



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de un modelo de Dinámica de Sistemas (SD)  
para el sistema de recursos hídricos regulado del río  
Zambeze

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Arias López, Sebastián Esteban

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# Trabajo Fin de Máster

## *DESARROLLO DE UN MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS (SD) PARA EL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS REGULADO DEL RÍO ZAMBEZE*

### **Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

### **Autor:**

*SEBASTIÁN ESTEBAN ARIAS LÓPEZ*

### **Tutor:**

*DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ*

### **Cotutor/es:**

*DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES*

### **Director Experimental:**

*DR. ADRIÀ RUBIO MARTÍN*

**JUNIO, 2023**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen

En este trabajo de investigación, se presenta un caso de estudio modelación de sistemas de gestión de recursos hídricos utilizando dinámica de sistemas. El objetivo principal es desarrollar un modelo de dinámica de sistemas que simule las interacciones entre el suministro de agua, la demanda de riego, la producción de energía y la conservación ecológica, y evaluar su rendimiento mediante diferentes estrategias de gestión en un escenario de condiciones climáticas cambiantes. El modelo incorpora reglas de operación simples para aumentar su funcionalidad y ser relevante para las diversas partes interesadas en la gestión de estos sistemas.

Se utilizaron varios indicadores de rendimiento para evaluar la efectividad de diferentes objetivos de gestión, como los déficits en la producción de energía, el suministro de agua para riego y la conservación ecológica.

Este estudio destaca la flexibilidad y la capacidad de la metodología de dinámica de sistemas para representar sistemas complejos de gestión de recursos hídricos. A pesar de utilizar reglas de operación simples, el sistema logra un rendimiento comparable a sistemas que emplean funciones más complejas.

Además, se analizó el impacto de diferentes escenarios de cambio climático en el sistema. Los resultados muestran una disminución significativa en la disponibilidad de agua, lo que genera un deterioro sustancial en los indicadores de rendimiento. El estudio resalta la vulnerabilidad de estos sistemas ante la disminución de los recursos hídricos y sugiere la necesidad de una planificación adaptativa para enfrentar estos desafíos, como aumentar la capacidad de almacenamiento o mejorar la eficiencia en la producción agrícola.

En conclusión, el modelo de dinámica de sistemas demostró su flexibilidad al simular diferentes escenarios y objetivos de gestión para sistemas de recursos hídricos. A pesar de sus limitaciones, el modelo ofrece una perspectiva sobre los posibles impactos del cambio climático y destaca la importancia de incorporar posibles proyecciones en la demanda para una representación más integral del sistema. Esta investigación respalda el uso de modelos de dinámica de sistemas como una alternativa para la modelación y gestión de sistemas de recursos hídricos, ofreciendo oportunidades de modelación participativa si es necesario.

## Abstract

This research paper presents a case study on the application of system dynamics modeling to water resource management systems. The study aims to develop a system dynamics model to simulate the interactions between water supply, irrigation demand, energy production, and environmental conservation, and evaluate the performance of different management strategies in the face of changing climatic conditions. The model incorporated simple operational rules to enhance its usability for stakeholders involved in real-world system management. Various performance indicators were used to assess the effectiveness of different management objectives, including deficits for energy production, irrigation supply, and environmental conservation.

The study highlights the flexibility and competence of system dynamics methodology in representing complex water resource management systems. Despite the use of simple operational rules, the model performed comparably to models employing more complex functions.

Furthermore, the study examined the projected impacts of climate change on the water resource system. The results showed a significant decrease in water availability, leading to a substantial deterioration in the analyzed performance indicators. The study emphasizes the vulnerability of such systems to reduced resource inputs and suggests the need for adaptive planning to address these challenges, such as increasing storage capacity or improving agricultural efficiency.

In conclusion, the system dynamics model demonstrated its flexibility in simulating different scenarios and management objectives for water resource systems. Despite its limitations, the model provided insights into the potential impacts of climate change and highlighted the importance of considering future demand projections for a more complete representation of the system. The research findings support the utilization of system dynamics modeling as an alternative approach for modeling and managing water resource systems, offering opportunities for participatory decision-making if required.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Marco del proyecto . . . . .	10
1.2. Motivación . . . . .	11
1.3. Objetivo . . . . .	12
1.4. Alcance . . . . .	12
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>14</b>
2.1. Dinámica de sistemas . . . . .	14
2.2. Nexo Agua-Alimento-Energía-Ecosistema . . . . .	16
2.3. Proyecciones climáticas . . . . .	18
2.3.1. Trayectorias de concentración representativa (RCP) . . . . .	20
2.3.2. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) . . . . .	21
<b>3. Caso de estudio: cuenca del Río Zambeze</b>	<b>24</b>
3.1. Antecedentes generales . . . . .	24
3.2. Condiciones climáticas . . . . .	27
3.3. Regulación y producción energética . . . . .	31
3.4. Agricultura, ganadería y pesca . . . . .	33
3.5. Gobernabilidad y cooperación . . . . .	34
3.6. Sequías e inundaciones . . . . .	35
3.7. Agua subterránea . . . . .	37
<b>4. Metodología</b>	<b>38</b>
4.1. Modelo de dinámica de sistemas . . . . .	38
4.1.1. Indicadores del sistema . . . . .	40
4.1.2. Suministro a irrigación . . . . .	41
4.1.3. Demandas de irrigación . . . . .	42
4.1.4. Demandas de producción energética . . . . .	43
4.1.5. Funciones de desembalse . . . . .	43

4.1.6.	Optimización del sistema . . . . .	44
4.2.	Escenarios de cambio climático . . . . .	45
4.2.1.	Proyecciones climáticas . . . . .	45
4.2.2.	Modelo hidrológico . . . . .	46
4.2.3.	Proporcionalidad de subcuencas . . . . .	48
4.2.4.	Red neuronal artificial . . . . .	49
<b>5.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>50</b>
5.1.	Modelo de dinámica de sistemas . . . . .	50
5.2.	Representación del sistema . . . . .	53
5.2.1.	Embalses . . . . .	54
5.2.2.	Nodos . . . . .	55
5.3.	Reglas de operación de embalses . . . . .	56
5.4.	Optimización del modelo . . . . .	56
5.4.1.	Rendimiento del modelo . . . . .	57
5.5.	Obtención de curvas de decisión . . . . .	61
5.6.	Escenarios de cambio climático . . . . .	64
5.6.1.	Aportaciones periodo de control . . . . .	64
5.6.2.	Proyección de aportaciones . . . . .	68
5.6.3.	Rendimiento del modelo en periodo de control . . . . .	71
5.6.4.	Rendimiento del modelo en escenarios de cambio climático . . . . .	72
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>76</b>
	<b>Referencias</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>81</b>
7.1.	Anexo 1: Resultados optimización modelo SD datos observados . . . . .	81
7.2.	Anexo 2: Rendimiento de modelo SD optimizado datos observados . . . . .	84
7.3.	Anexo 3: Proyección de aportaciones . . . . .	85
7.4.	Anexo 4: Rendimiento de modelo SD optimizado escenarios de cambio climático . . . . .	97

# Índice de tablas

1.	Eventos extremos históricos en la ZRB . . . . .	36
2.	Demandas en $\text{hm}^3$ de los distritos de irrigación de la cuenca . . . . .	43
3.	Objetivos de producción energética . . . . .	43
4.	VARIABLES DE ESTADO DEL MODELO HBV . . . . .	47
5.	Parámetros del modelo HBV . . . . .	47
6.	Variaciones porcentuales en aportaciones periodo de control respecto a observaciones . . . . .	68
7.	Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Corto Plazo . . . . .	69
8.	Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Mediano Plazo . . . . .	70
9.	Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Largo Plazo . . . . .	70
10.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de producción energética en escenarios de cambio climático . . . . .	73
11.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de suministro a riego en escenarios de cambio climático . . . . .	73
12.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelos SD con objetivo de conservación ecológica en escenarios de cambio climático . . . . .	73
13.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de producción energética en escenarios de cambio climático . . . . .	74
14.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de suministro a riego en escenarios de cambio climático . . . . .	74
15.	Variaciones porcentuales en rendimiento modelos SD con objetivo de conservación ecológica en escenarios de cambio climático . . . . .	74
16.	Pesos de optimización modelo . . . . .	81
17.	Parámetros óptimos función de suministro a riego . . . . .	81
18.	Parámetros óptimos modelo producción energética mono-objetivo . . . . .	82
19.	Parámetros óptimos modelo producción energética multi-objetivo . . . . .	82

20.	Parámetros óptimos modelo suministro a riego mono-objetivo . . . . .	82
21.	Parámetros óptimos modelo suministro a riego multi-objetivo . . . . .	83
22.	Parámetros óptimos modelo conservación ecológica mono-objetivo . . . . .	83
23.	Parámetros óptimos modelo conservación ecológica multi-objetivo . . . . .	83
24.	Rendimiento modelos con objetivo producción energética . . . . .	84
25.	Rendimiento modelos con objetivo suministro a riego . . . . .	84
26.	Rendimiento modelos con objetivo conservación ecológica . . . . .	84
27.	Rendimiento modelos periodo de control . . . . .	97
28.	Rendimiento modelos con objetivo producción energética en escenarios de cambio climático . . . . .	97
29.	Rendimiento modelos con objetivo suministro a riego en escenarios de cambio climático . . . . .	97
30.	Rendimiento modelos con objetivo conservación ecológica en escenarios de cambio climático . . . . .	97

## Índice de figuras

1.	Ejemplo diagrama de bucles causales (izquierda) y diagrama de niveles y flujos (derecha) . . . . .	14
2.	Ejemplo del comportamiento de bucles de refuerzo y balanceo . . . . .	15
3.	Diagrama de las trayectorias de concentración representativas . . . . .	21
4.	Representación gráfica de las trayectorias socioeconómicas compartidas . . . . .	22
5.	Representación gráfica de las SSP principales asociadas a su RCP y aumento de temperatura . . . . .	23
6.	Mapa de la cuenca del río Zambeze . . . . .	25
7.	Esquema de los climas característicos de la zona de la ZRB . . . . .	28
8.	Esquema de las temperaturas promedio en la ZRB . . . . .	29
9.	Precipitación media anual en la ZRB . . . . .	30
10.	Agrupaciones de producción energética del continente africano . . . . .	31
11.	Principales puntos de irrigación operativos y proyectados en la ZRB . . . . .	34
12.	Diagrama de modelo base . . . . .	38



13.	Subcuencas utilizadas en estudio previo . . . . .	39
14.	Demandas de irrigación utilizadas para el modelo . . . . .	42
15.	Curva de regla de operación empleada . . . . .	44
16.	Esquema del modelo HBV . . . . .	46
17.	Subcuencas a modelar utilizando HBV . . . . .	48
18.	Subcuencas a modelar utilizando ANN . . . . .	49
19.	Vista 1 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Representación del sistema.	51
20.	Vista 2 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Reglas de operación. . . .	52
21.	Vista 3 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Gráficas de interés. . . .	52
22.	Indicadores de rendimiento del sistema . . . . .	53
23.	Representación de embalse Itzhi-Tezhi . . . . .	54
24.	Representación de nodos para la zona de Kafue Flats . . . . .	55
25.	Representación regla de operación . . . . .	56
26.	Rendimiento modelos con objetivo de producción energética . . . . .	58
27.	Rendimiento modelos con objetivo de suministro a riego . . . . .	58
28.	Rendimiento modelos con objetivo de conservación ecológica . . . . .	59
29.	Rendimiento modelos con objetivo de conservación ecológica. Déficit de Riego .	59
30.	Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi- objetivo de conservación ecológica . . . . .	61
31.	Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi- objetivo de producción energética . . . . .	62
32.	Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi- objetivo de suministro a riego . . . . .	63
33.	Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi- objetivo de conservación ecológica . . . . .	63
34.	Aportaciones para el periodo de control subcuenca Itzhi-Tezhi . . . . .	65
35.	Aportaciones para el periodo de control subcuenca Victoria Falls . . . . .	65
36.	Aportaciones para el periodo de control subcuenca río Luangwa . . . . .	66
37.	Aportaciones para el periodo de control subcuenca Shire/Malawi . . . . .	66
38.	Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Itzhi-Tezhi	66
39.	Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Victoria Falls	67

40.	Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca río Luangwa	67
41.	Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Shire/Malawi	67
42.	Resultados de indicadores para modelos con objetivo de producción energética.	
	Periodo de Control . . . . .	71
43.	Resultados de indicadores para modelos con objetivo de suministro a riego. Pe-	
	riodo de Control . . . . .	71
44.	Resultados de indicadores para modelos con objetivo de conservación ecológica.	
	Periodo de Control . . . . .	72
45.	Proyección de aportaciones subcuenca Itezhi-Tezhi. Corto plazo. . . . .	85
46.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Itezhi-Tezhi. Corto plazo.	85
47.	Proyección de aportaciones subcuenca Itezhi-Tezhi. Mediano plazo. . . . .	86
48.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Itezhi-Tezhi. Mediano	
	plazo. . . . .	86
49.	Proyección de aportaciones subcuenca Itezhi-Tezhi. Largo plazo. . . . .	87
50.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Itezhi-Tezhi. Largo plazo.	87
51.	Proyección de aportaciones subcuenca Victoria Falls. Corto plazo. . . . .	88
52.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Victoria Falls. Corto	
	plazo. . . . .	88
53.	Proyección de aportaciones subcuenca Victoria Falls. Mediano plazo. . . . .	89
54.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Victoria Falls. Mediano	
	plazo. . . . .	89
55.	Proyección de aportaciones subcuenca Victoria Falls. Largo plazo. . . . .	90
56.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Victoria Falls. Largo	
	plazo. . . . .	90
57.	Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Corto plazo. . . . .	91
58.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Corto plazo.	91
59.	Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Mediano plazo. . . . .	92
60.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Mediano	
	plazo. . . . .	92
61.	Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Largo plazo. . . . .	93
62.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Largo plazo.	93

63.	Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Corto plazo. . . . .	94
64.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Corto plazo. . . . .	94
65.	Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Mediano plazo. . . . .	95
66.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Mediano plazo. . . . .	95
67.	Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Largo plazo. . . . .	96
68.	Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Largo plazo. . . . .	96

# 1. Introducción

## 1.1. Marco del proyecto

El presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo gracias al apoyo de una beca otorgada por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia, fundamental para el desarrollo de este estudio, brindando recursos y oportunidades que han permitido llevar a cabo una investigación exhaustiva y de calidad. La investigación se enmarca en el proyecto europeo GoNEXUS y ha sido desarrollada en estrecha colaboración con el Politécnico de Milán, enriqueciendo este proyecto al combinar conocimientos y experiencia de diferentes contextos y perspectivas.

El proyecto GoNEXUS tiene como objetivo desarrollar un marco para diseñar y evaluar soluciones innovadoras para una gobernanza coordinada, eficiente y sostenible del nexo agua-energía-alimentos-ecosistema. Las soluciones combinarán cambios de políticas (alineación de políticas existentes de agua, energía, alimentos y medio ambiente) y otras opciones de enfoque suave (por ejemplo, una gestión más eficiente, herramientas de gestión de riesgos) con medidas técnicas e infraestructurales para un futuro más resiliente. La mejora de los modelos a diferentes escalas y entre escalas respaldará la evidencia para una mejor comprensión de las interconexiones del nexo. Además de integrar enfoques de modelización sólidos con diálogos intersectoriales, el proyecto irá más allá del estado del arte al abordar específicamente la adopción de políticas y los mecanismos de gobernanza, incluido el cambio institucional, para co-desarrollar soluciones social y políticamente factibles. La utilidad y eficacia del marco se mostrarán en una serie de estudios de caso geográficamente, económicamente, climáticamente y políticamente diversos que abarcan todos los niveles, desde local/cuenca fluvial hasta continental y global, incluidas cuencas transfronterizas en Europa (Danubio, Tajo-Segura, Lago Como) y África (Senegal, Zambeze).

Esta investigación se realiza en constante coordinación con el Politécnico de Milán (POLIMI), alineando el enfoque y el objetivo de la modelación, y comparando los resultados con los obtenidos en un modelo de Función de Base Radial desarrollado con anterioridad en este centro. Además, el constante apoyo del equipo de trabajo de POLIMI fue fundamental para el desarrollo de los escenarios de cambio climático, tanto en la obtención de los datos como en el tratamiento de estos.

## 1.2. Motivación

El presente trabajo surge de la necesidad de profundizar en la correcta gestión de los sistemas de recursos hídricos regulados, y desarrollar herramientas que le entreguen la posibilidad de analizar distintos escenarios y políticas a las partes interesadas. Es crucial lograr una representación adecuada de estos sistemas, ya que su desempeño en diversas situaciones influye directamente en el bienestar de las personas y los ecosistemas. El desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas para sistemas de recursos hídricos puede ser una herramienta útil para la representación del sistema en colaboración con los diversos sectores involucrados, permitiendo un proceso iterativo y participativo, y posibilitando comprender cómo se relacionan las distintas variables. Asimismo, esta herramienta ayuda a prever escenarios futuros y evaluar la efectividad de diferentes estrategias de gestión. Por ejemplo, un modelo de dinámica de sistemas podría ayudar a los gestores de recursos hídricos a simular el impacto de diferentes escenarios de sequía en la disponibilidad de agua para diferentes usuarios, y a identificar medidas de mitigación para garantizar un suministro adecuado de agua en caso de escasez.

La cuenca del río Zambeze es un sistema fluvial altamente interconectado que se extiende a través de ocho países de África del Sur, lo que la convierte en el sistema fluvial más compartido de la región (SARDC et al., 2012). Además, se espera que este sistema experimente un aumento significativo de la población (Tilmant et al., 2010) y una expansión de la agricultura (World Bank, 2010), lo que naturalmente tendrá efectos en la cantidad de recurso hídrico consumido. Dada esta complejidad, es esencial comprender cómo las diferentes partes del sistema se relacionan entre sí y qué estrategias pueden mejorar su rendimiento.

Si bien la disponibilidad de datos globales es cada vez mayor, la región africana sigue teniendo una brecha importante en cuanto a los datos y mediciones de sus sistemas. La metodología de dinámica de sistemas permite una complejización al punto que uno requiera, o bien, al punto que los datos lo permitan. El desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas puede generar una herramienta valiosa para presentar información de manera comprensible a aquellos que no tienen experiencia técnica y fomentar su participación en la gestión del sistema fluvial del Zambeze.

### 1.3. Objetivo

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal explorar la aplicación de modelos de dinámica de sistemas en la gestión de recursos hídricos y demostrar su utilidad en la toma de decisiones. Para ello, se evaluará el caso práctico de la cuenca del río Zambeze, evaluando diferentes objetivos, como la producción de energía, el suministro de agua para riego y la conservación del medio ambiente.

Se pretende desarrollar un modelo de dinámica de sistemas que permita obtener reglas de operación simples, las cuales se espera sean de gran utilidad para los grupos responsables de la gestión del sistema real. El enfoque de dinámica de sistemas permite ver la variación de todas las variables del sistema y como la interconexión de estas afecta el funcionamiento global.

El objetivo es proporcionar información valiosa que sirva como base para la toma de decisiones informadas en la gestión del recurso hídrico. Se buscará evaluar el desempeño de las reglas de operación desarrolladas en diferentes escenarios, incluyendo aquellos relacionados con el cambio climático. Para esto, se espera poder desarrollar diversos escenarios de proyecciones, basados en modelos climáticos globales con reducción de escala, para obtener escenarios de aportaciones al sistema y analizar el desempeño del modelo utilizando estos datos de entrada. De esta manera, se podrá evaluar cómo las decisiones tomadas bajo diferentes condiciones pueden afectar los resultados y cómo se puede adaptar la gestión para enfrentar desafíos futuros.

### 1.4. Alcance

En este trabajo de investigación, se identifican dos limitaciones principales relacionadas con la disponibilidad de datos. En primer lugar, la falta de datos sobre aguas subterráneas impide que el modelo de dinámica de sistemas pueda tener en cuenta esta parte importante del sistema hídrico. Esto limita la representación y la capacidad de análisis en relación con el comportamiento y la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas.

En segundo lugar, la ausencia de datos sobre la gestión histórica de los embalses constituye una limitación adicional. La falta de información histórica sobre la gestión de los embalses impide que el modelo pueda representar con precisión la situación actual de la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Zambeze. Además, esto dificulta la comparación de los resultados obtenidos con el modelo de dinámica de sistemas con respecto a la gestión real de los embalses.

Para abordar esta limitación y contar con un punto de comparación, se hace mención al modelo desarrollado anteriormente de función de base radial. Este modelo previo puede servir como referencia para evaluar el desempeño y la eficacia de las reglas de operación desarrolladas en el nuevo modelo de dinámica de sistemas.

A pesar de estas limitaciones, el trabajo de investigación se centrará en el desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas preciso que permita obtener reglas de operación simples para la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Zambeze. Aunque no se pueda tener en cuenta la gestión histórica de los embalses ni los datos de aguas subterráneas, se espera que el modelo proporcione información valiosa y útil para la toma de decisiones y la gestión efectiva del recurso hídrico en la cuenca.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas corresponde a un método para operacionalizar el pensamiento sistémico, con la finalidad de comprender cómo interactúan los diferentes subsistemas y cómo afectan al comportamiento general del sistema (Mirchi et al., 2012). Centrales a la dinámica de sistemas se encuentran las relaciones causales, las cuales pueden ser positivas, es decir, cuando un incremento en la variable A resulta en un incremento en la variable B y viceversa, o negativas, donde el comportamiento es opuesto.

Existen dos métodos principales para desarrollar modelos de dinámica de sistemas:

- **Diagrama de Bucles Causales:** permiten capturar gráficamente las relaciones entre los subsistemas interactuantes y son considerados un paso conceptual en el proceso de modelación. A través de ellos, es posible identificar la presencia de bucles de retroalimentación, la dominancia de bucles y la existencia de retardos.
- **Diagramas de Niveles y Flujos:** a partir del diagrama de bucles causales, se puede desarrollar un diagrama de niveles y flujos que caracteriza numéricamente la acumulación o agotamiento de niveles y el flujo de cantidades dentro del sistema.

En la figura 1 se presenta un ejemplo de un diagrama de bucles causales y uno de niveles y flujos para ilustrar las diferencias entre ambos métodos de modelación. Ambos diagramas son esenciales para el proceso de modelación de dinámica de sistemas y se utilizan de manera complementaria para desarrollar un modelo completo y preciso.

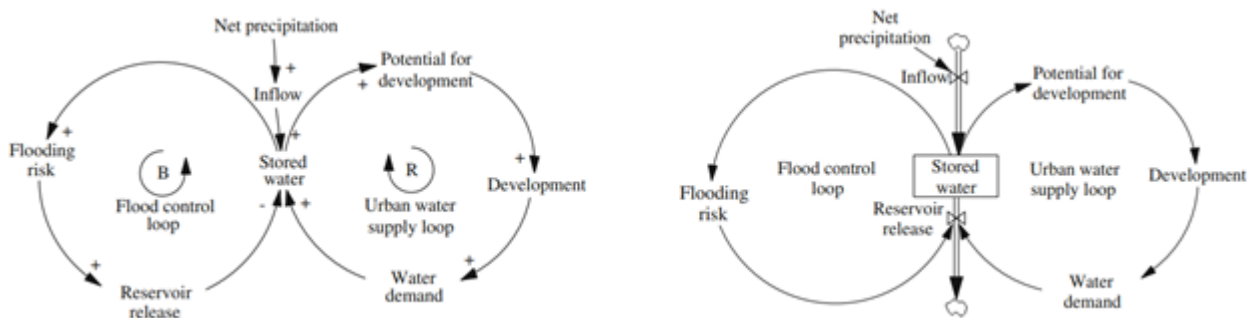


Figura 1: Ejemplo diagrama de bucles causales (izquierda) y diagrama de niveles y flujos (derecha) (Mirchi et al., 2012)



La figura 2 ilustra la representación de dos bucles de retroalimentación: uno de refuerzo (identificado con la letra R), y uno de balance (identificado con la letra B), y que efecto tendrían sobre una variable de interés, en este caso el almacenamiento. Los bucles de retroalimentación de refuerzo se caracterizan por tener tendencias continuas de crecimiento o disminución, mientras que los bucles de balance reducen la diferencia entre el estado actual y un estado deseado o de equilibrio. Como regla general, un bucle es de refuerzo si la cantidad de relaciones causales negativas es un número par, y es de balance en caso contrario.

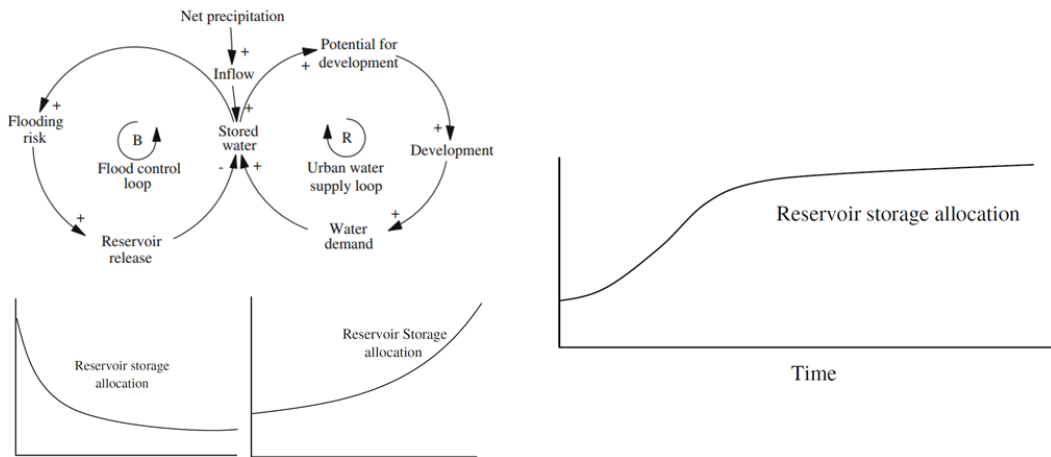


Figura 2: Ejemplo del comportamiento de bucles de refuerzo y balanceo (Mirchi et al., 2012)

El desarrollo de modelos de dinámica de sistemas es fundamental para comprender de manera integral los sistemas de recursos hídricos. Esto permite identificar las interrelaciones entre los subsistemas y evaluar distintos escenarios. Estos modelos son útiles, por ejemplo, para desarrollar políticas de manejo de aguas y evaluar el comportamiento de un sistema con proyecciones de cambio climático. Además, la visualización de tendencias presentes y su efecto en el comportamiento global puede facilitar la modelación participativa y mejorar la comprensión del comportamiento del sistema en cuestión.

Un ejemplo del uso de dinámica de sistemas en modelación participativa es un estudio donde se involucró a las partes interesadas (stakeholders) en todo el proceso de modelación para representar de mejor manera las interrelaciones en el nexo Agua-Alimento-Energía, e identificar desafíos para la zona como lo son la escasez hídrica, la dependencia de combustibles fósiles, y prácticas agrícolas poco sostenibles (González-Rosell et al., 2020). A través de diversos talleres y reuniones se puede tener en cuenta la experiencia de las personas que más interactúan con el

sistema, y generar resultados más valiosos para ellos, que tendrán una probabilidad más alta de aplicación.

Para lograr una implementación exitosa de políticas de manejo integral de recursos hídricos, es fundamental contar con un conocimiento interdisciplinario y estrategias de colaboración entre las distintas partes del sistema, especialmente en el estudio del nexo Agua-Alimento-Energía (WEF). En este sentido, la dinámica de sistemas se presenta como una herramienta altamente efectiva para representar estos sistemas complejos y analizar las interacciones presentes, así como los diferentes efectos que estas tienen sobre el sistema en su conjunto. Un ejemplo de éxito en la implementación de políticas de manejo integral de recursos hídricos es el caso de estudio de Irán (Samadi-Foroushani et al., 2022). En este caso, se logró una mejora del 16% en la eficiencia de irrigación y un aumento del 5% en el rendimiento agrícola anual gracias a la aplicación de políticas de manejo integral. Estos resultados demuestran la importancia de una gestión integrada de los recursos hídricos y la utilidad de herramientas como la dinámica de sistemas para lograr una gestión eficiente y sostenible.

## **2.2. Nexo Agua-Alimento-Energía-Ecosistema**

El nexo Agua-Alimento-Energía-Ecosistema (WEFE por sus siglas en inglés) se refiere a la relación y dependencia entre estos cuatro elementos en un sistema. Estos sistemas están intrínsecamente interconectados, con fuertes sinergias y trade-offs en consumo del recurso que llevan a desafiantes consecuencias ambientales y económicas (Hirsh Bar Gai et al., 2022). Por ejemplo, la producción de alimentos requiere de agua y energía, mientras que la producción de energía puede afectar la calidad del agua y el medio ambiente. Además, el agua y el medio ambiente son factores críticos en la producción de alimentos, y cualquier cambio en la calidad o cantidad del agua puede tener un impacto directo en la producción de energía.

Por lo tanto, para lograr una gestión efectiva y sostenible de estos recursos, se requiere un enfoque interdisciplinario que considere la interdependencia de estos elementos y promueva una colaboración estratégica entre las partes involucradas. La implementación de políticas y prácticas de gestión integrada de recursos naturales que aborden el nexo puede conducir a soluciones más efectivas y sostenibles, apuntando a garantizar el acceso a los recursos necesarios para satisfacer las necesidades humanas y preservar el medio ambiente.

El nexa WEFÉ es un tema que se estudia en diferentes escalas temporales y espaciales. Por ejemplo, en un estudio a escala de hogar realizado por Hussien et al. en 2017 (Hussien et al., 2017), se analizan los efectos de factores como el tamaño de las familias, el ingreso y la dieta, en el consumo de agua, alimentos y energía. Por otro lado, el Global Trade Analysis Project estudia los impactos de políticas de comercio en el nexa, y el modelo Global Land Use and Technological Change analiza los efectos de cambios en el uso del suelo en el nexa, ambos a escala global. Estos estudios aportan información valiosa sobre el WEFÉ y permiten comprender mejor sus complejas interacciones. (Hirsh Bar Gai 2022).

El WEFÉ es un sistema complejo que tiene múltiples interacciones y efectos. La dinámica de sistemas se puede utilizar para modelar y analizar estos sistemas, comprendiendo cómo las diferentes variables interactúan entre sí. Algunos ejemplos de la dinámica de sistemas aplicada al nexa son:

- **Gestión de recursos hídricos:** analizar cómo los cambios en el uso del agua afectan la disponibilidad de este recurso para la producción de alimentos y energía. Por ejemplo, se puede modelar cómo el aumento de la demanda de agua para la producción de biocombustibles afecta la disponibilidad de agua para la producción de alimentos y cómo esto a su vez afecta la seguridad alimentaria (Vicaró et al., 2022)
- **Seguridad alimentaria:** analizar cómo las variaciones en la producción de alimentos afectan la seguridad alimentaria. Por ejemplo, se puede modelar las interacciones del nexa, junto a perfiles de nutrición, para generar políticas que apunten a la seguridad alimentaria (Fernández-Ríos et al., 2021).
- **Transición energética:** analizar cómo la transición hacia fuentes de energía renovable afecta el ambiente y la disponibilidad de recursos. Por ejemplo, se puede modelar cómo la implementación de políticas de energía renovable, como la hidroeléctrica, afecta la disponibilidad de agua para el regadío en épocas secas, y a su vez, el impacto que esto tiene en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la seguridad energética.

- **Cambio climático:** Analizar cómo el cambio climático afecta la disponibilidad de recursos y cómo esto a su vez afecta la seguridad alimentaria y la seguridad energética. Por ejemplo, se puede modelar cómo la variabilidad climática afecta la disponibilidad de agua, la producción de cultivos y la producción hidroeléctrica.

Si bien el estudio del nexo busca representar las interacciones entre los subsistemas, esto puede resultar desafiante. La falta de datos y la dificultad de integrar perspectivas de diversas disciplinas muchas veces confinan los estudios a esferas monodisciplinarias (Albrecht et al., 2018). La modelación participativa entre las partes interesadas, bien soportada por un enfoque de dinámica de sistemas, puede ayudar a superar esta visión unidisciplinaria y facilitar resultados más aplicables en sistemas complejos reales.

### 2.3. Proyecciones climáticas

La existencia del cambio climático ya es una realidad difícil de contradecir. Se ha vuelto normal escuchar que batimos récords de temperaturas anuales (WMO, 2023), y es difícil no sentirse abatido al ver imágenes de las afecciones del cambio climático sobre nuestros ecosistemas (NASA, 2023; New York Times, 2022). En este contexto de incertidumbre, donde los escenarios más pesimistas se tornan cada vez más difíciles de separar de los más realistas, la variación del recurso hídrico toma un papel fundamental a la hora de realizar proyecciones futuras. Los cambios en la magnitud y estacionalidad de las lluvias tienen efectos directos tanto en el estado ecológico de los entornos naturales como en el desarrollo socioeconómico de las zonas intervenidas por el ser humano.

En el sexto reporte del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, 2022) se informa un aumento de  $1,1^{\circ}\text{C}$  sobre niveles preindustriales, y se espera que alcance los  $1,5^{\circ}\text{C}$  en dentro de las próximas dos décadas, siendo el resultado inequívoco de la actividad humana. Además, la frecuencia de escenarios extremos como lo son olas de calor, sequías e inundaciones va a seguir aumentando junto al aumento de temperatura global.

Distintas iniciativas han sido creadas con el objetivo de coordinar y optimizar el estudio del cambio climático, lo que permite enfocar los recursos en las áreas que aún requieren investigación y compartir de manera más efectiva los resultados obtenidos entre los grupos de investigación. Estas iniciativas fomentan la colaboración y el intercambio de conocimientos entre investigadores

de todo el mundo, lo que permite una mejor comprensión de este fenómeno y una toma de decisiones más informada. Algunas de estas iniciativas incluyen el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) y la Iniciativa de Modelado del Clima Regional (CORDEX), desarrolladas bajo el Programa Mundial de Investigación sobre el Clima (WCRP).

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) busca aumentar nuestro entendimiento del cambio climático y sus potenciales impactos, comparando los resultados de distintos modelos desarrollados por grupos de investigación alrededor del mundo. Esto permite estandarizar las simulaciones y comparar el desempeño de los distintos modelos en diferentes regiones (WCRP, 2023).

Aunque los modelos climáticos globales son una herramienta útil para realizar proyecciones climáticas generales, estos trabajan a una escala demasiado grande para abordar estudios a nivel local, como a escala de cuenca. Para ello, se requiere una reducción de escala que permita considerar las características climáticas propias del área de estudio y corregir los posibles sesgos que puedan existir en los datos. Así, es posible obtener proyecciones más precisas y relevantes para la toma de decisiones a nivel local en temas como la gestión del agua, la agricultura y la planificación urbana, entre otros. La iniciativa CORDEX tiene como objetivo proporcionar información climática de alta resolución y proyecciones para distintas regiones alrededor del mundo, con el fin de aumentar el entendimiento y la adaptación a los impactos regionales del cambio climático (CORDEX, 2023). Esta iniciativa reúne a la comunidad científica internacional para desarrollar y evaluar modelos climáticos regionales de alta calidad y asegurar que se incluyan las características específicas de cada región, permitiendo a los usuarios finales, encargados de planificar y tomar decisiones, tener acceso a información climática más precisa y relevante de sus respectivas regiones.

Siempre que los datos lo permitan, se debe estudiar el efecto del cambio climático en los modelos desarrollados, analizando su comportamiento en los distintos escenarios proyectados y evaluando el desempeño de las políticas futuras. Por ejemplo, en la gestión del agua, es necesario considerar la variabilidad del recurso hídrico debido al cambio climático, y cómo esto puede afectar su disponibilidad para diferentes usos. Además, se deben evaluar diversas estrategias para adaptarse y mitigar los impactos del cambio climático, tales como la construcción de infraestructuras de almacenamiento de agua o la implementación de prácticas de uso eficiente del recurso. En general, es importante considerar el cambio climático en la planificación y toma

de decisiones en todos los ámbitos, para asegurar la resiliencia y sostenibilidad de los sistemas frente a los impactos del cambio climático.

### 2.3.1. Trayectorias de concentración representativa (RCP)

En el quinto informe de evaluación de la IPCC (IPCC, 2014), se introdujo el concepto de las trayectorias de concentración representativa (RCP por sus siglas en inglés), como herramientas útiles para realizar proyecciones climáticas. Estas trayectorias definieron cuatro niveles de forzamiento radiativo, que corresponden a un aumento en la entrada de energía a nivel de superficie en Watts por metro cuadrado que se espera alcanzar a finales del siglo XXI.

Cada trayectoria se asocia con diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y otros factores climáticos, y se utilizan como base para modelar diferentes escenarios futuros y analizar sus posibles impactos. Las cuatro trayectorias son ampliamente utilizadas en la investigación y la toma de decisiones sobre cambio climático y son conocidas como RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5:

- **RCP2.6:** corresponde al escenario más optimista, en el cual se realiza una mitigación importante desde el futuro inmediato disminuyendo las emisiones anuales de gases de efecto invernadero y manteniéndolas en niveles bajos. Esto permite limitar el aumento de temperatura a 2 grados celsius sobre niveles preindustriales.
- **RCP4.5:** implica continuar aumentando las emisiones, pero luego se produce una disminución desde la segunda mitad del siglo XXI debido a la adopción de políticas climáticas y tecnologías más limpias.
- **RCP6.0:** mantiene un aumento en las emisiones a lo largo de este siglo y no hay políticas importantes de reducción.
- **RCP8.5:** corresponde al escenario más pesimista, donde las emisiones aumentan significativamente durante todo el siglo generando el mayor impacto global.

Las trayectorias de concentración representativa son una herramienta importante para comprender los posibles efectos del cambio climático y la importancia de tomar medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

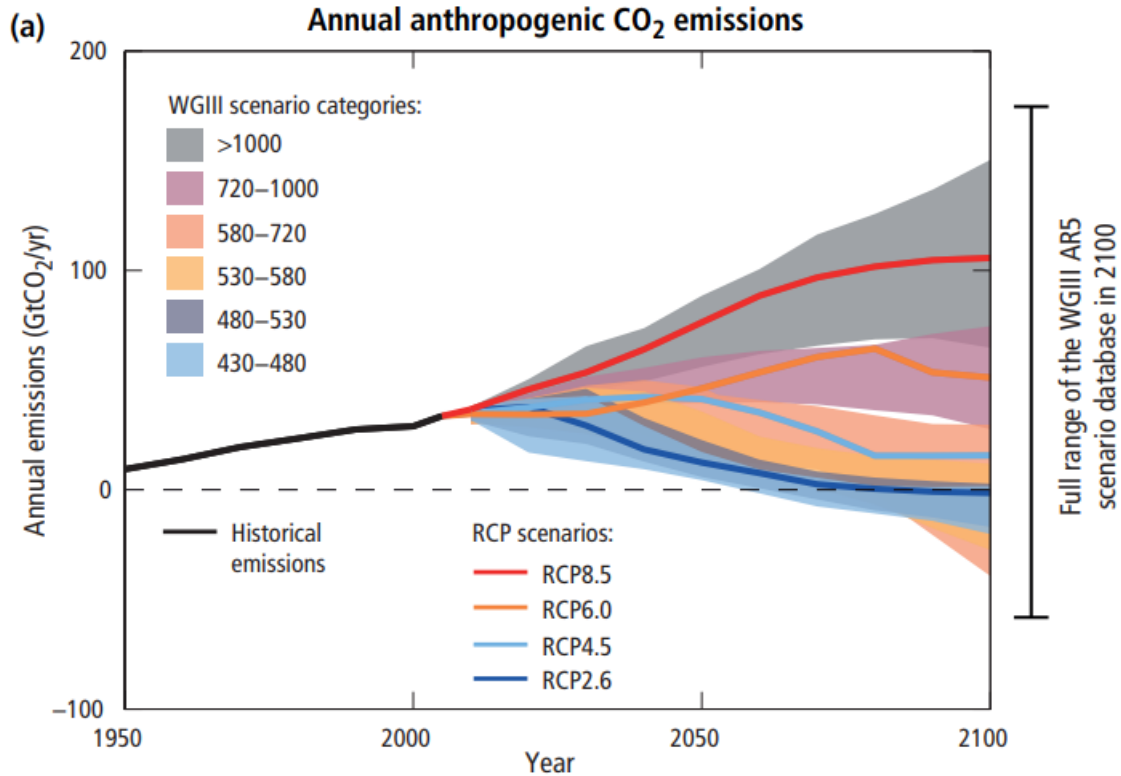


Figura 3: Diagrama de las trayectorias de concentración representativas (IPCC, 2014)

### 2.3.2. Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)

En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014), se introdujo también el concepto de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés), como una serie de posibles trayectorias de desarrollo socioeconómico sin intervención de políticas climáticas. Al combinarlas con las Trayectorias de Concentración Representativa, pretenden entregar un marco más integral para el análisis de los impactos del cambio climático y el desarrollo de políticas de adaptación y mitigación.

A pesar de su introducción en el quinto informe de evaluación, estos conceptos de han utilizado más ampliamente en el último informe de evaluación (AR6) (IPCC, 2022).

Estas narrativas corresponden a 5 escenarios distintos con características y desafíos propios:

- **SSP1 “Sostenibilidad”**: representa una transición exitosa hacia una economía sostenible con políticas y tecnologías que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta trayectoria combina un bajo crecimiento poblacional con un alto desarrollo económico, una buena gobernanza y una cooperación internacional sólida.

- **SSP3 “Rivalidad regional”**: representa un futuro en el que el crecimiento poblacional es alto y el desarrollo económico es bajo. Se caracteriza por una baja conciencia ambiental y una poca cooperación internacional, lo que representa un desafío importante para la adaptación y la mitigación.
- **SSP2 “Mitad del camino”**: es una trayectoria intermedia entre SSP1 y SSP3.
- **SSP4 “Desigualdad”**: representa un futuro en el que hay un alto desarrollo tecnológico en los países más desarrollados, pero poca cooperación internacional impide que toda la población se beneficie. Esta trayectoria representa un nivel alto de desafío para la adaptación.
- **SSP5 “Desarrollo dependiente de combustibles fósiles”**: representa un futuro en el que hay un bajo crecimiento de la población y un alto crecimiento económico, pero con una baja conciencia ambiental y una fuerte dependencia de los combustibles fósiles. Esto representa un desafío importante para la mitigación del cambio climático.



Figura 4: Representación gráfica de las trayectorias socioeconómicas compartidas



Un set principal de cinco escenarios de proyecciones climáticas es utilizado en el sexto reporte de la IPCC, correspondientes a SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (figura 5).

El primer número de cada identificador corresponde a las suposiciones socioeconómicas que controlan las emisiones junto a otros factores que tienen efectos sobre el cambio climático, y el segundo número es el forzamiento radiativo alcanzado en 2100.

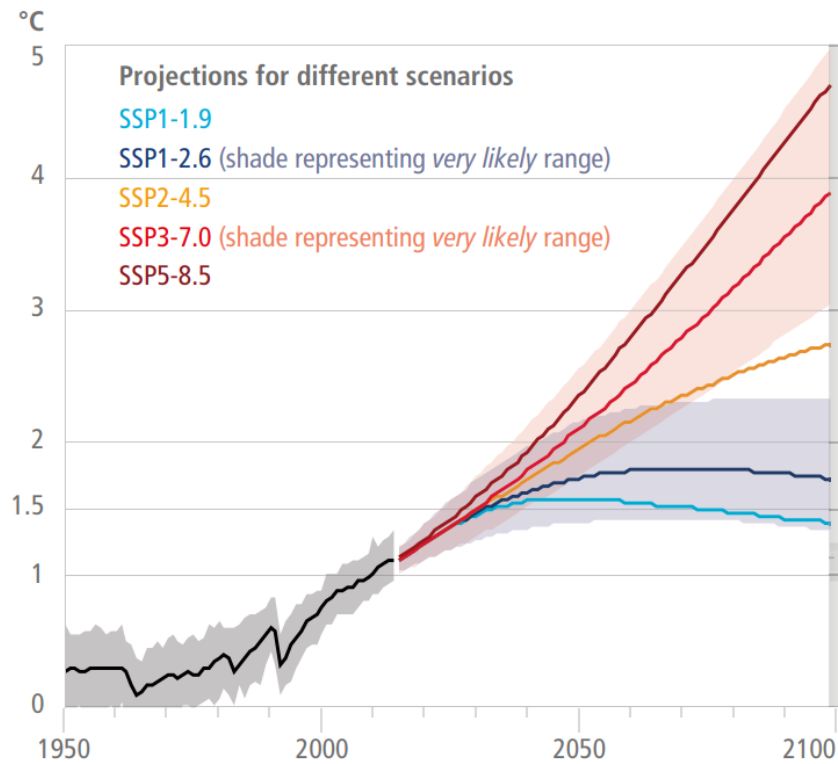


Figura 5: Representación gráfica de las SSP principales asociadas a su RCP y aumento de temperatura (IPCC, 2022)

Es importante señalar que existen diversas combinaciones de trayectorias SSP-RCP que se pueden evaluar. Cada trayectoria SSP se puede combinar con diferentes políticas para producir una variedad de trayectorias de emisiones. Estas combinaciones representan la incertidumbre y el amplio rango de posibilidades que se pueden dar en cuanto a la evolución futura de las emisiones.

A su vez, es importante destacar que existe incertidumbre en la capacidad de traducir los escenarios de emisiones en trayectorias de concentración, principalmente por la retroalimentación del ciclo clima-carbono. Por lo tanto, es necesario considerar diferentes combinaciones de trayectorias SSP-RCP para obtener una visión más completa de los posibles futuros climáticos.

## 3. Caso de estudio: cuenca del Río Zambeze

### 3.1. Antecedentes generales

Con una superficie de 1.32 millones de km<sup>2</sup>, la cuenca del río Zambeze se alza como la cuarta más grande del continente africano, extendiéndose por el territorio de ocho países: Angola, Botswana, Malawi, Mozambique, Namibia, Tanzania, Zambia y Zimbabwe (AC-ETHZ et al., 2018), con una población estimada por sobre los 173 millones de habitantes, de los cuales el 28 % (47 millones) viven dentro de la demarcación de la cuenca (ZAMCOM et al., 2015). Es el sistema fluvial más compartido de África del Sur (SARDC et al., 2012). Las proyecciones de crecimiento demográfico para esta cuenca indican que este valor se podría incrementar a más de 70 millones de habitantes para el año 2050 (Tilmant et al., 2010), lo que podría ocasionar un aumento sustancial en la cantidad de recursos necesarios para mantener las actividades socioeconómicas de la población.

Naturalmente, el área de la cuenca no está dividida uniformemente entre los países que la abarcan. Zambia es el país que posee la mayor extensión sobre la cuenca, con un 41,7 %, seguida de Angola (18,4 %), Zimbabwe (15 %), Mozambique (12,8 %), Malawi (8 %), Tanzania (2 %), y, finalmente, Botswana y Namibia, cada uno con el 1 % del área. En particular, para el caso de Malawi, el territorio comprendido dentro de la cuenca cubre casi todo el territorio del país, correspondiendo al estado más pequeño de la cuenca (ZAMCOM et al., 2015). El detalle de la división territorial y de cada subcuenca se puede ver en la figura 6, donde se observa la diversidad en la cantidad de área que posee cada país.

Es importante mencionar la diversidad en el poder económico de los estados comprendidos en la cuenca, lo que resulta en diferencias en el potencial de inversión y, por ende, diferencias en la capacidad para acceder y utilizar los recursos disponibles (AC-ETHZ et al., 2018). Por ejemplo, Botswana y Namibia tienen un potencial de inversión mayor que puede ser usado para proyectos de aprovechamiento de agua, mientras que Zambia al tener un gran porcentaje de participación geográfica e hidrológica podría reclamar una asignación mayor. (Beck and Bernauer, 2010)



En el territorio de la cuenca del río Zambeze, se produce una variedad de actividades económicas, desde la agricultura y la silvicultura hasta la manufactura, la minería, la conservación y el turismo, todas ellas determinadas por el capital natural de la cuenca. Sin embargo, al tratarse de una fuente de recursos transfronteriza, sujeta a la administración por diversos intereses sectoriales y nacionales, la cuenca es altamente propensa a la sobreexplotación y a la obtención de beneficios a corto plazo en lugar de fomentar un desarrollo sostenible a largo plazo (ZAMCOM et al., 2015).

Desde el punto de vista ecológico, la cuenca cuenta con una elevada riqueza en biodiversidad incluyendo cuatro distintos biomas: el Zambeziano, Congoleño, Montano y Costero. El bioma Zambeziano cubre el 95% de la cuenca, principalmente con bosques, pastizales, pantanos y lagos; con estaciones secas y húmedas marcadas, y elevada diversidad de plantas florecientes, aves y animales en general. El bioma montano se encuentra entre los 1800 y los 2000 metros sobre el nivel del mar, con un clima más frío y húmedo, encontrándose muchas veces cubierto de neblina; en esta zona se pueden encontrar principalmente hierbas y especies introducidas como pinos y acacias. El bioma congoleño está en la zona de cabecera del río, con clima húmedo y cálido; albergando una mezcla de especies de zona boscosa y tropical de la cuenca del Congo, y de zona arbolada de la cuenca del Zambeze. Finalmente, el clima costero corresponde a una pequeña parte de la cuenca en Mozambique donde el clima es modificado por la proximidad con la costa, sin zona seca marcada ni variación importante de temperatura; los hábitats incluyen bosques secos y pastizales (SARDC et al., 2012).

En conjunto, el río Zambeze, con su densa red de tributarios descargan en promedio 2.600 m<sup>3</sup>/s de agua, lo que lo sitúa en el mismo rango que el río Nilo (2.830 m<sup>3</sup>/s) y el Rin (2.200 m<sup>3</sup>/s) (SARDC et al., 2012). Al año 2018, el mayor uso consuntivo de agua (15-20% de la esorrentía anual) se producía en la zona media y baja de la cuenca, correspondiendo a pérdidas por evaporación en embalses, irrigación agrícola y en menor manera suministro a la población (AC-ETHZ et al., 2018).

Diversos proyectos de regulación hídrica se han llevado a cabo en el río Zambeze, con objetivos de generación energética, control de inundaciones, recreación, pesca e irrigación (Tilmant et al., 2012). Actualmente, se encuentran 5 embalses en el cauce principal del río Zambezi: Itezhi-Tezhi, Kafue Gorge Upper, Kafue Gorge Lower, Kariba y Caora Bassa; destacando estos últimos dos por su inmensa capacidad almacenando más de doscientos mil millones de metros cúbicos en conjunto, o dos veces la descarga promedio anual al mar.

### **3.2. Condiciones climáticas**

Debido a la amplia extensión de la cuenca, se presentan diferentes regiones con climas característicos. Según el informe Zambezi Atlas Screen (SARDC et al., 2012), el clima de la región está fuertemente influenciado por los sistemas de viento predominantes, incluyendo aquellos provenientes del sudeste, la masa de aire del Congo, los provenientes del nordeste, y la zona de convergencia intertropical. Además, la presencia de grandes cuerpos de agua, como Malawi, Kariba y Cahora Bassa, también influye en las condiciones climáticas.

Según el informe de DAFNE (AC-ETHZ et al., 2018), basado en la clasificación climática de Köppen-Geiger, se pueden identificar tres áreas climáticas distintas en la cuenca. La más predominante es la zona norte, clasificada como “Cwa”, con clima templado y un invierno seco. La zona sureste se caracteriza por un clima estepario, clasificado como “Bsh”, con una evapotranspiración anual mayor que la precipitación anual. Por último, las zonas del delta y al oeste presentan un clima tropical, clasificado como “Am”, con temperaturas elevadas y un periodo seco corto. La figura 7 muestra la principal división climática de la zona geográfica donde se encuentra la cuenca.

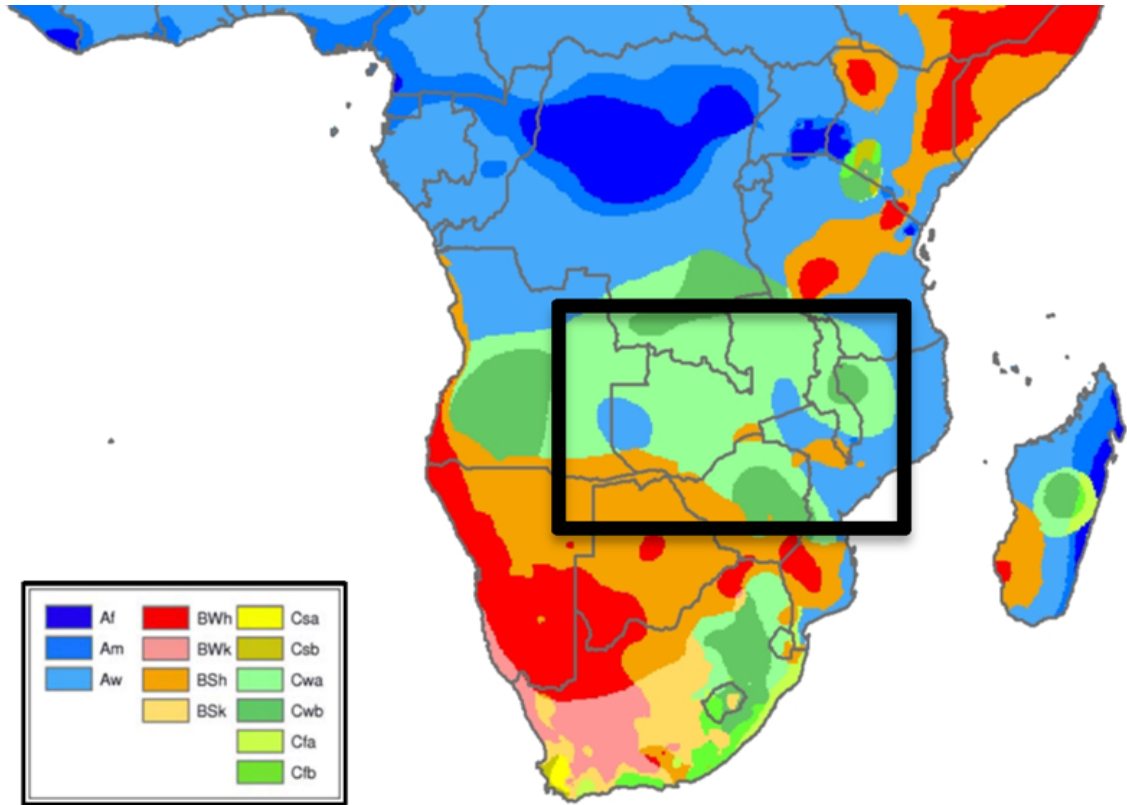


Figura 7: Esquema de los climas característicos de la zona de la ZRB (AC-ETHZ et al., 2018)

La variación de temperatura en la cuenca del Zambeze se debe principalmente a las diferencias de altitud y, en menor magnitud, la latitud. Según el informe Zambezi Atlas Screen (SARDC et al., 2012), en el mes más frío (julio), las temperaturas promedio van desde menos de 13°C en las zonas más elevadas hasta 23°C en las zonas más bajas. En los meses más cálidos (octubre y noviembre), las temperaturas varían de 23°C a 31°C siguiendo el mismo gradiente de elevación. El rango de variación de temperatura a lo largo del día también es diverso, desde cerca de los 10°C en la temporada húmeda hasta los 20°C en la temporada seca en algunas zonas. Dadas las elevadas temperaturas, la tasa anual de evaporación es de entre 5 y 10 mm/día. Esto implica que alrededor del 65 % de la precipitación total se evapora inmediatamente después de caer. En la figura 8 se muestra la variación de la temperatura promedio en julio y diciembre en la cuenca del Zambeze.

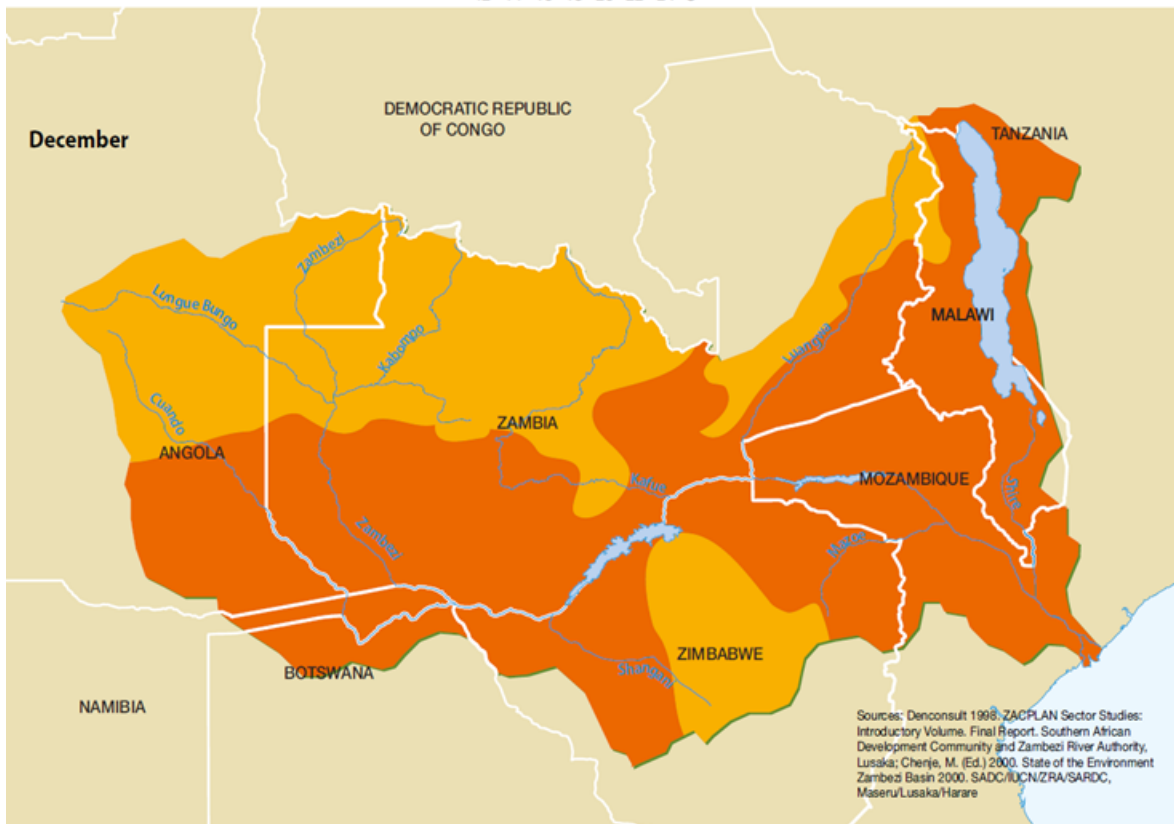
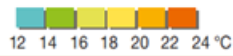
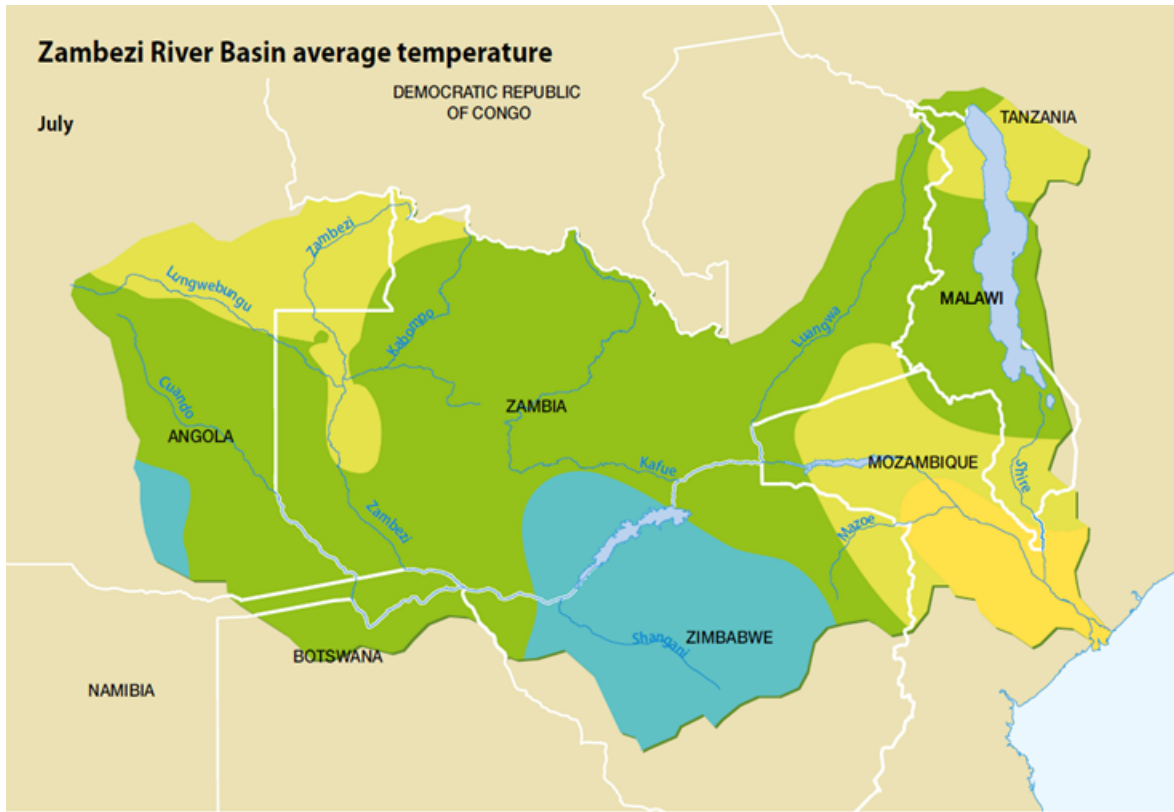


Figura 8: Esquema de las temperaturas promedio en la ZRB (SARDC et al., 2012)

El patrón de lluvias en la cuenca está influenciado principalmente por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ITCZ). Durante la temporada lluviosa, entre los meses de octubre y abril, la oscilación de la ITCZ a lo largo de la cuenca produce precipitaciones generalizadas. Por otro lado, la temporada seca suele extenderse desde mayo hasta septiembre, caracterizada por la escasez de precipitaciones.

La precipitación promedio anual en la cuenca es de 990 mm, con un gradiente sur-norte pronunciado que varía desde los 700 mm hasta los 1200 mm al año (AC-ETHZ et al., 2018). Este gradiente se puede apreciar claramente en la figura 9.

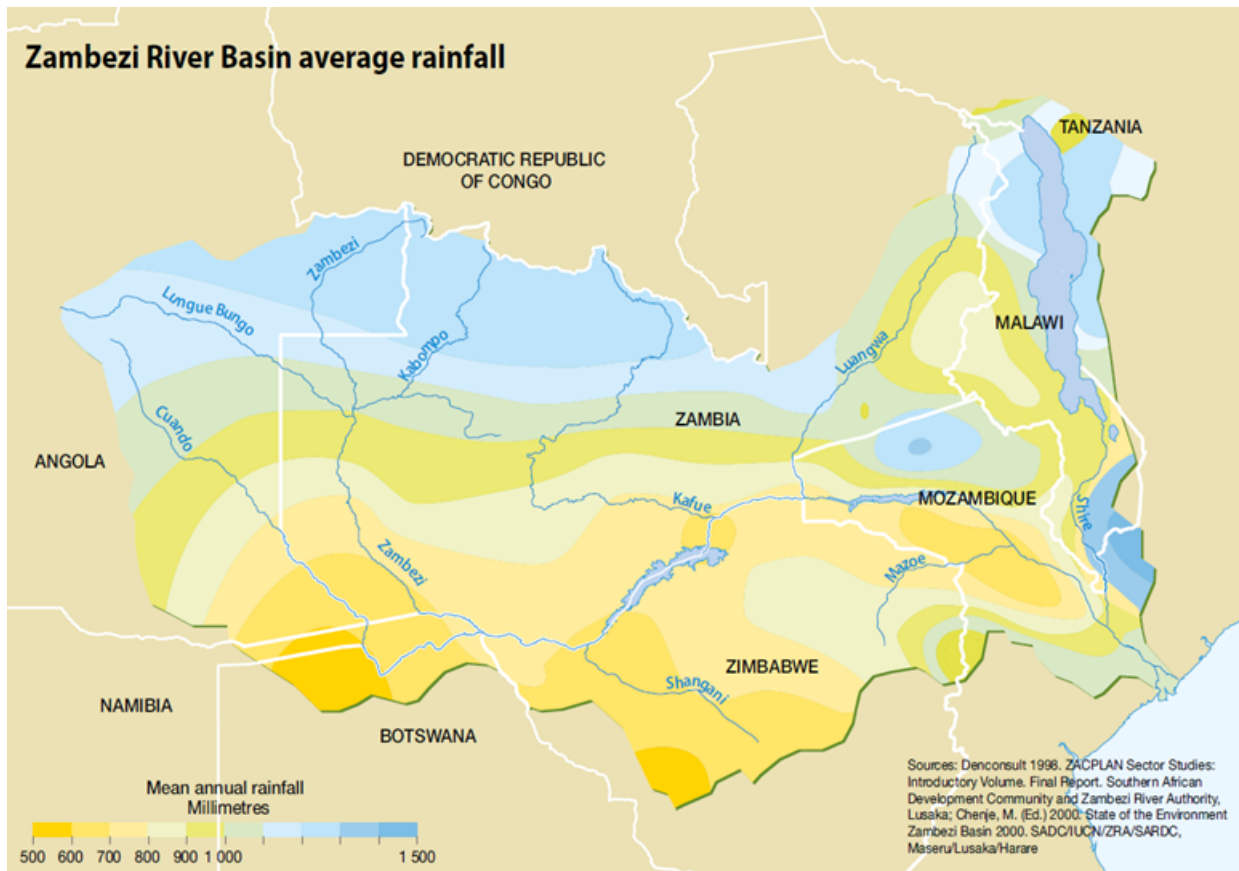


Figura 9: Precipitación media anual en la ZRB (SARDC et al., 2012)



### 3.3. Regulación y producción energética

En el continente africano, la producción energética se divide en cinco agrupaciones principales de producción energética: COMELEC, y los grupos energéticos de África del oeste, central, del este y del sur.

En la cuenca del río Zambeze, que forma parte del grupo energético de África del Sur (SAPP), la capacidad instalada en 2018 fue de 61.859 MW, principalmente generada a partir de carbón (62%), seguida de hidroeléctrica (21%) y otras fuentes en menor medida. Sudáfrica es el mayor contribuidor a la capacidad total, con una participación del 75,9% a base principalmente de energía térmica (incluyendo nuclear), siendo esencial para la estabilidad energética regional. A pesar del crecimiento de la capacidad instalada, se observa un déficit significativo en la demanda, reportándose en marzo de 2015 que el 16,6% de la demanda no se satisfacía. Se planea solucionar este déficit con la comisión de nuevos proyectos energéticos, algunos de los cuales ya están en funcionamiento (AC-ETHZ et al., 2018).

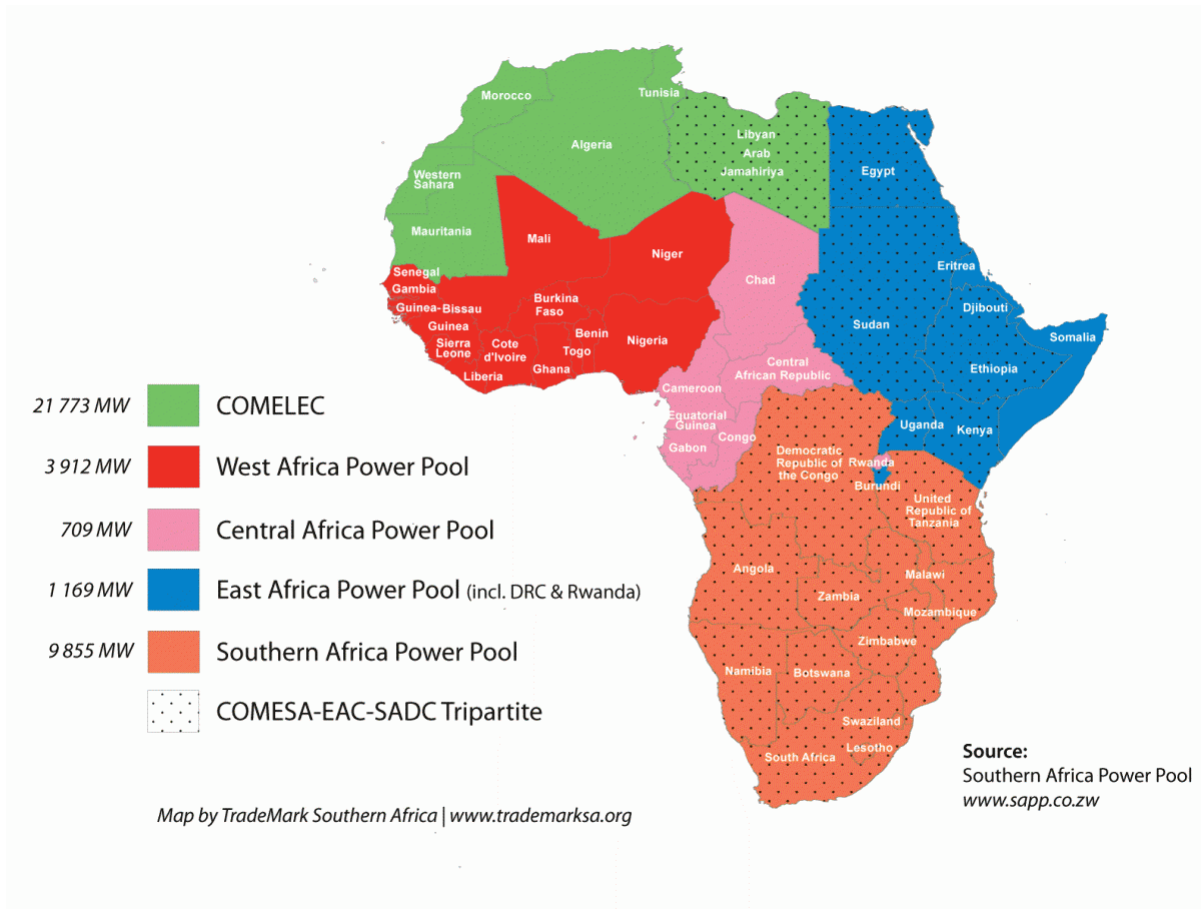


Figura 10: Agrupaciones de producción energética del continente africano

Para la cuenca del río Zambeze, la producción energética es uno de los mayores recursos disponibles, principalmente presente en el cauce principal del río y en dos de sus mayores tributarios, los ríos Kafue y Shire (World Bank, 2010).

Dentro del SAPP, el mercado de la electricidad se divide en dos redes principales (norte y sur) y cuenta con un mercado energético a corto plazo (DAM) donde se intercambia energía con un día de anticipación, pero sujetos a contratos bilaterales previos. Existe también la plataforma de intercambio de mercado (MTP), donde se realizan contratos con meses y semanas de anticipación, y el mercado intra-diario (IDM) donde se negocian intercambios posteriores al DAM, incluso con una hora de anticipación (AC-ETHZ et al., 2018).

La cuenca del río Zambeze cuenta con un potencial hidroeléctrico de 20.000 MW (Stevanato et al., 2021) de los cuales, para el año 2016, 5.415 MW ya se encontraban desarrollados y se proyectaba un aumento de 8.394 MW adicionales a ser comisionados para finales de 2023 (Cervigni et al., 2015).

Los embalses presentes en el sistema, enfocados principalmente en producción hidroeléctrica pero que además sirven de regulación hídrica para el sistema, corresponden a:

- **Kafue Gorge Upper:** localizada en Zambia, presa de materiales sueltos de gravedad con objetivo principal de producción energética, cuenta con una capacidad instalada de 900 MW y una capacidad de almacenamiento máxima de 1.178 hm<sup>3</sup>.
- **Kafue Gorge Lower:** localizada en Zambia, presa de enrocado con cara de concreto con objetivo principal de producción energética, cuenta con una capacidad instalada de 750 MW y una capacidad de almacenamiento máxima de 62,8 hm<sup>3</sup>.
- **Itezhi-Tezhi:** localizada en Zambia, presa de materiales sueltos de gravedad con objetivo principal de regulación de la presa Kafue Gorge Upper, cuenta con una capacidad instalada de 120 MW y una capacidad de almacenamiento máxima de 5.883 hm<sup>3</sup>
- **Kariba:** localizada en Zambia y Zimbabwe, presa de arco de concreto de doble curvatura que crea el lago Kariba, con un objetivo principal de producción energética y una capacidad instalada de 1.080 MW, además de una capacidad de almacenamiento máxima de 180.798 hm<sup>3</sup>.

- **Cahora Bassa:** localizada en Mozambique, presa de arco de concreto con objetivo principal de producción energética, cuenta con una capacidad instalada de 2.075 MW y una capacidad de almacenamiento máxima de 51.704 hm<sup>3</sup>.

Se puede observar que existen características variables en las presas existentes, tanto en la capacidad instalada de producción energética, como en la capacidad máxima de almacenamiento. Es importante tener en cuenta esta variabilidad al analizar los resultados del modelo y al considerar las reglas de operación que se pueden establecer.

Aunque la regulación hídrica tiene ventajas como el control del flujo de los cauces y la posibilidad de almacenar aguas en épocas de escasez, no podemos ignorar las consecuencias ecológicas negativas que puede generar, como el estancamiento del agua, la fragmentación y bloqueo de migración de peces, cambios en la calidad del agua, interrupción de los regímenes de inundación y procesos geomorfológicos (Tilmant et al., 2010). Estos impactos afectan los procesos biológicos de especies que dependen de cierta estacionalidad del río, la cual se pierde muchas veces cuando la operación de los embalses se enfoca únicamente en el desarrollo socioeconómico humano inmediato, priorizando la producción energética e irrigación. Es importante destacar que un ecosistema saludable brinda una gran variedad de servicios y sistemas ecosistémicos, tales como las llanuras de inundación, los humedales y hábitats de aguas tranquilas, que generan zonas de desove para peces, tierras fértiles para agricultura y atenuación natural de inundaciones. Es necesario considerar el beneficio a largo plazo de una regulación responsable de los sistemas de recursos hídricos, para evitar la destrucción de hábitats sensibles, y muchas veces, únicos.

### **3.4. Agricultura, ganadería y pesca**

La agricultura es una de las principales actividades económicas dentro de la cuenca, con más de un 60% de la población de la ZRB activa en agricultura. Si bien la basta mayoría de la actividad agrícola se lleva a cabo en terrenos de secano, la agricultura de riego representa el segundo factor de consumo más significativo en la ZRB, alcanzando los 1.5 km<sup>3</sup> por año. El único factor que lo supera es la evaporación en embalses, con una cifra de 13 km<sup>3</sup> (Beck and Bernauer, 2010). Los principales puntos de irrigación en la ZRB se presentan en la figura 11.

En el elemento del nexo correspondiente a alimentos, cabe destacar que en la cuenca del río Zambeze se llevan a cabo otras actividades importantes, como la cría de ganado y la acuicultura.

Es común que los terrenos destinados a la ganadería también sean utilizados para la agricultura, mientras que la acuicultura y pesca se concentra en los cuerpos de agua, llanuras de inundación y dambos de la región (AC-ETHZ et al., 2018).

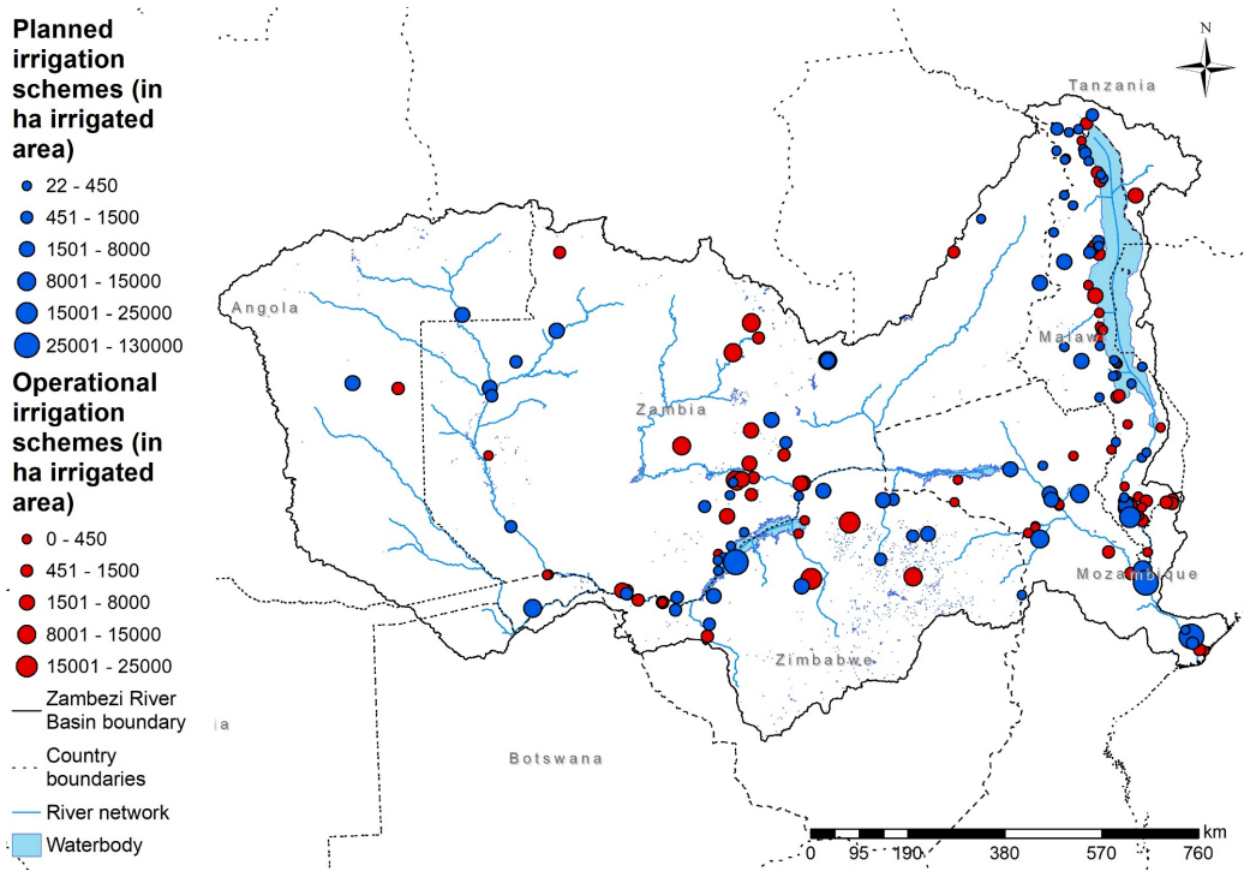


Figura 11: Principales puntos de irrigación operativos y proyectados en la ZRB (Castelletti et al., 2019a)

De acuerdo a las proyecciones para el año 2050, se pronostica que el incremento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones tendrán un impacto significativo en la producción agrícola de los países de la cuenca. En particular, se espera que los cultivos de secano sean los más afectados (Lautze et al., 2017).

### 3.5. Gobernabilidad y cooperación

La heterogeneidad en la participación geográfica, hidrológica y el potencial de inversión entre los países de la cuenca, mencionada anteriormente, destaca la importancia de la gobernabilidad y cooperación en la implementación de proyectos de regulación y asignación de extracción de agua.

El Convenio de las Naciones Unidas sobre los Usos de los Cursos de Agua Internacionales No Navegables de 1997 es el principal instrumento legal que rige las aguas transfronterizas y contiene principios sustantivos para identificar una buena gobernanza. Estos principios incluyen la utilización equitativa y razonable de los recursos, la obligación de prevenir daños significativos a otros estados, la protección y preservación de los ecosistemas y la prevención, reducción y control de la contaminación. Solo Namibia de los estados de la ZRB ha firmado y ratificado el UNWC, lo que significa que otros estados no están obligados por el convenio. Sin embargo, varios estados de la ZRB votaron a favor de su adopción en la Asamblea General de las Naciones Unidas, lo que indica que la mayoría de los estados de la ZRB apoyan sus principios, objetivos y aspiraciones.

A nivel regional, todos los países de la ZRB son miembros de la Comunidad de Desarrollo de África del Sur (SADC), que ha sido importante en la creación de leyes regionales de recursos hídricos compartidos, incluyendo el Protocolo Revisado de Cursos de Agua Compartidos (SADC-PC). Todos los países miembros han firmado el acuerdo ZAMCOM, que rige los aspectos hidrológicos de la cuenca, pero no detalla el manejo ambiental y ecosistémico. Este acuerdo es consistente con lo detallado en el UNWC y SADC-PC, que cubren el uso equitativo y razonable del recurso, evitar el daño a otros estados miembros, la protección de los ecosistemas y el deber de cooperación.

### **3.6. Sequías e inundaciones**

Los informes que analizan el estado de la cuenca de la ZRB destacan recurrentemente el problema de las sequías e inundaciones. En la tabla 1 se detalla los eventos históricos extremos reportados hasta el año 2017, donde se puede observar la severidad y la cantidad de gente afectada por ellos.

Es crucial tener en cuenta estos antecedentes de la cuenca al planificar y operar proyectos de regulación. Un enfoque exclusivo en la producción de energía puede contribuir a inundaciones aguas abajo de la cuenca o a niveles de embalse muy bajos en períodos secos, lo que puede resultar en mayores daños durante las sequías.

Tabla 1: Eventos extremos históricos en la ZRB (ZAMCOM, 2019)

<b>Periodo</b>	<b>Descripción</b>
2017	Lluvias estacionales muy severas, con deslizamiento de terreno, perdidas de vida y propiedad. Mozambique, Malawi, Zimbabwe, Botswana y Namibia.
2015-2016	Sequía asociada al fenómeno del Niño, la peor en los últimos 35 años (50 según la fuente), afectando a 39 millones de personas.
2014-2015	Inundaciones causadas por tormenta tropical Chedza. Más de 500.000 personas desplazadas.
2012-2013	Condiciones secas desde enero a mayo en la parte sur de la cuenca
2008-2009	Inundaciones en el cauce, miles de personas desplazadas en Angola, Botswana, Malawi, Namibia y Zambia.
2007	Inundaciones asociadas al ciclón Favio impactaron a Mozambique y Zimbabwe.
2005-2006	Inundaciones asociadas a precipitaciones muy fuertes. Daño estructural considerable.
2004-2005	Precipitaciones por debajo de lo normal. Varios estados miembros declararon catástrofe nacional.
2001-2003	Sequía severa en la zona de la SADC.
1999-2000	Inundaciones asociadas al ciclón Eline. 2 millones de personas afectadas con 650.000 desplazadas.
1994-1995	Muchos países de la SADC golpeados por una severa sequía, superando el impacto de la de 1991-1992.
1991-1992	La peor sequía a la fecha experimentada en África del sur, excluyendo a Namibia.
1986-1987	Condiciones de sequía vuelven a la región.
1983	Sequía severa en todo el continente africano.
1982	La mayor parte de África sub-tropical experimenta sequía.
1981-1982	Sequía severa en la mayoría de África del Sur.
1967-1973	Periodo seco a lo largo de la región, posiblemente corresponde a sequía severa.

### 3.7. Agua subterránea

La información del agua subterránea en la ZRB es bastante limitada. Se encuentran al menos 10 acuíferos transfronterizos en la cuenca, de cinco tipos distintos: acuíferos inconsolidados con baja a alta productividad, acuíferos del basamento con baja a moderada productividad, acuíferos sedimentarios consolidados con flujo intergranular y de fractura, acuíferos sedimentarios consolidados de alta productividad con flujo de fractura y acuíferos ígneos (AC-ETHZ et al., 2018).

El agua subterránea es un recurso crucial para la sostenibilidad social, económica y ambiental en la ZRB, y su uso está aumentando rápidamente. Las zonas urbanas, rurales y algunos países dependen en gran medida del agua subterránea para el suministro doméstico, el agua potable, el riego, el agua para el ganado y la industria (Lautze et al., 2017). Sin embargo, la explotación del recurso sigue siendo limitada en algunos países como Zimbabwe, Mozambique y Angola debido a la falta de conocimiento sobre su potencial y estado. En Mozambique, el conocimiento limitado de la población sobre el recurso es el factor limitante para su uso. En Angola, el uso del agua subterránea está restringido a áreas del sur y de la costa con una disponibilidad limitada de agua superficial (AC-ETHZ et al., 2018).

## 4. Metodología

### 4.1. Modelo de dinámica de sistemas

El modelo de dinámica de sistemas se basa en un modelo previamente desarrollado por el Politécnico de Milán (POLIMI) en el marco del proyecto DAFNE. Este modelo representa una simplificación del cauce principal de la cuenca del Zambezi, y su diagrama se muestra en la figura 12.

El modelo incluye cinco embalses de diferentes tamaños para almacenamiento y producción energética: Itezhi-Thezi, Kafue Gorge Upper, Kafue Gorge Lower, Kariba y Caora Bassa. Además, cuenta con una central de producción energética de paso en Victoria Falls.

El sistema también tiene seis entradas, dos de ellas ubicadas aguas arriba antes de Itezhi-Thezi y Victoria Falls, dos laterales previas a Kafue Gorge Upper y Kariba, y dos entradas de tributarios correspondientes al río Luangwa (antes de Caora Bassa) y al río Shire cercano a la zona del delta.

El modelo también representa dos zonas de interés medioambiental en Kafue Flats y Victoria Falls, así como ocho distritos de irrigación destinados a la agricultura.

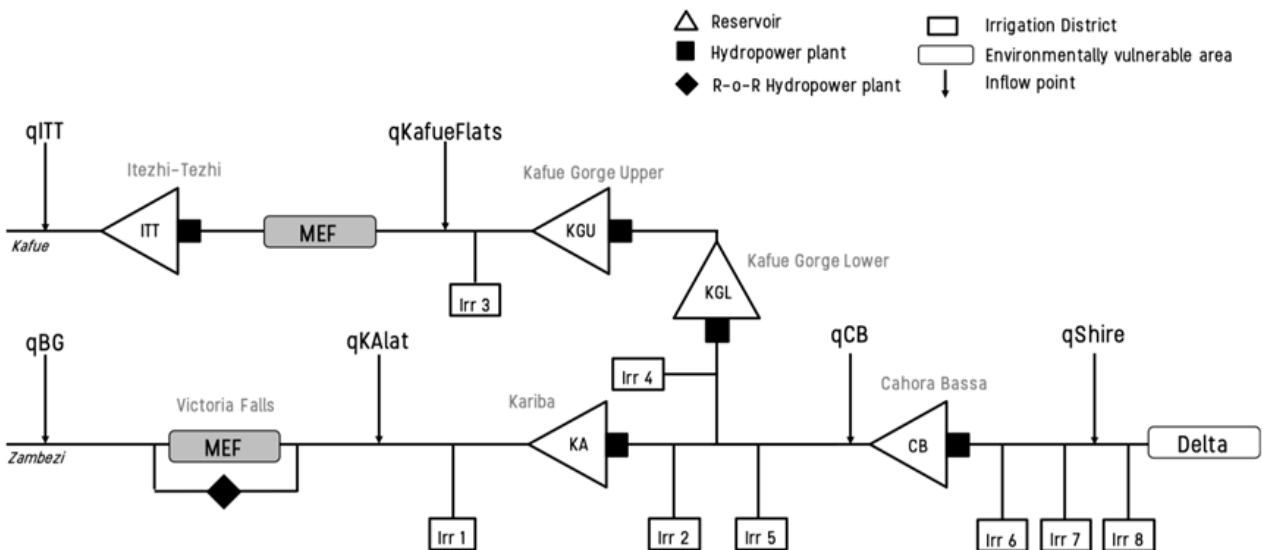


Figura 12: Diagrama de modelo base (Castelletti et al., 2019b)



Este modelo está asociado con la división de subcuencas que se muestra en la figura 13. Los valores de  $q_{ITT}$ ,  $q_{KafueFlats}$ ,  $q_{BG}$ ,  $q_{KAlat}$ ,  $q_{CB}$  y  $q_{Shire}$  corresponden a las subcuencas Itezhi Tezhi, Kafue Flats, Victoria Falls, Kariba, Luangwa y Shire, respectivamente. No se incluyen las subcuencas Cahora Bassa y Delta en el modelo debido a que no son significativas en comparación con las demás subcuencas.

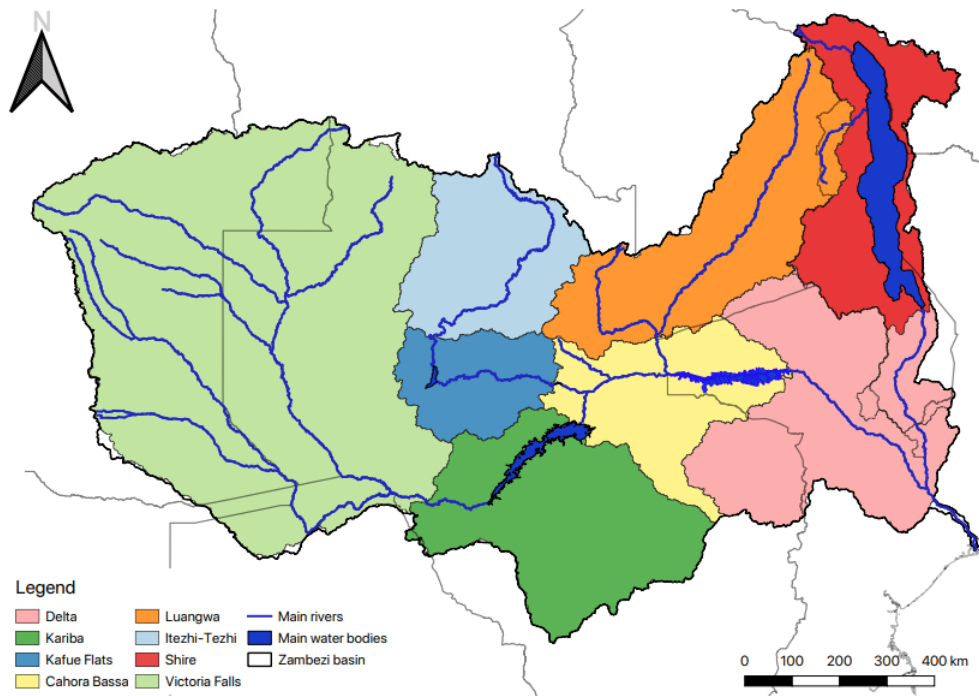


Figura 13: Subcuencas utilizadas en estudio previo (Castelletti et al., 2019b)

El modelo desarrollado por POLIMI para tomar decisiones de desembalse utiliza una metodología de Función de Base Radial (RBF) que resulta bastante complicada de representar en un modelo de dinámica de sistemas. Por esta razón, el modelo que se va a desarrollar tiene como objetivo generar funciones de desembalse más simples que puedan ser comparables en términos de rendimiento con los resultados obtenidos en el modelo original.

El funcionamiento principal del modelo corresponde a un balance de masas en todos los puntos del sistema. Para los embalses, se toman en cuenta las entradas mensuales de agua, se resta la evaporación (calculada en función de la evaporación potencial y la batimetría), y se resta además la cantidad que se ha decidido desembalsar según las funciones de toma de decisiones establecidas en el modelo.

#### 4.1.1. Indicadores del sistema

Con la finalidad de que el modelo sea comparable con el desarrollado en POLIMI, se han utilizado los mismos indicadores para medir el rendimiento, las cuales corresponden al déficit que se busca minimizar en los distintos sectores, específicamente a:

- **Déficit de producción energética:** corresponde al déficit entre la energía eléctrica que se busca generar en el sistema y la realmente generada. La energía que se busca generar corresponde a demandas energéticas específicas para cada embalse, las cuales fueron obtenidas por un modelo energético desarrollado en el marco del proyecto DAFNE. El cálculo del déficit se realiza con la ecuación:

$$DEF_{PP} = \frac{1}{Nyears} \left[ \sum_{t=0}^{h-1} \sum_{r=1}^{rmax} |Wp_t^r - P_{t+1}^r| \right]$$

Donde:

$r$ : número de planta de producción energética

$h$ : número de meses del horizonte de evaluación

$Wp_t^r$ : producción energética objetivo

$P_{t+1}^r = \eta^r g \gamma h_t^r q_{t+1}^{turb,r}$ : producción energética real.  $\eta$ : eficiencia de las turbinas;  $\gamma$ : densidad del agua;  $h_t^r$ : altura neta hidráulica;  $q_{t+1}^{turb,r}$ : flujo turbinado

- **Déficit de suministro a riego normalizado:** corresponde al déficit entre las demandas de irrigación y lo que se suministra realmente. Calculado con la formula:

$$DEF_{IRR} = \frac{1}{h} \left[ \sum_{t=0}^{h-1} \sum_{id=1}^{idmax} \left( \frac{\max(wirr_t^{id} - rirr_{t+1}^{id}, 0)}{wirr_t^{id}} \right)^2 \right]$$

Donde:

$id$ : distrito de irrigación

$h$ : número de meses del horizonte de evaluación

$wirr_t^{id}$ : demanda de irrigación del distrito  $id$

$rirr_{t+1}^{id}$ : suministro a riego del distrito  $id$

- **Déficit medioambiental**: oficialmente, no hay caudales ecológicos establecidos para la zona del delta del Zambeze. Sin embargo, para evaluar la componente ambiental y de disponibilidad de agua en el sistema se plantea un flujo mínimo de 7.000 m<sup>3</sup>/s a satisfacer en los meses de febrero y marzo. Con esto, la función de déficit queda como:

$$DEF_{ECO} = \frac{1}{h} \left[ \sum_{t=0}^{h-1} (\max(Qe_t - r_{t+1}, 0))^2 \right]$$

Donde:

$h$ : número de meses del horizonte de evaluación

$Qe_t$ : 7.000 m<sup>3</sup>/s en febrero y marzo

$r_{t+1}$ : cantidad de agua entrando al delta

#### 4.1.2. Suministro a irrigación

Análogo a lo realizado en el modelo de POLIMI, el suministro de agua para satisfacer las necesidades de irrigación depende de la cantidad de agua disponible en el tramo de río correspondiente para un periodo de tiempo determinado, con la finalidad de tener en cuenta los usuarios aguas abajo del sistema.

Con este objetivo, se utilizan dos parámetros que determinan la cantidad de agua que se extrae para cada canal de irrigación, estos parámetros se pueden optimizar dependiendo del objetivo, y no varían a lo largo de la simulación. La función corresponde a:

$$rirr_{t+1}^i = \begin{cases} \min \left( q_{t+1}^i, wirr_t^i \cdot \left[ \frac{q_{t+1}^i}{h^i} \right]^{m^i} \right) & \text{si } q^j \leq h^i \\ \min(q^j, wirr_t^i) & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde:

$q_{t+1}^i$ : caudal circulante por ese tramo de río

$wirr_t^i$ : demanda de ese mes para ese canal de extracción

$h^i, m^i$ : parámetros que regulan ese canal de extracción

#### 4.1.3. Demandas de irrigación

Para el modelo se utilizaron las demandas de irrigación representadas en la figura 14, correspondiendo a las demandas Irr 1 a Irr 8 del diagrama de la figura 12.

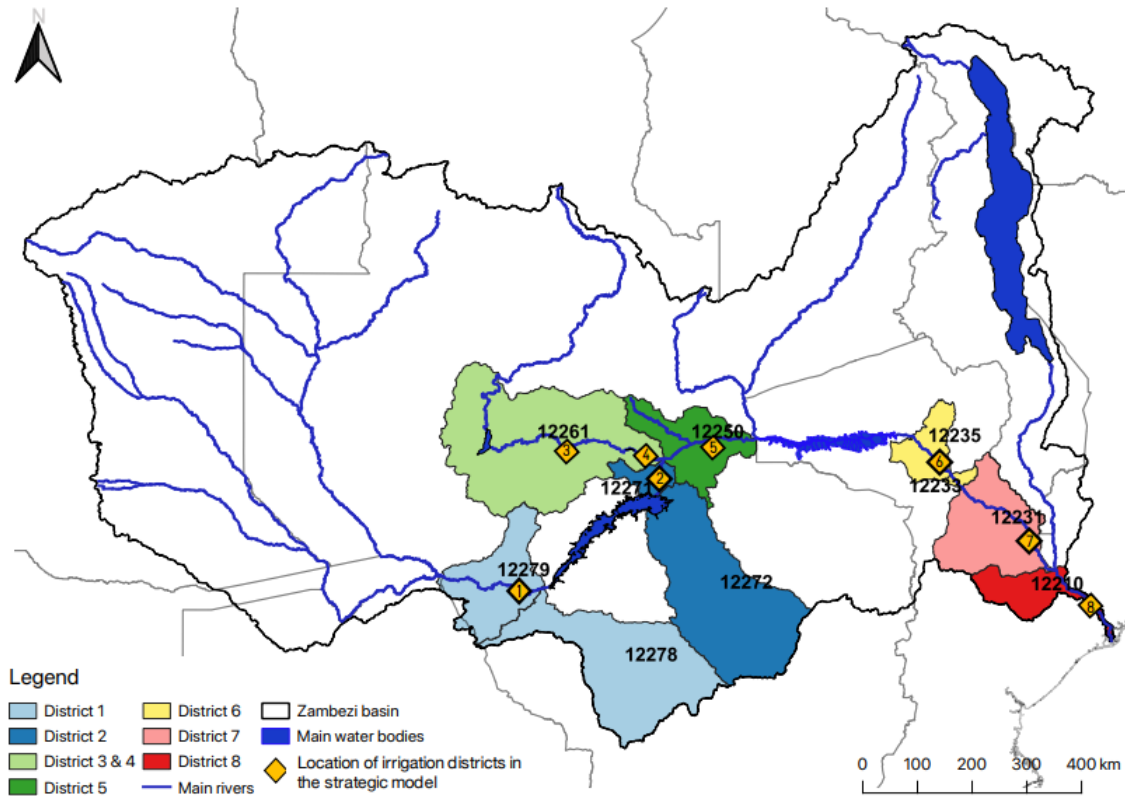


Figura 14: Demandas de irrigación utilizadas para el modelo (Castelletti et al., 2019b)

La magnitud de las demandas anuales va desde los  $0,15 \text{ hm}^3$  para el distrito 6, hasta los  $311 \text{ hm}^3$  para el distrito 5, sumando un total anual de  $620 \text{ hm}^3$ . Comparativamente, corresponden a un  $0,83\%$  de las aportaciones anuales medias de los datos observados, que suman un valor de  $74.800 \text{ hm}^3$ .

Tabla 2: Demandas en  $\text{hm}^3$  de los distritos de irrigación de la cuenca

Mes	irr1	irr2	irr3	irr4	irr5	irr6	irr7	irr8
Enero	0,57	1,48	3,91	0	2,62	0	0,03	0,75
Febrero	0,41	1,24	1,14	0	1,68	0	0,03	1,14
Marzo	0,93	2,28	3,45	0,62	14,13	0	0,05	1,63
Abril	1,56	3,84	8,06	0,23	26,28	0	0,39	6,92
Mayo	2,05	5,00	12,36	0,83	30,82	0,03	0,57	7,93
Junio	2,31	5,88	12,23	1,61	32,94	0,03	0,62	6,51
Julio	3,16	8,40	14,46	3,03	43,31	0,03	0,83	8,50
Agosto	3,81	10,68	15,11	3,32	52,82	0,03	1,04	11,46
Septiembre	3,60	10,47	14,64	1,53	50,67	0,03	1,09	15,55
Octubre	2,59	7,15	14,80	0	38,02	0,03	0,70	19,34
Noviembre	1,19	2,33	7,34	0	14,20	0	0,08	13,04
Diciembre	0,34	0,67	5,75	0	3,76	0	0	4,61
Total	22,52	59,43	113,27	11,17	311,27	0,16	5,42	97,38

#### 4.1.4. Demandas de producción energética

Las demandas de producción energética se obtienen del proyecto DAFNE (Castelletti et al., 2019a). La cuales a su vez fueron obtenidas de un modelo energético específico para la región africana, llamado TEMBA, el cual fue desarrollado a partir del modelo energético Osemosys. Los objetivos de producción energética para cada embalse se presentan en la tabla 3. Si bien la producción energética es mensual, los valores están anualizados.

Tabla 3: Objetivos de producción energética

Planta de producción	Objetivo [TWh/año]
Itezhi-Tezhi	0.56730
Kafue Gorge Upper	4.77410
Kafue Gorge Lower	3.40022
Kariba	9.11217
Caora Bassa	14.49489

#### 4.1.5. Funciones de desembalse

El desarrollo de funciones de desembalse es uno de los objetivos principales de este trabajo. Para lograr una función de desembalse sencilla y fácil de explicar a profesionales de diferentes áreas, se ha optado por utilizar curvas simples con tres rangos de nivel almacenado, tal como se

puede apreciar en la figura 15. En estas curvas, los niveles mínimo y máximo se establecen de acuerdo con las condiciones de diseño de los embalses, mientras que el nivel medio y la suelta óptima se optimizan para cada embalse, para cada mes del año, obteniendo así 12 reglas de operación para cada embalse del sistema.

Para cada mes, esta curva relaciona el nivel del embalse con un flujo a entregar, el cual se va a cumplir siempre que esto no signifique bajar del nivel mínimo o quedar sobre el nivel máximo.

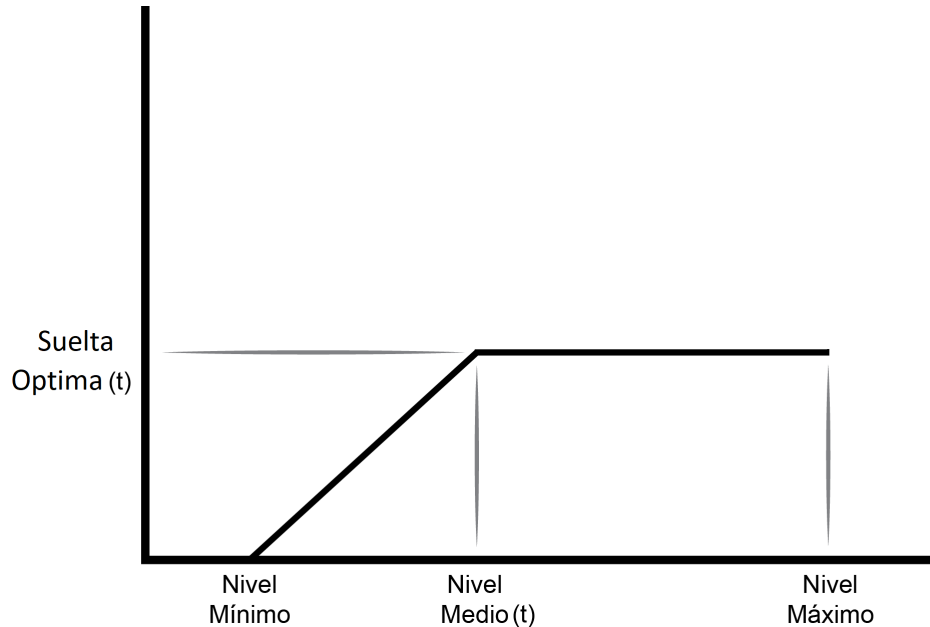


Figura 15: Curva de regla de operación empleada

#### 4.1.6. Optimización del sistema

La optimización del modelo de dinámica de sistemas se lleva a cabo utilizando la herramienta de optimización integrada en el software VENSIM. Esta herramienta requiere que se especifiquen las variables que se deben maximizar o minimizar, así como los parámetros del modelo que se deben ajustar y en qué rango. En este caso, se realiza una minimización de las funciones objetivo mencionadas, tanto individualmente como en conjunto. En este último caso, se asignan pesos según el objetivo específico de cada modelo. Los parámetros que se ajustan en este proceso son los parámetros de las funciones de suministro de agua para la irrigación ( $h$  y  $m$ ), y los parámetros de las reglas de operación (nivel medio y suelta óptima) de todos los embalses para cada mes del año.

## 4.2. Escenarios de cambio climático

### 4.2.1. Proyecciones climáticas

En este estudio, se emplearon proyecciones climáticas obtenidas a partir de modelos globales que han sido ajustados a la escala regional de interés. Estos modelos fueron desarrollados en el marco del proyecto GoNEXUS y se obtuvieron a través del portal Yoda de la Universidad de Utrecht en los Países Bajos. Los datos proyectados incluyen información diaria georreferenciada de precipitación y temperatura media para el periodo de control de 1979 a 2014, así como proyecciones para el periodo de 2015 a 2100. Los modelos ajustados utilizados en este estudio fueron preparados por el Postdam Institute for Climate Impact Research (PIK), y corresponden a datos diarios con corrección de sesgo y ajuste estadístico de escala a una resolución horizontal de 0,5 grados utilizando ISIMIP3BASD v2.5.0 y W5E5 v2.0. Se utilizaron cinco modelos globales distintos, que corresponden a:

- **GFDL-ESM4:** Earth System Model del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
- **IPSL-CM6A-LR:** Climate Model del Institut Pierre Simon Laplace
- **MPI-ESM1-2-HR:** Earth System Model del Max Planck Institute
- **MRI-ESM2-0:** Earth System Model del Meteorological Research Institute
- **UKESM1-0-LL:** UK Earth System Model

Las proyecciones climáticas utilizadas en este estudio se obtienen en formato netCDF, el cual corresponde a datos distribuidos geográficamente en el área de estudio. Sin embargo, para poder utilizar estos datos con el modelo hidrológico y la red neuronal, es necesario obtener datos promedio por subcuenca. Para lograr esto, se requiere un procesamiento previo de los datos distribuidos de precipitación y temperatura. En este estudio, se emplea una rutina de código que discrimina los datos que se encuentren en el área comprendida en cada subcuenca, y realiza un promedio de estos.

Este proceso permitió obtener datos de promedio diario de precipitación y temperatura para cada subcuenca, los cuales se utilizarán posteriormente como entrada para el modelo hidrológico o para la red neuronal, según corresponda a cada caso.

#### 4.2.2. Modelo hidrológico

Con la finalidad de evaluar escenarios de cambio climático en la cuenca, se utiliza un modelo hidrológico utilizando los datos de temperatura y precipitación promedio obtenidos anteriormente. En este caso se utiliza el modelo agregado Hydrologiska Byras Vattenbalansavdelning (HBV) desarrollado en Suecia para predicción de inundaciones (Giuliani and Herman, 2017). Este modelo fue calibrado y validado con anterioridad por POLIMI, por lo que este paso no es necesario en el trabajo actual.

En la figura 16 se puede apreciar que el modelo consta de cuatro unidades dispuestas en cascada, y que su correcto funcionamiento requiere de dos variables de entrada: precipitación  $P$  y temperatura  $T$ . Una vez procesados estos datos junto a los parámetros de cada subcuenca, el modelo arroja como resultado el caudal de descarga,  $Q_{sim}$ . Cabe mencionar que para el cálculo de la evapotranspiración emplea el método Hamon, que obtiene la evapotranspiración real a partir de datos de evapotranspiración potencial.

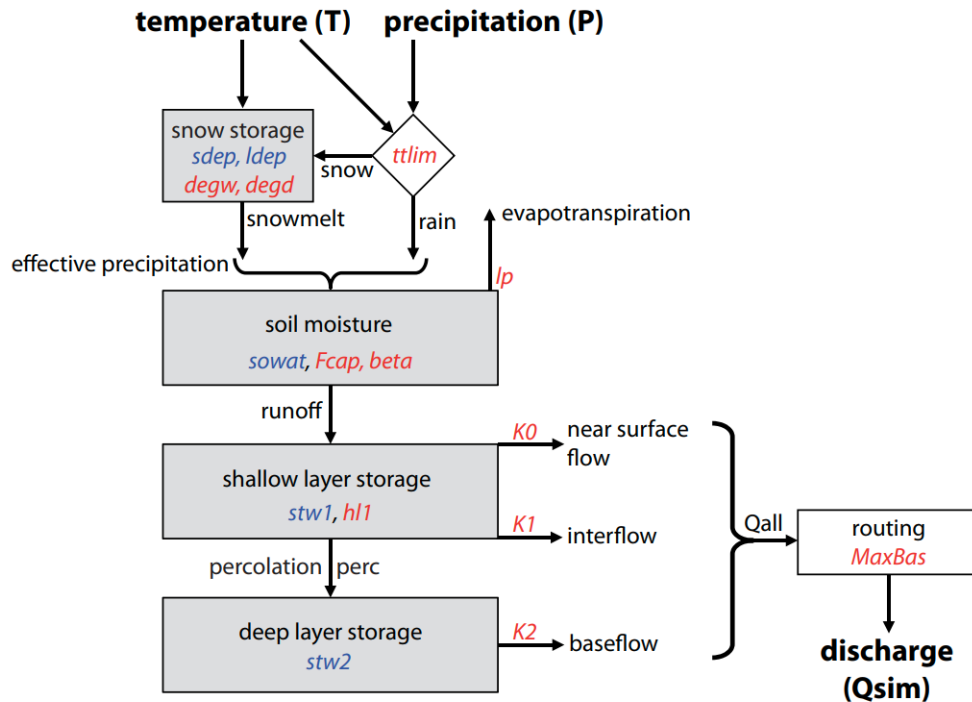


Figura 16: Esquema del modelo HBV (Giuliani and Herman, 2017)



El modelo HBV depende de cinco variables de estado, que se presentan en la tabla 4 y 12 parámetros que se presentan en la tabla 5.

Tabla 4: Variables de estado del modelo HBV (Giuliani and Herman, 2017)

Variable	Descripción
<i>sowat</i>	almacenamiento de agua en el suelo
<i>sdep</i>	almacenamiento de nieve
<i>ldep</i>	profundidad de liquido en la capa de nieve
<i>stw1</i>	almacenamiento en suelo superficial
<i>stw2</i>	almacenamiento en suelo profundo

Tabla 5: Parámetros del modelo HBV (Giuliani and Herman, 2017)

Parámetro	Unidades	Descripción	Rango
$K_2$	[día]	tasa extracción de agua capas profundas	(10;20.000)
$K_1$	[día]	tasa extracción de excedente capa superficial	(1;100)
$K_0$	[día]	tasa extracción de interflujo capa superficial	(0,5;20)
<i>MaxBas</i>	[hora]	longitud de enrutamiento del hidrograma	(24 - 120)
<i>degd</i>	[mm/(día °C)]	factor de derretimiento de nieve	(0;20)
<i>degw</i>	[°C]	temperatura sobre la que se derrite nieve	(-3;3)
<i>tlim</i>	[°C]	temperatura bajo la que hay congelamiento	(-3;3)
<i>perc</i>	[mm/día]	percolación hacia capa profunda	(0;100)
$\beta$	[-]	distribución de almacenamientos en suelo	(0;7)
<i>lp</i>	[-]	humedad limite para la evapotranspiración	(0,3;1)
$F_{cap}$	[mm]	humedad del suelo máxima	(10;2.000)
<i>hl1</i>	[mm]	almacenamiento máximo capa superficial	(0;100)

El modelo hidrológico se utiliza para tres subcuencas de la cuenca del Zambeze: Itezhi Tezhi, el río Luangwa y Victoria Falls; las que se pueden observar en la figura 17, y corresponden a los valores de  $q_{ITT}$ ,  $q_{BG}$  y  $q_{CB}$  de la figura 12, respectivamente. Para el resto de entradas del sistema, se va a explicar en detalle el procedimiento en las siguientes secciones.

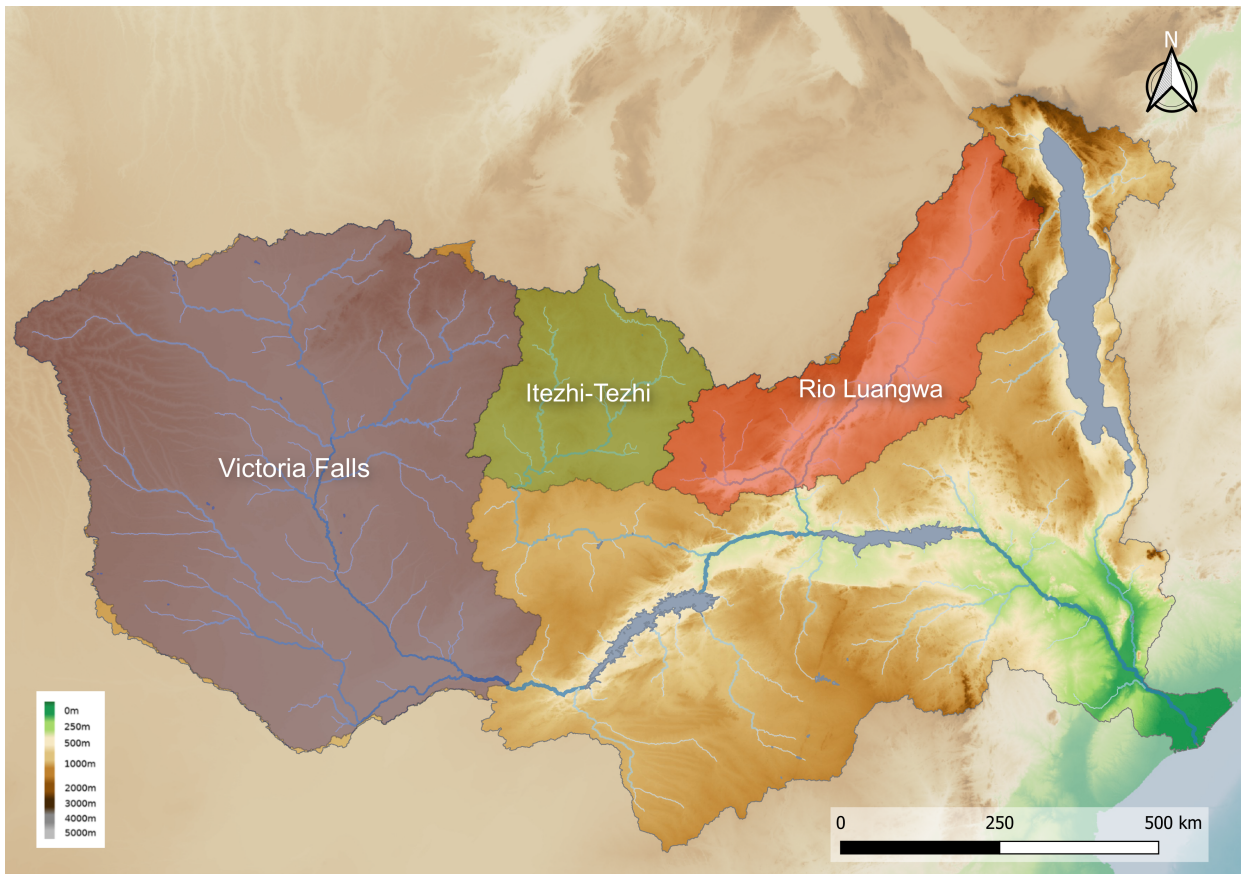


Figura 17: Subcuencas a modelar utilizando HBV

#### 4.2.3. Proporcionalidad de subcuencas

Se ha observado una clara relación de dependencia entre las aportaciones de las subcuencas Kariba y Kafue Flats con las de las subcuencas Victoria Falls e Itezhi-Tezhi, respectivamente. De acuerdo con la información disponible, las aportaciones de Kafue Flats representan históricamente alrededor del 30% de las de Itezhi-Tezhi, mientras que las aportaciones de Kariba equivalen aproximadamente al 10% del total de las de Victoria Falls (Castelletti et al., 2019b). Este coeficiente de proporcionalidad será aplicado para estimar las aportaciones de estas dos subcuencas en base a los resultados del modelo hidrológico HBV.

#### 4.2.4. Red neuronal artificial

En lo que respecta a la subcuenca del río Shire, se utiliza una red neuronal artificial (ANN) que fue previamente desarrollada y entrenada por POLIMI. Esta red neuronal establece una relación entre los caudales del río Shire y los valores de nivel del Lago Malawi, así como los valores de precipitación y temperatura.

No se va a adentrar en el funcionamiento de este tipo de herramientas porque se escapa del alcance del presente trabajo.

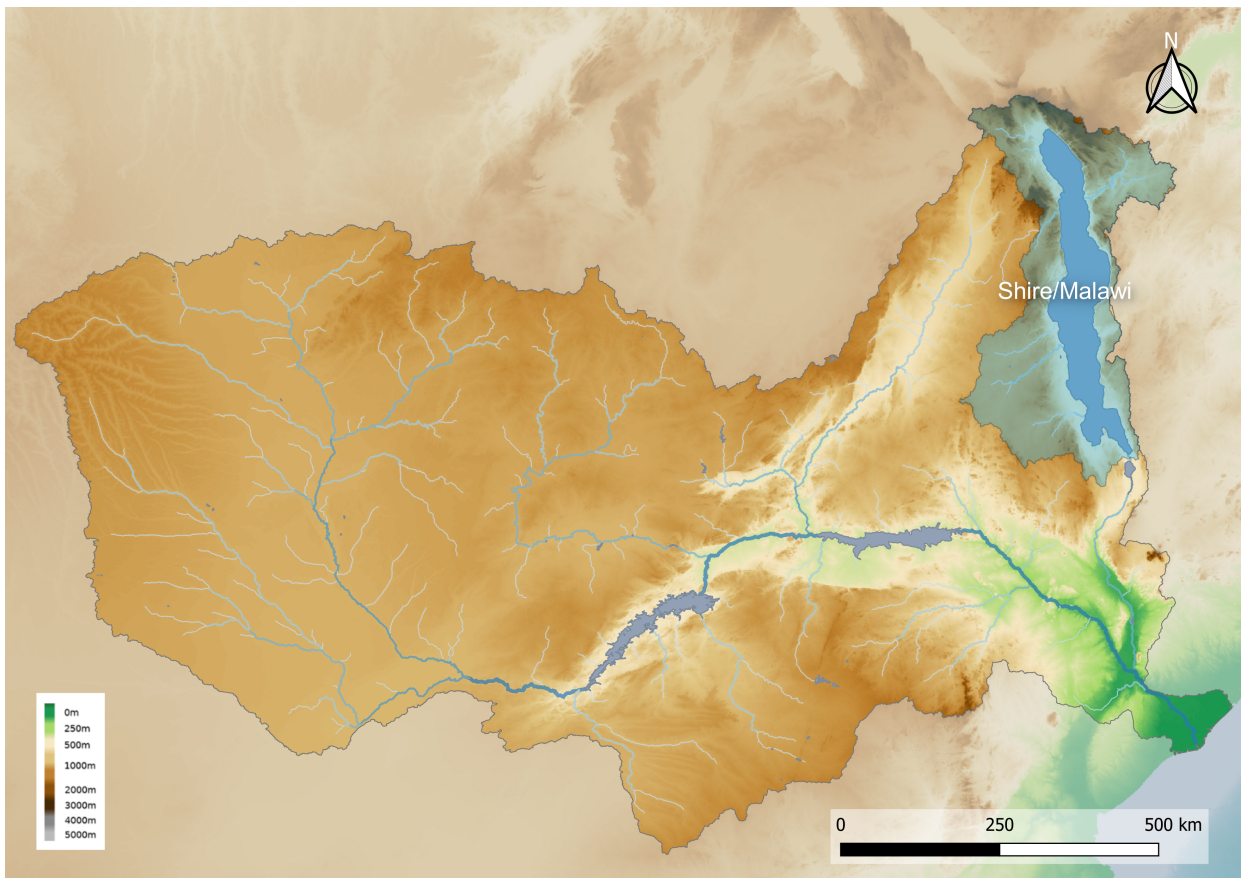


Figura 18: Subcuencas a modelar utilizando ANN

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Modelo de dinámica de sistemas

El modelo de dinámica de sistemas desarrollado se presenta en las figuras 19 a 21, donde se presentan las vistas de las distintas partes del modelo. Cada una de ellas entrega información importante sobre el planteamiento y funcionamiento del modelo.

En la figura 19, se muestra la representación del sistema de recursos hídricos de la cuenca. Esta vista es importante porque se realizan los balances de masa correspondientes, lo que permite ver cómo evolucionan los almacenamientos en los embalses en función de los flujos del sistema. Este tipo de análisis es fundamental para comprender cómo se distribuye el agua dentro de la cuenca y cómo afectan los diferentes factores a su gestión.

En la figura 20, se realizan las decisiones de desembalse. En esta vista se presentan las reglas que se aplican para tomar estas decisiones, las cuales se detallan en la sección 5.3.

Finalmente, en la figura 21, se presentan las gráficas de interés del sistema. En este caso, se muestran el nivel de los embalses, el flujo en el delta y la evolución de los indicadores de rendimiento a lo largo del periodo de simulación. Estas gráficas son esenciales para visualizar la dinámica del sistema y comprender su comportamiento en diferentes escenarios.

En las siguientes secciones se detallará el funcionamiento específico del sistema en los diferentes escenarios analizados, así como su rendimiento en los indicadores propuestos. Es fundamental analizar el desempeño del sistema en diferentes condiciones para entender su capacidad de adaptación y mejorar su gestión en situaciones adversas.

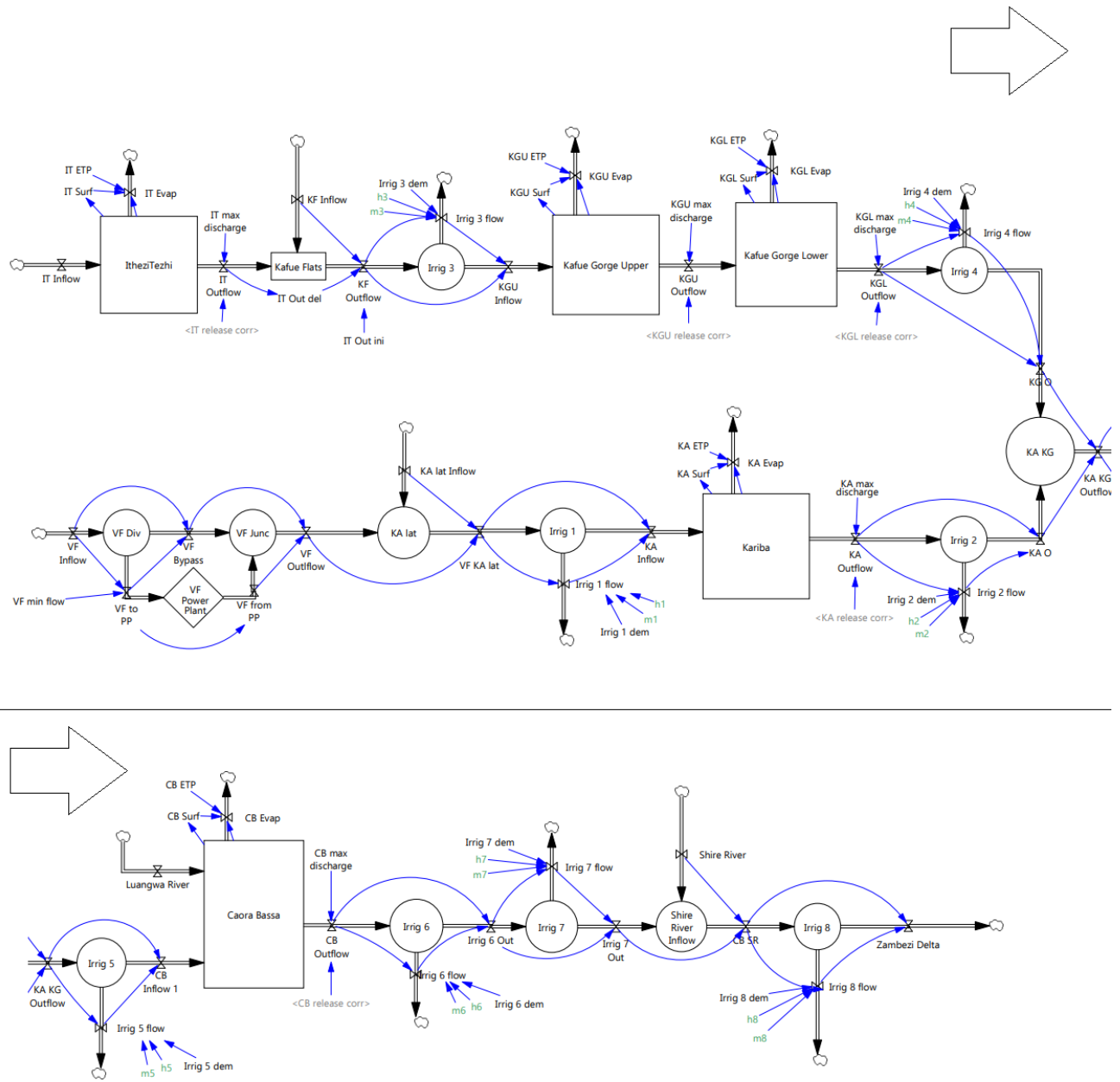


Figura 19: Vista 1 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Representación del sistema.

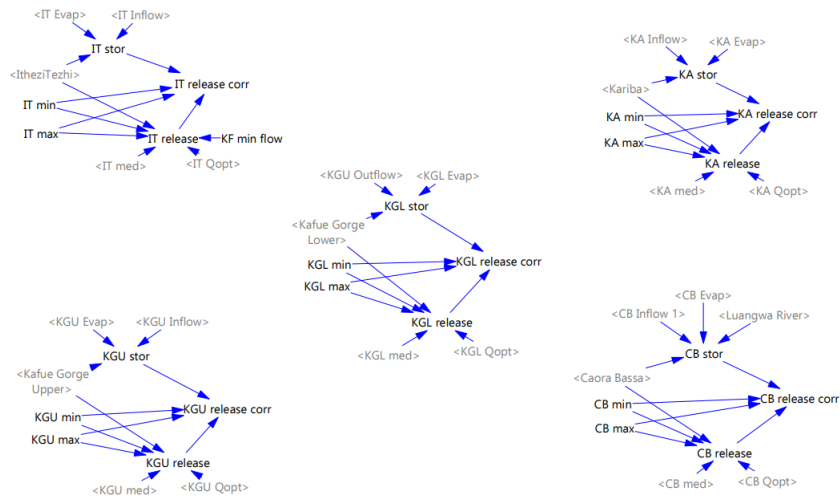


Figura 20: Vista 2 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Reglas de operación.

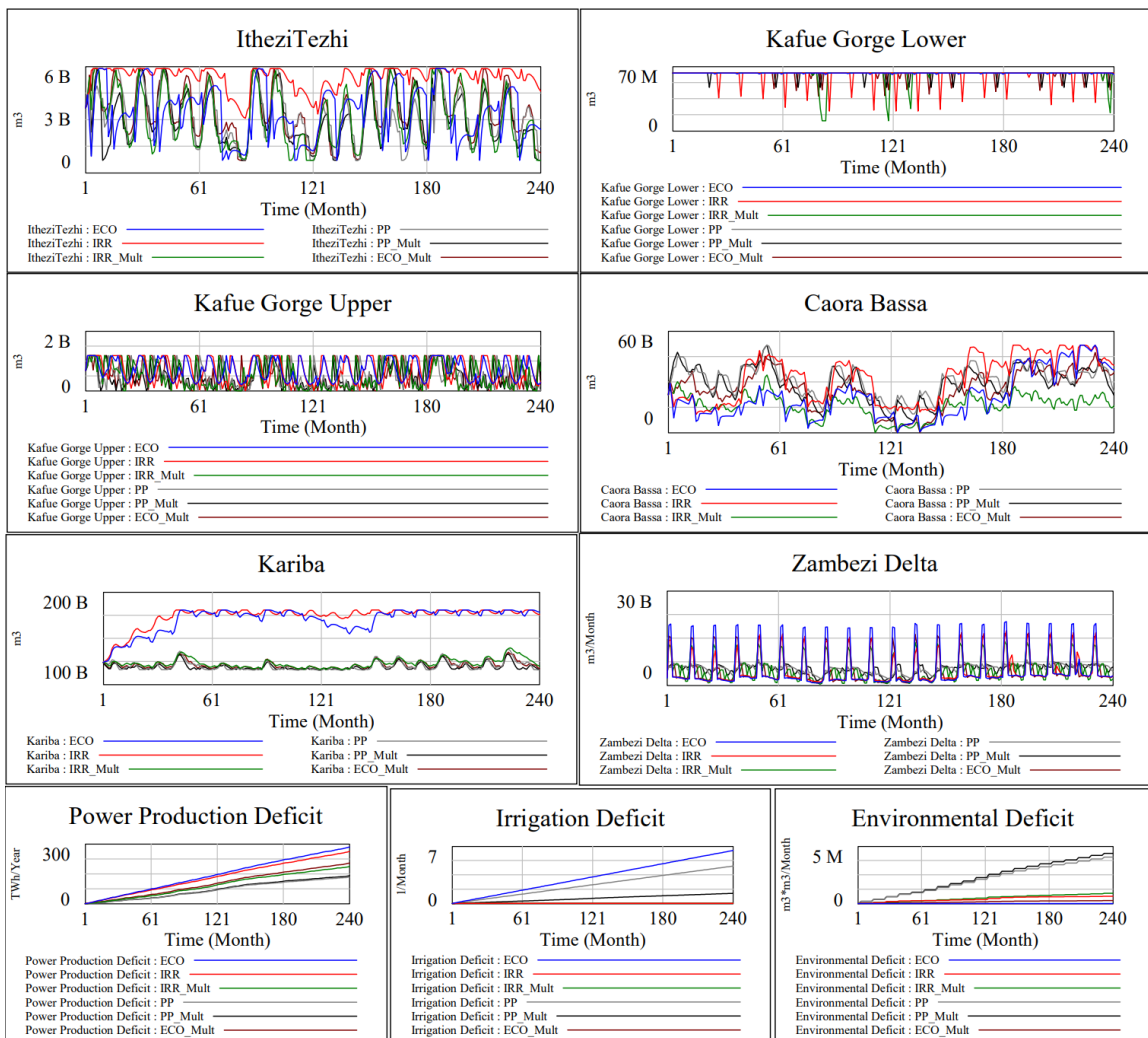


Figura 21: Vista 3 modelo de dinámica de sistemas desarrollado. Gráficas de interés.

## 5.2. Representación del sistema

En la vista 1 del modelo presentada anteriormente en la figura 19, se muestra la representación del sistema de gestión de recursos hídricos. En esta vista se pueden observar los principales elementos de este sistema, que incluyen los embalses y los nodos. En las secciones siguientes se abordará en detalle el funcionamiento de cada uno de estos elementos y su interacción dentro del sistema. Cabe mencionar que con la finalidad de no recargar la figura, no se incluyeron los elementos de cálculo de los indicadores que se realiza en esta vista. Estos se presentan en la figura 22, y corresponden a las ecuaciones detalladas en la sección 4.1.1 .

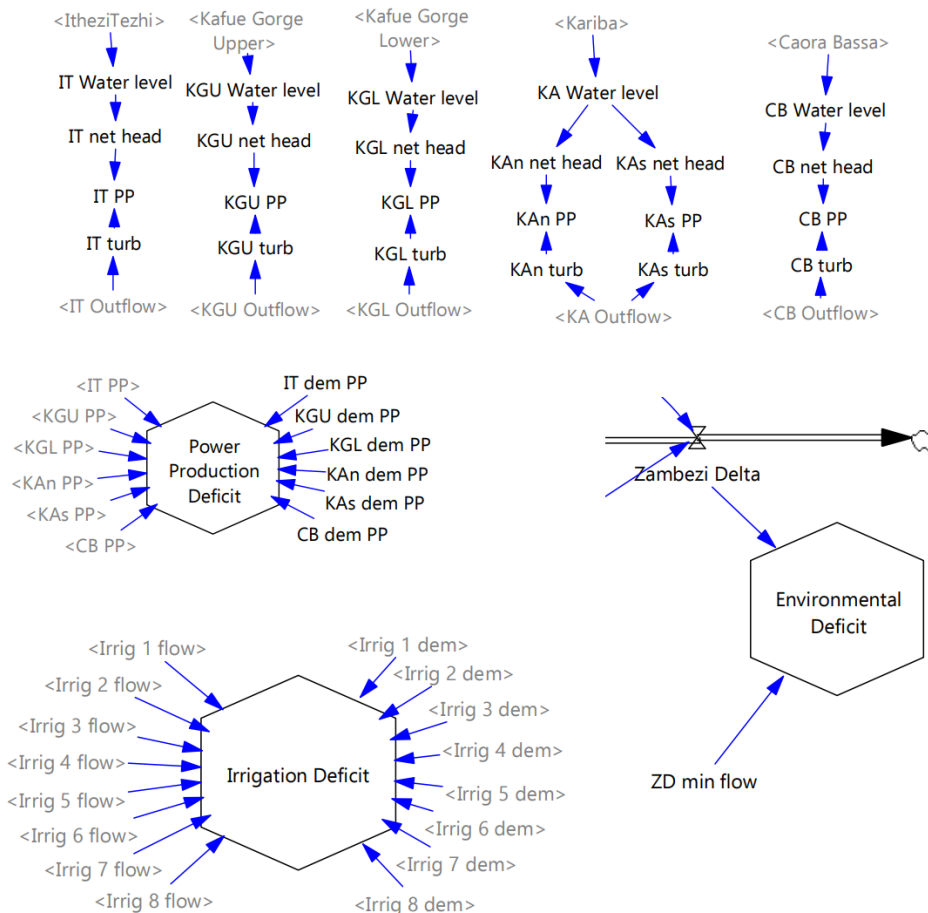


Figura 22: Indicadores de rendimiento del sistema

### 5.2.1. Embalses

En la figura 23 se muestra en detalle la representación de uno de los embalses del sistema, en este caso Itezhi-Tezhi, junto con sus flujos de entrada y salida. El nivel del embalse se determina a partir del nivel inicial para el periodo de tiempo y los flujos de entrada y salida, con la condición de que no se pueden tener niveles negativos, ya que esto no es físicamente posible.

Se puede observar que se realiza un cálculo de la evaporación del embalse, la cual depende de la superficie y la evaporación potencial. La superficie se calcula utilizando una curva batimétrica que relaciona la cantidad de agua almacenada con la superficie, y la evaporación potencial corresponde a una curva con valores mensuales. Naturalmente, ambas curvas son específicas para cada embalse del sistema.

Los símbolos de nubes representan los límites del sistema. En este caso el flujo de entrada al embalse viene de aportaciones de la cuenca, las cuales se obtienen de una planilla de cálculo externa, pero para otros embalses la entrada puede venir de un flujo interno del sistema. La evaporación se representa hacia una nube porque este flujo sale del sistema.

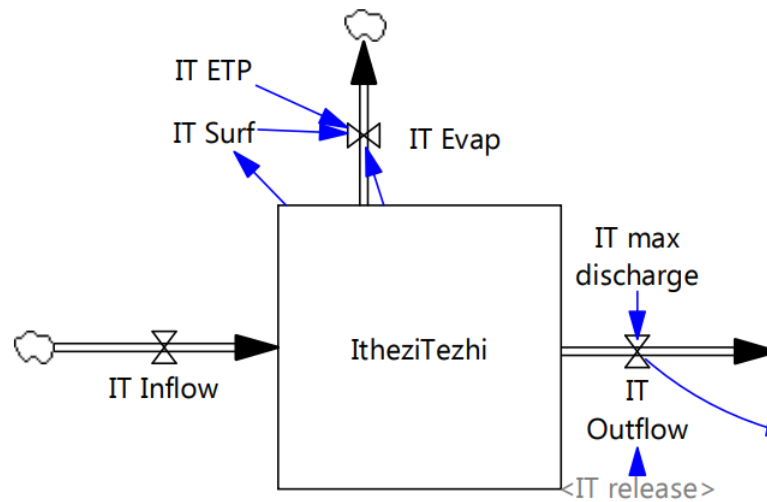


Figura 23: Representación de embalse Itezhi-Tezhi



### 5.2.2. Nodos

La figura 24 muestra dos nodos del sistema de gestión de recursos hídricos. Es importante destacar que estos nodos no almacenan agua, sino que simplemente representan uniones o separaciones de corrientes.

El nodo denominado Kafue Flats corresponde a una subcuenca del sistema, y las aportaciones de escorrentía se representan como KF Inflow. Los antecedentes de esta zona es que se presenta un desfase entre la entrada y salida del sistema, al corresponderse a una zona de humedales. Se ha estimado este retraso en dos meses, por lo que al sistema se le agrega un Delay de dos meses representado por IT Out del.

El nodo Irrig 3 corresponde al suministro del distrito de irrigación número 3, el cual se calcula de acuerdo a la ecuación detallada en la sección 4.1.2. Este flujo depende del flujo disponible (KF Outflow), la demanda (Irrig 3 dem), y dos parametros característicos ( $h_3$  y  $m_3$ ).

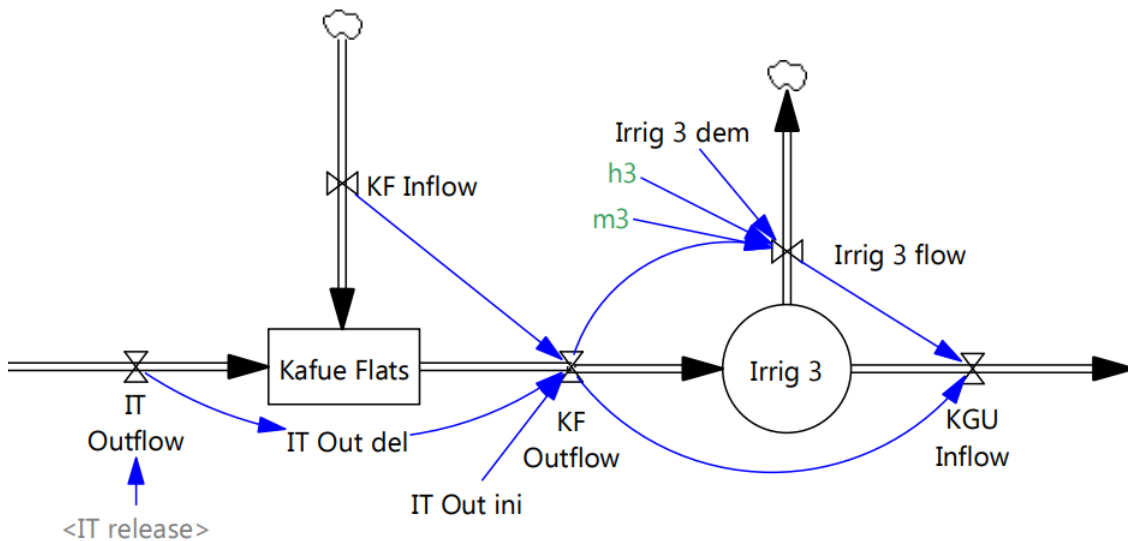


Figura 24: Representación de nodos para la zona de Kafue Flats

### 5.3. Reglas de operación de embalses

Las decisiones de desembalse están determinadas por las curvas de operación establecidas para cada embalse. Es importante recordar que los valores de suelta óptima y nivel medio varían mensualmente, lo que implica que existen 12 valores para cada parámetro por embalse. Se agrega un paso de corrección en caso de que la decisión de desembalse resulte en un nivel bajo el mínimo o sobre el máximo, el cual limita el desembalse para mantenerse dentro de este rango.

Para la regla ejemplificada en la figura 25, el estado del embalse utilizado corresponde a  $\langle I_{tezhiTezhi} \rangle$ , específicamente el nivel inicial del embalse para el periodo de tiempo. Con este valor se obtiene un valor de flujo dado por la curva del mes correspondiente. Luego, con este valor de flujo  $IT_{release}$ , se hace una comprobación de si al tener en cuenta las entradas y la evaporación, el nivel de embalse sale del rango permitido ( $IT_{min} - IT_{max}$ ), corrigiendo en caso de ser necesario para mantenerse en el rango.

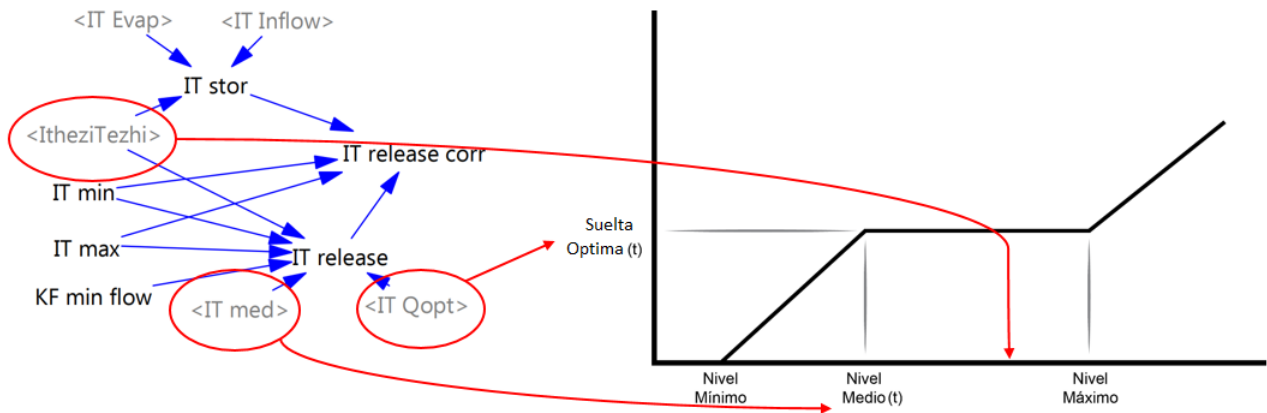


Figura 25: Representación regla de operación

### 5.4. Optimización del modelo

Utilizando los valores de aportaciones mensuales observadas y teniendo como punto de comparación el modelo desarrollado por POLIMI, se realiza la optimización de las reglas de operación de los parametros del sistema, en este caso corresponden a 120 parametros de las reglas de operación de los embalses, y 16 parametros de las funciones de suministro a riego.

Como ya se mencionó en la sección 4.1.6, este procedimiento se realiza con la herramienta de optimización integrada en VENSIM, que utiliza un algoritmo de optimización basado en el método de Powell, minimizando las funciones de déficit con un ajuste de los pesos dependiendo del objetivo principal, el caso denominado mono-objetivo, solo se trata de disminuir el déficit correspondiente a ese objetivo sin tener en cuenta los otros, en el caso multi-objetivo se le da un peso (menor) a los otros indicadores. La totalidad de los resultados de este proceso se presenta en la sección 7.1, donde se entregan tablas tanto de los pesos utilizados para cada optimización, como de los parámetros óptimos encontrados.

#### **5.4.1. Rendimiento del modelo**

Se realizó una prueba de rendimiento del modelo utilizando datos de observaciones de aportaciones históricas, comparando con el modelo de RBF. Los resultados se presentan en las tablas de la sección 7.2 y en las gráficas de las figuras 26 a 29.

Al analizar los resultados de los modelos relacionados con la producción energética, se puede observar que el modelo propuesto supera lo obtenido por RBF en este indicador para el caso mono-objetivo con una mejora de un 2,1 %, pero no para el caso multiobjetivo donde se supera el déficit por un 2,8 % .

Es importante mencionar que, al enfocarse exclusivamente en la producción energética, el enfoque de optimización mono-objetivo descuida considerablemente el suministro de agua para riego. Esta falta de consideración conlleva a un déficit significativamente mayor en comparación con el modelo de RBF. El modelo propuesto restringe indiscriminadamente las demandas de riego para los distritos anteriores al distrito 6, lo que resulta en una restricción prácticamente total del suministro de agua. Sin embargo, es importante resaltar que esta limitación se ve compensada en el caso de la optimización multi-objetivo, ya que se incluyen los otros déficits relevantes en el proceso de optimización.

Para el modelo multi-objetivo, el déficit de suministro a riego queda un 22,8 % por sobre el obtenido en el modelo RBF, mientras que el déficit medioambiental es un 17,2 % mayor.

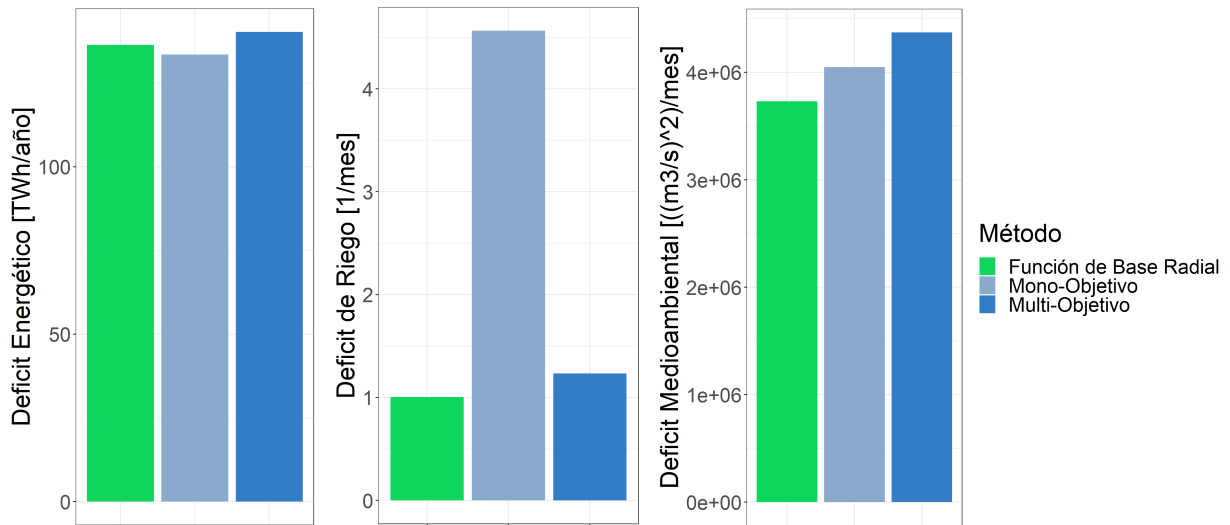


Figura 26: Rendimiento modelos con objetivo de producción energética

En el caso de los modelos con objetivo de irrigación, ambos modelos logran reducir el déficit por debajo de lo obtenido por el modelo de RBF para este indicador, para el caso mono-objetivo se logra anular el déficit, y para el caso multi-objetivo se disminuye en un 55,7%.

En cuando al indicador de producción energética, el enfoque mono-objetivo aumenta el déficit en un 44,4% mientras que el multi-objetivo limita el aumento a un 2,8%.

El modelo mono-objetivo es superior además en conservación ecológica, disminuyendo el déficit en un 18,1%, mientras que el multi-objetivo se ve superado por el de RBF, obteniendo un déficit 16,3% mayor

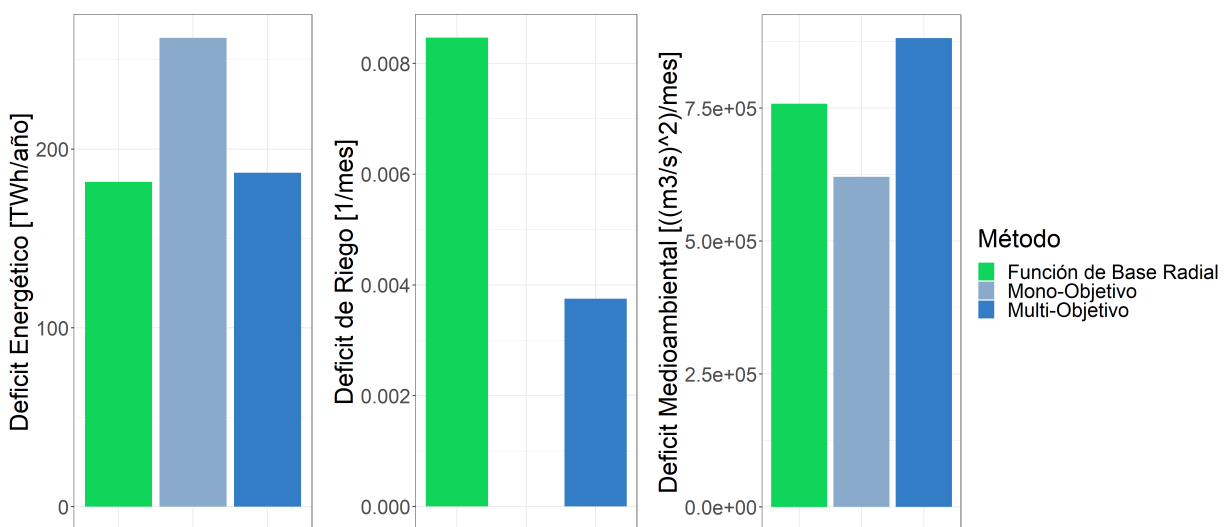


Figura 27: Rendimiento modelos con objetivo de suministro a riego

En el caso de los modelos con objetivo de conservación ecológica, se observa que la optimización mono-objetivo logra eliminar por completo el déficit de este indicador. Sin embargo, es importante destacar que esto se logra descuidando la producción energética y, sobre todo, el suministro de agua para riego en comparación con el modelo de referencia.

Para el caso multi-objetivo, se destaca que todos los indicadores superan lo obtenido en el modelo de RBF, observando mejoras del 4,2% en la producción energética, del 62,7% en el suministro a riego y del 26,5% en la conservación ecológica.

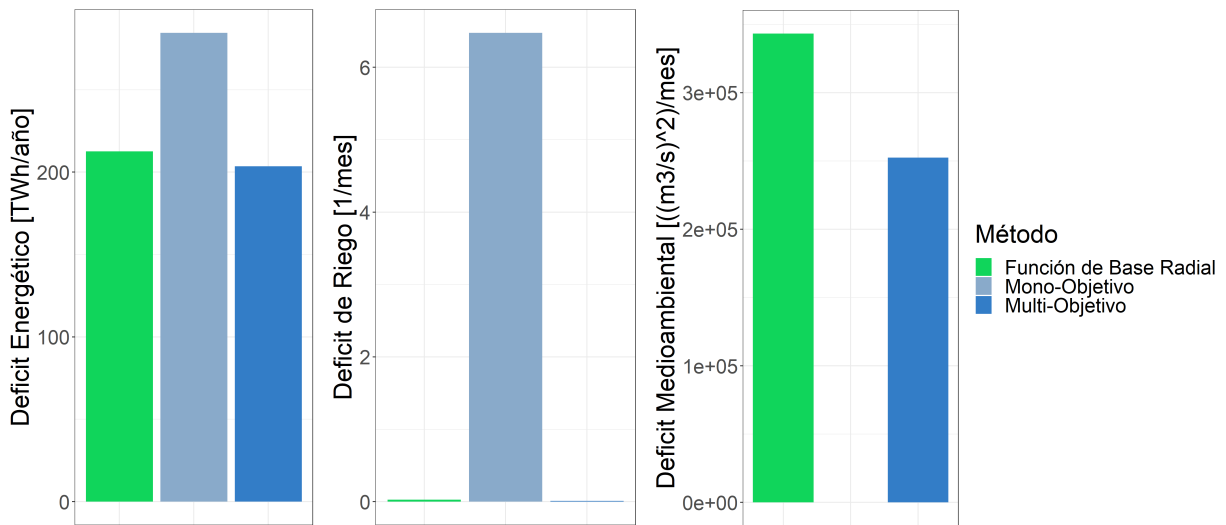


Figura 28: Rendimiento modelos con objetivo de conservación ecológica

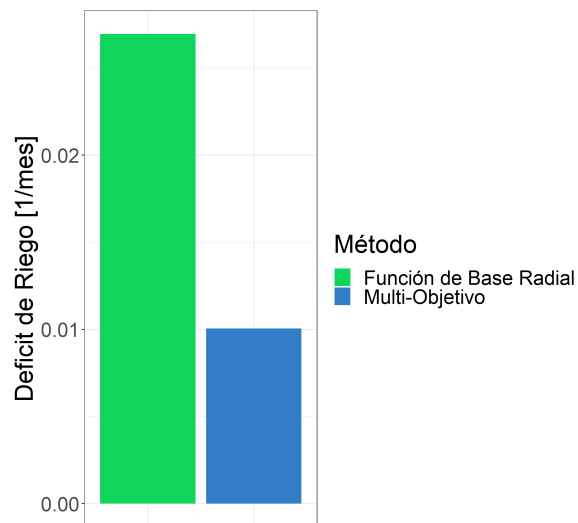


Figura 29: Rendimiento modelos con objetivo de conservación ecológica. Déficit de Riego

Los resultados obtenidos en los modelos de dinámica de sistemas, indican que se pueden utilizar reglas de operación simples con resultados comparables a los obtenidos por modelos más complejos. En general el modelo muestra un rendimiento inferior solo en los objetivos de producción energética.

El rendimiento inferior en cuanto a producción energética se puede explicar dado que se está penalizando la sobreproducción energética, no solo la subproducción, por lo que superar el objetivo de producción es igual de indeseable que no alcanzarlo. Teniendo esto en consideración, reglas de operación que entreguen un flujo fijo para distintos almacenamientos en un rango, pueden no ser las más adecuadas. Una alternativa que podría ser complejizar las reglas de operación agregando más puntos. O bien, realizar un modelo que tenga en cuenta el estado del sistema a la hora de entregar las reglas de operación. Se debe mencionar que esta última alternativa generaría una dependencia al modelo para la gestión del sistema, teniendo que utilizarlo continuamente para obtener los desembalses óptimos, esto puede significar un resultado menos aplicable a la hora de entregarlo a los encargados de la gestión del recurso.

Es importante destacar que en las optimizaciones mono-objetivo, al no considerar otros déficits durante el proceso de búsqueda de soluciones, existe el riesgo de no encontrar las mejores soluciones que puedan eliminar dicho déficit en particular, dado que todas las soluciones que anulan el déficit son igual de óptimas. Además, no solo se deben considerar los indicadores sino también la aplicabilidad de los resultados en la práctica. En algunos casos, se puede restringir la demanda de irrigación en su totalidad, lo cual no es un resultado aplicable en la gestión de embalses. Por lo tanto, es necesario evaluar cuidadosamente los resultados y considerar todas las implicaciones prácticas antes de aplicar las reglas de operación en la gestión de embalses.

La optimización multiobjetivo considera el equilibrio entre diferentes objetivos y facilita la obtención de un conjunto de soluciones óptimas que cubren un rango de compromisos entre ellos. Esto brinda una visión más completa y una mejor comprensión de las posibles soluciones.

En resumen, aunque las optimizaciones mono-objetivo pueden ser útiles para ver hasta que punto se puede disminuir un déficit, es importante reconocer sus limitaciones y considerar enfoques multi-objetivo cuando se aborden problemas más complejos que involucren múltiples criterios o déficits interrelacionados.

## 5.5. Obtención de curvas de decisión

Con los resultados entregados en las tablas de la sección 7.1, fácilmente se puede generar las curvas de decisión de los embalses. Estas curvas dependen únicamente de dos puntos: el nivel medio del embalse y la suelta optima o  $Q_{opt}$ . A modo de ejemplo, se presenta la representación de las curvas del embalse Caora Bassa para el modelo con objetivo de conservación ecológica multi-objetivo.

Considerando que este modelo corresponde al de conservación ecológica, que prioriza el flujo en el delta para los meses de febrero y marzo, se puede ver claramente que en estos meses las sueltas son mayores, y se mantienen por un rango más amplio de almacenamiento, mientras que en los otros meses las sueltas son menores y se tienden a restringir.

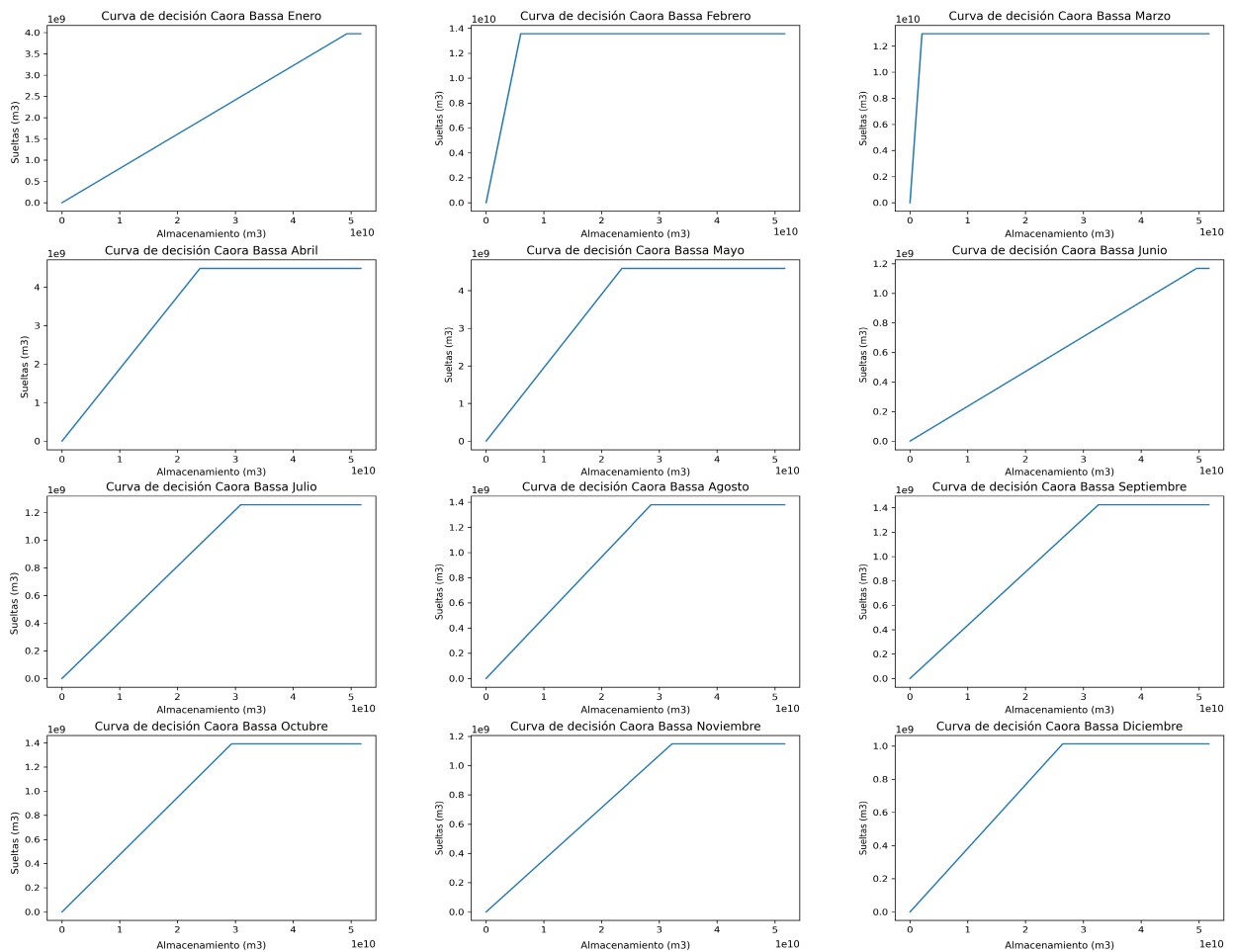


Figura 30: Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi-objetivo de conservación ecológica

En las figuras 31 a 33, se puede ver en gráficas de la misma escala como varían las curvas a lo largo del año, para el embalse Caora Bassa en las optimizaciones multiobjetivo. Se puede notar como las curvas de objetivo producción energética no varían considerablemente a lo largo del año, dado que los objetivos de producción se mantienen constantes. Mientras que en el modelo que preferencia el suministro a riego, difieren mucho más entre si, dado que la demanda de riego tiene una fluctuación anual importante. Como se discutió anteriormente, en las curvas del modelo de conservación ecológica, se nota la clara diferencia entre los meses de flujo mínimo en el delta y los demás meses del año.

La representación de la totalidad de las curvas de operación obtenidas no se considera necesaria para este trabajo, dada la gran cantidad de gráficas que se generaría. Sin embargo, el procedimiento es análogo al utilizado para las reglas de operación aquí presentadas y de requerirse se pueden generar.

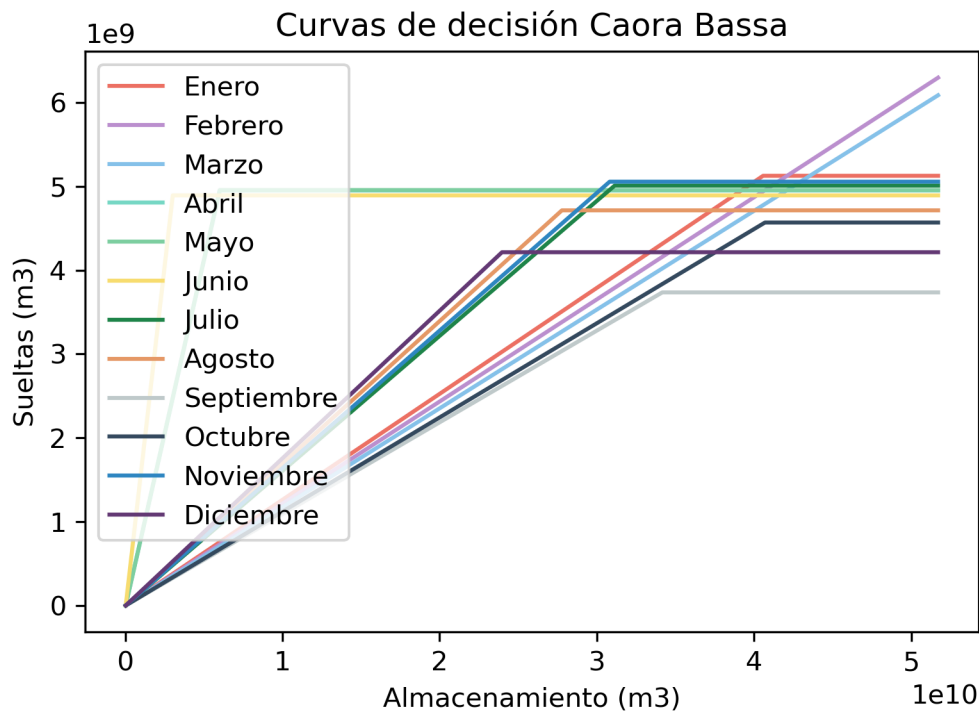


Figura 31: Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi-objetivo de producción energética



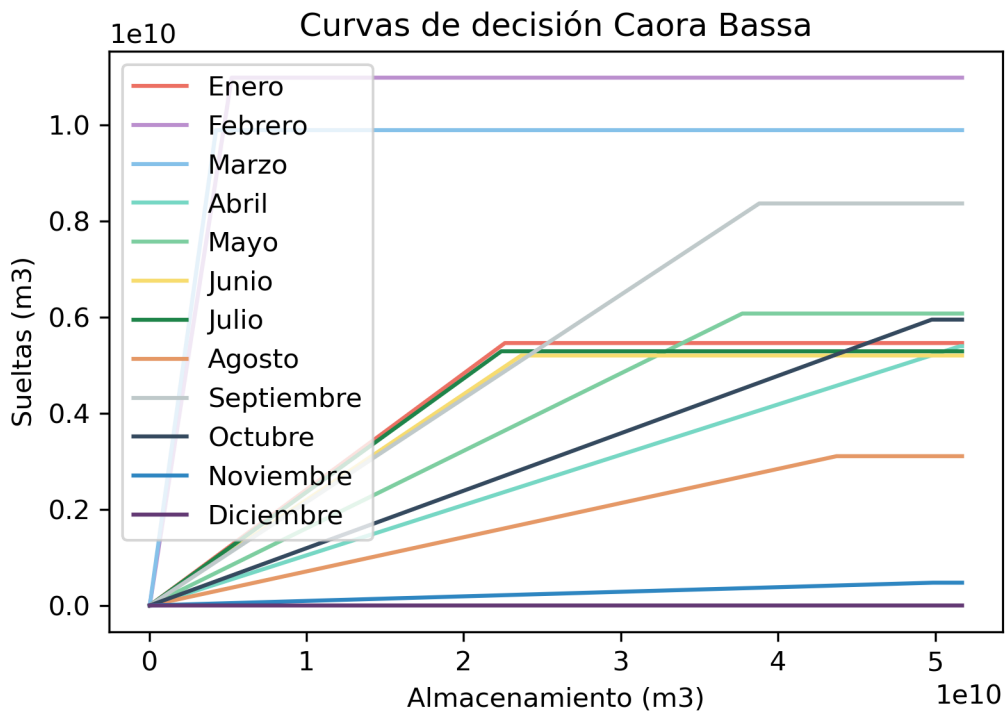


Figura 32: Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi-objetivo de suministro a riego

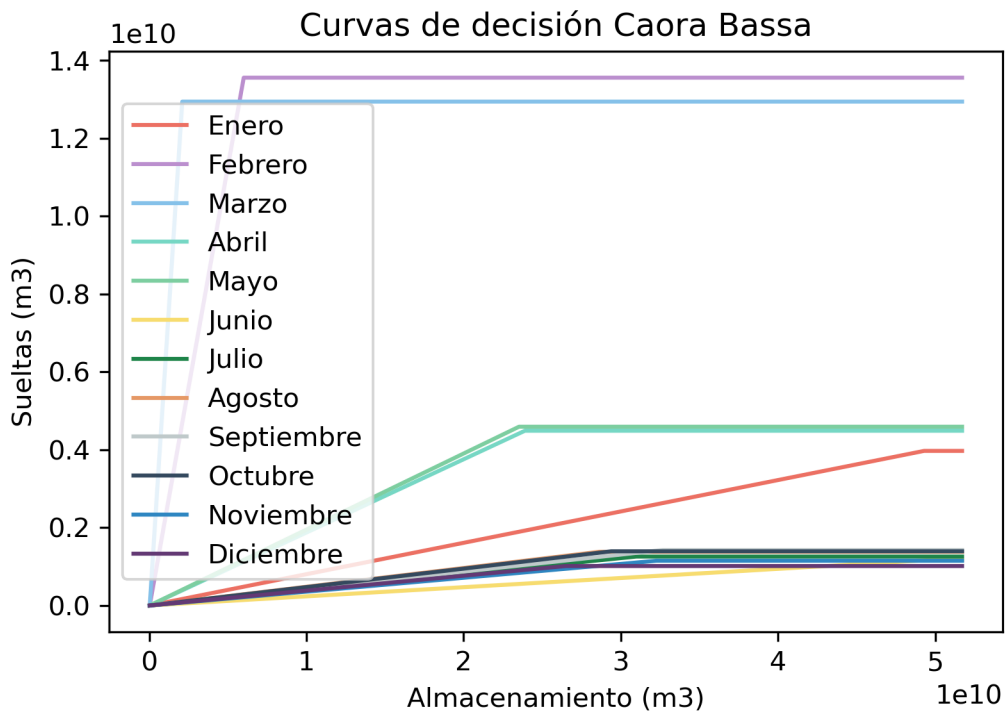


Figura 33: Ejemplo de curvas de decisión obtenidas. Embalse Caora Bassa modelo multi-objetivo de conservación ecológica

## 5.6. Escenarios de cambio climático

### 5.6.1. Aportaciones periodo de control

La figura 34 a la figura 37 muestran los resultados del modelo hidrológico y la red neuronal artificial para el período de control, utilizando datos de los modelos climáticos. Para cada caso, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos por cada modelo, así como la media de los 5 modelos utilizados.

En general, se puede observar una clara diferencia entre las cuencas modeladas con el modelo hidrológico y la cuenca del río Shire. En las cuencas modeladas con el modelo hidrológico, las aportaciones de agua son principalmente asociadas a la precipitación y la escorrentía superficial. Por otro lado, en la cuenca del río Shire, las aportaciones de agua están fuertemente influenciadas por la dinámica del lago Malawi.

En las figuras 38 a 41 se pueden observar las aportaciones medias mensuales para el periodo de control y su comparación con las aportaciones medias mensuales de las observaciones utilizadas para desarrollar el modelo de dinámica de sistemas. Se observa claramente la temporada húmeda y seca a lo largo del año para las primeras tres subcuencas, y nuevamente se puede observar la influencia de la dinámica del lago Malawi en las aportaciones al río Shire, donde no se observa una variación tan pronunciada a lo largo del año en estos valores.

No se observa una tendencia clara en la modelación del periodo de control en comparación con los valores observados. Los modelos estiman diferentes aportaciones para cada ubicación analizada. Para Itezhi-Tezhi, los modelos pronostican mayores aportaciones en el periodo húmedo y menores en el periodo seco. En Victoria Falls, los modelos pronostican menores aportaciones en promedio para todos los meses. Para el río Luangwa, los modelos pronostican aportaciones superiores en la mayoría de los meses, excepto en enero, febrero y septiembre. En la subcuenca del río Shire, las aportaciones modeladas están significativamente por debajo de las observadas en todos los meses.

La tabla 6 resume las comparaciones de las medias mensuales. Se observa un aumento anual de un 204,3% en la subcuenca de Itezhi-Tezhi y un aumento del 37,35% en la subcuenca del río Luangwa. Por otro lado, hay una disminución del 59,51% en la subcuenca de Victoria Falls y del 50,31% en la subcuenca del río Shire. Para el caso de las aportaciones anuales medias totales se observa una disminución de un -1,38%, teniendo en consideración la variación en las subcuencas modeladas proporcionalmente (Kafue Flats y Kariba).

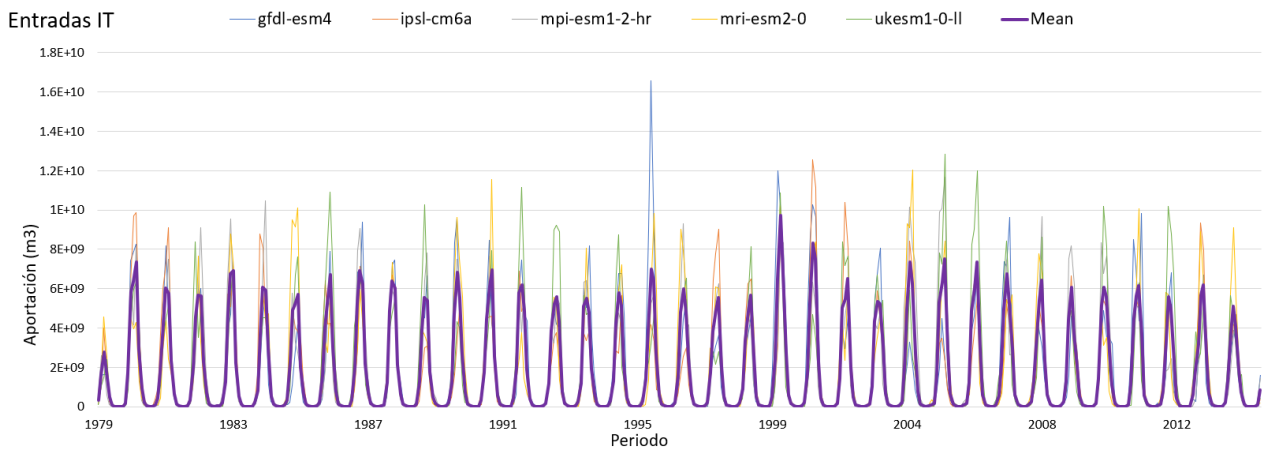


Figura 34: Aportaciones para el periodo de control subcuenca Itezhi-Tezhi

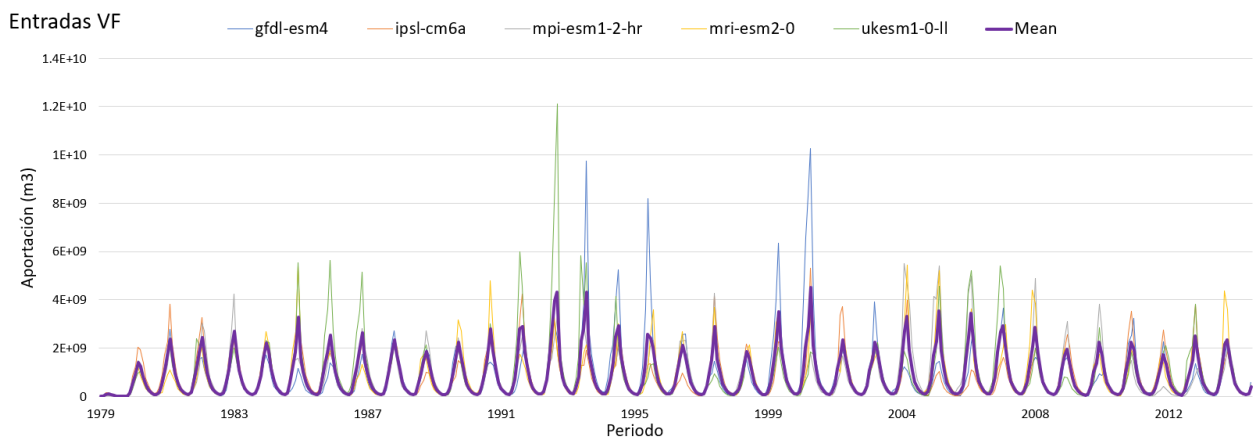


Figura 35: Aportaciones para el periodo de control subcuenca Victoria Falls

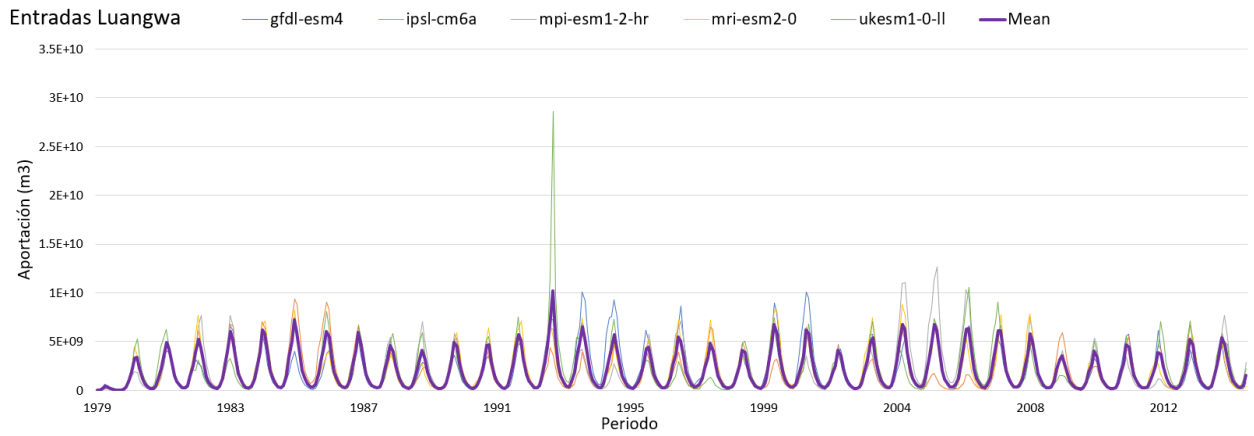


Figura 36: Aportaciones para el periodo de control subcuenca río Luangwa

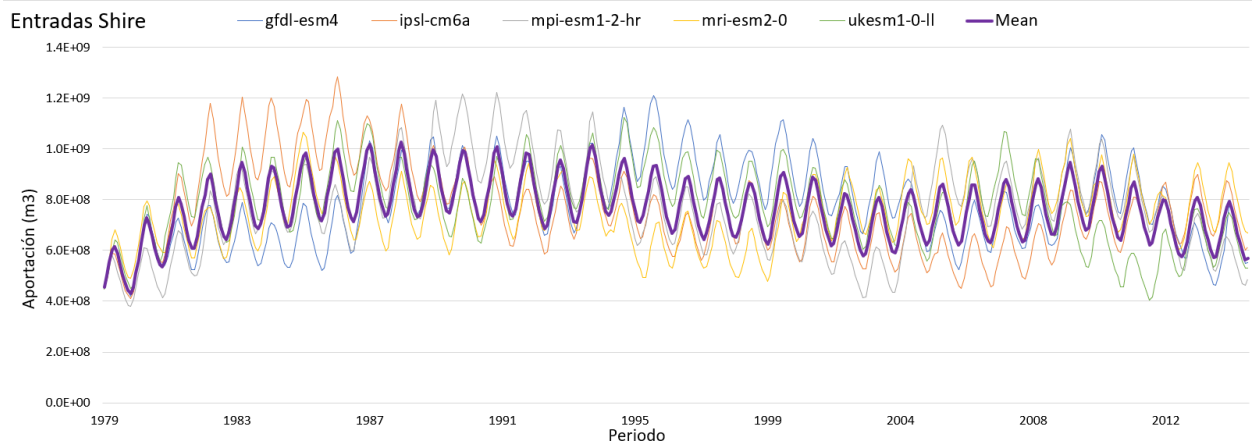


Figura 37: Aportaciones para el periodo de control subcuenca Shire/Malawi

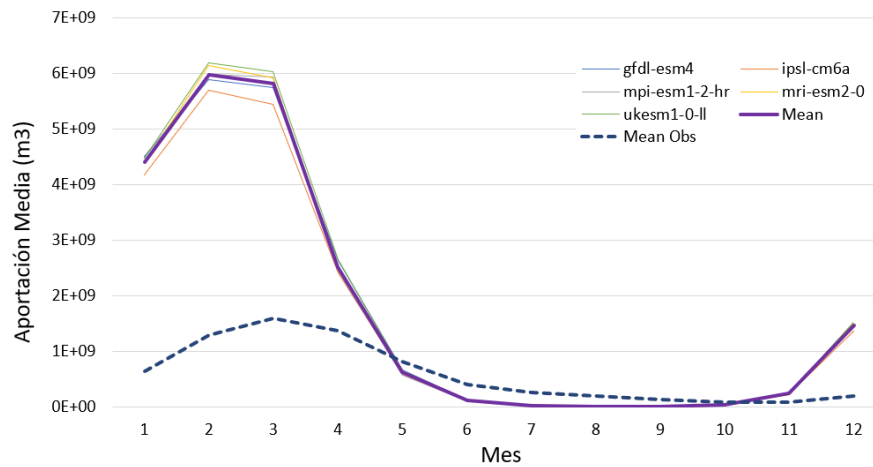


Figura 38: Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Itezhi-Tezhi

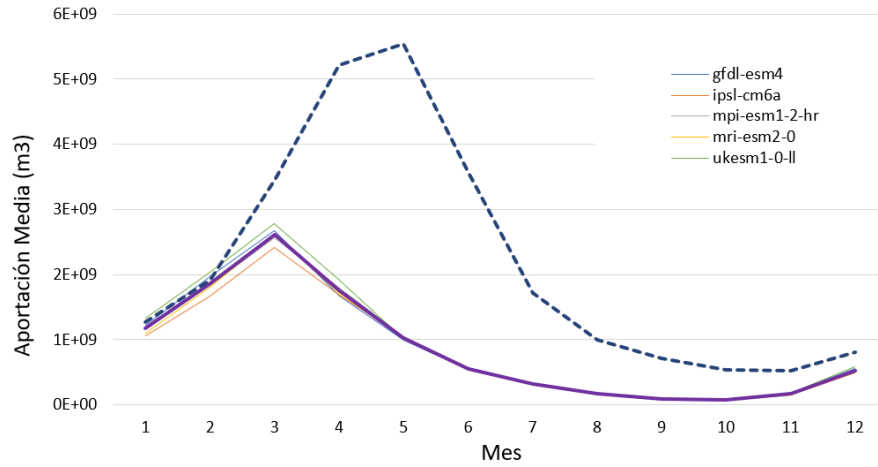


Figura 39: Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Victoria Falls

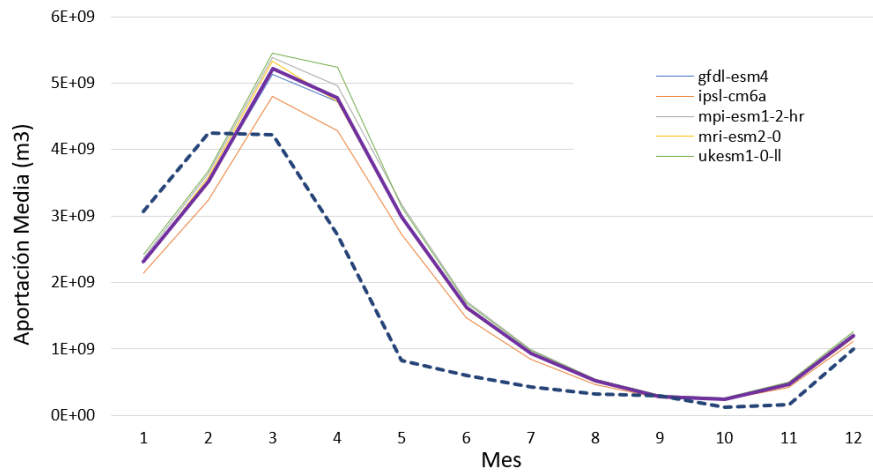


Figura 40: Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca río Luangwa

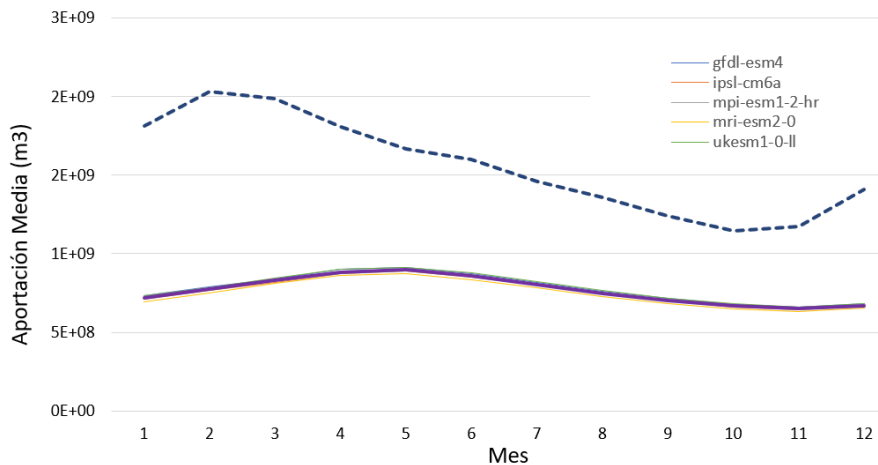


Figura 41: Aportaciones medias mensuales para el periodo de control subcuenca Shire/Malawi

Tabla 6: Variaciones porcentuales en aportaciones periodo de control respecto a observaciones

Mes	IT	VF	LW	SH
1	605.75	-5.06	-22.49	-60.07
2	374.01	-0.40	-14.78	-61.60
3	268.47	-22.27	27.16	-57.91
4	84.32	-65.37	80.33	-50.68
5	-23.08	-81.05	272.42	-45.69
6	-70.86	-83.98	178.00	-45.78
7	-89.83	-80.89	125.29	-44.35
8	-94.91	-82.04	66.00	-44.25
9	-93.79	-86.17	1.65	-42.85
10	-59.19	-84.96	103.03	-41.17
11	176.90	-67.85	183.96	-44.00
12	669.62	-32.55	21.95	-52.11
Anual	204.30	-59.51	37.35	-50.31
		-1.38		

### 5.6.2. Proyección de aportaciones

Para analizar la proyección de las aportaciones a la cuenca se consideran 3 periodos de tiempo: corto plazo (de 2016 a 2040), mediano plazo (de 2041 a 2070) y largo plazo (de 2071 a 2100). En la sección 7.3 se presentan los promedios de los modelos para cada subcuenca, en los tres periodos de tiempo mencionados, y para los tres escenarios climáticos considerados (SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5).

En las tablas 7 a 9 se presentan los porcentajes de variación en las aportaciones de cada subcuenca para los distintos periodos considerados. Se observa un empeoramiento generalizado en todas las subcuencas, excepto en la del río Luangwa, donde se evidencia una mejora centrada en los meses secos en los escenarios de corto y mediano plazo, y en el escenario SSP1-2.6 de largo plazo, solo para los meses de septiembre y octubre. En el caso de la subcuenca del río Luangwa, la variación anual resulta positiva solo en el escenario SSP5-8.5 a corto plazo.

A pesar de esta mejora en el río Luangwa, las aportaciones totales de la cuenca muestran variaciones negativas en todos los escenarios. La menor disminución se registra en el escenario SSP5-8.5 de corto plazo, con una reducción del 6,43%. Por otro lado, el escenario SSP3-7.0 de largo plazo presenta la disminución más drástica, con un 77,09% de reducción en las aportaciones totales de la ZRB.

Es importante destacar la disminución sustancial proyectada a largo plazo en la subcuenca Shire/Malawi, donde se observan reducciones del 90,78% y 93,98% en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente.

En resumen, las proyecciones indican un empeoramiento generalizado en las aportaciones a la cuenca, con la excepción del río Luangwa que muestra mejoras en algunos escenarios y periodos específicos. No obstante, las aportaciones totales de la cuenca presentan disminuciones en todos los escenarios y periodos, siendo especialmente preocupante la situación proyectada para la subcuenca Shire/Malawi a largo plazo.

Tabla 7: Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Corto Plazo

2016-2040												
	SSP1-2.6				SSP3-7.0				SSP5-8.5			
Mes	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH
1	-14.29	-33.38	-49.09	-21.28	-12.62	-37.90	-47.69	-15.97	-12.32	-27.80	-42.39	-17.29
2	-9.37	-25.48	-36.75	-20.55	-9.56	-34.78	-37.95	-15.31	-8.93	-22.80	-30.03	-16.61
3	-7.04	-21.45	-22.46	-19.91	-11.05	-31.10	-25.64	-15.14	-7.08	-20.35	-13.78	-16.12
4	-10.24	-20.57	-6.60	-19.65	-12.72	-24.29	-10.22	-15.38	-9.95	-19.08	-2.14	-15.94
5	-10.13	-17.17	17.64	-19.54	-7.96	-18.97	13.25	-15.38	-5.66	-16.93	25.32	-15.79
6	-10.03	-17.37	54.54	-19.27	-12.45	-19.18	48.75	-15.05	-9.23	-17.35	64.51	-15.56
7	-12.81	-17.37	103.32	-19.20	-15.65	-19.17	95.71	-14.89	-9.19	-17.31	116.51	-15.40
8	-10.38	-17.46	167.83	-19.11	-8.79	-19.29	157.77	-14.72	-1.31	-17.32	185.30	-15.25
9	-21.83	-17.52	239.08	-19.04	-13.75	-19.80	226.20	-14.57	-15.06	-17.73	261.27	-15.14
10	-31.25	-29.04	201.35	-19.29	-25.85	-28.67	190.46	-14.69	-37.72	-27.04	222.26	-15.45
11	-28.76	-41.86	25.09	-20.79	-31.48	-45.13	21.05	-15.53	-21.90	-36.38	36.00	-16.61
12	-19.73	-38.22	-44.47	-22.17	-20.07	-41.93	-43.88	-16.43	-16.71	-32.66	-36.49	-17.58
Anual	-10.86	-23.75	0.34	-19.94	-11.95	-29.63	-2.87	-15.25	-9.89	-21.69	8.32	-16.03
		-10.29				-12.12				-6.43		

Tabla 8: Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Mediano Plazo

2041-2070												
	SSP1-2.6				SSP3-7.0				SSP5-8.5			
Mes	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH
1	-55.91	-67.93	-74.37	-63.28	-57.30	-72.12	-77.19	-68.44	-54.38	-69.88	-78.35	-73.59
2	-51.90	-64.61	-68.04	-62.54	-52.26	-69.41	-71.66	-67.56	-51.43	-67.27	-73.03	-72.67
3	-53.03	-65.85	-60.60	-61.94	-52.24	-68.31	-64.10	-66.86	-51.47	-66.79	-67.42	-71.95
4	-50.94	-61.96	-55.69	-61.67	-52.84	-63.77	-58.86	-66.81	-55.21	-62.40	-60.70	-71.91
5	-50.30	-60.35	-43.60	-61.65	-56.48	-62.34	-47.74	-67.03	-56.23	-61.82	-50.35	-72.19
6	-53.88	-60.80	-26.06	-61.59	-59.98	-62.60	-31.48	-66.96	-61.09	-62.09	-34.93	-72.16
7	-54.29	-60.80	-2.77	-61.54	-62.70	-62.61	-9.93	-66.88	-62.55	-62.10	-14.47	-72.15
8	-51.77	-60.87	28.00	-61.50	-61.82	-62.69	18.51	-66.82	-59.77	-62.17	12.50	-72.16
9	-59.46	-61.04	61.83	-61.49	-69.92	-63.07	49.62	-66.81	-67.75	-62.50	41.94	-72.21
10	-70.83	-66.42	43.40	-61.71	-74.33	-68.90	32.02	-67.27	-74.68	-68.37	25.17	-72.75
11	-67.38	-74.25	-40.83	-62.77	-67.64	-76.56	-46.29	-68.78	-71.65	-77.25	-49.48	-74.30
12	-61.99	-72.58	-73.06	-63.76	-63.20	-75.24	-76.10	-69.86	-61.98	-74.07	-77.54	-75.22
Anual	-53.80	-64.59	-51.20	-62.08	-54.52	-67.45	-55.26	-67.44	-53.71	-66.03	-57.81	-72.69
		-55.68				-58.44				-59.43		

Tabla 9: Variaciones porcentuales en aportaciones proyectadas respecto a periodo de control. Largo Plazo

2071-2100												
	SSP1-2.6				SSP3-7.0				SSP5-8.5			
Mes	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH	IT	VF	LW	SH
1	-71.56	-78.07	-81.13	-77.72	-71.84	-86.11	-89.55	-91.70	-71.82	-84.00	-88.41	-94.47
2	-68.46	-75.49	-77.16	-77.25	-68.72	-84.05	-86.13	-90.98	-67.10	-78.57	-84.69	-94.03
3	-68.22	-75.92	-73.24	-76.83	-68.92	-82.88	-82.31	-90.35	-67.67	-76.53	-79.52	-93.63
4	-70.08	-73.04	-67.93	-76.63	-69.57	-79.83	-77.92	-90.08	-68.85	-74.81	-73.29	-93.52
5	-70.09	-72.57	-59.34	-76.60	-71.82	-79.20	-71.58	-90.17	-72.16	-75.46	-68.33	-93.64
6	-72.86	-72.76	-46.71	-76.56	-75.49	-79.36	-62.79	-90.24	-74.68	-75.60	-58.51	-93.70
7	-73.73	-72.76	-29.90	-76.56	-78.17	-79.37	-51.14	-90.28	-77.38	-75.61	-45.49	-93.72
8	-73.16	-72.81	-7.66	-76.58	-79.15	-79.42	-35.81	-90.35	-77.62	-75.67	-28.32	-93.76
9	-71.49	-72.97	16.87	-76.58	-83.69	-79.71	-19.15	-90.47	-85.27	-76.00	-9.63	-93.84
10	-78.93	-75.88	3.85	-76.74	-86.43	-83.51	-29.09	-90.99	-88.87	-80.64	-20.75	-94.17
11	-77.79	-81.12	-56.97	-77.48	-87.12	-90.51	-72.27	-92.06	-88.54	-89.70	-69.14	-94.81
12	-74.90	-80.69	-80.36	-78.09	-78.65	-89.51	-88.82	-92.51	-78.44	-88.11	-87.54	-94.99
Anual	-69.88	-75.25	-65.11	-76.93	-70.59	-82.66	-76.69	-90.78	-69.71	-78.08	-73.45	-93.98
		-70.02				-77.09				-75.35		



### 5.6.3. Rendimiento del modelo en periodo de control

Teniendo en cuenta la discrepancia entre las contribuciones de los modelos durante el período de control y las observadas, se procede a realizar una nueva optimización de los parámetros del modelo utilizando los datos de aportaciones del período de control, para así poder comparar el rendimiento de las proyecciones con estos datos.

El análisis del modelo en escenarios de cambio climático se realiza con **optimización multi-objetivo**, dado que con este método se obtuvieron los mejores resultados utilizando datos observados. El rendimiento del modelo se muestra en las tablas de la sección 7.4 y se representa gráficamente en las figuras 42 a 44, comparado al obtenido con el set de datos observados.

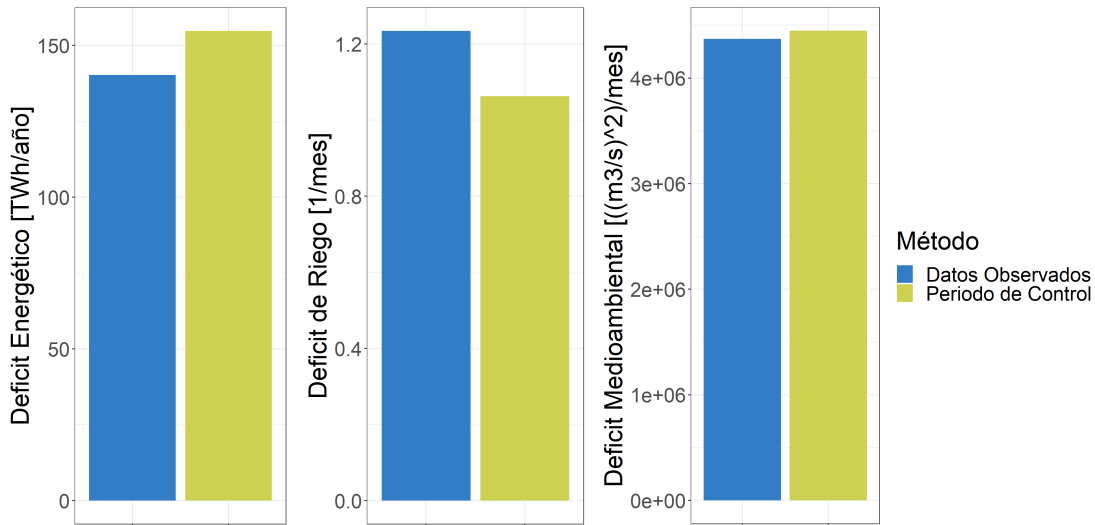


Figura 42: Resultados de indicadores para modelos con objetivo de producción energética. Periodo de Control

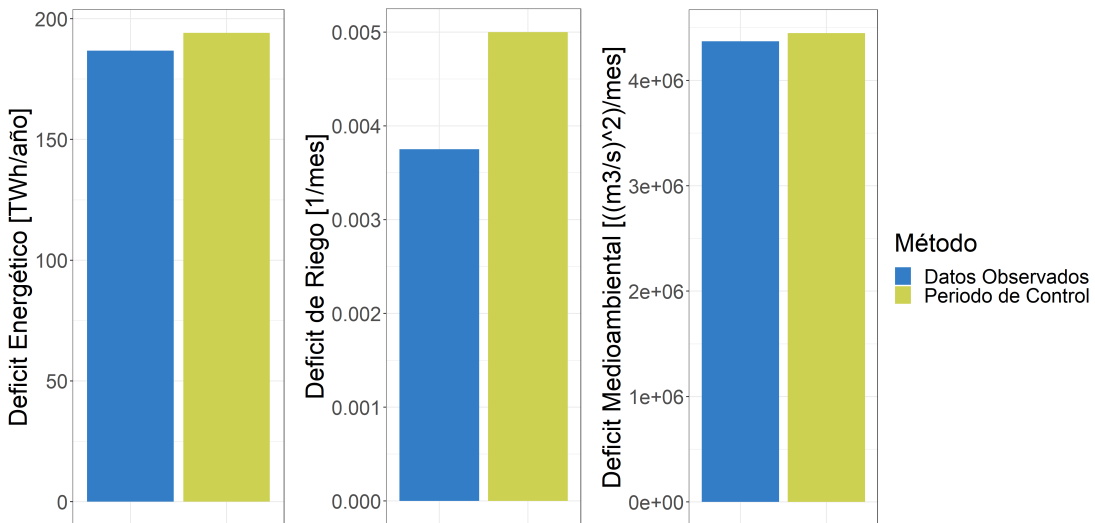


Figura 43: Resultados de indicadores para modelos con objetivo de suministro a riego. Periodo de Control

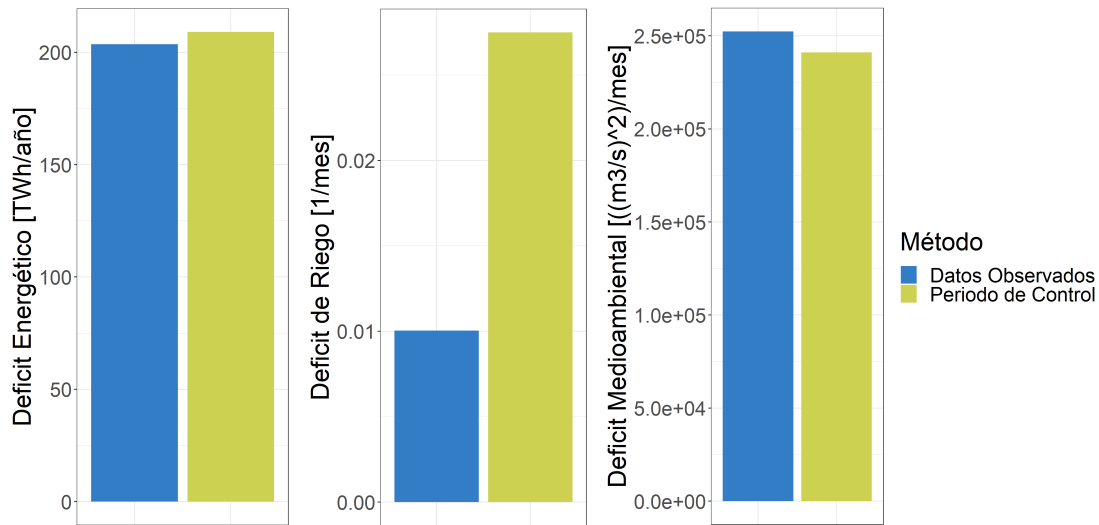


Figura 44: Resultados de indicadores para modelos con objetivo de conservación ecológica. Periodo de Control

#### 5.6.4. Rendimiento del modelo en escenarios de cambio climático

Las proyecciones climáticas se basan en los resultados de la optimización del periodo de control y se comparan con los indicadores de rendimiento. Las variaciones en los indicadores para diferentes modelos se resumen en las tablas 10 a 12.

Se observa un empeoramiento significativo en los indicadores, siendo el modelo de producción energética el que muestra las menores diferencias respecto al periodo de control y el de conservación medioambiental el que presenta las mayores. En cuanto a los escenarios, se tiene que en general el SSP3-7.0 es el que presenta un mayor impacto en el sistema.

Para el modelo con objetivo de producción energética, es importante destacar que este presenta los peores indicadores de déficit de riego y déficit medioambiental en el periodo de control. Estos indicadores dependen principalmente de la disponibilidad de agua, ya que son demandas consuntivas. Por lo tanto, si el rendimiento es peor en el periodo de control, las variaciones en las proyecciones pueden ser porcentualmente menores.

En el caso del modelo con objetivo de suministro a riego, se observa que este indicador en específico se puede mantener bajo la referencia del periodo de control para algunos escenarios. Esto se debe principalmente a lo pequeña que es la demanda de irrigación en comparación con las aportaciones anuales medias de la cuenca, lo que hace que manteniendo los pesos de la optimización, se pueda ver beneficiado a costa de un deterioro mayor en los otros indicadores.

Para el caso del modelo con objetivo de conservación medioambiental, se observan los impactos más severos en los indicadores de rendimiento. Esto se puede deber al elevado valor de caudal objetivo en el delta que se está fijando para los meses de febrero y marzo, el cual corresponde a un 24% de las aportaciones anuales medias de la cuenca, para cada mes. Esto hace que el indicador de déficit medioambiental sea el más susceptible a un deterioro debido a la disminución en las aportaciones.

Tabla 10: Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de producción energética en escenarios de cambio climático

Producción Energética	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
Periodo									
2016-2040	27.1	28.7	14.2	13.6	24.5	-4.4	19.8	23.0	2.1
2041-2070	26.3	3.3	15.2	26.9	-3.9	6.1	27.8	4.7	11.2
2071-2100	16.2	6.5	-4.2	50.0	30.6	1.2	28.0	12.0	1.6

Tabla 11: Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de suministro a riego en escenarios de cambio climático

Suministro a Riego	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
Periodo									
2016-2040	13.5	205.5	-8.6	22.1	52.7	-4.3	3.8	617.4	10.8
2041-2070	18.7	-90.5	-2.9	30.9	530.2	4.0	24.4	-98.5	12.7
2071-2100	16.6	-94.3	-1.0	35.6	132.0	15.1	36.0	59.2	15.0

Tabla 12: Variaciones porcentuales en rendimiento modelos SD con objetivo de conservación ecológica en escenarios de cambio climático

Conservación Ecológica	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
Periodo									
2016-2040	9.7	30.4	4.8	19.4	20.4	12.5	6.7	157.5	67.6
2041-2070	18.7	68.1	52.6	20.9	179.2	57.4	23.6	34.9	57.0
2071-2100	15.6	24.7	27.0	28.2	30.9	94.1	33.2	187.9	57.3

Es importante tener en cuenta la diferencia en las unidades de los diferentes déficits. Aunque se promedian a lo largo del tiempo, responden de manera diferente a una disminución en las entradas al sistema en términos de magnitud. Luego, al mantener constantes los pesos de la optimización, las variaciones en los déficit no se dan en la misma proporción, encontrando incluso disminuciones en algunos casos en los déficit de riego y medioambiental. Por esta razón,

se realiza una búsqueda de pesos específicos para la optimización en cada periodo para intentar repartir el deterioro entre los diversos indicadores. Los resultados se presentan en las tablas 13 a 15, donde se observa un deterioro en los déficit más uniforme entre los diversos indicadores. Sin embargo, este es un proceso de prueba y error. No hay una forma directa de visualizar cómo cambiarán los déficits al variar los pesos de cada optimización, por lo tanto, no se puede obtener una variación completamente homogénea con respecto al periodo de control.

Tabla 13: Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de producción energética en escenarios de cambio climático

Producción Energética	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
2016-2040		25.2	36.0	11.6	12.0	10.9	4.3	6.0	-3.3	1.5
2041-2070		26.3	3.3	15.2	26.9	-3.9	6.1	27.8	4.7	11.2
2071-2100		17.3	17.7	4.8	40.4	45.7	23.2	44.7	51.9	17.2

Tabla 14: Variaciones porcentuales en rendimiento modelo SD con objetivo de suministro a riego en escenarios de cambio climático

Suministro a Riego	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
2016-2040		8.5	46.9	23.4	23.9	11.4	15.8	7.6	34.0	11.0
2041-2070		19.9	5.8	9.8	21.5	13.5	5.3	25.0	7.7	10.9
2071-2100		17.1	80.9	-0.6	31.1	37.2	22.8	36.0	59.2	15.0

Tabla 15: Variaciones porcentuales en rendimiento modelos SD con objetivo de conservación ecológica en escenarios de cambio climático

Conservación Ecológica	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
2016-2040		9.7	30.4	4.8	19.4	20.4	12.5	7.1	12.1	4.9
2041-2070		19.7	11.0	9.3	25.1	46.4	11.6	22.8	29.1	7.8
2071-2100		15.6	24.7	27.0	31.1	98.8	25.3	29.7	87.7	26.9

Observando las proyecciones de los indicadores en los distintos escenarios de cambio climático, se deja en evidencia lo vulnerable de este tipo de sistemas a una disminución de las entradas de recurso. Para afrontar estos escenarios desalentadores, se debe proyectar una planificación que tenga en cuenta estos posibles escenarios. Se puede plantear un aumento en la capacidad de almacenamiento de recurso, o una mejora en la eficiencia del sector agrícola, disminuyendo la demanda.

Finalmente, es importante mencionar que las proyecciones climáticas fueron realizadas basándose en la información disponible, sin considerar un posible aumento en la demanda de suministro a riego o de producción energética, que se puede dar por el crecimiento de la población. Si un aumento en estas demandas recayera sobre el sistema, se podría esperar un escenario aún más preocupante en cuanto a las proyecciones de los diversos indicadores estudiados.

## 6. Conclusiones y líneas futuras

La metodología de dinámica de sistemas es una herramienta altamente flexible y competente para representar sistemas de recursos hídricos. Su enfoque permite abordar la complejidad de estos sistemas, adaptándose a los objetivos de modelación y a los datos disponibles. Esta metodología se destaca por su capacidad de facilitar el desarrollo de reglas de operación simples e intuitivas, lo cual mejora significativamente la comunicación con las partes interesadas en el manejo y gestión de sistemas reales.

Una de las ventajas clave de la dinámica de sistemas es su capacidad para traducir modelos complejos en reglas comprensibles para los actores involucrados, incluso aquellos sin experiencia técnica en la comprensión de modelos complejos. Esto implica que las reglas de operación desarrolladas pueden ser entendidas y utilizadas por una variedad de actores, desde gestores de recursos hídricos hasta agricultores y comunidades locales.

A pesar de utilizar reglas de operación simples, el modelo desarrollado con la metodología de dinámica de sistemas logra un rendimiento suficiente para compararse con modelos más complejos que emplean funciones avanzadas, como la función de base radial. Si bien el modelo puede presentar una desventaja en términos de producción energética, los resultados obtenidos son comparables e incluso superiores en algunos casos en lo que respecta al suministro de agua para riego y la conservación ecológica.

Los escenarios de cambio climático proyectan una importante disminución en los recursos hídricos disponibles para el sistema, lo que resulta en un deterioro significativo de los indicadores analizados, con variaciones fuertemente dependientes del rendimiento del modelo en el periodo de control y de los pesos otorgados a los indicadores. Esto enfatiza la necesidad de contar con herramientas de modelación adecuadas, como la dinámica de sistemas, que permitan evaluar y anticipar los impactos del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos.

A pesar de las limitaciones inherentes a cualquier modelo, el enfoque de dinámica de sistemas demuestra ser lo suficientemente flexible para simular diferentes escenarios y objetivos de gestión. Esto lo convierte en una alternativa interesante para modelar sistemas de gestión de recursos hídricos, ya que facilita la comunicación efectiva del funcionamiento del sistema a personas de diversas áreas y brinda oportunidades de participación en la modelación, en caso de ser necesario.

En cuanto a las áreas de mejora y futuras investigaciones, es importante mencionar que la capacidad de desarrollar modelos siempre está condicionada por la cantidad y calidad de los datos disponibles. En este caso particular, la falta de datos ha llevado a que no se represente el agua subterránea en el sistema. Sería muy interesante considerar la posibilidad de agregar esta representación en el futuro, en caso de que se obtengan los datos necesarios.

Además, otra variación potencialmente interesante sería desarrollar un modelo de mayor resolución temporal, al menos para las zonas más propensas a inundaciones, como la zona del Delta. Dado que las inundaciones representan un problema importante en esta cuenca, contar con un modelo más detallado y preciso en estas áreas permitiría una mejor comprensión de los riesgos y la toma de decisiones más informadas.

Asimismo, sería valioso realizar un estudio más detallado de las zonas de interés medioambiental, como los humedales. Estos ecosistemas son especialmente sensibles a los cambios en los recursos hídricos y su conservación es fundamental. Sin embargo, dicho estudio estaría sujeto a la disponibilidad de datos necesarios para llevar a cabo un análisis en profundidad.

## Referencias

- AC-ETHZ, EM-ETHZ, HWRM-ETHZ, ICRE8, K. Leuven, POLIMI, and UNIABDN. DAFNE Deliverable D2.1 Baseline Scenario. 2018.
- T. R. Albrecht, A. Crootof, and C. A. Scott. The water-energy-food nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13, 043002, 2018.
- L. Beck and T. Bernauer. Water Scenarios for the Zambezi River Basin, 2000-2050. *Zurich, Switzerland: Center for Comparative and International Studies*, 2010.
- A. Castelletti, F. Bertoni, M. Zaniolo, M. Micotti, M. Giuliani, E. Odada, A. Opere, I. Nyambe, K. Banda, E. Namafe, D. Juízo, G. Zeleke, A. Bantider., S. Sinclair, F. Kleinschroth, E. Calamita, P. Koundouri, E. Akinsete, L. Papadaki, X. Kartala, N. Englezos, J. V. Orshoven, I. Rosier, J. Gibson, Z. Yihdego, C. van Bers, C. Lumosi, C. Knieper, J. Lautze, M. McCartney, and P. Burlando. DAFNE Deliverable D5.1 Evaluation of Indicators, Value Functions and Pathways. 2019a.
- A. Castelletti, F. Bertoni, M. Zaniolo, J. Z. Salazar, M. Giuliani, I. Rosier, R. Hillen, and S. Sinclair. DAFNE Deliverable D5.2 Decision Analytic Framework. 2019b.
- R. Cervigni, R. Liden, J. E. Neumann, and K. M. Strzpek. Enhancing the Climate Resilience of Africa's Infrastructure - The Power and Water Sectors. *Agence Française de Développement and The World Bank*, 2015.
- CORDEX. Vision and goals, url = <https://cordex.org/about/our-vision/>, accessed: 26.04.2023, 2023.
- A. Fernández-Ríos, J. Laso, C. Campos, I. Ruiz-Salmón, D. Hoehn, J. Cristóbal, L. Batlle-Bayer, A. Bala, P. F. i Palmer, R. Puig, R. Aldaco, and M. Margallo. Towards a water-energy-food (wef) nexus index: A review of nutrient profile models as a fundamental pillar of food and nutrition security. *Science of the total environment*, 789, 147936, 2021.
- M. Giuliani and J. Herman. Introduction to the HBV model . 2017.



- A. González-Rosell, M. Blanco, and I. Arfa. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water*, 12,3172, 2020.
- D. Hirsh Bar Gai, E. Shittu, Y. C. E. Yang, and H.-Y. Li. A comprehensive review of the nexus of food, energy, and water systems: What the models tell us. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(6), 2022.
- W. A. Hussien, F. A. Memon, and D. A. Savic. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. *Environmental Modelling & Software*, 93:366–380, 2017.
- IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. 2014.
- IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. 2022.
- J. Lautze, Z. Phiri, V. Smakhtin, and D. Saruchera. *The Zambezi River Basin - Water and sustainable development*. Routledge, 2017.
- A. Mirchi, K. Madani, D. Watkins Jr., and S. Ahmad. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management*, 26: 2421–2442, 2012.
- NASA. Images of change, url = <https://climate.nasa.gov/images-of-change/>, accessed: 26.04.2023, 2023.
- New York Times. Our changing world: The climate crisis in pictures, url = <https://www.nytimes.com/2022/11/08/world/climate-change-global-photos.html>, accessed: 26.04.2023, 2022.
- M. Samadi-Foroushani, M. Javad Keyhanpour, S. H. Musavi-Jahromi, and H. Ebrahimi. Integrated water resources management based on water governance and water-food-energy nexus through system dynamics and social network analyzing approaches. *Water Resources Management*, 36:6093–6113, 2022.
- SARDC, SADC, ZAMCOM, GRID-Arendal, and UNEP. Zambezi river basin: Atlas of the changing environment. 2012.

- N. Stevanato, M. V. Rocco, M. Giuliani, A. Castelletti, and E. Colombo. Advancing the representation of reservoir hydropower in energy systems modelling: The case of zambesi river basin. *PLoS ONE*, 16(12), 2021.
- A. Tilmant, L. Beevers, and B. Muyunda. Restoring a flow regime through the coordinated operation of a multireservoir system: The case of the zambezi river basin. *Water Resources Research*, 46, W07533, 2010.
- A. Tilmant, W. Kinzelbach, D. Juizo, L. Beevers, D. Senn, and C. Casarotto. Economic valuation of benefits and costs associated with the coordinated development and management of the zambezi river basin. *Water Policy*, 14:490–508, 2012.
- M. Viccaro, D. Caniani, S. Masi, S. Romano, and M. Cozzi. Biofuels or not biofuels? the “nexus thinking” in land suitability analysis for energy crops. *Renewable Energy*, 187:1050–1064, 2022.
- WCRP. About us, url = <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>, accessed: 26.04.2023, 2023.
- WMO. Past eight years confirmed to be the eight warmest on record, url = <https://public.wmo.int/en/media/press-release/past-eight-years-confirmed-be-eight-warmest-record>, accessed: 26.04.2023, 2023.
- World Bank. The zambezi river basin: A multi-sector investment opportunities analysis (2012). 2010.
- ZAMCOM. Strategic Plan for the Zambezi Watercourse . 2019.
- ZAMCOM, SADC, and SARDC. Zambezi Environment Outlook. 2015.

## 7. Anexos

### 7.1. Anexo 1: Resultados optimización modelo SD datos observados

Tabla 16: Pesos de optimización modelo

Pesos	PP Mono	PP Multi	Irr Mono	Irr Multi	Env Mono	Env Multi
PP deficit	-1	-1,5	0	-0,15	0	-0,15
Irr deficit	0	-7	-1	-7	0	-7
Env deficit	0	-1,00E-06	0	-2,50E-06	-1	-5,00E-06

Tabla 17: Parámetros óptimos función de suministro a riego

Parámetros	PP Mono	PP Mult	IRR Mono	IRR Mult	ECO Mono	ECO Mult
h1	1,00E+13	48470,4	48470,4	48470,4	1,00E+13	48470,4
h2	1,00E+13	1,30E+11	87091,2	87091,2	1,00E+13	87091,2
h3	1,00E+13	4,94E+11	1,18E+06	1,18E+06	1,00E+13	1,18E+06
h4	1,00E+13	3,30E+12	391392	391392	1,00E+13	391392
h5	1,00E+13	4,16E+12	1,84E+06	1,84E+06	1,00E+13	1,84E+06
h6	88905,6	88905,6	88905,6	88905,6	88905,6	88905,6
h7	16511	16511	16511	16511	1,00E+13	16511
h8	226282	226282	226282	226282	1,00E+13	226282
m1	0,710858	0,456	0,456	0,456	1	0,456
m2	1	0,0377925	0,0703	0,0703	1	0,0703
m3	1	0,19516	0,13	0,13	1	0,13
m4	1	0,0062	0,0035	0,0035	1	0,0035
m5	1	0,271563	0,0726	0,0726	1	0,0726
m6	0,149	0,149	0,149	0,149	0,149	0,149
m7	0,609	0,609	0,609	0,609	1	0,609
m8	0,00962	0,00962	0,00962	0,00962	1	0,00962

Tabla 18: Parámetros óptimos modelo producción energética mono-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	5,89E+08	8,15E+08	5,04E+09	7,06E+08	6,97E+08	6,86E+08	8,72E+08	1,15E+09	6,52E+08	1,74E+09	4,36E+09	1,64E+08
IT med	4,12E+09	2,48E+09	4,35E+09	5,09E+09	5,88E+09	7,00E+08	1,76E+09	2,29E+09	4,12E+09	6,99E+08	2,81E+09	1,92E+09
KGU Qopt	6,32E+08	6,20E+08	6,04E+08	6,05E+08	6,08E+08	6,51E+08	6,61E+08	6,11E+08	6,08E+08	6,05E+08	6,63E+08	4,52E+08
KGU med	5,52E+08	1,26E+08	7,77E+07	9,68E+07	5,00E+06	6,35E+08	1,82E+08	5,00E+06	4,28E+07	2,27E+08	7,22E+08	2,19E+08
KGL Qopt	1,71E+06	2,00E+07	1,31E+07	0,00E+00	0,00E+00	2,08E+06	0,00E+00	0,00E+00	1,02E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
KGL med	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07
CB Qopt	6,23E+09	6,07E+09	5,50E+09	4,63E+09	4,95E+09	4,68E+09	4,99E+09	4,71E+09	4,62E+09	4,58E+09	4,34E+09	4,21E+09
CB med	4,72E+10	5,17E+10	5,16E+10	6,01E+09	3,85E+10	3,56E+10	1,42E+10	3,20E+10	3,22E+10	3,00E+10	3,62E+10	3,42E+10
KA Qopt	2,02E+09	2,49E+09	4,19E+09	4,26E+09	3,20E+09	4,26E+09	4,38E+09	4,39E+09	4,24E+09	6,72E+09	3,55E+09	6,54E+09
KA med	1,16E+11	1,16E+11	1,16E+11	1,52E+11	1,18E+11	1,19E+11	1,17E+11	1,16E+11	1,16E+11	1,37E+11	1,46E+11	1,68E+11

Tabla 19: Parámetros óptimos modelo producción energética multi-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	5,30E+08	1,11E+09	6,32E+09	4,20E+08	4,59E+08	7,97E+08	6,91E+08	1,71E+09	4,41E+09	1,45E+09	1,86E+08	4,34E+09
IT med	1,62E+09	4,12E+09	4,73E+09	6,99E+08	4,35E+09	4,44E+09	2,23E+09	7,00E+08	4,12E+09	1,58E+09	2,81E+09	3,00E+09
KGU Qopt	5,99E+08	6,49E+08	6,26E+08	6,09E+08	6,35E+08	5,74E+08	6,07E+08	6,10E+08	6,07E+08	6,06E+08	6,04E+08	5,45E+08
KGU med	6,10E+08	1,95E+08	1,71E+08	1,65E+08	7,28E+07	4,23E+08	9,41E+07	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	3,01E+08	5,00E+06
KGL Qopt	0,00E+00	2,00E+07	4,69E+06	2,21E+06	7,29E+06	2,08E+06	2,51E+07	1,67E+07	9,71E+06	2,54E+06	0,00E+00	2,98E+07
KGL med	6,04E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07
CB Qopt	5,79E+09	8,30E+09	6,54E+09	5,01E+09	4,89E+09	4,95E+09	5,03E+09	5,03E+09	5,10E+09	5,13E+09	5,15E+09	4,49E+09
CB med	5,17E+10	5,17E+10	5,17E+10	6,01E+09	6,01E+09	3,02E+09	3,20E+07	3,81E+10	3,90E+10	3,90E+10	3,47E+10	4,23E+10
KA Qopt	3,18E+09	3,99E+09	4,41E+09	4,24E+09	4,40E+09	6,33E+09	6,18E+09	6,10E+09	6,68E+09	1,17E+09	5,10E+09	4,96E+09
KA med	1,18E+11	1,20E+11	1,16E+11	1,16E+11	1,16E+11	1,38E+11	1,39E+11	1,37E+11	1,37E+11	1,32E+11	1,75E+11	1,81E+11

Tabla 20: Parámetros óptimos modelo suministro a riego mono-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	1,50E+08	8,20E+08	2,29E+09	2,68E+08	2,43E+08	2,04E+08	1,01E+09	2,20E+08	2,30E+08	2,26E+08	1,86E+08	1,67E+08
IT med	5,88E+09	2,81E+09	4,41E+09	4,12E+09	2,81E+09	2,81E+09	3,53E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09
KGU Qopt	1,30E+07	2,70E+08	5,24E+08	4,18E+07	4,94E+07	4,75E+07	1,29E+08	3,76E+07	2,41E+07	1,20E+07	5,52E+06	9,46E+07
KGU med	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08
KGL Qopt	1,71E+06	2,00E+07	1,31E+07	2,39E+06	2,38E+06	2,08E+06	2,23E+06	2,45E+06	2,55E+06	4,24E+07	2,13E+06	1,85E+06
KGL med	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07
CB Qopt	9,59E+08	1,21E+10	1,44E+10	1,30E+09	1,24E+09	1,17E+09	1,26E+09	1,38E+09	1,42E+09	1,39E+09	1,15E+09	1,01E+09
CB med	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10
KA Qopt	2,50E+08	5,45E+08	9,11E+08	1,88E+08	3,59E+08	4,78E+08	5,67E+08	1,14E+09	7,13E+08	4,56E+08	3,15E+08	2,49E+08
KA med	1,81E+11	1,81E+11	1,81E+11	1,77E+11	1,81E+11	1,75E+11	1,66E+11	1,60E+11	1,26E+11	1,26E+11	1,66E+11	1,81E+11

Tabla 21: Parámetros óptimos modelo suministro a riego multi-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	4,10E+08	8,34E+08	4,26E+09	2,81E+09	1,73E+09	7,09E+08	5,91E+08	1,87E+09	8,38E+08	6,62E+08	4,76E+08	1,67E+08
IT med	4,12E+09	2,91E+09	4,61E+09	5,52E+09	5,00E+09	3,84E+09	2,42E+09	3,26E+09	1,19E+09	3,31E+09	6,99E+08	4,12E+09
KGU Qopt	5,96E+08	6,56E+08	6,15E+08	6,05E+08	6,07E+08	6,06E+08	4,26E+07	6,08E+08	6,08E+08	6,11E+08	6,03E+08	6,04E+08
KGU med	1,97E+08	2,10E+08	1,71E+08	1,60E+08	5,00E+06	1,60E+08	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	6,03E+07	5,00E+06	7,89E+08
KGL Qopt	1,71E+06	0,00E+00	6,15E+06	2,39E+06	8,20E+06	2,08E+06	2,37E+07	2,15E+07	2,98E+07	0,00E+00	0,00E+00	1,37E+07
KGL med	6,07E+07	6,07E+07	6,28E+07	6,28E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,28E+07	4,85E+07	2,65E+07	6,28E+07	6,23E+07	6,07E+07
CB Qopt	5,34E+09	1,11E+10	1,00E+10	4,05E+09	5,76E+09	5,27E+09	5,29E+09	5,38E+09	8,12E+09	2,26E+09	4,15E+08	1,38E+09
CB med	2,52E+10	6,31E+09	4,78E+09	5,13E+10	3,89E+10	2,90E+10	2,70E+10	2,53E+10	3,52E+10	5,15E+10	5,16E+10	5,09E+10
KA Qopt	2,61E+09	3,97E+09	4,39E+09	4,26E+09	5,30E+09	4,25E+09	3,04E+09	3,06E+09	2,76E+09	1,76E+09	2,08E+09	4,39E+09
KA med	1,58E+11	1,19E+11	1,18E+11	1,19E+11	1,27E+11	1,26E+11	1,30E+11	1,31E+11	1,29E+11	1,22E+11	1,21E+11	1,20E+11

Tabla 22: Parámetros óptimos modelo conservación ecológica mono-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	1,50E+08	2,52E+09	3,44E+09	2,68E+08	2,43E+08	2,04E+08	2,08E+08	3,02E+09	2,30E+08	2,26E+08	1,86E+08	4,34E+09
IT med	4,79E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09	2,81E+09
KGU Qopt	1,30E+07	2,70E+08	3,58E+08	4,18E+07	4,94E+07	4,75E+07	4,26E+07	3,76E+07	2,41E+07	1,20E+07	5,52E+06	4,62E+08
KGU med	5,00E+06	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08	2,70E+08
KGL Qopt	1,71E+06	2,00E+07	1,31E+07	2,39E+06	2,38E+06	2,08E+06	2,23E+06	2,45E+06	2,55E+06	2,54E+06	2,55E+07	1,85E+06
KGL med	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07
CB Qopt	9,59E+08	1,70E+10	1,72E+10	1,30E+09	1,24E+09	1,17E+09	1,26E+09	1,38E+09	1,42E+09	1,39E+09	1,15E+09	1,01E+09
CB med	5,17E+10	6,01E+09	6,01E+09	3,91E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10	2,64E+10
KA Qopt	2,50E+08	6,72E+09	4,19E+09	1,88E+08	3,59E+08	4,78E+08	5,67E+08	1,44E+09	5,44E+08	4,56E+08	3,15E+08	1,94E+09
KA med	1,68E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11	1,50E+11

Tabla 23: Parámetros óptimos modelo conservación ecológica multi-objetivo

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
IT Qopt	5,89E+08	1,12E+09	3,86E+09	4,20E+08	1,16E+09	1,57E+09	2,08E+08	1,81E+09	9,87E+08	6,64E+08	1,86E+08	1,67E+08
IT med	7,00E+08	2,49E+09	4,35E+09	5,34E+09	5,88E+09	3,84E+09	7,00E+08	2,33E+09	1,28E+09	4,12E+09	4,12E+09	7,14E+08
KGU Qopt	5,87E+08	6,59E+08	6,07E+08	6,16E+08	6,14E+08	5,93E+08	6,09E+08	6,02E+08	5,34E+08	6,10E+08	4,78E+08	5,93E+08
KGU med	7,16E+07	2,61E+08	2,77E+07	4,42E+08	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06	5,00E+06
KGL Qopt	0,00E+00	4,60E+07	6,14E+06	2,39E+06	8,26E+06	2,08E+06	2,42E+07	2,37E+07	5,35E+07	2,54E+06	0,00E+00	4,46E+07
KGL med	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,28E+07	6,28E+07	6,07E+07	6,18E+07	5,27E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07	6,07E+07
CB Qopt	8,58E+09	1,35E+10	1,29E+10	5,45E+09	4,59E+09	3,65E+09	3,99E+09	1,76E+08	1,42E+09	1,72E+09	4,54E+08	1,01E+09
CB med	5,01E+10	8,59E+09	2,10E+09	2,67E+10	2,09E+10	2,11E+10	2,31E+10	2,27E+10	2,50E+10	2,54E+10	2,45E+10	2,63E+10
KA Qopt	3,53E+09	5,09E+09	4,39E+09	5,65E+09	4,39E+09	4,26E+09	4,40E+09	2,90E+09	1,83E+09	1,01E+09	1,57E+09	2,30E+09
KA med	1,46E+11	1,29E+11	1,19E+11	1,25E+11	1,24E+11	1,29E+11	1,30E+11	1,27E+11	1,24E+11	1,21E+11	1,20E+11	1,18E+11

## 7.2. Anexo 2: Rendimiento de modelo SD optimizado datos observados

Tabla 24: Rendimiento modelos con objetivo producción energética

<b>Método</b>	<b>PP def TWh/año</b>	<b>Irr def 1/mes</b>	<b>Env def (m3/s)2/mes</b>
Mono-Objetivo	133,53	4,5648	4,048E+06
Multi-Objetivo	140,27	1,2345	4,372E+06
Función de Base Radial	136,40	1,0053	3,731E+06

Tabla 25: Rendimiento modelos con objetivo suministro a riego

<b>Método</b>	<b>PP def TWh/año</b>	<b>Irr def 1/mes</b>	<b>Env def (m3/s)2/mes</b>
Mono-Objetivo	262,24	0	6,209E+05
Multi-Objetivo	186,75	0,003751	8,816E+05
Función de Base Radial	181,62	0,008465	7,581E+05

Tabla 26: Rendimiento modelos con objetivo conservación ecológica

<b>Método</b>	<b>PP def TWh/año</b>	<b>Irr def 1/mes</b>	<b>Env def (m3/s)2/mes</b>
Mono-Objetivo	284,53	6,4760	0
Multi-Objetivo	203,58	0,0100	2,524E+05
Función de Base Radial	212,54	0,0270	3,433E+05

### 7.3. Anexo 3: Proyección de aportaciones

#### ■ Subcuenca Itezhi-Tezhi

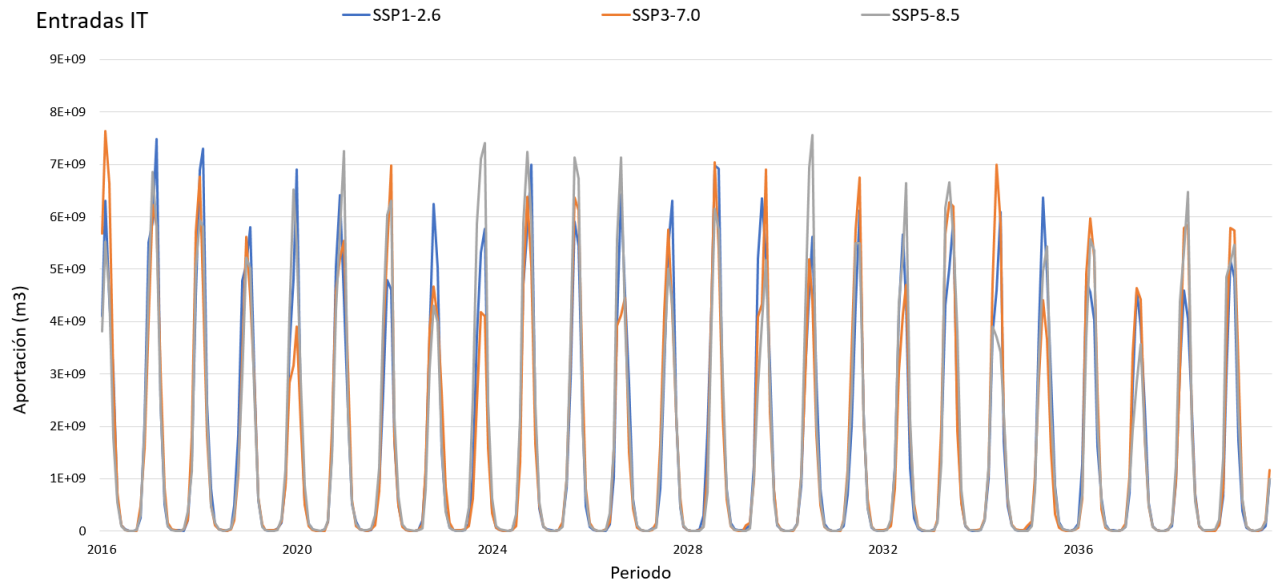


Figura 45: Proyección de aportaciones subcuenca Itezhi-Tezhi. Corto plazo.

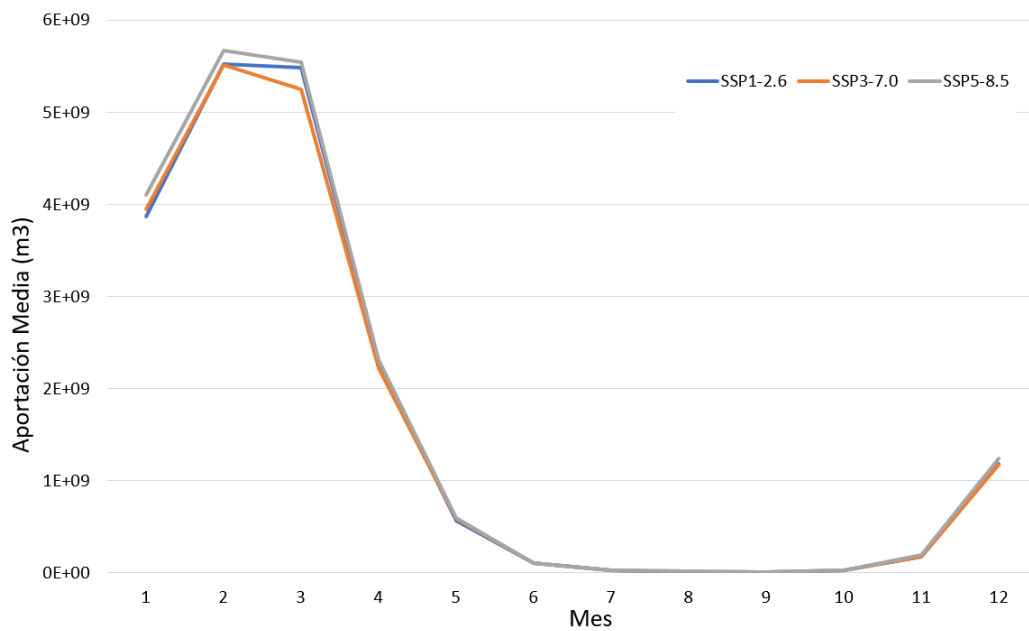


Figura 46: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Itezhi-Tezhi. Corto plazo.

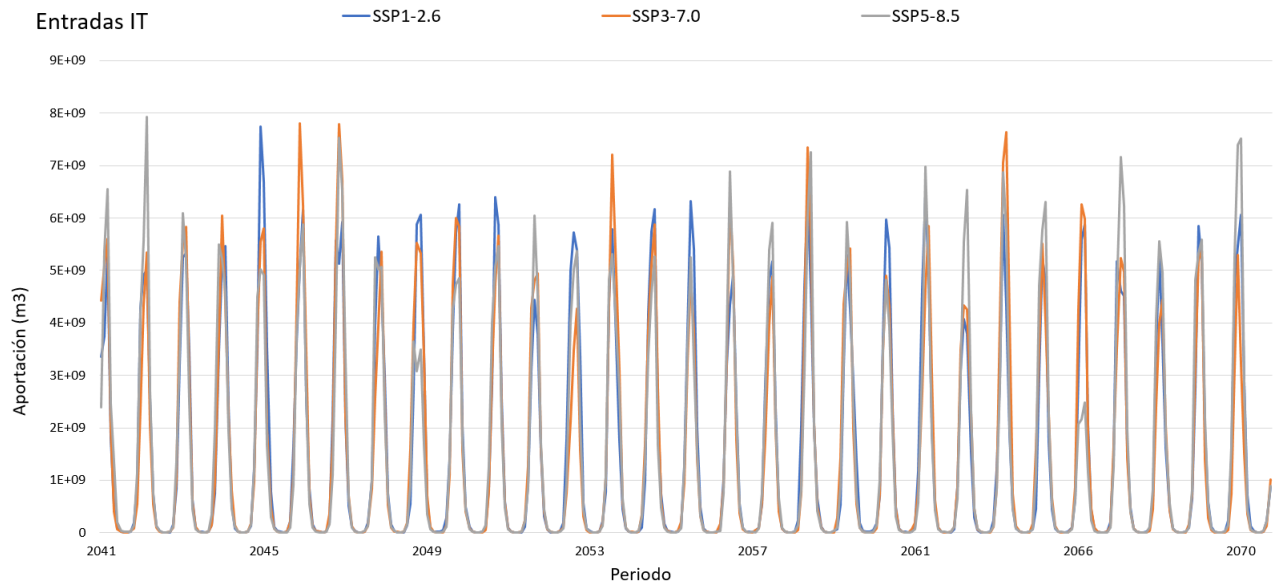


Figura 47: Proyección de aportaciones subcuenca Itezhi-Tezhi. Mediano plazo.

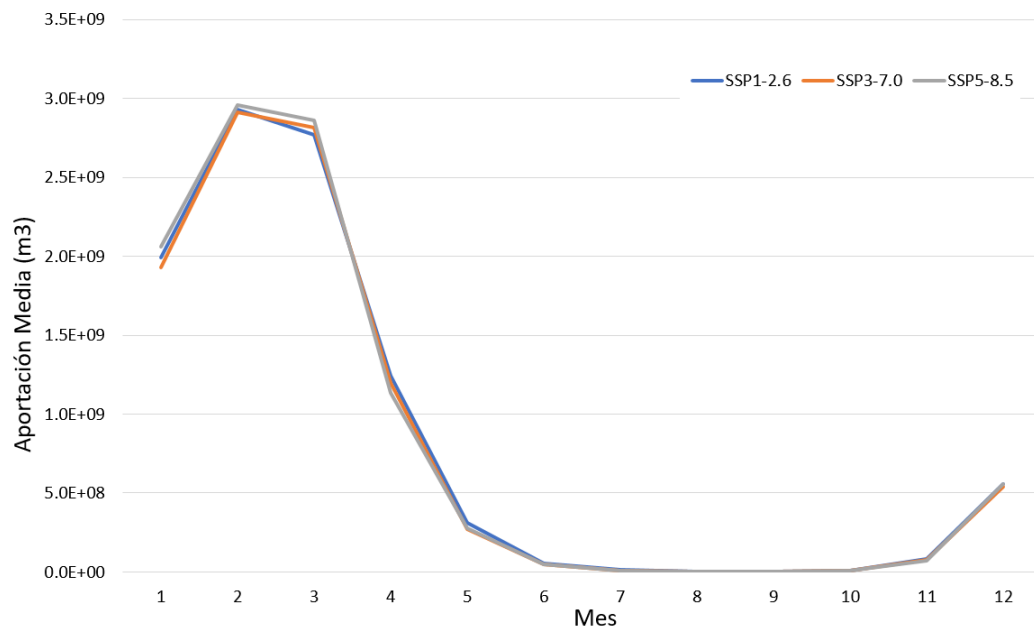


Figura 48: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Itezhi-Tezhi. Mediano plazo.



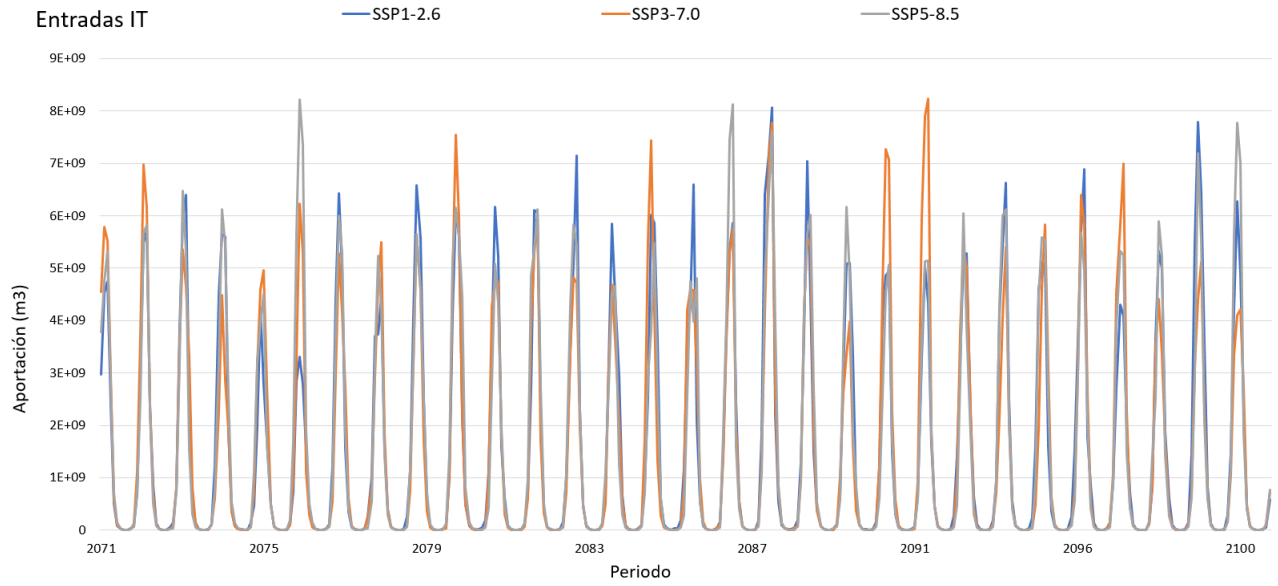


Figura 49: Proyección de aportaciones subcuena Itezhi-Tezhi. Largo plazo.

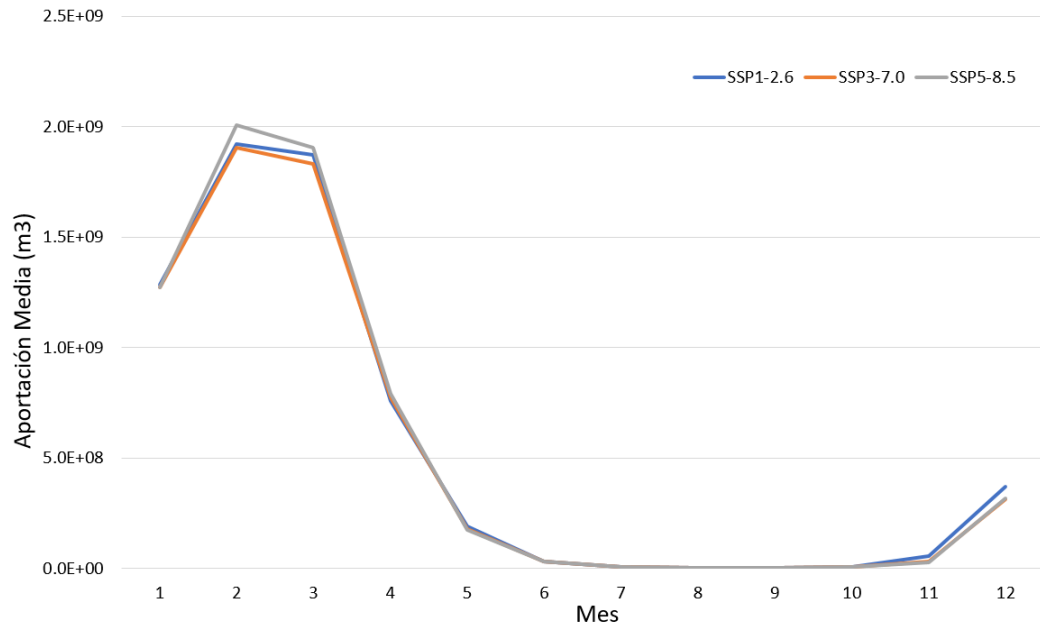


Figura 50: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuena Itezhi-Tezhi. Largo plazo.

■ Subcuenca Victoria Falls

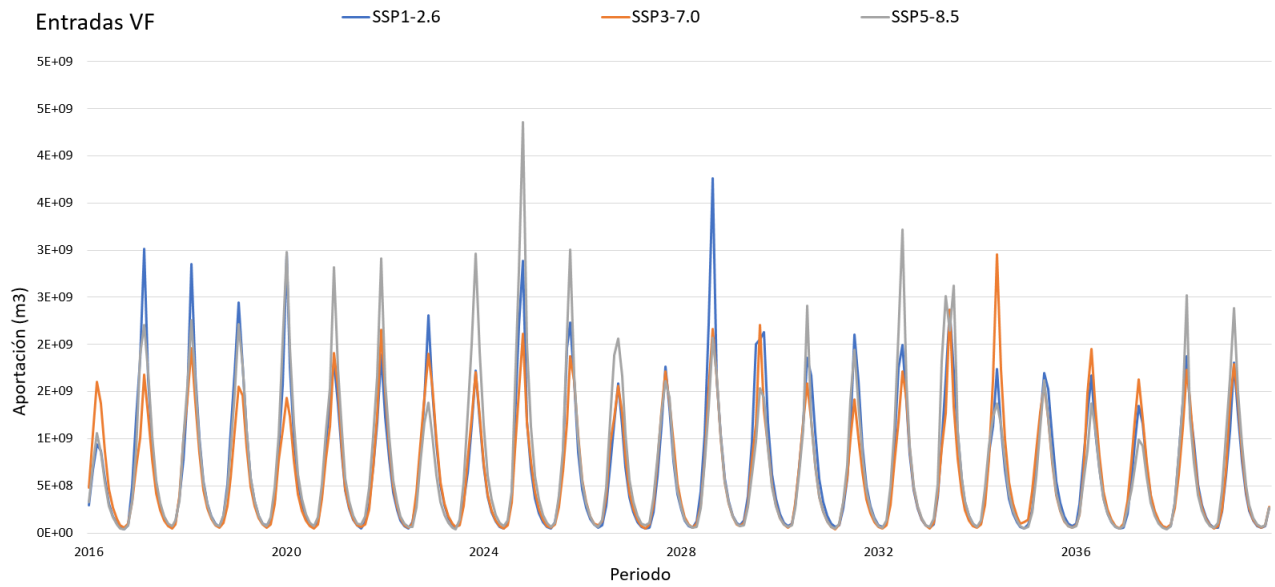


Figura 51: Proyección de aportaciones subcuenca Victoria Falls. Corto plazo.

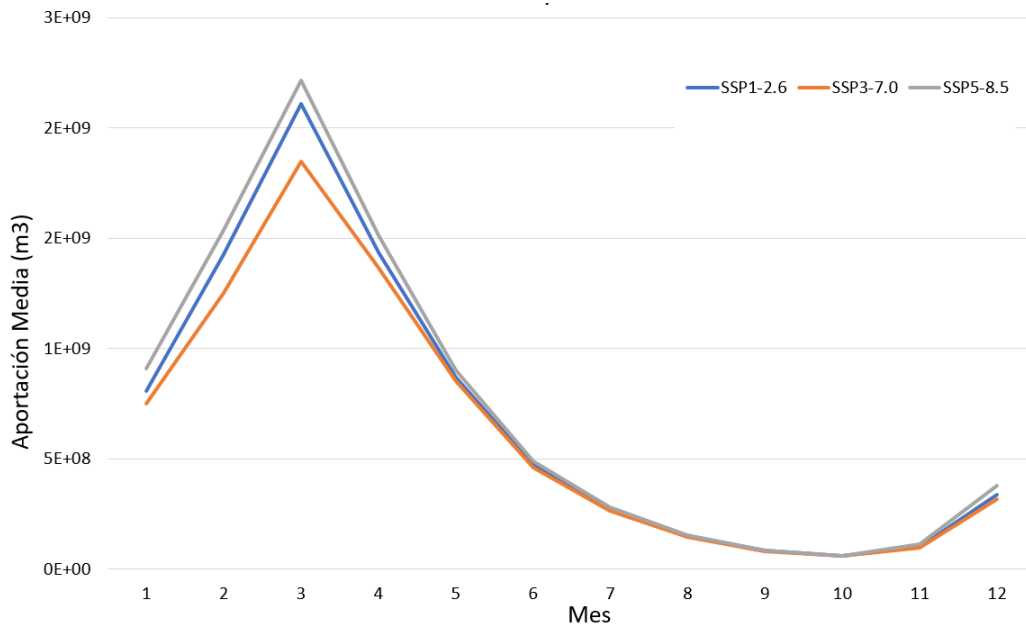


Figura 52: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Victoria Falls. Corto plazo.

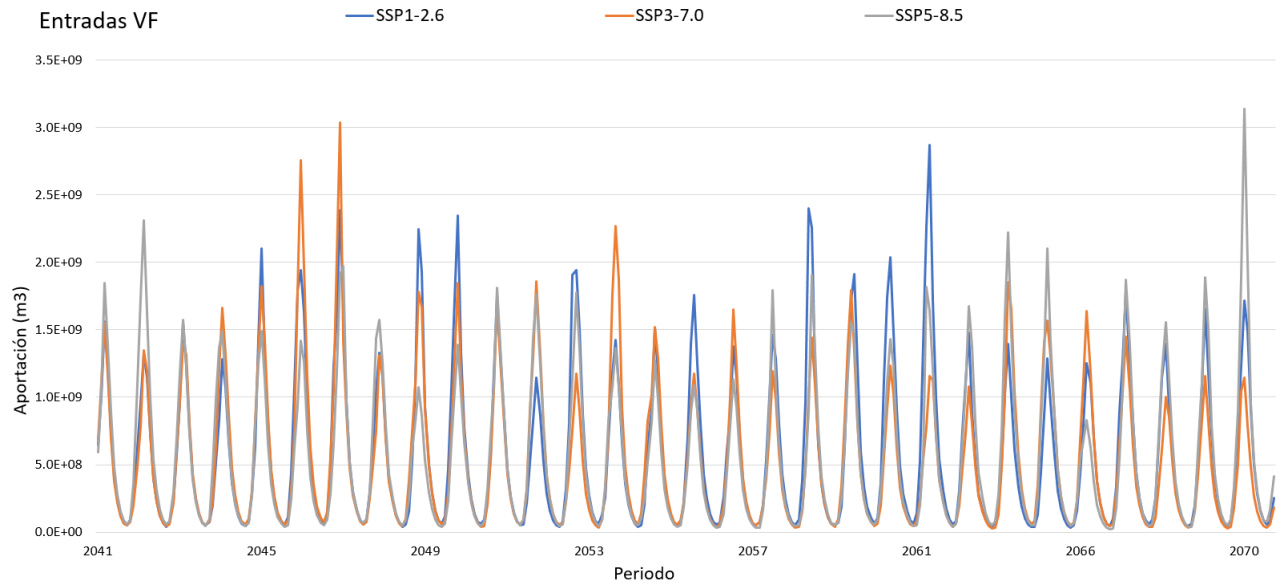


Figura 53: Proyección de aportaciones subcuenca Victoria Falls. Mediano plazo.

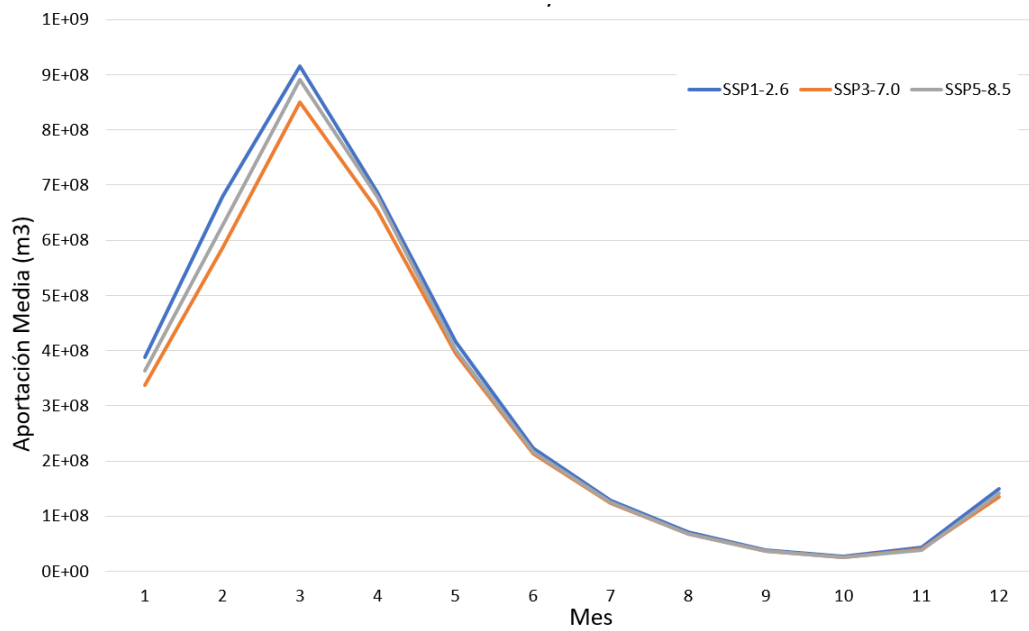


Figura 54: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Victoria Falls. Mediano plazo.

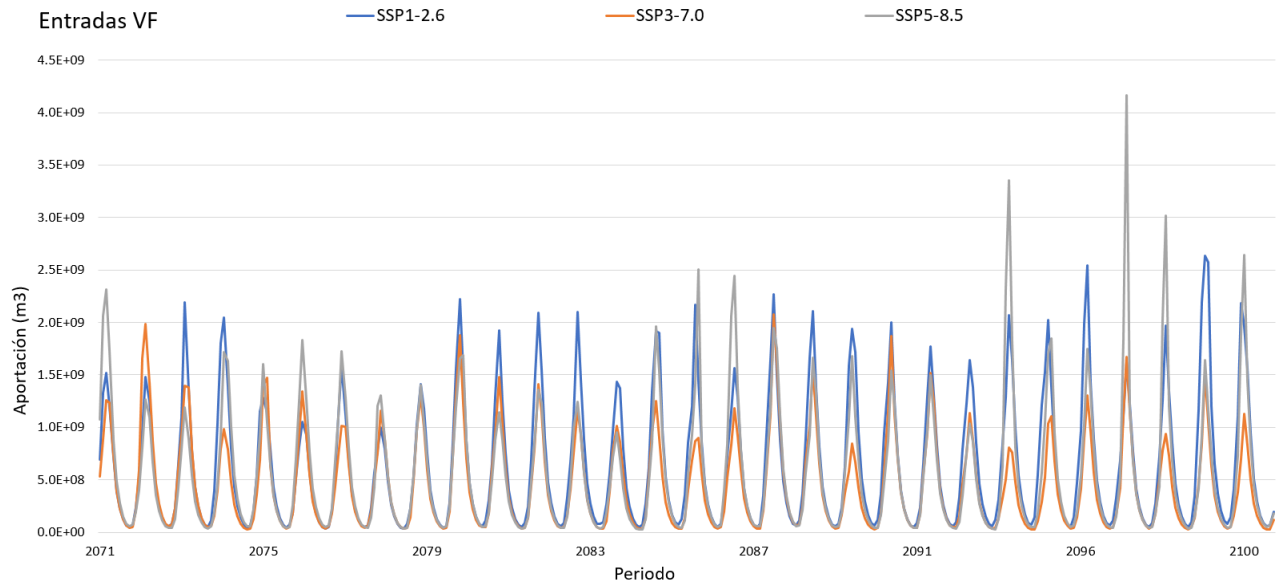


Figura 55: Proyección de aportaciones subcuena Victoria Falls. Largo plazo.

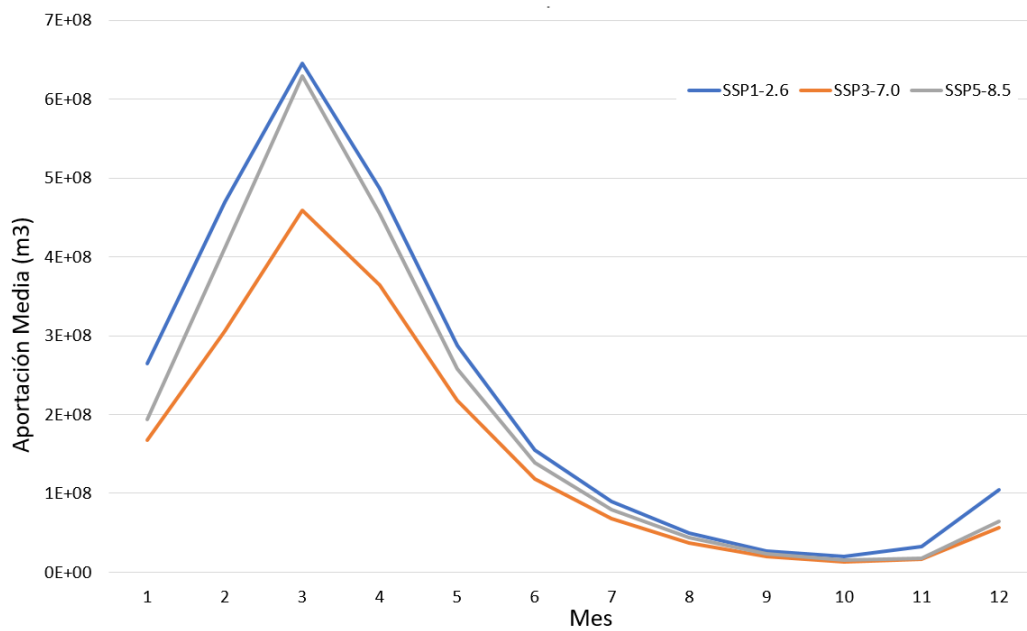


Figura 56: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuena Victoria Falls. Largo plazo.

■ Subcuenca río Luangwa

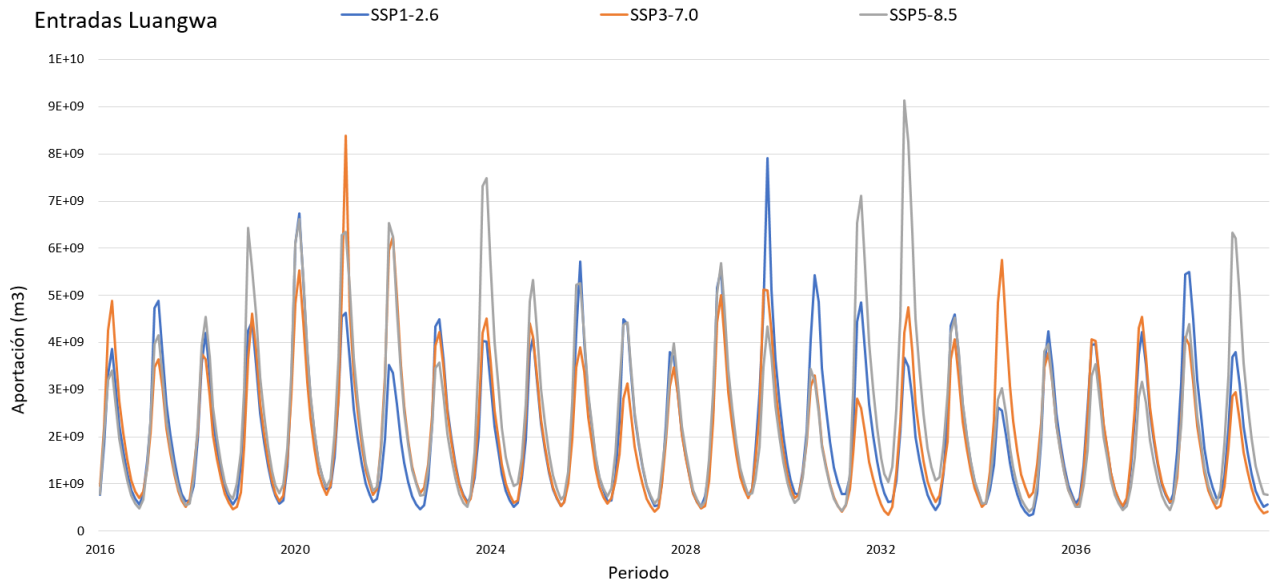


Figura 57: Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Corto plazo.

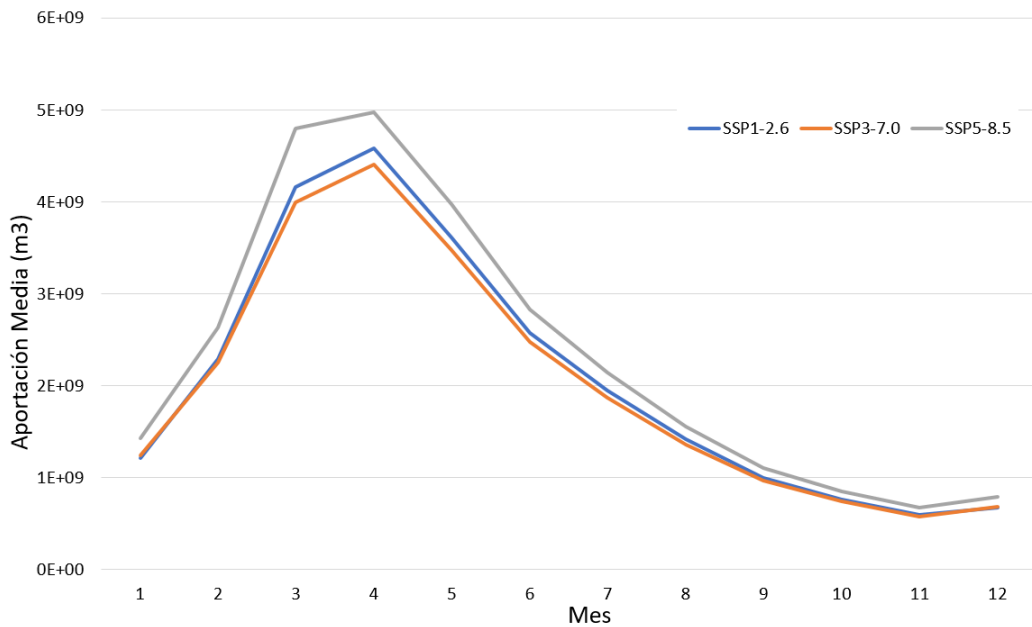


Figura 58: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Corto plazo.

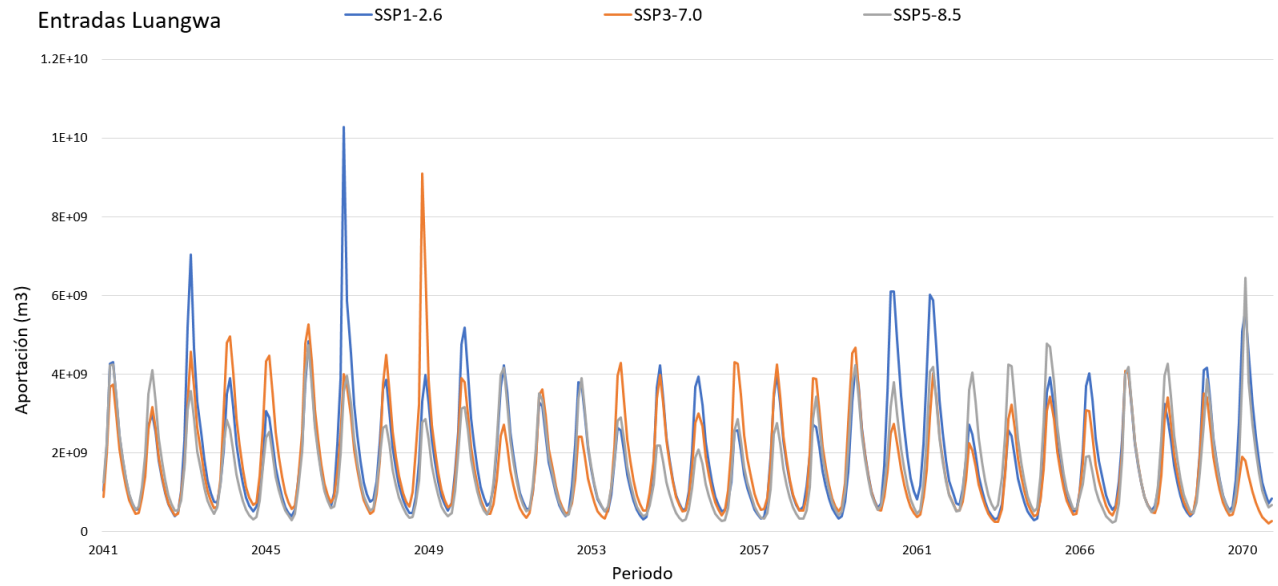


Figura 59: Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Mediano plazo.

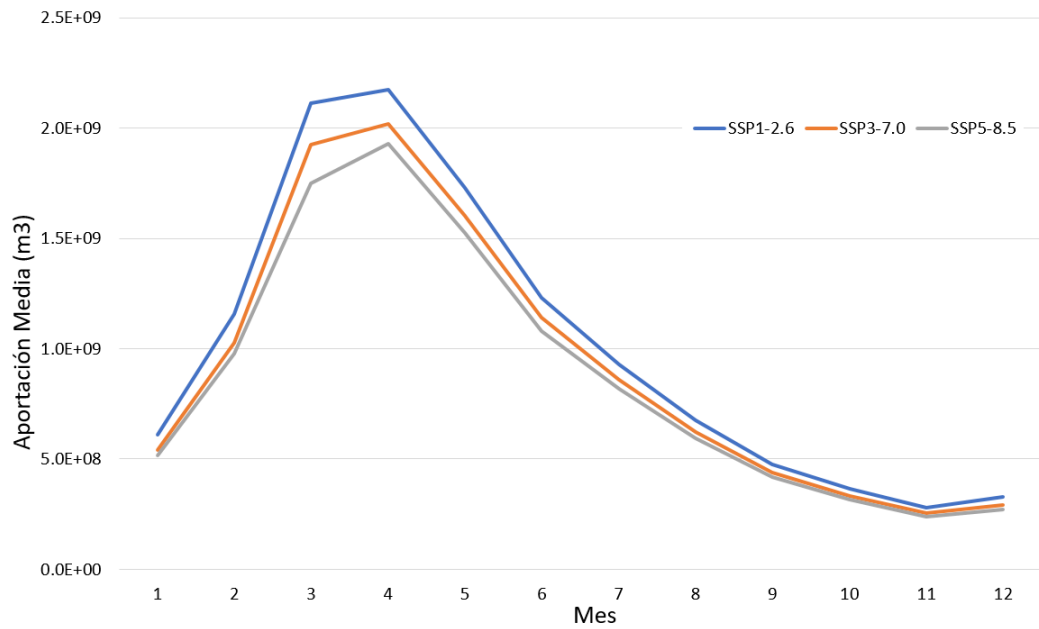


Figura 60: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Mediano plazo.

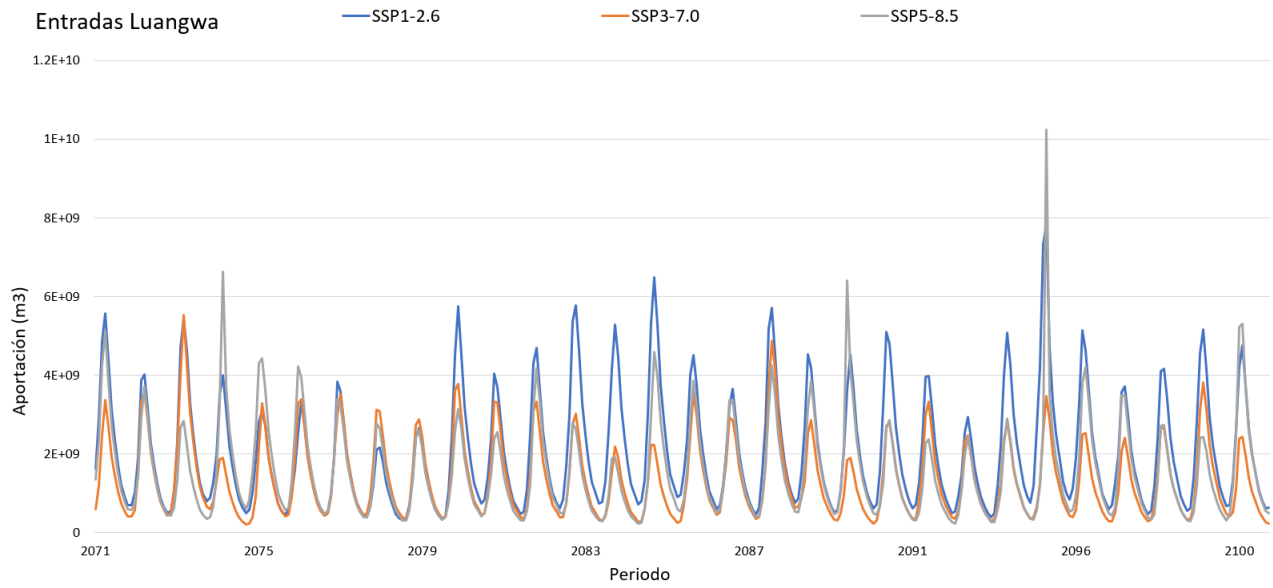


Figura 61: Proyección de aportaciones subcuenca río Luangwa. Largo plazo.

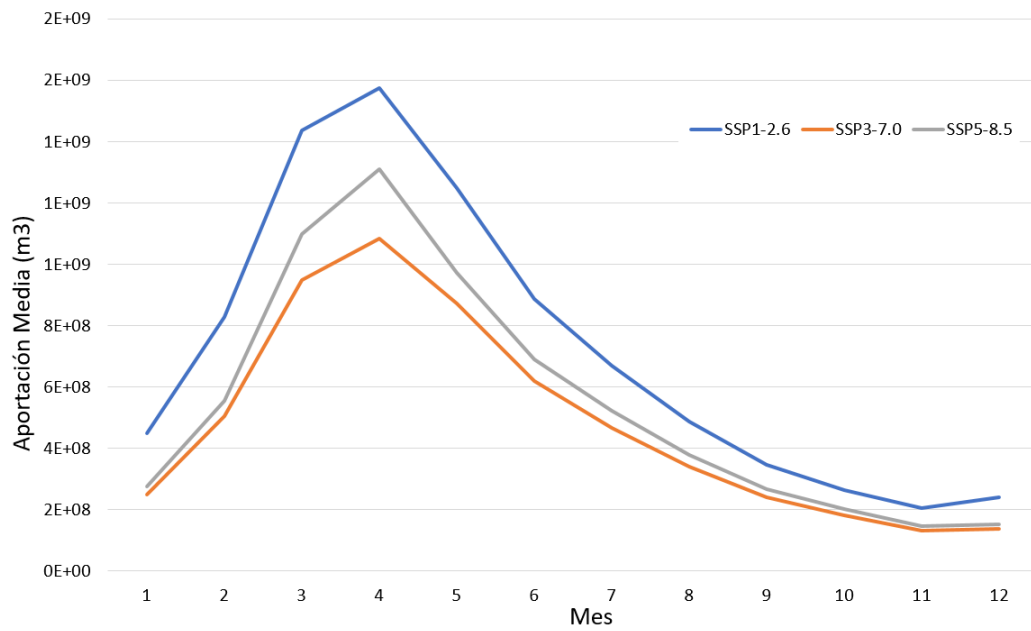


Figura 62: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca río Luangwa. Largo plazo.

■ Subcuenca Shire/Malawi

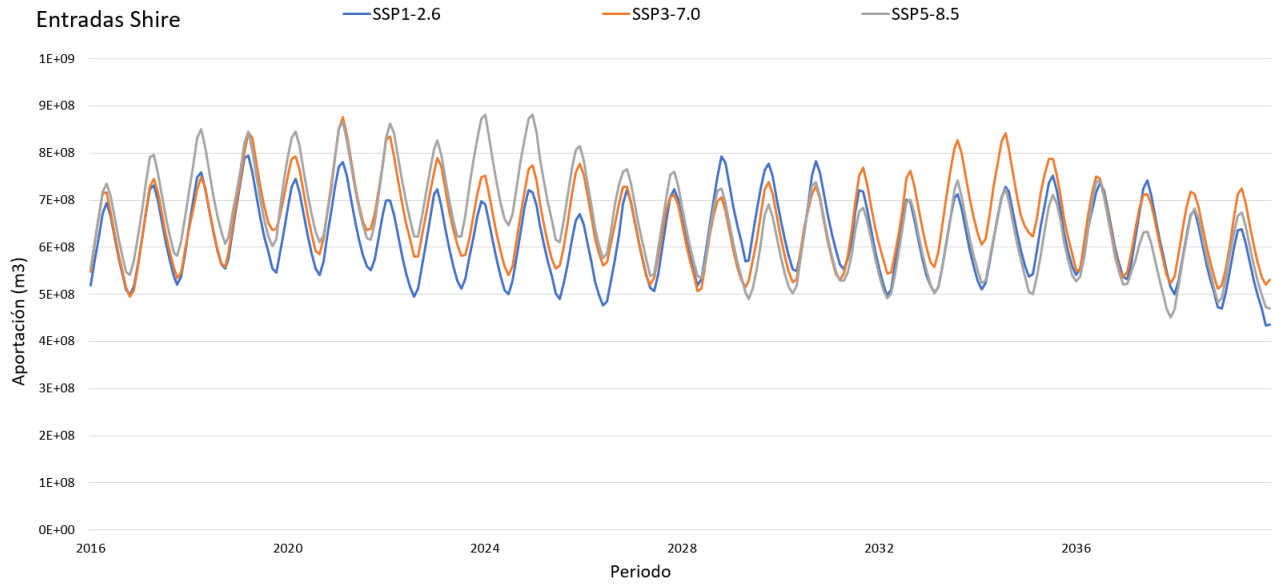


Figura 63: Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Corto plazo.

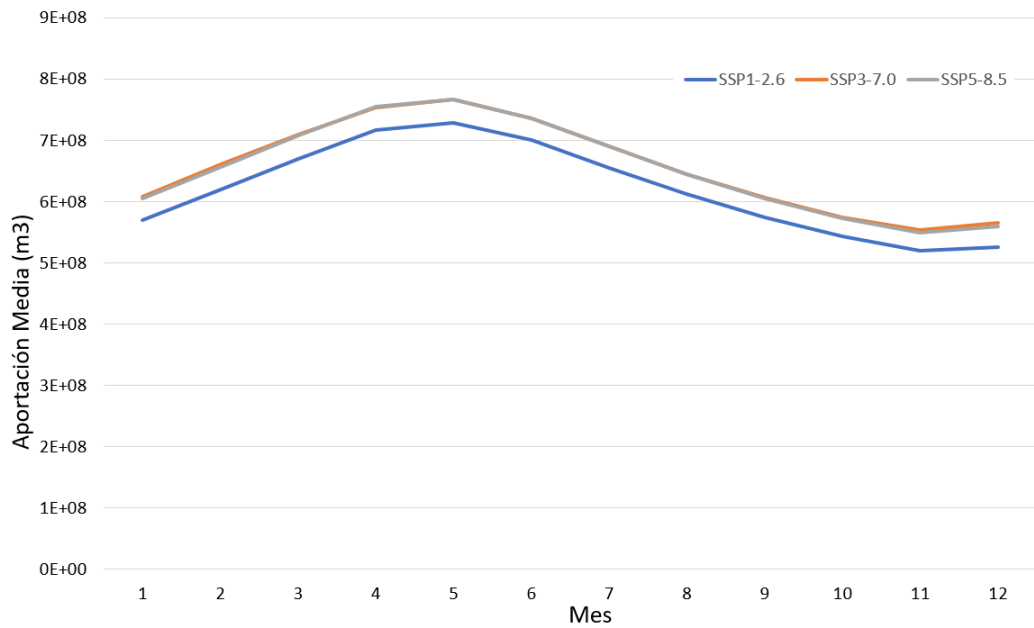


Figura 64: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Corto plazo.



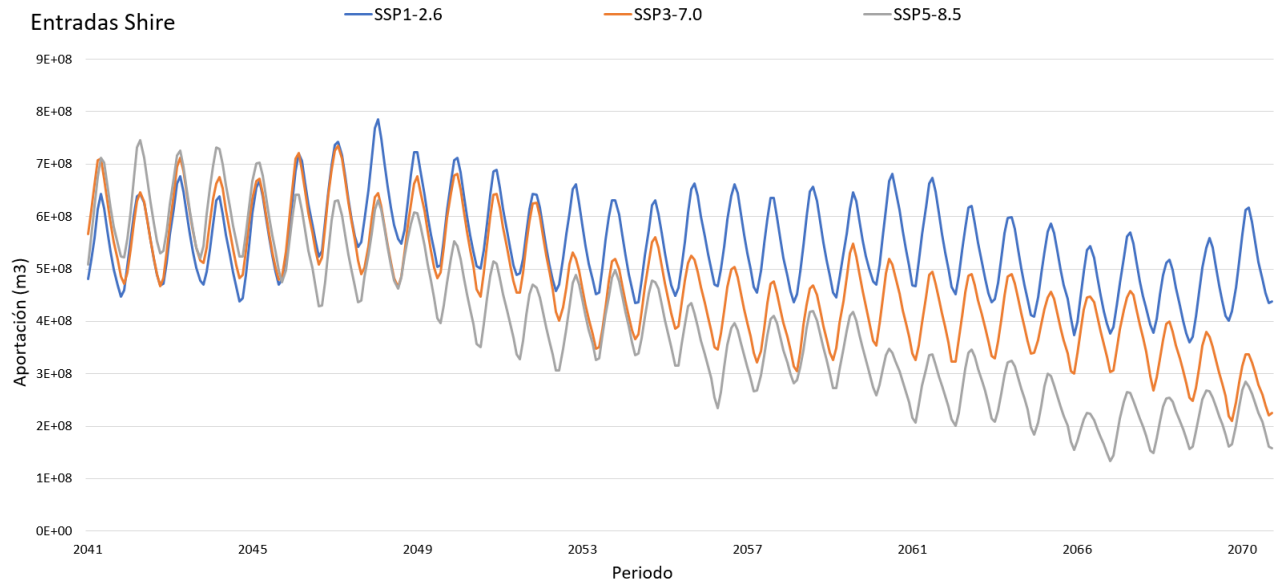


Figura 65: Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Mediano plazo.

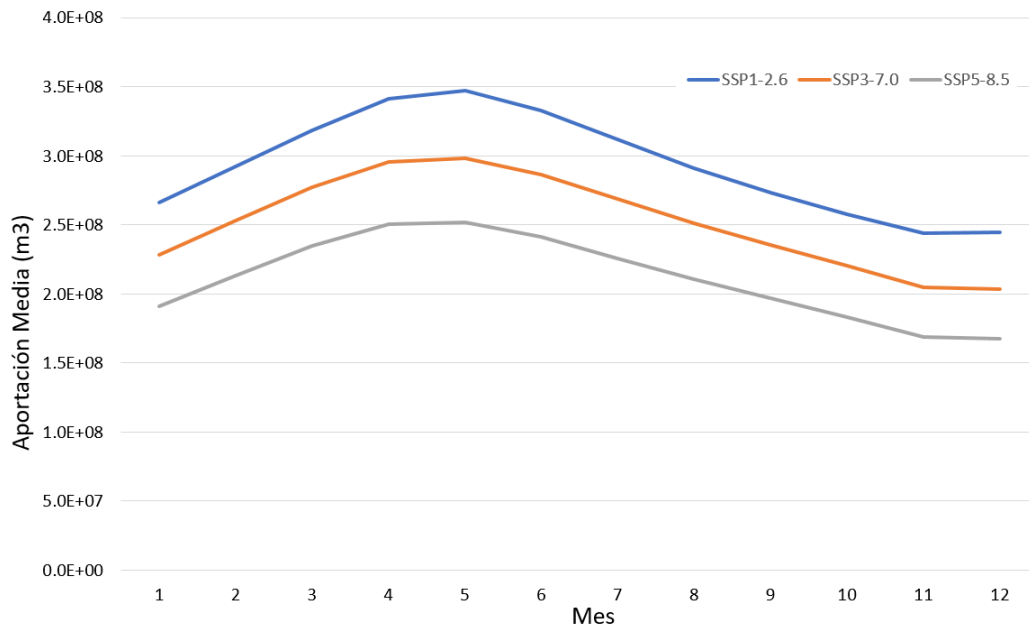


Figura 66: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Mediano plazo.

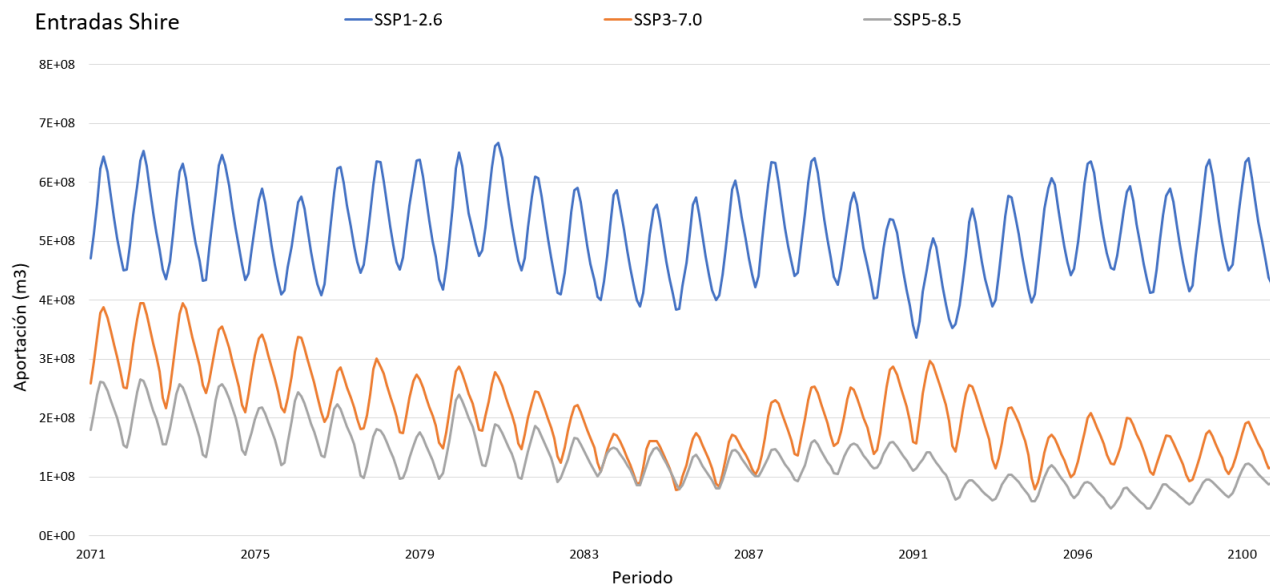


Figura 67: Proyección de aportaciones subcuenca Shire/Malawi. Largo plazo.

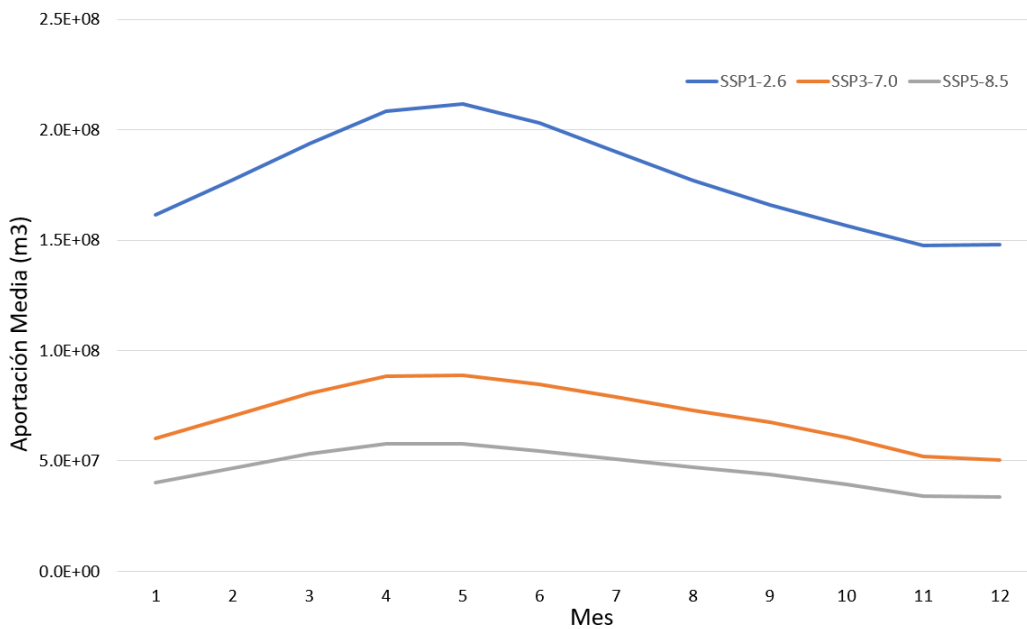


Figura 68: Proyección de aportaciones medias mensuales subcuenca Shire/Malawi. Largo plazo.

## 7.4. Anexo 4: Rendimiento de modelo SD optimizado escenarios de cambio climático

Tabla 27: Rendimiento modelos periodo de control

Objetivo	PP def	Irr def	Env def
Producción Energética	154,81	1,0627	4,449E+06
Suministro a Riego	194,16	0,0050	9,641E+05
Conservación Ecológica	209,10	0,0275	2,411E+05

Tabla 28: Rendimiento modelos con objetivo producción energética en escenarios de cambio climático

Producción Energética	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
	2016-2040	196,823	1,36728	5,082E+06	175,817	1,32318	4,255E+06	185,505	1,30663	4,540E+06
	2041-2070	195,550	1,09758	5,125E+06	196,524	1,02120	4,718E+06	197,818	1,11313	4,945E+06
	2071-2100	179,887	1,13226	4,260E+06	232,188	1,38804	4,500E+06	198,226	1,19065	4,522E+06

Tabla 29: Rendimiento modelos con objetivo suministro a riego en escenarios de cambio climático

Suministro a Riego	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
	2016-2040	220,296	0,01530	8,815E+05	236,971	0,00765	9,224E+05	201,489	0,03593	1,068E+06
	2041-2070	230,398	0,00048	9,363E+05	254,161	0,03157	1,003E+06	241,600	0,00007	1,087E+06
	2071-2100	226,404	0,00028	9,548E+05	263,206	0,01162	1,109E+06	264,143	0,00797	1,109E+06

Tabla 30: Rendimiento modelos con objetivo conservación ecológica en escenarios de cambio climático

Conservación Ecológica	SSP1-2.6			SSP3-7.0			SSP5-8.5			
	Periodo	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def	PP def	Irr def	Env def
	2016-2040	229,478	0,03590	2,527E+05	249,609	0,03317	2,712E+05	223,137	0,07092	4,041E+05
	2041-2070	248,282	0,04629	3,681E+05	252,769	0,07690	3,796E+05	258,443	0,03714	3,787E+05
	2071-2100	241,825	0,03435	3,063E+05	268,147	0,03604	4,681E+05	278,523	0,07930	3,794E+05