial (ver fig. 20) (Anane & Cobbinah, 2022).

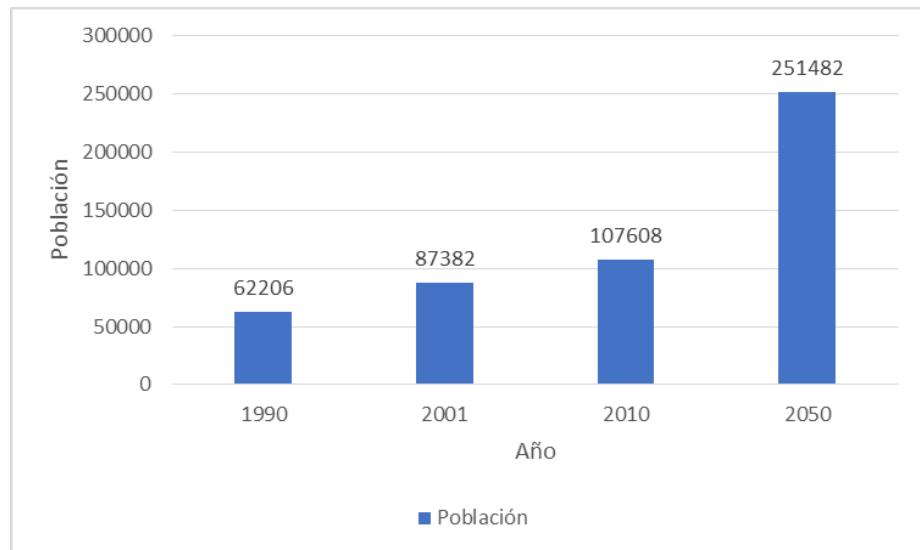


Figura 20. Crecimiento poblacional de la subcuenca Tomebamba al 2050.

Fuente: Pacheco et al., 2019.

6.8.3 Cambio en el uso del suelo

Pacheco et al., (2019) realizó una proyección en el cambio del uso del suelo de la subcuenca del río Tomebamba desde el año 2018 hasta 2050, se basó en tres escenarios: pesimista, óptimo y tendencial. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- El escenario pesimista no respeta la restricción como Parque Nacional Cajas, incrementa la variable de “senderos” generando muchas ramificaciones debido al constante desarrollo, obteniendo como consecuencia el cambio de la cobertura del suelo (Tabla 25) (Pacheco et al., 2019).

Tabla 25. Cambio de uso de suelo según el escenario pesimista.

Uso de suelo	2018 - 2028 (%)	2028 - 2038 (%)	2038 – 2050 (%)
Áreas degradadas	-12,88	-25,90	-25,85
Bosque	-4,40	-8,75	-11,89
Cultivos Mixtos	5,69	9,70	11,31
Humedales	-0,69	-1,22	-1,74
Lagunas	-1,39	-3,71	-6,02
Páramo	-0,69	-1,22	-1,74
Pasto	-6,13	-12,42	-18,36
Zonas urbanas	14,49	32,20	55,33

Fuente: Pacheco et al., 2019.

- El escenario óptimo respeta las restricciones como Parque Nacional Cajas y por ende establece actividades de protección por parte de la empresa ETAPA EP y estas actividades son cumplidas en su totalidad (Pacheco et al., 2019). El cambio del uso de suelo se observa en la tabla 26.

Tabla 26. Cambio de uso de suelo según el escenario óptimo.

Uso de suelo	2018 - 2028 (%)	2028 - 2038 (%)	2038 – 2050 (%)
Áreas degradadas	13,22	25,08	27,72
Bosque	0,99	1,17	0,08
Cultivos Mixtos	-3,42	-7,49	-8,89
Humedales	-0,69	-1,22	-1,74
Lagunas	-3,09	-5,97	-8,65
Páramo	-0,10	-0,19	-0,47
Pasto	-5,61	-12,28	-19,67
Zonas urbanas	23,69	51,58	75,64

Fuente: Pacheco et al., 2019.

- El escenario tendencial propone un mayor peso a las variables de población, actividades económicas y vías, teniendo en cuenta la posibilidad que sigan avanzando aun en la dificultad del terreno (Pacheco et al., 2019). La variación del uso de suelo se observa en la tabla 27.

Tabla 27. Cambio de uso de suelo según el escenario tendencial.

Uso de suelo	2018 – 2028 (%)	2028 – 2038 (%)	2038 – 2050 (%)
Áreas degradadas	-47,02	-54,99	-74,73
Bosque	-1,92	-2,43	-2,92
Cultivos Mixtos	-0,06	1,32	1,44
Humedales	-0,19	-0,82	-1,19
Lagunas	-3,16	-6,35	-9,30
Páramo	-0,19	-0,82	-1,19
Pasto	-6,47	-11,73	-16,78
Zonas urbanas	21,16	38,94	56,30

Fuente: Pacheco et al., 2019.

UCUENCA

Para el modelo de la subcuenca del Tomebamba se ha escogido el escenario óptimo para el escenario climático RCP 4,5 y el escenario tendencial para el escenario RCP 8,5.

6.8.4 Demanda futura

6.8.4.1 Plantas de tratamiento de agua potable

En Avilés (2011) se indica la demanda futura para uso doméstico, la misma que es obtenida en base a la tasa de crecimiento poblacional de la ciudad de Cuenca, parroquia San Joaquín y parroquia Sayausí, asumiendo que el consumo futuro es de 1m³/mes, es decir 194,27 l/hab*día tomando en consideración 5 habitantes por familia. En la tabla 28 se puede observar la demanda de agua futura. Cabe mencionar que las juntas de agua de riego se mantendrán constantes, puesto que no se conoce de la creación de nuevos proyectos.

Tabla 28. Dotación futura de agua en la subcuenca del río Tomebamba

USO	UNIDAD	CANTIDAD	DOTACIÓN
Doméstico	Habitantes	414862	173,72 l/hab*día
Abrevaderos	Semovientes	663	4,91 m ³ /semovientes*mes
Piscícolas	Piscinas	41	4,98 l/seg*piscina

Fuente: Avilés, 2011.

En el año 2050, se plantea que las plantas de tratamiento de agua potable estarán funcionando a su máxima capacidad debido al crecimiento poblacional (tabla 29).

Según el informe de viabilidad dispuesto por la Secretaría del agua, (2016) indica la planificación de diseño de la planta de tratamiento “El Cebollar” para el año 2040, proyecta dotar de agua potable a 263957 habitantes.

Tabla 29. Dotación máxima de las PTAP.

Plantas de tratamiento de agua potable	Dotación de agua potable (l/s)	Población abastecida (per cápita)
EL Cebollar	1200	263957
Sayausí	15	3200
San Pedro	315	67750
San Pedro – Proyecto Culebrillas	235	50000

Fuente: Elaboración propia

UCUENCA

6.8.4.1.1 Perdidas

Para la proyección de los dos escenarios se ha establecido una tasa de escape de 15%, debido a que se establecerá nuevos reglamentos y procedimientos que permitirán una menor fuga de agua al momento de distribuirla.

6.8.4.2 Juntas de agua de riego

Las juntas de agua de riego se mantienen constantes debido a la inexistencia de proyectos para la creación de juntas de agua disponibles para el año 2022 – 2050.

6.8.4.2.1 Eficiencia del sistema de riego

Para la simulación del sistema de riego en los escenarios futuros (RCP 4,5 y RCP 8,5) se ha simulado con la idea de implementar mejoras progresivas según la época: el primer periodo (2015 - 2030) se espera una mejora con respecto a la aplicación que sería por surcos y aspersión, mientras que para el segundo periodo (2030 – 2050) de igual manera se espera una eficiencia en la aplicación proponiendo métodos de goteo o microred, los resultados esperados de eficacia se observan en la tabla 30.

Tabla 30. *Eficiencia de riego para el periodo 2015 - 2050*

Periodo	Disyunción de los componentes de Eficiencia de riego (Efr)	Medio de utilidad	Eficiencia	Eficiencia de riego (Efr)	Perdidas del sistema
2015 - 2030	Eficiencia de conducción (Efc)	Tubería	1	0,85	0,15
	Eficiencia de distribución (Efd)	Tubería	1		
	Eficiencia de aplicación (Efa)	Surcos – Aspersión	0,85		
2030 - 2050	Eficiencia de conducción (Efc)	Tubería	1	0,95	0,05
	Eficiencia de distribución (Efd)	Tubería	1		
	Eficiencia de aplicación (Efa)	Goteo – Microjet	0,95		

Fuente: Elaboración propia

6.8.4.3 Variación en la capacidad de dotación tanto para el agua potable como para el agua de riego

La variación de la dotación de agua potable y agua de riego se seguirá trabajando de la misma manera que los escenarios históricos, indicados en la sección 6.3.1.2.3.

En las tablas 31 y 32 se observa la variación de uso de agua de riego obtenida por la proyección de precipitación mensual dispuesta por los escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5 para cada una de las cuencas hidrográficas en un periodo de modelación 2015 a 2050, como resultado obtenemos un porcentaje de consumo de agua, recalando que en los meses de mayor precipitación existe menor consumo de agua de riego.

Tabla 31. Variación mensual del consumo de agua de riego en función de la precipitación simulada por el escenario RCP 4,5.

Mes	Estaciones meteorológicas (2011-2050)		Suma (mm/mes)	Porcentaje (%)	Análisis		Variación mensual del consumo (%)
	Surucucho	Matadero			Precipitación	Consumo	
ENE	117,98	79,25	197,23	9,17	Menos lluvia	Alta	9,25
FEB	121,26	84,89	206,15	9,58	Más lluvia	Baja	5,95
MAR	128,39	89,98	218,36	10,15	Más lluvia	Baja	5,20
ABR	122,99	84,43	207,42	9,64	Más lluvia	Baja	5,46
MAY	114,57	66,59	181,16	8,42	Lluvia estandar	Media	8,16
JUN	102,73	44,86	147,59	6,86	Menos lluvia	Alta	10,11
JUL	103,43	38,09	141,52	6,58	Menos lluvia	Alta	12,14
AGO	107,44	35,31	142,74	6,64	Menos lluvia	Alta	10,13
SEP	108,41	45,66	154,07	7,16	Menos lluvia	Alta	9,99
OCT	114,65	62,22	176,87	8,22	Lluvia estandar	Media	8,91
NOV	117,15	71,20	188,36	8,76	Más lluvia	Baja	7,98
DIC	114,70	74,73	189,43	8,81	Más lluvia	Baja	6,73
Total			2150,89	100,00			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Variación mensual del consumo de agua de riego en función de la precipitación simulada por el escenario RCP 8,5.

Mes	Estaciones meteorológicas (2011-2050)			Suma (mm/mes)	Porcentaje (%)	Análisis		Variación mensual del consumo (%)
	Surucucho	Matadero	Monay			Precipitación	Consumo	
ENE	118,35	81,25	58,10	257,71	7,82	Lluvia estandar	Media	9,09
FEB	124,79	85,88	109,30	319,98	9,71	Más lluvia	Baja	6,89
MAR	130,44	92,08	168,90	391,42	11,88	Más lluvia	Baja	5,17
ABR	130,10	89,85	116,92	336,88	10,22	Más lluvia	Baja	6,00
MAY	120,35	78,30	100,90	299,55	9,09	Más lluvia	Baja	7,82
JUN	111,06	61,43	37,11	209,60	6,36	Menos lluvia	Alta	9,87
JUL	105,45	61,98	30,35	197,78	6,00	Menos lluvia	Alta	9,71
AGO	102,21	50,51	17,63	170,36	5,17	Menos lluvia	Alta	11,88
SEP	107,19	63,52	56,46	227,16	6,89	Menos lluvia	Alta	10,22
OCT	116,02	74,32	78,43	268,77	8,16	Lluvia estandar	Media	8,81
NOV	113,58	76,05	100,66	290,29	8,81	Lluvia estandar	Media	8,16
DIC	114,87	82,75	127,66	325,28	9,87	Más lluvia	Baja	6,36
			TOTAL	3294,75	100,00			

Fuente: Elaboración propia

6.8.4.4 Piscícolas

La presencia de piscícolas es muy usual en la cuenca del Tomebamba, según la entrega de permisos para la utilización del agua ha sido creciente en los últimos 11 años, posee una tasa de crecimiento anual de 4,96%.

6.8.4.5 Uso de abrevaderos para ganado

El sector agropecuario en la zona no es muy explotado, es por ello que se planea mantener el valor actual del consumo de agua constante.

7. Resultados

7.1 Calibración del modelo hidrológico

El proceso de calibración se llevó a cabo usando el método avanzado de calibración automática de PEST, se varió parámetros de usos de suelo como: capacidad de agua en la zona profunda (D_w), capacidad de agua en el suelo (S_w), conductividad en la zona profunda (k_d), conductividad en la zona radicular (k_s), dirección del flujo (f) y factor de resistencia a la escorrentía (RRF); se mantuvieron constantes los parámetros de clima como: precipitación (Pr), temperatura (T), humedad relativa (RH) y velocidad del viento (Vv).

La calibración del modelo comenzó con los datos de estudios previos realizados en zonas de páramos de cuencas andinas, debido a que no existía información específica de la zona de estudio. Considerar que los rangos de valores de los parámetros de uso de suelo utilizados en nuestra calibración se encuentran bibliográficamente adecuados para el suelo de nuestra área de estudio (Tabla 33).

Tener en cuenta que el objetivo de la calibración es que el caudal simulado del periodo 1998 a 2010 sean similares a los caudales observados del mismo periodo.

Tabla 33. Parámetros de suelo empleados en la calibración del modelo.

Parámetros	Unidades	Rango de valores
D_w	mm	9450 - 18000
S_w	mm	300 – 1800
K_d	mm/mes	24 – 78
K_s	mm/mes	90 – 300

Parámetros	Unidades	Rango de valores
F	Adimensional	0,1 - 1
RRF	Adimensional	0,5 - 12

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 34 se puede observar la eficacia del modelo según los índices de bondad de ajuste utilizados en su calibración, notar que en las unidades hidrológicas Surucucho y Matadero de Sayausí según el análisis de los índices de eficiencia revelan una modelación buena a pesar de las limitaciones de datos sobre el área de estudio.

La calibración del modelo según los índices de bondad de ajuste se encuentran dentro de una categoría de bueno para Surucucho y muy bueno para Matadero. De igual manera, Parra (2015) y Amin (2018) calibraron sus cuencas hidrográficas con el mismo método de calibración empleado en el estudio (calibración automática de PEST), al igual que los mismos índices de bondad de ajuste, obteniendo resultados de muy bueno y excelente respectivamente.

Tabla 34. Valores de índices de eficiencia en el periodo de calibración.

Unidades hidrológicas	ÍNDICES DE BONDAD DE AJUSTE			
	Nash – Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Surucucho	0,48	0,39	0,70	-0,9
Matadero	0,50	0,35	0,71	-3

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 21 y 22 se presenta los hidrogramas de cada una de las unidades hidrológicas, donde se puede evidenciar el comportamiento de los caudales simulados y observados.

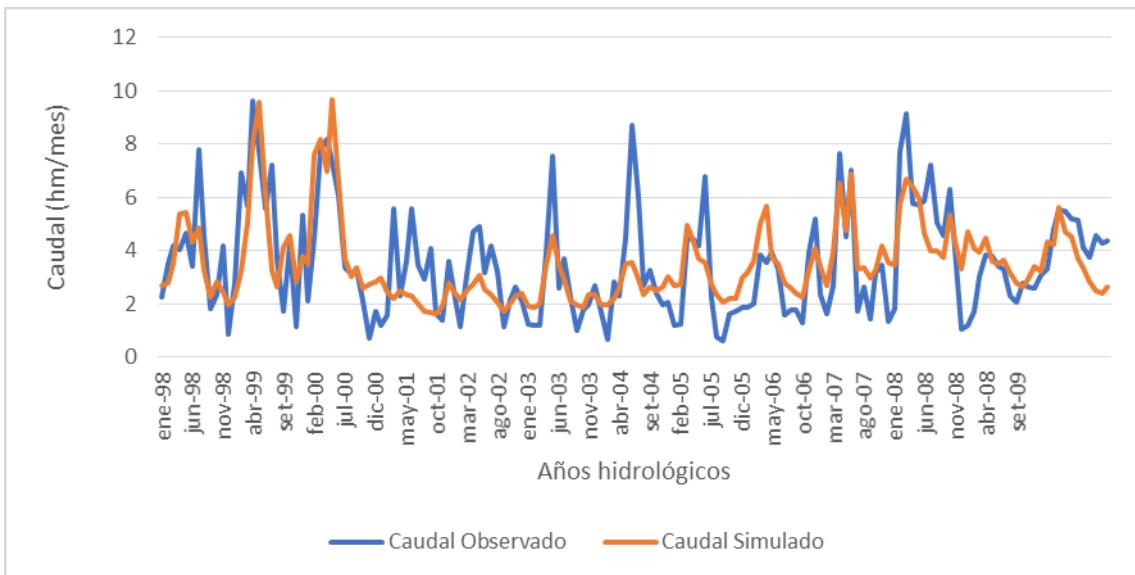


Figura 21. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Surucucho en el periodo de calibración.

Fuente: Elaboración propia

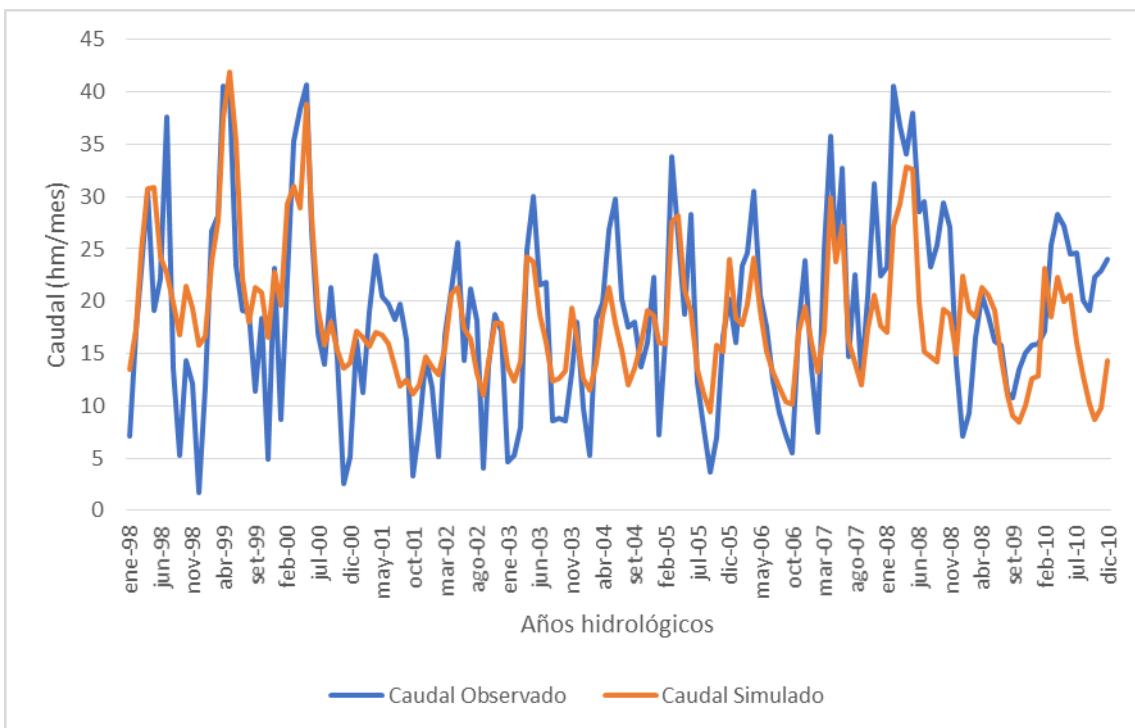


Figura 22. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Matadero de Sayausí en el periodo de calibración.

Fuente: Elaboración propia

7.2 Validación del modelo hidrológico

El periodo de validación fue desde el año 2012 a 2014, con un año (2011) en cuentas corrientes. El comportamiento del caudal de la unidad hidrológica Surucuho no

UCUENCA

presenta cambios significantes, debido a que permanece con una categoría de Buena según el índice de Nash y en una categoría de muy buena según el índice de Nash-In.

Por otra parte, el comportamiento del caudal de la unidad hidrológica de Matadero de Sayausí ha mejorado notablemente, puesto que los valores de calibración del modelo según el índice de Nash se encuentran dentro del rango muy bueno, con respecto al índice de Nash-In permanece dentro de la categoría de Bueno (ver tabla 35).

Los valores resultantes de los índices de bondad de ajuste para la validación indican que el desempeño del modelo es bueno, al igual que Worku *et al.*, (2021) y Parra, (2016) aplicaron los mismos índices de bondad de ajuste para la cuenca del río Beressa y la cuenca del río Machángara generando un desempeño bueno y muy bueno del modelo.

Tabla 35. Valores de índices de eficiencia en el periodo de validación.

Unidades hidrológicas	ÍNDICES DE BONDAD DE AJUSTE			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Surucucho	0,47	0,61	0,80	-15,42
Matadero	0,64	0,37	0,83	9,47

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 23 y 24 se presenta los hidrogramas de cada una de las unidades hidrológicas, donde se puede evidenciar el comportamiento de los caudales simulados y observados en el periodo de validación.

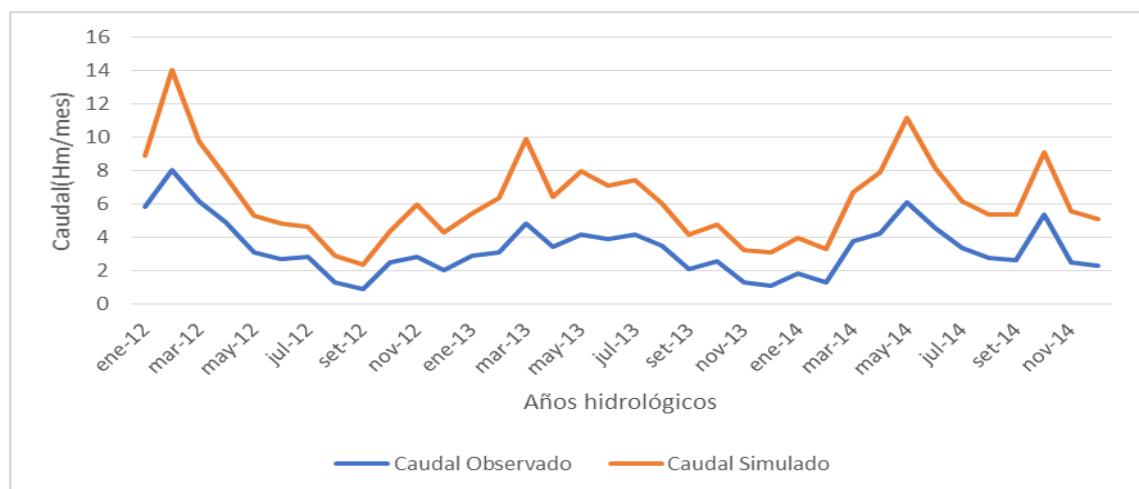


Figura 23. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Surucucho en el periodo de validación.

Fuente: Elaboración propia

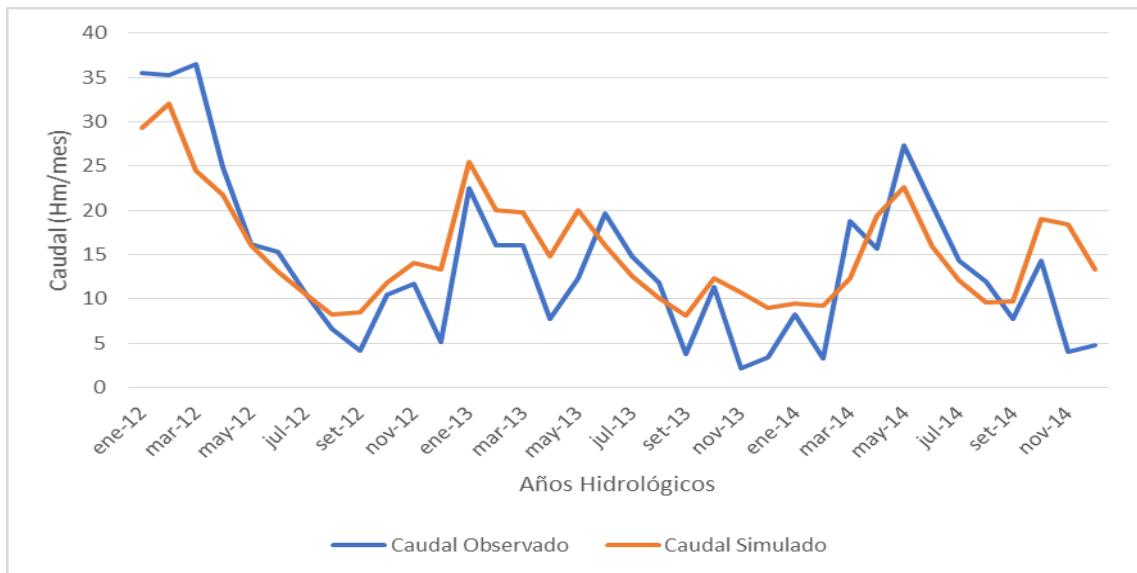


Figura 24. Caudales observados y simulados de la unidad hidrológica Matadero de Sayausí en el periodo de validación.

Fuente: Elaboración propia

7.3 Proyección del caudal

7.3.1 U.H. Surucucho

El comportamiento del caudal de la U.H. Surucucho tiene un decrecimiento al inicio de la modelación, seguido de un crecimiento que inicia alrededor del año 2030. En la figura 25, notar que el caudal entre el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 tienen un comportamiento similar, a pesar de que en el escenario RCP 4,5 presenta una mayor presencia de picos. La diferencia de caudal promedio entre los escenarios es de alrededor de 0,29 hm/año, presentando un mayor caudal el escenario RCP 8,5.

En la U.H. Surucucho presenta una caudal promedio de 2,3049 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 2,60 hm/mes para el escenario RCP 8,5. También, exhibe un caudal mínimo promedio de 0,7898 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 1,31 hm/mes para el escenario RCP 8,5, por último, muestra un caudal máximo promedio de 4,7190 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 4,10 para el escenario RCP 8,5 (ver figura 25).

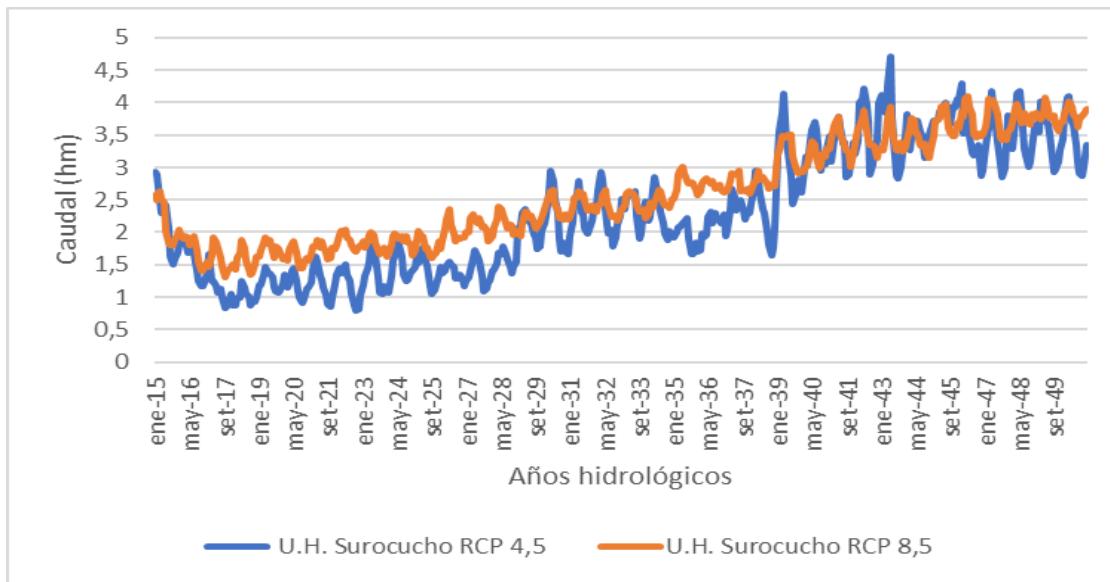


Figura 25. Proyección del caudal de la unidad hidrológica Surucucho.

Fuente: Elaboración propia

7.3.2 U.H. Matadero de Sayausí

El comportamiento del caudal de la U.H. Matadero presenta un decrecimiento en todo el tiempo de modelación (ver figura 26), notar que el comportamiento del caudal es relativamente parecido en los dos escenarios, ya que en este caso el escenario RCP 4,5 no presenta picos significativos. La diferencia del caudal promedio entre los escenarios es de alrededor de 1,62 hm/año, presentando un mayor caudal el escenario RCP 4,5.

En la U.H. Matadero de Sayausí presenta una caudal promedio de 12,80 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 11,18 hm/mes para el escenario RCP 8,5. También, exhibe un caudal mínimo promedio de 8,80 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 6,94 hm/mes para el escenario RCP 8,5, por último, muestra un caudal máximo promedio de 19,97 hm/mes para el escenario RCP 4,5 y 18,23 para el escenario RCP 8,5 (ver figura 26).

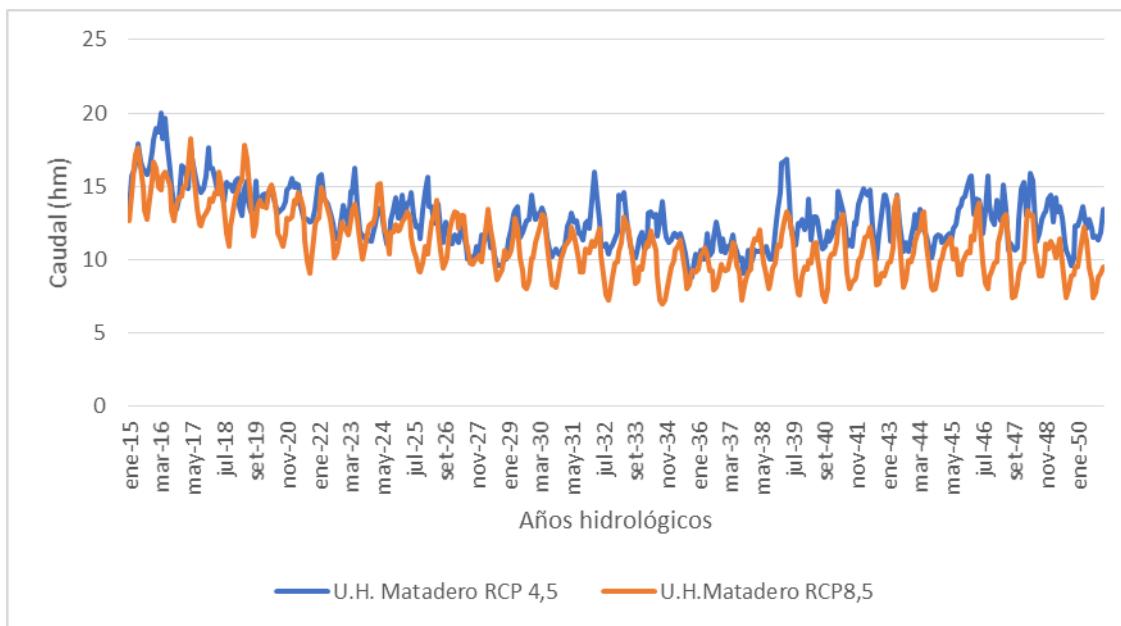


Figura 26. Proyección del caudal de la unidad hidrológica Matadero.

Fuente: Elaboración propia

Al realizar un análisis del impacto del cambio climático en los caudales proyectados para el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 en las dos unidades hidrológicas disminuye significativamente, ya que, al aplicar los escenarios climáticos por medio de MCR, indica una disminución de la tasa mensual de precipitaciones y un aumento promedio mensual de temperatura variando entre 1°C y + 3,5°C. Stehr *et al.*, (2010) muestra resultados similares en los análisis de los caudales proyectados de los ríos Vergara y Lonquimay de la cuenca Biobío en Chile, la reducción porcentual de los caudales es considerablemente más alta que la correspondiente reducción porcentual en las precipitaciones, indicando un mayor impacto en los caudales. Por otra parte, Olsson *et al.*, (2016) indican que la disminución de agua en el suelo y precipitaciones en la parte alta o norte la las subcuenca podrían dar como resultado una baja evapotranspiración real, debido a los cambios en la temperatura y el agua del suelo.

7.4 Demanda futura

Como se indicó anteriormente, el modelo WEAP abastece de agua según el orden de las prioridades definidas para cada demanda, como es el caso de las PTAP que se encuentran en categoría 1, el modelo abastecerá primero a las cuatro PTAP y después seguirá por el sistema de agua de riego, piscícolas y abrevaderos para ganado.

7.4.1 Plantas de tratamiento de agua

La proyección de agua demanda por cada PTAP se puede observar en la figura 27, nótese que existe una variabilidad mensual en el consumo de agua es calculada automáticamente por el modelo WEAP. El caudal requerido por la PTAP del Cebollar

UCUENCA

superá por mucho a las demás PTAP, y a la vez es la planta de tratamiento perteneciente a la cuenca del Tomebamba que abastece a la mayor parte población cuencana. La disminución de abastecimiento entre meses se puede atribuir a la variabilidad del caudal provocada por el cambio climático y la estación en la que se presenta cada una de ellas (invierno y verano).

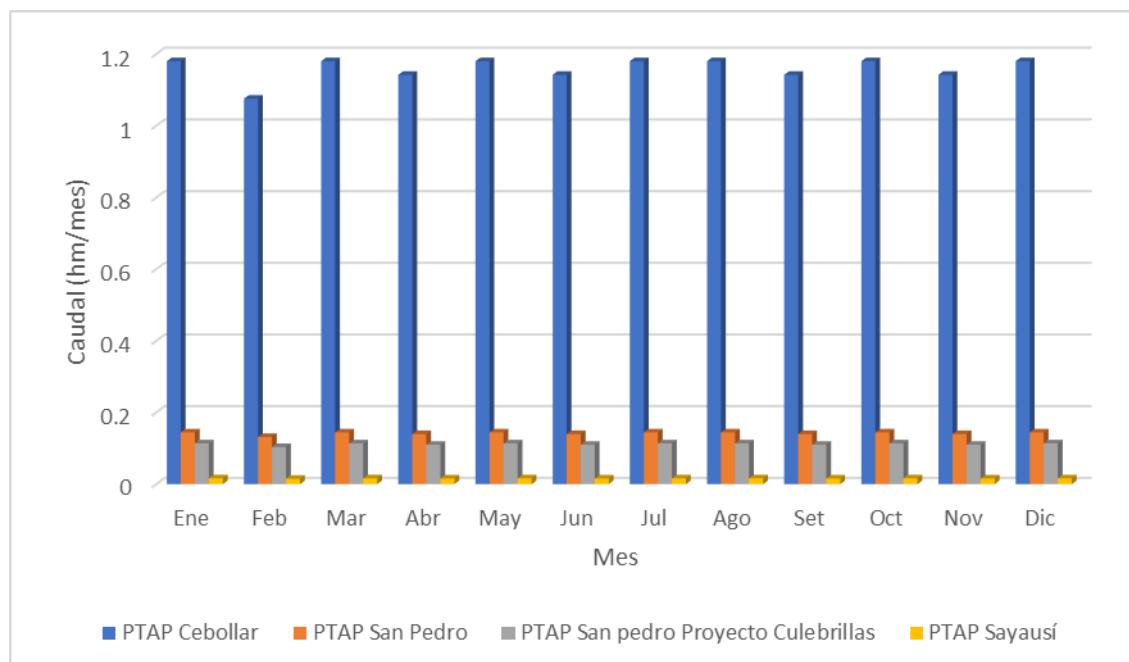


Figura 27. Demanda proyectada de las PTAP en el periodo 2015 – 2050.

Fuente: Elaboración propia

7.4.2 Juntas de agua de riego

La proyección de agua demandada por cada junta de agua de riego se puede observar en la figura 28, el consumo depende de la precipitación del área, ya que a mayor precipitación menor será la utilización de agua de riego. La junta de agua de riego que presenta un mayor uso es la Junta de agua de “Las Rosas” (J7), ya que presenta una capacidad de dotación de 105 l/s con 1200 usuarios; por lo contrario, la junta de agua de riego que presenta un menor explotación de agua de riego es la Junta de agua “Chulag Yacu”(J4), esto se debe a que posee una capacidad de dotación de 8 l/s con 76 usuario. La eficiencia de riego es la misma para todas la juntas de agua, ya que en el estudio se plantea que hasta el año 2050 presentan una eficiencia del 95%.

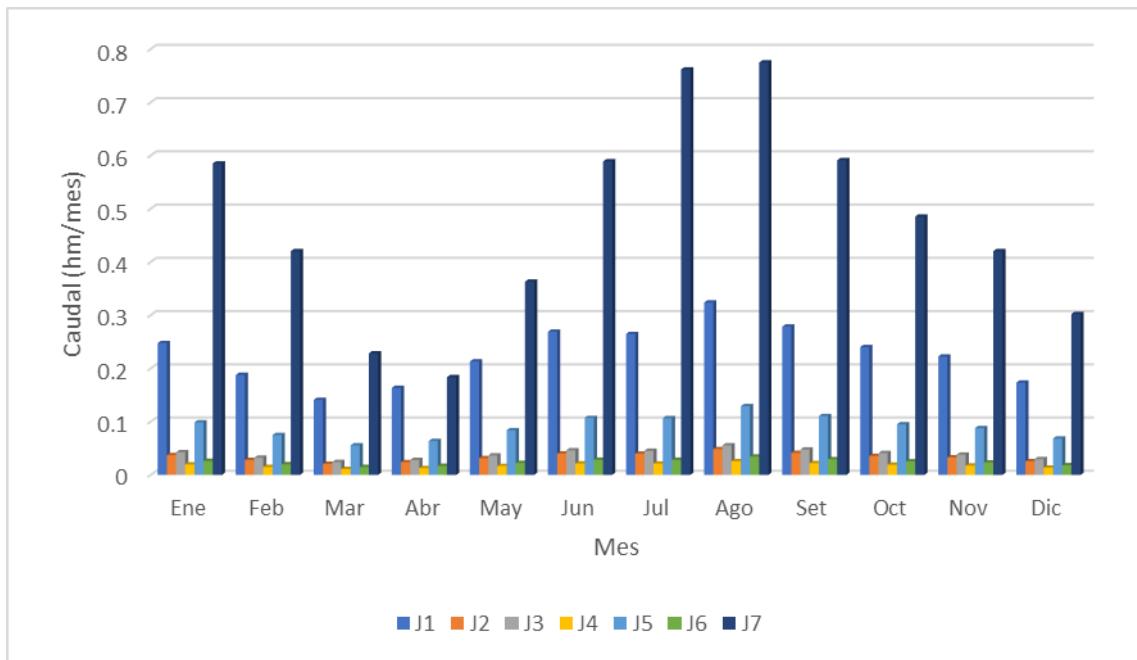


Figura 28. Demanda proyectada de las juntas de agua de riego en el periodo 2015 – 2050.

Fuente: Elaboración propia

7.4.3 Suministro demandado según los escenarios climáticos

La demanda de agua es muy similar en los dos escenarios climáticos, debido a que se ha dispuesto para ambos escenarios las mismas demandas (PTAP, Juntas de agua de riego, piscícola y abrevaderos para ganado). La demanda promedio mensual del escenario RCP 4,5 es de 3,0340 hm, mientras que para el escenario RCP 8,5 es de 3,3751 hm; la demanda del escenario RCP 8,5 es relativamente mayor a la demanda del escenario RCP 4,5, con una diferencia de caudal promedio mensual de 0,3410 hm en el periodo 2015 - 2050, la variabilidad de la demanda se debe al cambio de las condiciones climáticas y uso de suelo de los escenarios en estudio (ver Fig. 29).

El incremento de la demanda de agua en los dos escenarios climáticos se atribuye a la tasa de crecimiento poblacional de 3.48%, al comparar con un estudio realizado en la cuenca de Boumerzoug, la demanda de agua potable aumentará de 0,9295 hm en el año 2007 a 1,5433 hm en el año 2037, nuevamente evidenciada por una tasa de crecimiento poblacional de 2,4% (Kiniouar et al., 2017).

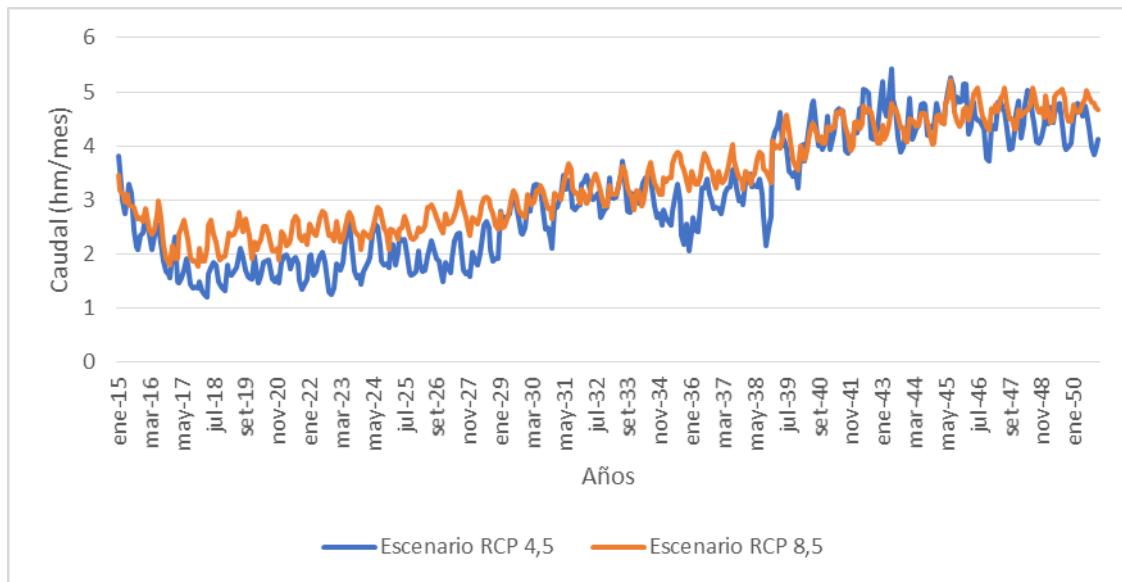


Figura 29. Demanda promedio mensual del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

7.5 Cobertura de la demanda

La cobertura de la demanda del modelo de WEAP se establece según las prioridades de demanda establecidas en el modelo (ver sección 6.3.1.2) WEAP ejecuta el balance de cobertura para los 12 meses de los 36 años simulados, indica la capacidad del sistema hídrico de suplir las demandas. Tener en cuenta que el número de fallos hace referencia al número de meses con déficit del recurso agua en todo el proceso de simulación, cabe recalcar que el comportamiento de los meses simulados es diferente, ya que varía de acuerdo al escenario estudiado.

7.5.1 Plantas de tratamiento de agua

Las PTAP se encuentran establecidas como prioridad 1, es por eso que su demanda es prioridad a comparación de las juntas de agua de riego, abrevadero y piscícolas. En la tabla 36 se puede observar el número de fallos o déficit de agua presentes en cada PTAP y por cada escenario.

Tabla 36. Número de déficits presentes por cada PTAP.

Planta de tratamiento de agua potable	Fallos (mes)	
	Escenario RCP 4,5	Escenario RCP 8,5
El Cebollar	19	23
San Pedro	15	18

Planta de tratamiento de agua potable	Fallos (mes)	
	Escenario RCP 4,5	Escenario RCP 8,5
San Pedro – Proyecto culebrillas	15	18
Sayausí	0	0

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes figuras se puede observar la cobertura de las PTAP por cada escenario en el periodo 2015 - 2050, al comparar el porcentaje de la cobertura de los dos escenarios se puede observar que el mayor porcentaje de cobertura corresponde al escenario RCP 8,5.

La diferencia de cobertura entre el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 de las PTAP: Cebollar, San Pedro, San Pedro – proyecto Culebrillas es 6.1840, 6.1750, 2,9004 puntos porcentuales respectivamente, por último, la cobertura para la PTAP de Sayausí es igual para los dos escenarios, ya que su cobertura es del 100%.

En el escenario RCP 4,5 los meses que poseen menor cobertura es agosto, septiembre y octubre, presenta una cobertura de 97,7%, 97,8% y 97,5% respectivamente, mientras que los meses de mayor cobertura pertenecen a los meses de abril, mayo y junio con una cobertura del 99,7%, 99,9% y 99,6% respectivamente (fig.30).

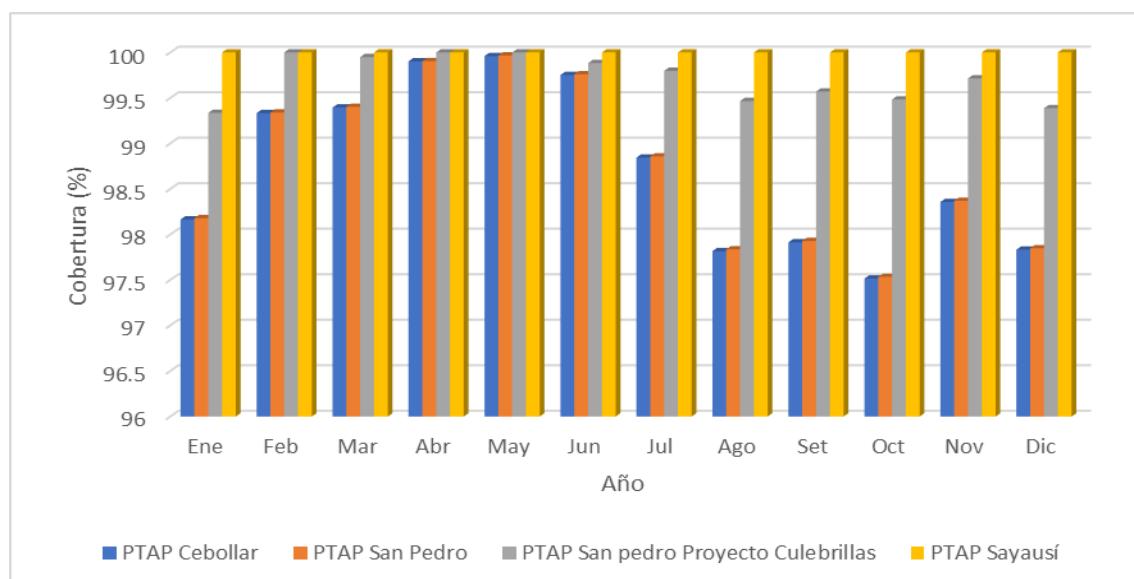


Figura 30. Cobertura de PTAP en el escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

UCUENCA

En el escenario RCP 8,5 los meses que poseen menor cobertura es septiembre y octubre, con una cobertura de 89% y 85% respectivamente, mientras que los meses de mayor cobertura pertenecen a los meses de abril, mayo y junio con una cobertura del 95% (fig. 31).

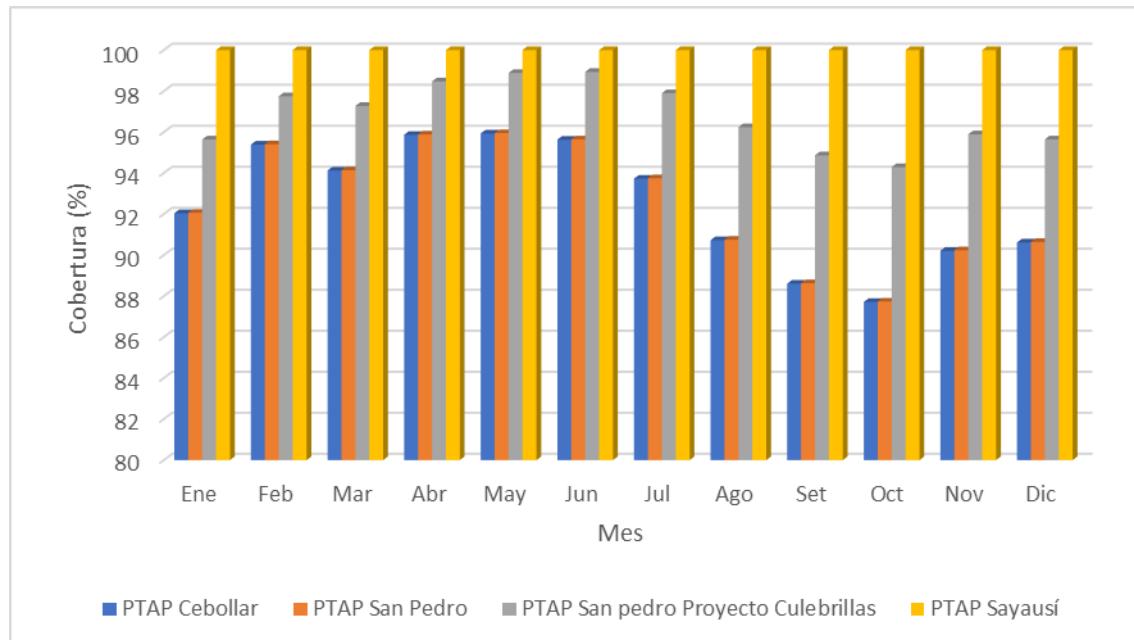


Figura 31. Cobertura de PTAP en el escenario RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

7.5.2 Juntas de agua de riego

Las juntas de agua de riego se encuentran establecidas como prioridad 2, es decir, después de haber abastecido a las demandas de las PTAP el programa suplirá las demandas de agua de riego. En la tabla 38 se puede observar el número de fallos o déficit de agua presentes en cada junta de agua de riego y por cada escenario.

Tabla 37. Número de déficits presentes por cada junta de agua de riego.

Junta de agua de riego		Fallos (mes)	
		Escenario RCP 4,5	Escenario RCP 8,5
Cabogana	J1	244	304
Minas – San Vicente	J2	243	239
Dudahuyco	J3	235	296
Chulag Yacu	J4	225	287

Junta de agua de riego		Fallos (mes)	
		Escenario RCP 4,5	Escenario RCP 8,5
Sayausí – Bellavista	J5	253	298
Minas	J6	267	304
Las Rosas	J7	150	200

Fuente: Elaboración Propia

En las siguientes figuras se puede observar la cobertura de las juntas de agua de riego por cada escenario en el periodo 2015 - 2050, al comparar el porcentaje de la cobertura de los dos escenarios se puede observar que el mayor porcentaje de cobertura corresponde al escenario RCP 4,5.

La diferencia de cobertura entre el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 de las juntas de agua de riego: Cabogana (J1), Minas – San Vicente (J2), Dudahuayco (J3), Chulag Yacu (J4), Sayausí - Bellavista (J5), Minas (J6), Las Rosas (J7) es 10,5893, 17,6743, 10,5919, 10,5938, 10,5894, 10,5919 puntos porcentuales respectivamente.

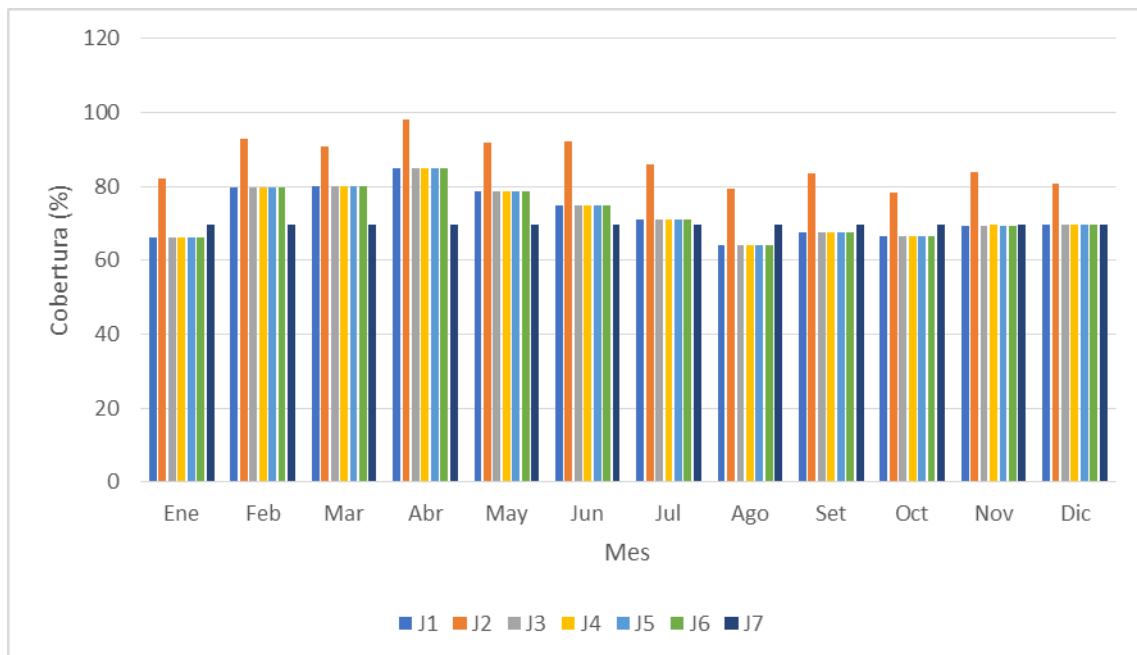


Figura 32. Cobertura de junta de agua de riego en el escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

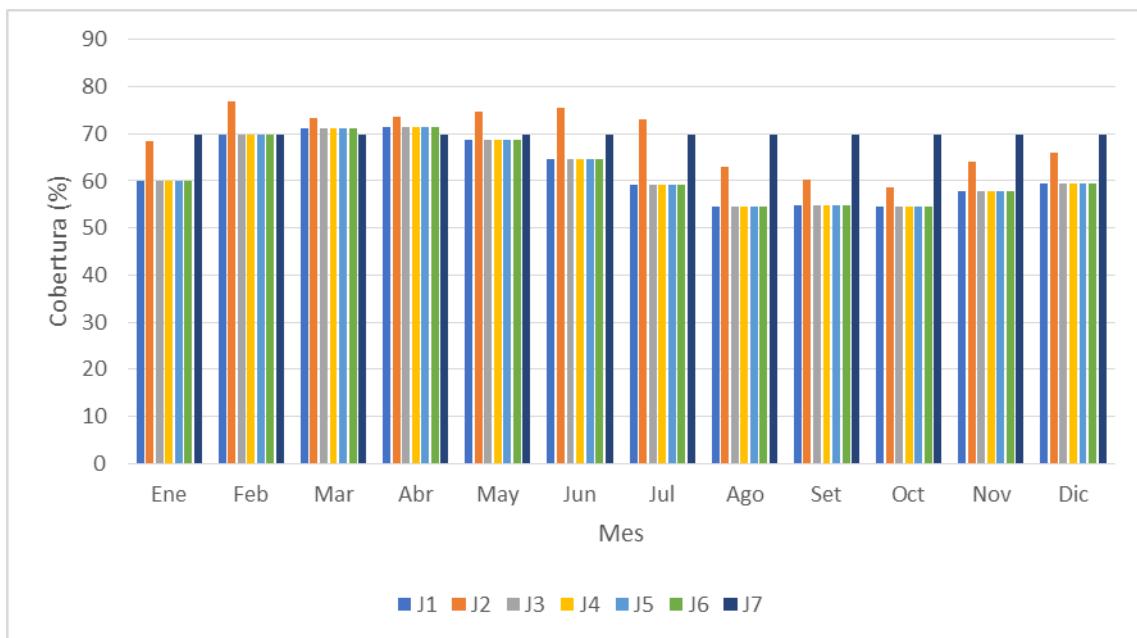


Figura 33. Cobertura de junta de agua de riego en el escenario RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

La cobertura de la demanda varía según los escenarios climáticos estudiados, puesto que, la cobertura para las PTAP del escenario RCP 4,5 es de 99,29% mientras que para el escenario RCP 8,5 es de 95,48%; la cobertura para las juntas de agua de riego del escenario RCP 4,5 es de 74,29% mientras que para el escenario RCP 8,5 es de 64,20%. Estos resultados corroboran lo mencionado por CCGUCC and SEI, (2009) menciona que las demandas de agua se suministran de acuerdo a la prioridad indicada en el modelo WEAP.

La demanda de agua para los dos escenarios climáticos no se encuentra cubiertos en su totalidad. Al igual que un estudio realizado en la subcuenca de Didessa, comparó la oferta y demanda concluyendo que al introducir estrategias de gestión del agua puede ayudar a resolver la demanda de agua insatisfecha de la cuenca (Adgolign et al., 2016). Otro estudio ejecutado en la cuenca de Mae Kong, indica que la demanda de agua insatisfecha en el sector de la agricultura es de 0,062 hm/año y de 0,017 hm/año en la subcuenca del río Tha Chin (Khalil et al., 2018).

7.6 Resultado hidroeconómico

El análisis hidroeconómico se realizó a partir de los ajustes de las funciones económicas obtenidas al momento de graficar costo versus caudal, posteriormente, se presenta los resultados de coste escasez, respondiendo a la pregunta: ¿ Cuál será el costo cuando no se logra cubrir las demandas de la cuenca en el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5?.

7.6.1 Escenario RCP 4,5

7.6.1.1 Plantas de Tratamiento de Agua Potable

Para poder efectuar el análisis de costo escasez relacionamos el caudal del escenario RCP 4,5 versus el costo del agua demandada. El costo del agua se obtuvo de la página de trasparecencia dispuesto por ETAPA (precio que paga el usuario final)(sección 6.4.1), además, se realizó una tasa de crecimiento económico para conocer la variabilidad del precio anualmente.

Para una mayor explicación de la creación de la curva de demanda, el año base fue 2016, su costo inicial es de \$0,42, a ello le agregamos la tasa de crecimiento económico anual de \$0,027, obteniendo así el costo por metro cúbico desde el año 2016 al año 2050. Dicho costo por metro cúbico multiplicamos por el caudal no cubierto de escenario RCP 4,5 por cada PTAP y así obtenemos la perdida que genera la escasez de agua.

En la siguiente imagen se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta según cada una de las PTAP. Cabe recalcar que la PTAP Sayausí no presenta déficit en los escenarios estudiados, puesto que el consumo de agua es bajo (15 l/s) a relación de las demás PTAP.

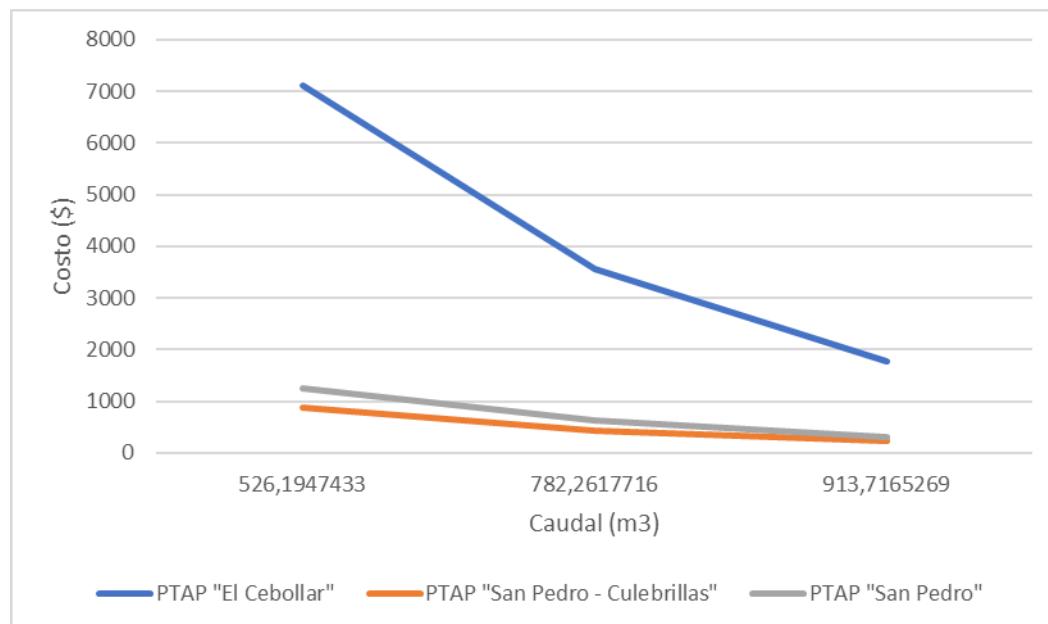


Figura 34. Costo generada por la demanda no cubierta de las plantas de tratamiento de agua potable del escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

7.6.1.2 Juntas de Riego

El análisis hidroeconómico de las juntas de agua se basó en la productividad de la cuenca, es por ello que se dividió en dos: área agrícola y área ganadera (producción de leche).

Agricultura Para realizar el costo del cálculo de la agricultura se basó en el costo que genera al agricultor producir por hectárea, según GAD Sayausí (2015) indica que el costo de producción por hectárea es de \$215 por año, si conocemos nuestro caudal no cubierto (deficiencia del caudal del escenario RCP 4,5) de cada una de las juntas de agua de riego y a la vez conocemos las hectáreas regadas de cada una de ellas, se calcula el número de hectáreas no regadas.

Se puede calcular la perdida que va a generar al agricultor la escasez de agua (costo déficit), ya que cuando existe una deficiencia de agua el costo para sembrar las hectáreas va a ser mayor que el costo base (costo dispuesto por el GAD de Sayausí), es decir, cuando existe un déficit de agua va a elevar el costo de producción para el agricultor.

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta para el sector agrícola, nótese que la demanda difiere por cada junta de agua de riego, ya que depende del caudal demandado.

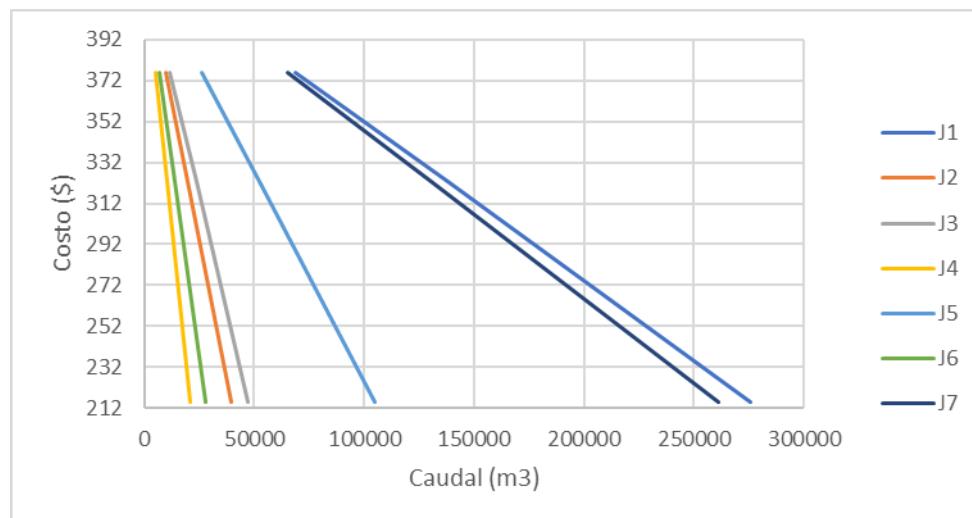


Figura 35. Costo generado por la demanda no cubierta en la agricultura de las juntas de agua de riego del escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

UCUENCA

Ganadería (producción de leche)

Con respecto a la producción de leche se conoce que en una hectárea se puede mantener un promedio de 10 cabezas de ganado, y además, por unidad se obtiene 12 litros de leche por día, el costo por litro de leche es de \$0,43, es decir que en una hectárea se produce \$51,6 diarios. Según este concepto se puede conocer la producción promedio que tiene cada junta de agua.

Al conocer el caudal no cubierto (deficiencia del caudal del escenario RCP 4,5) de cada una de las juntas de agua de riego y a la vez conocemos las hectáreas regadas de cada una de ellas, se calcula el número de hectáreas no regadas.

Se puede calcular la perdida que va a generar al ganadero la escasez de agua (costo déficit), ya que cuando existe una deficiencia de agua el costo para mantener a las cabezas de ganado va a ser mayor, es decir, cuando existe un déficit de agua va a elevar el costo de producción para el ganadero.

Un dato muy importante es que la producción de leche no representa los 365 días del año, ya que representa un promedio de 305 días del año, esto debido a su ciclo productivo de leche (Bretschneider et al., 2015).

En la siguiente imagen se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta para el sector ganadero, para ser más específicos en la producción de leche, nótese que la demanda difiere por cada junta de agua de riego, ya que, depende del caudal demandado.

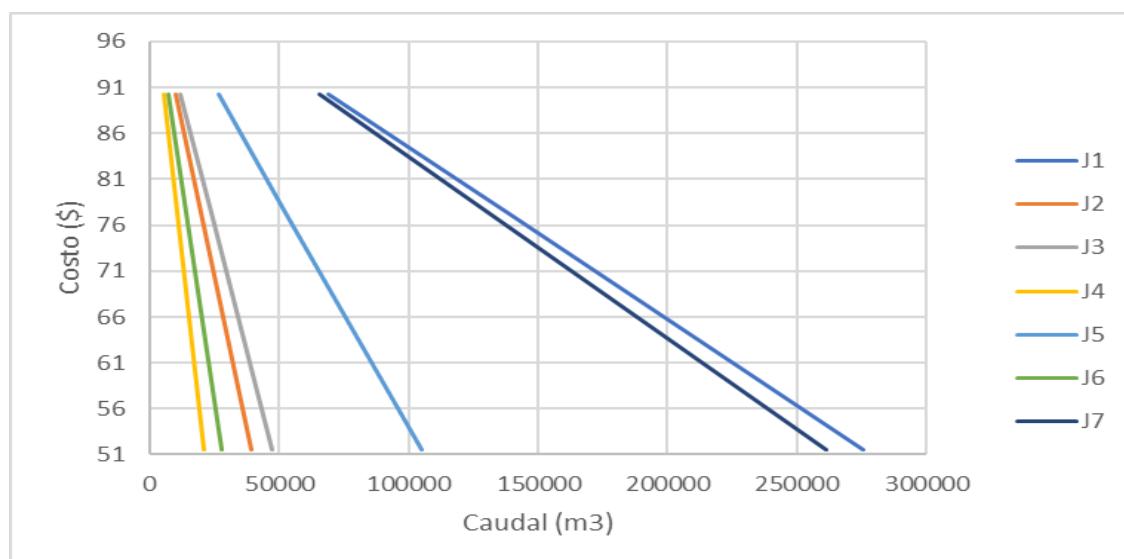


Figura 36. Costo generado por la demanda no cubierta en la producción de leche de las juntas de agua de riego del escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

7.6.2 Escenario RCP 8,5

Al igual que en escenario RCP 4,5 el análisis hidroeconómico se realizó a partir de los ajustes de las funciones económicas obtenidas al momento de graficar costo versus caudal, posteriormente, se presenta los resultados de coste escasez, respondiendo a la pregunta: ¿ Cuál será el costo cuando no se logra cubrir las demandas de la cuenca en el escenario RCP 4,5 y RCP 8,5?.

7.6.2.1 Plantas de Tratamiento de Agua Potable

En la siguiente imagen se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta según cada una de las PTAP en el escenario RCP 8,5. Tomar en cuenta que la PTAP Sayausí no presenta déficit en los escenarios estudiados, puesto que el consumo de agua es bajo (15 l/s) a relación de las demás PTAP.

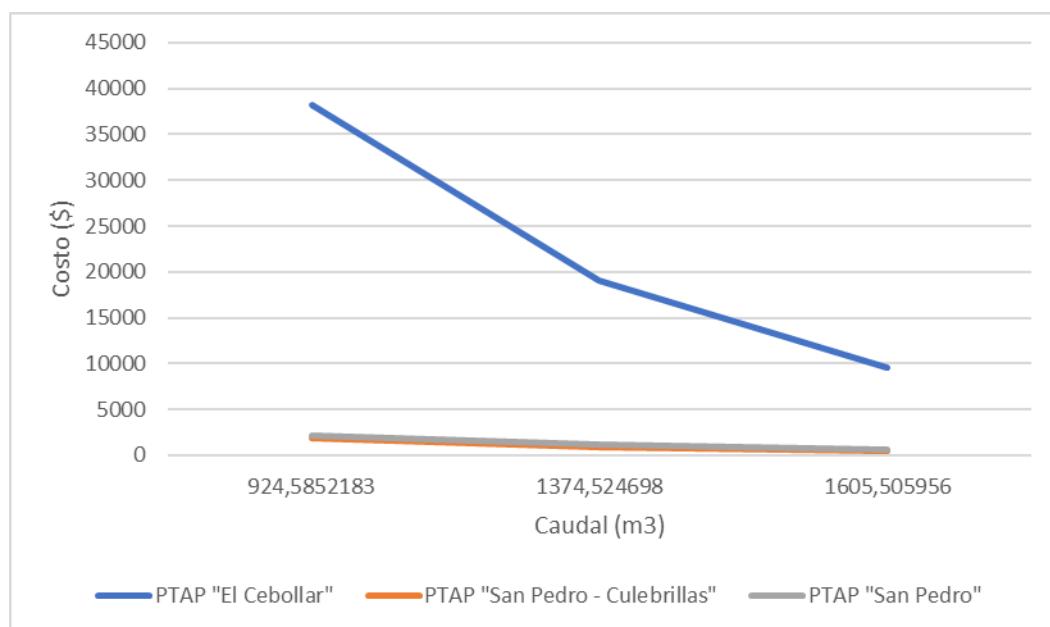


Figura 37. Costo generada por la demanda no cubierta de las plantas de tratamiento de agua potable del escenario RCP 4,5.

Fuente: Elaboración propia

7.6.2.2 Juntas de Riego

De igual forma que el escenario RCP 4,5 el análisis hidroeconómico de las juntas de agua se basó en la productividad de la cuenca, utilizando el mismo método para calcular la demanda insatisfecha de la agricultura y la producción de leche.

Agricultura

En la siguiente imagen se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta para el sector agrícola, considerar que la demanda difiere por cada junta de agua de riego, ya que depende del caudal demandado en el escenario RCP 8,5.

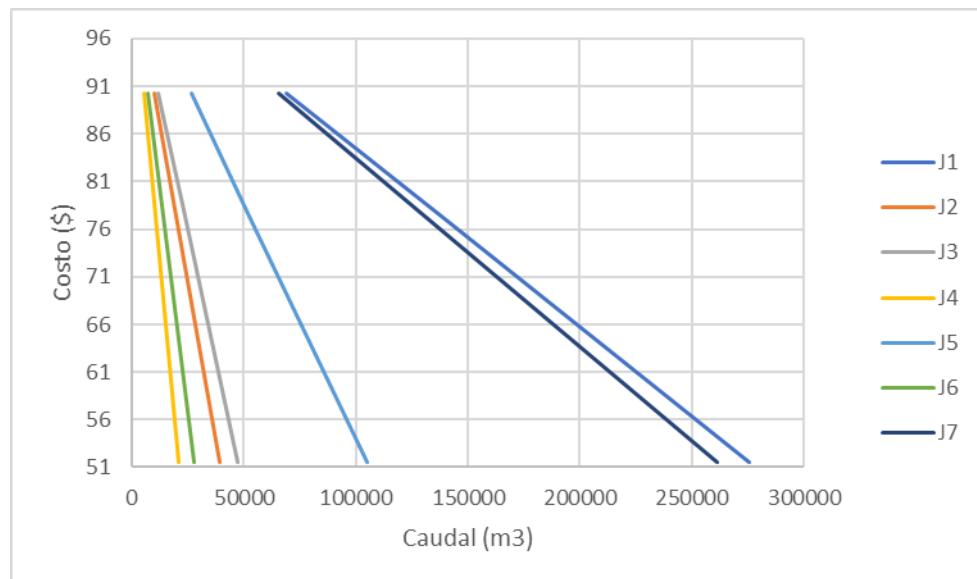


Figura 38. Costo generado por la demanda no cubierta en la agricultura de las juntas de agua de riego del escenario RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

Ganadería (producción de leche)

En la siguiente imagen se puede observar el comportamiento de la demanda no cubierta para el sector ganadero, tener en cuenta que la demanda difiere por cada junta de agua de riego, ya que, depende del caudal demandado.

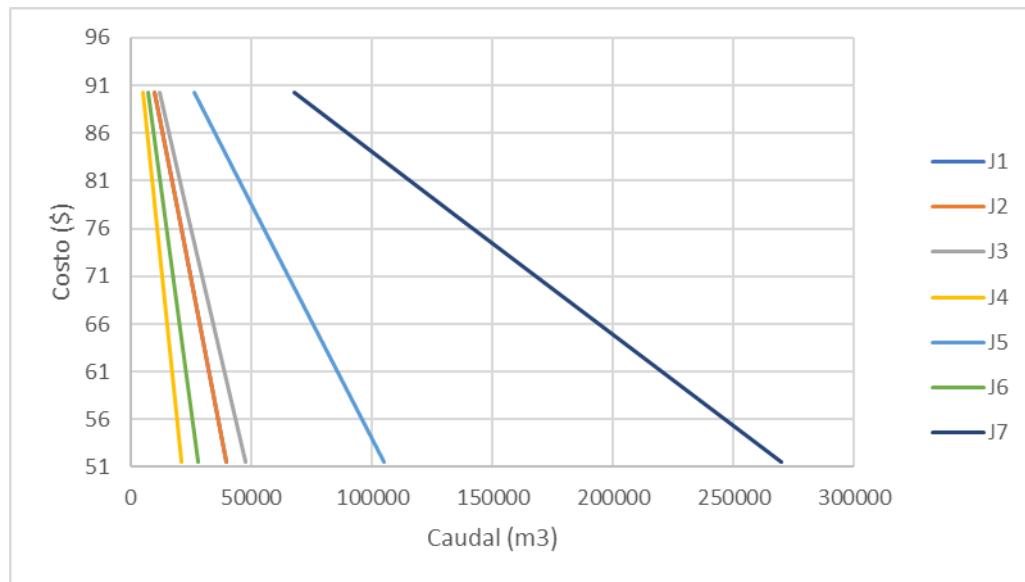


Figura 39. Costo generada por la demanda no cubierta en la producción de leche de las juntas de agua de riego del escenario RCP 8,5.

Fuente: Elaboración propia

7.6.2.3 Comparación del análisis hidroeconómico del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5

Plantas de tratamiento de agua

Al comprar los resultados obtenidos del análisis hidroeconómico de los dos escenarios climáticos estudiados los valores más altos para coste escasez es para el escenario RCP 8,5 (ver tabla 339). La diferencia del coste escasez entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 es de 43869948 dólares.

Tabla 38. Coste escasez para las PTAP del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5.

Planta de agua potable	Escenario	
	RCP 4,5	RCP 8,5
Cebollar	21775745	62676872
San Pedro	336312	2081696
San Pedro – Culebrillas	336312	1559749
Total	22448369	66318317

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 39 se realizó una comparación de cada una de las PTAP en los dos escenarios estudiados, señalando al escenario RCP 8,5 como el escenario que presenta un mayor coste escasez a comparación del escenario RCP 4,5. La diferencia que existe entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 para la PTAP Cebollar, PTAP San

UCUENCA

pedro, PTAP San Pedro - proyecto Culebrillas es de 40901127, 1745384, 1223437 respectivamente.

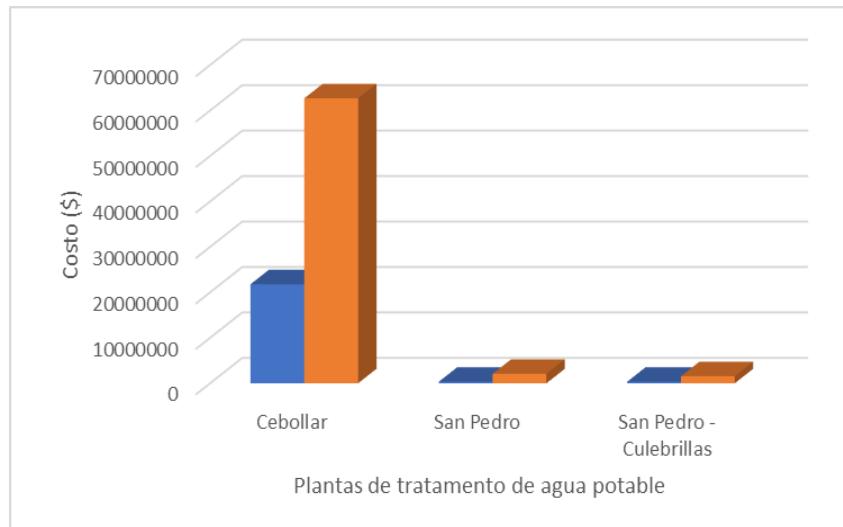


Figura 40. Comparación de coste escasez del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 de las PTAP.

Fuente: Elaboración propia

Juntas de agua a de riego

Al comparar el coste escasez de los dos escenarios estudiados tanto para el área ganadera como área agrícola, presenta un mayor costo el escenario RCP 8,5.

Agricultura

Al igual que en las PTAP, se comparó los resultados obtenidos del análisis hidroeconómico de los dos escenarios climáticos estudiados, los valores más altos para coste escasez resulta ser del escenario 8,5 (ver tabla 40). La diferencia del coste escasez entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 es de 276568 dólares.

Tabla 39. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 con respecto al área agrícola.

Área Agrícola			
Junta de agua de riego		Escenario	
		RCP 4,5	RCP 8,5
Cabogana	J1	604306	870576
Minas – San Vicente	J2	870716	870576
Dudahuyco	J3	105360	105352

Junta de agua de riego		Escenario	
		RCP 4,5	RCP 8,5
Chulag Yacu	J4	466714	466637
Sayausí – Bellavista	J5	235429	235389
Minas	J6	619916	619815
Las Rosas	J7	586786	597450
Total		3489227	3765795

Fuente: Elaboración propia

En la figura 40 se realizó una comparación de cada una de las juntas de agua de riego en el sector agrícola de los dos escenarios estudiados, señalando al escenario RCP 8,5 como el escenario que presenta un mayor coste escasez a comparación del escenario RCP 4,5. La diferencia que existe entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 para la junta de agua: Cabogana, Minas – San Vicente, Dudahuyco, Chulag Yacu, Sayausí – Bellavista, Minas, Las Rosas es de 266270, -140, -8, -77, -40, -101 y 10664 respectivamente.

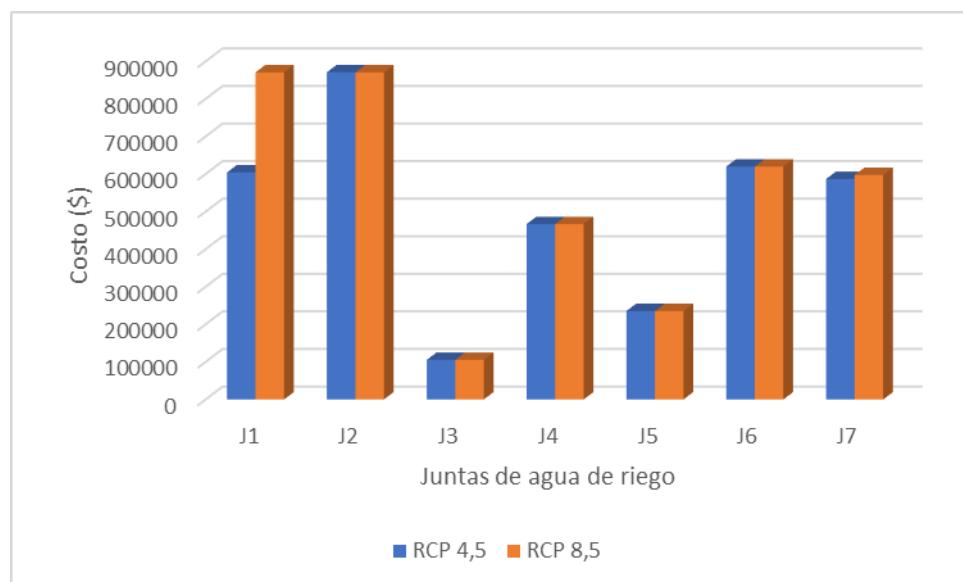


Figura 41. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 de las juntas de agua de riego en el sector agrícola.

Fuente: Elaboración propia

Ganadería

Al igual que en las PTAP, se comparó los resultados obtenidos del análisis hidroeconómico de los dos escenarios climáticos estudiados, los valores más altos para coste escasez resulta ser del escenario 8,5 (ver tabla 4). La diferencia del coste escasez entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 es de 70367 dólares.

UCUENCA

Tabla 40. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 con respecto al área Ganadera.

Área Ganadera (lechera)			
Junta de agua de riego	Escenario		
	RCP 4,5	RCP 8,5	
Cabogana	J1	142179	210394
Minas – San Vicente	J2	210429	210394
Dudahuyco	J3	346566	346497
Chulag Yacu	J4	110933	110916
Sayausí – Bellavista	J5	554669	554580
Minas	J6	150542	150517
Las Rosas	J7	138266	140653
Total		1653584	1723951

Fuente: Elaboración propia

En la figura 41 se realizó una comparación de cada una de las juntas de agua de riego en el sector ganadero de los dos escenarios estudiados, señalando al escenario RCP 8,5 como el escenario que presenta un mayor coste escasez a comparación del escenario RCP 4,5. La diferencia que existe entre el escenario RCP 8,5 y RCP 4,5 para la junta de agua: Cabogana, Minas – San Vicente, Dudahuyco, Chulag Yacu, Sayausí – Bellavista, Minas, Las Rosas es de 68215, -35, -69, -17, -89, -25 y 2387 respectivamente.

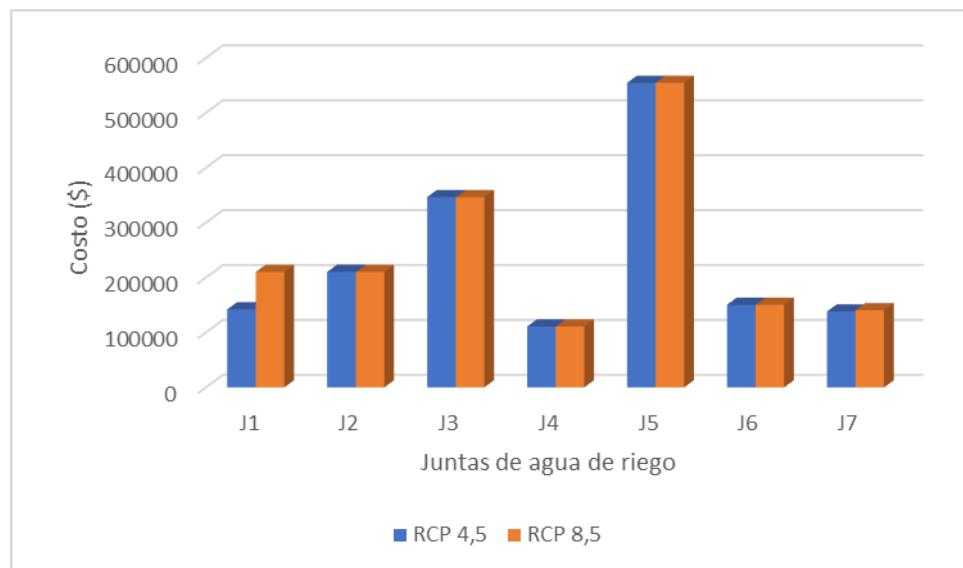


Figura 42. Comparación del coste escasez de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5 de las juntas de agua de riego, en el sector ganadero.

Fuente: Elaboración propia

UCUENCA

El análisis del impacto en el cambio climático en la oferta de agua y la demanda se demuestra en el análisis hidroeconómico, mostrando como la alteración del clima puede afectar monetariamente a las diferentes actividades presentes en el área de estudio. Al igual que Esteve et al., (2015) presentan valores similares, el análisis del modelo hidroeconómico refleja cómo los agricultores responden a una menor disponibilidad de agua, menores rendimientos de los cultivos y mayores necesidades de agua de riego. Cuando los agricultores se adaptan a estas nuevas condiciones, las nuevas opciones de cultivos dan como resultado un menor uso de agua (de acuerdo con una menor disponibilidad) y menores ingresos agrícolas. De la misma manera, en un estudio similar realizó su valoración económica con funciones económicas para cada una de las demandas, obteniendo como resultado un coste de escasez promedio anual de \$91,01 anuales para el escenario de largo plazo y \$20,74 anuales para el escenario de mediano plazo (Escriva-Bou, 2012).

Según el análisis el impacto económico del cambio climático sobre la agricultura/ganadería es representativo en los dos escenarios climáticos, de la misma manera corrobora Pellicer et al., (2021) predice una reducción de la superficie de regadío de la cuenca del río Segura del -4,7% en el escenario RCP 4.5 y del -7,4% en el escenario RCP 8.5, con un impacto económico medio en términos de pérdidas de margen bruto del -4,0% y del -7,3%, respectivamente. De igual forma Sharma et al., (2022) corrobora que el aumento de la temperatura de los escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5 afecta a la productividad de la agricultura, ya que en su estudio el aumento de temperatura presenta un aumento de cosecha de arroz en un 20% a 22% y un decrecimiento de cosecha de trigo en un -4%.

8. Conclusiones

Los escenarios del cambio climático, la modelación del recurso hídrico y los datos acerca de la demanda de la cuenca ha sido crucial para la obtención del análisis hidroeconómico de la cuenca Tomebamba. El modelo climático regional ENSAMBLE es muy útil para simular variables climáticas (temperatura y prestación), debido a su confiabilidad, ya que, se obtuvo los datos del Ministerio del Ambiente de la Tercera Comunicación de Cambio Climático del Ecuador.

La simulación del modelo hidrológico se realizó por el método de humedad del suelo, permitiéndonos conocer la oferta de agua de los dos escenarios estudiados obtenida por el modelo WEAP, y así, se pudo conocer la influencia que presenta la variabilidad climática del escenario RCP 4,5 y RCP 8,5 en los caudales de cada unidad hidrológica de la cuenca. En los escenarios estudiados se pudo observar que en los primeros

UCUENCA

años de la modelación los caudales tienden a disminuir su flujos, después los caudales se estabilizan en el caso de la U.H. Matardero, mientras que, en la U.H. Surucucho presenta un aumento del flujo a partir del año 2039.

Al evaluar el comportamiento de la oferta y demanda del agua bajo los escenarios estudiados se puede observar que existe una mayor cobertura por parte del escenario RCP 4,5, debido a que el escenario RCP 8,5 presenta una mayor variabilidad en su caudal. Los meses de menor cobertura para las PTAP son agosto, septiembre, octubre y noviembre, mientras que para las juntas de agua de riego son los meses de enero, agosto, septiembre y octubre. Esta información es de vital importancia para la población cuencana como para los distintos directivos encargados de la toma de decisiones, ya que se debería tomar en cuenta para la creación de planes estratégicos o distintas acciones que puede ayudar a combatir el déficit de cobertura que presenta la cuenca, evitando una planificación equivoca y tardía.

Al valorar el comportamiento hidroeconómico que generan los dos escenarios estudiados para las PTAP y las juntas de agua de riego, se puede decir que el escenario RCP 8,5 presenta un mayor coste escasez a comparación del escenario RCP 4,5. La información obtenida es de gran ayuda para realizar un plan de manejo y evaluación integral para la repartición de agua en una cuenca tropical Andina, a partir de las pérdidas económicas que se genera por la falta de este recurso agua.

9. Bibliografía

- Adgolign, T., Rao, G. V. R. S., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 55–70. <https://doi.org/10.1007/S40899-015-0041-4/TABLES/12>
- Ahmadaali, J., Barani, G. A., Qaderi, K., & Hessari, B. (2018). Analysis of the Effects of Water Management Strategies and Climate Change on the Environmental and Agricultural Sustainability of Urmia Lake Basin, Iran. *Water 2018, Vol. 10, Page 160*, 10(2), 160. <https://doi.org/10.3390/W10020160>
- Amin, A., Iqbal, J., Asghar, A., & Ribbe, L. (2018). Analysis of Current and Future Water Demands in the Upper Indus Basin under IPCC Climate and Socio-Economic Scenarios Using a Hydro-Economic WEAP Model. *Water*, 10(5), 537. <https://doi.org/10.3390/w10050537>
- Anane, G. K., & Cobbinah, P. B. (2022). Everyday politics of land use planning in peri-urbanisation. *Habitat International*, 120, 102497. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2021.102497>
- Aparicio, J. (2019). Una aproximación al efecto del cambio climático en los camélidos domésticos en Bolivia. *Scielo*, 87–93. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182019000100012&script=sci_abstract
- Avilés, A. (2011). *Análisis de los sistemas de recursos hídricos en las subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig (provincias Azuay y Cañar-Ecuador)* [Universidad Politécnica de Valéncia]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12801/Memoria_TFM_Final.pdf?sequence=1
- Baccour, S., Albiac, J., Kahil, T., Esteban, E., Crespo, D., & Dinar, A. (2021). Hydroeconomic modeling for assessing water scarcity and agricultural pollution abatement policies in the Ebro River Basin, Spain. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129459. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129459>
- Benavides, H., & León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. In ACADEMIA. Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM.
- Bermeo, M. (2014). *Información nutricional del suelo como indicador para una*

UCUENCA

- propuesta de plan de manejo dentro de la Microcuenca del Río Mazán. Cuenca [Universidad de Cuenca].* <http://201.159.222.99/bitstream/datos/4233/1/10793.pdf>
- Bretschneider, G., Slado, E., Cuatrín, A., & Arías, D. (2015). Lactancia: Pico y Persistencia ¿Por qué cuidarlos? *INTA.* https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_lactancia_pico_y.persistencia_febrero_2015.pdf
- Bruijnzeel, L. (2004, September). Valuing watershed services: Concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 104*(1), 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.016>
- Carabine, E., & Lemma, A. (2014). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC .* <https://cdkn.org/wp-content/uploads/2014/12/INFORME-del-IPCC-Que-implica-para-Latinoamerica-CDKN.pdf>
- Carabajal, G., Agosta, E., & Canziani, P. (2009). *Validación de los datos de la línea base del modelo climático regional PRECIS, el reanálisis ERA40 y datos CRU en la región dentro de Sudamerica .* https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/42039681/BASE_LINE_DATA_VALIDATION_USED_THE_REGIO20160204-25126-x8qgor.pdf?1454588923=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBASE_LINE_DATA_VALIDATION_USED_THE_REGIO.pdf&Expires=1623725496&Signature=arYTeHOeun~hu4TnuFbReBde3bcF9CSUQjEnyP8z8KlxDER56nlYDWrXJx0T85dGwRfO6~WkIG9B6jLH74Hk5pvtuR0dg9WJBVk512lYdom-IwxBCf32mongxQSkew5alO4yRbVwb8jqj4pWzZ7fj7lltFnIKorvHzXCM9tOe5ZyfGC CG4eaefwlSoyd37AX5X997g2eIGHN2Hlb6gLrSKPWyzae75DHDWddtyFs2ZYR0tZleGakipEhiiCBO0QoXtLVyZBvTeigJmHCc7Cw69r71EpZkEDzpEjLID8WS611FUzOBzT8vWAEDYtNDMxGHPQhtiQ0OWrmcrAbNCM8w__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- CCGUCC, & SEI. (2009). *Guía metodológica - Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP.* https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- CIIFEN. (2014). *Escenarios y Proyecciones | CIIFEN.* <https://ciifen.org/escenarios-y-proyecciones/>
- Conde, A., & Gay, C. (2008). *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional Primera versión.* <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/1/1574/CC019.pdf?sequence=1>

UCUENCA

Crespo, A. (2014). *Cerca de la Píscícola Chirimichay, presenta grandes sectores dedicados a la agricultura, con pequeñas áreas que conservan la vegetación natural. Finalmente la ciudad de Cuenca hasta Sayausí, el área corresponde a urbanizaciones y sembríos.*

<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4222/1/10784.pdf>

Crespo, D., Albiac, J., Esteban, E., & Kahil, T. (2020). *Beneficios Medioambientales de los Ecosistemas en el Modelo Hidroeconómico de la Cuenca del Ebro*.
https://citarea.cita-aragon.es/citarea/bitstream/10532/5108/1/2020_230.pdf

ENSEMBLES. (2009). *ENSEMBLES | FIC Fundación para la Investigación del Clima*.
<https://www2.ficlima.org/ensembles/>

Escriva-Bou, A. (2012). *Análisis Hidroeconómico de la Adaptación al Cambio Climático en Sistemas de Gestión de Recursos Hídricos. Aplicación a la Cuenca del Júcar* [Universidad Politécnica de Valencia].
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18402/Trabajo Final de Máster Àlvar Escrivà i Bou.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18402/Trabajo%20Final%20de%20Máster%20Àlvar%20Escrivà%20i%20Bou.pdf?sequence=1)

Esteve, P., Varela, C., Blanco, I., & E. Downing, T. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120, 49–58.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.09.017>

ETAPA EP. (2013). *Planes maestros de agua potable y saneamiento II fase*.
https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/convocatoriatixan/8.9.PROCEDIMIENTO_DEL_PLAN_SEGURIDAD_Y_SALUD_PARTE_1.pdf

ETAPA EP. (2021). *Plantas de potabilización del cantón de cuenca*.
<https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable/operacion-y-mantenimiento/plantas-de-potabilizacion>

FAO56. (2006). *Guías para la determinación de los requerimientos de agua de cultivos*.
<https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

GAD San Joaquín. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia de San Joaquín*.
<https://odsterritorioecuador.ec/wp-content/uploads/2019/04/PDOT-PARROQUIA-SAN-JOAQUIN-2015.pdf>

GAD Sayausí. (2015). *Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia de “Sayausí.”*
http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0160027120001_Dia

UCUENCA

gnostico_Sayausí_14-05-2015_11-26-47.pdf

Galarza, M., & Chicaiza, O. (2008). *Propuesta agroproductiva sustentable para la microcuenca del río Culebrillas, parroquia Sayausí, provincia del Azuay.* <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/458/1/06664.pdf>

Gomezcoello, C. (2020). *Resiliencia de la microcuenca del río Matadero frente a riesgos exógenos* [Universidad de Cuenca]. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Trabajo de titulación.pdf

González, A., & Hernández, M. (2020). *Implementación del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System) a la cuenca del río Apulo para la determinación de la disponibilidad hídrica de la cuenca bajo escenarios de cambios en usos del suelo* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/29385/6/2020andersongonzalez.pdf>

González, A., & Hernández, M. (2020). *Implementación del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System) a la cuenca del río Apulo para la determinación de la disponibilidad hídrica de la cuenca bajo escenarios de cambios en usos del suelo* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/29385/2020andersongonzalez.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Guerrero, A. (2015). Demanda hídrica y calidad de agua de uso agrícola de la cuenca del río Jequetepeque, Perú. *REBIOL*, 35(2), 5–18.

Hakami-Kermani, A., Babazadeh, H., Porhemmat, J., & Sarai-Tabrizi, M. (2020). An uncertainty assessment of reservoir system performance indices under the climate change effect. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 889–904. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.03.015>

Khalil, A., Rittima, A., & Phankamolsil, Y. (2018). The projected changes in water status of the Mae Klong Basin, Thailand, using WEAP model. *Paddy and Water Environment* 2018 16:3, 16(3), 439–455. <https://doi.org/10.1007/S10333-018-0638-Y>

Kiniouar, H., Hani, A., & Kapelan, Z. (2017). Water Demand Assessment of the Upper Semi-arid Sub-catchment of a Mediterranean Basin. *Energy Procedia*, 119, 870–882. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.140>

Lema, M., & Plaza, V. (2009). *Modelación hidrológica de la cuenca (alta y media) del* 108

UCUENCA

- río Pastaza aplicando el modelo de simulación WEAP (Water Evaluation and Planning System) [Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1780/1/CD-2366.pdf>
- Lozano, X. (2010). *Modelo Hidroeconómico para el análisis del impacto de cambio climático. Aplicación a la cuenca del río Serpis* [Universidad Politécnica de Valencia].
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11339/MoHiEvIccCSerpis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MAGAP. (2014). *Manual de Riego Parcelario*. <https://www.agricultura.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/Manual-de-rieo-parcelario.pdf>
- Martínes, A., & Pesántez, J. (2015). *PROPUESTA DE MODELO DE GESTIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TOMEBAAMBA, COMO HERRAMIENTA DE MANEJO INTEGRADO Y CONSERVACIÓN* [Universidad del Azuay].
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/4576>
- Martínez, J. (2012). *Diagnóstico del inventario de recursos hídricos en la provincia del Azuay* [Universidad política Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/3680/1/UPS-CT002575.pdf>
- Martínez, Y., & Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *SCIELO*, 39.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005
- MINAGRI. (2015). Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego. In *Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego (DGIAr)* (p. 54).
https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/manual-rieo/manual_determinacion_eficiencia_rieo.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Parque Nacional Cajas / Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador*. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/areas-protegidas/parque-nacional-cajas>
- Ngene, B. U., Nwafor, C. O., Bamigboye, G. O., Ogbiye, A. S., Ogundare, J. O., & Akpan, V. E. (2021). Assessment of water resources development and exploitation in Nigeria: A review of integrated water resources management approach. *Helijon*, 7(1), e05955. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2021.e05955>
- Olsson, J., Arheimer, B., Borris, M., Donnelly, C., Foster, K., Nikulin, G., Persson, M., Perttu, A. M., Uvo, C. B., Viklander, M., & Yang, W. (2016). Hydrological Climate

UCUENCA

- Change Impact Assessment at Small and Large Scales: Key Messages from Recent Progress in Sweden. *Climate* 2016, Vol. 4, Page 39, 4(3), 39. <https://doi.org/10.3390/CLI4030039>
- ONU-DAES. (2015). Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015. Áreas temáticas: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). *EL AGUA, FUENTE DE VIDA.* <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>
- Ordóñez, F. (2004). *Ecuador: Análisis del Sector Agua Potable y Saneamiento*. <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/388/14.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pachauri, R. K., Meyer, L., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Jiang, K., Jiménez Cisneros México, B., Kattsov, V., Lee, H., Minx, J., Mulugetta, Y., Brinkman, S., Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N., & Boxmeer, F. (2014). *Cambio climático 2014 - Informe de síntesis*. <http://www.ipcc.ch>.
- Pacheco, J., Tenesaca, C., Reibán, M., Astudillo, L., Cordero, P., & Merchán, M. (2019). *Evaluación de los efectos de las actividades socioeconómicas en el cambio del uso del suelo*.
- Palacios, K. (2017). "ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA [Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28445/1/Trabajo de Titulación.pdf>
- Parra, M. (2016). *Implementar el sistema de modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua en la cuenca del río Machángara* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/25834/1/Tesis.pdf>
- Pellicer, F., Perni, Á., & Matínez, J. (2021). *Impacto económico del cambio climático sobre la agricultura en regadío de la Demarcación Hidrográfica del Segura*. <https://doi.org/10.31428/10317/10403>
- Pérez, C. D., Gil, L., & Saiz, P. (2021). An actionable hydroeconomic Decision Support System for the assessment of water reallocations in irrigated agriculture. A study of minimum environmental flows in the Douro River Basin, Spain. *Journal of Environmental Management*, 298, 113432. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113432>

UCUENCA

- Pesáñez, J. (2015). *Propuesta de modelo de gestión de la subcuenca del río Tomebamba como herramienta de manejo integrado y conservación* [Universidad del Azuay]. <http://201.159.222.99/bitstream/datos/4576/1/11063.pdf>
- Piedra, A. (2017). *Estudio ambiental del sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento.* <https://maeazuay.files.wordpress.com/2017/03/estudio-ambiental-expost-del-sistema-de-abastecimiento-de-agua-potable-para-la-ciudad-de-cuenca-en-su-etapa-de-operacion-y-mantenimiento.pdf>
- Rincón, J., Merchán, D., Sparer, A., Rojas, D., & Zarate, E. (2017). La descomposición de la hojarasca como herramienta para evaluar la integridad funcional de ríos altoandinos del sur del Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 65(1), 321–334. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i1.23233>
- Salinas, R., & Sarmiento, P. (2019). *Efecto de la elevación en la distribución espacio-temporal de la precipitación a escala mensual en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay usando datos de radar* [Universidad de Cuenca]. <https://core.ac.uk/reader/288576920>
- Secretaría del agua. (2016, April). *Informe de viabilidad Técnica: “Diseño hidráulico sanitario de ampliación de la planta de tratamiento de agua potable de Tixan - Modulo II-1.100 litros por segundo.”* https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/convocatoriatixan/9.2.INFORME_DE_VIABILIDAD_TECNICA.pdf
- Sharma, G., Singh, A., & Jain, S. (2022). Hybrid deep learning techniques for estimation of daily crop evapotranspiration using limited climate data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107338. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2022.107338>
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro - sur de Chile. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 37–58. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531971002>
- Thornton, P. K., Erickson, P. J., Herrero, M., & Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
- Urquiza, A., & Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y

UCUENCA

conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire Des Amériques*, 218. <https://doi.org/10.4000/orda.1774>

Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., & Dile, Y. T. (2021). Modelling hydrological processes under climate change scenarios in the Jemma sub-basin of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Climate Risk Management*, 31, 100272. <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2021.100272>