

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“CONFIABILIDAD, RESILIENCIA Y VULNERABILIDAD DEL
SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA CAÑETE
PARA SATISFACER DERECHOS DE USO DE AGUA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

BRAYAN TORRES ZAGASTIZABAL

LIMA - PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“CONFIABILIDAD, RESILIENCIA Y VULNERABILIDAD
DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA
CAÑETE PARA SATISFACER DERECHOS DE USO DE
AGUA”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. BRAYAN TORRES ZAGASTIZABAL

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. ABSALÓN VÁSQUEZ VILLANUEVA
Presidente

Dr. EDUARDO ABRAHAM CHÁVARRI VELARDE
Miembro

Mg. Sc. JOSELITO JERSIN ROBLES SILVESTRE
Miembro

Dra. LIA RAMOS FERNANDEZ
Asesor

LIMA – PERU

2022

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres, Emma y José.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Universidad Agraria La Molina, a la Facultad de Ingeniería Agrícola y a los docentes de esta casa de estudios, por haber contribuido en mi formación y haber cultivado en mí la pasión por la ciencia y la ingeniería.

Estoy especialmente agradecido con mi asesora de tesis. La Dra. Lía Ramos Fernández con su gran calidad científica y humana me ha apoyado en todo momento. Debo agradecerle su orientación, sugerencias y correcciones sin las cuales no hubiera podido culminar este trabajo.

A los miembros del jurado, el Dr. Absalon Vásquez Villanueva, el Dr. Eduardo Abraham Chávarri Velarde y el Mg. Sc. Joselito Jersin Robles Silvestre, por haber corregido este trabajo minuciosa y pacientemente y haberme dado la posibilidad de mejorarlo.

Mi sincero agradecimiento al Ing. Gastón Pantoja Tapia de la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, por compartir conmigo su experiencia en la gestión de los recursos hídricos y haberme inspirado en el tema de investigación.

A los profesionales de la Administración Local del Agua Mala-Omas-Cañete por sus gestos de amabilidad y haber resuelto mis inquietudes durante mis visitas a la zona de estudio.

A mis padres Emma y José, por su apoyo incondicional.

A mi hermana mayor Katerin, por su aliento y ejemplo.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
II.	REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1.	TEORÍA DE SISTEMAS Y SU APLICACIÓN EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	4
2.2.	MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	5
2.2.1.	Simulación.....	5
2.2.2.	Optimización (simple).....	6
2.2.3.	Optimización multiobjetivo.....	7
2.3.	MODELOS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	8
2.4.	EL ROL DE LOS MODELOS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS	8
2.4.1.	Análisis de desempeño	8
2.4.2.	Análisis de planificación	9
2.5.	MEDIDAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO	9
2.5.1.	Revisión de indicadores	9
2.5.2.	Revisión de índices.....	11
2.5.3.	Criterios de selección	12
III.	METODOLOGÍA	15
3.1.	ZONA DE ESTUDIO	15
3.2.	MATERIALES.....	17
3.2.1.	Información meteorológica	17
3.2.2.	Información hidrométrica.....	17
3.2.3.	Información cartográfica	18
3.2.4.	Equipos y herramientas computacionales	18
3.3.	PROCEDIMIENTO	22
3.3.1.	Modelamiento del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete.....	23
3.3.2.	Selección de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (CRV)	34

3.3.3. Evaluación de los niveles de CRV del Sistema.....	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA CAÑETE.....	41
4.1.1. Calibración y validación del modelo hidrológico	41
4.2. SELECCIÓN DE INDICADORES DE CONFIABILIDAD, RESILIENCIA Y VULNERABILIDAD (CRV).....	43
4.2.1. Validación del modelo estocástico MulGETS	43
4.2.2. Análisis de la monotonía y sensibilidad	48
4.2.3. Análisis de la superposición entre indicadores	50
4.2.4. Longitud de datos requerida.....	51
4.3. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CRV DEL SISTEMA.....	53
4.3.1. Cambios en la CRV del Sistema por las operaciones del embalse Paucarcocha 53	
4.3.2. Comportamiento de la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha	54
4.3.3. Rangos aceptables de caudal ecológico en el tramo final del río Cañete.....	57
V. CONCLUSIONES	59
VI. RECOMENDACIONES	61
VII. BIBLIOGRAFÍA	62
VIII. ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Categorías de indicadores en la gestión de SRH.....	10
Tabla 2: Características de indicadores adecuados para la gestión de SRH.....	12
Tabla 3: Ubicación geográfica de la zona de estudio	16
Tabla 4: Equipos y herramientas computacionales	18
Tabla 5: Ubicación de estaciones pluviométricas.....	20
Tabla 6: Ubicación de estaciones hidrométricas	21
Tabla 7: Demanda hídrica superficial en la cuenca Cañete (hm ³).....	28
Tabla 8: Prioridades para el suministro de agua en el modelo	30
Tabla 9: Reglas de operación del embalse Paucarcocha	31
Tabla 10: Indicadores de rendimiento del modelo hidrológico.....	32
Tabla 11: Parámetros del modelo hidrológico (<i>Soil Moisture Accounting Model</i>).....	32
Tabla 12: Definición de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad	36
Tabla 13: Resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico.....	41
Tabla 14: Media y desviación estándar de las precipitaciones anuales observadas y generadas	47
Tabla 15: CRV y sostenibilidad del Sistema sin (S) y con (C) las operaciones del embalse Paucarcocha, por grupos de usuarios.	54
Tabla 16: CRV y sostenibilidad del Sistema sin (S) y con (C) las operaciones del embalse Paucarcocha, a nivel de sitios de demandas	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de la definición de sistema.....	5
Figura 2: Ubicación de la zona de estudio.....	16
Figura 3: Red de estaciones pluviométricas (a) e hidrométricas (b) de la cuenca Cañete ..	18
Figura 4: Esquema metodológico de la investigación	22
Figura 5: Modelo digital de elevación (a) y subcuencas (b) de la cuenca Cañete.....	24
Figura 6: Cobertura vegetal/uso del suelo (a) y geología (b) de la cuenca Cañete	25
Figura 7: Precipitación (a), temperatura (b), humedad relativa (c) y velocidad del viento (d) promedio en la cuenca alta Cañete	26
Figura 8: Esquema hidráulico del SRH de la cuenca Cañete	27
Figura 9: Demandas de la C.H. El Platanal, volúmenes otorgados y captados.....	29
Figura 10: Alteración hidrológica del río Cañete por las operaciones del embalse Paucarcocha.....	30
Figura 11: Curva Altura vs. volumen del embalse Paucarcocha.....	31
Figura 12: Regiones para la calibración del modelo hidrológico.....	33
Figura 13: Características de un periodo de déficit.....	35
Figura 14: Hidrogramas de calibración y gráficos de regresión lineal entre caudales observados y simulados.....	42
Figura 15: Hidrogramas de validación y gráficos de regresión lineal entre caudales observados y simulados.....	43
Figura 16: Correlación de ocurrencias de precipitación observada entre todos los pares de estaciones vs. correlaciones generadas por MulGETS	44
Figura 17: Correlación de cantidades de precipitación observada entre todos los pares de estaciones vs. correlaciones generadas por MulGETS	45
Figura 18: Comparación entre la precipitación mensual observada (promedio) y generada (diagrama de caja), estaciones Ayaviri-Huaro-chiri.....	46
Figura 19: Comparación entre la precipitación mensual observada (promedio) y generada (diagrama de caja), estaciones SP Pilas-Yauyos.....	47
Figura 20: Comportamiento de los indicadores de CRV en la C.H. El Platanal en función de la demanda, para distintos valores de volumen útil del embalse Paucarcocha.....	49
Figura 21: Coeficientes de correlación entre indicadores de CRV para demandas de	

100, 80 y 60 por ciento en la C.H. El Platanal	51
Figura 22: Estimaciones de CRV en función de la longitud de datos	52
Figura 23: CRV y sostenibilidad del sector agrícola de la cuenca baja en función de la demanda.....	55
Figura 24: CRV y sostenibilidad del sector agrícola de la cuenca baja en función de los planes de operación del embalse Paucarcocha (demanda de la C.H. El Platanal)	56
Figura 25: CRV y sostenibilidad de los sectores de la cuenca baja en función del caudal ecológico en el tramo final del río Cañete.	57
Figura 26: Periodo de registros de datos hidrométricos	70
Figura 27: Periodo de registros de datos pluviométricos	71

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PERIODOS DE REGISTRO DE DATOS HIDROMÉTRICOS Y PLUVIOMÉTRICOS	70
ANEXO 2: DESEMPEÑO DEL SISTEMA A NIVEL DE SITIOS DE DEMANDAS.....	72
ANEXO 3: ENLACES DE CÓDIGOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES ..	75

ABREVIATURAS

ALA	Administración Local del Agua
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CELEPSA	Compañía Eléctrica El Platanal S.A.
CLIGEN	<i>Climate generator</i>
CRV	Confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad
C_t	Confiabilidad en tiempo
C_v	Confiabilidad en volumen
DEM	Modelo Digital de Elevaciones
DRI	<i>Drought Risk Index</i>
DWC	<i>Deep water capacity</i>
INGEMMET	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales
kc	Coefficiente de cultivo
MulGETS	<i>Multi-site stochastic weather generator</i>
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PROFODUA	Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua
R_m	Resiliencia media.
R_{max}	Resiliencia máxima.
R_{q90}	Resiliencia cuantil 0.90.
RRF	<i>Runoff resistance factor</i>
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SI	<i>Sustainability Index</i>
SRH	Sistema de recursos hídricos
SWC	<i>Soil water capacity</i>
V_{hmax}	Vulnerabilidad máxima (de déficits).
V_m	Vulnerabilidad media.
V_{max}	Vulnerabilidad máxima (de déficits acumulados).
V_{q90}	Vulnerabilidad cuantil 0.90.
WEAP	<i>Water Evaluation And Planning</i>
WGEN	<i>Weather generator</i>

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar los niveles de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (CRV) del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete, utilizando el modelo WEAP. El Sistema contempla las principales fuentes de agua superficial y las demandas con derechos de uso, no considera el volumen de explotación de agua subterránea y la demanda que de ella se abastece. Nueve indicadores de CRV propuestos en la literatura (dos de confiabilidad, tres de resiliencia y cuatro de vulnerabilidad) fueron examinados con el propósito de seleccionar la combinación más adecuada para el modelo en términos de sensibilidad, monotonía y grado de superposición. Los indicadores seleccionados fueron agregados en Índices de Sostenibilidad por grupos de usuarios de agua para facilitar el análisis entre los diferentes sectores (agrícola, energético, poblacional, ecológico) y evaluar el estado general del sistema. Los resultados muestran que la combinación de indicadores más apropiada para el Sistema es: confiabilidad en tiempo (C_t); resiliencia según la duración máxima de los déficits (R_{max}) y vulnerabilidad según la media de los déficits máximos (V_{hmax}). El análisis de CRV del Sistema indica que el funcionamiento del embalse Paucarcocha ha mejorado la satisfacción de los derechos de uso de agua, no solo energéticos, sino también agrícolas, especialmente en el valle durante el periodo de estiaje. No obstante, un incremento en la demanda de este sector en 10 por ciento, o incluso menos, significaría un deterioro rápido en los niveles de CRV; de la misma forma, el establecimiento de un caudal ecológico por encima de $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el valle Cañete, dificultaría la sostenibilidad del Sistema. Los resultados del estudio sugieren que la gestión de recursos hídricos debe apoyarse en múltiples indicadores e índices que contribuyan a reconocer las capacidades y características del Sistema con el objetivo de garantizar la sostenibilidad de los derechos de uso de agua.

Palabras clave: cuenca Cañete, embalse Paucarcocha, indicadores de desempeño, modelo WEAP, sostenibilidad.

ABSTRACT

The goal of this work is to study the degree of reliability, resilience and vulnerability (RRV) of the water resource system Cañete River Basin, using the WEAP model. The System considers the main sources of surface water and the volume of water use rights, it does not include the volume of exploitation of underground water and the demands that is supplied from it. Nine estimators of RRV proposed in the literature were examined (two of reliability, 3 of resilience and four of vulnerability) in order to select the most appropriate combination in terms of sensibility, monotony and degree of overlap. The selected estimators were aggregated into Sustainability Indices by groups of water users to make the comparison between sectors easier (agricultural, energetic, population, ecological) and to evaluate the general status of the system. The results show that the most appropriate combination of estimators for the System is: time-based reliability (Rel^t); resilience based on maximum values of failure duration (Res^{max}) and vulnerability based on mean values of maximum deficits (Vul^{hmax}). The analysis of RRV shows that the operations of the Paucarcocha reservoir has improved the system to meet the volume of water rights not only for the energy sector, but also for the agricultural sector, especially in the lower basin during the dry season. However, if the demand of this sector increases by 10 percent or even less, there would be a rapid degradation in the degree of RRV; in the same way, if the ecological requirement flow is determined and set above $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ in the valley, would make it difficult for the system to meet the demands. The result of this study suggests that the water resource management should be based on multiple indicators and indices that help to identify the capabilities and characteristics of the system to guarantee the sustainability of the water use rights.

Keywords: Cañete River Basin, Paucarcocha reservoir, performance measures, sustainability, WEAP model.

I. INTRODUCCIÓN

Las características hidrológicas favorables de la cuenca del río Cañete y el otorgamiento de derechos de uso de agua por el ex Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA), han permitido, en general, un uso sostenible de los recursos hídricos. En un futuro, es posible que el desarrollo de nuevos proyectos hidráulicos, como la ampliación de la frontera agrícola (Proyecto de Ley N° 03924, 2018), la construcción de centrales hidroeléctricas (RC Hydro & LKS Energy Perú, 2015), el represamiento de lagunas en la zona alta, y trasvases con fines poblacionales (Resolución Directoral N° 942, 2017), cambien las condiciones de oferta-demanda que actualmente conocemos.

Como antecedente, en el 2010 entró en operación el embalse de la laguna Paucarcocha (volumen útil 70 hm³) —la principal infraestructura de almacenamiento a la fecha— con el objetivo de afianzar las demandas de la central hidroeléctrica El Platanal (220 MW) mediante el represamiento del río Cañete. El funcionamiento de dicha infraestructura supone un beneficio para el sector agrícola durante el estiaje, pero también, un cambio en los parámetros que sustentan los volúmenes asignados (INRENA, 2004; 2006). Otro cambio importante, es la reciente introducción de los requerimientos ecológicos en la planificación (no considerados en las asignaciones), los cuales aún no están completamente definidos en el valle.

Los potenciales desafíos en la gestión de recursos hídricos de la cuenca Cañete exigen un enfoque más sistémico. El análisis de sistemas de recursos hídricos (SRH), para la evaluación de la satisfacción de derechos de uso de agua, es una práctica muy extendida en el Perú (p. ej. ANA, 2019); no obstante, aún es necesario pensar bien como debemos medir el desempeño de estos. Diversos estudios hidrológicos (INRENA, 2001; Administración Local del Agua Mala-Omas-Cañete [ALA MOC], 2019) realizan balances utilizando persistencias al 75 por ciento, sobre la oferta como un criterio de garantía. Si bien esta

metodología se encuentra reglamentada (ANA, 2015) y es de uso generalizado, no proporciona información suficiente sobre otros aspectos, como la recurrencia, duración o severidad de déficits, que permita a los tomadores de decisiones valorar adecuadamente las opciones de políticas.

Las medidas (o indicadores/estimadores) de desempeño comúnmente empleadas en la literatura de SRH, se basan en conceptos de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (CRV); en términos generales, estos criterios se refieren a que tan probable es que un sistema falle¹ (confiabilidad), que tan severas pueden ser las consecuencias de una falla (vulnerabilidad) y con qué velocidad se puede retornar a un estado favorable una vez ocurrida una falla (resiliencia) (Hashimoto *et al.*, 1982a).

Diversos autores han propuesto y discutido estimadores de CRV, la mayoría de estos se valen de las características estadísticas de los periodos de falla (número de eventos, duración, déficit máximo, déficit acumulado, etc.). Según sea el método adoptado se obtendrán valores y comportamientos distintos y, por ende, conclusiones diferentes (Kjeldsen & Rosbjerg, 2004; McMahon *et al.*, 2006; Jain, 2010; Roach *et al.*, 2018). En este sentido, identificar y seleccionar estimadores adecuados es fundamental al momento de evaluar un SRH bajo distintos escenarios de planificación u operación (Nkwonta *et al.*, 2017).

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general es estudiar la confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete bajo el esquema de funcionamiento actual.

Siendo los objetivos específicos:

- Implementar un modelo para el sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete.
- Seleccionar indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad.
- Evaluar la confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del Sistema, respondiendo lo siguiente: (1) ¿Qué cambios, en términos de CRV, producen las operaciones del embalse Paucarcocha?; (2) ¿Qué comportamiento tiene la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha ?; y (3) ¿Qué rangos de

¹ Las fallas están referidas a un estado desfavorable de abastecimiento de agua (déficits).

caudal ecológico en el tramo final del río Cañete, permiten mantener niveles de CRV aceptables?

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. TEORÍA DE SISTEMAS Y SU APLICACIÓN EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

En el sentido más general, un sistema puede definirse como una colección de varios elementos estructurales y no estructurales que están conectados y organizados de forma tal para lograr algún objetivo específico a través del control y la distribución de recursos materiales, energéticos y de información (Simonovic, 2012, p. 66). La notación formal de un sistema se puede establecer como:

$$S: X \rightarrow Y \quad (1)$$

Donde X es un vector de entrada e Y un vector de salida. Dicho de otra forma, un sistema es un conjunto de operaciones que transforma un vector de entrada X en un vector de salida Y . Una representación esquemática de la definición de sistemas se muestra en la Figura 1. En esta se puede observar el sistema en términos de inputs, outputs, un proceso de transformación, *feedback* y una restricción. Los inputs del sistema impulsan la operación de un proceso de transformación que conduce al estado final conocido como outputs. El *feedback* o retroalimentación es el nombre dado al número de operaciones que comparan el output actual con un objetivo e identifican las discrepancias entre ellas.

El enfoque sistémico (Richmond, 1993) nos provee de herramientas para entender y abordar muchos de los problemas, generalmente complejos, como la gestión de recursos hídricos (GRH), en donde la creciente dificultad es originada por las múltiples interacciones entre los subsistemas físicos y sociales que configuran la realidad.

Existen muchos y variados sistemas y subsistemas que se pueden identificar en la GRH. Por ejemplo, Toledo (2011), basándose en el reglamento la Ley de Recursos Hídricos del Perú (ANA, 2018), menciona: el sistema de principios, el agua y sus bienes asociados; el sistema de derechos de uso del agua; el sistema de protección de fuentes naturales y régimen

económico por el uso de agua; el sistema de planificación de la gestión del agua y sus instrumentos respectivos; los sistemas de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y subterráneas, etc. Todos estos sistemas forman parte del gran Sistema Nacional de Gestión del Agua, cuyo ente rector es la Autoridad Nacional del Agua que a su vez incluye otros subsistemas dentro de su organización.

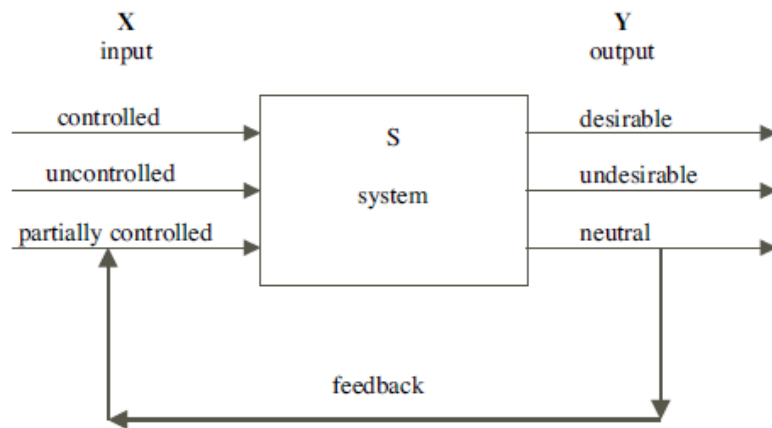


Figura 1: Representación esquemática de la definición de sistema

FUENTE: Simonovic (2012).

Los sistemas de recursos hídricos son de especial interés para la presente investigación. De acuerdo a Brown *et al.* (2015) estos sistemas se encuentran conformados por procesos hidrológicos, ecológicos y antrópicos interconectados. Esto comprende procesos biogeofísicos, incluyendo elementos del ciclo hidrológico, el funcionamiento de ecosistemas y procesos humanos que involucran el agua, como la construcción, operación y remoción de infraestructura hidráulica; además de las decisiones y acciones humanas (consumo, recreación, contaminación, etc.).

2.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Los métodos más utilizados en el análisis de sistemas de recursos hídricos son: simulación, optimización (simple) y optimización multiobjetivo.

2.2.1. Simulación

La simulación describe cómo opera un sistema en respuesta a varios inputs, en tal sentido, es utilizado para predecir qué cambios resultaran de un curso específico de acción (modelos

de causa-efecto). Contiene las siguientes fases: desarrollo del modelo de sistemas, operación del modelo, observación e interpretación de resultados (Simonovic, 2012).

El procedimiento de *simulación clásica* implica, en primer lugar, la descomposición del problema para la descripción del sistema. Identificados los elementos principales, se representa matemáticamente cada uno de ellos y se realiza la codificación computacional. Seguidamente, se calibran los parámetros del modelo y se verifica el desempeño utilizando datos distintos a los empleados durante el proceso de calibración. Luego, el modelo completo es operado empleando tantos sets de datos de entrada como sean necesarios. El proceso concluye luego de analizar detalladamente los resultados que arrojan las simulaciones. Si existe la necesidad de modificar la descripción o estructura del sistema, el procedimiento debe empezar de nuevo, es decir, el modelo debe ser recodificado, calibrado y validado otra vez antes de su uso.

Por otro lado, la *simulación dinámica* de sistemas es un método que facilita la retroalimentación (*feedback*) y el análisis a través de un modelo (*software*) que simula los efectos de las estructuras y políticas de control sobre el comportamiento del sistema. Las ventajas de la simulación dinámica sobre la simulación clásica incluyen:

- La simplicidad de uso y la aplicabilidad de los principios generales de sistemas dinámicos a los sistemas sociales, naturales y físicos.
- La habilidad de evaluar como cambios estructurales en partes del sistema puede afectar al sistema en su conjunto.
- La predictibilidad combinada (el comportamiento de un sistema bajo condiciones de entrada particulares) y de aprendizaje (descubrimiento del comportamiento inesperado del sistema bajo condiciones de entrada particulares).
- Participación activa de las partes interesadas en el proceso de modelización.

2.2.2. Optimización (simple)

El procedimiento de seleccionar el conjunto de variables de decisión que maximiza/minimiza la función objetivo, sujeto a las restricciones del sistema, es llamado procedimiento de optimización. Una expresión matemática general para un problema de optimización, es:

$$\text{Min or Max } f(x) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$g_j(x) \leq b_j; j = 1, 2, \dots, m$$

$$x \geq 0; i = 1, 2, \dots, n$$

Donde x es un vector de decisión de variables; n , el número total de decisión de variables; g , las restricciones; b , los valores conocidos en el lado derecho; y m , el número total de restricciones.

La mayoría de los problemas de asignación de recursos hídricos son abordados utilizando técnicas de programación lineal (PL). La PL es aplicada a problemas que son formulados en términos de funciones objetivo y restricciones lineales, como:

$$\text{Max or Min } x_0 = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i; \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$x_j \geq 0; \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Donde c_j , es el coeficiente de la función objetivo; a_{ij} , el coeficiente tecnológico; b_i , el coeficiente del lado derecho; x_0 , la función objetivo; x_j , la variable de decisión; m , el número total de restricciones; y n , el número total de variables de decisiones.

2.2.3. Optimización multiobjetivo

En términos simples, la optimización multiobjetivo busca identificar aquellas decisiones o acciones cuyo desempeño en un objetivo solo puede mejorarse mediante la degradación del desempeño de otros objetivos (i.e., compensación óptima de Pareto). Los SRH son un claro ejemplo en donde se debe caracterizar explícitamente la compensación entre objetivos económicos, sociales y/o medioambientales en conflicto, especialmente, durante la evaluación de los costos-beneficios de proyectos hidráulicos (Brown *et al.*, 2015).

Aunque el análisis multiobjetivo va más allá del alcance del presente trabajo (optimización simple), donde se considera un solo propósito (abastecimiento de agua) y una sola variable de interés (cantidad de agua), el conflicto entre distintos objetivos podría surgir si se deseara mejorar el desempeño del suministro de agua de varios sectores a la vez (p. ej. agrícola y energético).

2.3. MODELOS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Existe un gran número de modelos de SRH desarrollados alrededor del mundo, la mayoría de estos se basan en la aplicación de técnicas analíticas complejas y programas de cómputo que simulan el comportamiento de SRH con principios matemáticos. Entre los modelos de SRH más conocidos se pueden mencionar WEAP (Yates *et al.*, 2005); ResSim (Klipsch & Hurst, 2007); AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1996); CalSim (Draper *et al.*, 2004) y OASIS (Roost, 2002). En general, los modelos poseen limitaciones que pueden incluir algunas o todas las que mencionan a continuación:

- Los modelos son inherentemente una simplificación del mundo real y dependen de asunciones.
- La confiabilidad de los resultados del modelo depende en gran medida de los datos disponibles.
- A menudo es difícil seleccionar un modelo apropiado o estandarizar un enfoque específico de modelamiento.
- Los modelos generalmente requieren configuraciones e interpretaciones de expertos, además de verificaciones y pruebas extensivas.

2.4. EL ROL DE LOS MODELOS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Los modelos de SRH pueden ser usados para realizar dos tipos de análisis, estos son: el análisis de desempeño y el análisis de planificación (Nkwonta *et al.*, 2017).

2.4.1. Análisis de desempeño

El análisis de desempeño tiene como propósito evaluar la capacidad total de los recursos a corto y largo plazo en un punto en particular dentro de un SRH para un nivel de desarrollo del sistema seleccionado y para un conjunto de reglas de operación del sistema. El rendimiento de un sistema puede determinarse en base a un análisis histórico, empleando datos observados (precipitación y escorrentía), o en base a un análisis estocástico, en cuyo

caso la garantía de suministro (o el riesgo de falta de suministro) puede resultar para una variedad de rendimientos.

2.4.2. Análisis de planificación

En general, el propósito de llevar a cabo un análisis de planificación es cuantificar analítica y dinámicamente los cambios en la capacidad de un SRH, determinar las reglas de operación y programar la implementación de opciones de desarrollo utilizando procedimientos de simulación de red y una estrategia de asignación práctica. El análisis de planificación se puede clasificar en dos tipos: planificación de desarrollo y planificación operativa.

La planificación de desarrollo se refiere al proceso llevado a cabo para determinar la necesidad y el momento adecuado para la intervención en un SRH. La intervención, en este contexto, se refiere a cualquier medida que puede ser implementada a fin de mejorar el balance entre la oferta y los requerimientos proyectados, este objetivo es logrado mediante opciones en la gestión de la demanda y/o infraestructura de desarrollo. Por otro lado, la planificación operativa, implica, mediante simulación y análisis de escenarios, la determinación analítica de reglas operación óptimas para el SRH.

2.5. MEDIDAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO

2.5.1. Revisión de indicadores

En un sentido amplio, los indicadores son parámetros cuantitativos o cualitativos que nos informan sobre las condiciones de un SRH y sus relaciones con los sistemas ecológicos, sociales y económicos. La Tabla 1 muestra cinco dominios o categorías de indicadores, el primero de estos, *suministro de agua*, representa el tema central del presente trabajo.

Los indicadores de *suministro de agua* nos ayudan a valorar, cuantitativamente, la bondad de un SRH para satisfacer requerimientos de agua. Estos indicadores pueden ser simples estadísticas (promedio, desviación estándar, etc.) sobre alguna variable de interés (evaluada generalmente a escala diaria o mensual), tales como volúmenes de almacenamiento, suministro, evaporación, déficits o descargas. También pueden ser probabilísticas, por ejemplo, las más conocidas están asociadas a conceptos de *confiabilidad*, *resiliencia* y

vulnerabilidad (CRV) (Hashimoto *et al.*, 1982a).

Tabla 1: Categorías de indicadores en la gestión de SRH

Categoría	Definición
Suministro de agua	Provisión de agua suficiente para satisfacer el funcionamiento (productivo), las necesidades de la salud y el bienestar económico.
Calidad de agua	La calidad química y física del agua para cumplir con los requisitos del ecosistema y del agua potable.
Salud del ecosistema	Las condiciones del sistema natural, incluyendo las interacciones del sistema terrestre y acuático a través de flujos de escorrentía.
Gestión adaptativa y sostenible	Un sistema de gestión que responda ágil y apropiadamente a las condiciones cambiantes y que sea equitativo y representativo de las diversas necesidades de agua.
Beneficios sociales y equidad	Los beneficios de salud, económicos y de equidad obtenidos de un sistema bien administrado, incluida la gestión de extracción y renovación del agua.

FUENTE: Adaptado de Shilling (2013).

Las medidas de *confiabilidad* han formado parte integral del análisis y diseño de SRH por más de un siglo. Desde las publicaciones de Hashimoto *et al.* (1982a, 1982b) y Fiering (1982), el uso de criterios adicionales (p. ej. *resiliencia*, *vulnerabilidad* y/o *robustez*) ha sido ampliamente discutido (Moy *et al.*, 1986; Kundzewicz & Kindler, 1995; Kjeldsen & Rosbjerg, 2004). En general, para determinar estos indicadores se deben extraer datos de los periodos de déficits durante el balance hídrico, que incluyen: número de eventos, duración, déficit máximo, déficit acumulado, etc.

En aplicaciones prácticas, la *confiabilidad* es el término utilizado para representar la probabilidad de que un sistema se encuentre en un estado satisfactorio, las expresiones más utilizadas son *confiabilidad de ocurrencia*, *confiabilidad temporal* y *confiabilidad volumétrica* (Klemes, 1969). Por su parte, la *resiliencia* describe la velocidad probable con la que el sistema puede recuperarse de un evento de falla (periodo de déficit) una vez producido, mientras que la *vulnerabilidad* se refiere a la severidad o daño probable de dicho evento.

Los estimadores de confiabilidad, por lo general, están asociados a la frecuencia de déficits; los de resiliencia, a la duración; y los de vulnerabilidad, a la magnitud; sin embargo, esto no limita el uso de estos conceptos a un solo aspecto. De hecho, el término “resiliencia” ha

mostrado una tracción particular en estudios recientes, con el consenso general de que debe ir más allá de su definición original (Davidson *et al.*, 2016).

Dependiendo de la definición y los aspectos que considere, se puede estimar la resiliencia de distintas formas. Por ejemplo, Jung (2013) lo determina en función de la severidad de las fallas y el tiempo de recuperación. Buttler *et al.* (2017), en cambio, lo definen en base a la minimización de la magnitud y duración de los niveles de falla durante la vida útil del sistema, mientras que Roach *et al.* (2018) proponen diez estimadores diferentes de resiliencia y los clasifica en cuatro tipos: basados en volumen, frecuencia, duración y magnitud, concluyendo que considerar múltiples aspectos simultáneamente conduce a una comprensión más completa de la resiliencia en comparación con enfoques convencionales. Recientemente se han logrado avances en la estimación de la CRV con la aplicación de la lógica difusa (Safavi *et al.*, 2016; Golmohammadi *et al.*, 2021). Este nuevo enfoque incorpora funciones de pertenencia difusa en la estructura de los indicadores para establecer múltiples umbrales y grados de satisfacción (a diferencia de técnicas tradicionales dónde solo se considera un umbral y dos estados, satisfactorio y no satisfactorio).

2.5.2. Revisión de índices

Los índices representan medidas agregadas de una combinación de diferentes indicadores (Sainz, 1989). Tienen estructuras jerárquicas, más o menos complejas, organizadas en ejes temáticos, tópicos, subtópicos, y factores elementales de diferente naturaleza (ambientales, económicos, sociales, institucionales, etc.) que se agregan sucesivamente, a través de técnicas matemáticas, en un único valor o factor.

Diversos índices han sido desarrollados entorno a la gestión sostenible de SRH, como el *Watershed Sustainability Index* (Chaves & Alipaz, 2007), *Sustainability Index for Integrated Urban Water Management* (De Carvalho *et al.*, 2009), *Sustainable Water Index* (Kim *et al.*, 2016), *Sustainable Water Management Index* (Maiolo & Pantusa, 2019), y también algunos índices más específicos para la evaluación del desempeño del suministro de agua, como *Sustainability Index* (SI) (Loucks, 1997) y *Drought Risk Index* (DRI) (Zongxue *et al.*, 1998). Los índices SI y DRI, a diferencia de otros que abordan un amplio rango de factores, resumen parámetros esenciales para la gestión de una forma más significativa, combinando los indicadores de CRV anteriormente descritos. Ambos índices han sido utilizados

ampliamente por la comunidad científica para la evaluación y comparación de políticas alternativas de gestión (McMahon *et al.*, 2006; Jain, 2010; Safavi *et al.*, 2016).

Algunos autores proponen variaciones al índice SI (Sandoval-Solis *et al.*, 2011) con el objetivo de mejorar su estructura, escala y contenido, y hacerlo más flexible y ajustable a diferentes grupos de usuario, tipos de uso, requerimientos ambientales y obligaciones (de acuerdo a tratados internacionales en cuencas transfronterizas).

Para todos los índices mencionados, la *sostenibilidad* es un concepto clave, aunque no necesariamente comparten la misma definición. La definición propuesta por Loucks (1997) es probablemente la más utilizada: “Los sistemas de recursos hídricos sostenibles son aquellos diseñados y gestionados para contribuir plenamente a los objetivos de la sociedad, ahora y en el futuro, manteniendo su integridad ecológica, ambiental e hidrológica”.

2.5.3. Criterios de selección

Previo al análisis de desempeño, se deben identificar los indicadores (e índices) más apropiados para el SRH en cuestión. En la Tabla 2 se muestra una lista de las características deseables, algunas de estas pueden ser reconocidas de forma inmediata en un indicador (p. ej. práctico, comprensible), otras, en cambio, requieren algún tipo análisis estadístico para su verificación (p. ej. no redundante/superpuesto).

Son varios los estudios que han investigado las características de la Tabla 2 con el objetivo de seleccionar la combinación más apropiada de indicadores. Aquí se hace una breve revisión de algunos de ellos.

Tabla 2: Características de indicadores adecuados para la gestión de SRH

Ítem	Característica	Descripción
1	Práctico	Cuantitativo más que cualitativo.
2	Completo	Cubre todos los aspectos importantes del sistema, incluyendo las características de los eventos de déficits (frecuencia, duración y magnitud).
3	Comprensible	Fácil de entender y explicar a las partes interesadas sin conocimientos técnicos.
4	No redundante/ superpuesto	Es independiente y específico.
5	Mínimo	Se considera el menor número de indicadores posible.

«continuación»

6	Defendible	Muestra superioridad en comparación con indicadores convencionales relevantes en un determinado contexto (confiabilidad, riesgo/probabilidad/impacto, etc.).
7	Enfocado	Permite al sector del agua expresar sus metas y objetivos.
8	Estratégico	Incorpora un objetivo estratégico y provee suficiente información para monitorear, planificar y adaptar correctamente.
9	Preciso	Puede ser proyectado/determinado con precisión para un sistema dado, se encuentra libre de aproximaciones y valores indistintos.
10	Sensible	Responde a los cambios de forma moderada y uniforme.
11	Monótono	Provee claramente una señal de mejora o deterioro del sistema.
12	Estandarizado	Hay consenso entre las partes involucradas para el uso del indicador, es de fácil determinación para las empresas, organizaciones e individuos.
13	Informativo	Proporciona información útil y precisa para la cuantificación de los costos y beneficios sociales, ambientales y económicos asociados al desempeño del sistema.

FUENTE: Adaptado de Roach *et al.* (2018).

Kjeldsen & Rosbjerg (2004) evalúan estimadores de CRV en función del comportamiento monótono y del grado de superposición. El análisis se lleva a cabo mediante el tránsito de series de descargas a través de reservorios con demandas y volúmenes de almacenamiento específicos, de acuerdo a una Política Operativa Lineal Estándar (SLOP, por sus siglas en inglés). Los resultados muestran que el uso de series de longitud histórica (< 100 años) puede conducir a estimaciones no monótonas de resiliencia y vulnerabilidad (o a estimaciones monótonas con valores sobreestimados/subestimados). A fin de obtener estimadores estables, recomiendan el uso de series estocásticas de al menos 1000 años. Por otra parte, las fuertes correlaciones (superposición) encontradas entre algunos estimadores de resiliencia y vulnerabilidad sugieren que uno de estos criterios no debería ser tomado en cuenta explícitamente.

Jain (2010) y McMahon *et al.* (2006) emplean metodologías similares a Kjeldsen & Rosbjerg (2004) para estudiar la sensibilidad de los estimadores. De acuerdo a los análisis de Jain (2010), el grado de sensibilidad de un estimador depende de la estadística utilizada (valores medios, máximos, cuantiles) y de las condiciones de operación (oferta y demanda) bajo análisis; asimismo, McMahon *et al.* (2006) agregan que, para niveles de operación similares, la variabilidad hidrológica (coeficiente de variación de las descargas anuales) juega un papel importante en el comportamiento de los estimadores. Ambos estudios sugieren seleccionar estimadores que muestren comportamientos moderados y uniformes.

Roach *et al.* (2018) evalúan diez estimadores potenciales de resiliencia para un SRH más complejo, sujeto a demandas hídricas multisectoriales y requerimientos ambientales. La metodología incluye un análisis de sensibilidad y correlación bajo escenarios de cambio climático y estrategias de adaptación, además de un examen detallado del comportamiento de los periodos de déficits.

En resumen, estos estudios permiten reconocer aspectos claves en la selección de indicadores de CRV.

III. METODOLOGÍA

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Cañete se ubica en la costa y sierra central del Perú, en el departamento de Lima, provincias de Yauyos y Cañete. Geográficamente está comprendida entre las coordenadas UTM WGS84 Norte 8543670 a 8676084 m, y Este 347258 a 443640 m (Tabla 3). Por el Norte limita con la cuenca del río Mantaro y San Juan; por el Sur, con la intercuenca qda. Topará y el Océano Pacífico; y por el Oeste, con las cuencas de los ríos Omas, Mala y el Océano Pacífico (Figura 2).

Tiene una extensión de 6049,4 km², un perímetro de 650,1 km y una altitud media de 4079 m s. n. m. El cauce principal nace en la laguna Ticllacocha, ubicada al pie de las cordilleras de Ticlla y Pichahuarco a una altitud aproximada de 4800 m s. n. m. Luego de recorrer 233,8 km. con una pendiente promedio de 1,9 por ciento, desemboca en el Océano Pacífico. La descarga media anual del río Cañete es 50 m³s⁻¹ y, al igual que la mayoría de las cuencas de la Vertiente del Pacífico, posee una marcada estacionalidad. Las descargas mínimas se presentan en setiembre con 10 m³s⁻¹ en promedio y las máximas en marzo con 140 m³s⁻¹.

Para efectos de la presente investigación, se ha dividido la cuenca en tres sectores: cuenca baja, media y alta. La cuenca baja o valle, se localiza aguas abajo de la estación Sosci; la cuenca media, aguas arriba de dicha estación hasta la confluencia del río Cañete con el río Huangáscar; y la cuenca alta, aguas arriba de dicha confluencia.

Tabla 3: Ubicación geográfica de la zona de estudio

Sistema	Datum	Componentes	Valor Mínimo	Valor Máximo
Coordenadas Geográficas UTM	Horizontal WGS84/ UTM Zona 18S	Este (m)	347258	443640
		Norte (m)	8543670	8676084
Altitud	Vertical nivel medio del mar	m s. n. m	0	5816

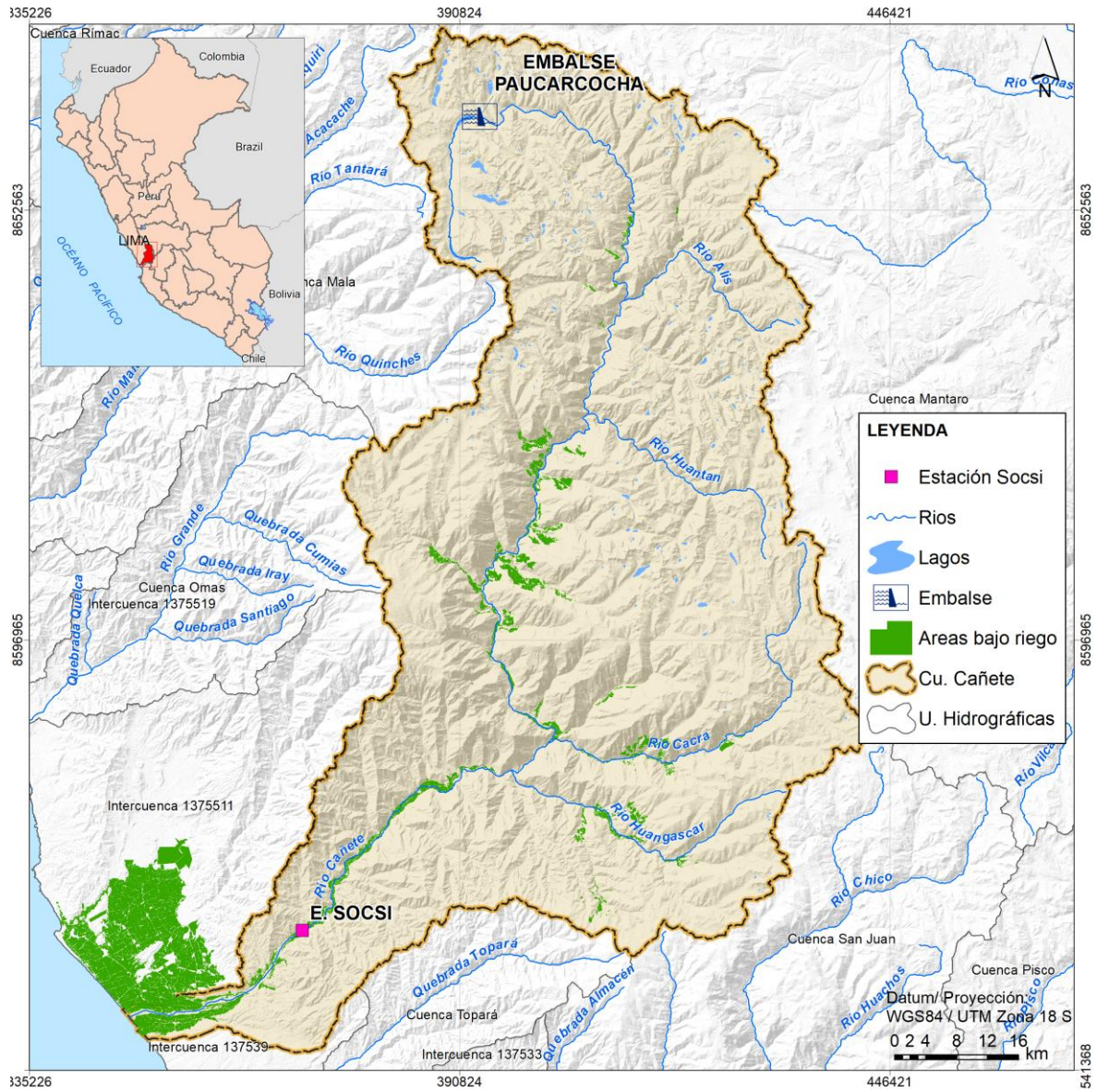


Figura 2: Ubicación de la zona de estudio

FUENTE: Elaborado con información de la ANA y SENAMHI.

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información meteorológica

La información de meteorológica comprende registros diarios y mensuales de la red de estaciones meteorológicas y pluviométricas de la cuenca de estudio y cuencas vecinas, administradas por el SENAMHI.

En la Figura 3(a) y Tabla 5 se muestra la ubicación geográfica de las 16 estaciones pluviométricas identificadas, ocho de las cuales se localizan en la cuenca Cañete, cuatro en la cuenca Mala, dos en la cuenca San Juan, uno en la cuenca Omas y otro en la Intercuenca 1375511. Los registros abarcan el periodo 1964-2019 y tienen una disponibilidad de datos varía entre 21 y 55 años por estación, ver Figura 27 del ANEXO 1.

3.2.2. Información hidrométrica

Comprende registros observados de caudales diarios y mensuales de la red de estaciones hidrométricas de la cuenca de estudio administradas por el SENAMHI, CELEPSA y ELECTROPERU. En la Figura 3(b) y Tabla 6 se muestra la ubicación geográfica de las 10 estaciones identificadas. La estación hidrométrica Socsi es la más importante en cuanto a ubicación y cantidad de información, puesto que monitorea prácticamente el total de las descargas del río Cañete, se encuentra localizada en la cabecera del valle y abarca un periodo extenso de registro con más de 50 años (1964-2019), ver Figura 26 del ANEXO 1.

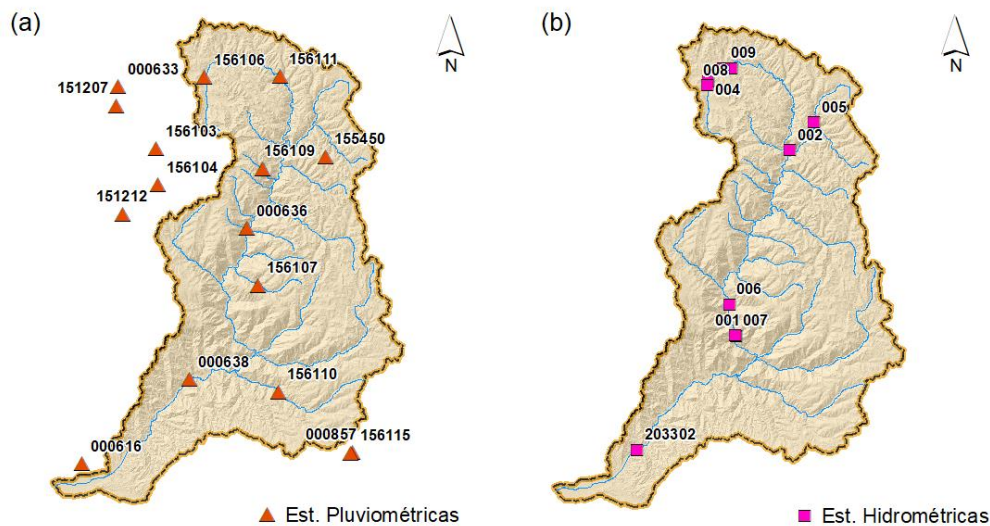


Figura 3: Red de estaciones pluviométricas (a) e hidrométricas (b) de la cuenca Cañete

FUENTE: Elaborado con información del SENAMHI.

3.2.3. Información cartográfica

La información cartográfica utilizada, es la siguiente:

- Cartas Nacionales: 24.k – Matucana, 25.k – Huarochirí, 26.k – Lunahuaná, 27.k – Chincha, 24.l – La Oroya, 25.l – Yauyos, 26.l – Tupe y 27.l – Tántara a escala 1:100,000 del Instituto Geográfico Nacional.
- Mapa de delimitación de Unidades Hidrográficas del Perú del INRENA (2007).
- Mapa Geológico del Perú a escala 1:1'000,000 del INGEMMET (2018).
- Mapa Nacional de Cobertura Vegetal a escala 1:2'000,000 del MINAM (2015).
- Mapa de Clasificación Climática del Perú del SENAMHI (1988).
- Modelo Digital de Elevación ASTER-GDEM v1.

3.2.4. Equipos y herramientas computacionales

Los equipos y herramientas computacionales utilizados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Equipos y herramientas computacionales

	Descripción
EQUIPOS	
Computadora	Monitor LG, Procesador AMD Ryzen 5 3600 6-Core 3.59 GHz, memoria RAM 16 GB
Impresora	Canon E400 Series

«continuación»

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

ArcGIS 10.8	Programa para visualizar, editar, crear y analizar datos geoespaciales.
Matlab R2021a	Sistema de cómputo con un entorno de desarrollo integrado y lenguaje de programación propio.
Python 3.8	Lenguaje de programación de alto nivel.
WEAP 2019.2	Herramienta computacional para la planificación integrada de los recursos hídricos.

Tabla 5: Ubicación de estaciones pluviométricas

Código	Nombre	Tipo	Departamento	Provincia	Distrito	Unidad Hidrográfica	Latitud (S)	Longitud (W)	Altitud (m s. n. m.)
156104	Ayaviri*	PLU	Lima	Yauyos	Ayaviri	Mala	12° 22' 55.49''	76° 08' 12.20''	3224
000616	Cañete	CO	Lima	Cañete	Imperial	Interc. 1375511	13° 04' 29.10''	76° 19' 49.51''	116
156109	Carania*	PE	Lima	Yauyos	Carania	Cañete	12° 20' 39.83''	75° 52' 19.74''	3820
156107	Colonia	PLU	Lima	Yauyos	Colonia	Cañete	12° 38' 01.00''	75° 53' 01.00''	3308
151207	Huancata*	PLU	Lima	Huaroquirí	Sangallaya	Mala	12° 11' 10.24''	76° 14' 26.37''	2684
156110	Huangáscar*	PE	Lima	Yauyos	Huangáscar	Cañete	12° 53' 54.88''	75° 50' 01.14''	2500
156103	Huañec*	PLU	Lima	Yauyos	Huañec	Mala	12° 17' 36.91''	76° 08' 20.48''	3200
000633	Huaroquirí*	CO	Lima	Huaroquirí	Huaroquirí	Mala	12° 08' 19.88''	76° 14' 03.46''	3120
000638	Pacarán*	CO	Lima	Cañete	Pacarán	Cañete	12° 52' 00.81''	76° 03' 28.54''	684
000857	San Pedro de Huacarpana*	CO	Ica	Chincha	San Pedro de Huacarpana	San Juan	13° 02' 52.63''	75° 38' 46.63''	3772
156115	San Pedro de Huacarpana	PLU	Ica	Chincha	San Pedro de Huacarpana	San Juan	13° 03' 01.00''	75° 39' 01.00''	3763
151212	San Pedro de Pilas*	PLU	Lima	Yauyos	San Pedro de Pilas	Omas	12° 27' 17.29''	76° 13' 32.11''	2707
156106	Tanta*	PLU	Lima	Yauyos	Tanta	Cañete	12° 07' 00.00''	76° 01' 00.00''	4323
156111	Vilca*	PE	Lima	Yauyos	Huancaya	Cañete	12° 06' 52.44''	75° 49' 34.21''	3832
155450	Yauricocha*	PLU	Lima	Yauyos	Alis	Cañete	12° 18' 53.21''	75° 42' 43.51''	4560
000636	Yauyos*	CO	Lima	Yauyos	Colonia	Cañete	12° 29' 30.22''	75° 54' 37.41''	2285

FUENTE: Elaborado con información del SENAMHI. (*) Estaciones en funcionamiento. (CO) Climatológica Ordinaria, (PE) Propósitos Específicos, (CP) Climatológica Principal, (PLU) Pluviométrica.

Tabla 6: Ubicación de estaciones hidrométricas

Código	Nombre	Tipo	Departamento	Provincia	Distrito	Latitud (S)	Longitud (W)	Altitud (m s. n. m.)	Operador
203302	Socsi*	HLM/EHA	Lima	Cañete	Lunahuaná	13° 01' 41.88"	76° 11' 40.20"	311	SENAMHI
001	Chavín	HLG	Lima	Yauyos	Catahuasi	12° 44' 48.00"	75° 56' 33.00"	1350	ELECTROPERU
002	Tinco de Alis	HLG	Lima	Yauyos	Alis	12° 17' 10.00"	75° 48' 16.00"	3350	ELECTROPERU
003	Aguas Calientes	HLG	Lima	Yauyos	Tanta	12° 04' 55.00"	75° 57' 06.00"	4110	ELECTROPERU
004	Tanta	HLM	Lima	Yauyos	Tanta	12° 06' 53.00"	76° 00' 41.00"	4278	ELECTROPERU
005	Tomas	HM	Lima	Yauyos	Tomas	12° 13' 02.00"	75° 44' 37.00"	3542	ELECTROPERU
006	Putinza*	HM	Lima	Yauyos	Putinza	12° 40' 05.40"	75° 57' 35.10"	890	CELEPSA
007	Capillucas*	HM	Lima	Yauyos	Catahuasi	12° 44' 42.00"	75° 56' 40.20"	580	CELEPSA
008	Tanta*	HM	Lima	Yauyos	Tanta	12° 07' 27.10"	76° 00' 50.41"	4289	CELEPSA
009	Paucarcocha*	HM	Lima	Yauyos	Tanta	12° 04' 52.30"	75° 58' 20.49"	4231	CELEPSA

FUENTE: Elaborado con información del SENAMHI, ELECTROPERU y CELEPSA. (*) Estaciones en funcionamiento. (HLM) Hidrométrica Limnimétrica, (HLG) Hidrométrica Limnigráfica, (EHA) Estación Hidrométrica Automática.

3.3. PROCEDIMIENTO

Para estudiar la CRV del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete se diseñó un procedimiento metodológico compuesto por tres objetivos específicos y 11 métodos, como se aprecia en el esquema de la Figura 4.

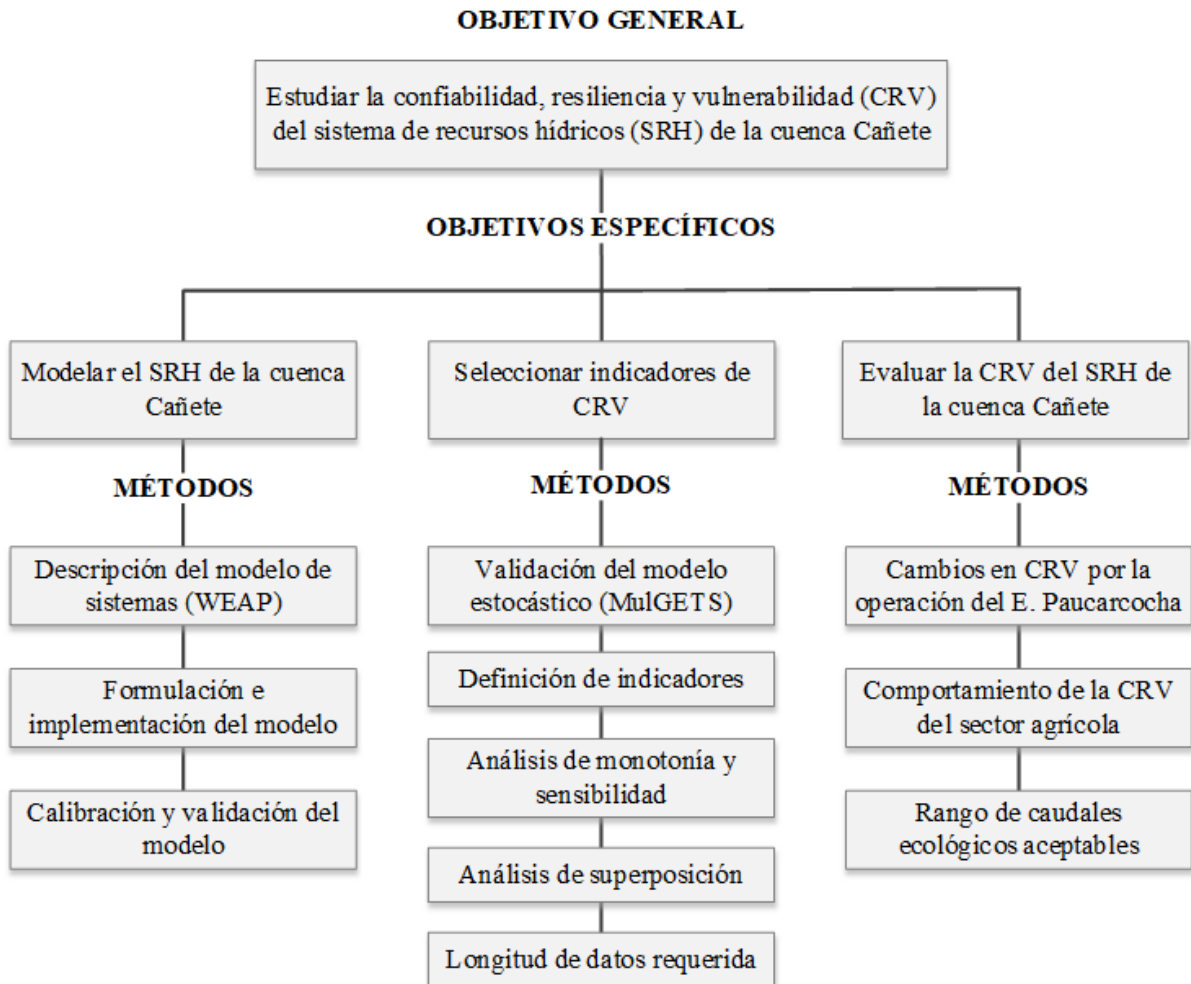


Figura 4: Esquema metodológico de la investigación

La metodología busca responder lo siguiente: (1) ¿Qué cambios, en términos de CRV, producen las operaciones del embalse Paucarcocha?; (2) ¿Qué comportamiento tiene la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha?; y (3) ¿Qué rangos de caudal ecológico en el tramo final del río Cañete, permiten mantener niveles de CRV aceptables?

3.3.1. Modelamiento del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete

El modelamiento del Sistema se realizó en WEAP (*Water Evaluation And Planning*) (Sieber & Purkey, 2015). WEAP es una herramienta computacional para la simulación dinámica de sistemas de recursos hídricos. Realiza balances entre la oferta, generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca; y demanda, caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal, con distintas prioridades de atención. El modelo hidrológico utilizado para la generación de descargas en WEAP fue *Soil Moisture Accounting Model* (Escobar & Vicuña, 2009).

a. Formulación e implementación del modelo

Tratamiento de la información básica. Los datos meteorológicos de temperatura media, velocidad del viento y humedad relativa, fueron sometidos a un control de calidad de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2018), ello consistió en verificar las coherencias internas, temporales y espaciales, así como el establecimiento de pruebas de tolerancia para detectar posibles datos atípicos.

Para la consistencia y homogeneidad de datos pluviométricos e hidrométricos se emplearon técnicas típicas, como hidrogramas, regionalización (Método del Vector Regional), pruebas estadísticas de tendencias, saltos en la media y cambios en la media/mediana; asimismo, se completaron datos faltantes escala mensual mediante el método de regresión lineal múltiple. Para el caso de la hidrometría, previamente, se naturalizaron los caudales de las estaciones Sosci, (2010-2019) y Putinza (2014-2019) utilizando datos de las estaciones que monitorean los flujos de entrada y salida del embalse Paucarcocha.

Otro tipo de información procesada y sistematizada, incluye: cartografía del uso del suelo/cobertura vegetal, geología, modelo digital de elevación y demandas de agua.

Identificación de la red hidrográfica. En esta etapa se identificaron los afluentes más importantes para su representación en WEAP. La identificación se realizó en base a la información cartográfica e hidrológica, y en función de las fuentes de agua superficial (ríos/quebradas) utilizadas para la asignación u otorgamiento de derechos de uso, los afluentes son; por la margen derecha, los ríos Miraflores, Carania, Yauyos, Aucampi y las

quebradas Maizal y Huayllura; y por la margen izquierda, los ríos Alis (confluencia de los ríos Shinhua y Siria), Laraos, Huantán, Pampas, Tupe, Cakra, Huangáscar y las quebradas Pacala y Curpacocha.

Delimitación de subcuencas. En primer lugar, se identificaron los puntos de interés donde generar descargas, de manera que estos puedan representar la oferta hídrica para el mayor número de sitios de demandas posible (bloques de riego); asimismo, se tomó en cuenta las superficies más importantes para la captación y transformación de precipitación en esorrentía, esto último se logró tomando como referencia la isoyeta anual 250 mm. Posteriormente, las coordenadas geográficas de los puntos identificados se sobrepusieron sobre el modelo digital de elevación (Figura 5(a)) para delimitar las subcuencas mediante el uso de la herramienta computacional ArcGIS. Bajo esta metodología se obtuvo un total de 21 subcuencas como se puede apreciar en la Figura 5(b).

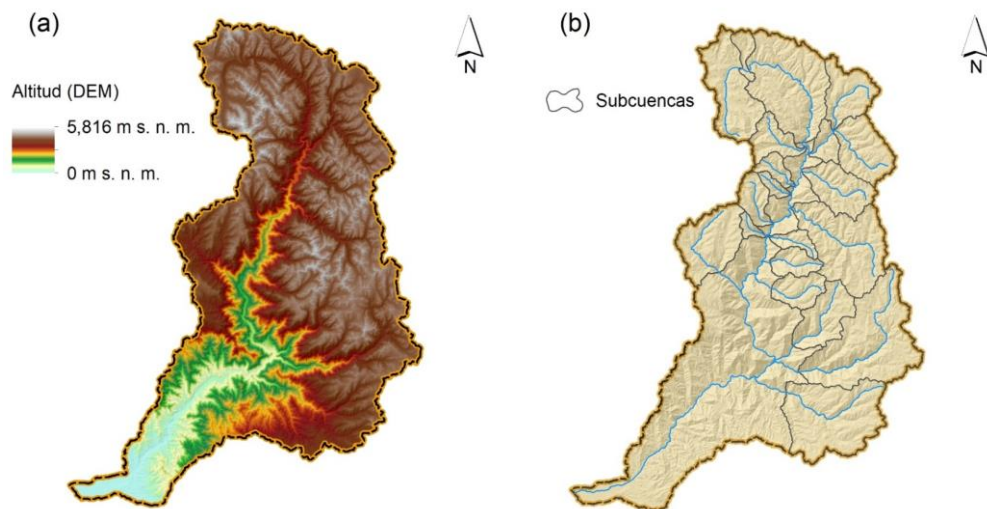


Figura 5: Modelo digital de elevación (a) y subcuencas (b) de la cuenca Cañete

Caracterización del uso del suelo/cobertura vegetal y geología. Esta etapa consistió en identificar los tipos de coberturas, las áreas y los porcentajes presentes en cada una de las subcuencas (Figura 6(a)). El uso del suelo/cobertura vegetal está directamente relacionado con algunos parámetros del modelo hidrológico; como el coeficiente de cultivo (k_c), en el proceso de evapotranspiración; y el factor de resistencia al flujo (RRF), en el escurrimiento superficial. También se efectuó la caracterización geológica (Figura 6(b)) con el objetivo de identificar zonas homogéneas y regionalizar los parámetros asociados al suelo; por ejemplo,

la capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (SWC) y la capacidad de almacenamiento en la zona profunda (DWC).

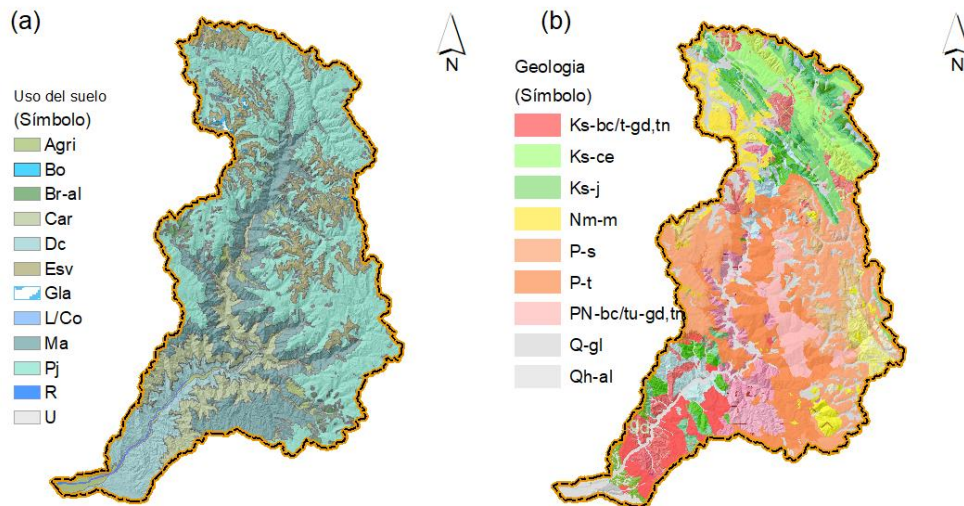


Figura 6: Cobertura vegetal/uso del suelo (a) y geología (b) de la cuenca Cañete

Caracterización climática. Consistió en estimar series mensuales de precipitación, temperatura media, humedad relativa y velocidad del viento para cada subcuenca. Para la variable precipitación se generó una superficie grillada de 0.7° de resolución mediante el método de interpolación Kriging Ordinario en base a 10 estaciones pluviométricas, con la cual se obtuvieron series de precipitación media areal para cada subcuenca. En el caso de la temperatura media, el procedimiento fue similar; sin embargo, solo se interpolaron datos a nivel de promedios mensuales (método de inverso a la distancia) debido al corto periodo de datos (2003-2018), no coincidente con el de precipitación (1964-2019). Para las variables de humedad relativa y velocidad del viento, se utilizaron datos de la estación meteorológica más representativa de la zona (estación Yauyos). En la Figura 7 puede apreciar la variación estacional de las variables estudiadas.

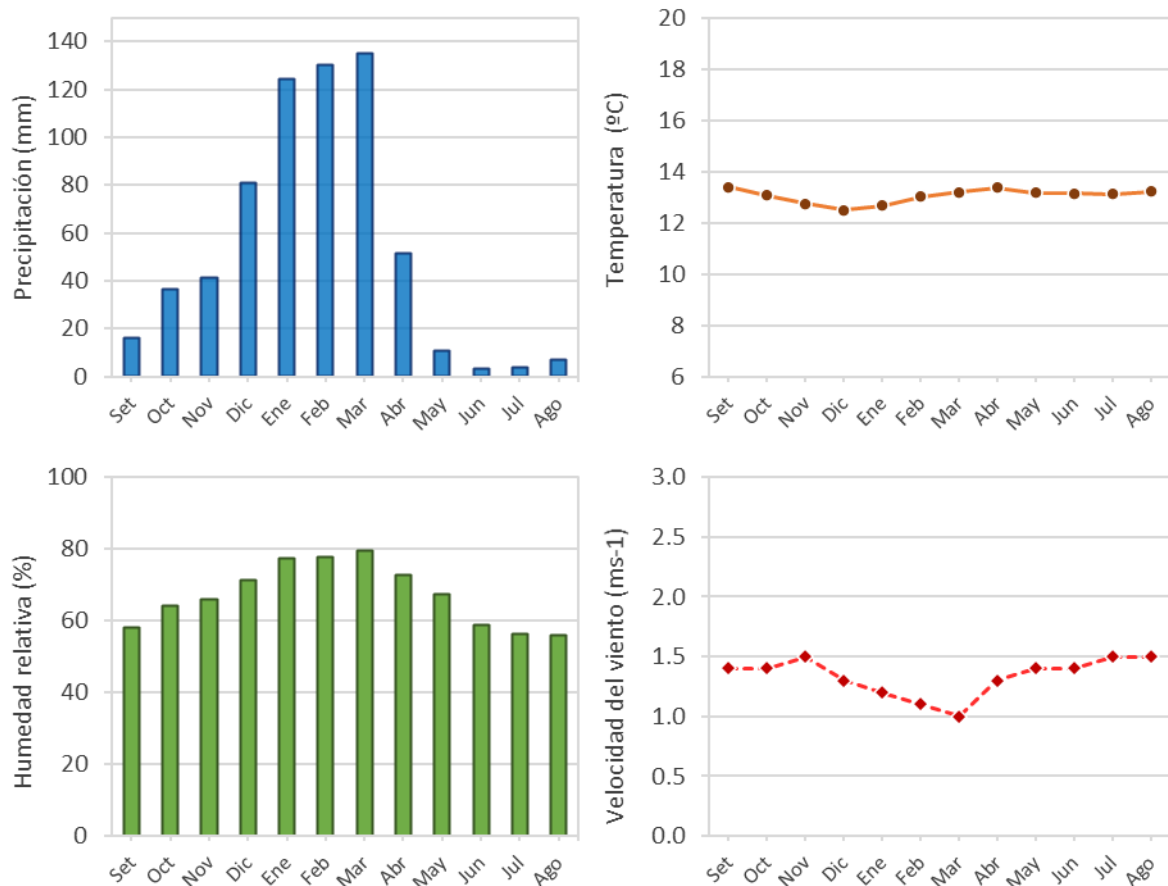


Figura 7: Precipitación (a), temperatura (b), humedad relativa (c) y velocidad del viento (d) promedio en la cuenca alta Cañete

FUENTE: Elaborado con información del SENAMHI.

Esquematación del sistema. Consistió en identificar la infraestructura hidráulica principal de la cuenca para su representación en WEAP. En la parte baja, existen cuatro estructuras de captación (Nuevo Imperial, La Pinta, La Fortaleza, Palo Herbay), una toma directa (Pachacamilla Vieja) y cinco canales de derivación, que abastecen a 34 bloques de riego, una central hidroeléctrica y una entidad prestadora de servicios de agua y saneamiento. En la cuenca media y alta existe un total de 48 bloques de riego, cada uno de los cuales cuenta con un sistema hidráulico propio; asimismo, existen infraestructuras de uso energético (C.H. El Platanal y Llapay) y pecuario que captan, almacenan y restituyen volúmenes de agua. La infraestructura de almacenamiento más importante es el embalse de la laguna Paucarcocha. En la Figura 8 se muestra el esquema general de la cuenca Cañete.

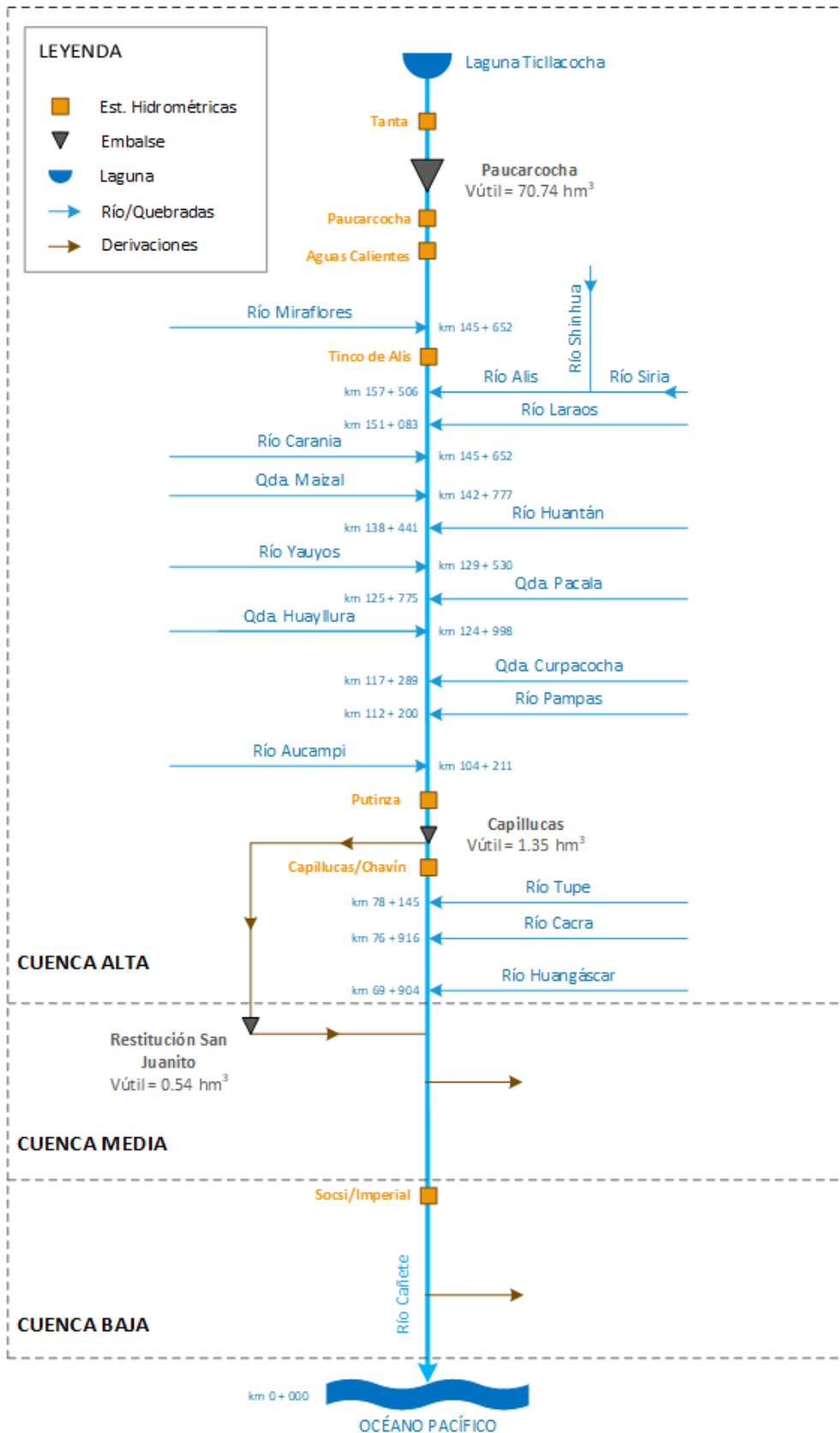


Figura 8: Esquema hidráulico del SRH de la cuenca Cañete

FUENTE: Adaptación basada en ANA (2019) y ALA MOC (2019). Derivaciones en la zona alta no mostrada.

Demandas de agua. En esta etapa se sistematizaron las demandas en base a los volúmenes asignados, a usos agrarios; y otorgados, a usos no agrarios (INRENA, 2004; 2006; ANA, 2019). Las asignaciones y otorgamientos de derechos de uso de agua se han realizado, básicamente, con fuentes de agua superficial, por lo que no se han considerado demandas con fuentes de agua subterránea o filtraciones (permisos de uso). Se identificaron 82 sitios de demandas de uso agrícola; tres de uso energético; dos de uso poblacional; y uno de uso acuícola. Las demandas agrícolas ascienden a 484,844 hm³, las de uso energético a 1330,918 hm³, mientras que las de uso poblacional a 5,329 hm³. En la Tabla 7 se muestran las demandas mensuales por sectores.

Tabla 7: Demanda hídrica superficial en la cuenca Cañete (hm³)

Tipo de uso	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
CUENCA BAJA												
Poblacional	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Agrícola	20,7	19,6	24,7	27,2	37,2	44,1	44,8	49,5	37,0	22,0	23,0	22,7
Industrial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mínero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Energético	12,7	10,3	9,6	12,0	20,1	20,1	18,1	20,1	19,4	20,1	19,3	15,2
Otros usos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CUENCA MEDIA												
Poblacional	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Agrícola	5,1	4,4	4,1	4,6	5,1	5,4	4,9	3,5	3,2	2,9	2,6	2,4
Industrial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mínero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Energético	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Otros usos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CUENCA ALTA												
Poblacional	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agrícola	4,6	8,7	6,6	8,1	7,4	4,7	2,3	2,5	4,3	5,3	4,8	4,7
Industrial	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mínero	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Energético	24,2	23,6	27,6	47,1	94,7	179,8	196,0	218,1	170,2	79,1	42,7	30,6
Otros usos	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

FUENTE: ALA MOC (2019), INRENA (2004, 2006). Otros usos: acuícola, recreativo y pecuario.

Es importante mencionar que parte de los volúmenes otorgados a la C.H. El Platanal (850 hm³ en total) son almacenados en el embalse Paucarcocha con el propósito de satisfacer las demandas del proyecto hidroenergético durante el estiaje. Para simular el embalse Paucarcocha en WEAP se consideró el promedio de los volúmenes captados en la C.H. El Platanal como demandas. Los volúmenes captados promedios mensuales fueron estimados en base a los registros del monitoreo que realiza la compañía CELPESA (2014/15-2018/19), ver Figura 9.

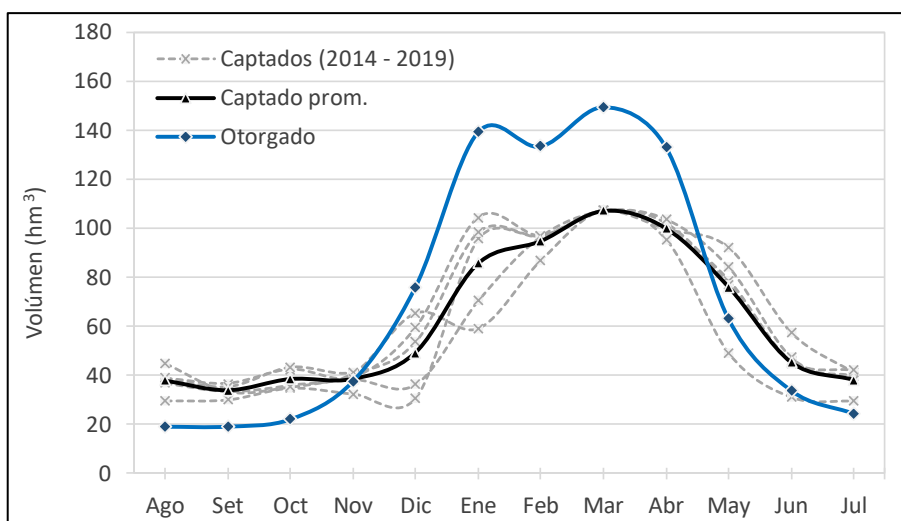


Figura 9: Demandas de la C.H. El Platanal, volúmenes otorgados y captados

FUENTE: Elaborado con información de CELEPSA (2018).

Caudal ecológico. Actualmente se han establecido caudales ecológicos de un m^3s^{-1} en dos tramos del río Cañete. El primero, se encuentra ubicado entre la captación y la restitución de la C.H. El Platanal (Resolución Directoral N° 169, 2011), y el segundo, a la altura de la C.H. Nuevo Imperial en la cuenca baja (Resolución Directoral N° 226, 2013).

Para el balance hídrico debe considerarse, además de los mencionados, un caudal ecológico en el tramo final del río Cañete, luego de las captaciones. Estudios previos (ANA, 2019) han propuesto caudales entre dos y cinco m^3s^{-1} para la época de estiaje en base a métodos hidrológicos y criterios de satisfacción, es decir, considerando los excedentes luego de atender las demandas. El establecimiento de un valor exacto debe realizarse siguiendo la normatividad vigente (Resolución Jefatural N° 267, 2019), la cual recomienda desarrollar métodos holísticos y de simulación del habitat. En la presente investigación se asumió un caudal ecológico de tres m^3s^{-1} para los distintos análisis; además, como parte de los objetivos se incluyó un análisis de sensibilidad considerando distintos valores de caudal entre cero y $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Definición de prioridades. Las prioridades se encuentran en función del tipo de uso (Ley de Recursos Hídricos) y la zona de asignación, es decir, cuenca baja, media o alta (INRENA 2004, 2006). En la Tabla 8 se muestra el orden de las prioridades, las cuales varían de 1 a 13, siendo uno la más alta y 13 la más baja. Según esta configuración, en una determinada zona (cuenca alta, media o baja) se atenderá primero el uso poblacional seguido del caudal

ecológico y los usos productivos, luego, el caudal restante pasará a la siguiente zona aguas abajo, donde se repetirá el orden mencionado en la distribución.

Tabla 8: Prioridades para el suministro de agua en el modelo

Uso	Zona alta		Zona media	Zona baja
	Subcuencas	Intercuenca		
Poblacional	1	4	8	11
Caudal ecológico	2	5	9	12
Usos productivos	3	6	10	13
Embalse Paucarcocha*	-	7	-	-

(*) El embalse opera en función de las demandas de mayor prioridad (< 7).

Caracterización del embalse Paucarcocha. El embalse Paucarcocha se encuentra ubicado en la parte alta (4200 m s.n.m.) cuenta con un área receptora de 290 km². Históricamente sus operaciones han producido un aumento de 5 m³s⁻¹ (12,96 hm³) en las descargas del río Cañete durante los meses de menor caudal (agosto y setiembre) tal como se aprecia en el gráfico de alteración hidrológica mostrada en la Figura 10.

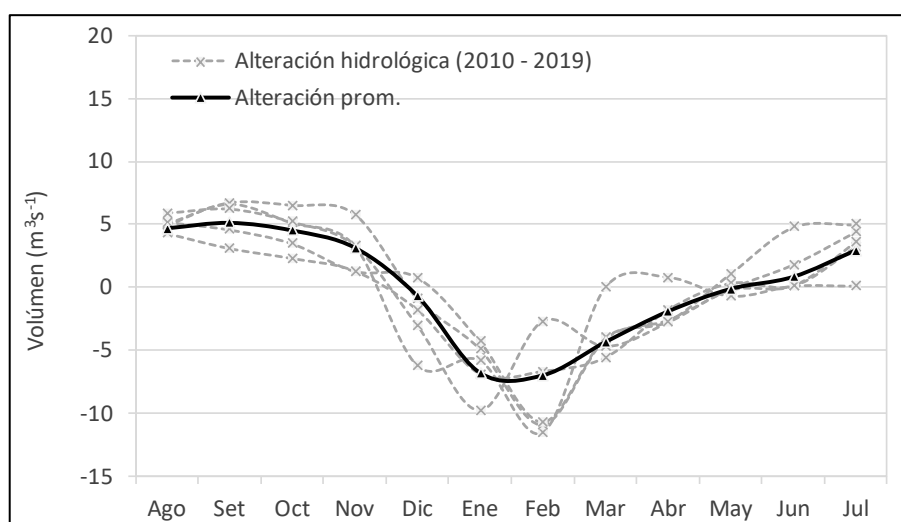


Figura 10: Alteración hidrológica del río Cañete por las operaciones del embalse Paucarcocha

Nota. Elaboración propia en base a las descargas registradas por CELEPSA antes y después del embalse.

El embalse tiene una capacidad total de 128,89 hm³, un volumen útil de 70 hm³ y un volumen inactivo de 38,77. Para la simulación se consideró, adicionalmente, una zona de amortiguamiento de 30 por ciento del volumen útil y un coeficiente de descarga de 0.5 en

dicha zona con el fin de evitar cambios bruscos en los niveles de almacenamiento. Las pérdidas netas por laminación se determinaron en base a los datos de evaporación y precipitación de las estaciones meteorológicas Paucarcocha (CELEPSA) y Tanta (SENAMHI), periodo 2013-2016. La regla de operación del embalse y la curva altura-volumen fueron especificadas de acuerdo al Plan de Manejo Ambiental del Embalse de la Laguna Paucarcocha (Oficio N° 3411, 2008), ver Tabla 9 y Figura 11.

Tabla 9: Reglas de operación del embalse Paucarcocha

Característica	Valor	Unidad
Capacidad total del embalse	125,89	hm ³
Parte superior de conservación (NAMO)	109,5	hm ³
Parte superior del volumen inactivo (NAMINO)	38,77	hm ³
Parte superior de amortiguamiento	60	hm ³
Coefficiente de amortiguamiento	0.5	-
Caudal máximo de descarga controlada	31,69	m ³ /s

FUENTE: CELEPSA (2018).

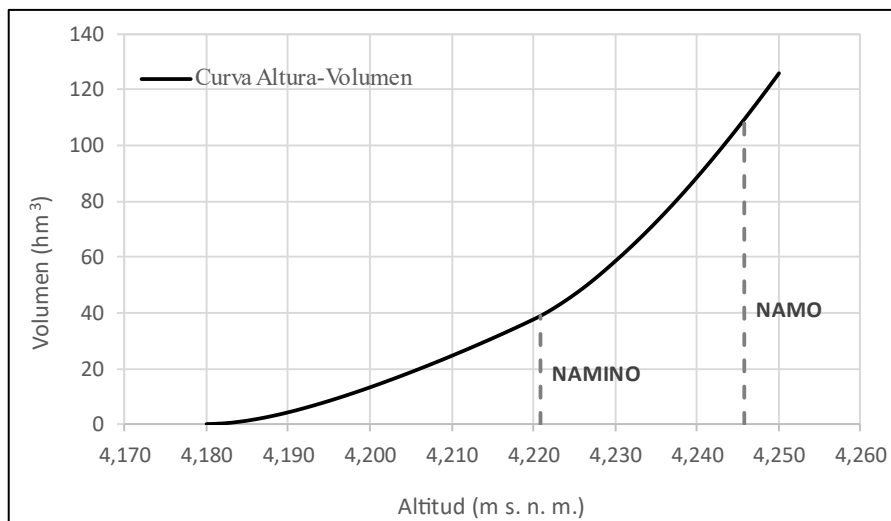


Figura 11: Curva Altura vs. volumen del embalse Paucarcocha

FUENTE: Adaptado de CELEPSA (2018).

b. Calibración y validación del modelo hidrológico

Indicadores de rendimiento. Los indicadores utilizados para evaluar el desempeño del modelo hidrológico fueron, el coeficiente de Nash, el coeficiente de Nash para valores logarítmicos (Nash-ln) y el sesgo volumétrico relativo (RVB). El coeficiente de Nash es utilizado para evaluar el poder predictivo del modelo; el coeficiente de Nash-ln, para evaluar

la eficiencia del modelo para valores bajos; y el RVB, para medir el error relativo. En la Tabla 10 se muestra la definición de cada uno de los indicadores.

Tabla 10: Indicadores de rendimiento del modelo hidrológico

Indicador	Rango	Valor óptimo
$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2}$	$0 \leq Nash \leq 1$	1
$Nash - ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{obs,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{obs,t}) - \ln(\bar{Q}_{obs}))^2}$	$0 \leq Nash - ln \leq 1$	1
$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{obs,t})}$	$-\infty \leq RVB \leq +\infty$	0

Nota: Caudales observados (Q_{obs}), simulados (Q_{sim}), promedio observado (\bar{Q}_{obs}), y promedio simulado (\bar{Q}_{sim}).

Estrategia de calibración y validación. Como primer paso se establecieron rangos generales y valores preliminares para toda la cuenca, como se muestra en la Tabla 11. Posteriormente, los parámetros de suelo SWC, DWC, RZC, DC y PDF, fueron calibrados para cada región homogénea (Figura 12), las regiones homogéneas fueron identificadas en base a las unidades geológicas dominantes. Los parámetros kc y RRF fueron ajustados considerando el tipo de cobertura vegetal y la época del año (húmeda/seca). El coeficiente de cultivo (kc) varía a lo largo del año dependiendo del estado de su ciclo vegetativo y las condiciones climáticas; asimismo. La resistencia al flujo (RRF) varía estacionalmente, presentando valores menores durante la época húmeda, como consecuencia de la saturación, y valores mayores durante la época seca.

Tabla 11: Parámetros del modelo hidrológico (*Soil Moisture Accounting Model*)

Parámetro	Unid.	Rango inicial	Observación
Coficiente vegetativo (kc)	–	0-1	Variable según cobertura y época
Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (SWC)	mm	150-400	Variable según región
Capacidad de almacenamiento en la zona profunda (DWC)	mm	500-900	Variable según región
Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)	–	0,2-3	Variable según cobertura y época
Conductividad de zona de raíces (RZC)	mm	100-300	Variable según región
Conductividad de zona profunda (DC)	mm	1-50	Variable según región
Dirección preferencial de flujo (PDF)	–	0-1	Variable según región
Almacenamiento inicial en la zona de raíces (z1)	%	10-50	Variable según región
Almacenamiento inicial en la zona de profunda (z2)	%	10-50	Variable según región

El proceso de calibración se efectuó de aguas arriba hacia aguas abajo, ajustando sets de parámetros en cada región, mediante el análisis de indicadores de rendimiento (Nash, Nash-In y RVB) e hidrogramas (observado vs. simulado) en el punto de aforo de la estación hidrométrica localizada inmediatamente aguas abajo de la región a calibrar. Las regiones calibradas fueron “cerradas” para las subsecuentes calibraciones aguas abajo. Los métodos de calibración fueron tanto manual como automática, en este último caso con apoyo del software PEST (*Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis*) incluido en WEAP.

Las estaciones hidrométricas utilizadas para la calibración fueron: Aguas Calientes (1986-1997), Chavín (1986-1997), Socsi (1978-1991) y Tinco de Alis (1990-1997); y las utilizadas para la validación: Putinza (2014-2019) y Socsi (1964-1977, 1992-2005, 2006-2019). En la Figura 12 se puede observar la ubicación de dichas estaciones.

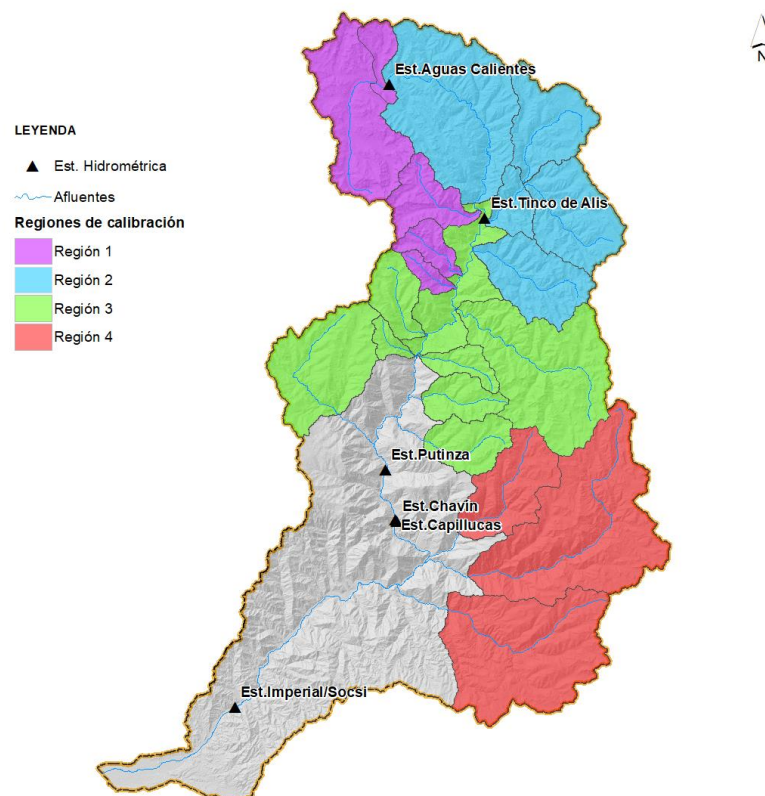


Figura 12: Regiones para la calibración del modelo hidrológico

3.3.2. Selección de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (CRV)

a. Descripción y validación del modelo estocástico MulGETS

Para el computo de indicadores de CRV se emplearon series hidrológicas sintéticas mediante el uso del modelo MulGETS. MulGETS (*Multi-site weather Generator of École de Technologie Supérieure*) es un generador estocástico *multi-sitio* de series de precipitación y temperatura diaria, esto es, impulsa modelos locales e individuales (estación meteorológica) con números aleatorios independientes temporalmente, pero espacialmente correlacionados (red de estaciones).

El procedimiento detallado para la generación de precipitación (Chen *et al.*, 2014) es el siguiente. Sea n el número de estaciones pluviométricas y m la longitud de la serie diaria a generar. Si $[C]$ es la matriz de correlación de ocurrencias o cantidades de precipitación ($n \times n$), y cumple la condición de ser *definida positiva* y *simétrica*, se reescribe como $[C] = [P][P']$ mediante el método de descomposición de Cholesky, donde $[P]$ y $[P']$ son matrices triangulares superior e inferior, respectivamente. Luego, multiplicando $[P']$ por un campo de números aleatorios de distribución normal $[R]$ ($n \times m$) se obtiene un nuevo campo $[X]$ con la matriz de correlación deseada $[C]$. Los números aleatorios $[X]$ son posteriormente introducidos en generadores climáticos locales, que emplean cadenas de Márkov de primer orden, para la obtención de ocurrencias, y distribuciones multi-gamma (o multi-exponencial) condicionadas, para la obtención de cantidades.

El proceso descrito se realiza a intervalos mensuales para las ocurrencias y a intervalos estacionales para las cantidades de precipitación. En el ANEXO 3 se presenta los enlaces de las herramientas computacionales utilizadas para la aplicación de MulGETS.

Análisis estadístico. MulGETS fue calibrado empleando datos diarios de 13 estaciones pluviométricas localizadas en la cuenca Cañete y cuencas vecinas, periodo 1981-2016. El desempeño del modelo fue evaluado respecto a la preservación de la correlación espacial entre estaciones y las características estadísticas de la precipitación mensual y anual. Además, para la validación se consideró una serie extensa de precipitación de 1000 años, a fin minimizar el sesgo intrínseco del modelo estocástico.

b. Definición de indicadores e índices

La definición de indicadores de CRV se basa en la asunción de que un determinado sistema, en un tiempo dado t , puede encontrarse en un estado satisfactorio S o no satisfactorio NS . Los estados S ocurren cuando los suministros de agua son capaces de cubrir toda la demanda, por el contrario, los estados NS ocurren cuando existen déficits o fallas en el suministro. Al pasar de un tiempo t a $t+1$, el sistema puede permanecer en el mismo estado o migrar al otro estado. Las características principales de los periodos de déficits son, la duración $d(j)$, el volumen de déficits acumulado $v(j)$, y el déficit máximo $h_{max}(j)$, $j = 1, 2, 3, \dots, M$, donde M es el número de periodos de déficits. En la Figura 13 se ilustra estas características para un evento de falla.

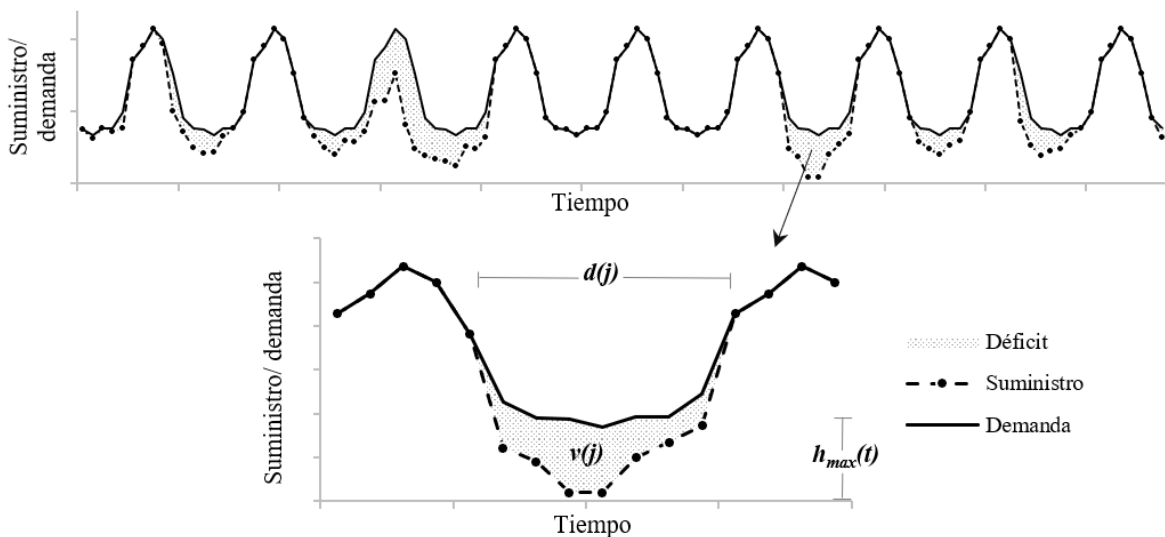


Figura 13: Características de un periodo de déficit

FUENTE: Adaptado de Kjeldsen & Rosbjerg (2004).

En la Tabla 12 se muestra la definición de los indicadores de CRV estudiados en la presente investigación. De acuerdo a estas definiciones, los indicadores de confiabilidad y resiliencia son adimensionales y varían de cero a uno, mientras que los indicadores de vulnerabilidad se expresan en unidades volumétricas. Con el propósito de obtener valores comparativos, los indicadores de vulnerabilidad fueron normalizados dividiendo cada valor entre el máximo del conjunto de escenarios evaluados (Roach *et al.* 2018).

Los códigos implementados para el computo de los indicadores de CRV se pueden encontrar en los enlaces del ANEXO 3.

Tabla 12: Definición de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad

Indicador	Formulación	Rango (optimo)	Descripción	Referencias
Confiabilidad en tiempo (C _t)	$1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T}$	[0 ; 1] (1)	Frecuencia de eventos satisfactorios.	Hashimoto <i>et al.</i> (1982)
Confiabilidad en volumen (C _v)	$1 - \frac{\sum_{j=1}^M v(j)}{\sum_{t=1}^T D(t)}$	[0 ; 1] (1)	Proporción del volumen atendido.	Hashimoto <i>et al.</i> (1982)
Resiliencia media (R _m)	$\left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1}$	[0 ; 1] (1)	Inversa de la duración media de los déficits.	Hashimoto <i>et al.</i> (1982)
Resiliencia máxima (R _{max})	$\left[\max_j \{d_j\} \right]^{-1}$	[0 ; 1] (1)	Inversa de la duración máxima de los déficits.	Moy <i>et al.</i> (1986)
Resiliencia cuantil 0.90 (R _{q90})	$\{F_d^{-1}(0.9)\}^{-1}$	[0 ; 1] (1)	Inversa de la duración cuantil 0.90 de los déficits.	Kjeldsen & Rosbjerg, 2004
Vulnerabilidad máxima (V _{hmax})	$\frac{\sum_j h_{max}(j)}{M}$	[0 ; +∞ > (0)	Media de los déficits máximos.	Hashimoto <i>et al.</i> (1982)
Vulnerabilidad media (V _m)	$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j$	[0 ; +∞ > (0)	Media de los déficits acumulados.	Kjeldsen & Rosbjerg (2004)
Vulnerabilidad máxima (V _{max})	$\max_j \{v_j\}$	[0 ; +∞ > (0)	Máximo de los déficits acumulados.	Kjeldsen & Rosbjerg (2004)
Vulnerabilidad cuantil 0.90 (V _{q90})	$F_v^{-1}(0.9)$	[0 ; +∞ > (0)	Cuantil 0.90 de los déficits acumulados.	Kjeldsen & Rosbjerg (2004)

Nota: Demanda (D), número total de intervalos de tiempo (T), número de periodos de déficits (M), duración (d), volumen de déficit (v), déficit máximo (hmax), función de distribución acumulada (F).

Índice de sostenibilidad. Con el objetivo de combinar los indicadores en un único valor de síntesis, Sandoval-Solis *et al.* (2011), en base a Loucks (1997), propusieron el índice de sostenibilidad (SI) como la media geométrica de los *N* criterios de desempeño. En términos de CRV el índice de sostenibilidad se determinó como:

$$SI = [C * R * (1 - V)]^{1/N} \quad (6)$$

La selección de estimadores de CRV se describe más adelante.

Indicadores e índices por grupos de usuarios. Para facilitar la comparación de resultados

entre los diferentes sectores y tener una cantidad manejable de indicadores/índices, los valores a nivel de sitios de demandas se ponderaron por grupos de usuarios (agrícola, energético, poblacional, etc.) en función a la demanda (Sandoval-Solis *et al.*, 2011). Para un grupo k con usuarios de agua de i al j -ésimo, el indicador/índice por grupos (IG) está definido como:

$$IG^k = \sum_{i=1 \in k}^{i=j \in k} \frac{DA^i}{DA^k} I^i; \quad DA^k = \sum_{i=1 \in k}^{i=j \in k} DA^i \quad (7)$$

Donde I^i es el indicador/índice del i -ésimo, y DA , la demanda anual de agua.

c. Análisis de la monotonía y sensibilidad

Para introducir el concepto de un estimador monótono (Kjeldsen & Rosbjerg, 2004), considérese un SRH con una relación del tipo demanda-oferta-rendimiento, donde el rendimiento es una medida de confiabilidad (en tiempo o volumen). Si la oferta aumenta (p. ej. aumento del volumen útil de un embalse) o la demanda disminuye, la confiabilidad del sistema se incrementará, por lo tanto, se dice que la confiabilidad es un estimador monótono respecto de la oferta y demanda.

El grado de monotonía y sensibilidad de los indicadores de resiliencia y vulnerabilidad del SRH de la cuenca Cañete se evaluó mediante el análisis de escenarios hipotéticos, esto es, introduciendo cambios porcentuales en el volumen útil del embalse Paucarcocha (70 hm³) y la demanda de la C.H. El Platanal (750 hm³). El procedimiento fue el siguiente:

- i. Establecimiento de nuevas condiciones de oferta y demanda, considerando cambios de 60, 80, 100 y 120 por ciento en volumen útil, y 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 por ciento en la demanda.
- ii. Simulación del modelo hidrológico (empleando datos observados de precipitación).
- iii. Determinación de los indicadores de CRV para la C.H. El Platanal.

El grado de monotonía de cada indicador fue analizado a través de gráficos de curvas en función de la demanda para cada volumen útil. Se consideraron indicadores adecuados aquellos que presentaban comportamientos monótonos claros con sensibilidad moderada, sin cambios bruscos ni muy robustos.

d. Análisis de la superposición entre indicadores

La superposición, o dependencia, entre diferentes indicadores puede conducir a una clasificación errónea de los escenarios considerados en la planificación. Para ilustrar el efecto de la superposición, considérese dos opciones de políticas cada una de las cuales depende de dos criterios, a y b . Asumiendo que la clasificación final de las opciones de políticas está basada en el producto de ambos criterios. Si a y b están significativamente correlacionados, luego b puede expresarse como una función lineal de a como $b = \alpha a + \beta$, donde α y β son constantes. El producto de a y b esta dado como $ab = a(\alpha a + \beta) = \alpha a^2 + \beta a$, por lo tanto, la clasificación de las opciones de políticas únicamente están basadas en el valor de a (o b).

En el presente estudio, la superposición entre indicadores de CRV fue investigada mediante la generación de múltiples series sintéticas de precipitación y descargas, estimando la CRV para cada serie y luego cuantificando el grado de superposición en términos de coeficientes de correlación entre series de muestras de indicadores. La metodología fue la siguiente:

- i. Calibración y validación del modelo estocástico de precipitación MulGETS .
- ii. Generación sintética de una serie temporal de precipitación de longitud igual al periodo de datos observados (55 años).
- iii. Simulación del modelo hidrológico.
- iv. Estimación de los indicadores de CRV para la C.H. El Platanal.
- v. Repetición de los pasos i-iv un total de 100 veces.
- vi. Determinación del coeficiente de correlación entre todos los pares de indicadores utilizando las 100 estimaciones obtenidas de cada uno.

La investigación se llevó a cabo para tres condiciones de demanda, de 60, 80 y 100 por ciento, el volumen útil se mantuvo en su estado actual (100 por ciento). Se exploraron las posibles combinaciones de indicadores de acuerdo al menor grado de dependencia, es decir, menor correlación. Cuanto mayor es el valor del coeficiente correlación, mayor es la superposición, lo que reduce la cantidad de información obtenida en comparación con el uso de dos criterios independientes.

e. Longitud de datos requerida

Es probable que el uso de series de longitud histórica (55 años en este caso) conduzca a

estimaciones no monótonas por el limitado número de eventos de falla y la alta variabilidad de series hidrológicas cortas. Para mejorar las estimaciones de CRV se utilizó un modelo estocástico con el objetivo de generar series sintéticas extensas y obtener un mayor número de eventos de falla. El procedimiento utilizado para determinar la longitud de datos requerida fue la siguiente:

- i. Calibración y validación del modelo estocástico de precipitación.
- ii. Generación de una serie sintética de precipitación de 10000 años.
- iii. Simulación del modelo hidrológico.
- iv. Estimación de los indicadores de CRV para la C.H. El Platanal en base a un periodo de T años, que cubre los primeros 10, 20, 30,..., 10000 años de la serie generada.

Este procedimiento se llevó a cabo para dos escenarios de demanda, de 80 y 100 por ciento; el volumen útil se mantuvo en su estado actual (100 por ciento). Se asumió que se alcanzaría la longitud requerida de la serie cuando a una mayor extensión de esta no cambiara significativamente las estimaciones de CRV.

3.3.3. Evaluación de los niveles de CRV del Sistema

Seleccionados los indicadores de CRV (e identificada la longitud de datos requerida para la obtención de indicadores estables) se procedió a evaluar el desempeño del sistema de la siguiente forma.

a. Determinación de los cambios en la CRV del Sistema por las operaciones del embalse Paucarcocha

Consistió en aplicar directamente los indicadores de CRV y el Índice de Sostenibilidad en el Sistema con y sin embalse para analizar qué impacto tuvo su implementación en la satisfacción de las demandas.

b. Comportamiento de la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha

Consistió en aplicar variaciones porcentuales a la demanda agrícola del valle y los planes de operación del embalse Paucarcocha (demanda de la C.H. El Platanal) para describir el comportamiento de la CRV.

c. Rangos aceptables de caudal ecológico en el tramo final del río Cañete

Consistió en simular el sistema para un amplio rango de caudales ecológicos (cero a $10 \text{ m}^3/\text{s}$) con el propósito de describir como influyen dichos valores y cuales podrían ser recomendados para mantener niveles aceptables de CRV.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA CAÑETE

4.1.1. Calibración y validación del modelo hidrológico

En la Tabla 13 se muestran los indicadores de desempeño obtenidos en la calibración y validación del modelo hidrológico. Las calibraciones en las estaciones Aguas Calientes y Tinco de Alis son representativas del buen desempeño del modelo en la parte alta de la cuenca donde se obtienen índices de Nash de 0,82 y 0,87; respectivamente, lo cual indica que el poder predictivo del modelo es alto ($Nash > 0,8$), asimismo, no se observan sesgos importantes en la simulación del flujo base ($Nash-In > 0,9$) ni errores volumétricos significativos ($|RVB| < 0,2$). De la misma forma, el resultado de la calibración en Chavín y Socsi nos indica que el modelo logra simular las descargas de la parte media-alta de la cuenca satisfactoriamente, pues los índices de Nash y Nash-In son mayores a 0,85.

Tabla 13: Resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico

Estación	Periodo	Promedio (m^3s^{-1})		Nash	Nash-In	RVB
		Observado	Simulado			
Calibración						
Aguas Calientes	1986 – 1997	5,77	5,25	0,82	0,91	-0,09
Chavín	1986 – 1997	34,59	32,43	0,92	0,97	-0,06
Socsi	1978 – 1991	50,10	42,47	0,85	0,96	-0,19
Tinco de Alis	1990 – 1997	11,32	11,52	0,87	0,91	0,06
Validación						
Putinza	2014 – 2019	42,47	38,45	0,95	0,98	-0,09
Socsi	1964 – 1977	49,27	40,92	0,87	0,96	-0,14
Socsi	1992 – 2005	53,77	42,95	0,84	0,97	-0,23
Socsi	2006 – 2019	49,59	50,47	0,94	0,97	0,02

Es posible que los altos índices de Nash y Nash-In de algunas estaciones (Aguas Calientes, Chavín y Tinco de Alis) se encuentren sobrestimados por el corto periodo de registros. Sin embargo, a través de la validación se puede corroborar que dichas estaciones contribuyen en

la estimación de parámetros, ya que los índices de Nash y Nash-In también alcanzan valores altos.

Las Figuras 14 y 15 muestran los hidrogramas y gráficos de regresión lineal (observado vs. simulado) de las calibraciones y validaciones, respectivamente. En general, se observa que el modelo tiende a subestimar las descargas durante los meses de avenidas (enero-marzo) y a sobreestimarlas, ligeramente, durante los meses de estiaje (mayo-agosto), aun así, logra simular la presencia de años húmedos, medios y secos satisfactoriamente. Los gráficos de regresión lineal muestran una alta correspondencia entre valores observados y simulados, pues la dispersión tiende a ser simétrica y a concentrarse a lo largo del modelo lineal. En términos matemáticos, el coeficiente de las ecuaciones es aproximadamente uno y el estadístico R^2 mayor 0.8.

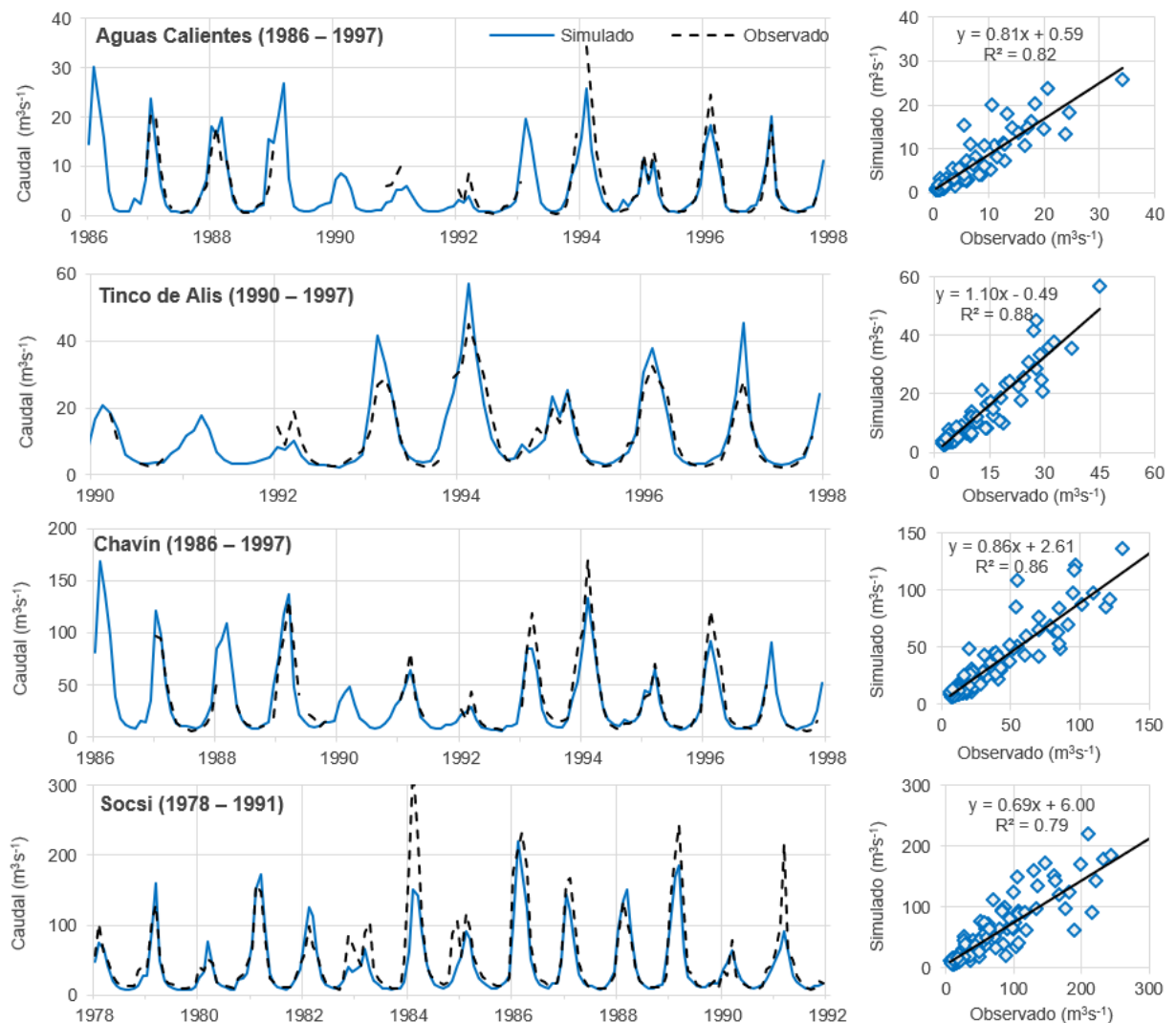


Figura 14: Hidrogramas de calibración y gráficos de regresión lineal entre caudales observados y simulados

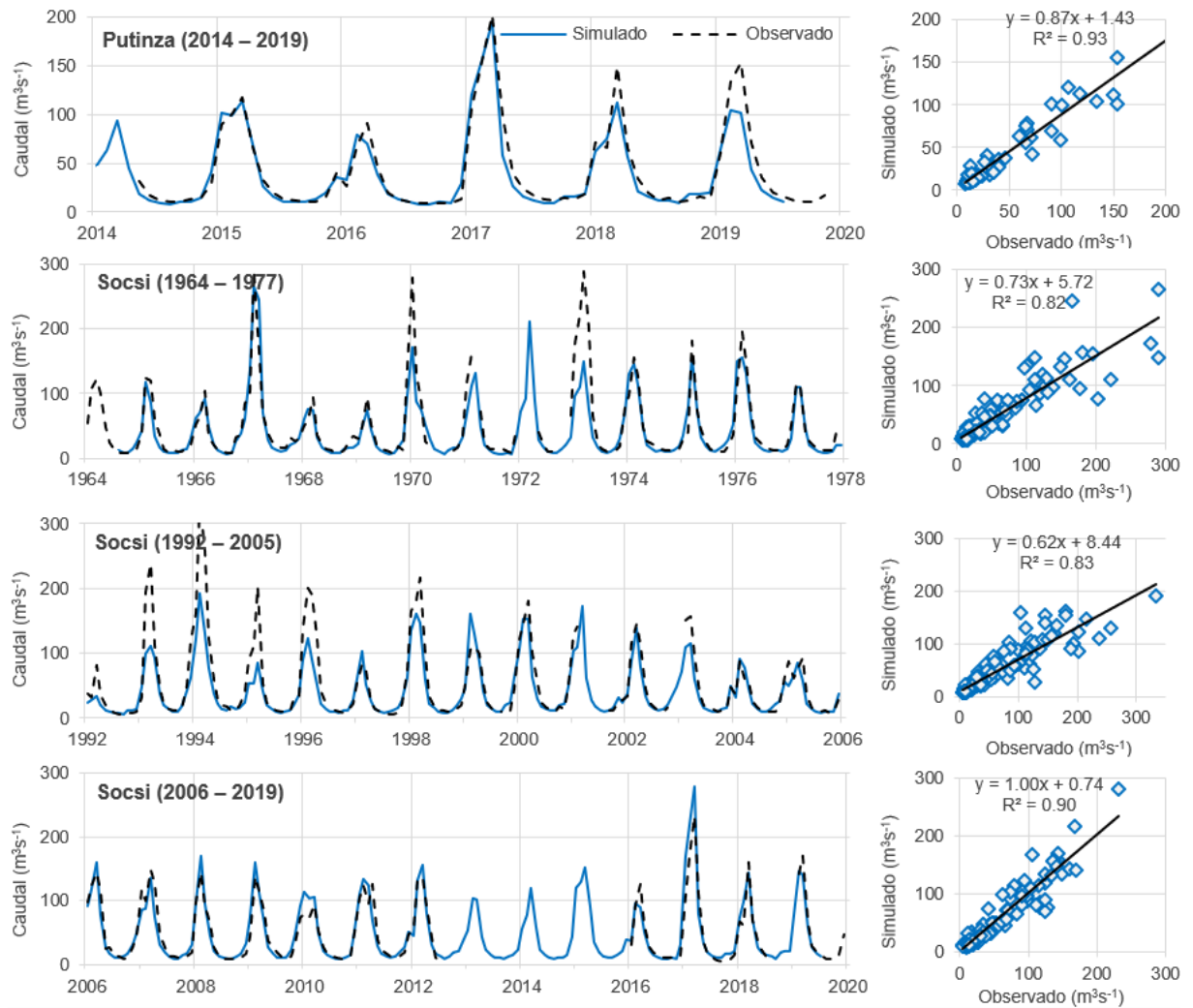


Figura 15: Hidrogramas de validación y gráficos de regresión lineal entre caudales observados y simulados

4.2. SELECCIÓN DE INDICADORES DE CONFIABILIDAD, RESILIENCIA Y VULNERABILIDAD (CRV)

4.2.1. Validación del modelo estocástico MulGETS

Las Figuras 16 y 17 presentan los coeficientes de correlación de ocurrencias y cantidades de precipitación observadas vs. generadas, entre todos los pares de estaciones. La dispersión cercana a la línea 1:1 indica que las correlaciones generadas son casi idénticas a sus contrapartes observadas. Aunque se pueden observar sesgos en algunos meses o estaciones del año, no son significativos, puesto que se trata de periodos con escasa precipitación.

En las Figuras 18 y 19 se compara la precipitación promedio mensual observada con la distribución de la precipitación generada (diagrama de cajas) en cada una de las 13 estaciones. En general, se observa que la distribución de los datos generados se encuentra centrada en la media de los datos observados, y que el modelo logra reproducir satisfactoriamente la estacionalidad. Asimismo, las precipitaciones anuales observadas y generadas, mostradas en la Tabla 14 sugieren que no existe un sesgo significativo en la media y desviación estándar, pues solo se tiene un error promedio de -7.8 y 58.3 mm año^{-1} para estas estadísticas, respectivamente.

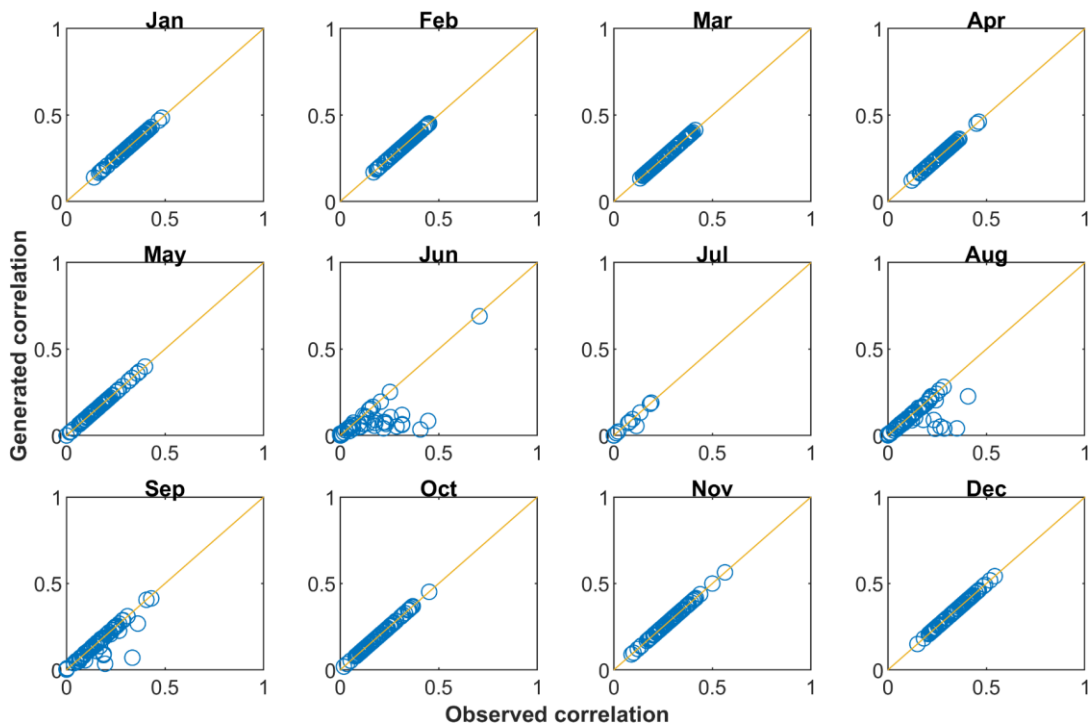


Figura 16: Correlación de ocurrencias de precipitación observada entre todos los pares de estaciones vs. correlaciones generadas por MulGETS

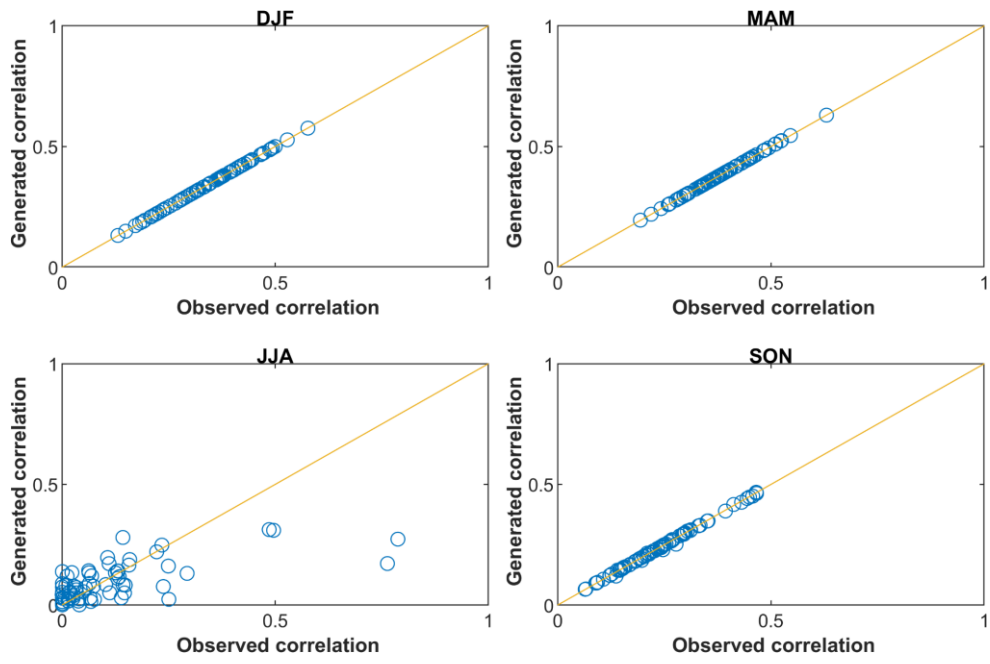


Figura 17: Correlación de cantidades de precipitación observada entre todos los pares de estaciones vs. correlaciones generadas por MulGETS

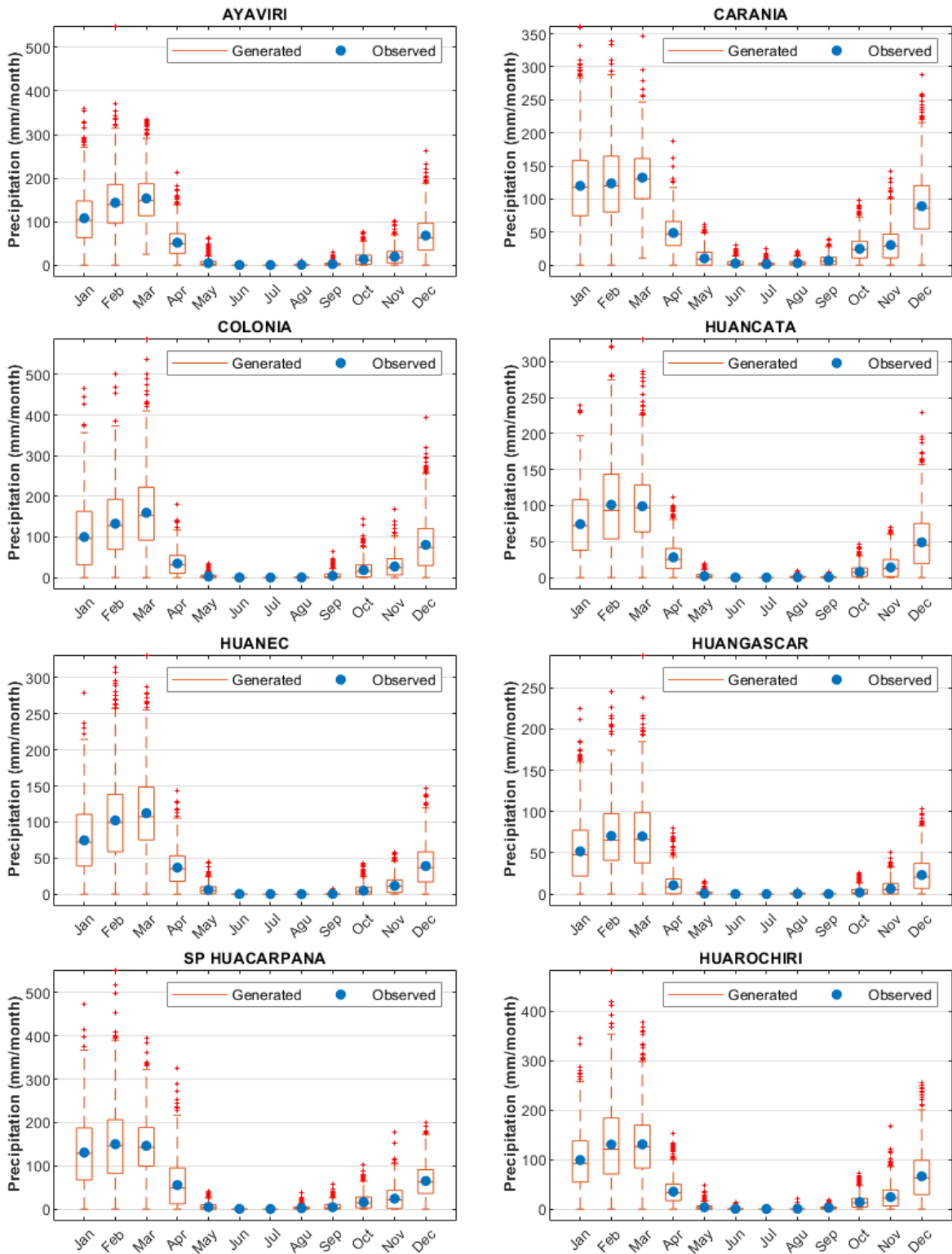


Figura 18: Comparación entre la precipitación mensual observada (promedio) y generada (diagrama de caja), estaciones Ayaviri-Huarochiri

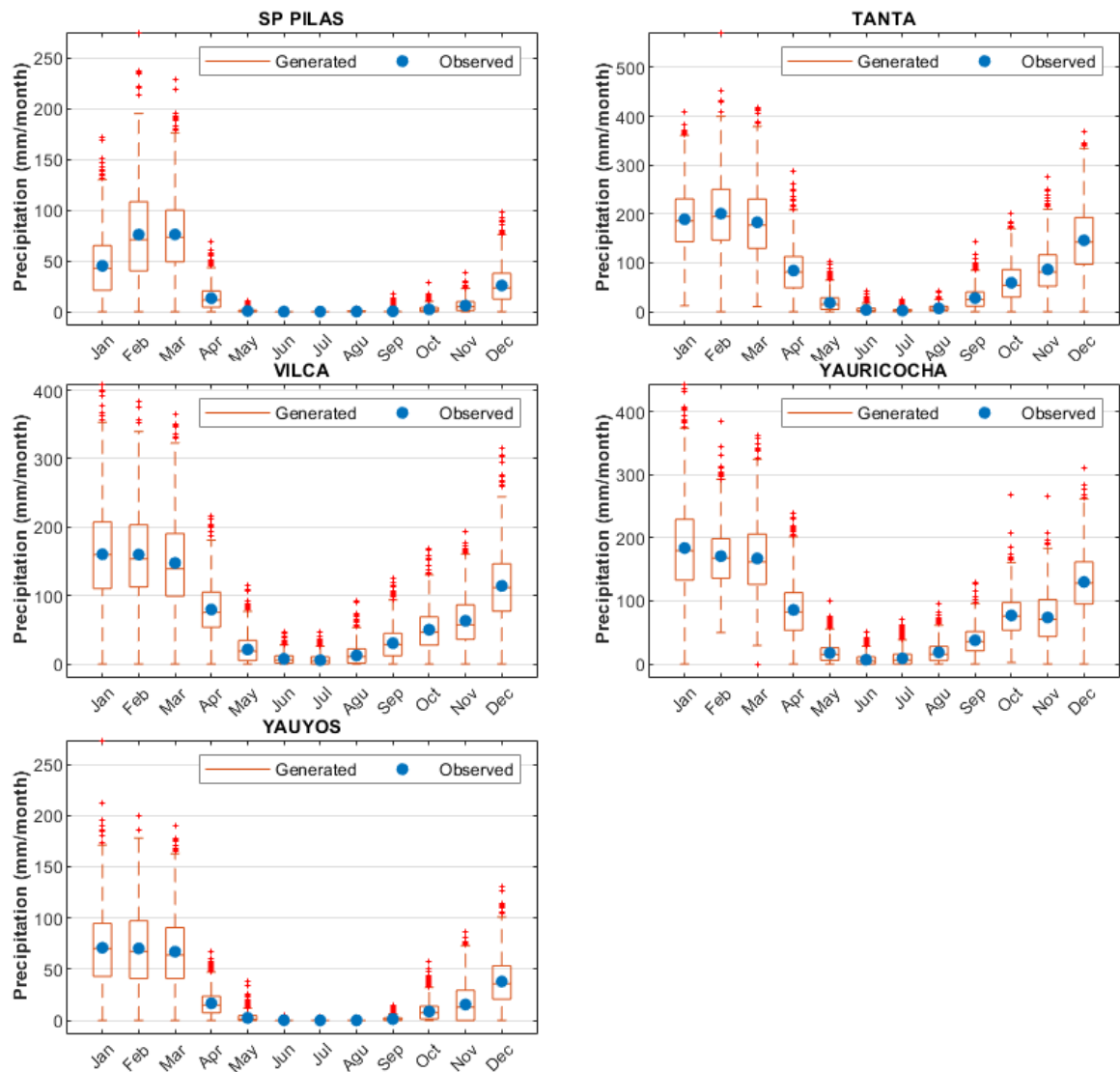


Figura 19: Comparación entre la precipitación mensual observada (promedio) y generada (diagrama de caja), estaciones SP Pilas-Yauyos

Tabla 14: Media y desviación estándar de las precipitaciones anuales observadas y generadas

Estaciones	Media (mm año ⁻¹)		Desv. est. (mm año ⁻¹)	
	Observado	Generado	Observado	Generado
Ayaviri	563,6	569,3	159,9	123,5
Carania	592,5	600,0	178,5	118,8
Colonia	559,8	579,4	243,7	180,5
Huancata	376,8	384,2	132,1	103,7
Huanec	387,2	393,8	165,0	107,8
Huangascar	235,2	244,0	116,8	80,3
Huarochiri	507,1	513,6	209,4	142,9
SP Huacarpana	597,8	615,3	231,3	155,7
SP Pilas	245,7	248,8	93,1	71,6
Tanta	1007,1	1011,0	270,1	158,0
Vilca	851,8	857,3	249,6	142,3
Yauricocha	977,3	981,2	208,9	138,8
Yauyos	290,9	295,7	96,9	73,1

4.2.2. Análisis de la monotonía y sensibilidad

Las Figuras 20(a) y (b) muestran que las confiabilidades en tiempo (C_t) y volumen (C_v) disminuyen monótonamente con el incremento de la demanda y que los valores son mayores mientras mayor sea el volumen útil; sin embargo, C_v muestra ser mucho menos sensible, pues solo varía entre 0,9 y uno.

Los indicadores de resiliencia R_m , R_{max} y R_{q90} (Figuras 20 (c), (d) y (e)) disminuyen conforme aumenta la demanda, pero tienden a ser insensibles para valores altos de demanda (> 70 por ciento); asimismo, no se observa un comportamiento monótono claro en función del volumen útil. R_{max} es posiblemente el mejor indicador de resiliencia en cuanto a monotonía y sensibilidad. Por otro lado, los indicadores de vulnerabilidad V_{hmax} , V_m , V_{max} y V_{q90} (Figuras 20(f), (g), (h) e (i)) exhiben un comportamiento monótono creciente como función de la demanda con igual grado de sensibilidad y, al igual que en el caso de la resiliencia, no se observan un comportamiento monótono claro respecto del volumen útil con excepción de V_{max} .

La ausencia de un comportamiento monótono claro en los indicadores de resiliencia y vulnerabilidad respecto del volumen útil puede deberse a dos factores. Primero, el porcentaje del volumen útil del embalse (70 hm^3) respecto de la descarga media anual del río Cañete (1563.2 hm^3) (ANA, 2019) es apenas 4,5 por ciento, mientras que el porcentaje que representa la demanda de la C.H. El Platanal (750 hm^3) es 48 por ciento; por tanto, el impacto de este último será mucho mayor. Segundo, los indicadores han sido obtenidos a partir de series de longitud histórica (55 años), las cuales suelen tener varianzas muestrales muy grandes e insuficientes eventos de fallas, lo que no permite obtener estimaciones robustas. En este sentido, lo adecuado es utilizar series estocásticas extensas, la longitud mínima requerida se discute más adelante.

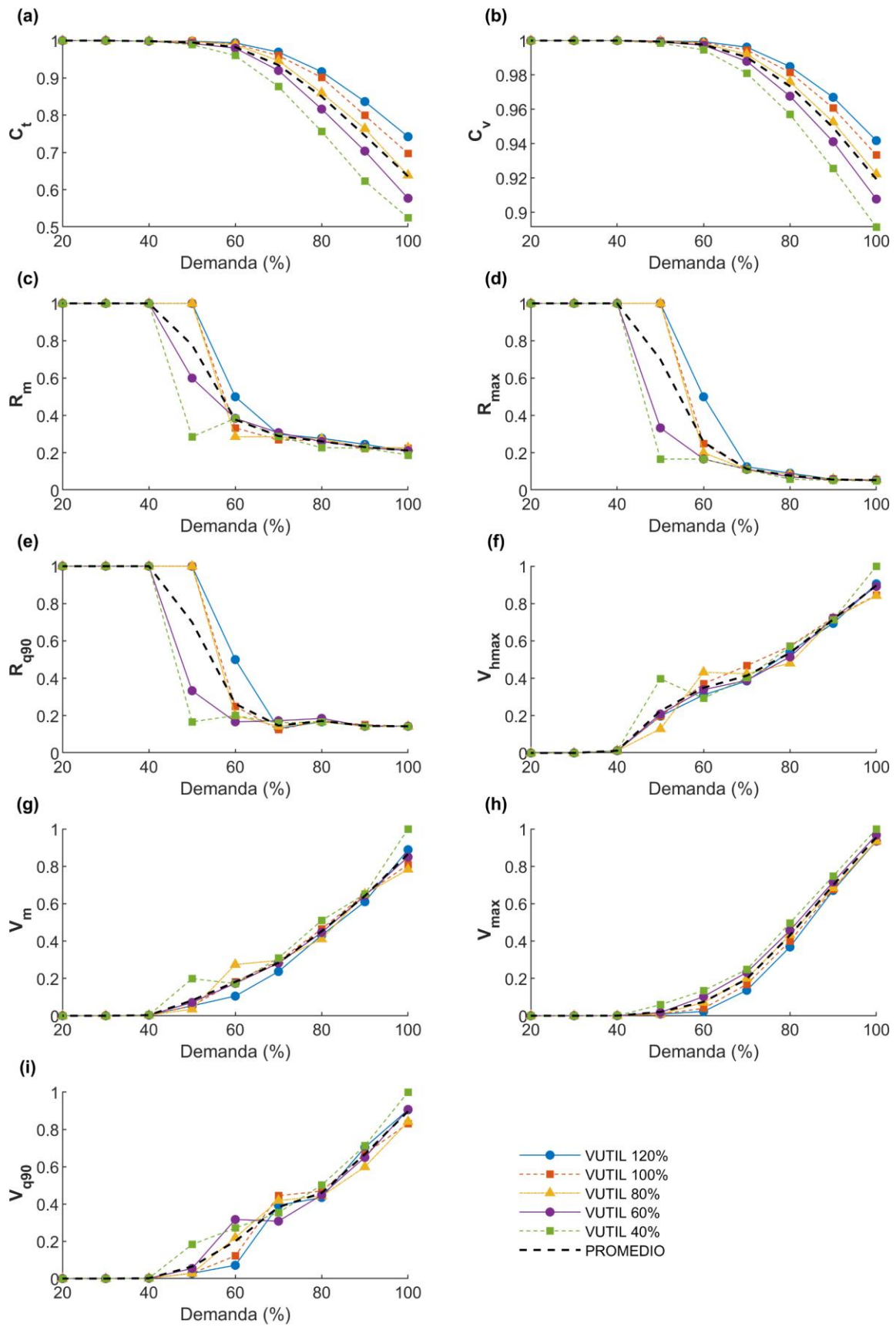


Figura 20: Comportamiento de los indicadores de CRV en la C.H. El Platanal en función de la demanda, para distintos valores de volumen útil del embalse Pucarcocha

4.2.3. Análisis de la superposición entre indicadores

La Figura 21 muestra la matriz de correlación entre los nueve indicadores de CRV para demandas de 60, 80 y 100 por ciento en la C.H. El Platanal. La interpretación de los resultados se ha realizado para los siguientes casos: entre estimadores del mismo criterio, entre confiabilidad-resiliencia, confiabilidad-vulnerabilidad, y resiliencia-vulnerabilidad.

El coeficiente de correlación entre estimadores de confiabilidad se encuentran en el orden de 0,7 para todas las condiciones de demanda. Entre estimadores de resiliencia se observa una débil correlación (0,1 a 0,3) para la demanda de 100 por ciento, pero aumenta a medida que la demanda disminuye. Asimismo, entre estimadores de vulnerabilidad, se observa un amplio rango de correlación (0,3 a 0,7) para la demanda de 100 por ciento, pero también tiende a aumentar con la disminución de la demanda.

Las correlaciones confiabilidad-resiliencia son en su mayoría de moderadas a ligeramente fuertes (0,3 a 0,6), y no presentan una clara tendencia respecto de la demanda. La correlación positiva sugiere que los sistemas con mayor confiabilidad tienden a ser también más resilientes. Teniendo como objetivo capturar la mayor cantidad de información, el uso de indicadores de resiliencia basados en duraciones medias (R_m) no parece adecuada por su fuerte correlación con C_t y C_v , por el contrario, las bajas correlaciones entre indicadores basados en duraciones máximas (R_{max}) y cuantil 0,90 (R_{q90}) con C_t las coloca como potenciales candidatos.

La correlación confiabilidad-vulnerabilidad depende en gran medida del estimador utilizado para la confiabilidad, así, mientras que con C_t las correlaciones son débiles y moderadas (-0,1 a -0,5), con C_v las correlaciones son fuertes o muy fuertes (-0,5 a -0,8). La correlación negativa señala que los sistemas con mayor confiabilidad tienden a ser también menos vulnerables. Según los resultados, el uso de C_v no parece adecuado en combinación con los estimadores de vulnerabilidad; existe una estrecha relación entre la definición de C_v , que se basa en la proporción del volumen atendido, y las definiciones de vulnerabilidad, que se basan en el complemento, es decir, los déficits. Las combinaciones confiabilidad-vulnerabilidad más apropiadas serían: $C_t - V_{max}$, $C_t - V_{q90}$, o $C_t - V_{hmax}$.

Por último, se observa que las correlaciones resiliencia-vulnerabilidad pueden ser de débiles a fuertes; y tienden a ser mayores cuando se utilizan estimadores con las mismas estadísticas (media, cuantil 0,90 y máxima), indicando una mayor superposición en estos casos.

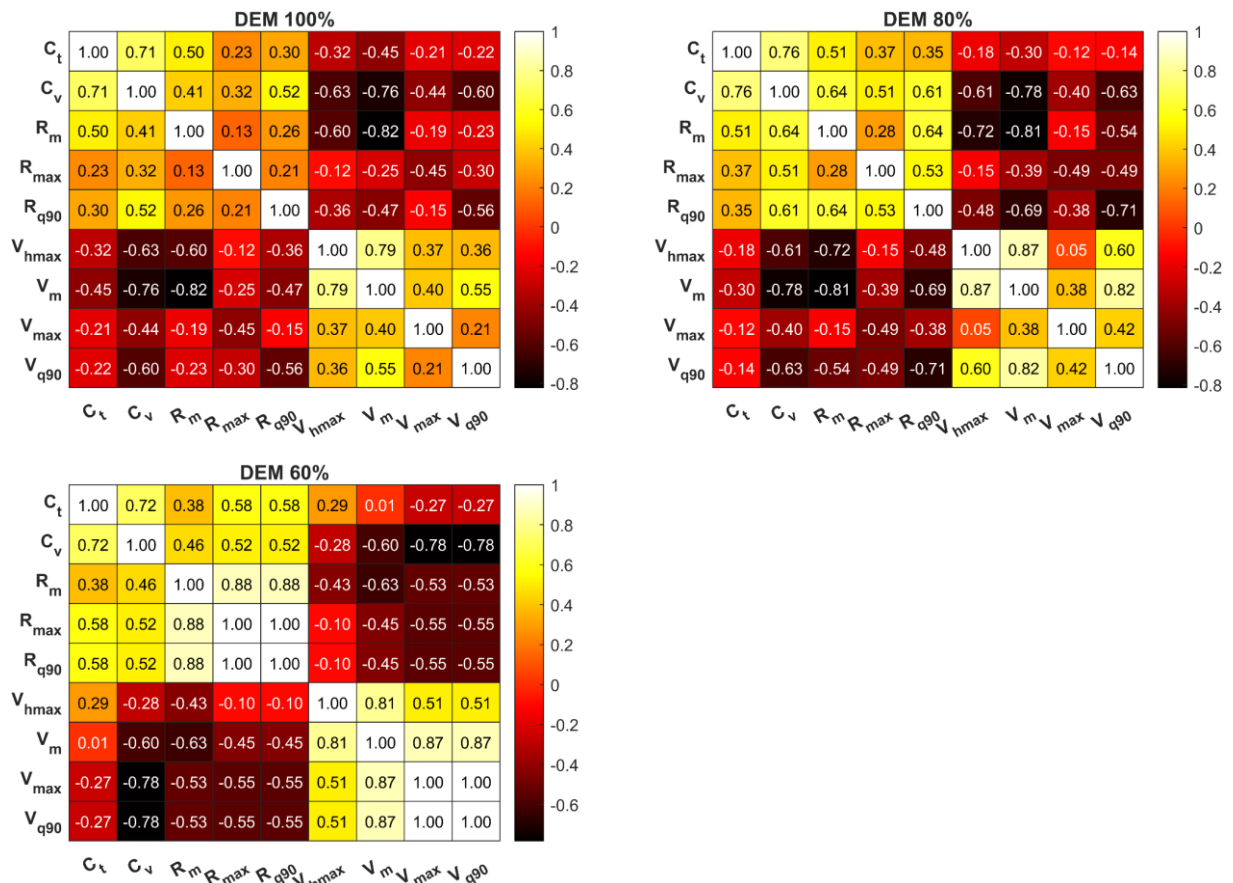


Figura 21: Coeficientes de correlación entre indicadores de CRV para demandas de 100, 80 y 60 por ciento en la C.H. El Platanal

Nota. Correlación nula ($0 \leq |r| < 0,1$), débil ($0,1 \leq |r| < 0,3$), moderada ($0,3 \leq |r| < 0,5$), fuerte ($0,5 \leq |r| < 1,0$).

4.2.4. Longitud de datos requerida

La Figura 22 muestra el comportamiento de los estimadores de CRV en función del número de años utilizados. Según se observa, C_t y C_v alcanzan valores constantes para longitudes mayores a 100 años, R_m y R_{q90} encuentran valores constantes a partir de 3000 y 500 años, respectivamente; mientras que V_m y V_{q90} también se requieren 500 años, por lo menos. Naturalmente, algunos estimadores basados en estadísticas máximas, como R_{max} (Figura 22 (d)) y V_{max} (Figura 22 (h)), tienden a disminuir o incrementarse con la longitud de datos, por tanto, no es posible establecer una longitud requerida en estos casos; sin embargo, la longitud tampoco debería exceder 2000 años ya que se observan saltos hacia sus límites inferior o

superior. Los resultados obtenidos dependen de la eficiencia del modelo estocástico MulGETS (Chen *et al.*, 2014). Es posible que el uso de modelos “clásicos”, como WGEN o CLIGEN, conduzcan a la necesidad de emplear series más extensas demandando un mayor costo computacional.

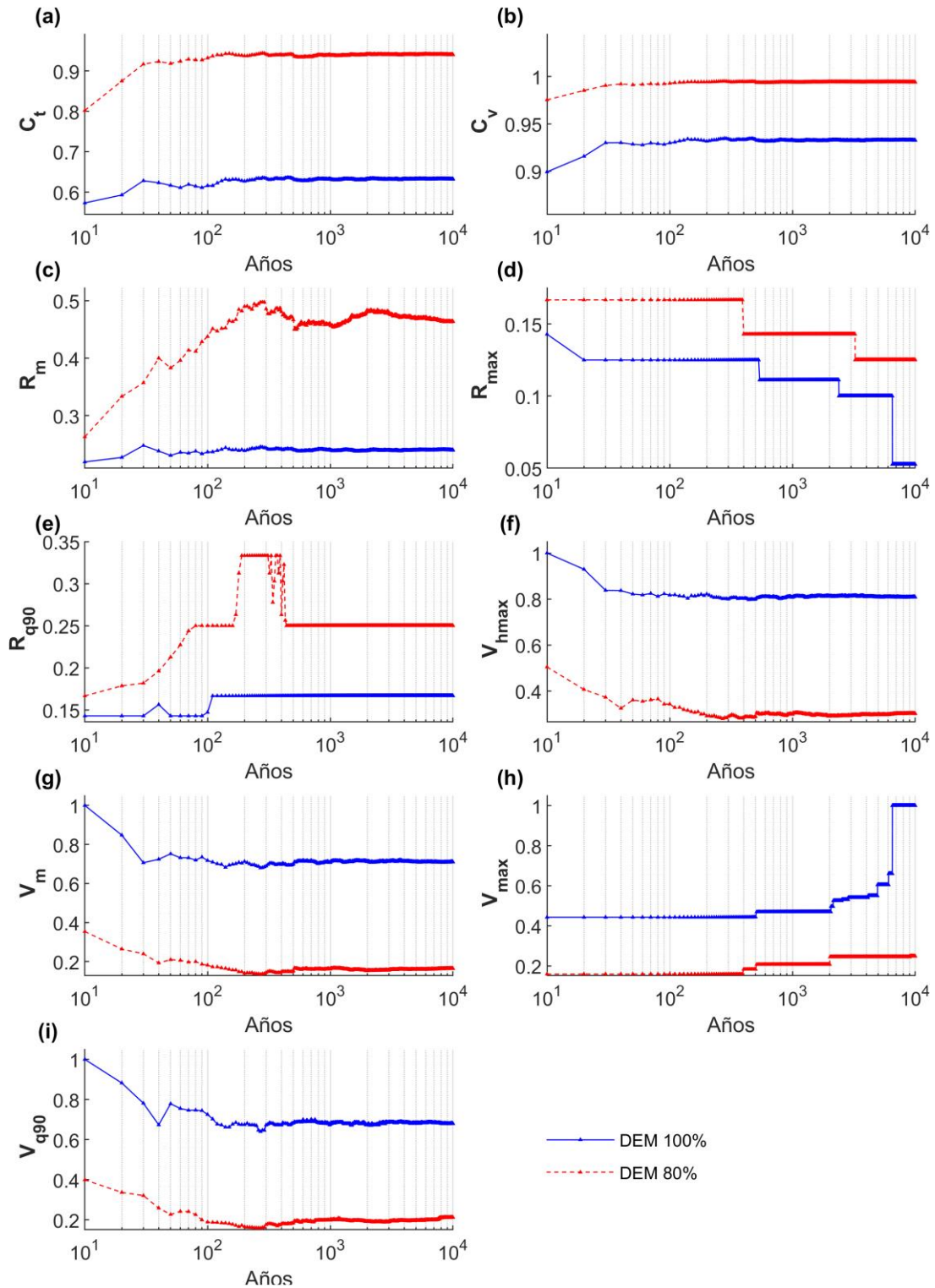


Figura 22: Estimaciones de CRV en función de la longitud de datos

4.3. EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CRV DEL SISTEMA

Los estimadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad seleccionados para evaluar el desempeño del sistema fueron C_t , R_{max} y V_{hmax} , respectivamente, obtenidos con 500 años de simulación. La sostenibilidad del sistema se cuantificó en base a la combinación de dichos criterios según el Índice de Sostenibilidad (acápite 3.2.2).

4.3.1. Cambios en la CRV del Sistema por las operaciones del embalse Paucarcocha

La Tabla 15 muestra la CRV del Sistema para los diferentes grupos de usuarios con y sin las operaciones del embalse Paucarcocha. Según estos resultados, la confiabilidad se incrementa en 0,12 puntos (de 0,66 a 0,78) para el sector agrícola de la cuenca baja, y en 0,16 puntos (de 0,55 a 0,71) para el sector energético de la cuenca alta. La resiliencia del sistema no sufrió cambios importantes, pues el sector agrícola solo obtuvo un incremento de 0,03 puntos (de 0,14 a 0,17), lo cual equivale a una disminución de la duración máxima de los déficits (inversa de la resiliencia) de 1,2 meses (de 7,1 a 5,8 meses).

Respecto a la vulnerabilidad, se observa una disminución de 0,28 puntos (de 1 a 0,74) para el sector agrícola de la parte baja, y de 0,51 puntos (de 1 a 0,49) para el uso energético de la parte alta. Nótese, que este indicador se muestra normalizado en la Tabla 13, de ahí que se tengan valores de cero y uno para el sistema sin embalse (escenario de referencia). Expresadas en unidades volumétricas, la vulnerabilidad del sector agrícola se reduciría en $0,10 \text{ hm}^3$ (de $0,34$ a $0,24 \text{ hm}^3$). Teniendo como referencia la demanda promedio de los 34 bloques de riego en el mes de menor caudal ($0,58 \text{ hm}^3$), esto representaría una disminución en 17,2 % del déficit máximo.

Se debe recordar que durante las asignaciones de uso agrario en el valle (INRENA, 2006) no se consideró el caudal ecológico, el cual fue asumido aquí en $\text{tres m}^3\text{s}^{-1}$. Es probable que dicha asunción haya disminuido la CRV del Sistema; no obstante, las operaciones del embalse Pucarcocha estarían compensando parcialmente esta pérdida de rendimiento, tal como indican los cambios descritos. El efecto de considerar distintos valores de caudal ecológico se analiza en el acápite 4.3.3.

La sostenibilidad del sistema, mostrada en la Tabla 15, resume en pocas cifras los cambios

ocurridos. Según se observa, los usos energéticos y agrícolas de la cuenca alta fueron los que obtuvieron mayores beneficios, con 0,46 y 0,62 puntos, respectivamente, seguido de los usos energéticos y agrícolas de la cuenca baja, con 0,35 y 0,33 puntos.

Tabla 15: CRV y sostenibilidad del Sistema sin (S) y con (C) las operaciones del embalse Paucarcocha, por grupos de usuarios¹

Grupo	Confiabilidad			Resiliencia			Vulnerabilidad			Sostenibilidad	
	S	C	Δ	S	C	Δ	S (hm ³)	C (hm ³)	Δ	S	C
CUENCA BAJA											
Poblacional	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00
Agrícola	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.03	1.00 (0.34)	0.72 (0.24)	- 0.28	0.00	0.33
Energético	0.62	0.77	+ 0.15	0.14	0.17	+ 0.03	1.00 (5.14)	0.66 (3.40)	- 0.34	0.00	0.35
Ecológico	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00
CUENCA MEDIA											
Poblacional	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00
Agrícola	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00
CUENCA ALTA											
Agrícola	0.97	0.97	0.00	0.87	0.87	0.00	0.51 (0.04)	0.47 (0.04)	- 0.04	0.49	0.62
Energético	0.55	0.71	+ 0.16	0.26	0.31	+ 0.05	1.00 (19.04)	0.49 (11.59)	- 0.51	0.00	0.46
Acuícola	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00
Ecológico	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00	1.00	1.00

4.3.2. Comportamiento de la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha

La Figura 23(a) muestra la CRV del uso agrícola de la cuenca baja en función de la demanda. Demandas inferiores al 100 por ciento, representan políticas que mejoran la eficiencia del sistema a través de medidas de conservación (reducción del uso y/o consumo); demandas superiores al 100 por ciento, políticas que incrementan el uso extensivo de los recursos hídricos.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa la demanda, (1) disminuye la confiabilidad exponencialmente; (2) aumenta la vulnerabilidad con mayor intensidad, a partir de la demanda de 40 por ciento; (3) cae rápidamente la resiliencia en la demanda de 30 por ciento y luego disminuye presentando valores bajos.

Según este comportamiento, si en lugar de aumentar el uso extensivo de los recursos hídricos

¹ En la Tabla 16 del ANEXO 2 se presentan los resultados a nivel de sitios de demandas.

se optara por medidas de conservación se obtendrían mayores beneficios, el sistema tendría un mejor desempeño y parte de los recursos preservados podrían ser reasignados para afianzar nuevos proyectos. Aun así, sería necesaria la implementación de obras de almacenamiento, ya que la reducción de la demanda por sí sola no produce mejoras significativas en la resiliencia sino disminuye hasta el 70 por ciento. Por otro lado, incrementar la demanda (en estiaje) más allá de 110 por ciento no parece sostenible, ya que los indicadores se encontrarían muy por debajo de niveles razonablemente aceptables (Confiabilidad < 0,69; resiliencia < 0,17 y vulnerabilidad > 0,72).

El gráfico de sostenibilidad de la Figura 23(b) muestra el beneficio total que obtendríamos al implementar medidas de conservación. Según se observa, la sostenibilidad se incrementa a una razón más o menos constante para demandas entre el 60 y 100 por ciento. Mediante esta curva, podríamos considerar evaluar otros tipos de políticas que complementen las medidas de conservación (p. ej. reúso de aguas drenadas) a fin de optimizar el sistema.

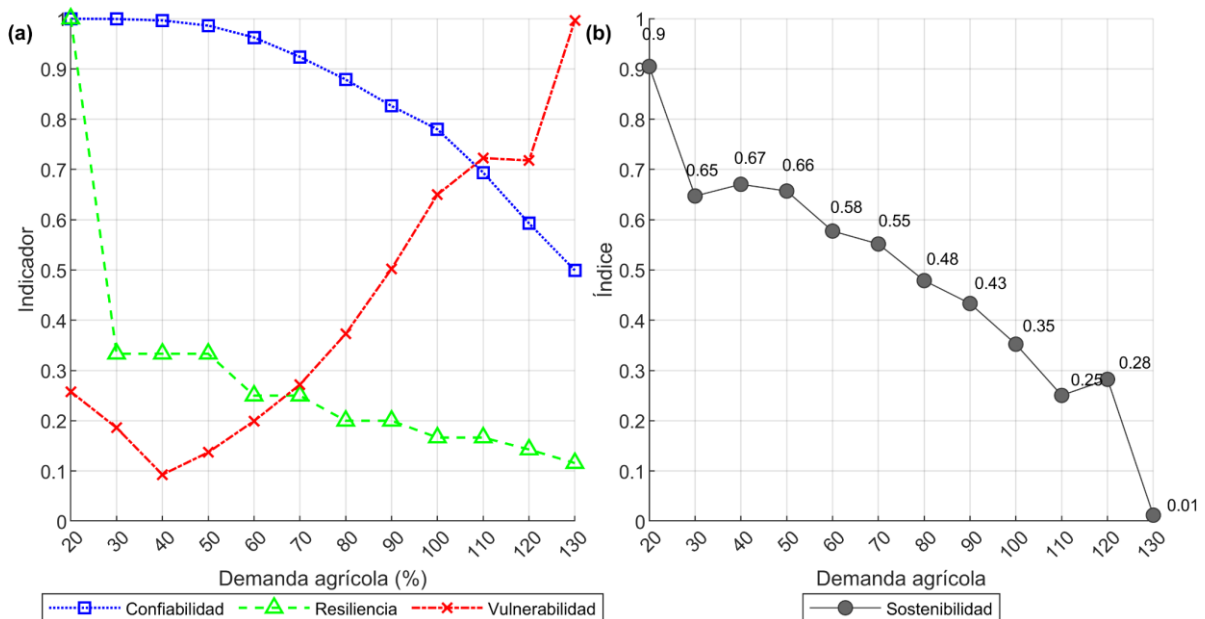


Figura 23: CRV y sostenibilidad del sector agrícola de la cuenca baja en función de la demanda

La Figura 24(a) muestra el efecto de los planes de operación del embalse Paucarcocha, definido en función de la demanda de la C.H. El Platanal, sobre la CRV del sector agrícola de la cuenca baja. Los resultados muestran que a medida que se incrementa la demanda, (1)

aumenta la confiabilidad hasta un máximo y luego disminuye; (2) aumenta levemente la resiliencia hasta un máximo y luego disminuye; (3) disminuye la vulnerabilidad hasta un mínimo y luego aumenta.

Según estos resultados, se alcanzan las mejores condiciones cuando la C.H. El Platanal opera al 80 por ciento del volumen que actualmente viene ejecutando (2015-2019). Los beneficios se traducirían, principalmente, en un aumento de la confiabilidad, que ascendería a 0,90, y en una disminución de la vulnerabilidad, que descendería a 0,37. La resiliencia no mostraría cambios importantes, pues solo se incrementaría a 0,20. Las operaciones con volúmenes superiores al 80 por ciento ejercerían una sobrepresión sobre el embalse Paucarcocha disminuyendo los beneficios.

El gráfico de sostenibilidad mostrado en la Figura 24 (b) describe el beneficio total para el sector agrícola en función de la demanda de la C.H. El Platanal. Para operaciones con demandas inferiores al 60 por ciento no existirían mejoras significativas. Para demandas de 60 a 80 por ciento se incrementaría la sostenibilidad hasta un máximo (0,48). Por encima del 80 por ciento la sostenibilidad empezaría a disminuir, aunque nunca por debajo de los niveles logrados en la demanda de 60 por ciento (0,23).

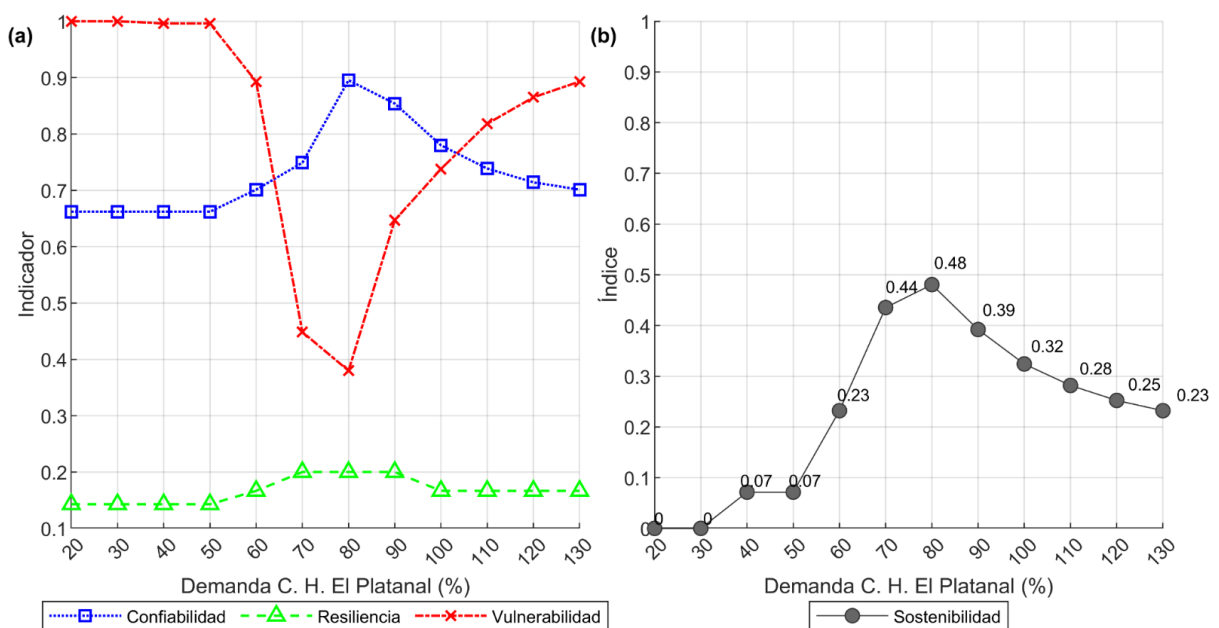


Figura 24: CRV y sostenibilidad del sector agrícola de la cuenca baja en función de los planes de operación del embalse Paucarcocha (demanda de la C.H. El Platanal)

4.3.3. Rangos aceptables de caudal ecológico en el tramo final del río Cañete

En las secciones anteriores se asumió un caudal ecológico de $3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para los distintos análisis, dicho valor se encuentra en el rango de valores adoptados en estudios previos (ANA, 2019; ALA Mala-Omas-Cañete, 2019). La Figura 25 muestra el efecto que tendría considerar distintos valores de caudal ecológico sobre la CRV de los diferentes sectores de la cuenca baja (agrícola, energético, poblacional y ecológico).

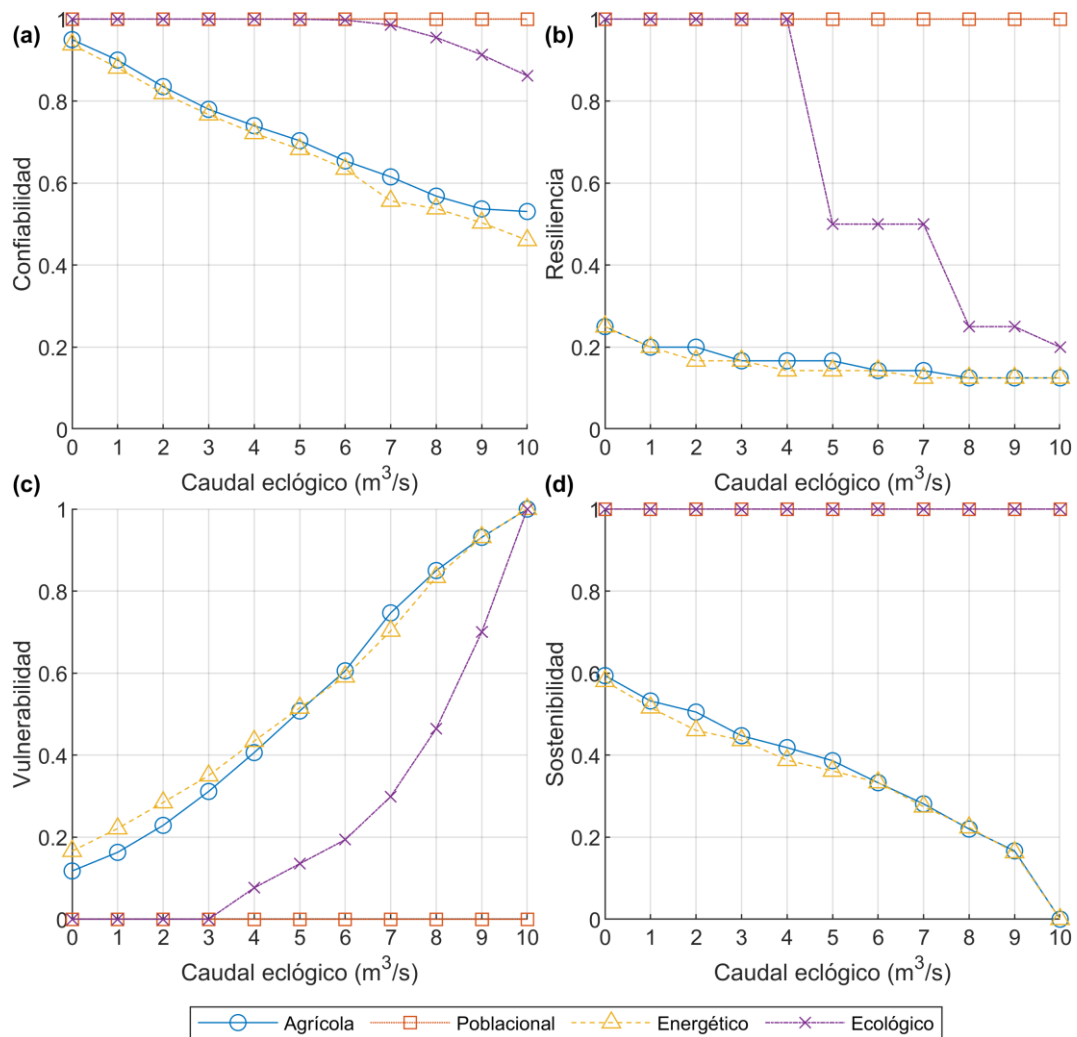


Figura 25: CRV y sostenibilidad de los sectores de la cuenca baja en función del caudal ecológico en el tramo final del río Cañete

Desde el punto de vista de la satisfacción de las demandas, consideramos “rangos aceptables” de caudal ecológico aquellos caudales que no menoscaban los niveles de CRV en más de cinco por ciento, asumiendo que las condiciones en este margen son adecuadas. Según los resultados, el caudal ecológico solo podría incrementarse hasta un máximo de

cuatro m^3s^{-1} ; asimismo, por encima de cinco m^3s^{-1} , el cumplimiento de los requerimientos ecológicos se vería comprometido, especialmente, por un aumento en la vulnerabilidad y una disminución en la resiliencia. El caudal ecológico máximo se contrasta con el caudal mínimo del río Cañete, luego de atender las demandas en el valle, el cual se estima entre cuatro y cinco m^3s^{-1} .

Finalmente, considerar un caudal ecológico igual a cero representaría la situación bajo la cual se asignaron derechos de uso agrario (INRENA, 2006), en este caso se obtendría niveles de confiabilidad bastante altos (0,97), resiliencias ligeramente superiores (0,23) y vulnerabilidades significativamente bajas (0,16).

V. CONCLUSIONES

Objetivo específico 1: Modelamiento del sistema de recursos hídricos de la cuenca Cañete.

Basado en los altos índices de Nash y Nash-In ($0,85 >$) y bajos valores de RVB ($< 0,2$) obtenidos en la calibración y validación podemos sostener que el modelo hidrológico implementado en WEAP es confiable y adecuado para su aplicación en el balance hídrico del Sistema. Los errores de subestimación de descargas observados durante los meses de avenidas (enero-marzo) no representan mayor dificultad, pues la demanda sigue siendo muy inferior a la oferta hídrica generada por el modelo. Los resultados están determinados, en gran medida, durante los meses de estiaje (mayo-octubre), donde es más probable la ocurrencia de déficits.

Objetivo específico 2: Selección de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad (CRV).

Nueve potenciales indicadores de CRV fueron examinados con el propósito de describir el desempeño del Sistema. De acuerdo a los análisis, la combinación de indicadores más apropiada e informativa para el Sistema estudiado es: confiabilidad en tiempo (C_t), resiliencia según la duración máximas de los déficits (R_{max}) y vulnerabilidad según la media de los déficits máximos (V_{hmax}); alternatively, podríamos utilizar la resiliencia basada en el cuantil 0,90 (R_{q90}) en lugar de R_{max} . Asimismo, la longitud de datos requerida para la obtención de estimadores estables a través del modelo estocástico MulGETS fue de 500 años.

Objetivo específico 3: Evaluación de los niveles de CRV del Sistema.

¿Qué cambios, en términos de CRV, producen las operaciones del embalse Paucarcocha?

Se observan incrementos en la confiabilidad y disminuciones en la vulnerabilidad, tanto para el sector energético como agrícola. Por su parte, la resiliencia para estos sectores se mantiene básicamente igual. En otras palabras, el funcionamiento del embalse Paucarcocha ha

disminuido la frecuencia de déficits y la magnitud de los déficits máximos, pero no la duración de los periodos de déficits. El Índice de Sostenibilidad muestra en síntesis que los sectores energético y agrícola de la cuenca alta obtuvieron los mayores beneficios, con 0,46 y 0,62 puntos; seguido de los sectores energético y agrícola de la cuenca baja, con 0,35 y 0,33 puntos, respectivamente. Los demás usos (ecológico y poblacional) se encuentran en niveles óptimos de sostenibilidad.

¿Qué comportamiento tiene la CRV del sector agrícola en función de la demanda y los planes de operación del embalse Paucarcocha? El comportamiento de la CRV del sector agrícola de la cuenca baja muestra una disminución rápida del desempeño del Sistema como consecuencia del incremento de la demanda. Aunque las condiciones actuales son buenas, si el uso de los recursos hídricos se incrementara en solo diez por ciento o incluso menos (i. e. nuevos derechos de uso en estiaje) se presentaría un deterioro rápido en la CRV. Una disminución en la demanda, como consecuencia de políticas que mejoran la eficiencia del uso, aumentaría sustancialmente el desempeño; además, parte de los recursos preservados podrían ser reasignados para su aprovechamiento.

Por otro lado, los planes de operación del embalse Paucarcocha y los volúmenes utilizados en la C.H. El Platanal tienen un claro efecto sobre la CRV del sector agrícola del valle. Así, los niveles de CRV mejoran cuando el volumen utilizado en la C.H. El Platanal es mayor o igual al 60 por ciento del volumen que actualmente vienen ejecutado (2015-2019). Las mejores condiciones se logran cuando dicho volumen alcanza el 80 por ciento (Confiabilidad = 0,9; resiliencia = 0,2 y vulnerabilidad = 0,37).

¿Qué rangos de caudal ecológico en el tramo final del río Cañete, permiten mantener niveles de CRV aceptables? El caudal ecológico podría incrementarse hasta cuatro m^3s^{-1} (en estiaje) para no afectar la CRV de los derechos de usos de agua otorgados en el valle. Asimismo, se debe agregar que un caudal ecológico nulo representa la situación bajo las cuales asignaron derechos de uso agrario en el valle, en este caso se obtendrían indicadores de CRV bastante altos.

VI. RECOMENDACIONES

- Presentar los indicadores de CRV y el Índice de Sostenibilidad utilizados en el presente Estudio a los tomadores de decisión de la cuenca Cañete a fin de reconocer su practicidad, adaptarlos y/o mejorarlos.
- Los indicadores pueden ser utilizados con éxito en sistemas de recursos hídricos similares a la cuenca Cañete que hayan sido modelados en WEAP. En general, se debe tener en cuenta lo siguiente: 1. el modelo de sistemas utilizado (¿qué método se emplea en la simulación del embalse?, ¿qué efecto tienen las escalas temporales, horaria, diaria o mensual, sobre los indicadores?); 2. las condiciones de oferta y demanda; y 3. la variabilidad hidrológica.
- Los indicadores fueron los mismos para todos los tipos de uso; no obstante, en la práctica, los tomadores de decisión y los actores de la cuenca pueden establecer los criterios y umbrales de acuerdo a las necesidades de cada sector, más allá de los criterios de CRV estudiados aquí.
- Dada la subjetividad que existe en la selección de criterios y la incertidumbre en la estimación de la demanda, se recomienda investigar más sobre experiencias en la toma de decisiones basadas en indicadores/índices y el modelamiento de sistemas.
- Se recomienda investigar sobre la utilidad de los indicadores de CRV bajo condiciones de cambio climático, esto es, con impactos en las disponibilidades hídricas y las demandas.
- Se recomienda incluir el volumen de explotación de agua subterránea del valle Cañete y la demanda cubierta por ella, en futuros análisis.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Andreu, J.; Capilla, J. & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of hydrology*, 177(3-4), 269-291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)

Administración Local del Agua Mala-Omas-Cañete [ALA-MOC]. (2019). Plan de aprovechamiento de las disponibilidades hídricas de la cuenca del río Cañete 2019-2020. Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua.

Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2019). Estudio hidrológico de la unidad hidrográfica Cañete. Lima: ANA. Recuperado de https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/4713/ANA0003209_1.pdf

Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2018). Compendio de Normas. Lima: ANA. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2168/ANA0001013.pdf>

Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2015). Resolución Jefatural N°007-2015-ANA, Reglamento de procedimientos administrativos para el otorgamiento de derechos de uso de agua y autorizaciones de ejecución de obras en fuentes naturales de agua. Recuperado de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/res._jef._ndeg_007-2015-ana_0_0.pdf

- Brown, C.M.; Lund, J.R.; Cai, X.; Reed, P.M.; Zagona, E.A.; Ostfeld, A.; Hall, J.; Characklis, G.W.; Yu, W. & Brekke, L. (2015). The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. *Water resources research*, 51(8), 6110-6124. <https://doi.org/10.1002/2015WR017114>
- Butler, D.; Ward, S.; Sweetapple, C.; Astarai-Imani, M.; Diao, K.; Farmani, R. & Fu, G. (2017). Reliable, resilient and sustainable water management: the Safe & SuRe approach. *Global Challenges*, 1(1), 63-77. <http://doi.org/10.1002/gch2.1010>
- Compañía Eléctrica el Platanal S. A [CELEPSA]. (2018). Plan anual de descarga – presa Paucarcocha C.H. El Platanal 2018. Cañete: Administración Local del Agua Mala-Omas-Cañete.
- Chaves, H.M. & Alipaz, S. (2007). An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Water Resources Management*, 21(5), 883-895. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2>
- Escobar, M. & Vicuña, S. (2009). Guía metodológico: modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. A joint publication of Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile and Stockholm Environment Institute. WEAP. https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- Chen, J.; Brissette, F.P. & Zhang, X.J. (2014). A multi-site stochastic weather generator for daily precipitation and temperature. *Transactions of the ASABE*, 57(5), 1375-1391. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10685>
- Davidson, J.L.; Jacobson, C.; Lyth, A.; Dedekorkut-Howes, A.; Baldwin, C.L.; Ellison, J. C.; ... & Smith, T.F. (2016). Interrogating resilience: toward a typology to improve its operationalization. *Ecology and Society*, 21(2). <http://doi.org/10.5751/ES-08450-210227>

- De Carvalho, S.C.P.; Carden, K.J. & Armitage, N.P. (2009). Application of a sustainability index for integrated urban water management in Southern African cities: Case study comparison–Maputo and Hermanus. *Water Sa*, 35(2). <https://doi.org/10.4314/wsa.v35i2.76727>
- Draper, A.J.; Munevar, A.; Arora, S.K.; Reyes, E.; Parker, N.L.; Chung, F.I. & Peterson, L. E. (2004). CalSim: Generalized model for reservoir system analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(6), 480-489. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:6\(480\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:6(480))
- Golmohammadi, M.H.; Safavi, H.R.; Sandoval-Solis, S. & Fooladi, M. (2021). Improving Performance Criteria in the Water Resource Systems Based on Fuzzy Approach. *Water Resources Management*, 35(2), 593-611. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02739-6>
- Hashimoto, T.; Stedinger, J.R. & Loucks, D.P. (1982a). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- Hashimoto, T.; Loucks, D.P. & Stedinger, J.R. (1982b). Robustness of water resources systems. *Water Resources Research*, 18(1), 21-26. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00021>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA]. (2001). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Cañete: Estudio hidrogeológico del valle Cañete (informe final). Lima: Autoridad Nacional del Agua. Recuperado de http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/1726/ANA0000726_1.pdf
- Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA]. (2004). Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua en la cuenca del río Cañete: Estudio de asignación de agua a los bloques de riego del valle de Cañete. Administración Técnica del Distrito de Riego Mala-Omas-Cañete.

Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA]. (2006). Programa de Formalización de Derechos de Uso de Agua PROFODUA: Propuesta de asignación de agua superficial en bloques (volúmenes anuales y mensuales), para la formalización de los derechos de uso de agua en la cuenca media y alta de Cañete (Región Lima). Administración Técnica del Distrito de Riego Mala-Omas-Cañete.

Sieber, J. & Purkey, D. (2015). Water evaluation and planning system user guide. Stockholm Environmental Institute. Recovered from https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf

Jain, S.K. (2010). Investigating the behavior of statistical indices for performance assessment of a reservoir. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.009>

Jain, S.K. & Singh, V.P. (2003). Water resources systems planning and management. Elsevier.

Jung, D. (2013). Robust and resilient water distribution systems [PhD thesis, University of Arizona]. USA. Recovered from https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/311454/azu_etd_13051_sip1_m.pdf

Kim, I.; Kim, Y. & Kong, I. (2016, May). Assessing sustainable water use and local economy in Korea. Proceedings of the 36^o Annual Conference of the International Association for Impact Assessment, 11- 14, Nagoya, Japan. <https://conferences.iaia.org/2016/Final-Papers/Kim, Ikjae - Assessing Sustainable Water Use in Korea.pdf>

Klemes, V. (1969). Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input. *Journal of Hydrology*, 7(2), 198-216. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90056-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90056-0)

- Klipsch, J.D. & Hurst, M.B. (2007). HEC-ResSim reservoir system simulation user's manual version 3.0. USACE, Davis, CA, 512.
- Kjeldsen, T.R. & Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological sciences journal*, 49(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.755.55136>
- Kundzewicz, Z.W. & Kindler, J. (1995). Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resource systems. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 231, 217-224. http://hydrologie.org/redbooks/a231/iahs_231_0217.pdf
- Loucks, D.P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 513-530. <https://doi.org/10.1080/02626669709492051>
- McMahon, T.A. & Adeloye, A.J. (2005). Water resources yield. *Water Resources Publication*.
- McMahon, T.A.; Adeloye, A.J. & Zhou, S.L. (2006). Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 359-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.030>
- Maiolo, M. & Pantusa, D. (2019). Sustainable water management index, SWaM_Index. *Cogent Engineering*, 6(1), 1603817. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1603817>
- Moy, W.S.; Cohon, J.L. & ReVelle, C.S. (1986). A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water resources research*, 22(4), 489-498. <https://doi.org/10.1029/WR022i004p00489>
- Nkwonta, O.I.; Dzwire, B.; Otieno, F.A.O. & Adeyemo, J.A. (2017). A review on water resources yield model. *south african journal of chemical engineering*, 23, 107-115.

<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.04.002>

Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2018). Guía de prácticas climatológicas (OMM-N°100). Suiza: OMM. Recovered from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027

RC Hydro & LKS Energy Perú. (2015). Estudio Hidrológico Central Hidroeléctrica Churo. Cañete: Administración Local del Agua Mala-Omas-Cañete.

Resolución Directoral N° 169 de 2011 [Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Administración de Recursos Hídricos]. Modificación de la licencia con fines energéticos para la Central Hidroeléctrica G1 El Platanal.

Resolución Directoral N° 226 de 2013 [Autoridad Administrativa del Agua Cañete-Fortaleza]. Otorgamiento de licencia de uso de agua con fines energéticos para la Central Hidroeléctrica Nuevo Imperial.

Resolución Directoral N° 942 de 2017 [Autoridad Administrativa del Agua Cañete-Fortaleza]. Autorización a la empresa SEDAPAL la ejecución de estudios de Disponibilidad hídrica superficial con fines poblacional para el proyecto “Captación de 6.0 m³/s de las aguas del río Cañete, para la derivación hasta el distrito de Lurín”. 5 de mayo de 2017.

Resolución Jefatural N° 267 de 2019 [Autoridad Nacional del Agua]. “Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos”.

Roach, T.; Kapelan, Z. & Ledbetter, R. (2018). Resilience-based performance metrics for water resources management under uncertainty. *Advances in Water Resources*, 116, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.03.016>

Roost, N. (2002). Strategic options analysis in surface irrigation systems: Integrated

modelling for efficient, productive and equitable water use (Publication No. 2641) [Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology]. Lausanne, Switzerland: ETH Zurich.

Safavi, H.R.; Golmohammadi, M.H. & Sandoval-Solis, S. (2016). Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. *Journal of hydrology*, 539, 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.073>

Sandoval-Solis, S.; McKinney, D.C. & Loucks, D.P. (2011). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000134)

Sainz, P. (1989). An index of social welfare. In *Towards a New Way to Measure Development. Report on the International Meeting on More Effective Development Indicators* (pp. 156-60). Caracas, Venezuela: Office of the South Commission.

Shilling, F.; Khan, A.; Juricich, R. & Fong, V. (2013). Using indicators to measure water resources sustainability in California. In *World environmental and water resources congress 2013: Showcasing the future* (pp. 2708-2715). <https://doi.org/10.1061/9780784412947.268>

Simonovic, S.P. (2012). *Managing water resources: methods and tools for a systems approach*. Routledge.

Proyecto de Ley N° 03924 de 2018 [Congreso de la República del Perú]. Ley que declara de necesidad pública y preferente interés nacional el proyecto de afianzamiento hídrico de la cuenca del río Cañete y Proyectos de irrigación. 25 de febrero de 2019. https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/Proyectos_de_Ley_y_de_Resoluciones_Legislativas/PL0392420190225.pdf

Yates, D.; Sieber, J.; Purkey, D. & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500. <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>

Zongxue, X.; Jinno, K.; Kawamura, A.; Takesaki, S. & Ito, K. (1998). Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 12(1), 13-30. <https://doi.org/10.1023/A:1007951806144>

ANEXO 2: DESEMPEÑO DEL SISTEMA A NIVEL DE SITIOS DE DEMANDAS

Tabla 16: CRV y sostenibilidad del Sistema sin (S) y con (C) las operaciones del embalse Paucarcocha, a nivel de sitios de demandas

Sitios de demanda	Confiabilidad			Resiliencia			Vulnerabilidad			Sostenibilidad	
	S	C	Δ	S	C	Δ	S	C	Δ	S	C
CUENCA BAJA											
BR Casa Blanca Los Lobos	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Chilcal La Quebrada	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Comunidad Divididos Olivar	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Cuiva Don German	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Huanca Alta	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Huanca Baja	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Huanca Media	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Huanca Vieja	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.71	- 0.29	0.00	0.34
BR Lucumo	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Montalban Arona Tupac Lat 74	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Montejato Hualcara	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Pachacamilla	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Pachacamilla Vieja	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Almenares Santa Adela	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Bandurria y El Cortijo	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.71	- 0.29	0.00	0.34
BR Cantagallo Union Campesina	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Cantera	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.71	- 0.29	0.00	0.33
BR La Huerta	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.71	- 0.29	0.00	0.34
BR Lateral A	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Lateral B	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Lateral T	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.71	- 0.29	0.00	0.34
BR Lateral Z	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Rio Caltopa	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Roma Rinconada	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Tunel Grande	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33

«continuación»

C.H. Nuevo Imperial	0.62	0.77	+ 0.14	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.66	- 0.34	0.00	0.35
Demanda Poblacional	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Caltopa Caltopilla	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Herbay Alto	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Herbay Bajo	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Palo	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Casa Pintada San Isidro Compradores	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR Cerro Alegre Casa Pintada I	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR El Conde Hualcara Alto Gago	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.73	- 0.27	0.00	0.33
BR Josefina Santa Glicería Huaca Chivato	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
BR San Benito Compradores	0.66	0.78	+ 0.12	0.14	0.17	+ 0.02	1.00	0.72	- 0.28	0.00	0.33
CUENCA MEDIA											
BR Lunahuana 01	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Lunahuana 02	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Lunahuana 03	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Lunahuana 04	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Pacaran Alto	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Pacaran Bajo	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Zuniga Alto	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Zuniga Bajo	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
Demada Poblacional	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
CUENCA ALTA											
BR Caullama	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Aquicha	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Auco	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Cachuy	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Capillucas	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Pinos	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Putinza	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Coccoche Antunco Vinchunco	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
Centro Acuicola Catahuasi	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
C.H. El Platanal	0.43	0.63	+ 0.20	0.06	0.13	+ 0.06	1.00	0.62	- 0.38	0.00	0.31

«continuación»

C.H. LLapay	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	- 1.00	0.00	1.00
BR CC SP de Cusi	0.92	0.92	0.00	0.25	0.25	0.00	1.00	1.00	+ 0.00	0.02	0.00
BR CC Huayllura Quiscay	0.84	0.84	0.00	0.33	0.33	0.00	1.00	1.00	+ 0.00	0.05	0.00
BR CC Quisque	0.80	0.80	0.00	0.25	0.25	0.00	1.00	1.00	+ 0.00	0.02	0.00
BR CC Huancachi	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC SL de Alis	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Tomas	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Huancaya	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Vitis	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Allauca	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Aucampi	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Lincha	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC SP de Cakra	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC SP de Hongos	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Tana	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Apuri	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.81	- 0.19	0.00	0.57
BR CC Ortigal	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.81	- 0.19	0.00	0.57
BR CC SC Chocos	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.81	- 0.19	0.00	0.57
BR CC SJB de Huangascar	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.81	- 0.19	0.00	0.57
BR CC TA de Azangaro	1.00	1.00	+ 0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.81	- 0.19	0.00	0.57
BR CC Miraflores	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	- 0.00	0.00	0.07
BR CC Casinta	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Pampas	0.92	0.92	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	+ 0.00	0.04	0.00
BR CC Catahuasi	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR CC Lerida o Tupe	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
BR Auquiarco	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR Camara LLungune	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR Canchano	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR La Union	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR Molino Pampa Naupahuasi	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR Ochopuquio	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.90	- 0.10	0.00	0.32
BR Pucche Coyrura	0.93	0.94	+ 0.01	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33
BR Tambillo	0.93	0.94	+ 0.02	0.33	0.33	0.00	1.00	0.88	- 0.12	0.00	0.33

Nota: (BR) Bloque de riego, (CC) Comunidad campesina.

ANEXO 3: ENLACES DE CÓDIGOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

- Códigos para el computo de indicadores de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad, y ejemplos de aplicación (MATLAB): <https://github.com/brayantz/RRV-Measures>
- Generador estocástico MulGETS, versión original: <https://uk.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47537-multi-site-stochastic-weather-generator-mulgets>
- Generador estocástico MulGETS, versión modificada para el presente estudio: <https://github.com/brayantz/MulGETS>