

**PROPUESTA DE PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
APLICANDO EL MODELO DE EVALUACIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL
AGUA WEAP Y EL MODELO DE SIMULACIÓN DE RESERVORIOS HEC –
RESSIM**

APLICACIÓN PRÁCTICA: PRESA CALDERAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El agua es un recurso de vital importancia porque es un elemento básico para la vida que acompaña a la naturaleza, es parte de ella, está en las nubes, en el subsuelo, en los ríos; está en la vida del planeta Tierra.

Según el informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos publicado en el año 2018, afirma que muchos países ya están padeciendo condiciones generalizadas de escasez de agua y es probable que tengan que enfrentar una menor disponibilidad de recursos hídricos superficiales en la década de 2050.

Actualmente, la demanda mundial de agua se ha estimado en alrededor de 4.600 km³/año y se prevé que aumente entre un 20% y un 30% para el 2050. El uso global del agua ha aumentado seis veces en los últimos 100 años y sigue creciendo de manera constante a una tasa aproximada del 1% anual.

En Bolivia se atraviesa por la peor sequía en 25 años, llegando incluso a ser emergencia nacional. Miles de campesinos han perdido cosechas enteras y han tenido que migrar o están endeudados y miles de animales han muerto.

Bolivia es considerada como la cuna de la papa y ahora la tiene que importar de fuera, lo mismo pasa con el maíz y otros alimentos. Según la Cámara Agropecuaria del Oriente (CAO), en Santa Cruz, las pérdidas agrarias en 2016 llegan a alrededor de 500 millones de euros.

El aumento de la demanda de agua, el crecimiento de las necesidades de agua para los distintos usos, los problemas de contaminación de las fuentes, el deterioro de su calidad

y la influencia del cambio climático, traen como consecuencia una escases de agua. Las alteraciones de la frecuencia de lluvias y otras dificultades actuales nos advierten que el agua es una prioridad; de ahí que es fundamental tener estrategias para su uso adecuado.

El departamento de Tarija cuenta con nueve presas, las cuales son: La Tipa, San Jacinto, Calderas, Peña Colorada, Chiguaypolla, Huacata, La Hondura, Trinchera Cabildo y Caigua.

La presa de Calderas es una presa de enrocado, con una altura total de 32 m, una longitud de corona de 214,00 m y una capacidad de almacenamiento de 4,91 hm³, implantada en un angosto del cauce del río Calderas que deja aguas arriba la posibilidad de embalsar, tanto las aguas de la cuenca directa, como de aquellas que se conducen con un canal de trasvase. Esta presa fue construida con la finalidad de regar una superficie total de 1.229 ha de tierras agrícolas, situadas en ambos márgenes de los ríos Calderas y Yesera, de las comunidades de Caldera Chica, Hornos, Curuyo, Gamoneda, Santa Ana Barbecho y Santa Ana Baja, cuya demanda hídrica anual es de 5.396 m³/ha-año.

Hoy en día solo 151,10 ha aprovechan el agua de la presa y existe una deficiente operación de la misma debido a la falta de conocimiento del caudal a trasvasar, además que los comunarios de las zonas beneficiarias reportan que existe un déficit en cuanto a la dotación del agua en algunas comunidades.

La presente investigación pretende analizar escenarios de oferta y demanda de la presa Calderas en función al año promedio, húmedo y seco con la finalidad de proponer estrategias para el buen manejo y operación de la presa aplicando el modelo de evaluación y planificación del agua WEAP para el balance hídrico de la cuenca Calderas y Yesera, y el modelo de simulación de reservorios HEC-ResSim para la operación de la presa.

1.2. Planteamiento del problema

La escasez de agua en nuestro país cada vez se va intensificando debido al cambio climático y otros factores como son el crecimiento poblacional y por ende la contaminación en los afluentes. Debido a estos factores la oferta hídrica está disminuyendo y no es posible cubrir en épocas de estiaje las demandas tanto para riego como para consumo humano y otras actividades.

El incremento de la temperatura, mayor irradiación solar en especial en otoño e invierno y la evapotranspiración, están originando cambios en el patrón de distribución y frecuencia de las precipitaciones causando una disminución en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Es por ello que se hace cada vez más necesario realizar un proceso de planificación e implementar estrategias sostenibles del uso del agua para evitar procesos de déficit hídrico.

En la presente investigación se analizará el embalse Calderas, el cual se encuentra emplazado en una zona semiárida donde el cambio climático afecta con mayor intensidad.

La presa fue construida para cubrir un área de riego de 1.229 ha. Hoy en día solo cubre 151,10 ha anualmente debido a que no se construyeron las obras complementarias (canales secundarios y terciarios) por lo tanto las familias beneficiarias riegan a través de un sistema tradicional (canales de tierra y surcos). Pese a que no se está cubriendo el área de riego que se planteó en el diseño final del proyecto algunas comunidades reportan que existe un déficit en la dotación del agua en ciertas épocas del año.

En el diseño final se planteó un sistema de trasvase de $0,70 \text{ m}^3/\text{s}$ derivando entre noviembre y abril. Existen una serie de acuerdos específicos para trasvasar el agua del río Yesera a la presa Calderas en época de verano, especialmente con las comunidades aguas arriba del sitio del trasvase, como también las que están aguas abajo que corresponde a las comunidades beneficiarias de la presa Calderas. Lo que no conocen los comunarios son los meses que deben ser trasvasados las aguas, creen que son desde

enero a marzo, no conocen el caudal que debe ser trasvasado, solamente en la construcción se les indico que el canal tenía una capacidad de 800 l/s y que debía trabajar lleno.

Así mismo, ante esta situación es necesario conocer el comportamiento de la disponibilidad hídrica y plantear estrategias en el manejo adecuado del agua de la presa Calderas para diferentes escenarios de época seca, húmeda y promedio porque para situaciones extremas probablemente los niveles de la presa no sean los requeridos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar una propuesta de planificación de los recursos hídricos de la presa Calderas aplicando el modelo de evaluación y planificación del agua WEAP y el modelo de simulación de reservorios HEC–ResSim.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recolectar y procesar la información de las variables que son necesarias en el modelo WEAP para realizar el balance hídrico de la cuenca de aporte directo e indirecto.
- Generar caudales medios diarios de aporte directo e indirecto hacia el embalse mediante el modelo WEAP.
- Realizar una clasificación de escenarios de tiempo de acuerdo a la probabilidad de no excedencia, para caracterizar el año húmedo, año medio y seco (75, 50 y 30% de probabilidad de no excedencia).
- Crear un modelo de simulación para el embalse, con diferentes alternativas de operación a paso diario aplicando el modelo de simulación de reservorios HEC-ResSim.
- Analizar la variación de volúmenes del embalse para las demandas de riego y en los escenarios de tiempo dados.

- Proponer posibles soluciones para el manejo adecuado de los recursos hídricos de la presa Calderas.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

Los recursos hídricos son fundamentales para el desarrollo de las ciudades y poblaciones, puesto que su aprovechamiento genera un bienestar y calidad de vida en los habitantes que las conforman. Pero el efecto del cambio climático, la contaminación, el crecimiento poblacional están provocando escases del recurso frente a las demandas que se tiene tanto para el consumo como para la producción agrícola y generación de energía eléctrica. Esta situación seguirá prevaleciendo, incluso se prevé una menor disponibilidad de agua en un futuro próximo.

Para hacer frente a estos efectos se ve la necesidad de construir presas y mejorar la gestión de las que ya existen con la finalidad de poder aprovechar y optimizar el uso del recurso agua.

Por otra parte, el manejo adecuado del agua de una presa es indispensable para tener una óptima operación del mismo porque las presas son estructuras con la función de almacenar y regular el agua para el bienestar de la sociedad, además, presentan factores de riesgo en cuanto a su estructura.

En el diseño final de la presa Calderas se realizó una planificación de la operación del embalse con respecto a una demanda, actualmente solo se riega un porcentaje y se presenta un déficit del recurso, al existir una incertidumbre en la disponibilidad hídrica de la presa es necesario conocer esta disponibilidad y su comportamiento ante la demanda actual en diferentes escenarios de tiempo.

1.4.2. Justificación metodológica

El modelo de evaluación y planificación del agua (WEAP) está concebido para realizar un balance integral de los recursos hídricos en cuencas en los diferentes niveles y estados de flujo del agua en la atmosfera (flujo superficial, sub superficial, aguas subterráneas, trasvases, etc.), lo que permite realizar un balance completo de todas las

variables hidrológicas necesarias a la hora de manejar el balance hídrico en cuencas. Permite hacer variaciones en la metodología usada en los subelementos de forma particular, otorgando mayor detalle en la modelación hidrológica en zonas donde la información esté disponible, y simplificando la misma en zonas donde la información sea escasa como en el caso de la cuenca Calderas y Yesera. A través del balance hídrico se genera información útil (caudales medios diarios de la cuenca Calderas y Yesera) para el manejo de los recursos naturales, sobretodo el rendimiento hídrico de las cuencas.

HEC-ResSim es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, el cual ayuda a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a ello determinar las salidas de agua durante la operación del mismo. Es una herramienta de apoyo pues ayuda a la toma de decisiones para un mejor funcionamiento de los reservorios y su esquema flexible para describir la operación de los embalses hacen que sea aplicable para modelar casi cualquier sistema de almacenamiento de usos múltiples.

1.4.3. Justificación práctica

La información obtenida mediante las simulaciones del reservorio a diferentes escenarios de tiempos permitirá establecer el comportamiento de la operación del embalse a través de los cuales se podrá analizar si se cumple con el objetivo de satisfacer la necesidad básica de riego de los cultivos o caso contrario para ayudar a la toma de decisiones para el manejo adecuado del recurso hídrico.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se analizan los aportes teóricos que tienen relación con la temática de planificación de los recursos hídricos de un embalse que se hayan realizado en el mundo o en nuestro país. Posteriormente se realiza el análisis de tres trabajos que se realizaron en el Ecuador, Colombia y finalmente en nuestro departamento.

2.1. Investigaciones Internacionales

Análisis de escenarios y estudio de un balance hídrico con aplicación al embalse Macul 1 empleando el programa HEC-ResSim

Celi Contreras, M. V., y Vélez Arcentales, M. (2013). *Análisis de escenarios y estudio de un balance hídrico con aplicación al embalse Macul 1 empleando el programa - HEC-ResSim*. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca Ecuador.

En la ciudad ecuatoriana Cuenca se desarrolló el proyecto "Pacalori", por el Programa para Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), que tiene como objetivo fundamental el control de inundaciones y el abastecimiento de agua para riego, por lo que se construirían presas cuyos embalses se utilizarían para el almacenamiento del agua de riego, siendo uno de estos el embalse Macul 1 con una capacidad de almacenamiento de 57 hm³.

Objetivo: Analizaron diferentes escenarios y estudiaron el balance hídrico del embalse Macul 1 a través del programa Hec-ResSim.

Alcance: Se estudió el comportamiento del embalse mediante un balance hídrico para distintos escenarios de tiempo (año lluvioso, normal y extrema sequía) con la implementación del programa computacional HEC-ResSim, a partir de esta información se analizó si el embalse mantuvo el volumen y niveles requeridos para un escenario dado, y así también se conoció su funcionamiento y como se podía mejorar si era el caso.

Resultados: Dentro de los principales resultados se tiene que para un escenario lluvioso y normal hay rebose de agua en volúmenes bastante grandes de aproximadamente 39 hm^3 para el año normal y 110 hm^3 para el año lluvioso y para el escenario seco no se produce salida del caudal por el vertedero.

Se realiza un trasvase del excedente de la presa Macul a la presa Maculillo y se determina que el volumen de agua transportado desde Macul hacia Maculillo para los escenarios lluviosos y normales representa un volumen casi igual o excedido al volumen de almacenamiento de la presa Maculillo. Lo que en realidad no debería producirse pues la concepción del trasvase Quevedo-Macul es justamente alimentar Maculillo pero no en su totalidad, ya que su propia cuenca lo llena en aproximadamente un 34% de su capacidad. Para un año seco la conducción transporta aproximadamente un 78% del volumen que debería aportar el trasvase, lo que implica que tal cantidad para un año seco es relativamente considerable. Concluyéndose que hay un excedente de agua en gran magnitud, que debe ser considerado y analizado para que este exceso de agua sea debidamente utilizado.

Se recomendó que, en caso de déficit de agua para satisfacer las demandas de riego y caudal ecológico, se regule la salida por la conducción hacia Maculillo, pues el caudal que se descarga hacia el embalse está por encima del requerido, ese excedente podría satisfacer las necesidades de riego y del caudal ecológico.

Guía metodológica para el análisis de la gestión de embalses. caso de estudio embalse La Copa

Sanabria Ayala, J. A. (2019). *Guía metodológica para el análisis de la gestión de embalses. caso de estudio embalse La Copa*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

Objetivo: Elaboraron un modelo de simulación de embalses con la herramienta HEC-ResSim para una mejor operación de un embalse dado a través de la determinación de una curva guía óptima.

Alcance: La guía comprende los procesos del ciclo hidrológico desde la precipitación de la lluvia hasta la operación que se requiere en cada uno de los embalses que contiene un área de estudio. Se realizaron procesos complementarios, entre los cuales destacan la creación de un modelo hidrológico de simulación continua (utilizando la herramienta HEC-HMS y el método de pérdidas o abstracciones SMA) que tras su debida calibración brindo las series anuales de caudales diarios que se ingresan al modelo de embalses; la creación de un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando (HEC-RAS 2D) que permitió conocer las bondades de la regulación a través de las simulaciones de condiciones actual y con regulación óptima.

Resultados: En el estudio se propusieron distintas metodologías para determinar la curva guía óptima del sistema y se compararon sus resultados; esto sin cerrar la puerta a metodologías alternas que podían proporcionar un mejor acercamiento a la curva guía óptima. Para la evaluación de la operación se desarrolló un número de curvas guía, entre las cuales se seleccionaron 4; estas se ponen a prueba utilizando el modelo HEC-ResSim a través de la cuantificación de fallos en la descarga de volúmenes mínimos y máximos. Finalmente se seleccionó la curva guía que presenta menor cantidad de fallos y por tanto la que proporcione la mejor operación del sistema.

2.2. Investigaciones Locales

Análisis de escenarios de tiempo y demanda para la simulación del embalse Huacata, aplicando el software Hec ResSim

Sánchez Flores, K. M. (2017). *Análisis de escenarios de tiempo y demanda para la simulación del embalse Huacata, aplicando el software HEC – Ressim*. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Civil. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Tarija, Bolivia.

Objetivo: Analizaron diferentes escenarios tanto de tiempo como de demanda para la simulación del embalse Huacata aplicando la herramienta Hec ResSim.

Alcance: Para predecir el comportamiento del embalse y planificar mejor el manejo del recurso reunieron la información correspondiente a las características hidrológicas

que constituye uno de los escenarios básicos para el desarrollo del proyecto tal así que se han establecido características hidrológicas que van desde condiciones normales a extremas, es decir aporte de años secos, normales y húmedos. Otro de los escenarios planteados son las demandas con las cuales se ha concebido el proyecto, y las características físicas del embalse del estudio y las del proyecto una vez ya construido, la simulación de la operación se llevó a cabo a nivel diario, todas estas condiciones sumadas a las restricciones operacionales del embalse y sus componentes, permitieron establecer un modelo de operación adecuado de acuerdo a las condiciones planteadas.

Resultados: Los resultados obtenidos del análisis indican el comportamiento del embalse donde se resalta que en el estudio del proyecto se considera que es necesario la entrada de un caudal constante durante 5 meses por el canal trasvase para el llenado del embalse, en las simulaciones se observó que tanto para un escenario lluvioso como en un año normal hay rebose de agua en volúmenes bastante grandes, en el periodo en que se está trasvasando caudal, de manera que se presentó para cada escenario de tiempo y demanda una alternativa para minimizar este vertido, cuidando de que el embalse vuelva a llenarse, como resultado se llegó en un caso a no necesitar del aporte por el trasvase.

Para los tres escenarios (año lluvioso, húmedo y seco) para datos de embalse construido, se observó que no se satisfacen las demandas para un caudal extraído de 1400 l/s para ninguno de los escenarios planteados vaciándose el embalse en menos de 3 meses satisfaciendo solo un 65% de la demanda requerida para la central hidroeléctrica, en el caso de la demanda de riego y abastecimiento de agua potable 860 l/s se satisface la demanda al 100% para los tres escenarios planteados, aunque al presentarse un año seco el embalse tiene dificultades para volverse a llenar, finalmente al considerar como operación solo la demanda de riego 600 l/s también se cubre la demanda al 100% para los tres escenarios de tiempo, sin tener ningún problema en su llenado.

Los tres estudios nos muestran la importancia de analizar el funcionamiento de un embalse para gestionar óptimamente el uso del agua con la finalidad de evitar que se

presente déficits en la entrega de un caudal de demanda y hacer el uso eficiente del recurso hídrico.

Con las experiencias dadas se puede observar que es necesario analizar el funcionamiento de un embalse bajo condiciones extremas para realizar una planificación adecuada a la demanda a satisfacer, porque que cada año se puede caracterizar como año húmedo o seco debido de la diversidad de las precipitaciones durante el año. Para ello se debe realizar un balance hídrico de la cuenca y un balance hídrico del embalse en estudio, donde se podrá determinar si existe un déficit o no, evaluando la variación de los volúmenes y niveles durante la operación del embalse, y así proponer soluciones factibles para el uso del agua frente a la demanda.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1. Conceptos generales sobre embalses

3.1.1. Definición

Embalse o reservorio es la gran acumulación de agua, generado por el represamiento de uno o varios ríos.

3.1.2. Tipos de embalses

Se clasifican en:

Naturales. Son consecuencia de derrumbes de laderas o acumulaciones de hielo, generalmente tienen una vida corta.

Artificiales. Son consecuencia de una presa de tierra o de hormigón. Este tipo de embalses son empleados con los siguientes propósitos: generación de energía eléctrica, riego, control de inundaciones, control de sedimentos, agua potable, entre otros. (Celi et al, 2013:17)

3.1.3. Estructuras que conforman los embalses

Las principales partes que conforman un embalse son:

Presa. Son estructuras hidráulicas concebidas para almacenar agua durante los periodos de alto escurrimiento superficial para su uso durante las épocas de estiaje.

Aliviadero. Es una estructura de alivio que tiene la finalidad de descargar los excedentes que llegan al embalse durante las crecidas.

Obras de Toma. Son un conjunto de obras formado por una estructura de entrada o toma, un túnel o conducto a través de la presa y una estructura de salida con el objetivo de extraer el agua de forma controlada y poder utilizarla con algún fin. (Alegret et al, 2005:2)

3.1.4. Características de un embalse

3.1.4.1. Curvas de áreas y volúmenes

Las curvas cota-área-volumen, permiten conocer gráficamente los volúmenes capaces de ser almacenados y las áreas a ser inundadas para cualquier altura de la presa. Estas a su vez permiten seleccionar varias alternativas que presenten mayores capacidades para una misma altura de la presa.

3.1.4.2. Alturas características en el embalse

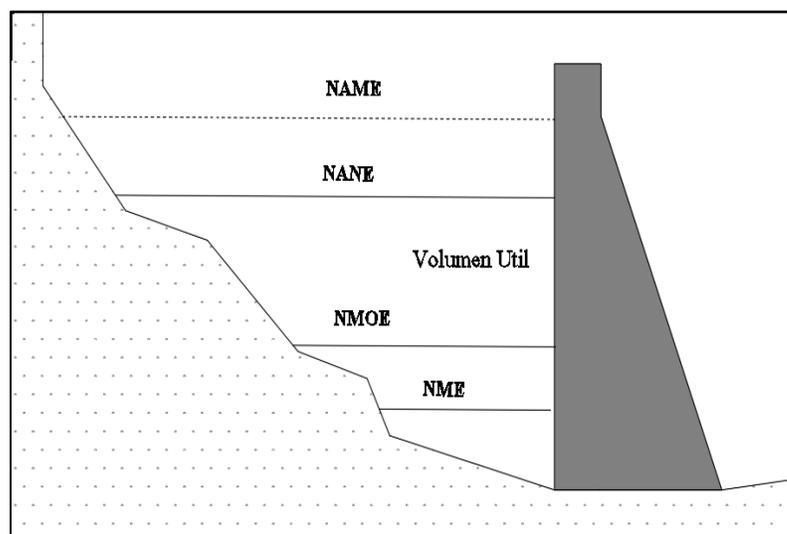


Figura 3.1 Niveles característicos de un embalse

Fuente: Guevara, 2013

Nivel de embalse muerto (NME). Es el nivel mínimo de agua en el embalse, delimita superiormente el volumen muerto del embalse el cuál debe exceder en capacidad al volumen de sedimentos calculado durante la vida útil con el fin de que el embalse los pueda contener.

Nivel mínimo de operación del embalse (NMOE). Delimita superiormente el volumen generado por la altura mínima del agua necesaria para el correcto funcionamiento de toma de agua la que se sitúa por encima de NME.

Nivel normal del agua (NANE). Delimita superiormente al volumen útil del embalse, que es el que se aprovecha y gasta en función de diferentes propósitos: energía, riego,

suministro de agua, etc. Para su ubicación se tienen en cuenta los siguientes aspectos: aportes de la cuenca, demanda de agua, pérdidas por infiltración y evaporación.

Nivel de aguas máximo de embalse (NAME). Es el nivel máximo que alcanza la superficie del reservorio se le conoce como nivel de aguas máximo de embalse (NAME). Se presenta durante la época de avenida donde se producen caudales en el río que deben ser evacuados por el vertedero de excedencia, alcanzando la superficie de agua del reservorio a levantarse por encima del nivel de aguas máximo de operación (NAMO).

3.1.4.3. Volúmenes característicos

Volumen de sedimentos. Estimado mediante estudios de hidráulica fluvial y de transporte de sedimentos. Los diseños deben asegurar que haya suficiente espacio de almacenamiento de sedimentos para que, durante los años de operación proyectados, los sedimentos no obstaculicen el funcionamiento de las estructuras de captación.

Volumen muerto. Está asociado al volumen de sedimentos, se considera como el volumen almacenado hasta alcanzar el nivel mínimo.

Volumen útil de almacenamiento. Es el volumen comprendido entre el nivel mínimo y el nivel máximo operacional. Se lo utiliza para abastecer las demandas y las pérdidas de agua durante un período determinado de funcionamiento del embalse. Cuando el volumen útil es menor que el volumen requerido entonces el embalse no está en capacidad de suministrar la demanda durante todo el tiempo y se presentan fallas en el suministro con el consiguiente racionamiento.

Volumen de laminación. Es el volumen comprendido entre el nivel máximo operacional y el nivel de avenida máxima, se lo utiliza para reducir el caudal vertido en las avenidas y así limitar los daños aguas abajo. (Córdova, 2015:23-24)

3.2. Balance Hidrológico

El Balance Hidrológico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea. Se aplica cuando se realiza una

distribución de los recursos hidráulicos a nivel global, o en cuencas particulares. Es imprescindible en los estudios de regulación de embalses y en los proyectos de suministro de agua para acueducto, riego y generación hidroeléctrica.

El cálculo del balance hídrico en una cuenca o en una región determinada, permite obtener información sobre: el volumen anual de escurrimiento o excedentes; el período en el que se produce el excedente y por tanto la infiltración o recarga del acuífero; y el período en el que se produce un déficit de agua o sequía y el cálculo de demanda de agua para riego en ese período.

El establecimiento de un balance supone la medición de flujos de agua (caudales) y almacenamientos de la misma (niveles). Se pueden establecer balances de forma general, incluyendo aguas superficiales y subterráneas y parciales de sólo aguas superficiales, de un acuífero, del agua del suelo, etc. En cualquier caso, a la hora de establecer el balance se examinan las entradas y las salidas en el sistema analizado, es decir, se aplica la Ecuación de Continuidad sobre un volumen de control delimitado por una superficie de referencia a través de la cual el agua se mueve desde la parte interna a la externa y viceversa, siendo un sistema abierto a flujos de masa, cantidad de movimiento y de energía.

Así, el balance se reduce a la cantidad de agua que queda almacenada: (Fattorelli, 2011:21).

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Variación de almacenamiento}$$

3.2.1. Componentes que intervienen en el balance hidrológico

Los principales elementos del balance hídrico son:

- Precipitación
- Infiltración
- Evaporación
- Evapotranspiración

- Escorrentía superficial

Precipitación. La precipitación incluye la lluvia, la nieve, y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como granizo y nevisca. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. (Chow, 1994:65)

Infiltración. Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. (Aparicio, 1989:177)

Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica y el contenido de humedad presente en el suelo. (Chow, 1994:110)

Evaporación. Se define como evaporación al proceso físico por el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y representa la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera.

El cambio de estado de líquido a vapor se debe a la radiación solar que brinda la energía necesaria para que las moléculas del agua cambien de estado. Además de la radiación solar, las variables meteorológicas que intervienen en la evaporación, particularmente de las superficies libre de agua, son la temperatura del aire, velocidad de viento, tensión de vapor o humedad relativa del ambiente, determinando el poder evaporante de la atmósfera, que es la capacidad del aire que rodea a la superficie evaporante para admitir vapor de agua. (Gallardo, 2018:39)

Evapotranspiración. Es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Los mismos factores que dominan la evaporación desde una superficie de agua abierta también dominan la evapotranspiración, los cuales son: el suministro de energía y el transporte de vapor. Además, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un tercer factor que se debe tener en cuenta. A medida que el suelo se seca, la tasa de

evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. (Chow, 1994:93)

Escorrentía superficial. Usualmente cuando la tasa de la precipitación o de la fusión nival excede la tasa de infiltración superficial, el exceso de agua comienza a acumularse temporalmente en pequeñas depresiones de la superficie del suelo o simplemente escurre convirtiéndose en escorrentía superficial. El total de la precipitación puede considerarse constituida de dos componentes: una de “exceso de lluvia” o “precipitación efectiva” y otra de “pérdidas”. La primera es la que contribuye directamente a formar la escorrentía superficial, mientras que la segunda, es la precipitación remanente como evaporación, evapotranspiración, interceptación por vegetación o por el suelo e infiltración que en un principio no aporta a la escorrentía superficial. El proceso así descrito incluye otros componentes como escorrentía subsuperficial y el flujo subterráneo. (Fattorelli, 2011:61)

3.3. Estimación de caudales continuos de entrada al embalse

3.3.1. Modelo de balance hídrico

El modelo a utilizar, es el modelo de evaluación y planificación del agua (WEAP). Se trata de un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. El modelo tiene la capacidad de simular procesos como: lluvia escorrentía, flujo base, recarga subterránea, etc. De igual manera, tiene capacidad para hacer análisis sectoriales, de conservación de agua, derechos de agua, operación de embalses, generación hidroeléctrica, rastreo de contaminantes, calidad de agua, valoración de vulnerabilidad y mantenimiento de los requerimientos de los ecosistemas, también cuenta con un módulo de análisis financiero que permite hacer comparaciones beneficio-costos de diferentes proyectos o alternativas y explorar escenarios alternativos de largo alcance.

Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y

flujo base (Figura 3.2) WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como catchments.

Los catchments tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. A través de este proceso se obtiene la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal dentro de cada zona de captación.

Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, datos de caudales en estaciones de medición son necesarios para poder comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones. Finalmente, en el análisis de oferta de agua es necesario incorporar la información relativa a la infraestructura física de control y aprovechamiento existente al interior de la cuenca. (Centro de Cambio Global et al, 2009:17)

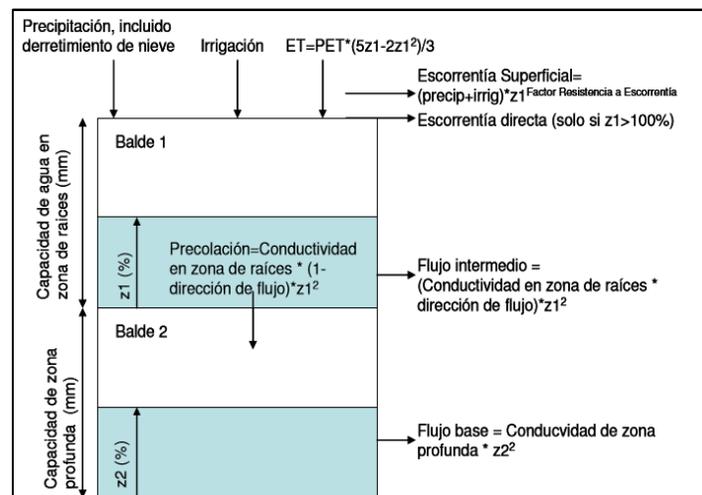


Figura 3.2 Elementos Hidrológicos modelados en WEAP

Fuente: Centro de Cambio Global et al, 2009

3.3.1.1. Métodos de simulación en procesos hidrológicos

Actualmente WEAP permite escoger entre cinco métodos de simulación de procesos hidrológicos que son:

- **Escurrimiento de riego (método de coeficiente simplificado).** Es el método más simple, utiliza los coeficientes de los cultivos para calcular la EP/demanda de riego de los cultivos en la cuenca. No simula procesos de escorrentía, infiltración o cambios en la humedad de suelo.
- **Solo demandas de lluvia (método de coeficiente simplificado).** También usa los coeficientes de los cultivos, pero simula el resto de la precipitación como escorrentía hacia un río y/o hacia agua subterránea.
- **Escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo).** Es más complejo, representa la cuenca con dos capas de suelo, además del potencial para la acumulación de nieve. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo poco profundo y cambios en la humedad del suelo. En la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y cambio en la humedad de suelo.
- **MABIA (Doble KC, diario, FAO 56).** El Método MABIA es una simulación diaria de la transpiración, la evaporación, las necesidades de riego/la programación, el crecimiento del cultivo y los rendimientos.
- **Desarrollo de Plantas (diario; CO₂, efectos de estrés por agua y temperatura).** Simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua, y el rendimiento utilizando una etapa de tiempo diario.

3.3.1.2. Modelo hidrológico WEAP (Método de la humedad del suelo)

Es un modelo unidimensional, el cual consiste en la noción de transferencia de agua entre dos contenedores (buckets): un balde superior que representa la zona de raíces, y un balde inferior que representa la interacción con el acuífero, los cuales representa la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, sub superficial, percolación, para un elemento de análisis o cuenca.

3.3.1.2.1. Ecuación del tanque superior

El modelo permite dividir la cuenca o sub cuencas (catchments) en varios elementos N de acuerdo a una característica específica. El modelo realiza un balance en cada sub elemento j de N donde hay un balance hídrico calculado para cada área fraccional. El clima es uniforme sobre cada área fraccional donde la ecuación de balance de masa continuo se escribe como:

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

Tabla 3.1 Definición de términos del balde superior

Término	Ecuación
1er término: Cambio en la humedad en un suelo j.	$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$
2do término: Precipitación efectiva incluye riego y derretimiento de nieves	$Pe(t)$
3er término: Evapotranspiración potencial.	$PET(t) \cdot k_{c,j}(t) \cdot \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$
4to término: Escorrentía superficial.	$Pe(t) \cdot z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}}$
5to término: Flujo intermedio	$f_j k_{s,j} z_{1,j}^2$
6to término: Percolación	$(1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por el MMAyA y VRHR

Tabla 3.2 Definición de variables del balde superior y descripción WEAP

Variable	Definición	Descripción WEAP
$k_{c,j}(t)$	Coefficiente de cobertura vegetal en un suelo j.	Coefficiente de cultivo.
Sw_j	Capacidad de almacenamiento en zona de raíces.	Capacidad de agua de suelo
RRF_j	es el factor de resistencia de escurrimiento para cada fracción de cobertura	Factor de resistencia a la escorrentía
$K_{s,j}(t)$	Estimación de la conductividad en la zona de raíces saturada (mm/paso de tiempo)	Conductividad en zona radicular.
f_j	Coefficiente de partición o división relacionado al suelo, tipo de cobertura, y la topografía que fraccionan el agua en dos componentes, vertical y horizontal	Dirección preferencial del flujo
$Z_{1,j}$	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de raíz (inicial).	Z_1 inicial

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por el MMAyA y VRHR

El escurrimiento superficial y de inter flujo RT se define en la siguiente expresión:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(Pe(t) \cdot z_{1,j} \frac{RRF_j}{2} + f_j \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2 \right)$$

3.3.1.2.2. Ecuación del tanque inferior

El modelo permite definir el escurrimiento dirigido hacia elementos como ríos y acuíferos. Para los casos en que no se tiene estas condiciones, el flujo base del segundo contenedor es estimado con la siguiente ecuación:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{2,j}^2$$

Tabla 3.3 Definición de términos del balde inferior

Término	Ecuación
1er término: Flujo de entrada en el balde inferior.	$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt}$
2do término: Flujo base	$k_d z_{1,j}^2$
3er término: Percolación	$(1 - f_j) k_s z_{2,j}^2$

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por el MMAyA y VRHR

Tabla 3.4 Definición de variables del balde inferior y descripción en WEAP

Variable	Definición	Descripción WEAP
Dw_j	Capacidad de almacenamiento en zona profunda.	Capacidad agua profunda.
kd	Tasa de conductividad de almacenamiento inferior	Conductividad profunda
Z_2	Almacenamiento relativo dado como fracción del almacenamiento total en la zona de profunda.	Z_2 inicial

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por el MMAyA y VRHR

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

Donde el flujo de entrada hacia este balde, S_{max} es la percolación desde el balde superior dado en la ecuación de Sw_j , y k_d es la conductividad saturada en el balde inferior (mm/paso de tiempo de simulación), la cual está dada como un valor general para la cuenca (no lleva subíndice j). Las ecuaciones de Sw_j , y S_{max} son resueltas por medio de iteración para obtener valores coincidentes en ambos contenedores (WEAP utiliza el algoritmo predictor-corrector). Si se quisiese realizar una representación de acuíferos de forma separada y se estableciera un elemento para este tipo de estructura (acuífero

aluvial), el segundo término de la ecuación de S_{\max} , es ignorado y la recarga R (volumen/paso de tiempo) hacia el acuífero es:

$$R = \sum_{j=1}^N A_j \cdot (1 - f_j) \cdot k_{s,j} \cdot z_{1,j}^2$$

Donde R es la percolación A_j es el área de aporte del elemento j. (Yates et al, 2005:490-495)

3.3.2. Calibración del modelo

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados, así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas. (Centro de Cambio Global et al, 2009:63)

3.3.2.1. Medidas de bondad de ajuste

La calibración de modelos usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Para este fin, se hace uso de diferentes “medidas de bondad de ajuste”, entre las cuales podemos mencionar:

- Coeficiente de Nash – Sutcliffe
- Coeficiente de PBIAS o desviación relativa de los caudales (Weglarczyk)

Coeficiente de Nash – Sutcliffe. El criterio de Nash – Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología. Esta medida propuesta por Nash y Sutcliffe 1970, busca establecer la eficiencia del modelo para predecir los caudales en comparación con la utilización de la media como predictor de la variable. Un coeficiente de NS = 0 implica

que el modelo pronostica los caudales de igual forma a como lo haría la media de los datos observados, un NS negativo implica que la media es mejor predictor y un NS mayor a 0 implica que el modelo es mejor predictor que la media.

$$NC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde:

$Q_{s,i}$ = Caudal simulado en el paso de tiempo i

$Q_{o,i}$ = Caudal observado en el paso de tiempo i

\bar{Q}_o = Promedio de los caudales observados

n, i = Número total de pasos de tiempo

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $NC=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$.

Cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele utilizar la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe”. (Centro de Cambio Global et al, 2009:65)

$$NC_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{s,i} - \log Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{o,i} - \log \bar{Q}_o)^2}$$

Coficiente de PBIAS o desviación relativa de los caudales (Weglarczyk). El “BIAS” o sesgo estadístico es la diferencia entre el promedio de los valores medidos y los valores estimados. Sirve para evaluar la existencia de errores sistemáticos de sub o sobreestimación de la variable modelada.

La tendencia de los datos simulados debe ser mayores o menores a los datos observados, El sesgo porcentual de PBIAS debe estar entre el $\pm 25\%$.

$$Bias = \frac{\bar{Q}_s - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \cdot 100$$

Donde:

Bias = Coeficiente de BIAS

\overline{Q}_s = Promedio de los caudales simulados

\overline{Q}_o = Promedio de los caudales observados

Bias: entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobre estimación y un Bias negativo indica sub-estimación de caudales. (Centro de Cambio Global et al, 2009:66)

Tabla 3.5 Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación

BIAS	Nash	Interpretación modelo
BIAS <±10	0,75<Nash≤1,0	Muy Bueno
±10≤BIAS<±15	0,65<Nash≤0,75	Bueno
±15<BIAS<±25	0,5≤Nash≤0,65	Satisfactorio
BIAS≥±25	Nash<0,5	No Satisfactorio

Fuente: Moriasi et. al., 2007

3.4. Balance hídrico en embalses

La ecuación fundamental para la simulación del funcionamiento de embalses es la de continuidad, que expresada en un intervalo de tiempo Δt dado es:

$$X - D = \Delta V$$

Donde:

X= Volumen de entradas al embalse durante el intervalo Δt

D= Volumen de salidas del embalse durante el mismo intervalo

ΔV = Cambio del volumen almacenado en el embalse durante el intervalo Δt

El intervalo de tiempo que se use depende del tamaño del embalse; generalmente se toma Δt = un mes, pero en embalses muy grandes, cuyos efectos reguladores alcanzan a cubrir lapsos del orden de años, Δt puede ser de varios meses, pero nunca mayor de

un año; por el contrario, en embalses de muy poca capacidad de regulación, el intervalo de simulación puede reducirse a una semana o hasta un día.

Las entradas a un embalse son:

$$X = E_{cp} + E_t + E_{ll}$$

Donde:

E_{cp} = Entradas por cuenca propia

E_t = Entradas por transferencia desde otras cuencas

E_{ll} = Entradas por lluvia directa sobre el embalse

Las salidas se componen de:

$$D = S_d + S_e + S_i + S_{de}$$

Donde:

S_d = Volumen extraído para satisfacer la demanda

S_e = Volumen evaporado

S_i = Volumen infiltrado en el embalse

S_{de} = Volumen derramado

3.4.1. Entradas al embalse

3.4.1.1. Entradas por cuenca propia

Son los volúmenes de escurrimiento superficial generados en la cuenca no controlada que descarga directamente a la presa, que está delimitada por el sitio de la boquilla; donde se localiza la cortina; y las presas situadas arriba.

3.4.1.2. Entradas por transferencia desde otras cuencas

Estas entradas provienen de las descargas libres o controladas de presas situadas arriba de la presa en cuestión o en otras cuencas. Si existen estas transferencias, siempre serán conocidas.

3.4.1.3. Entradas por lluvia directa sobre el embalse

El volumen de lluvia que cae directamente sobre el embalse es igual a la altura de precipitación multiplicada por el área que tenga la superficie libre del embalse, en promedio, durante el Δt usado en el cálculo. El área se determina por medio de la curva elevaciones – áreas del embalse.

3.4.2. Salidas al embalse

3.4.2.1. Volumen extraído para satisfacer la demanda

Está constituido por la ley de demandas bajo análisis, la cual depende, por un lado, del tipo de aprovechamiento de que se trate: agua potable, riego, generación de energía eléctrica, etc. y, por otro, de la relación beneficio/costo de la obra. Para fines de la simulación del funcionamiento del embalse, este volumen siempre es un dato.

3.4.2.2. Volumen evaporado directamente del embalse

La evaporación se mide en lámina o altura. Si se tienen evaporímetros cerca del embalse, la evaporación registrada se corrige y, por lo tanto, el volumen de evaporación se calcula de manera similar al de la lluvia directa sobre el embalse.

3.4.2.3. Volumen infiltrado en el embalse

Este volumen es difícil de medir, afortunadamente en general es muy pequeño; si se estima lo contrario, entonces será necesario realizar un estudio geológico detallado del embalse que proporcione los elementos para su cálculo.

3.4.2.4. Volumen derramado

El volumen de agua que sale por la obra de excedencias es resultado de la simulación y depende de los niveles característicos (especialmente del NANE) y de la política de operación de las compuertas que se defina para cada opción. (Aparicio, 1989:78-83)

3.5. Modelos de simulación

Los embalses son construidos y operados para múltiples propósitos tales como: control de inundaciones, generación de energía, uso recreativo, riego, además de la seguridad

estructural de la presa. Cada una de estas necesidades impone restricciones en el almacenamiento y liberación del suministro de agua, por lo que se han creado modelos de simulación de almacenamiento que ayudan a optimizar el buen funcionamiento del embalse.

El HEC Reservoir System Simulation (HEC-ResSim) es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, para ayudar a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a esto determinar las salidas de agua durante la operación del día a día del mismo. HEC-ResSim es único entre los modelos de simulación de embalses, pues ayuda a la toma de decisiones para un mejor funcionamiento de los reservorios.

La naturaleza generalizada de HEC-ResSim, su esquema flexible para describir la operación de los embalses y sus nuevas y potentes características, hacen que sea aplicable para modelar casi cualquier sistema de almacenamiento de usos múltiples. El programa representa el comportamiento físico de sistemas de almacenamiento por medio de una combinación de cálculos hidráulicos para flujos a través de las estructuras de control, y de tránsito hidrológico para representar el desfase y la atenuación de los flujos a través del cauce del río. HEC-ResSim ha progresado a través de tres grandes versiones, y su procedimiento de decisión se ha vuelto más complejo para satisfacer las necesidades del usuario. (USASE, 2013:1)

3.5.1. Análisis de simulación

Los modelos de simulación usan entradas (hidrología), operaciones (reglas de decisión) y balance de masas dentro de la cuenca (conectividad) para representar el comportamiento hidrológico de un sistema de embalses (Wondye, 2009:93).

El desarrollo del sistema implica seleccionar indicadores de flujo y/o almacenamiento, cuyos objetivos y características el modelador las considera importantes. Entre los indicadores se pueden incluir: niveles de almacenamiento del embalse, flujos de

entrada a las corrientes, generación hidroeléctrica, riego, abastecimiento de agua, derivaciones.

Para una simulación, el modelador primero ejecuta cálculos usando indicadores seleccionados para un caso base, representando así el comportamiento hidrológico existente del sistema. Posterior a ello, el modelador desarrolla una serie de alternativas para analizar el comportamiento del sistema cambiando características del embalse como son: asignación de almacenamiento, reglas de operación, demandas, niveles, etc. y ejecuta cálculos para estas hipótesis. Por último, el modelador compara los resultados de los casos base con los de las hipótesis planteadas. El objetivo del trabajo de simulación consiste en la formulación de varias alternativas que deber ser ejecutadas y sus resultados comparados y explicados. (Wondye, 2009:94).

3.5.2. Reglas de operación

HEC-ResSim utiliza un enfoque basado en normas con el fin de imitar la toma de decisiones operativas que siguen los operadores de los reservorios en el establecimiento de los calendarios de lanzamiento. Al igual que como lo haría un operador, el HEC-ResSim, para procesos de descarga de agua del embalse considera variables tales como: época del año, condiciones hidrológicas, y operaciones simultáneas con otros embalses dentro del sistema (USACE, 2013:269).

En la mayoría de los embalses, los requerimientos y limitaciones de flujo varían dependiendo del nivel de agua en el reservorio. Dado esto, las reglas cambian dependiendo de la cantidad de agua almacenada. HEC-ResSim describe esta dependencia dividiendo la piscina del embalse en zonas (Ver Figura 3.3 y 3.4) y aplicando un conjunto de diferentes normas a cada una de las zonas de trabajo en el reservorio.

Por defecto HEC-ResSim crea tres zonas dentro de un embalse: Flood control, Conservation e Inactive. Una zona de operación es descrita por una curva de elevación de agua (puede ser constante figura 3.3, o puede variar estacionalmente figura 3.4) que representa la parte superior de la zona. Cuando el nivel del agua en la piscina exceda

la parte superior (o fondo) de una zona, sus reglas no se pueden aplicar para toma de decisiones.

Un embalse en HEC-ResSim debe tener una elevación de destino, esta elevación comúnmente llamada curva guía es representada como una función del tiempo. La curva guía, como se muestra en la figura 3.3, es la línea divisoria entre la zona superior del reservorio (llamada zona de control de inundaciones) y la zona inferior (zona de conservación).

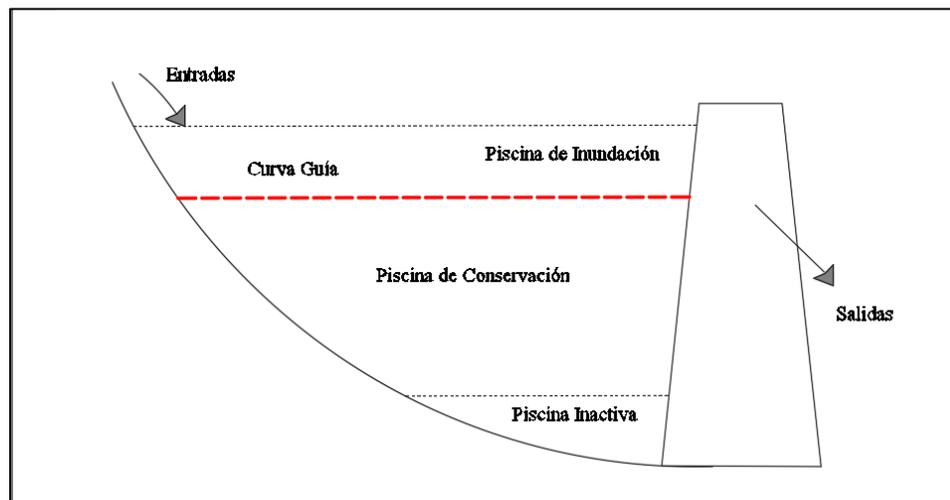


Figura 3.3 Curva guía y zonas constantes de un embalse según HEC-ResSim

Fuente: Elaboración propia en base a Wondye, 2009

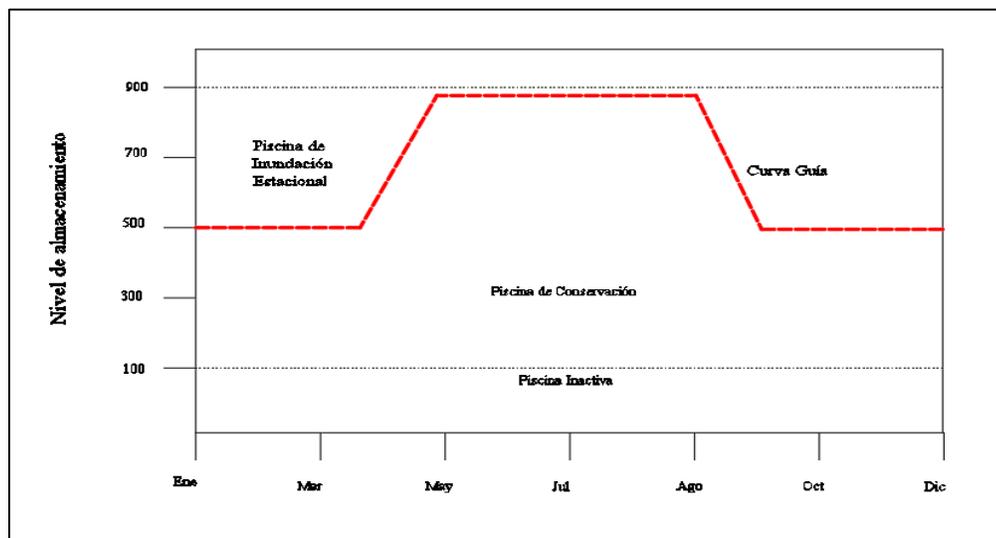


Figura 3.4 Curva guía y zonas estacionales de un embalse según HEC-ResSim

Fuente: Elaboración propia en base a Wondye, 2009

Cuando altos flujos de entrada invaden la zona de inundación y elevan el almacenamiento por encima de la curva guía, el embalse requiere liberar agua tan rápidamente como sea posible; cuando el nivel de la piscina está por debajo de la curva guía, el reservorio requiere liberar menos agua de la que está entrando. Todas las reglas de operación y las limitaciones físicas actúan como restricciones de almacenamiento con el objetivo de volver a la piscina a su curva guía.

3.5.3. Metodología de funcionamiento

HEC-ResSim tiene tres conjuntos de funciones llamados módulos, los cuales proveen el acceso a directorios y datos específicos de la configuración en curso. Estos módulos son:

- Watershed Setup (Configuración de Cuencas)
- Reservoir Network (Red de Reservorios)
- Simulation (Simulación)

Cada módulo tiene un propósito único y se encuentra asociado a un conjunto de funciones accesibles a través de menús y barras de herramientas. En la figura 3.5 se muestran los elementos básicos de modelamiento disponibles en cada módulo.

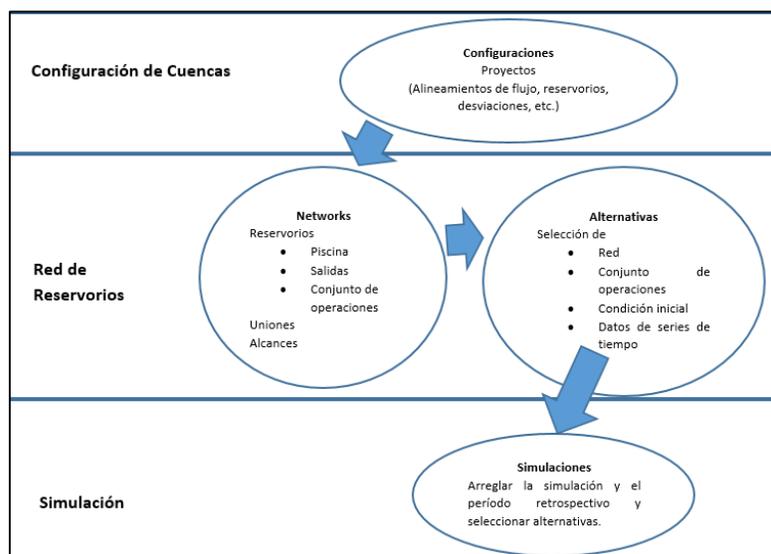


Figura 3.5 Elementos básicos de modelamiento

Fuente: Elaboración propia

El programa representa el comportamiento físico de sistemas de almacenamiento grandes y pequeños por medio de una combinación de cálculos hidráulicos para flujos a través de estructuras de control, y de tránsito hidrológico para representar el desfase y la atenuación de los flujos a través del cauce del río. (Celi et al, 2013:30-31)

3.5.3.1. Módulo Watershed Setup (Configuración de Cuencas)

El objetivo del módulo de configuración de cuencas es proporcionar un marco común para la creación de las cuencas hidrográficas y la definición entre las diferentes aplicaciones de modelación.

Una cuenca se asocia con una región geográfica para lo cual se pueden configurar múltiples modelos y coberturas de área. Una cuenca puede incluir todos los ríos, los proyectos (por ejemplo, embalses, diques), sistema de coordenadas, áreas de impacto, ubicaciones de series de tiempo y datos hidrológicos e hidráulicos para un área específica. Una vez configurado, forman un marco de cuencas. Cuando se crea una nueva cuenca, HEC-ResSim genera una estructura de directorios para todos los archivos asociados a la cuenca.

En el módulo de configuración de cuencas, se configurará la disposición física de cuencas hidrográficas como: mapas de fondo, la corriente de alineación, proyectos y datos georreferenciados. Se define proyectos y puntos de computación asociados a configuraciones específicas en la cuenca, los proyectos pueden incluir embalses, diques, desvíos y otros proyectos.

3.5.3.2. Módulo Reservoir Network (Red de Reservorios)

El módulo de red de embalse representa una colección de elementos de cuencas conectadas por alcances de enrutamiento (ríos). Los elementos creados en el módulo de configuración de cuencas pertenecen a configuraciones específicas de las cuencas hidrográficas, y cuando se crea una red de embalse se hace referencia a una de esas configuraciones.

Los puntos de cálculo definidos en el módulo de configuración de cuencas se convierten automáticamente en los cruces en el módulo de la red de embalse. Su tarea principal en el desarrollo de una red de embalse es conectar los alcances de enrutamiento.

El módulo de la red de embalse proporciona las herramientas, como introducir y editar los datos físicos y de operaciones. A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos más importantes del módulo Reservoir Network: (Celi et al, 2013:30-33)

- **Junctions** (Unión). Representan confluencia de corrientes o puntos donde flujos externos entran al sistema. HEC-ResSim no calcula el escurrimiento, por tanto, todos los flujos locales se deben introducir en los cruces como flujos externos. El flujo de salida de un junction es simplemente la suma de los flujos que llegan a la junction.
- **Routing reach** (Alcance de enrutamiento). Representan las corrientes naturales en el sistema. El retardo y la atenuación de flujo en un tramo se calcula por medio de una variedad de métodos de tránsito hidrológico, tales como: Muskingum, Puls Modificado, Muskingum-Cunge. Las pérdidas por filtraciones pueden ser también especificadas para cada tramo.
- **Diversion** (Desviación). Representa una "retirada" de agua de la corriente natural. La cantidad de la retirada se puede especificar como una cantidad constante o como una función de algunos parámetros tales como el tiempo o flujo. Una parte o la totalidad del agua derivada, puede regresar al sistema o puede ser completamente eliminada de él.
- **Reservoir** (Embalse). Es el elemento más complejo del reservoir network. Se compone de una piscina y una presa. HEC-ResSim asume que el comportamiento hidráulico de la piscina queda completamente definido por la curva cota-área-volumen.

- **Dam** (Presa). Permite al usuario describir las diferentes salidas del embalse en tanto detalle cómo se considere necesario. Existen dos tipos de salidas: las básicas y las salidas avanzadas.
 - ✓ Las salidas básicas son: las controladas y las no controladas. Un ejemplo de salida no controlada es el desborde por un vertedero (no hay estructura de control que regule el flujo), una salida controlada puede estar representada por una compuerta o válvula, capaz de regular el flujo.
 - ✓ Las salidas avanzadas son: plantas de energía y bombas. Los dos tipos son salidas controladas con características adicionales que permiten representar sus propósitos especiales. (USACE, 2013:51-52)

3.5.3.2.1. Definición de alternativas y set de operaciones

Luego de construir el esquema de red (network), hay que asignar datos físicos y operacionales a los sistemas de embalse, para ello hay que utilizar datos característicos del reservorio. Los datos físicos hacen referencia a la relación entre la elevación - área volumen del embalse, a las pérdidas por infiltración y por evaporación y a las salidas que este disponga (las salidas fueron definidas en el apartado anterior - sección Dam). Los datos operacionales se relacionan con las demandas, es decir, con las extracciones en cada una de las zonas de almacenamiento (si el nivel de almacenamiento se encuentra en la zona de inundación, en la de conservación o en la muerta).

Por tanto, antes de pasar al módulo simulation, este módulo queda definido al determinar las alternativas que especifican el reservoir network, los sets de operación, las condiciones iniciales, y la asignación de nombres de ruta DSS.

HEC-DSS es una herramienta que ResSim utiliza principalmente para almacenar y acceder a datos de series de tiempo, cuenta con una amplia capacidad para manipulación de datos, edición, trazado de gráficos, etc. Por medio de esta base de datos se realiza el ingreso de las entradas al sistema y otros datos de series de tiempo,

que hayan sido definidas durante la creación de alternativas o escenarios. (Celi et al, 2013:35)

3.5.3.3. Módulo Simulation (Simulación)

El módulo simulación se ha diseñado para facilitar la fase de análisis del modelamiento del reservorio, en este se crean y corren simulaciones (USACE, 2013). Por tanto, una vez que el modelo del embalse está completo y las alternativas han sido definidas, el módulo simulation se usa para configurar la simulación. Los cálculos son ejecutados y los resultados visualizados. En este módulo además de definir tiempos de simulación y condiciones iniciales, se seleccionan las alternativas e intervalos de cálculo. (Celi et al, 2013:36-37)

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción general del proyecto

La presa Calderas fue construida por el consorcio SANTA ANA, la construcción se dio inicio por el año 2009 y su conclusión fue alrededor del año 2013, los canales principales y el trasvase se construyeron de forma paralela concluyéndose el año 2014.

La presa está construida sobre el río Calderas, el tipo de presa es de enrocado con pantalla de hormigón de 32 m de altura desde el lecho del río hasta la corona, con una capacidad total de 4,91 hm³. La corona tiene una longitud de 214 m y un ancho de 96 m en el fondo del valle y 6 m en la parte superior.

La presa Calderas debe suministrar agua para riego a la zona de Yesera Sur que comprende a las comunidades Caldera Chica, Hornos y Curuyo, parte del cantón Santa Ana; zona Santa Ana la Nueva y las parcelas de las comunidades: Barbecho, Santa Ana Baja y al final del área las parcelas de la comunidad Gamoneda.

Debido a la falta de canales secundarios y terciarios los comunarios riegan a través de canales rústicos de tierra.

La presa capta y almacena el recurso hídrico durante todo el año, recibe aportes de caudal de la cuenca Calderas e indirectamente de la cuenca Yesera a través de un canal de trasvase, su aprovechamiento se efectúa durante todo el año.

Actualmente se riega una superficie total de 93,10 ha de las 151,10 ha irrigadas en invierno y verano.

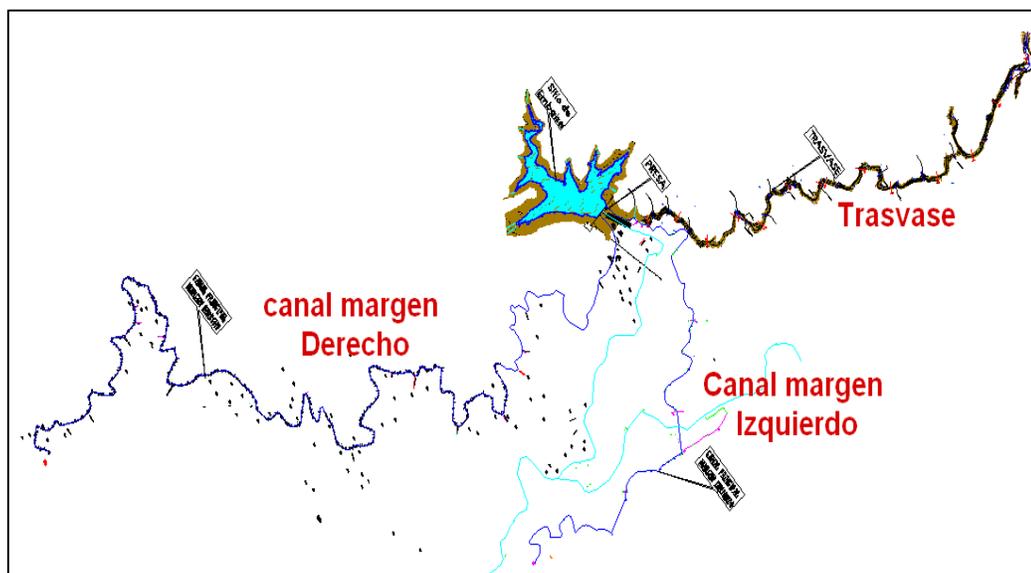


Figura 4.1 Esquema del sistema hidráulico

Fuente: Proyecto Construcción Obras Complementarias a la Presa Calderas, 2018

4.2. Caracterización del área de estudio

4.2.1. Ubicación

El proyecto de riego de Calderas se encuentra en la primera Sección Municipal Cercado del Departamento de Tarija entre las coordenadas geográficas 21° 24' a 21° 33" de latitud sur, y 64° 32' a 64° 38' de longitud oeste. La cuenca de cabecera del río Santa Ana incluye las dos subcuencas de los ríos Calderas y Yesera, que son las que aportan a la presa Calderas. Ambas recaen al este de la ciudad de Tarija y en el interior de la Primera Sección Municipal de la Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

En el proyecto se consideró:

La subcuenca de aporte del río Calderas hasta la sección de la presa (30,45 km²).

La sub cuenca de aporte del río Yesera, hasta la sección de derivación (107,33 km²).

El perímetro de riego con su área de influencia directa, que se encuentra en las comunidades de Caldera Chica, Hornos, Curuyo, Barbecho, Santa Ana Baja y Gamoneda.

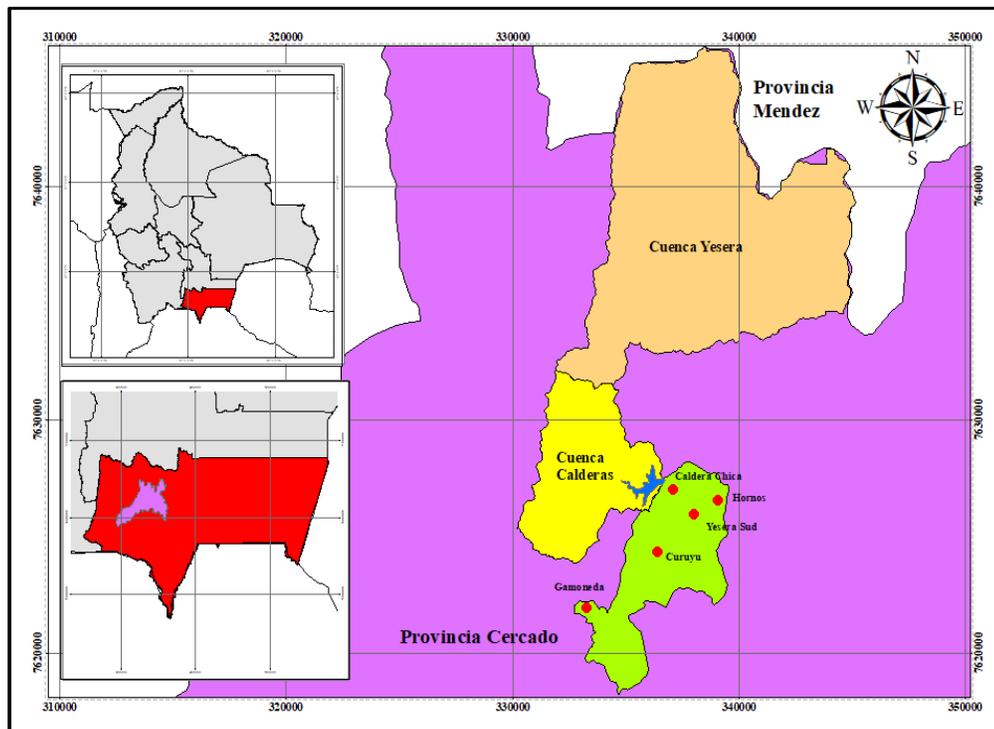


Figura 4.2 Ubicación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Clima

En las zonas de Calderas y Yesera el clima es árido a semiárido con presencia de heladas durante 6 a 11 meses por año, las que disminuyen su intensidad en el periodo entre los meses de noviembre a marzo. La vegetación natural está compuesta por matorrales bajos a altos, ralos a dispersos, mayormente siempre verdes y xeromórficos con un estrato herbáceo compuesto por gramíneas muy pobre. La precipitación media anual en la zona de Calderas es de 561,21 mm y en la cuenca de Yesera la precipitación media anual es de 540,83 mm, en cuanto a la temperatura se presenta medias de 18° C durante el verano y en invierno hasta temperaturas bajo 0°C.

4.2.3. Selección de Escala y Periodo de Estudio

Los procesos hidrológicos ocurren a diferentes escalas, desde el flujo en suelos no saturados en una masa de poca profundidad hasta inundaciones que abarcan regiones

de varios kilómetros de extensión (escala espacial); desde inundaciones repentinas en ríos de montaña hasta flujos en acuíferos con respuestas lentas perceptibles por varios años (escala temporal). En el presente estudio la elección de las escalas obedece a los objetivos del estudio.

4.2.3.1. Escala Temporal

La elección de esta escala está definida de acuerdo a la disponibilidad y requerimiento de información necesaria para alcanzar los objetivos planteados.

Para la cuenca de Calderas y Yesera se consideró las siguientes escalas temporales en función de la disponibilidad de información que se pudo obtener:

Escala media diaria, para datos de precipitación, temperatura e hidrométricos.

Escala media diaria multianual, para datos de velocidad de viento, humedad relativa y nubosidad.

4.2.3.1.1. Periodo de modelación del balance

Tomando en cuenta la información disponible de los datos climatológicos, hidrométricos y los objetivos del estudio se considera el periodo de modelación histórico del año 1980 al 2016, con un paso de tiempo diario debido a que el programa HEC-ResSim requiere datos de caudales de oferta en un nivel diario. Al tener 36 años de caudales simulados se podrá realizar una caracterización de año húmedo, normal y seco.

4.2.3.1.2. Periodo de Calibración y validación del modelo

De acuerdo a la información hidrométrica de la estación Yesera Sud, se tiene registros en los ríos Calderas y Yesera desde el año 2002 al 2011 y tomando en cuenta que el periodo de modelación es desde el año 1980 al 2016, se considera la calibración para ambas cuencas con 4 años (2002 al 2005) y la validación con 3 años (2006 al 2008), el periodo del 2009 al 2011 no se considera porque la información es escasa.

Lo ideal sería realizar la calibración y validación del modelo con más años, sin embargo, existe poca información hidrométrica de las cuencas, obligando a que se ajuste el estudio a la información disponible.

4.2.3.2. Escala Espacial

La delimitación espacial o esquema se refiere a la identificación de los límites de la extensión del modelo. En una cuenca específica, esto implica la identificación del punto límite de interés aguas abajo en el río a partir del cual se delinearán la cuenca a modelar. Adicionalmente, se requiere la identificación de puntos de manejo a partir de los cuales se delinearán puntos de cierre de las subcuencas.

- Puntos de manejo típicos incluyen:
- Estación de monitoreo de caudal
- Represa (existente o proyectada)
- Confluencia de ríos importantes (siempre que la subcuenca que agrupa a ambas posea condiciones climatológicas heterogéneas)
- Localización de canales de extracción de agua

Para el presente estudio se definen los siguientes puntos de modelación o de interés:

- Presa Calderas. Punto a partir del cual se define la Cuenca Calderas.
- Sección de derivación. Punto a partir del cual se define la Cuenca Yesera.

4.3. Recopilación de Información

4.3.1. Información Climática

El año 2018 se presentó el Balance Hídrico Superficial de Bolivia, este documento fue realizado por el Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo (SEI) y financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) El balance hídrico fue realizado con el software WEAP.

En este estudio se generó una grilla climática diaria basada en la metodología GMET para el periodo 1980-2016 para precipitación y temperatura. Para las otras variables

como humedad relativa, velocidad de vientos y horas sol, se ha generado una grilla solo para los promedios multimensuales con un método de interpolación tradicional como IDW.

Una de las conclusiones del informe del Balance Hídrico Superficial de Bolivia es aplicar las grillas GMET a una escala regional a nivel de cuenca, con el fin de poder evaluar y validar el desempeño de las mismas para estudios hidrológicos.

Tomando en cuenta estas recomendaciones para la presente investigación se hará uso de ésta base de datos para el desarrollo del modelo.

4.3.1.1. Precipitación y Temperatura

Las grillas de precipitación y temperatura fueron generadas a partir de 384 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera del territorio boliviano (ver figura 4.3). Los datos de estas estaciones fueron tratados y rellenados a una escala de tiempo diario para un periodo de 1980 a 2016. La grilla se encuentra en un formato NetCDF con una resolución espacial de $0,05^\circ$ (5km) (ver anexos 2).

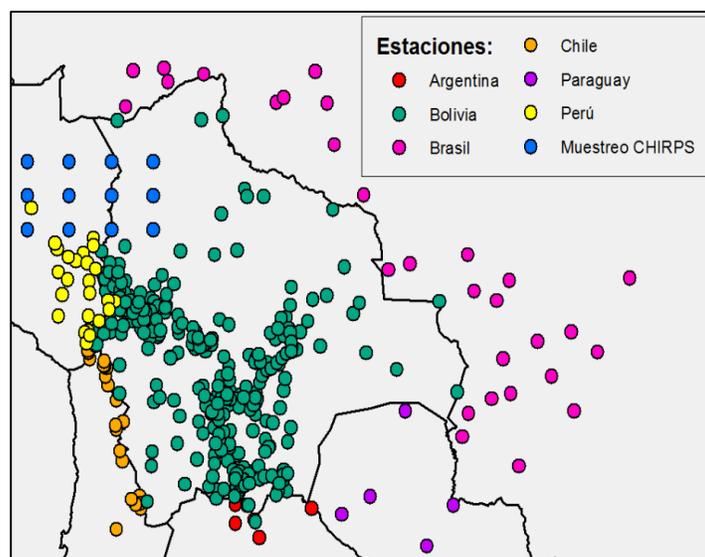


Figura 4.3 Estaciones consideradas para la elaboración de la grilla climatológica GMET

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Agua, 2016

Las estaciones que se encuentran cerca de la cuenca Calderas son la estación climatológica de Yesera Norte, Yesera Sur, Sella Quebradas, Gamoneda, Sella Méndez y San Pedro Buena Vista como se puede ver en la siguiente figura.

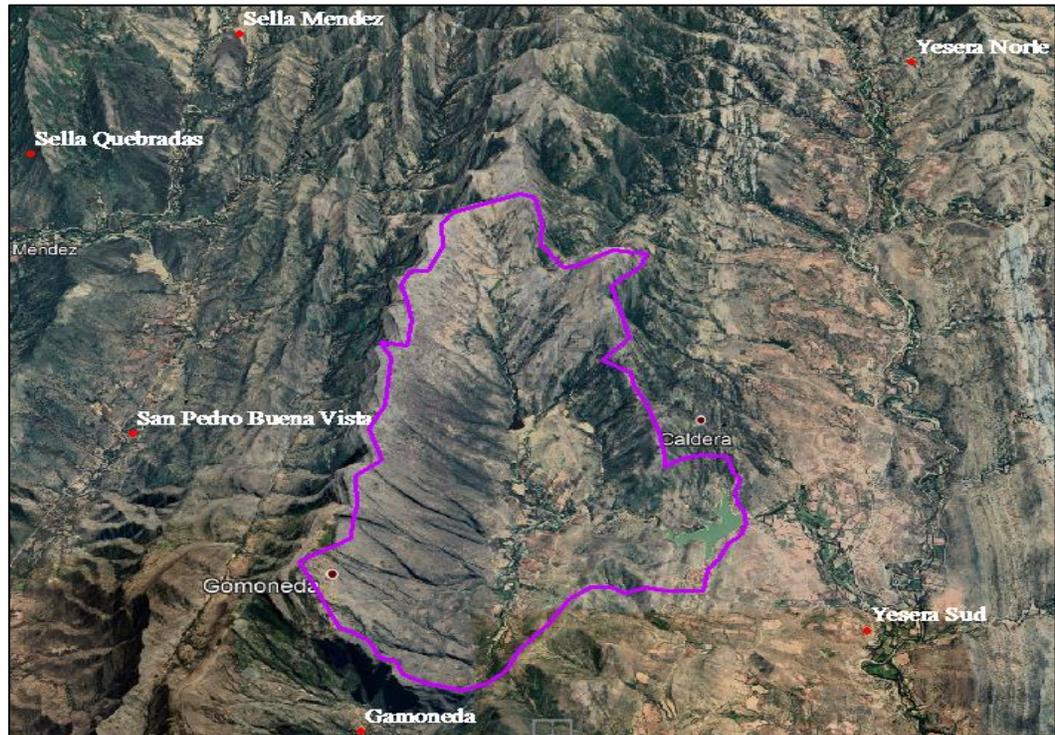


Figura 4.4 Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca Calderas

Fuente: Elaboración propia

Mediante los polígonos de Thiessen se estableció el área de influencia de las estaciones cercanas a la cuenca Calderas las cuales son las estaciones de Gamoneda, San Pedro Buena Vista, Sella Méndez, Yesera Sur y Yesera Norte.

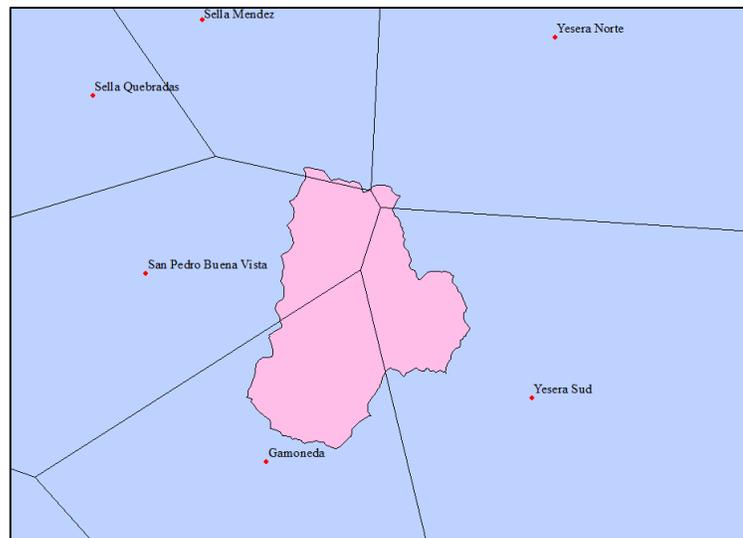


Figura 4.5 Estaciones que tienen influencia en la cuenca Calderas

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la cuenca de Yesera las estaciones cercanas son la estación de Yesera Norte, Alto Cajas, Sella Méndez, San Pedro Buena Vista y Sella Quebradas (ver figura 4.6).

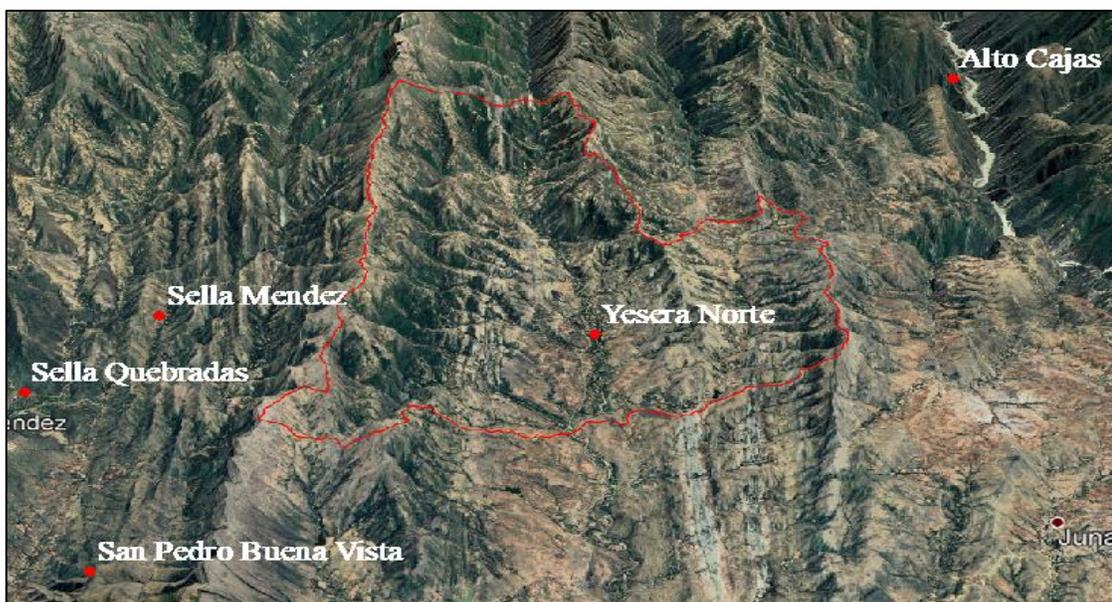


Figura 4.6 Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca Yesera

Fuente: Elaboración propia

Las estaciones que tienen influencia en la cuenca Yesera son la estación Sella Quebradas, Sella Méndez, Yesera Norte, Alto Cajas y San Pedro Buena Vista.

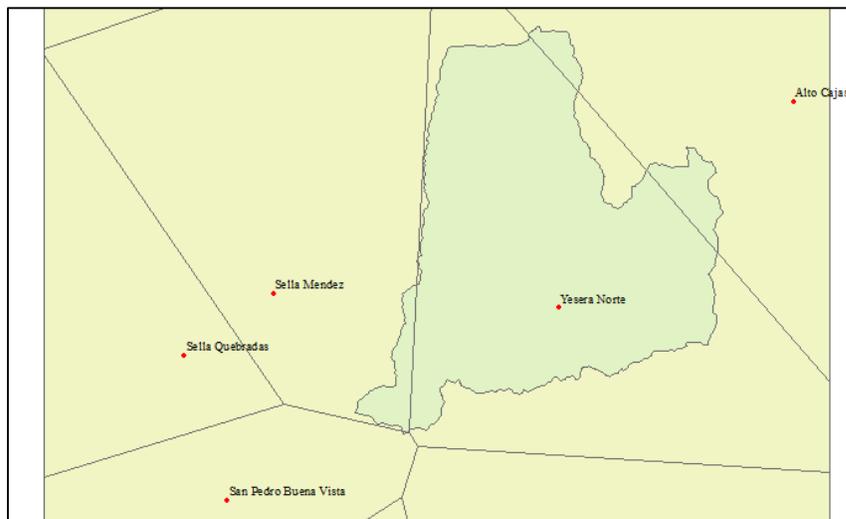


Figura 4.7 Estaciones que tienen influencia en la cuenca Yesera

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2. Humedad Relativa, Velocidad de viento y Nubosidad

4.3.1.2.1. Humedad Relativa

Las series históricas de la humedad relativa media diaria fueron recopiladas del SENAMHI, obteniendo un total de 303 estaciones, de todas estas estaciones se escogió aquellas que tenga al menos el 30 % de datos observados para el periodo de 1980-2016, como resultado se tuvo 128 estaciones.

Para poder utilizar estos datos, en el BHSB realizaron un análisis de consistencia a nivel mensual, llegando a depurar varias estaciones y obtener al final un número de 128 estaciones para ser nuevamente analizadas y finalmente con el relleno de datos y la homogeneidad de los mismos se llegó a obtener un total de 98 estaciones representativas para toda la región de Bolivia, para un periodo de 1980-2016.

El método que se utilizó para poder generar estas grillas de humedad relativa fue el IDW. Este método estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento.

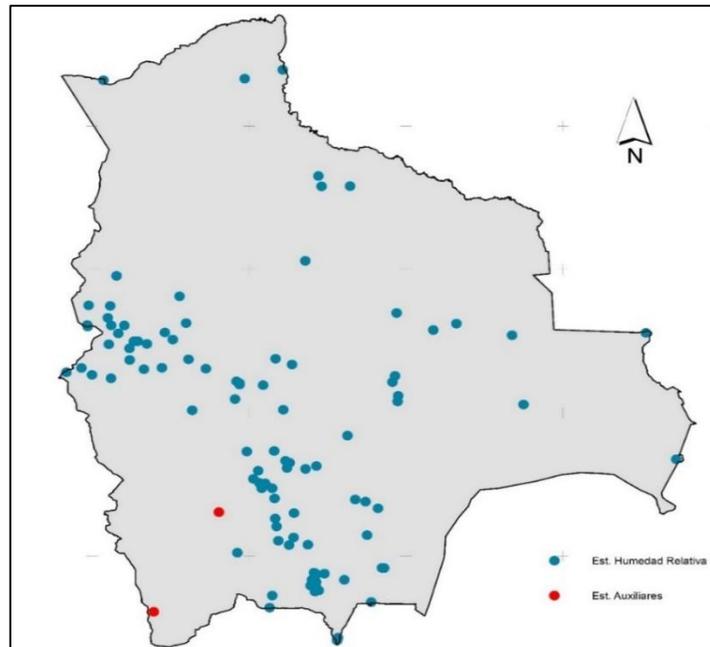


Figura 4.8 Estaciones climatológicas consideradas para la generación de la grilla de Humedad Relativa

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Agua, 2016

4.3.1.2.2. Velocidad de viento

Para la generación de la grilla de velocidad de viento se empleó el mismo método que se describe anteriormente para la grilla de humedad relativa en un periodo de 1980-2016. El número de estaciones corresponde a un total de 89 distribuidas en el territorio de Bolivia.

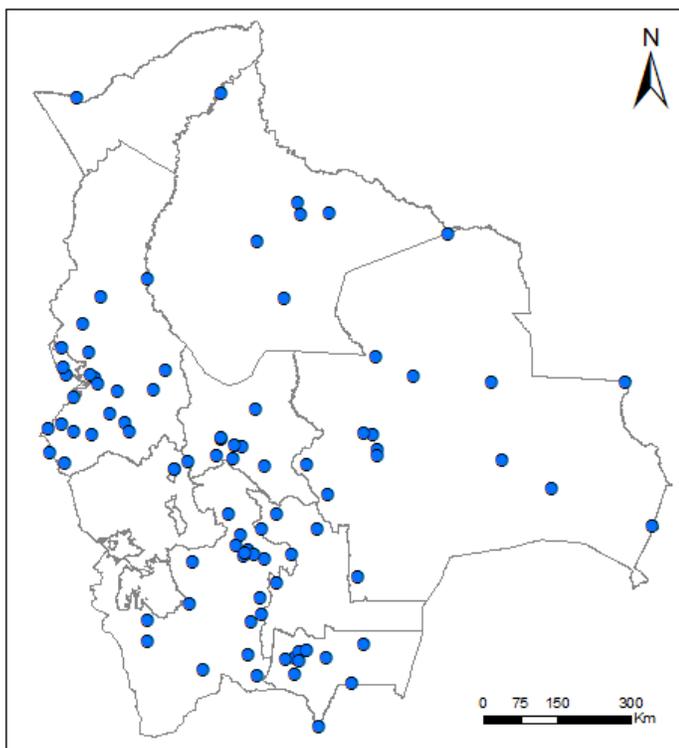


Figura 4.9 Estaciones empleadas en la construcción de la grilla de velocidad de viento

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Agua, 2016

4.3.1.2.3. Nubosidad

Los datos obtenidos para la nubosidad fueron procesados en el BHSB para poder obtener las grillas aplicando la metodología del Climate Research Unit (CRU).

Para poder llevar los datos de hora sol a nubosidad aplicaron los siguientes pasos:

- Los datos de horas sol se convierten a fracción sol.
- La fracción de sol, es convertida a cobertura de nubes (CC).
- Finalmente, la cobertura de nubes es ajustada (CCadj) multiplicando CC por 1.25.

“La interpretación de los valores de cobertura de nubes se realiza de la siguiente manera:

0 corresponde a un día sin nubes y 1 corresponde a un día completamente nublado”.

El total de estaciones con datos de promedios mensuales que se utilizaron para poder realizar la interpolación y generar las grillas fue de 46 distribuidas en todo el territorio de Bolivia en el periodo de 1980 al 2016.

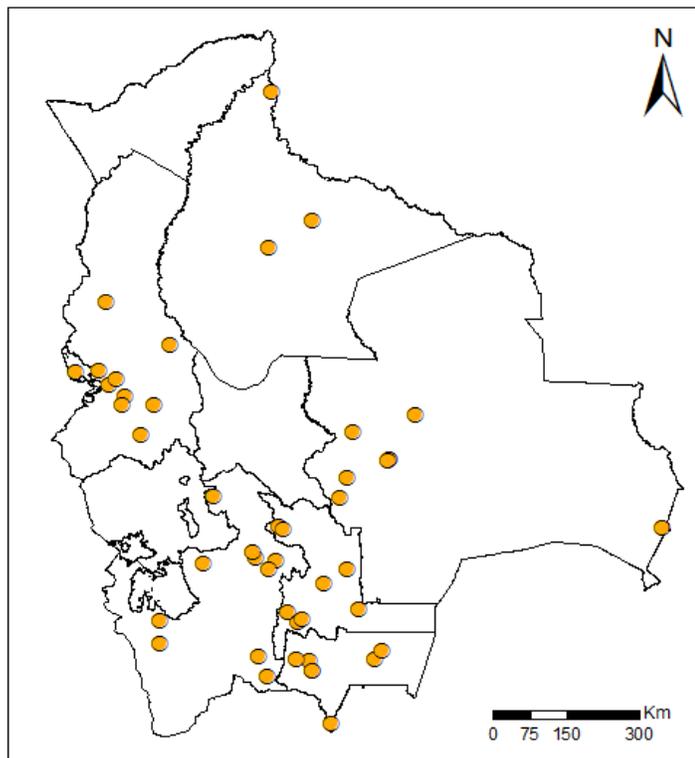


Figura 4.10 Estaciones consideradas en la elaboración de la grilla de Nubosidad

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Agua, 2016

4.3.2. Información Climática del SENAMHI

Para poder realizar una comparación y validación de las grillas meteorológicas se recopiló información meteorológica para las cuencas de Calderas y Yesera del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), institución encargada del monitoreo de las estaciones meteorológicas e hidrométricas en la ciudad de Tarija.

La estación Yesera Sur no fue considerada en la elaboración de las grillas climáticas.

4.3.3. Información Hidrométrica

Para realizar la calibración del modelo mediante del ajuste de los parámetros hidrológicos, es indispensable contar con información de caudales medidos o aforados.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología proporcionó información sobre aforos, lecturas de escala y caudales medios diarios del periodo 2002 al 2011.

En la tabla 4.1 y figura 4.11 se muestra la ubicación geográfica y espacial respectivamente de la estación de aforo Yesera Sud.

Tabla 4.1 Ubicación geográfica de la estación hidrométrica

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD
Yesera Sud	21° 28' 02" S	64° 33' 30" O

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.11 Ubicación de las estaciones hidrométricas

Fuente: Elaboración propia

La estación Yesera Sud cuenta con registros de caudales del río Calderas y Yesera de 10 años, pero solo se considera 7 años debido a que los últimos tres años la información es escasa. En la tabla 4.2 se muestra los caudales mensuales del río Calderas y Yesera.

Tabla 4.2 Caudales medios mensuales medidos del río Calderas y Yesera

CAUDAL MEDIDO RÍO CALDERAS (m ³ /s)												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,0000	0,0679	0,0000	0,0446	0,0371		0,0138	0,0073	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003
2003-2004	0,0000	0,0000			0,0670	0,0004	0,4865		0,0001	0,0030	0,0000	0,0000
2004-2005	0,0412	0,0000		0,0988	0,6382	0,0691	0,0107	0,0277		0,0004	0,0003	
2005-2006	0,0000				0,3598		0,1793	0,0015		0,0003	0,0000	0,0000
2006-2007				0,0000	0,2925		0,2225	0,2018	0,0008	0,0004		
2007-2008		0,0029		0,1109	0,1947	0,0873	0,0113	0,0027	0,0031			0,0000
2008-2009					0,7857		0,7390		0,0142	0,0091		0,0000
2009-2010					1,1150		1,2270					
2010-2011												
2011-2012												0,042
CAUDAL MEDIDO RÍO YESERA (m ³ /s)												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,0004	0,2492	0,0948	0,9843				0,2285	0,1062	0,0094	0,0063	0,0013
2003-2004	0,0000	0,0000			0,3201	0,0000	2,6360		0,0646	0,0033	0,0000	0,0000
2004-2005	0,0018	0,0000		0,2197	1,0750	0,1187	0,2190	0,3217		0,0504	0,0006	
2005-2006	0,0000				0,8519		0,8063	0,0935		0,0431	0,0043	0,0005
2006-2007				0,0175	1,0110		0,8370	2,1950	0,1126	0,0590		
2007-2008		0,0017		0,5155	1,0330	0,7903	0,3455	0,5081	0,1567			0,0025
2008-2009					2,8160		4,2260		0,1952	0,0534		0,0013
2009-2010					8,4800		3,3040					
2010-2011												
2011-2012												0,0028
2012-2013												
2013-2014								0,0297				

Fuente: Elaboración propia en base a información del SENAMHI

4.3.4. Información Cartográfica

Para el presente estudio se decidió utilizar el modelo de elevación digital ALOS PALSAR con una resolución de 12,5 x 12,5 m. Este modelo está disponible en el portal <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>.

Para poder descargar la imagen satelital se procedió a seleccionar el área de estudio mediante un rectángulo y se seleccionó las imágenes en formato FBS para facilitar la elección de la imagen.

4.3.5. Información de Cobertura, vegetación, uso y tipo de suelo

Para los datos de cobertura vegetal y tipo de suelo se utilizó el estudio realizado por ZONISIG para todo el departamento de Tarija, el cual empezó en el año 1993 y finalizó en el año 2002. El estudio fue realizado en campo mediante la extracción de calicatas para la clasificación del tipo de suelo, lo cual proporciona una menor escala y una mayor precisión. Además, se recopiló los textos metodológicos del programa ZONISIG porque contienen explicaciones sobre las leyendas que utilizaron de la FAO y el significado de cada uno.

También se recopiló información de cobertura, vegetación, uso y tipo de suelo del Balance Hídrico Superficial de Bolivia y del Balance Hídrico Integral del río Guadalquivir con la finalidad de relacionar la nomenclatura de las leyendas de cobertura vegetal y tipo de suelo.

4.3.6. Información de Demanda

4.3.6.1. Demanda de agua para riego

Esta información se obtuvo del estudio de Construcción de obras complementarias para la presa Calderas realizado el año 2018 por SEDEGIA y del censo agropecuario 2013 por el INE. Además, se cuenta con información de caudales de entrega mensuales proporcionados por SEDEGIA, pero estos datos solo se considerarán en el modelo HEC-ResSim.

El proyecto de obras complementarias de la presa Calderas cuenta con datos de áreas de riego irrigadas actualmente, la cédula de cultivo actual de las comunidades beneficiarias, capacidad de almacenamiento de la presa, el estado actual de las infraestructuras y de su operación.

El censo agropecuario 2013 cuenta con información de superficies de riego y tipos de cultivos de cada comunidad.

4.3.6.2. Demanda de agua potable

Se recolectó los datos de población para cada comunidad perteneciente a la zona de la cuenca Calderas y Yesera, además de las comunidades aledañas a las cuencas a partir del censo poblacional 2012, propuesto por el Instituto Nacional de estadística INE.

4.4. Análisis y procesamiento de la información

4.4.1. Selección de estaciones meteorológicas

Las estaciones que se encuentran cerca de la cuenca Calderas son la estación climatológica de Yesera Norte, Yesera Sur, Sella Quebradas, Gamoneda, Sella Méndez, Alto Cajas y San Pedro Buena Vista. Se procedió a evaluar los periodos de registro de cada estación, en la tabla 4.3 se detalla la información de precipitación disponible en cada estación.

Tabla 4.3 Información disponible de precipitación

CUENCA CALDERAS (PRECIPITACIÓN)																							
N°	ESTACIONES	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1	Alto Cajas																						
2	Sella Qds.										5											4	
3	Yesera Norte														6								
4	Yesera Sur																						
5	Gamoneda																						
6	Sella Méndez																						
7	San Pedro B.V.							6	11														
N°	ESTACIONES	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
1	Alto Cajas							2			3	4		5	6							9	9
2	Sella Qds.																						
3	Yesera Norte																						
4	Yesera Sur																						
5	Gamoneda					4																	
6	Sella Méndez																						
7	San Pedro B.V.			9																			

Fuente: Elaboración propia

Las celdas sombreadas representan los años que cuentan con información completa, las que contienen número representan los meses con información durante el año y las celdas con blanco los años que no se registraron datos.

En un primer análisis se observó las estaciones que tienen un registro continuo. En la tabla 4.3 se puede observar que la estación Gamoneda presenta un registro continuo desde 1980 al 2002 y las estaciones de Sella Quebradas, Yesera Sur y Yesera Norte presentan registros continuos durante el periodo de 2002 al 2019 y se descartan las estaciones de Alto Cajas, Sella Méndez y San Pedro Buena Vista debido a que no contienen periodos de registro continuo.

Mediante el método de polígonos de Thiessen se determinó el área de influencia de las estaciones de Gamoneda, Yesera Sud, Sella Quebradas y Yesera Norte.

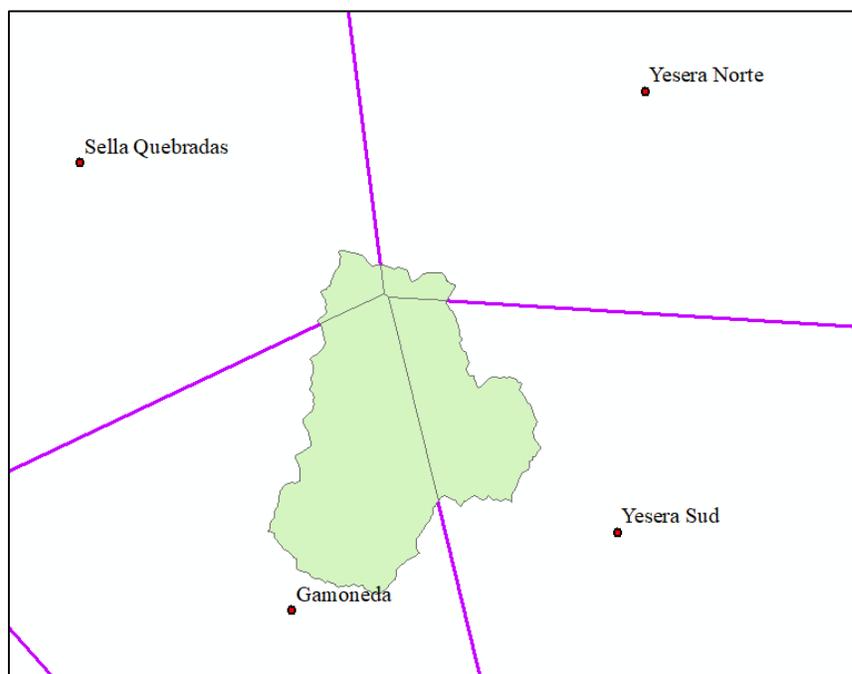


Figura 4.12 Polígono de Thiessen para la cuenca Calderas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4 Áreas de influencia sobre la cuenca Calderas

ESTACIÓN	Área (km ²)	Porcentaje %
Gamoneda	18,01	59,15
Yesera Norte	1,00	3,30
Yesera Sud	9,94	32,63
Sella Quebradas	1,50	4,93
Total	30,45	100,00

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.5 se muestra la información disponible de precipitación de las estaciones que están cerca de la cuenca Yesera las cuales son la estación Yesera Norte, Sella Quebradas, Sella Méndez, San Pedro Buena Vista y Alto Cajas.

Tabla 4.5 Información disponible de precipitación para la cuenca Yesera

		CUENCA YESERA (PRECIPITACIÓN)																					
Nº	ESTACIONES	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1	Alto Cajas																						
2	Sella Qds.										5												4
3	Yesera Norte														6								
4	Sella Méndez																						
5	San Pedro B. V.							6	11									4					
Nº	ESTACIONES	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
1	Alto Cajas							2			3	4		5	6							9	9
2	Sella Qds.																						
3	Yesera Norte																						
4	Sella Méndez																						
5	San Pedro B. V.			9																			

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la información fue el mismo que se describió anteriormente para la cuenca Calderas. Se determinó considerar las estaciones de Yesera Norte y Sella Quebradas porque tienen mayor registro y menor discontinuidad en sus registros y se

descarta la estación de Alto Cajas, Sella Méndez y San Pedro Buena Vista debido a que su periodo de registro es escaso y discontinuo.

Mediante los polígonos de Thiessen se determinó el área de influencia de las estaciones Yesera Norte, Sella Quebradas, San Pedro Buena Vista y Alto Cajas.

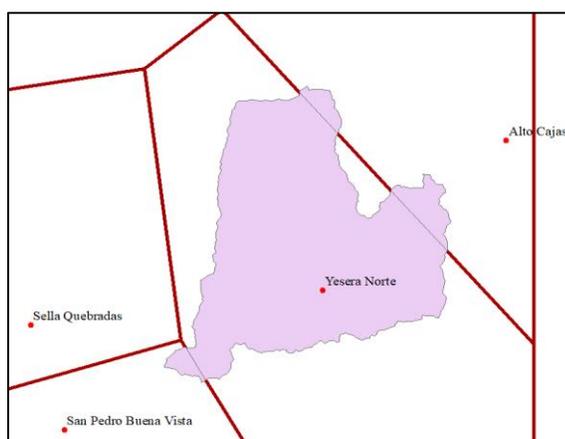


Figura 4.13 Polígono de Thiessen para la cuenca Yesera

Fuente: Elaboración propia

Considerando que las estaciones San Pedro Buena Vista y Alto Cajas no tienen muchos datos registrados, además que el área de influencia que tienen sobre la cuenca no es muy significativa con respecto a la estación Yesera Norte por lo tanto solo se considera esta estación para la validación de la grilla meteorológica.

4.4.2. Procesamiento de la información climática

4.4.2.1. Análisis de precipitación y temperatura

Primeramente, se realizó la exportación de los datos de precipitación y temperatura de la grilla climática del GMET de todo el periodo que es de 1980 al 2016 mediante el modelo WEAP.

Luego se procedió a determinar la precipitación media mensual de la cuenca Calderas mediante los polígonos de Thiessen y de la cuenca Yesera (ver anexo 3), con la finalidad de comparar con los datos de la grilla climática. Para realizar una validación estadística se tomaron como parámetros de evaluación el coeficiente de correlación (R) y de determinación (R^2).

Tabla 4.6 Precipitación media mensual en la cuenca Calderas

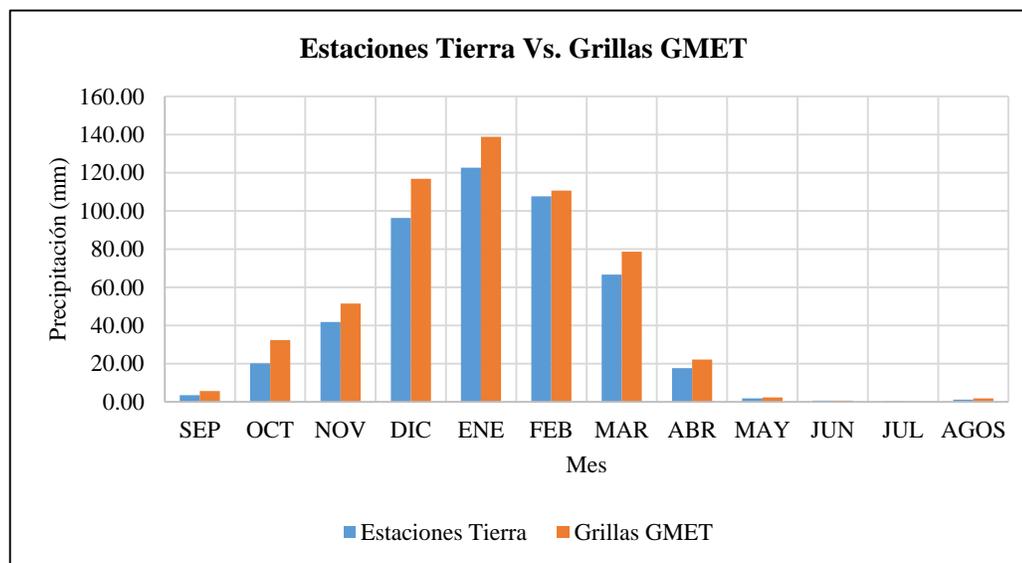
Precipitación media (mm) Cuenca Calderas													
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	TOTAL
Estaciones Tierra	3,40	20,18	41,79	96,28	122,69	107,64	66,58	17,64	1,81	0,53	0,26	1,09	479,89
Grillas GMET	5,61	32,26	51,52	116,79	138,82	110,67	78,68	22,09	2,30	0,65	0,12	1,69	561,21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grillas GMET
Media \bar{X}	39,99	46,77
Desviación Estándar S	46,35	51,63
Varianza S ²	2148,15	2666,12
Coefficiente de correlación R	0,9954	
Coefficiente de determinación R ²	0,9907	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.14** Comparación de precipitación de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8 Precipitación media mensual en la cuenca Yesera

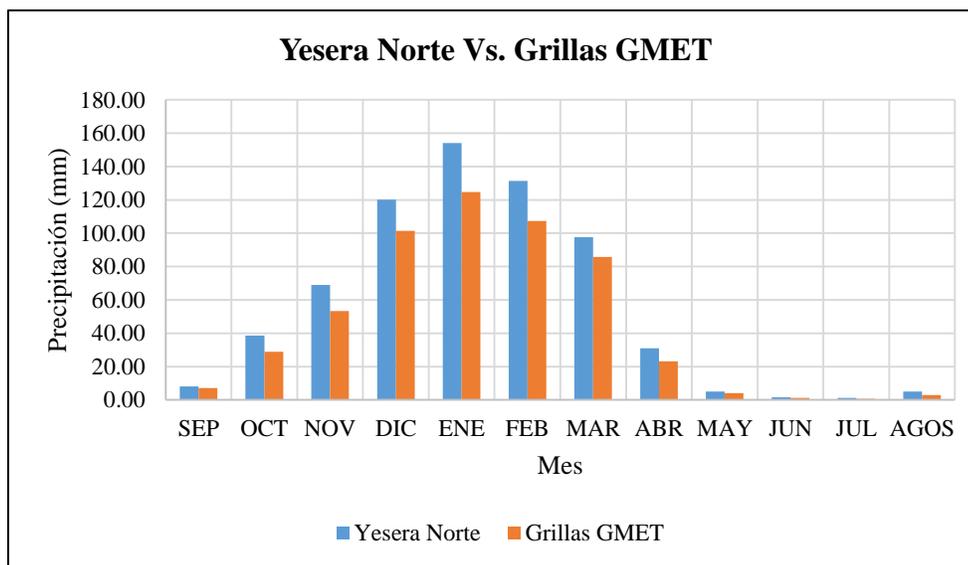
Precipitación media (mm) Cuenca Yesera													
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	TOTAL
Yesera Norte	8,15	38,70	68,93	120,15	154,04	131,31	97,67	31,03	5,13	1,55	1,30	5,02	662,96
Grillas GMET	7,17	28,82	53,40	101,45	124,80	107,30	85,87	23,25	4,12	1,18	0,56	2,91	540,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9 Análisis estadístico Estación Yesera Norte y Grillas GMET

Medida Estadística	Yesera Norte	Grillas GMET
Media \bar{X}	55,25	45,07
Desviación Estándar S	56,93	47,37
Varianza S ²	3240,95	2243,57
Coefficiente de correlación R	0,9987	
Coefficiente de determinación R ²	0,9974	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.15** Comparación de precipitación Estación Yesera Norte y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

En las gráficas se puede observar que los datos de precipitación media mensual de la grilla climática con respecto a las estaciones tierra tienen similitud y coherencia tanto en los meses húmedos y secos, además los coeficientes de correlación nos indican una

óptima asociación entre las variables y los coeficientes de determinación nos proporcionó el mínimo error entre ambas variables. Por lo tanto, se valida la grilla climática del GMET para su uso en el presente estudio.

4.4.2.2. Humedad relativa, Velocidad de viento y Nubosidad

Las grillas de humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad se encuentran en formato raster en un paso de tiempo medio mensual multianual y el modelo requiere datos a nivel diario y debido a que no hay mucha información de estas variables se generó datos de humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad a un paso de tiempo medio diario multianual el cual se utilizó de manera cíclica para todo el periodo de modelación.

4.4.2.2.1. Humedad Relativa

Para el análisis de la humedad relativa en la cuenca Calderas se trabajará en base al registro diario de las estaciones más cercanas que miden esta variable las cuales son la estación Yesera Norte, Sella Quebradas y Aeropuerto. La estación del Aeropuerto no tiene influencia en la cuenca, sin embargo, por ser una estación patrón y contar un amplio registro de datos se la tomará en cuenta para el estudio. Cabe mencionar que para el presente trabajo se realizó la estimación de datos faltantes mediante el método de la media aritmética el cual es un método aproximado que se aplica en zonas donde la variación geográfica así lo permite. (MMAyA, VRHR, & Soria, 2016:45)

La guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales sugiere la interpolación espacial por el método de remoción de tendencias el cual consiste en una correlación entre la topografía y las variables climáticas. En este estudio se realizó una correlación entre la altitud y la humedad relativa. Para la interpolación de la cuenca Calderas se usó la altura media de la cuenca (2389,33 msnm) obtenido del modelo digital ALOS PALSAR.

Los resultados de humedad relativa (ver anexo 5) se compararon con los datos de las grillas de humedad y se evaluaron mediante los coeficientes de correlación y

determinación en los cuales se puede evidenciar que existe buena relación entre ambas variables por lo tanto los datos generados de humedad se utilizaron en el estudio.

Tabla 4.10 Humedad relativa media mensual en la cuenca Calderas

Humedad Relativa media mensual (%) Cuenca Calderas												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	48,67	56,21	57,83	63,68	65,15	67,81	69,67	68,26	60,23	47,12	44,62	47,16
Grilla GMET	52,76	58,01	61,97	66,93	70,92	72,95	72,69	69,34	61,71	54,14	51,24	50,73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media	58,04	61,95
Desviación Estándar S	9,20	8,52
Varianza S ²	84,63	72,56
Coefficiente de correlación R	0,9787	
Coefficiente de determinación R ²	0,9579	

Fuente: Elaboración propia

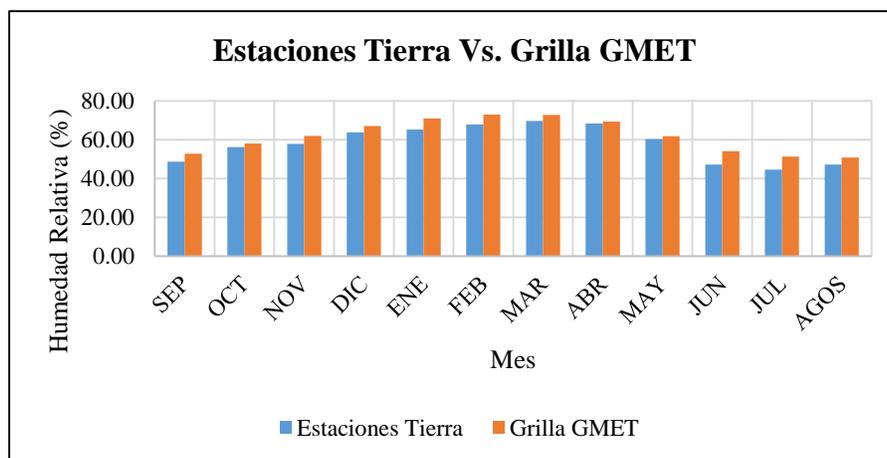


Figura 4.16 Comparación de Humedad Relativa de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la cuenca Yesera las estaciones más cercanas y que miden esta variable son la estación Sella Quebradas y Yesera Norte, al igual que en la cuenca Calderas también se consideró la estación Aeropuerto para la interpolación de la humedad relativa a la altura media de la cuenca (2564,09 msnm). Los resultados de humedad relativa tienen una buena relación con los datos que se extrajeron de la grilla para la cuenca Yesera.

Tabla 4.12 Humedad Relativa media mensual en la cuenca Yesera

Humedad Relativa media mensual (%) Cuenca Yesera												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	54,10	60,20	61,94	67,56	69,83	72,11	73,42	70,71	63,49	51,92	50,09	51,23
Grilla GMET	55,77	61,34	65,00	70,20	73,99	76,11	75,51	71,73	63,08	54,59	52,81	53,18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.13 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media \bar{X}	62,22	64,44
Desviación Estándar S	8,67	8,95
Varianza S ²	75,23	80,18
Coefficiente de correlación R	0,9899	
Coefficiente de determinación R ²	0,9798	

Fuente: Elaboración propia

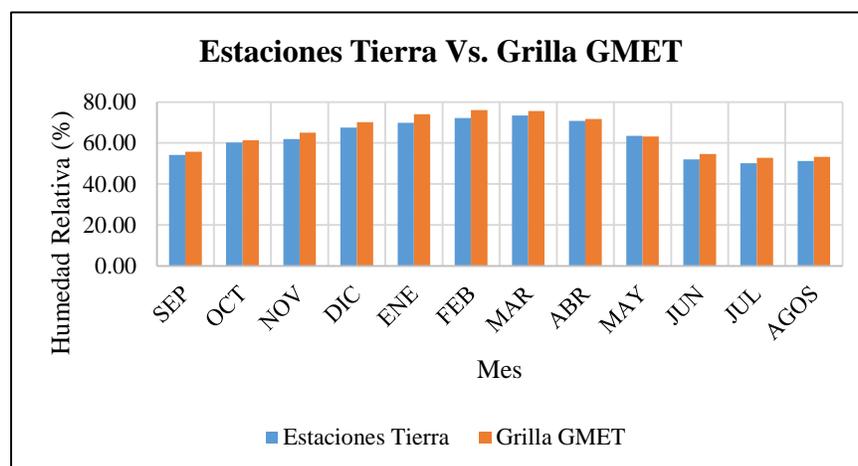


Figura 4.17 Comparación de Humedad Relativa de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.2. Velocidad de viento

El procedimiento que se realizó para esta variable fue el mismo que se describió anteriormente.

Las estaciones que se consideraron para la cuenca Calderas y Yesera fueron la estación Yesera Norte, Sella Quebradas y Aeropuerto.

Tabla 4.14 Velocidad media en la cuenca Calderas

Velocidad media (m/s) Cuenca Calderas												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	2,23	2,24	2,03	1,72	1,58	1,36	1,32	1,47	1,66	1,59	1,83	1,93
Grillas GMET	2,46	2,31	1,99	1,87	1,83	1,68	1,65	1,88	1,84	1,71	1,96	2,02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.15 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media \bar{X}	1,75	1,93
Desviación Estándar S	0,31	0,24
Varianza S ²	0,10	0,06
Coefficiente de correlación R	0,9224	
Coefficiente de determinación R ²	0,8509	

Fuente: Elaboración propia

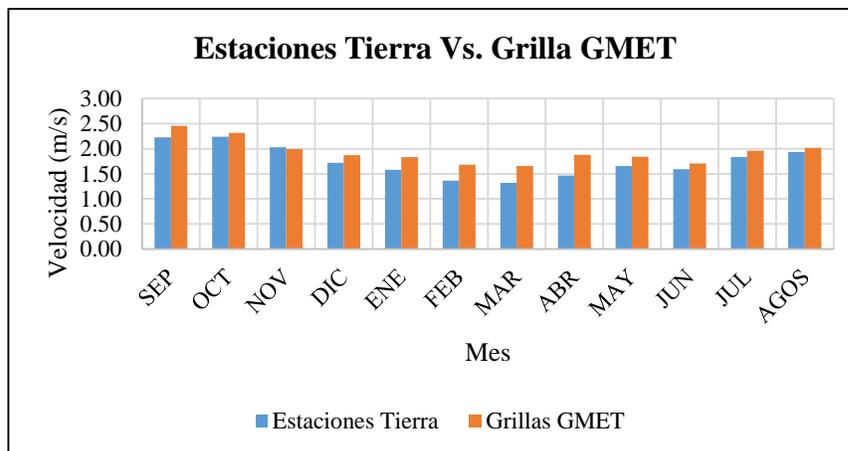


Figura 4.18 Comparación de Velocidad de viento de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16 Velocidad media en la cuenca Yesera

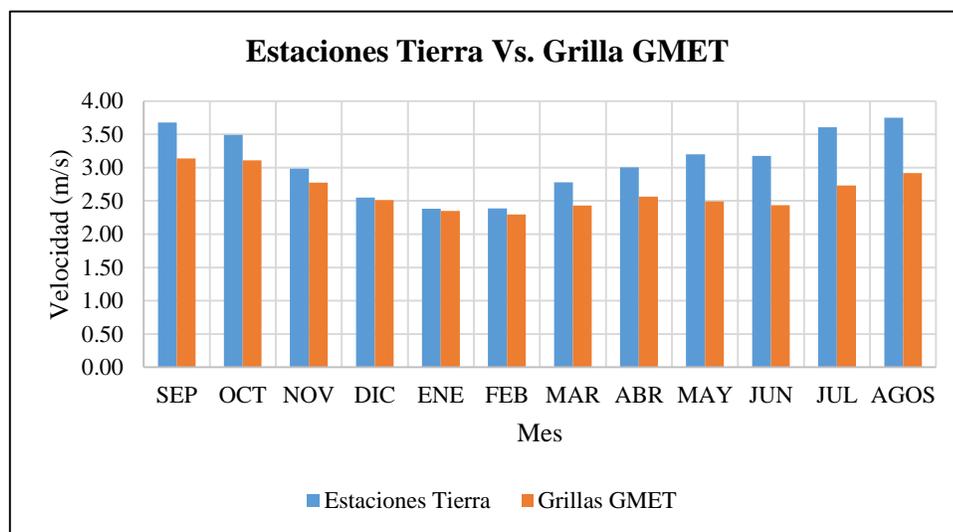
Velocidad media (m/s) Cuenca Yesera												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	3,68	3,49	2,98	2,55	2,38	2,39	2,78	3,00	3,20	3,18	3,61	3,75
Grillas GMET	3,14	3,11	2,78	2,51	2,35	2,30	2,43	2,57	2,49	2,43	2,73	2,92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media \bar{X}	3,08	2,65
Desviación Estándar S	0,49	0,29
Varianza S ²	0,24	0,08
Coficiente de correlación R	0,8106	
Coficiente de determinación R ²	0,6571	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.19** Comparación de Velocidad de viento de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la velocidad de viento (ver anexo 6) se compararon con los datos de la grilla para la cuenca Calderas y Yesera los cuales dieron resultados de correlación y determinación óptimos. Como se puede ver en las figuras los datos tienen relación y coherencia en los meses de humedad y sequía.

4.4.2.3. Nubosidad

El análisis de la nubosidad se realizó con las estaciones de Yesera Norte, Sella Quebradas y Aeropuerto para ambas cuencas.

Tabla 4.18 Nubosidad media en la cuenca Calderas

Nubosidad Cuenca Calderas												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	0,67	0,50	0,41	0,37	0,36	0,37	0,37	0,48	0,62	0,74	0,77	0,76
Grilla GMET	0,57	0,50	0,44	0,37	0,33	0,35	0,40	0,48	0,57	0,59	0,61	0,62

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.19 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media \bar{X}	0,53	0,49
Desviación Estándar S	0,17	0,10
Varianza S^2	0,03	0,01
Coefficiente de correlación R	0,9648	
Coefficiente de determinación R^2	0,9309	

Fuente: Elaboración propia

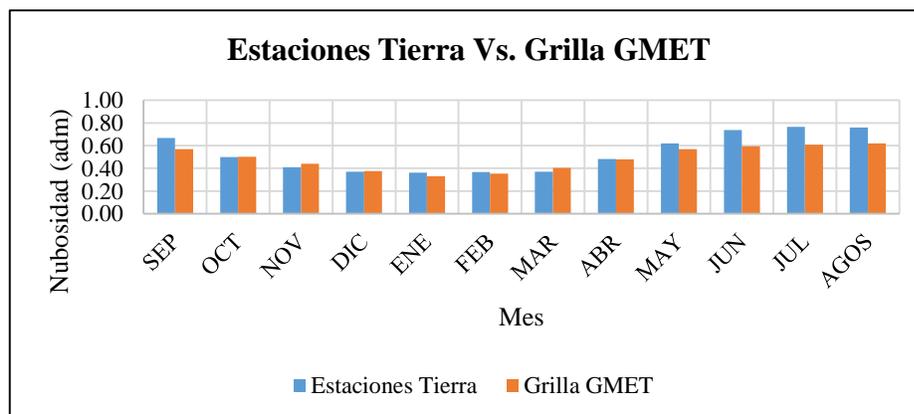


Figura 4.20 Comparación de Nubosidad de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.20 Nubosidad media en la cuenca Yesera

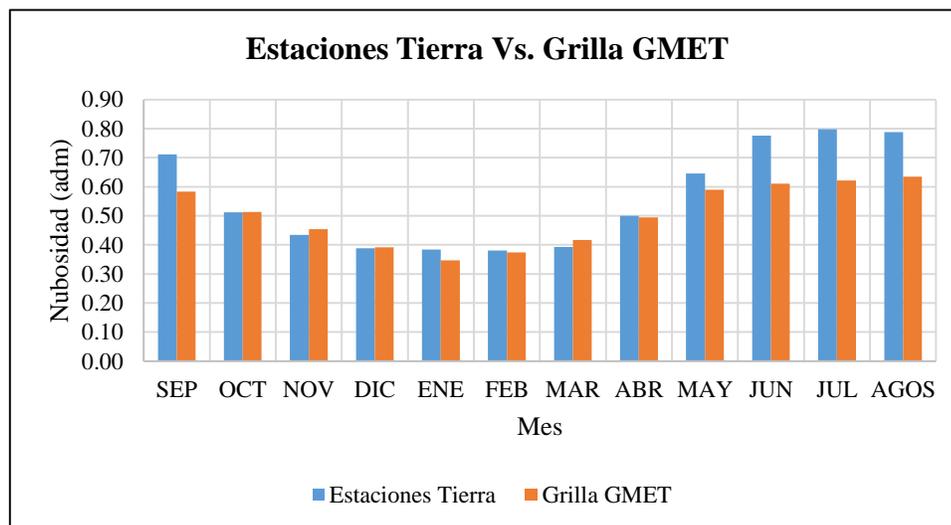
Nubosidad Cuenca Calderas												
MES	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS
Estaciones Tierra	0,71	0,51	0,43	0,39	0,38	0,38	0,39	0,50	0,65	0,78	0,80	0,79
Grilla GMET	0,58	0,51	0,45	0,39	0,35	0,37	0,42	0,49	0,59	0,61	0,62	0,64

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.21 Análisis estadístico Estaciones Tierra y Grillas GMET

Medida Estadística	Estaciones Tierra	Grilla GMET
Media \bar{X}	0,56	0,50
Desviación Estándar S	0,17	0,10
Varianza S^2	0,03	0,01
Coefficiente de correlación R	0,9636	
Coefficiente de determinación R^2	0,9284	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.20** Comparación de Nubosidad de las Estaciones Tierra y la Grilla GMET

Fuente: Elaboración propia

La interpretación de los valores de cobertura de nubes se realiza de la siguiente manera: 0 corresponde a un día sin nubes y 1 corresponde a un día completamente nublado.

Sin embargo, a estos valores se resta la unidad porque WEAP interpreta la fracción de nubosidad o fracción de horas del día sin sombra de nubes como 1 completamente descubierto y 0 nublado.

4.4.3. Procesamiento de Información Hidrométrica

Los datos obtenidos por el SENAMHI fueron procesados y analizados previo a su utilización. Debido a que los datos de caudales aforados en los ríos Calderas y Yesera son escasos para calibrar y validar a un paso diario por lo tanto se procedió a realizar curvas de descarga para cada año en el que se midió y posteriormente se calculó el caudal medio diario con datos de escalas diarias para ambos ríos.

Tabla 4.22 Caudales aforados en el río Calderas

FECHA	Escala (m)	Caudal (m ³ /s)
18-01-02	0,12	0,037
08-03-02	0,18	0,014
08-04-02	0,18	0,014
19-04-02	0,13	0,001
03-05-02	0,12	0,000
06-06-02	0,10	0,000
03-07-02	0,10	0,000
02-08-02	0,10	0,000
02-09-02	0,00	0,000
17-10-02	0,26	0,068
22-11-02	0,01	0,000
13-12-02	0,22	0,045
24-01-03	0,24	0,067
07-02-03	0,12	0,000
20-03-03	0,34	0,487
09-05-03	0,13	0,000
27-06-03	0,14	0,003
29-07-03	0,00	0,000
19-08-03	0,00	0,000
17-09-03	0,00	0,000
17-10-03	0,00	0,000
09-01-04	0,38	0,638
17-02-04	0,23	0,069

FECHA	Escala (m)	Caudal (m³/s)
15-03-04	0,17	0,011
01-04-04	0,19	0,028
02-06-04	0,11	0,000
30-07-04	0,11	0,000
28-09-04	0,19	0,041
21-10-04	0,00	0,000
17-12-04	0,25	0,099
19-01-05	0,31	0,360
08-03-05	0,28	0,179
29-04-05	0,13	0,002
07-06-05	0,13	0,000
26-07-05	0,13	0,000
17-08-05	0,00	0,000
27-09-05	0,00	0,000
05-01-06	0,29	0,293
02-03-06	0,27	0,223
03-04-06	0,23	0,202
30-05-06	0,09	0,001
13-06-06	0,06	0,000
06-12-06	0,00	0,000
24-01-07	0,25	0,195
05-02-07	0,21	0,087
30-03-07	0,09	0,011
12-04-07	0,08	0,003
06-05-07	0,05	0,003
02-08-07	0,00	0,000
11-10-07		0,003
10-12-07	0,23	0,111
22-01-08	0,35	0,786
12-03-08	0,35	0,739
15-05-08	0,08	0,014
26-06-08	0,00	0,009
29-08-08	0,00	0,000
09-01-09	0,45	1,115
12-03-09	0,42	1,227
09-08-11		0,042

Fuente: Elaboración propia en base a la información del SENAMHI

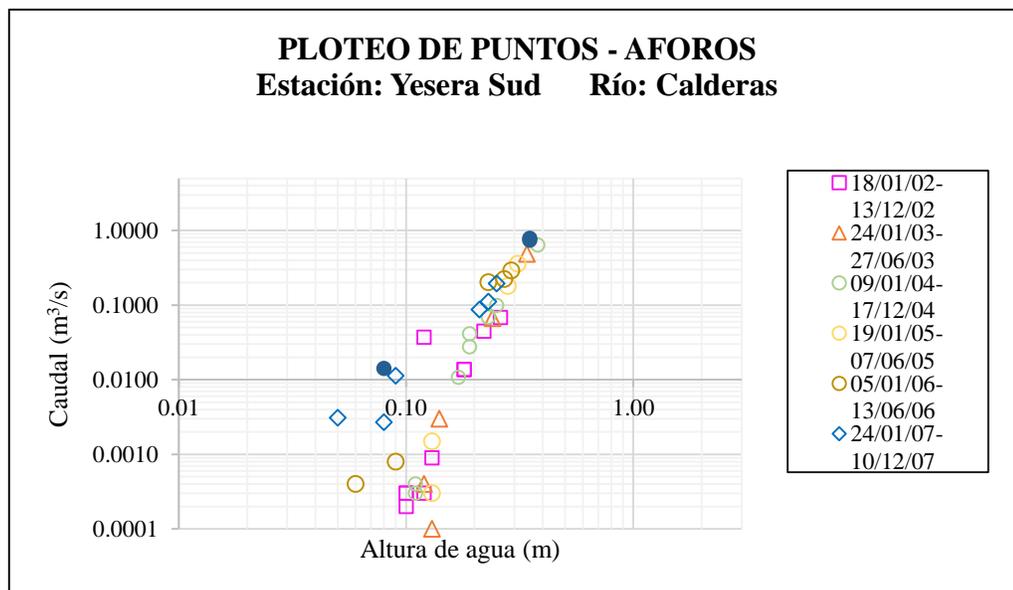


Figura 4.21 Caudales medidos en el río Calderas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.23 Caudales aforados en el río Yesera

FECHA	Escala (m)	Caudal (m ³ /s)
08-04-02	0,16	0,215
19-04-02	0,16	0,242
03-05-02	0,10	0,106
06-06-02	0,05	0,009
03-07-02	0,06	0,006
02-08-02	0,04	0,001
02-09-02	0,03	0,000
17-10-02	0,22	0,249
22-11-02	0,13	0,095
13-12-02	0,36	0,984
24-01-03	0,21	0,320
07-02-03	0,00	0,000
20-03-03	0,44	2,636
09-05-03	0,06	0,065
27-06-03	0,02	0,003
29-07-03	0,00	0,000
19-08-03	0,00	0,000
17-09-03	0,00	0,000

FECHA	Escala (m)	Caudal (m³/s)
17-10-03	0,00	0,000
09-01-04	0,29	1,075
17-02-04	0,12	0,119
15-03-04	0,16	0,219
01-04-04	0,20	0,322
02-06-04	0,08	0,050
30-07-04	0,00	0,001
28-09-04	0,00	0,002
21-10-04	0,00	0,000
17-12-04	0,18	0,220
19-01-05	0,30	0,852
08-03-05	0,34	0,806
29-04-05	0,16	0,094
07-06-05	0,14	0,043
26-07-05	0,10	0,004
17-08-05	0,07	0,001
27-09-05	0,00	0,000
05-01-06	0,32	1,011
02-03-06	0,31	0,837
03-04-06	0,42	2,195
30-05-06	0,14	0,113
13-06-06	0,12	0,059
06-12-06	0,02	0,018
24-01-07	0,33	1,033
05-02-07	0,31	0,790
30-03-07	0,23	0,346
12-04-07	0,27	0,508
09-05-07	0,18	0,157
02-08-07	0,08	0,003
11-10-07	0,09	0,002
11-12-07	0,25	0,516
22-01-08	0,45	2,816
12-03-08	0,53	4,226
15-05-08	0,19	0,195
26-06-08	0,16	0,053
29-08-08	0,07	0,001
09-01-09	0,71	8,480
12-03-09	0,51	3,304

FECHA	Escala (m)	Caudal (m ³ /s)
09-08-11	0,01	0,003
16-04-13		0,030

Fuente: Elaboración propia en base a la información del SENAMHI

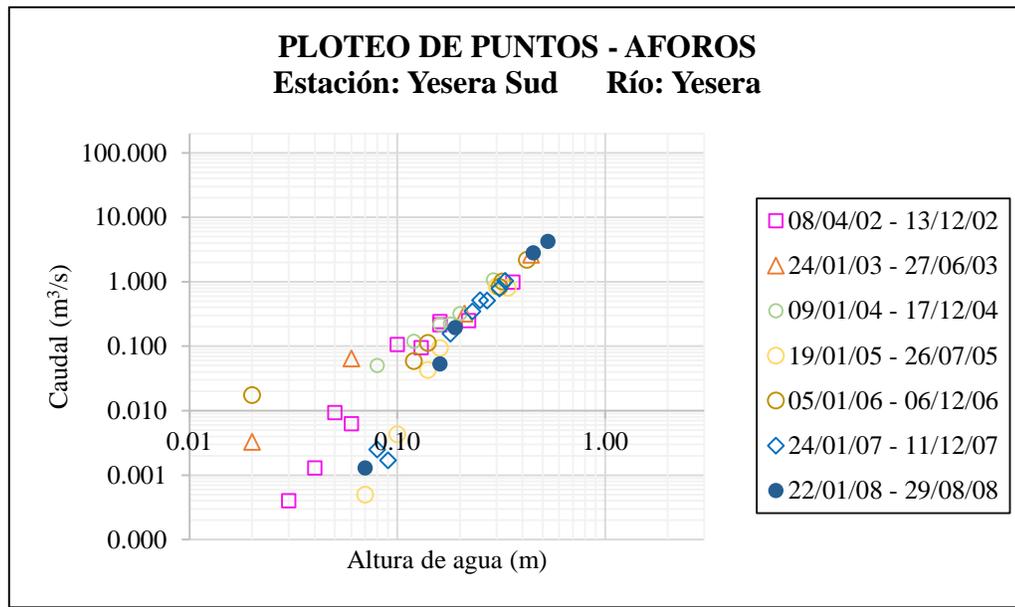


Figura 4.22 Caudales medidos en el río Yesera

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la figura 4.21 y 4.22 los datos de caudales tienen diferentes tendencias esto se debe a que, a lo largo del tiempo el lecho de un río sufre cambios en su morfología por socavación y sedimentación en cada crecida.

Para la calibración manual de las curvas de descarga de cada periodo de medición se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$Q = a(H - S_0)^b$$

Donde

Q = Caudal m³/s

H = Escala (m)

a, b y S_o = coeficientes

Posteriormente se compararon los caudales calibrados con los aforados a través de gráficas. Cabe señalar que cada curva de descarga solo se usa para el periodo con el que se calibró.

Las curvas de descarga para el río Calderas son las siguientes:

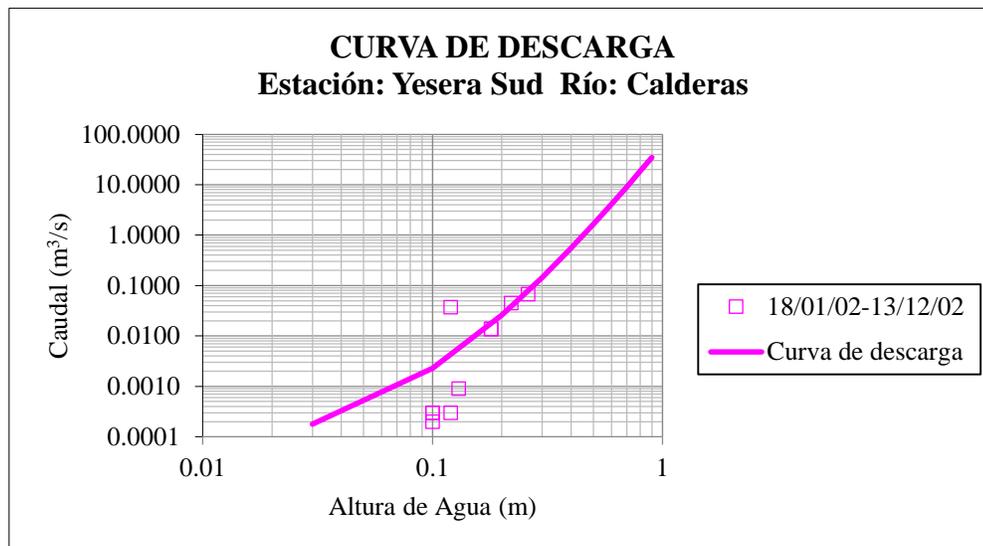


Figura 4.23 Curva de descarga año 2002

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.24 Parámetros de cálculo año 2002

Parámetros de calculo	
Ecuación de ajuste	$Q=34,4(H+0,101)^{5,99}$
Coefficiente de correlación	0,8761
Desviación estándar	0,0116
Error	0,0110
Error logarítmico	5,5330

Fuente: Elaboración propia

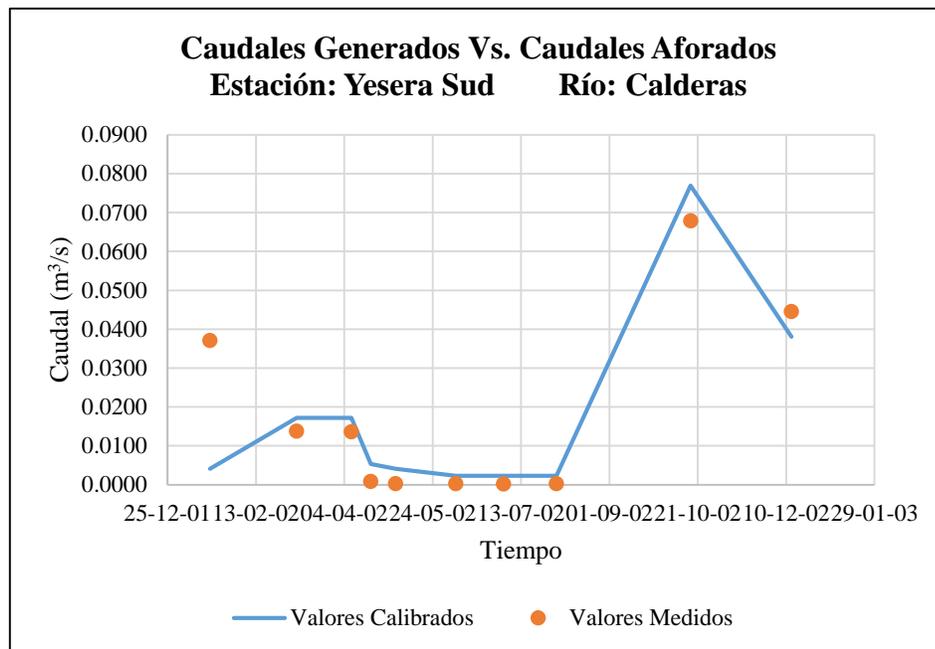


Figura 4.24 Caudales Calculados vs. Aforados año 2002

Fuente: Elaboración propia

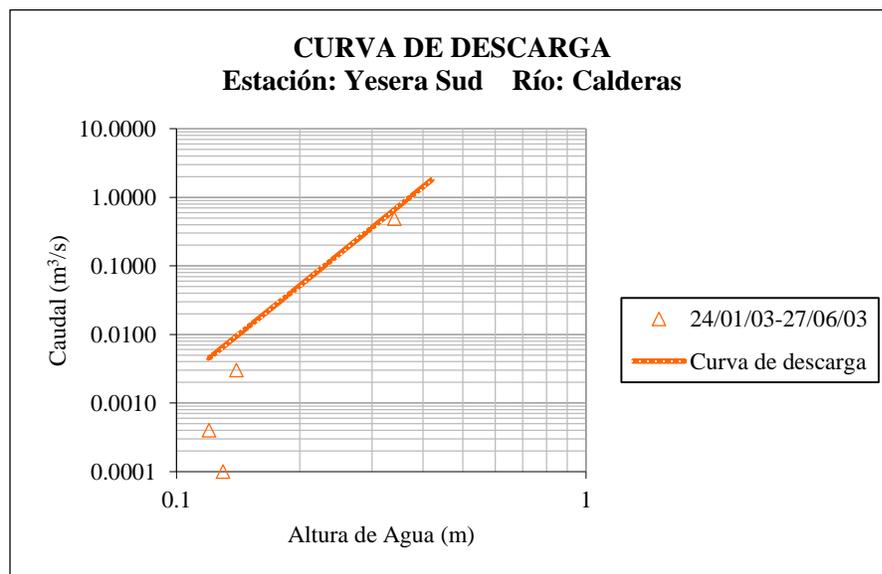


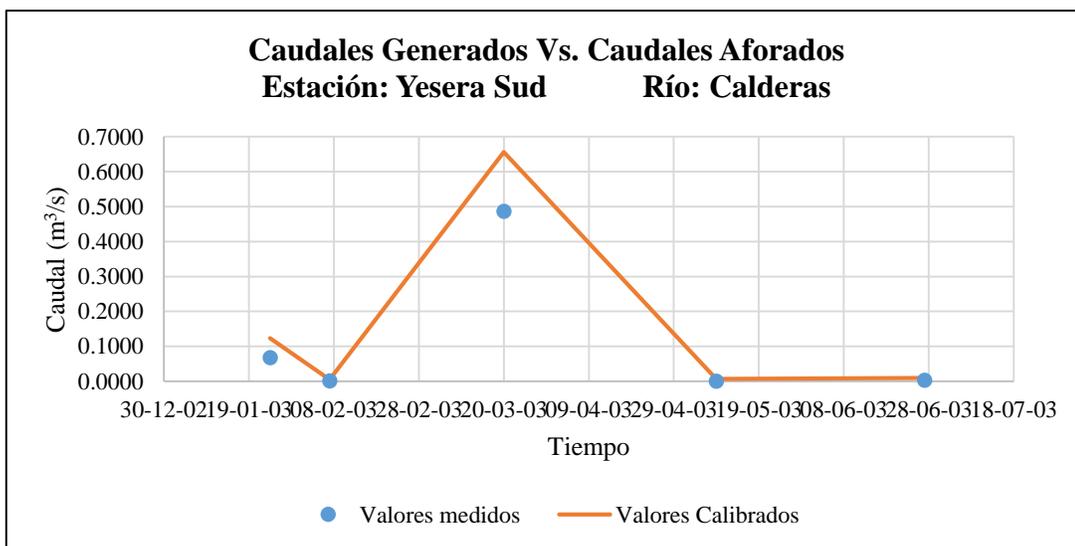
Figura 4.25 Curva de descarga año 2003

Fuente: Elaboración propia

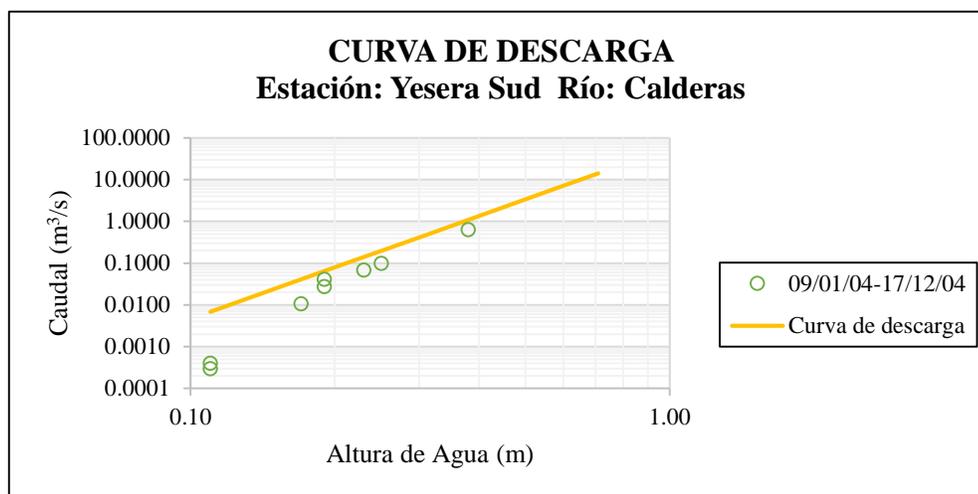
Tabla 4.25 Parámetros de cálculo año 2003

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=116(H+0,001)^{4,81}$
Coefficiente de correlación	0,9990
Desviación estándar	0,0671
Error	0,0800
Error logarítmico	9,4190

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.26** Caudales Calculados vs. Aforados año 2003

Fuente: Elaboración propia

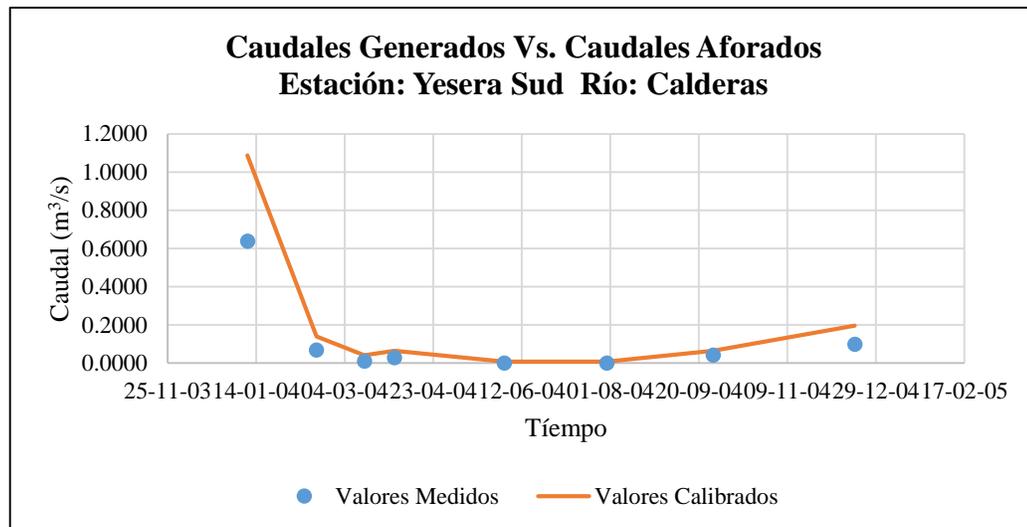
**Figura 4.27** Curva de descarga año 2004

Fuente: Elaboración propia

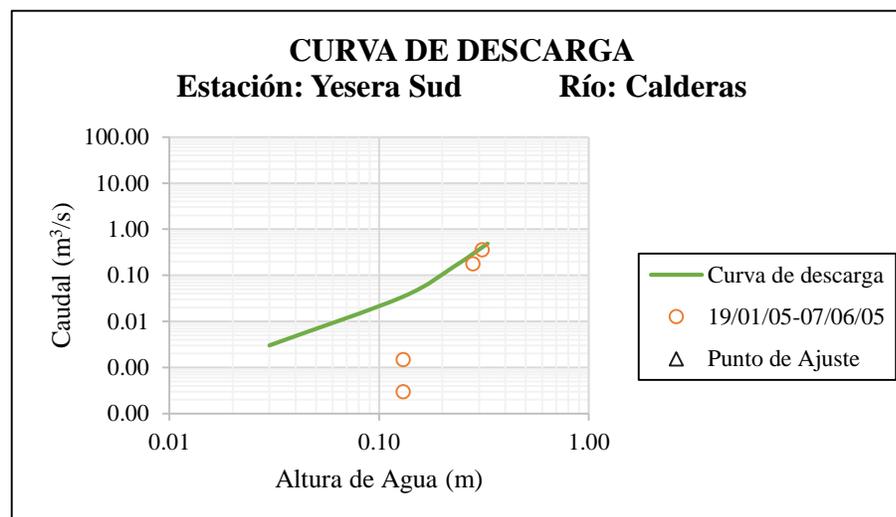
Tabla 4.26 Parámetros de cálculo año 2004

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=57,4(H+0,001)^{4,11}$
Coefficiente de correlación	0,9995
Desviación estándar	0,1436
Error	0,1650
Error logarítmico	5,1970

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.28** Caudales Calculados vs. Aforados año 2004

Fuente: Elaboración propia

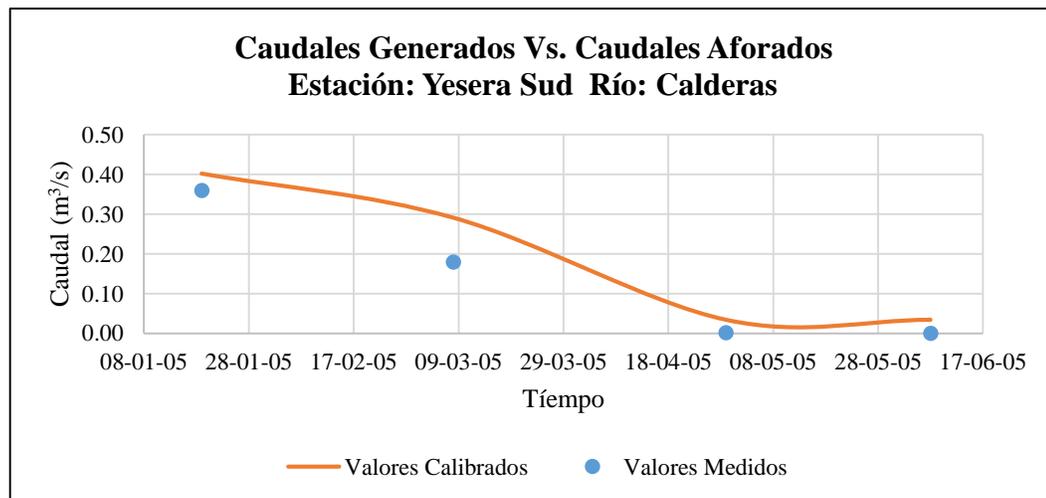
**Figura 4.29** Curva de descarga año 2005

Fuente: Elaboración propia

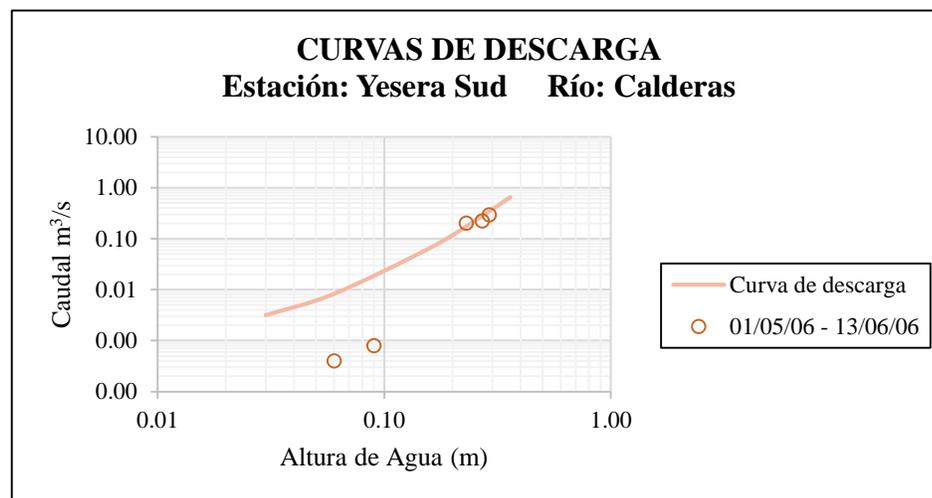
Tabla 4.27 Parámetros de cálculo año 2005

Parámetros de calculo	
Ecuación de ajuste	$Q=17,8(H+0,099)^{4,24}$
Coefficiente de correlación	0,9806
Desviación estándar	0,0351
Error	0,0640
Error logarítmico	17,3190

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.30** Caudales Calculados vs. Aforados año 2005

Fuente: Elaboración propia

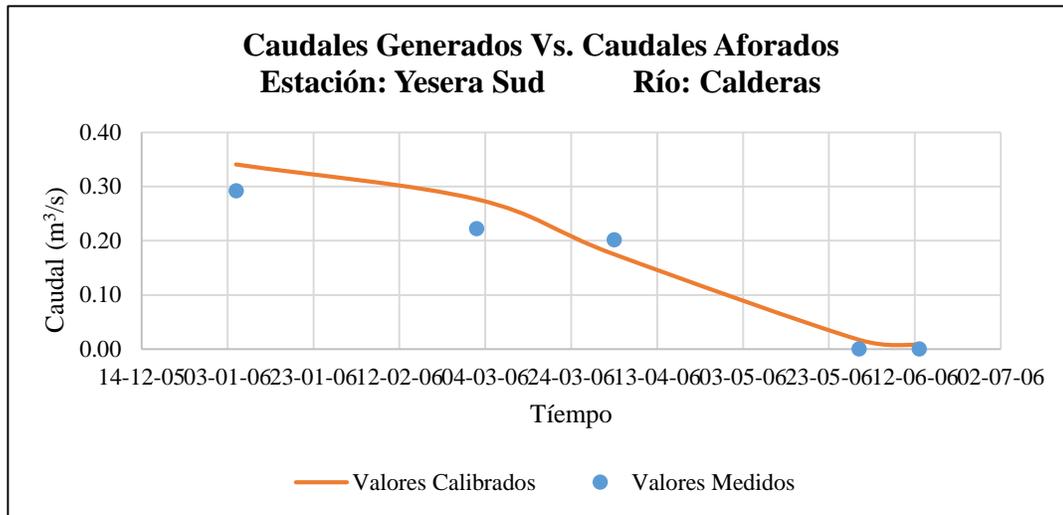
**Figura 4.31** Curva de descarga año 2006

Fuente: Elaboración propia

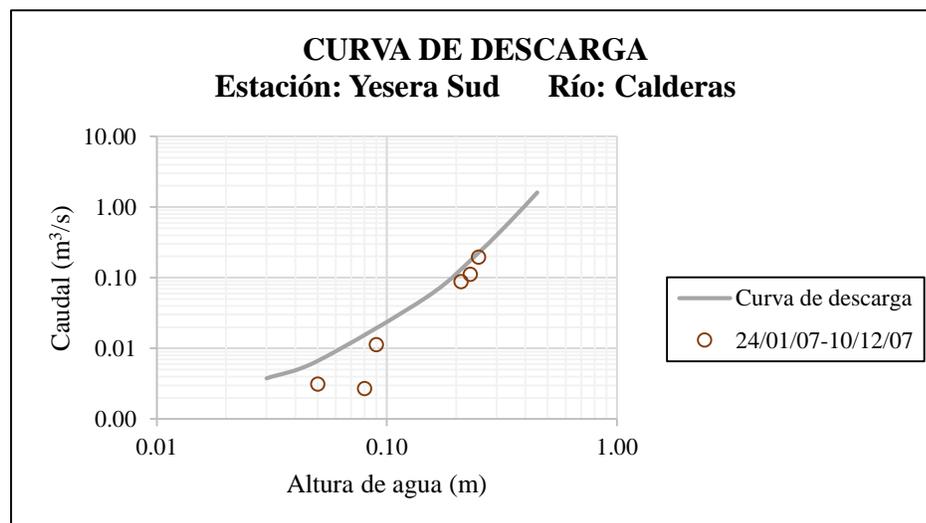
Tabla 4.28 Parámetros de cálculo año 2006

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=14,2(H+0,069)^{3,64}$
Coefficiente de correlación	0,9790
Desviación estándar	0,0310
Error	0,0360
Error logarítmico	6,9450

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.32** Caudales Calculados vs. Aforados año 2006

Fuente: Elaboración propia

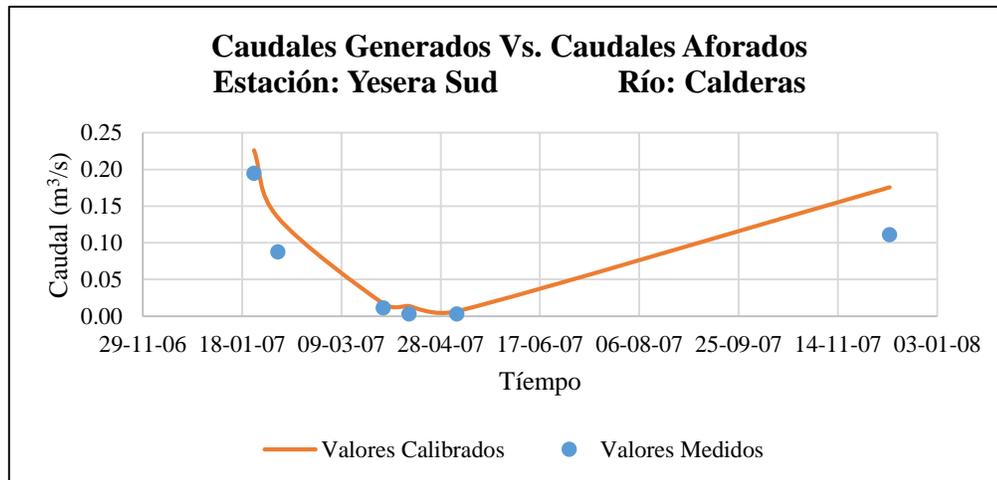
**Figura 4.33** Curva de descarga año 2007

Fuente: Elaboración propia

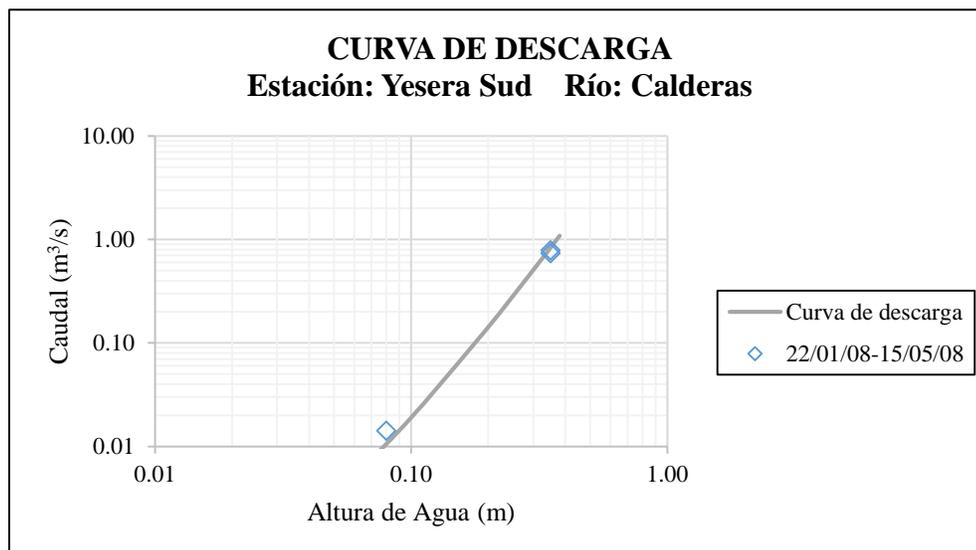
Tabla 4.29 Parámetros de cálculo año 2007

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=20,6(H+0,121)^{4,55}$
Coefficiente de correlación	0,9805
Desviación estándar	0,0238
Error	0,0360
Error logarítmico	2,2350

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.34** Caudales Calculados vs. Aforados año 2007

Fuente: Elaboración propia

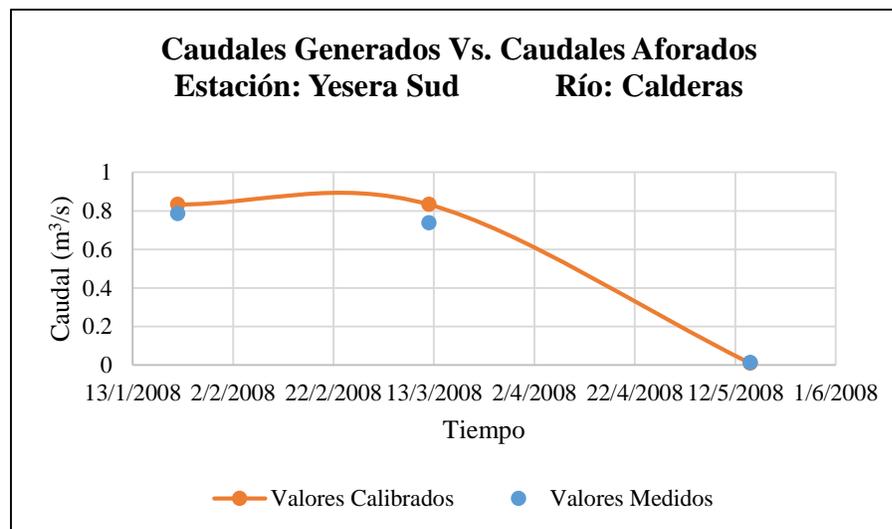
**Figura 4.35** Curva de descarga año 2008

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.30 Parámetros de cálculo año 2008

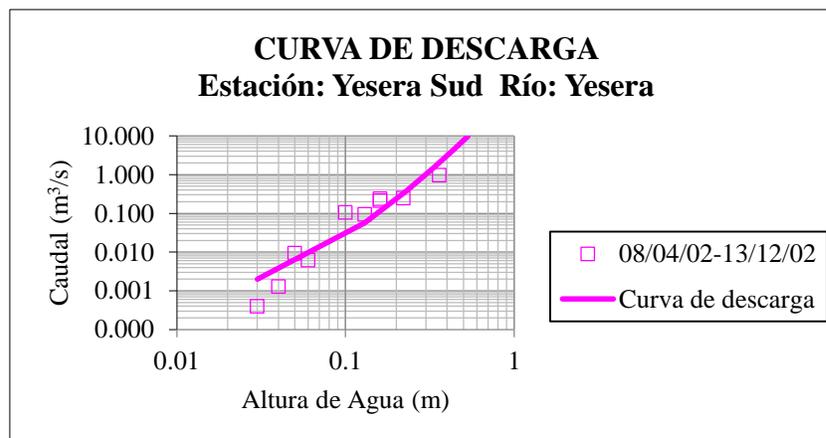
Parámetros de calculo	
Ecuación de ajuste	$Q=24,6(H+0,027)^{3,47}$
Coefficiente de correlación	0,9985
Desviación estándar	0,0439
Error	0,0610
Error logarítmico	1,2080

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.36** Caudales Calculados vs. Aforados año 2008

Fuente: Elaboración propia

Las curvas de descarga para el río Yesera son las siguientes:

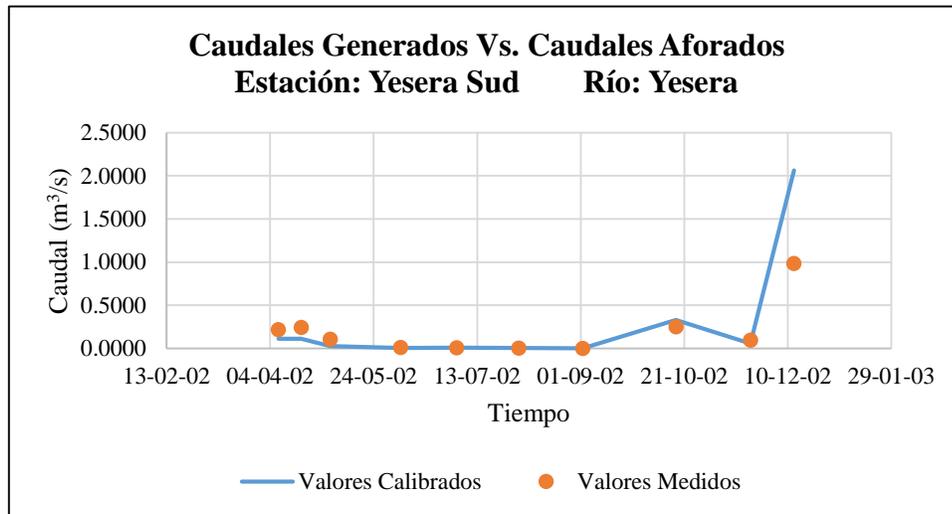
**Figura 4.37** Curva de descarga año 2002

Fuente: Elaboración propia

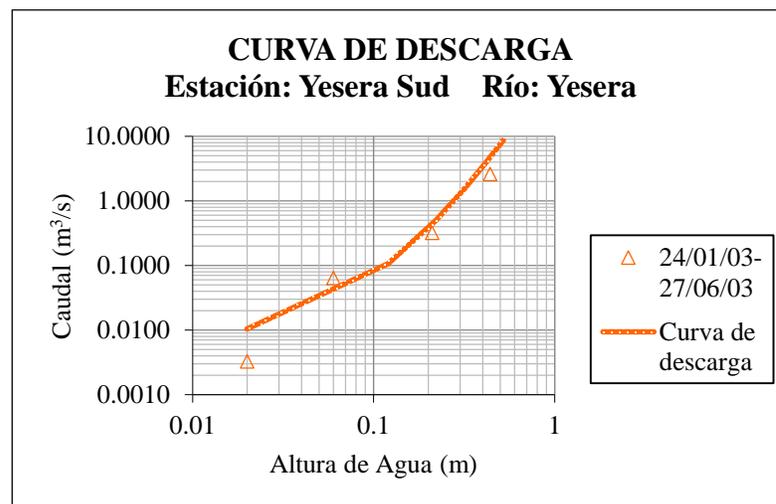
Tabla 4.31 Parámetros de cálculo año 2002

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=105,4(H+0,062)^{4,56}$
Coefficiente de correlación	0,9717
Desviación estándar	0,3463
Error	0,3470
Error Logarítmico	2,4080

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.38** Caudales Calculados vs. Aforados año 2002

Fuente: Elaboración propia

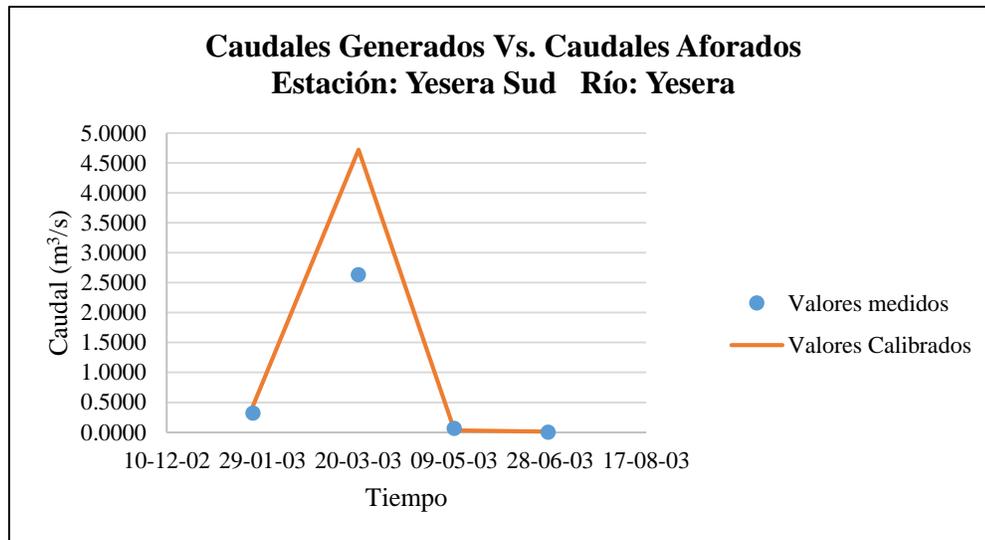
**Figura 4.39** Curva de descarga año 2003

Fuente: Elaboración propia

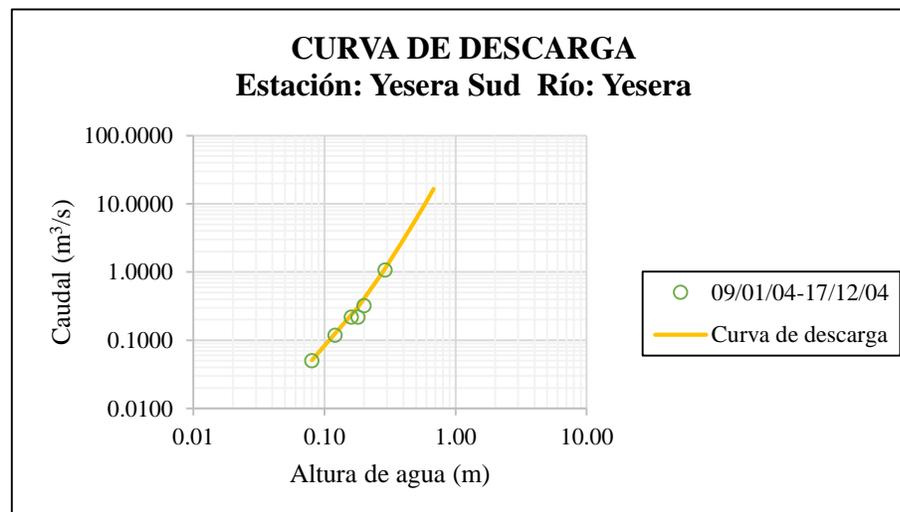
Tabla 4.32 Parámetros de cálculo año 2003

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=62,4(H+0,134)^{4,65}$
Coefficiente de correlación	0,9996
Desviación estándar	0,9536
Error	1,0450
Error logarítmico	2,1420

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.40** Caudales Calculados vs. Aforados año 2003

Fuente: Elaboración propia

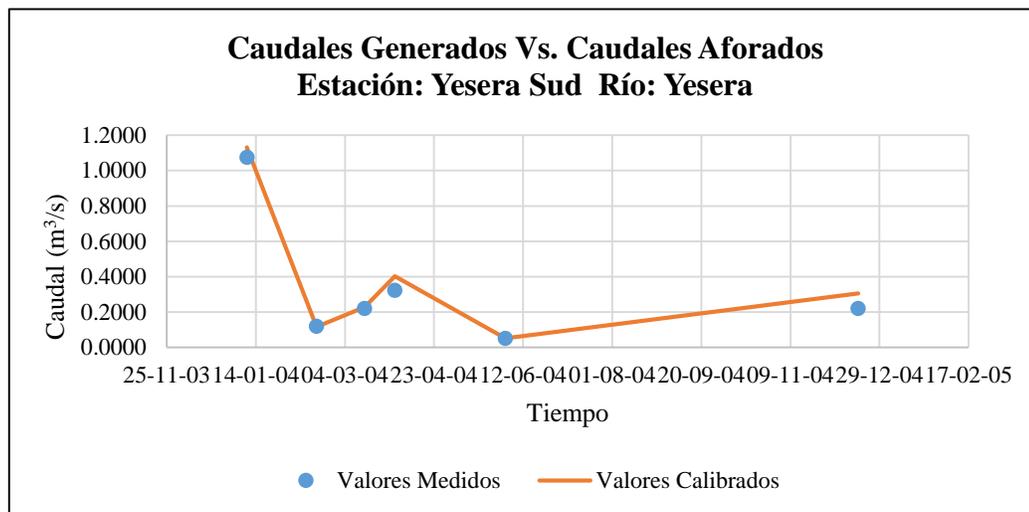
**Figura 4.41** Curva de descarga año 2004

Fuente: Elaboración propia

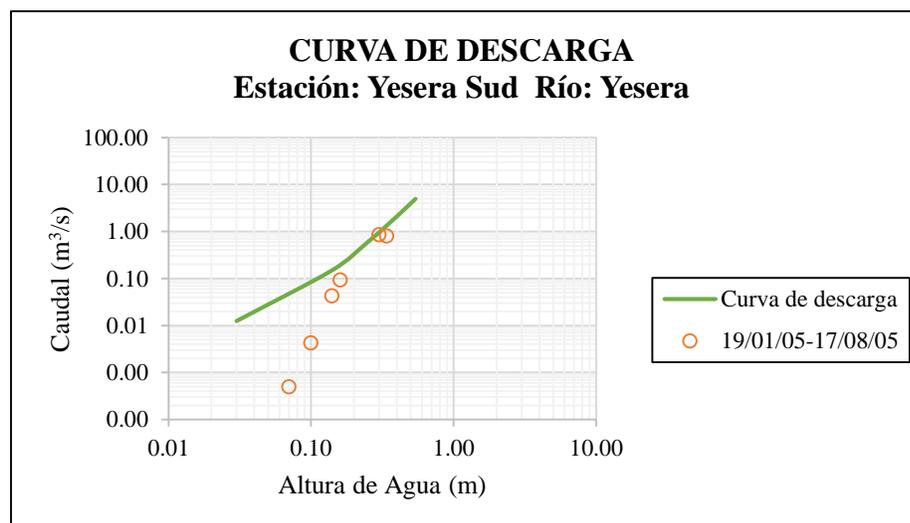
Tabla 4.33 Parámetros de cálculo año 2004

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=45,2(H+0,083)^{3,74}$
Coefficiente de correlación	0,9954
Desviación estándar	0,0390
Error	0,0530
Error logarítmico	1,1800

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.42** Caudales Calculados vs. Aforados año 2004

Fuente: Elaboración propia

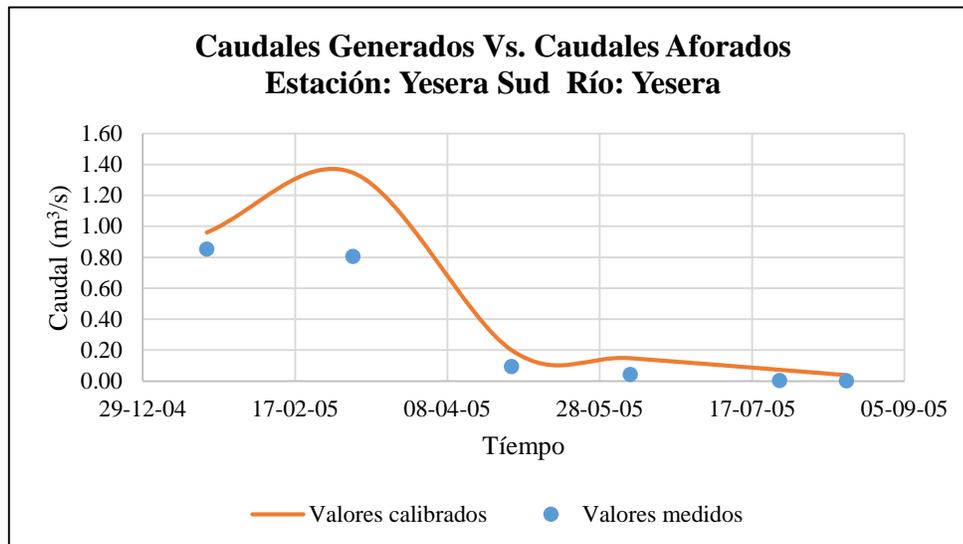
**Figura 4.43** Curva de descarga año 2005

Fuente: Elaboración propia

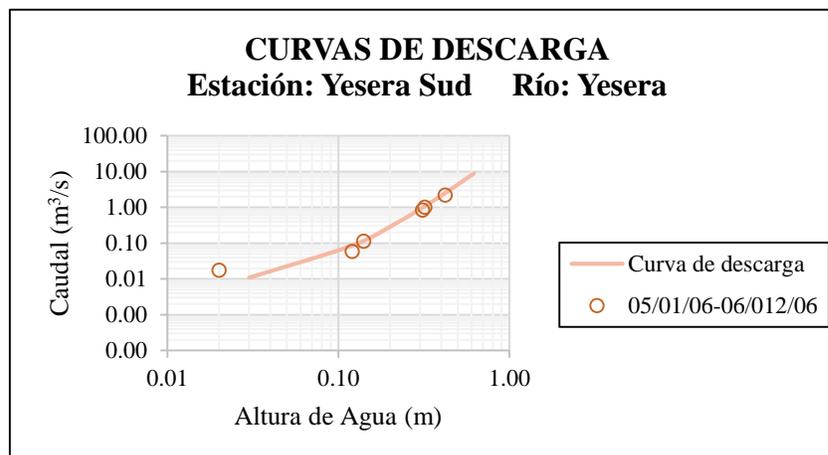
Tabla 4.34 Parámetros calculados año 2005

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=25,2(H+0,066)^{3,25}$
Coefficiente de correlación	0,9666
Desviación estándar	0,1788
Error	0,2350
Error logarítmico	9,1210

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.44** Caudales Calculados vs. Aforados año 2005

Fuente: Elaboración propia

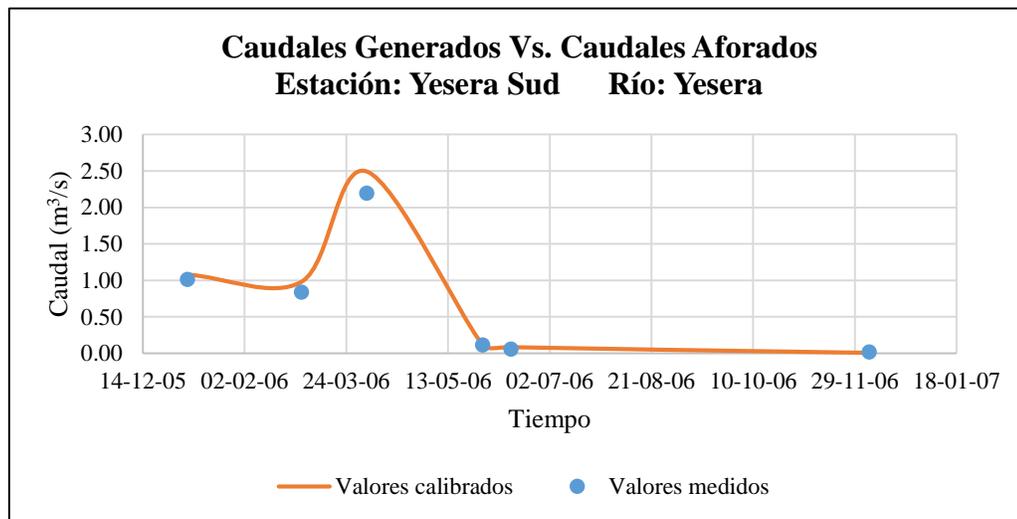
**Figura 4.45** Curva de descarga año 2006

Fuente: Elaboración propia

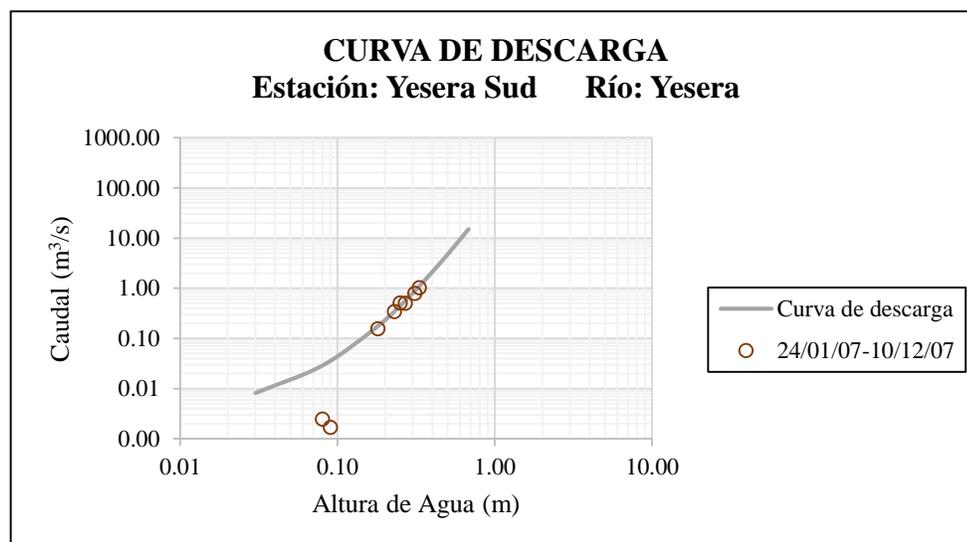
Tabla 4.35 Parámetros de cálculo año 2006

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=32,4(H+0,099)^{3,91}$
Coefficiente de correlación	0,9994
Desviación estándar	0,1111
Error	0,1390
Error logarítmico	1,4490

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.46** Caudales Calculados vs. Aforados año 2006

Fuente: Elaboración propia

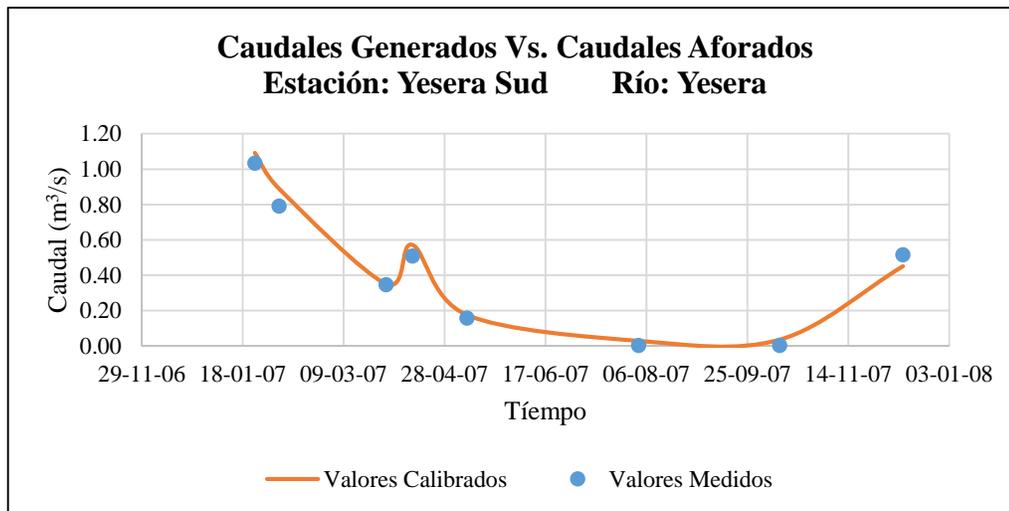
**Figura 4.47** Curva de descarga año 2007

Fuente: Elaboración propia

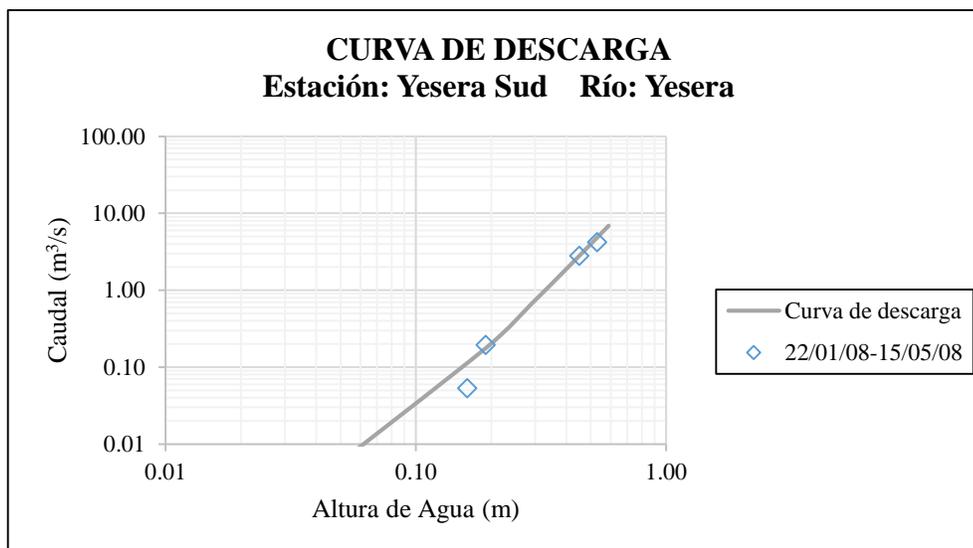
Tabla 4.36 Parámetros de cálculo año 2007

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=39,8(H+0,130)^{4,63}$
Coefficiente de correlación	0,9931
Desviación estándar	0,0468
Error	0,0550
Error logarítmico	3,9990

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.48** Caudales Calculados vs. Aforados año 2007

Fuente: Elaboración propia

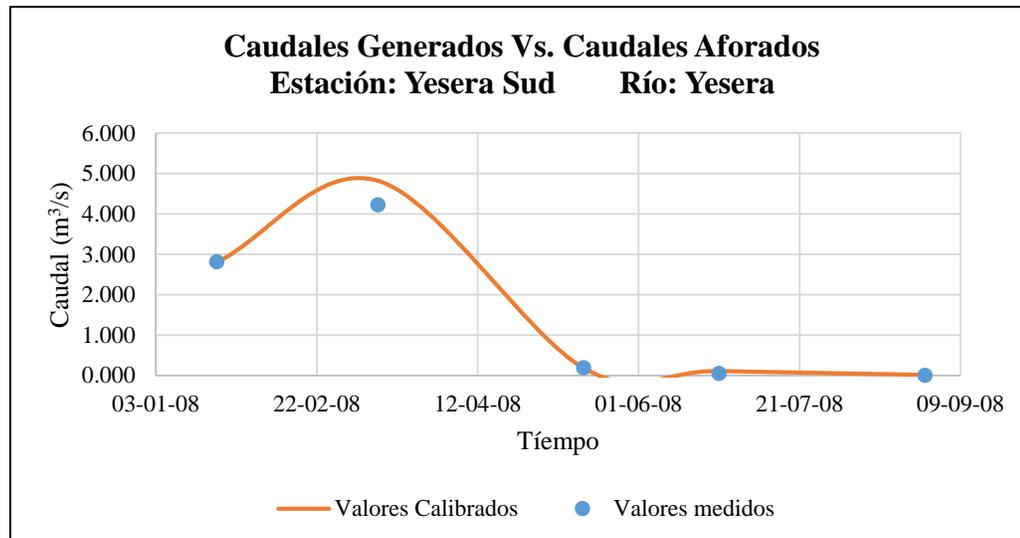
**Figura 4.49** Curva de descarga año 2008

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.37 Parámetros de cálculo año 2008

Parámetros de cálculo	
Ecuación de ajuste	$Q=37,6(H+0,027)^{3,51}$
Coefficiente de correlación	0,9967
Desviación estándar	0,2499
Error	0,2670
Error logarítmico	2,6690

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.50** Caudales Calculados vs. Aforados año 2008

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida la ecuación para cada año de medición se procedió a calcular los caudales medios diarios con los datos de escalas diarias (ver anexo 8) que proporciono el SENAMHI. Este procedimiento fue el mismo para ambos ríos. Los resultados de caudales medios diarios para cada río se detallan en el anexo 9.

Posteriormente se hizo un análisis donde se seleccionaron los años que tenían mayor cantidad y continuidad de datos para la calibración y validación del balance. Luego se realizó una evaluación en año hidrológico para cada año de medición comparando con la precipitación media y poder identificar anomalías como ser mayor precipitación y un caudal mínimo o viceversa.

A continuación, se presentan gráficas de comparación de caudales y precipitación para cada año de medición del río Calderas.

Tabla 4.38 Precipitación media mensual en la cuenca Calderas

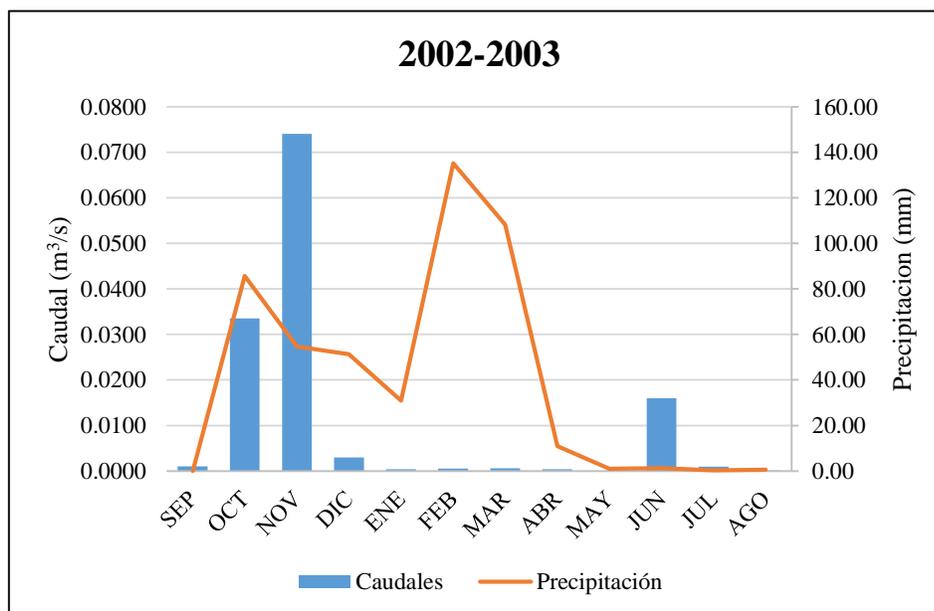
PRECIPITACION MEDIA MENSUAL (mm) CUENCA CALDERAS												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,02	85,75	54,63	51,34	30,97	135,20	108,13	10,88	1,06	1,25	0,32	0,66
2003-2004	1,73	41,35	45,99	157,98	119,97	61,34	133,42	4,95	8,22	0,02	0,00	0,59
2004-2005	12,76	28,41	52,65	113,80	81,93	77,75	92,91	15,40	3,23	0,21	0,19	4,55
2005-2006	5,48	3,23	72,81	143,13	105,49	145,26	68,23	15,15	0,01	0,00	0,25	0,29
2006-2007	1,61	59,09	40,83	60,11	159,12	115,65	82,37	28,40	3,33	0,00	0,15	0,00
2007-2008	22,77	57,51	63,75	131,01	178,68	60,23	96,47	13,11	0,50	0,00	0,00	0,43
2008-2009	0,59	33,23	82,98	240,81	184,48	90,60	140,34	27,15	0,00	0,01	0,00	0,90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.39 Caudales medios mensuales del rio Calderas

CAUDAL MEDIO MENSUAL RIO CALDERAS (m ³ /s)												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,0010	0,0335	0,0741	0,0030	0,0004	0,0006	0,0006	0,0004	0,0000	0,0160	0,0010	0,0001
2003-2004					0,0021	0,2048	0,0338	0,0010	0,0004	0,0005		
2004-2005	0,0008	0,0026	0,0010	0,0117	0,1910	0,0164	0,0406	0,0056	0,0004	0,0006	0,0005	0,0005
2005-2006					0,1032	0,3559	0,0617	0,0246	0,0087	0,0088		
2006-2007					0,3161	0,2019	0,0883	0,0369	0,0117	0,0063		
2007-2008	0,0014	0,0014	0,0814	0,2662	0,6423	0,1380	0,0820	0,0078	0,0069	0,0053	0,0038	0,0032
2008-2009					0,7049	0,1650	0,3397	0,0653	0,0012			

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.51** Comparación de precipitación y caudal año 2002

Fuente: Elaboración propia

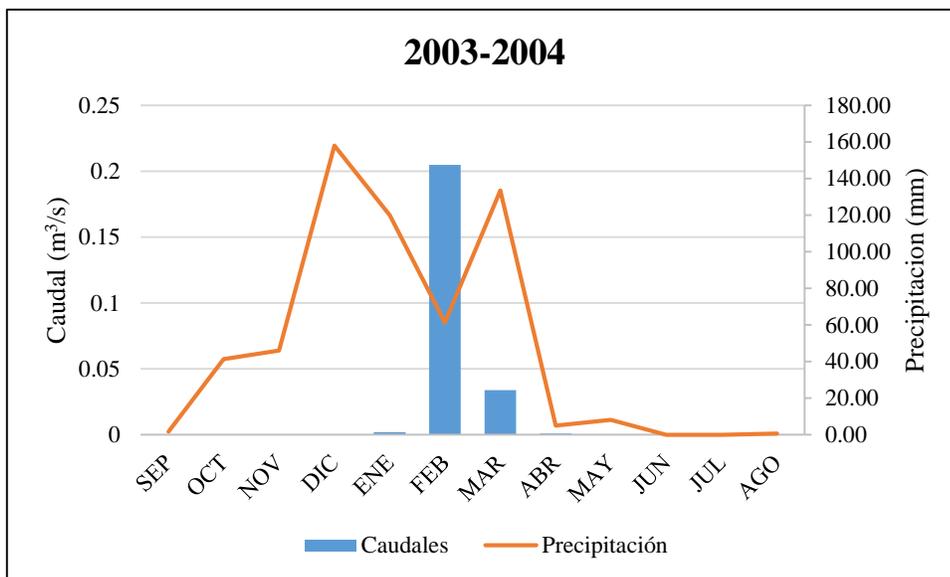


Figura 4.52 Comparación de precipitación y caudal año 2003

Fuente: Elaboración propia

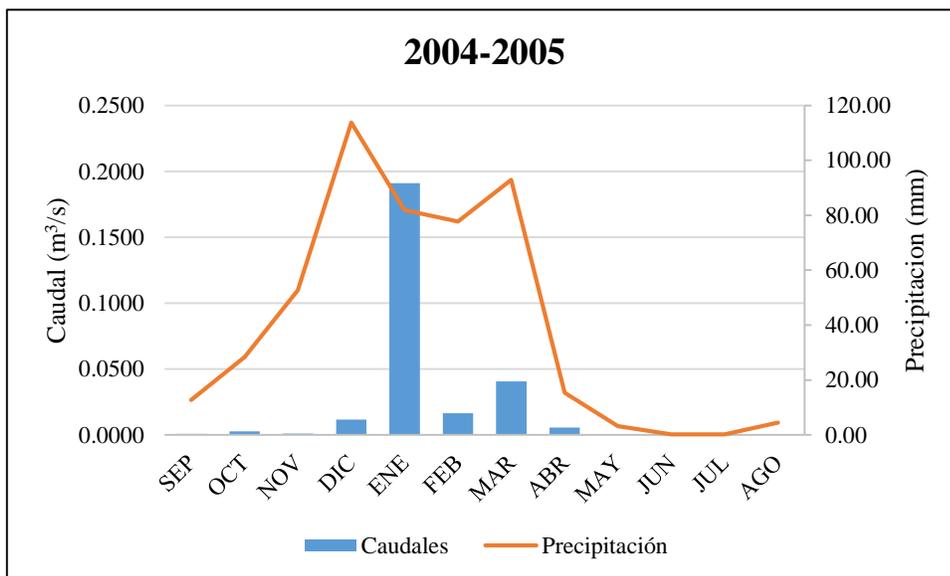


Figura 4.53 Comparación de precipitación y caudal año 2004

Fuente: Elaboración propia

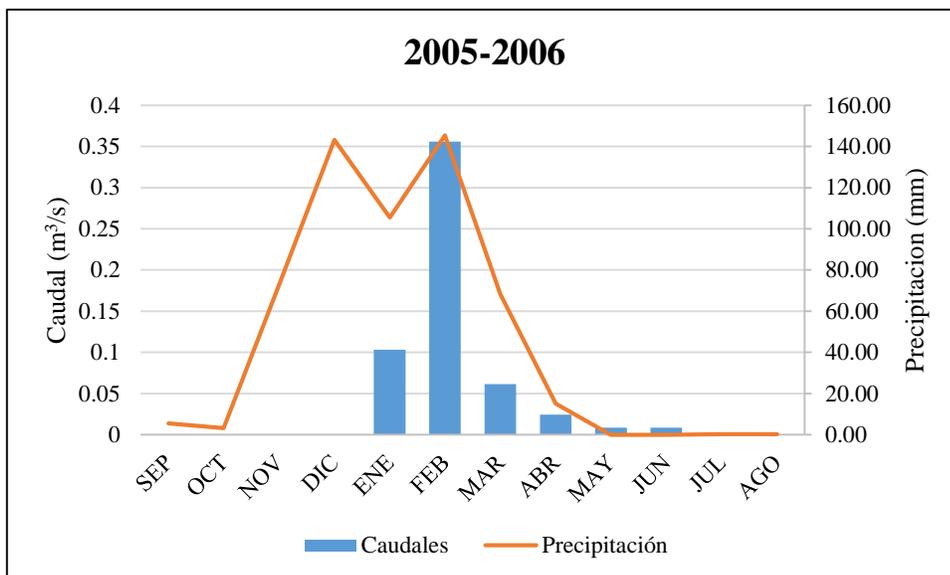


Figura 4.54 Comparación de precipitación y caudal año 2005

Fuente: Elaboración propia

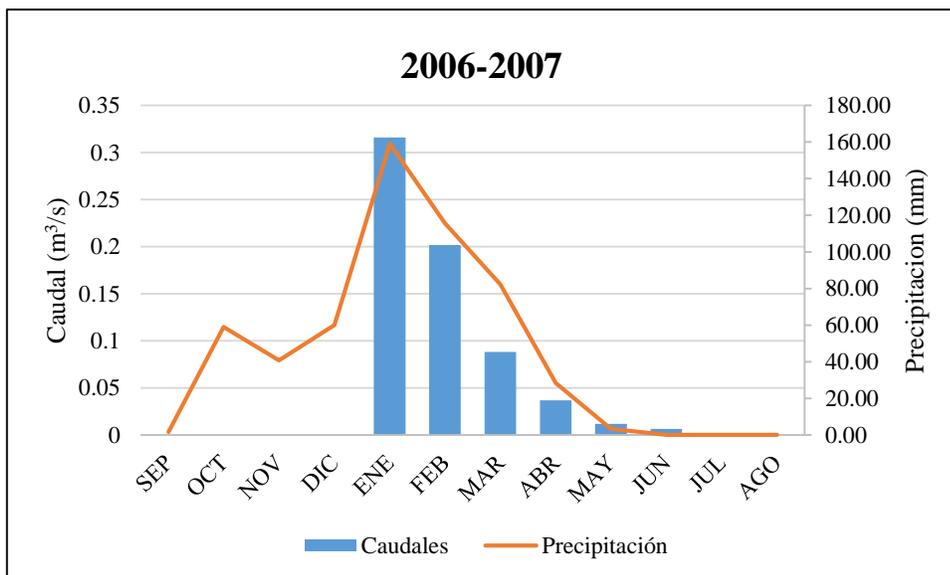


Figura 4.55 Comparación de precipitación y caudal año 2006

Fuente: Elaboración propia

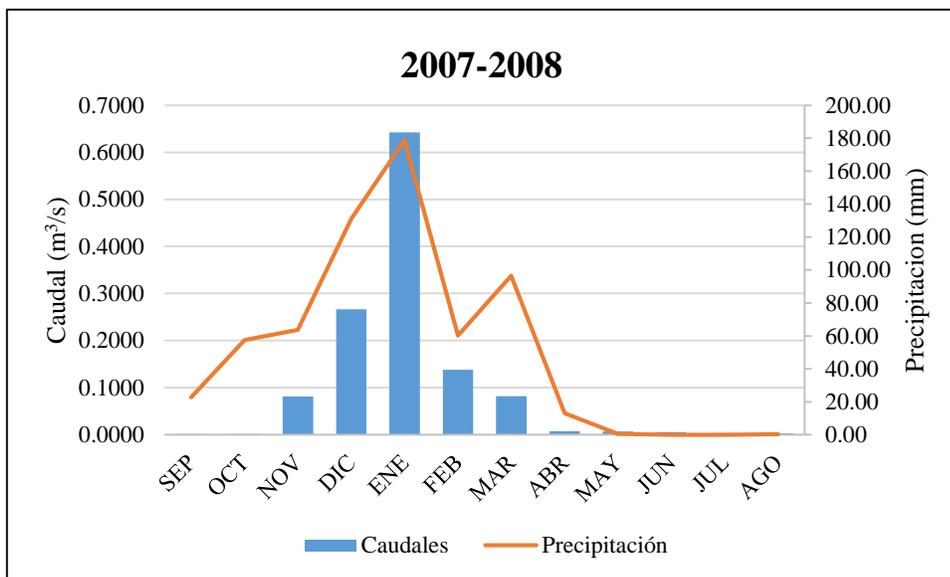


Figura 4.56 Comparación de precipitación y caudal año 2007

Fuente: Elaboración propia

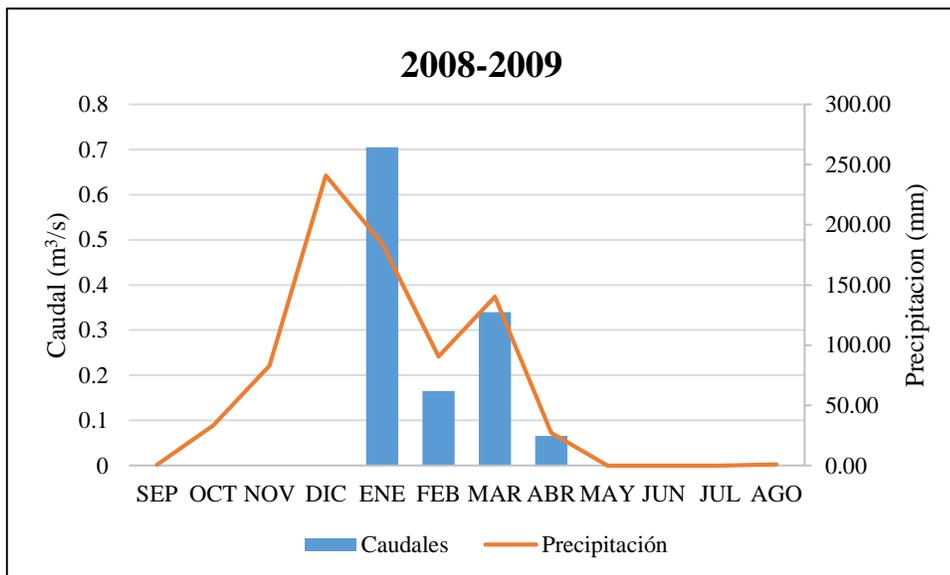


Figura 4.57 Comparación de precipitación y caudal año 2008

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.40 Precipitación media mensual en la Cuenca Yesera

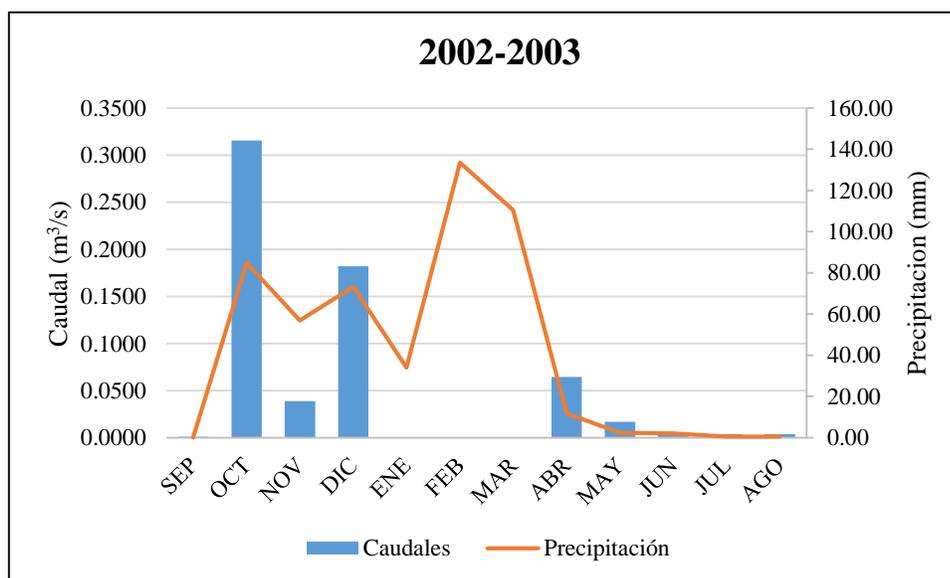
PRECIPITACION MEDIA MENSUAL (mm) CUENCA YESERA												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,00	84,82	56,82	73,28	34,01	133,52	110,48	11,72	2,33	1,97	0,46	0,46
2003-2004	2,06	38,63	43,53	182,13	132,90	76,44	157,29	6,71	8,93	0,04	0,00	1,86
2004-2005	14,59	28,72	50,82	111,66	91,14	76,65	92,54	16,83	3,26	0,55	0,23	8,90
2005-2006	6,55	7,34	57,27	149,14	107,66	150,57	66,43	14,06	0,28	0,00	0,57	0,28
2006-2007	2,17	51,68	47,67	70,12	182,93	108,92	88,51	33,57	3,61	0,02	0,24	0,00
2007-2008	18,09	52,17	68,07	137,27	195,11	61,42	95,36	16,52	0,79	0,00	0,00	0,75
2008-2009	0,67	31,00	69,30	254,01	183,61	91,29	152,33	25,94	0,61	0,00	0,00	0,84

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.41 Caudales medios mensuales del rio Yesera

CAUDAL MEDIO MENSUAL RIO YESERA (m ³ /s)												
AÑO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2002-2003	0,0009	0,3155	0,0386	0,1820				0,0644	0,0169	0,0050	0,0036	0,0035
2003-2004					0,4061	1,0882	4,1630	0,1356	0,0336	0,0277		
2004-2005	0,0082	0,0367	0,3038	0,3748	1,4110	0,7667	0,5751	0,1004	0,0508	0,0485	0,0210	0,0041
2005-2006					0,8125	3,2891	1,0186	0,4337	0,0839	0,0956	0,0718	0,0384
2006-2007	0,0044	0,9502	0,5371	0,0265	4,9919	4,6538	1,6502	0,6382	0,1012	0,0603	0,0280	0,0157
2007-2008	0,0097	0,0650	3,2925	2,8226	2,0219	0,7653	0,8235	0,2676	0,1081	0,0799	0,0344	0,0195
2008-2009					6,8961	2,2947	4,3246	0,7309	0,1256	0,0880	0,0361	0,0064

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.58** Comparación de precipitación y caudal año 2002

Fuente: Elaboración propia

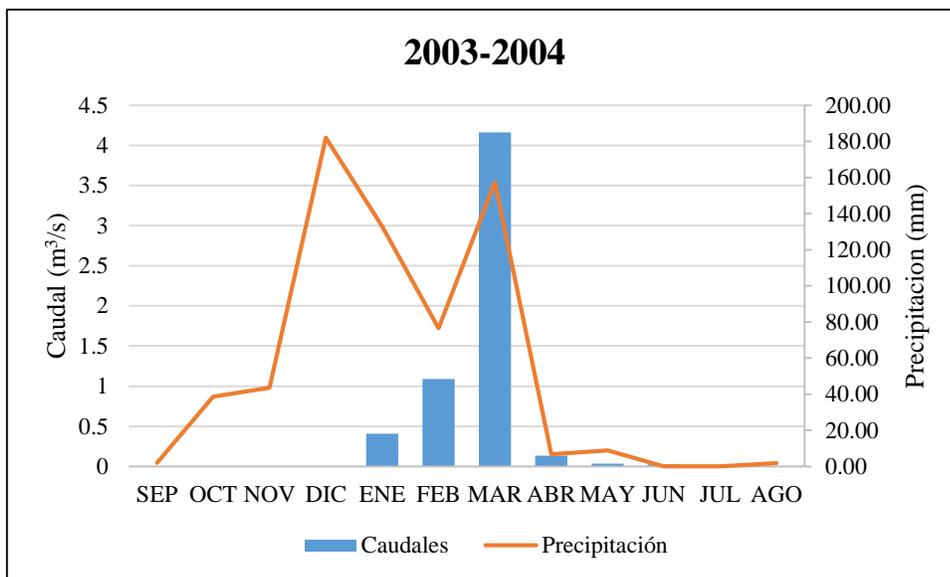


Figura 4.59 Comparación de precipitación y caudal 2003

Fuente: Elaboración propia

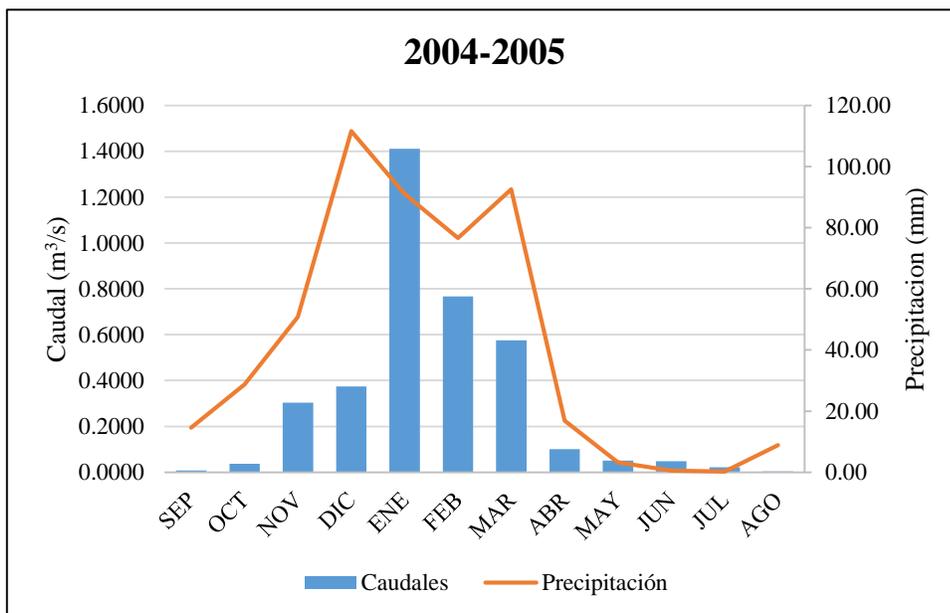


Figura 4.60 Comparación de precipitación y caudal 2004

Fuente: Elaboración propia

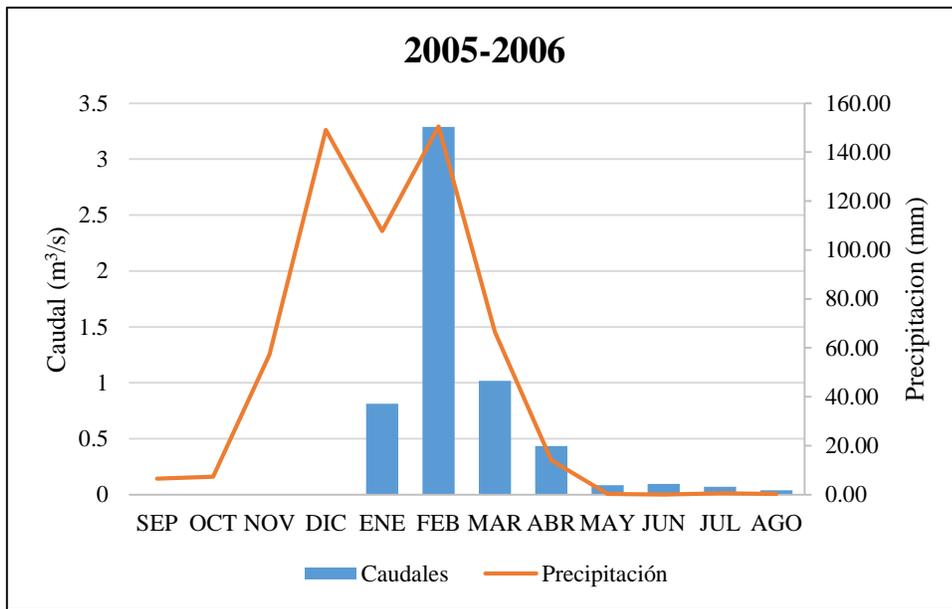


Figura 4.61 Comparación de precipitación y caudal 2005

Fuente: Elaboración propia

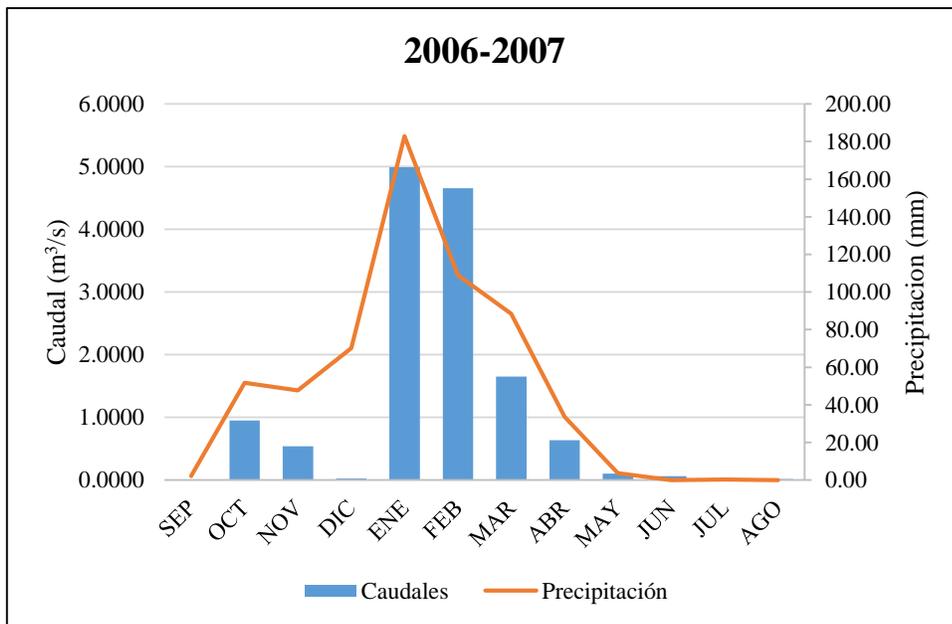


Figura 4.62 Comparación de precipitación y caudal 2006

Fuente: Elaboración propia

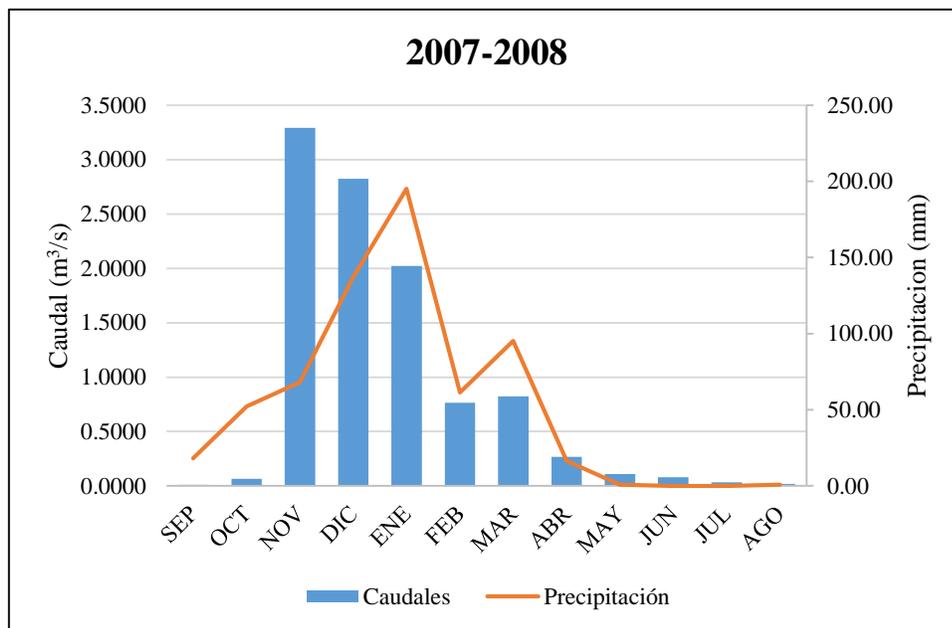


Figura 4.63 Comparación de precipitación y caudal 2007

Fuente: Elaboración propia

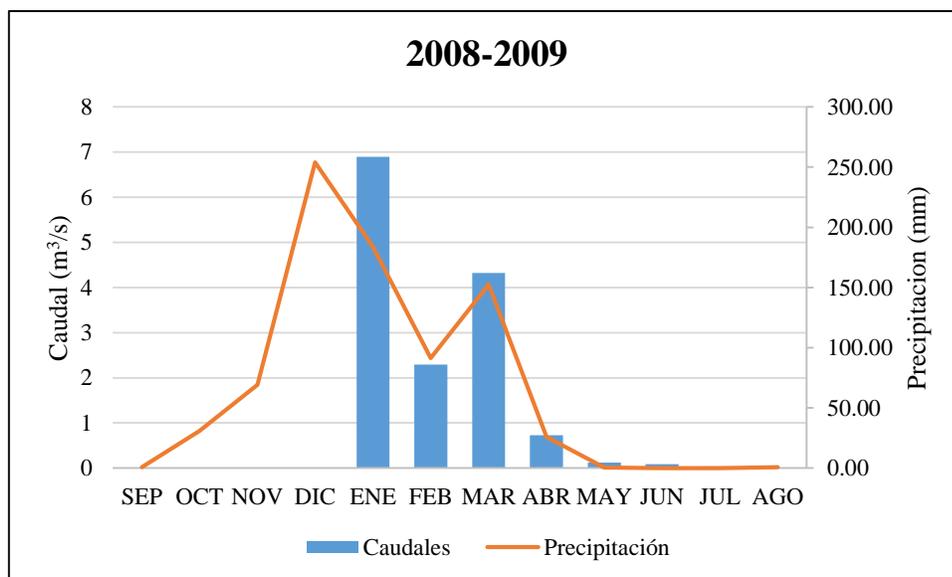


Figura 4.62 Comparación de precipitación y caudal 2008

Fuente: Elaboración propia

En base a este análisis los periodos de calibración y validación para la cuenca Calderas y Yesera son:

Estación Yesera Sud (Río Calderas): Periodo de calibración del 2004 al 2006 y periodo de validación del 2007 y 2008. Los años 2002 y 2003 se descartan debido a que no presentan coherencia entre el caudal y la precipitación.

Estación Yesera Sud (Río Yesera): Periodo de calibración del 2005 al 2006 y periodo de validación del 2007 al 2008 descartando los años 2002, 2003 y los meses de noviembre y diciembre en el año 2007 debido a que no presentan coherencia en relación a la precipitación y el caudal.

Los caudales medios diarios utilizados para la calibración de ambas cuencas se detallan en el anexo 9.

4.4.4. Cobertura vegetal y textura

La combinación de la cobertura vegetal y la textura nos proporciona una idea del comportamiento del agua sobre una cuenca.

Para poder representar la información de cobertura y textura en el modelo WEAP se realizó esta combinación mediante el software ArcGist.

Se extrajeron los archivos shapefile de cobertura y textura de la base de datos del ZONISIG. Estos archivos se encuentran en un sistema de referencia geocéntrico PSAD56 (Provisional South American Datum of 1956 UTM Zone 20S) debido a esto los shapefiles se proyectaron a las coordenadas UTM zona 20S para poder tener resultados más precisos en las cuencas.

4.4.4.1. Caracterización de la Cobertura vegetal

El archivo shapefile de cobertura vegetal es de todo el departamento de Tarija para ello se procedió a extraer solo la información para la cuenca Calderas y Yesera.

Los datos de cobertura se detallan para la cuenca Calderas y Yesera en la tabla 4.42.

Tabla 4.42 Leyenda de cobertura vegetal y área de influencia en la cuenca Calderas y Yesera

LEYENDA DE VEGETACIÓN CUENCA CALDERAS			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
59	MATORRAL XEROMÓRFICO deciduo por sequía montano	21,55	70,76
99	HERBACEA GRAMINOIDE BAJA sinusia arbustiva montano	6,84	22,45
C	Áreas agrícolas y pasturas (sembradas y de sucesión secundaria)	2,07	6,79
TOTAL		30,45	100,00
LEYENDA DE VEGETACIÓN CUENCA YESERA			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
108	HERBACEA GRAMINOIDE BAJA sin sinusia subalpino	4,77	4,44
19	BOSQUE RALO SIEMPRE VERDE semideciduo montano	6,71	6,25
50	MATORRAL CADUCIFOLIO deciduo por sequía montano	0,09	0,09
59	MATORRAL XEROMÓRFICO deciduo por sequía montano	25,36	23,60
99	HERBACEA GRAMINOIDE BAJA sinusia arbustiva montano	68,57	63,81
C	Áreas agrícolas y pasturas (sembradas y de sucesión secundaria)	1,96	1,83
TOTAL		107,46	100,00

Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG

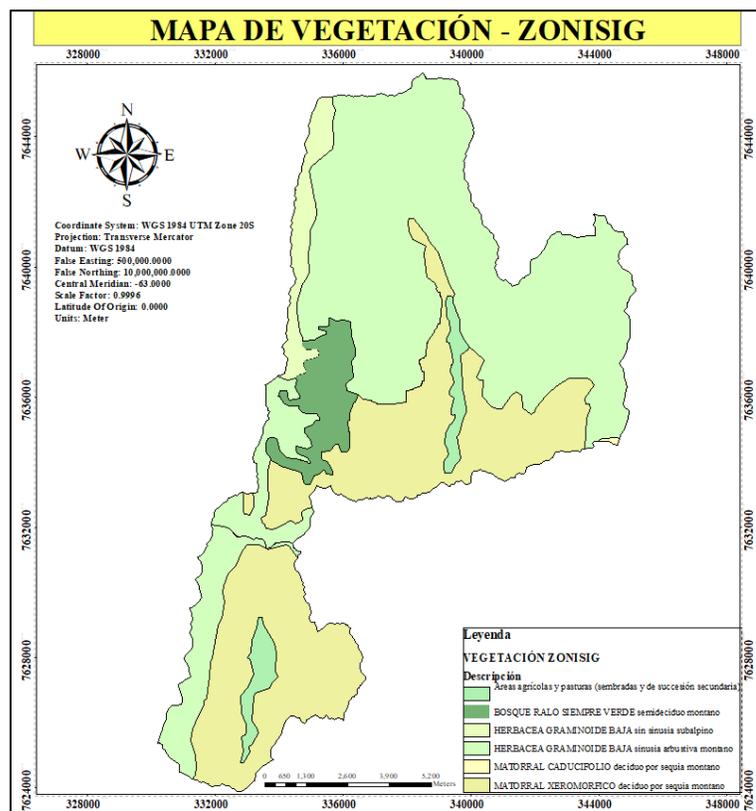


Figura 4.63 Mapa de vegetación – ZONISIG

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG del ZONISIG

La guía metodológica de modelación hidrológica para balances superficiales recomienda agrupar los tipos de vegetación cuando se dispone de información muy detallada esto se debe a que el modelo WEAP no requiere una clasificación de cobertura muy específica. Considerando esta sugerencia se procedió a agrupar y sintetizar la información de cobertura como se detalla en la tabla 4.43.

Tabla 4.43 Leyenda de cobertura vegetal para la utilización en WEAP

VEGETACIÓN ZONISIG	COBERTURA WEAP
HERBACEA GRAMINOIDE BAJA sin sinusia subalpino	Pastos
HERBACEA GRAMINOIDE BAJA sinusia arbustiva montano	
BOSQUE RALO SIEMPRE VERDE semideciduo montano	Bosque
MATORRAL CADUCIFOLIO deciduo por sequía montano	Matorral
MATORRAL XEROMÓRFICO deciduo por sequía montano	
Áreas agrícolas y pasturas (sembradas y de sucesión secundaria)	Agricultura

Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG

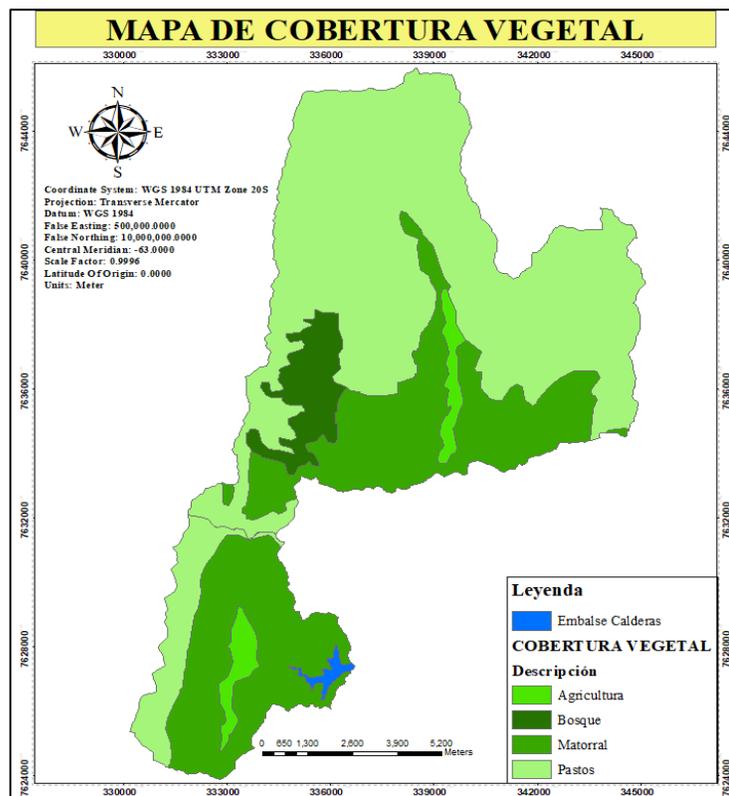


Figura 4.64 Mapa de cobertura vegetal

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG del ZONISIG

El criterio que se usó para la agrupación de los tipos de cobertura fue la similitud de las características físicas de la vegetación, lo cual podíamos confirmar mediante las imágenes digitales que nos proporciona el Google Earth, y además por el nombre de la leyenda. También se consideró el clima, la altitud en la cual se ubicaban los distintos polígonos de cobertura vegetal que tenían semejanza entre ellos.

4.4.4.2. Caracterización de Textura

La textura indica la permeabilidad e impermeabilidad de un suelo y así mismo la capacidad de infiltración la cual incide directamente en el primer contenedor del método de humedad del suelo del modelo WEAP.

Se extrajeron los datos del shapefile de textura para la cuenca de Calderas y Yesera. Las leyendas se muestran en la tabla 4.44.

Tabla 4.44 Leyenda de tipo de suelo y áreas de influencia en la cuenca Calderas y Yesera

LEYENDA DE TIPO DE SUELO CUENCA CALDERAS			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
14	Asociación Cambisol – Leptosol	1,74	5,72
3	Asociación Leptosol - Cambisol – Phaeozem	26,58	87,28
33	Asociación Calcisol – Lixisol	2,13	7,00
TOTAL		30,45	100,00
LEYENDA DE TIPO DE SUELO CUENCA CALDERAS			
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
14	Asociación Cambisol – Leptosol	72,18	67,17
3	Asociación Leptosol - Cambisol – Phaeozem	26,43	24,59
33	Asociación Calcisol – Lixisol	8,85	8,24
TOTAL		107,46	100,00

Fuente: Elaboración propia en base a información de ZONISIG

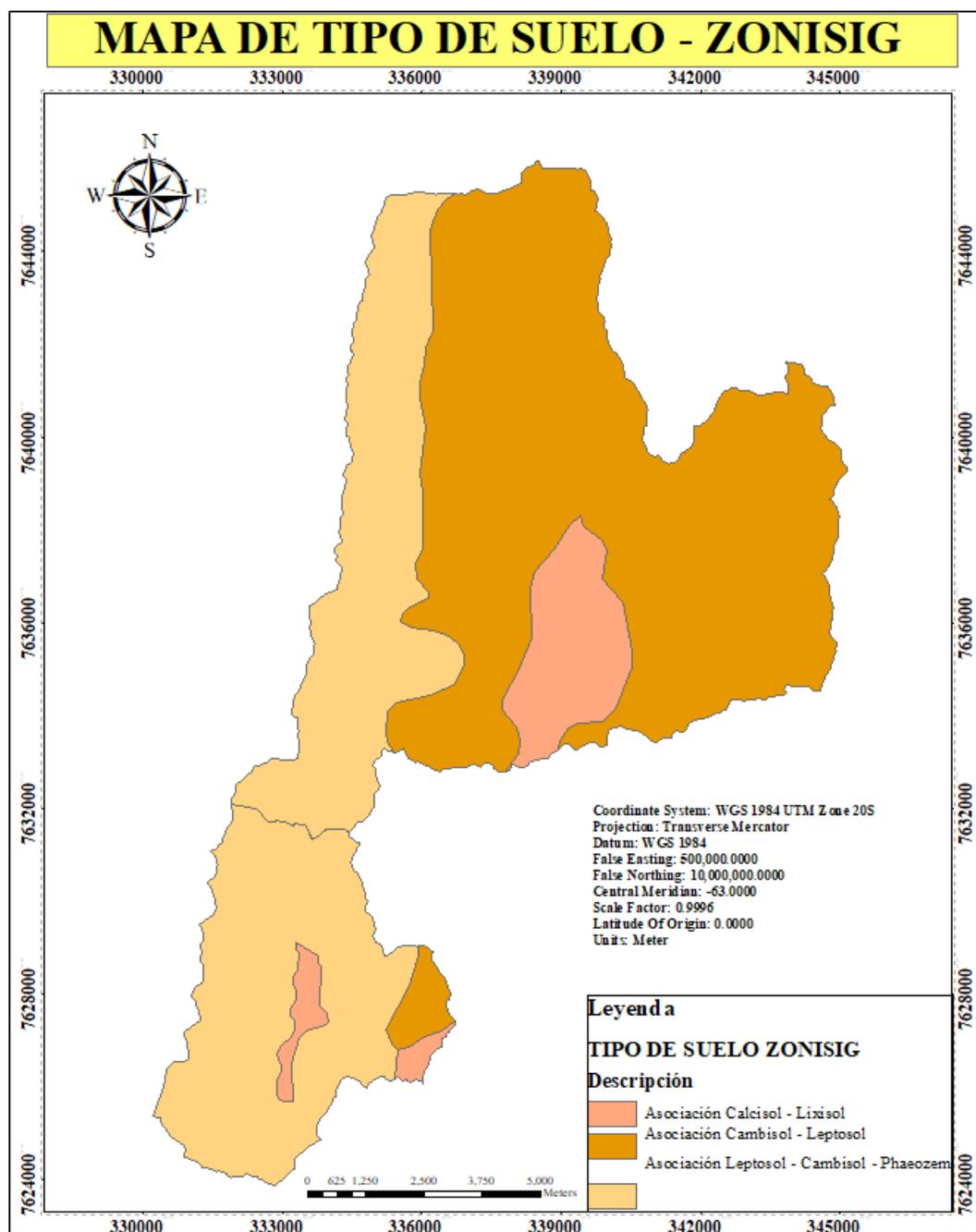


Figura 4.65 Mapa de tipo de suelo - ZONISIG

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG de ZONISIG

Para poder tener una mejor parametrización en el modelo WEAP, se aplicó de igual

manera la metodología de la cobertura vegetal, donde se realizó una verificación a través de imágenes satelitales del Google Earth si la descripción de cada polígono de textura, correspondía a su descripción, además se sintetizó los polígonos que tenían la misma leyenda y se renombró las mismas como se muestra en la tabla 4.45.

Tabla 4.45 Leyenda de Textura para la utilización en WEAP

Nº	TEXTURA ZONISIG	TEXTURA WEAP
1	Asociación Cambisol – Leptosol	Arcillo limoso (YL)
2	Asociación Leptosol - Cambisol - Phaeozem	Franco arcilloso arenoso (FYA)
3	Asociación Calcisol – Lixisol	Arcillo arenoso (YA)

Fuente: Elaboración propia

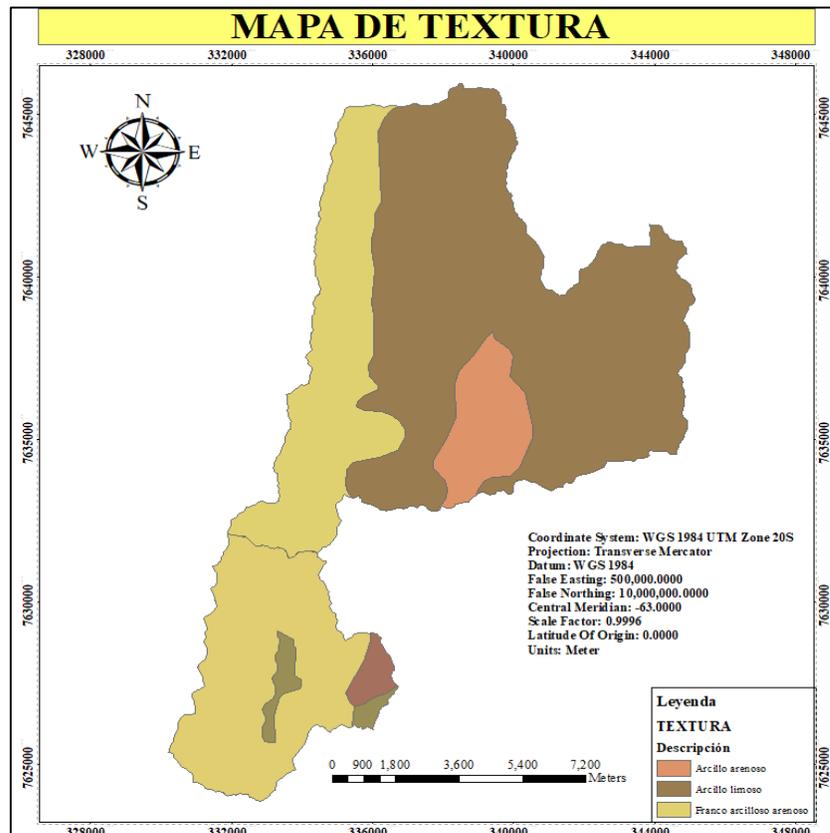


Figura 4.66 Mapa de textura

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG de ZONISIG

4.4.4.3. Combinación de cobertura vegetal y textura

La combinación de los mapas de cobertura y textura se realizó mediante el software ArcGist y se obtuvo diferentes combinaciones las cuales fueron analizadas bajo el siguiente criterio, para cierta textura se presenta cierta cobertura vegetal como ser en un suelo con una capacidad mínima de infiltración como suele ser un franco arcilloso no puede presentarse una cobertura vegetal como ser un bosque, además se hizo una comparación visual de las combinaciones generadas con respecto a las imágenes satelitales del Google Earth para así determinar si existe una relación con las combinaciones y validar los mapas generados.

En la tabla 4.46 se muestra el resultado del análisis de la combinación cobertura vegetal y textura.

Tabla 4.46 Combinación de cobertura vegetal y textura

CUENCA CALDERAS		
COMBINACIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
Agricultura_FYA	0,75	2,45
Agricultura_YA	1,32	4,34
Embalse Calderas_EC	0,70	2,30
Matorral_FYA	18,94	62,20
Matorral_YA	0,64	2,10
Matorral_YL	1,27	4,16
Pastos_FYA	6,84	22,45
TOTAL	30,45	100,00
CUENCA YESERA		
COMBINACIÓN	ÁREA (km²)	ÁREA (%)
Agricultura_YA	1,64	1,53
Agricultura_YL	0,32	0,30
Bosque_FYA	5,63	5,24
Bosque_YL	1,08	1,01
Matorral_FYA	3,25	3,02
Matorral_YA	7,10	6,60
Matorral_YL	15,11	14,06
Pastos_FYA	17,55	16,33
Pastos_YA	0,12	0,11
Pastos_YL	55,67	51,80
TOTAL	107,46	100,00

Fuente: Elaboración propia

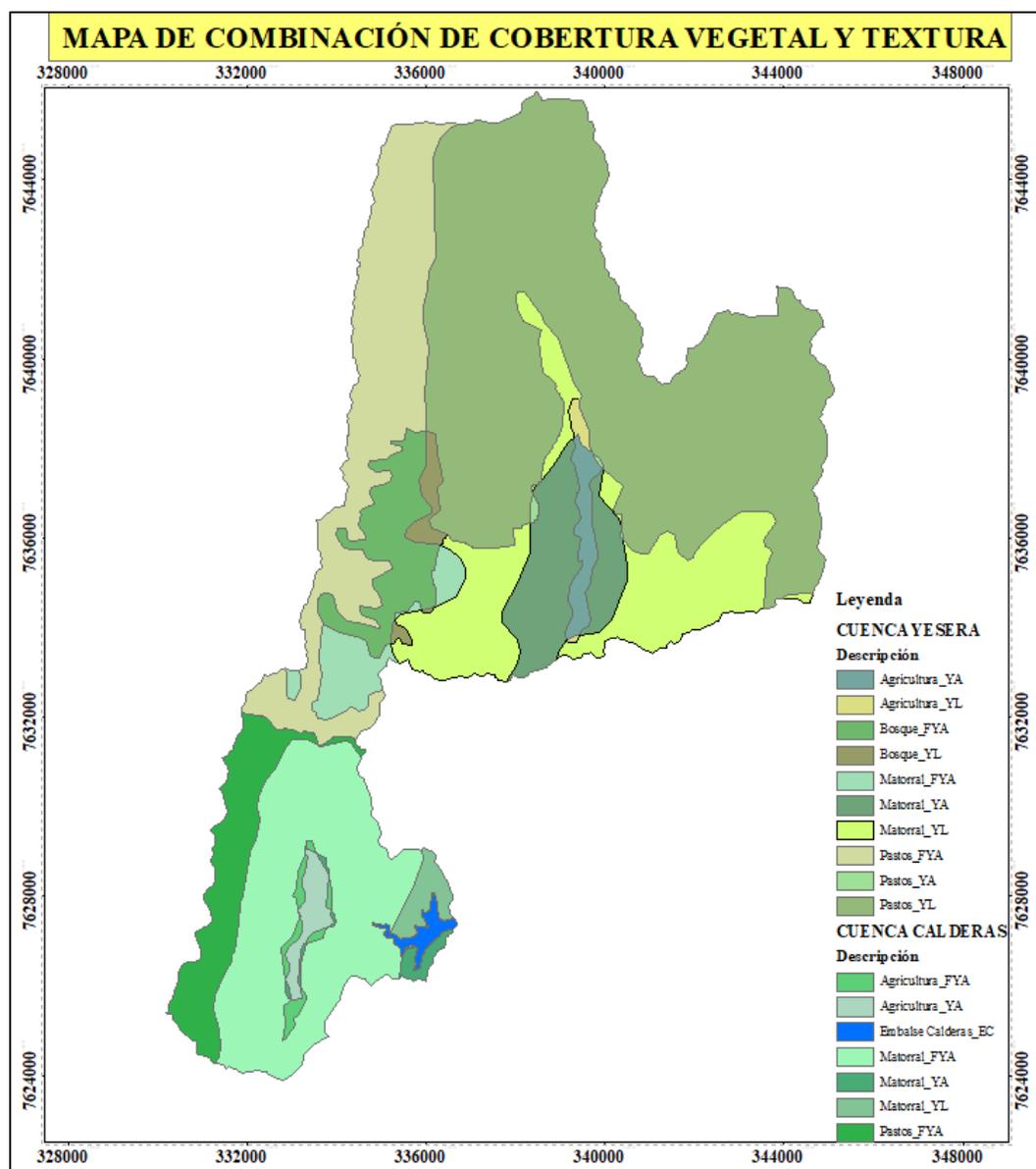


Figura 4.67 Mapa de combinación de cobertura vegetal y Textura

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG de ZONISIG

El formato que requiere el modelo WEAP para importar esta información es NETCDF (Formulario de datos comunes en red) el cual es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección.

Para ello el archivo shapefile de la combinación cobertura vegetal – textura se convirtió al formato raster y luego a NETCDF mediante los softwares ArcGist y QGIS.

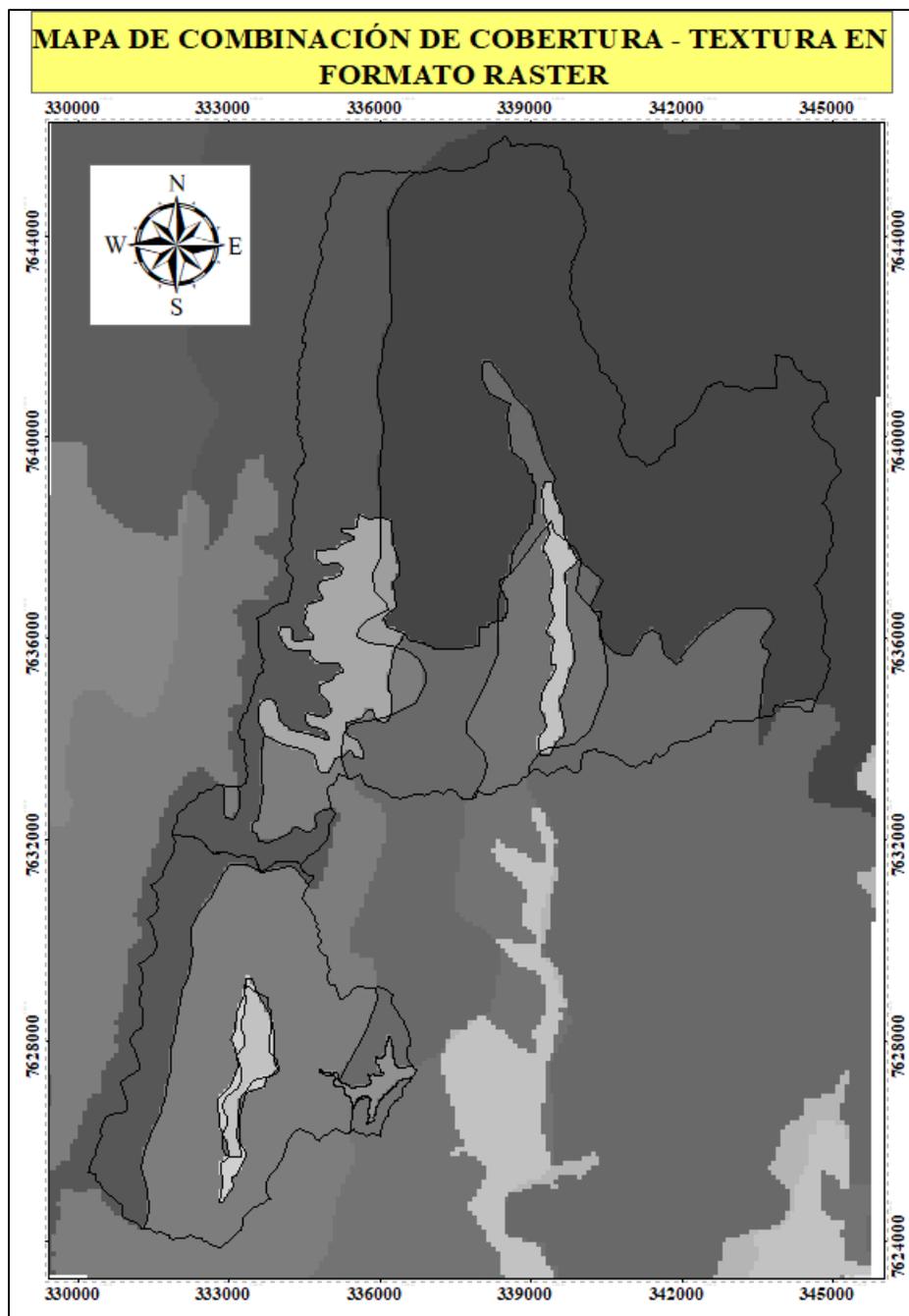


Figura 4.68 Mapa de combinación de cobertura vegetal y textura en formato raster

Fuente: Elaboración propia en base a información SIG de ZONISIG

4.4.5. Análisis de datos para la modelación de Embalses

Los datos del embalse Calderas que requiere el modelo WEAP son los parámetros físicos, operación y para la generación de energía eléctrica. En el caso de la presa Calderas fue diseñada para satisfacer demandas de riego y empezó a operar en el año 2015 por lo tanto el año de inicio de la modelación del embalse es el 2015, además, solo se consideran los parámetros físicos y de operación.

4.4.5.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos se refieren a las características físicas del embalse y no de la presa estos parámetros son:

Capacidad de almacenamiento. - Es la capacidad máxima que tiene el embalse para almacenar agua. El volumen al nivel de aguas normales es de 4,91 hm³ a la cota de 2084,44 msnm.

Curva elevación – volumen. - Se incorpora al modelo para que realice las simulaciones de regulación.

El Centro de investigación del Agua (CIAGUA) realizó la batimetría del embalse Calderas en el año 2019. En la tabla se detalla los datos de la curva – elevación - volumen.

Tabla 4.47 Curva Elevación – Volumen actual del embalse Calderas

COTA (msnm)	VOLUMEN batimetría (m ³)	VOLUMEN batimetría (hm ³)
2054	0,00	0,00
2054,5	0,00	0,00
2055	0,00	0,00
2055,5	0,00	0,00
2056	0,00	0,00
2056,5	48,02	0,00
2057	210,35	0,00
2057,5	457,28	0,00
2058	1053,77	0,00

COTA (msnm)	VOLUMEN batimetría (m³)	VOLUMEN batimetría (hm³)
2058,5	2426,26	0,00
2059	4380,80	0,00
2059,5	6835,61	0,01
2060	9813,65	0,01
2060,5	13658,64	0,01
2061	18498,92	0,02
2061,5	24570,18	0,02
2062	32303,61	0,03
2062,5	41772,67	0,04
2063	53042,86	0,05
2063,5	66272,37	0,07
2064	81499,47	0,08
2064,5	98821,96	0,10
2065	118540,74	0,12
2065,5	141279,67	0,14
2066	167452,79	0,17
2066,5	197360,07	0,20
2067	231095,18	0,23
2067,5	268618,24	0,27
2068	310143,77	0,31
2068,5	355887,12	0,36
2069	405865,91	0,41
2069,5	460145,39	0,46
2070	519059,43	0,52
2070,5	582799,07	0,58
2071	651995,34	0,65
2071,5	727044,99	0,73
2072	807875,78	0,81
2072,5	894449,20	0,89
2073	986315,51	0,99
2073,5	1083329,94	1,08
2074	1185886,27	1,19
2074,5	1294430,67	1,29
2075	1408874,39	1,41
2075,5	1529246,09	1,53
2076	1655801,22	1,66
2076,5	1788854,04	1,79
2077	1928710,37	1,93

COTA (msnm)	VOLUMEN batimetría (m³)	VOLUMEN batimetría (hm³)
2077,5	2075365,25	2,08
2078	2228991,20	2,23
2078,5	2390545,92	2,39
2079	2560967,32	2,56
2079,5	2739679,83	2,74
2080	2926246,15	2,93
2080,5	3121199,87	3,12
2081	3323857,83	3,32
2081,5	3533400,85	3,53
2082	3749686,11	3,75
2082,5	3972925,72	3,97
2083	4203289,64	4,20
2083,5	4441097,54	4,44
2084	4686359,21	4,69
2084,44	4908478,90	4,91
2084,5	4939254,59	4,94
2085	5200438,95	5,20
2085,5	5470254,06	5,47
2086	5748542,62	5,75

Fuente: Centro de Investigación del Agua, 2019

Evaporación neta. - Este valor tiene que ser del embalse, pero al no contar con dicha información se optó, por trabajar con la información de la estación Sella Quebradas que es la que se encuentra más cerca al embalse. La información que se utilizó fue la evaporación y la precipitación a nivel diario. La evaporación neta del embalse, es la resta entre la evaporación y la precipitación, si el valor es negativo quiere decir que hay exceso de agua

4.4.5.2. Parámetros de operación

Parte superior de conservación: Volumen máximo de agua en el embalse, generalmente este valor es igual a la capacidad de almacenamiento. El volumen es de 4,91 hm³ en la cota 2084,44 msnm.

Parte superior de amortiguamiento: Es el volumen o nivel en el cual la descarga de agua está restringida. El volumen de conservación y amortiguamiento corresponde al volumen mínimo de operación el cual es de 1,14 hm³ a una cota de 2073,80 msnm.

Parte superior del volumen inactivo: Volumen de agua no disponible para la asignación, corresponde al volumen muerto del embalse. El nivel del embalse muerto es de 2070,00 msnm al cual corresponde un volumen de 0,52 hm³.

Tabla 4.48 Niveles y volúmenes de operación del embalse Calderas

NIVEL	COTA (msnm)	VOLUMEN (hm ³)
Parte superior de conservación	2084,44	4,91
Parte superior de amortiguamiento	2073,8	1,14
Parte superior del volumen inactivo	2070	0,52

Fuente: Elaboración propia

4.4.5.3. Derivaciones de la cuenca Yesera al embalse Calderas

En proyecto de la presa Calderas se proyectó trasvasar un caudal de 0,70 m³/s de la cuenca Yesera al embalse durante el mes de noviembre, diciembre y enero, pero de acuerdo al estudio de obras complementarias para la presa Calderas realizado por el Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA) en el año 2018 el caudal de trasvase es de 0,45 m³/s durante los meses de enero, febrero y marzo y la capacidad el canal es de 0,8 m³/s. Para el presente estudio se toma como referencia este dato debido a que según el operador de la presa se entrega un caudal de 0,70 m³/s, sin embargo, durante el trayecto hacia el embalse este caudal se disminuye porque los comunarios de aguas arriba desvían el agua en su trayecto ocasionando la disminución de este caudal. El canal de trasvase empezó a operar desde el año 2015.

4.4.6. Demanda

4.4.6.1. Demanda de riego

Inicialmente la presa fue construida para regar 1.229 ha, actualmente solo se riegan 151,10 ha debido a que todavía no se construyeron los canales secundarios y terciarios y no se implementó el riego tecnificado a las comunidades beneficiarias. En el estudio

agronómico realizado por SEDEGIA en el año 2018 se determina una cédula de cultivo y un calendario agrícola actual como se puede ver en las tablas 4.49 y 4.50.

Tabla 4.49 Cédula de cultivo actual

CULTIVOS	INVIERNO		VERANO		TOTAL	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Maíz grano	0	0	70,21	47,21	70,21	31,1
Arveja (verde)	10,43	13,54	52,86	35,55	63,29	28,03
Papa	35,06	45,49	21,16	14,23	56,22	24,9
Vid	10,09	13,09	0	0	10,09	4,47
Maíz choclo	5,44	7,06	0	0	5,44	2,41
Durazno	5,13	6,65	0	0	5,13	2,27
Orégano	5,04	6,54	0	0	5,04	2,23
Trigo	0	0	4,48	3,01	4,48	1,98
Cebolla (Cabeza)	4,21	5,46	0	0	4,21	1,86
Tomate	1,68	2,18	0	0	1,68	0,74
TOTAL	77,08	100,01	148,71	100	225,79	100,00

Fuente: Elaboración propia en base a información de SEDEGIA

Tabla 4.50 Calendario agrícola y áreas de cultivo

CULTIVOS	INVIERNO						VERANO					
	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Maíz (Choclo)			5,44	5,44	5,44	5,44	5,44					
Maíz (Grano)							70,21	70,21	70,21	70,21	70,21	70,21
Arveja (Verde)				10,43	10,43	10,43	10,43					
Arveja (Verde)	52,86							52,86	52,86	52,86	52,86	52,86
Papa temprana				35,06	35,06	35,06	35,06					
Papa intermedia									21,16	21,16	21,16	21,16
Vid			10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09		
Durazno			5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13		
Orégano			5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	
Trigo								4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
Cebolla (Cabeza)				4,21	4,21	4,21	4,21					
Tomate			1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68				
TOTAL (ha)	52,86	0	27,38	77,08	77,08	77,08	147,3	149,5	169	169	153,8	148,7

Fuente: Elaboración propia en base a información de SEDEGIA

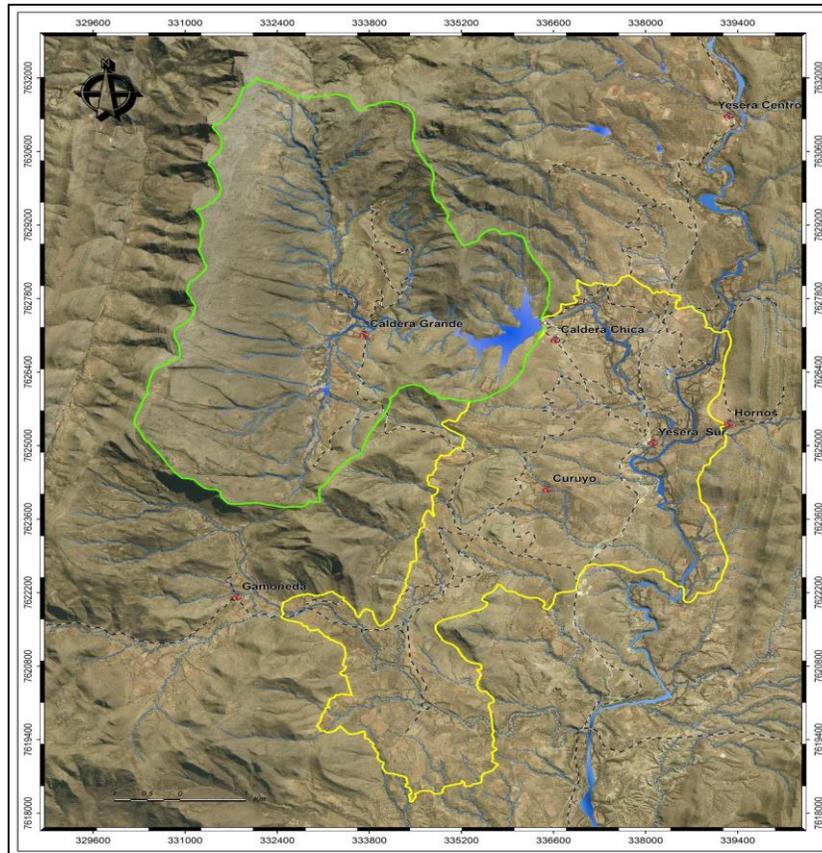


Figura 4.69 Cuenca de aporte y área de riego

Fuente: Proyecto Construcción Obras Complementarias a la Presa Calderas, 2018

El sistema de riego se divide en dos zonas, que son el margen derecho el cual contempla las comunidades de Coruyo, Santa Ana baja, Gamoneda y Barbecho, y el margen izquierdo que contempla las comunidades de Caldera Chica, Yesera Sur y Hornos.

Para el modelo se disgregó la cédula de cultivos actual para la margen izquierda y derecha para evaluar si existe o no un déficit hídrico en cada margen, debido a que la cédula de cultivos actual contempla todas las comunidades beneficiarias.

Para ello se utilizó la información del censo agropecuario 2013 y se extrajo las fichas de cada comunidad con la finalidad de obtener las áreas de cada cultivo que se encuentran bajo riego en cada margen.

Tabla 4.51 Superficie de cultivo bajo riego

SECCIÓN DE RIEGO	COMUNIDAD	ÁREA BAJO RIEGO (ha)
Margen derecho	Gamoneda	2,30
	Santa Ana la nueva	298,70
Margen izquierdo	Caldera Chica	7,80
	Yesera Sur	96,70

Fuente: Elaboración propia en base a información del censo agropecuario 2013

Este proceso consistió en definir la cédula de cultivos en cada margen en base a la cédula de cultivos actual del estudio agronómico de SEDEGIA, una vez definida se sumaron las áreas de todos los cultivos para la cédula de cultivos del margen derecho e izquierdo, luego se procedió a dividir esta área con respecto al área total de la cédula de cultivos actual para encontrar un factor de corrección que ajuste las áreas de cada margen con respecto a la cédula de cultivos actual y así obtener las áreas corregidas para cada tipo de cultivo que representa cada uno de ellos en cada margen.

Tabla 4.52 Factores de corrección para la cédula de cultivo

CULTIVO	CÉDULA MARGEN DERECHO	CÉDULA MARGEN IZQUIERDO	ÁREA TOTAL (ha)	ESTUDIO AGRONÓMICO (SEDEGIA)	FACTOR DE CORRECCIÓN
	Área (ha)	Área (ha)		Área total (ha)	
Maíz grano	62,35	38,15	100,50	70,21	0,70
Arveja verde	28,90	26,86	55,76	63,29	1,14
Papa	27,57	15,33	42,90	56,22	1,31
Vid	133,42		133,42	10,09	0,08
Maíz choclo			0,00	5,44	
Durazno	0,01	0,51	0,51	5,13	9,97
Orégano		0,51	0,51	5,04	9,92
Trigo	26,83	13,55	40,38	4,48	0,11
Cebolla cabeza	4,83	0,85	5,68	4,21	0,74
Tomate	1,63		1,63	1,68	1,03
TOTAL	285,54	95,75	381,29	225,79	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.53 Cédula de cultivos para el margen derecho e izquierdo

CÉDULA DE CULTIVOS					
CULTIVO	MARGEN DERECHO		MARGEN IZQUIERDO		TOTAL (ha)
	Invierno (ha)	Verano (ha)	Invierno (ha)	Verano (ha)	
Maíz grano		43,56		26,65	70,21
Arveja verde	5,41		5,02		10,43
Arveja verde		27,40		25,46	52,86
Papa temprano	22,53		12,53		35,06
Papa intermedia		13,60		7,56	21,16
Vid	10,09				10,09
Maíz choclo	2,72		2,72		5,44
Durazno	0,06		5,07		5,13
Orégano			5,04		5,04
Trigo	2,98		1,50		4,48
Cebolla cabeza	3,58		0,63		4,21
Tomate	1,68				1,68

Fuente: Elaboración propia en base al censo agropecuario 2013 e información de SEDEGIA

Tabla 4.54 Calendario agrícola y coeficientes de cultivo

CULTIVOS	INVIERNO						VERANO					
	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Maíz (Choclo)			0,24	0,41	0,8	1,08	1,03					
Maíz (Grano)							0,24	0,41	0,8	1,08	1,03	0,8
Arveja (Verde)				0,41	0,78	1,15	1,05					
Arveja (Verde)	0,8							0,41	0,78	1,15	1,05	0,8
Papa temprana				0,24	0,74	1,02	0,48					
Papa intermedia									0,24	0,74	1,02	0,75
Vid			0,45	0,6	0,7	0,7	0,7	0,65	0,5	0,3		
Durazno			0,55	0,95	1,05	1,15	1,15	1,15	1,1	0,9		
Orégano			0,71	1,09	1,13	0,7	1,14	1,15	0,66	0,83	1,07	
Trigo								0,38	0,76	0,95	1,15	0,87
Cebolla (Cabeza)				0,78	0,91	1,05	1,02					
Tomate			0,42	0,81	1,2	0,92	0,65	0,65				

Fuente: Elaboración propia en base a la información proporcionada por SEDEGIA

4.4.6.1.1. Método del coeficiente simplificado

Este método se empleó para estimar la demanda de riego. Los datos de entrada del método para la estimación de la demanda de riego del cultivo son la precipitación efectiva, coeficiente de cultivo (kc) y la evapotranspiración de referencia (ET_o), con

estos datos el modelo realiza el balance del agua para simular la demanda. El método solo simula demandas de riego y no procesos de escorrentía, infiltración o cambios de humedad de suelo. Su formulación matemática y conceptual se basa en el reporte de Riego y Drenaje de la FAO (Guía para la determinación de requerimiento de agua de cultivos). (Allen et al, 1998:25)

4.4.6.1.2. Precipitación Efectiva

Se define como la proporción de agua retenida en la capa radicular con relación a la cantidad de lluvia caída. Su magnitud depende, por un lado, de las características del terreno y por otra de las características de precipitación.

El Programa Nacional de Riego, en función a las características agroecológicas de las regiones de altiplano, valles y chaco; considera que no son efectivas las precipitaciones menores a 12, 15 y 20 mm respectivamente. Las lluvias mensuales, resultantes de la diferencia, son efectivas al 70, 75 y 80%. En la tabla 4.55 se indica las expresiones para el cálculo de la precipitación efectiva.

Tabla 4.55 Ecuaciones de precipitación efectiva

Región	Precipitación efectiva
Altiplano	$Pe = (P - 12) \cdot 0,70$
Valles	$Pe = (P - 15) \cdot 0,75$
Chaco	$Pe = (P - 20) \cdot 0,80$

Fuente: Elaboración propia en base a información de CR PROAGRO y GTZ, 2011

Donde

Pe = Precipitación Efectiva (mm)

P = Precipitación media (mm)

La precipitación efectiva que corresponde al área de estudio es la región de los valles. Para ingresar la precipitación efectiva en el modelo WEAP, se debe considerar que la unidad de la precipitación efectiva es porcentual, es decir la precipitación efectiva en

WEAP es la razón que existe entre la precipitación efectiva y la precipitación media multiplicada por cien.

4.4.6.1.3. Precipitación

La precipitación es la que corresponde al área de riego en el presente estudio se considera la precipitación media diaria de la estación Yesera Sud.

4.4.6.1.4. Evapotranspiración

Para la conceptualización de la evapotranspiración en WEAP, se puede obtener de varias formas entre ellas se vincula los datos de ETo generados en WEAP. Otra alternativa es generar la ETo potencial mediante el ABRO.

Para el estudio se estima la evapotranspiración mediante el programa oficial y vigente a nivel nacional que es el ABRO (área bajo riego optimo) del MMAyA. Los datos requeridos para calcular la evapotranspiración son la temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, horas sol y velocidad del viento (m/s) pero como la estación Yesera Sud solo mide la temperatura máxima, temperatura mínima y velocidad de viento, el cálculo solo se hizo con estos parámetros.

4.4.6.2. Demanda de agua para consumo humano

El censo 2012, realizado por el INE, nos proporciona información con respecto a la cantidad de población que existe en cada una de las comunidades que se encuentran dentro de las cuencas en estudio, la tasa de crecimiento poblacional anual para cada municipio y el porcentaje que representa el área Urbana y Rural.

El proceso consistió en identificar las comunidades que están dentro de la unidades hidrológicas y cercanas a ellas, luego se observó a que municipio pertenecen para aplicar la tasa de crecimiento poblacional correspondiente.

En la UH de Calderas se encuentra la comunidad de Calderas Grande y cercana a ella las comunidades de Caldera Chica, Yesera Sur y Hornos y en la UH de Yesera se encuentra Yesera Norte y cercana a ella Yesera Centro.

Tabla 4.56 Tasa de crecimiento poblacional

Municipio	Participación por área (%)		Tasa de crecimiento poblacional anual (%)	Comunidad	Tasa de crecimiento poblacional del área rural (%)
	Urbana	Rural			
Tarija	87,4	12,6	2,6	Caldera Grande	0,3
				Yesera Centro	0,3
				Yesera Norte	0,3
				Yesera Sur	0,3
				Caldera Chica	0,3

Fuente: Elaboración propia en base al censo poblacional 2012

Los datos de la población definida por el censo 2012 en cada comunidad se proyectó para el año 2016 con el método geométrico que se especifica en la Norma Boliviana (NB) 689, aplicando la tasa de crecimiento rural para el Municipio de Tarija.

Tabla 4.57 Población proyectada para el año 2016

Comunidad	Población (2012)	Población (2016)
Caldera Grande	75	76
Yesera Centro	363	367
Yesera Norte	442	447
Yesera Sur	488	494
Caldera Chica	45	46

Fuente: Elaboración propia en base al censo poblacional 2012

En base a la población del censo 2012 se calculó la dotación media diaria o tasa de consumo anual para el año 2016 considerando el proceso que se describe en la NB 689.

Tabla 4.58 Dotación media diaria (l/hab/d)

Zona	Población					
	Hasta 500	De 501 a 2000	De 2001 a 5000	De 5001 a 20000	De 20001 a 100000	Más de 100000
Del Altiplano	30 - 50	30 - 70	50 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200
De los Valles	30 - 70	50 - 90	70 - 100	100 - 140	150 - 200	200 - 250
DE los Llanos	70 - 90	70 - 110	90 - 120	120 - 180	200 - 250	250 - 350

Fuente: Elaboración propia en base a la NB 689

De la tabla 4.58 se extrajo la dotación inicial, se tomó la media del rango que se presentan en la zona de los Valles considerando la población del censo 2012.

En base a este dato, se proyectó la dotación futura para el año 2016 considerando una variación anual de la dotación del 1,25 % que es la media del rango en el que está definido la variación anual de dotación.

Se debe aclarar que, para usar esta dotación o consumo de agua, dentro del modelo WEAP, se transformó las unidades a $m^3/hab/año$.

Tabla 4.59 Consumo anual para el año 2016

COMUNIDAD	Df (l/hab/d)	Df ($m^3/hab/año$)
Caldera Grande	63,06	23,02
Yesera Centro	63,06	23,02
Yesera Norte	63,06	23,02
Yesera Sur	63,06	23,02
Caldera Chica	63,06	23,02

Fuente: Elaboración propia

4.5. Esquematización e incorporación de información al modelo WEAP

Hasta este punto se analizó y procesó toda la información necesaria para el modelo WEAP, el siguiente paso es incorporar la información y esquematizar el modelo.

Existen dos maneras para crear un modelo hidrológico en WEAP una manera es hacerlo de forma manual en base a capas SIG y otra es que se puede delimitar automáticamente.

4.5.1. Delimitación de cuencas

Se creó una nueva área en WEAP con el nombre de Modelo Calderas, luego se definió la ubicación de las cuencas en estudio y se guardó el modelo creado. Posteriormente se añadió las capas shapefile y se realizó el linkeo de los archivos NetCDF de clima y cobertura. Una vez terminado este proceso se ejecutó la delimitación automática de la cuenca Calderas y Yesera. En la figura 4.70 se muestra las cuencas a ser modeladas.

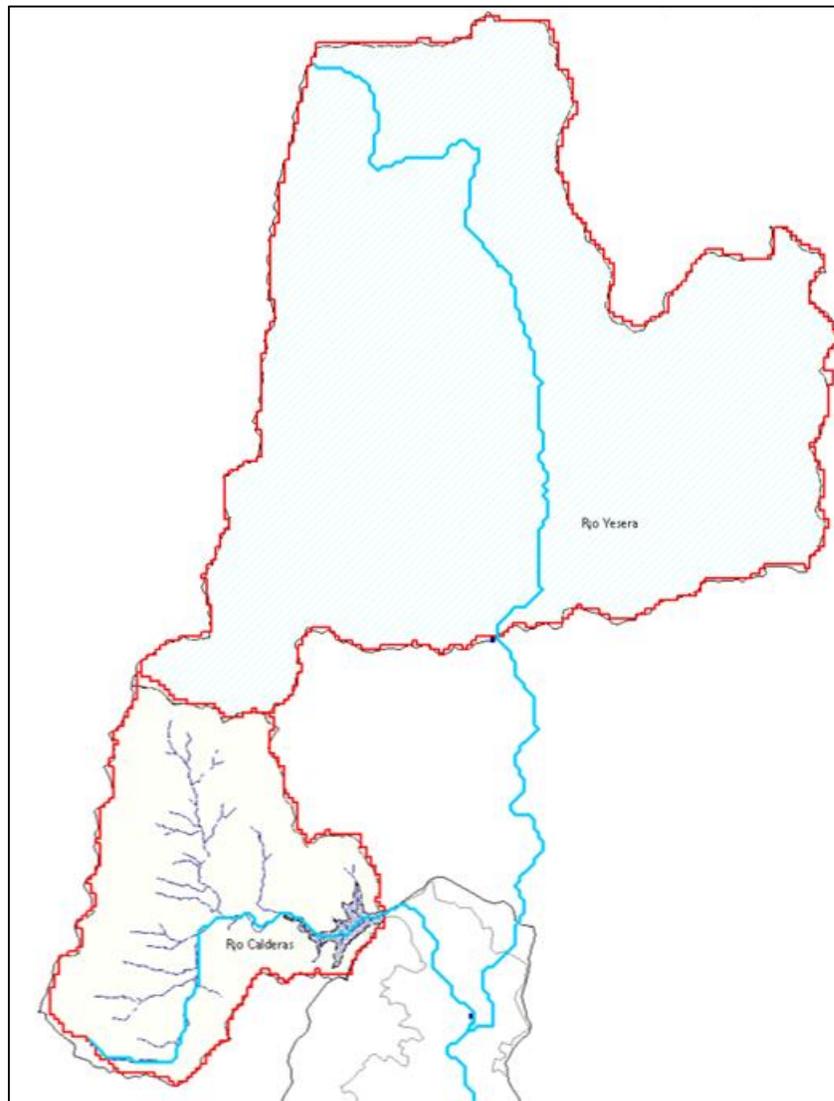


Figura 4.70 Unidades Hidrológicas delimitadas en WEAP

Fuente: Elaboración propia en base al programa WEAP

4.5.2. Incorporación de elementos al modelo

En la figura 4.71 y 4.72 se muestra el esquema final del modelo, donde los nodos de color verde que no están unidas al río representan las unidades hidrográficas, los nodos de color rojo es la demanda de agua potable, los nodos de color verde que están unidas a través de un elemento de conducción son las demandas de riego que satisface el embalse Calderas, el elemento de color amarillo representa la derivación que existe del

río Yesera al río Calderas y los nodos de color azul son los puntos de aforo de la Estación Yesera Sur.

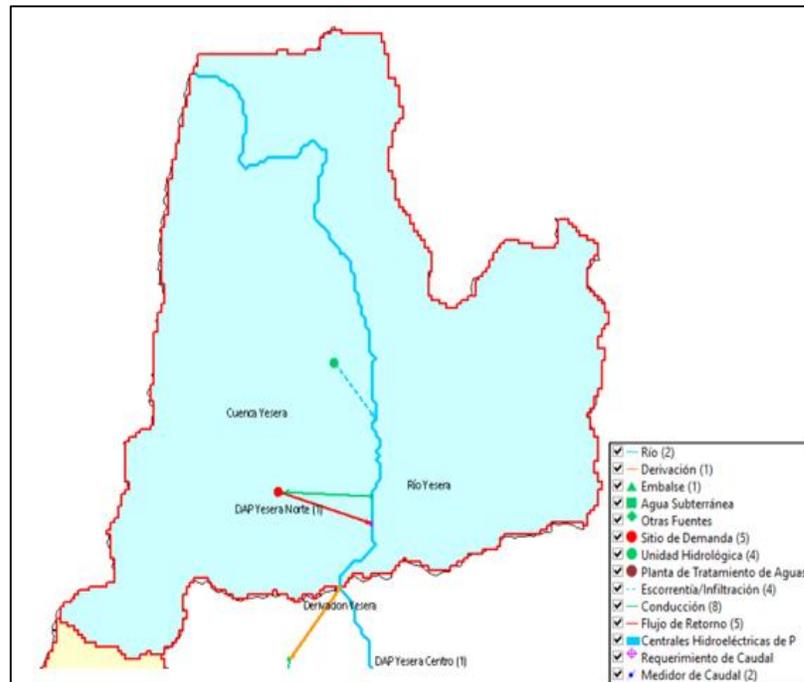


Figura 4.71 Esquema de la cuenca Yesera

Fuente: Elaboración propia en base al programa WEAP

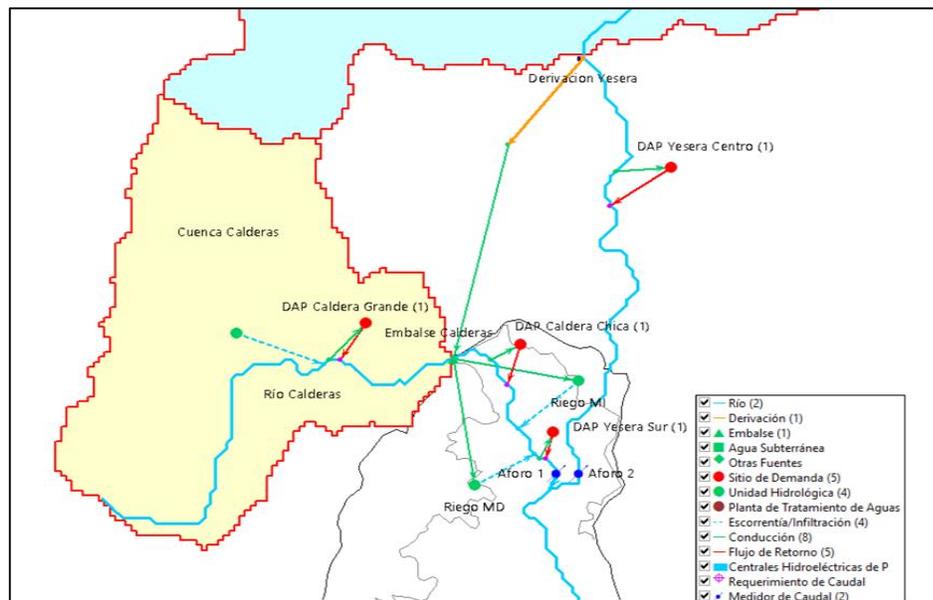


Figura 4.72 Esquema de la cuenca Calderas

Fuente: Elaboración propia en base al programa WEAP

4.5.3. Incorporación de información al modelo

4.5.3.1. Incorporación de información climática

Los datos grillados de precipitación y temperatura los cuales se encuentran en un formato NetCDF fueron incorporados al modelo por la opción Delimitación Automática de Catchments, las demás variables de humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad se incorporaron mediante planillas Excel (formato csv).

4.5.3.2. Incorporación de información de cobertura vegetal y textura

La combinación de cobertura vegetal y textura para la cuenca Calderas y Yesera al igual que la precipitación y temperatura se encuentra en un archivo NetCDF, de igual manera la información fue incorporada por la opción de Delimitación Automática de Catchments.

4.5.3.3. Incorporación de demanda de agua

Para complementar el balance hidrológico realizado por el modelo en sus componentes naturales e intervenidos es importante realizar un análisis de la demanda de agua. La demanda de riego y de agua potable fueron representadas mediante elementos específicos del modelo (sitios de demanda). En el caso de la demanda de riego, como se explicó anteriormente WEAP la calcula mediante el “Método de Escurrimiento de lluvia o Método del coeficiente simplificado”.

4.5.3.4. Supuestos Clave

Los supuestos claves, son los elementos con los cuales se realizan vinculaciones a los parámetros hidrológicos del método humedad del suelo, a partir de ecuaciones matemáticas o fórmulas, que el usuario incorpora para los fines de su estudio.

Esta herramienta es la más importante en el modelo ya que en base a ella se interconectan los parámetros y elementos que son modelados para realizar las simulaciones.

En el presente estudio se utilizó supuestos clave, para realizar la vinculación con los parámetros hidrológicos, ya que estos parámetros son los que influyen en el escurrimiento superficial y más adelante son utilizados para realizar la calibración. Como una primera simulación los valores son obtenidos de diferentes literaturas regionalizadas para la zona, posteriormente estos valores cambiaron en función a la calibración del modelo.

Los parámetros son los siguientes:

Coefficiente de cultivo referencial K_c , este coeficiente está en función del tipo de cobertura vegetal; sus valores fueron definidos de acuerdo a los valores que se utilizaron en el Balance Hídrico Nacional y en el Balance Integral del río Guadalquivir.

Tabla 4.60 Coeficientes de cultivo referenciales para la cuenca Calderas incorporados al modelo WEAP

Cobertura	K_c
Agricultura	0,7
Embalse Calderas	0,4
Matorral	0,7
Pastos	0,75

Fuente: Elaboración propia en base a información del MMAyA, 2016

Tabla 4.61 Coeficientes de cultivo referenciales para la cuenca Yesera incorporados al modelo WEAP

Cobertura	K_c
Agricultura	0,7
Bosque	0,8
Matorral	0,7
Pastos	0,75

Fuente: Elaboración propia en base a información del MMAyA, 2016

Capacidad de agua en el suelo Sw , este valor varía de acuerdo a las combinaciones de textura y cobertura, estos valores se obtuvieron de la multiplicación de los valores de la tabla 4.62 y 4.63.

Tabla 4.62 Valores referenciales de CRH en mm/m

Textura		Sin piedra ajustado a CRH	CRH tropical % de piedra y grava				
Código	Descripción		0%	0-5%	5-15%	15-40%	40-80%
Y	Arcilla	140	130%	120	90	50	10
F	Franco	170	160	140	110	40	20
L	Limo	150	130	120	100	55	10
A	Arena	90	80	70	60	30	10
AF	Arena francos	110	100	90	70	40	10
YA	Arcilla arenosa	110	100	90	70	40	10
FYA	Franco arcillo arenoso	150	140	130	100	55	10
FA	Franco arenoso	150	130	120	100	55	10
YL	Arcilla limosa	160	140	130	110	55	10
FYL	Franco arcillo limoso	170	150	140	110	65	20
FL	Franco Limoso	190	170	150	130	70	20
FY	Franco arcilloso	150	130	120	100	55	10

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA, 2016

Tabla 4.63 Valores de Profundidad Radicular

Tipo de utilización del suelo	Profundidad máxima de raíces (cm)
Agricultura	150
Bosque	200
Herbácea	100
Bosque con inundación	200
Centros poblados y urbanos	10
Matorrales	150
Vegetación dispersa o aislada de arbustos y gramíneas	100

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA, 2016

Tabla 4.64 Valores de capacidad de agua en el suelo para la cuenca Calderas

Cobertura - Textura	CRM	Pmax	Sw
Agricultura_FYA	140	1,5	210
Agricultura_YA	100	1,5	150
Embalse Calderas	130	0,1	13
Matorral_FYA	130	1,5	195
Matorral_YA	90	1,5	135
Pastos_FYA	140	1	140
Matorral_YL	140	1,5	210

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.62 y 4.63

Tabla 4.65 Valores de capacidad de agua en el suelo para la cuenca Yesera

Cobertura – Textura	CRM	Pmax	Sw
Agricultura_YA	100	1,5	150
Agricultura_YL	140	1,5	210
Bosque_FYA	140	2	280
Bosque_YL	140	2	280
Matorral_FYA	130	1,5	195
Matorral_YA	90	1,5	135
Matorral_YL	130	1,5	195
Pastos_FYA	140	1	140
Pastos_YA	100	1	100
Pastos_YL	140	1	140

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.62 y 4.63

Capacidad de agua profunda Dw, se creó para cada Unidad Hidrológica considerando el área de las cuencas y sus valores se asignaron de acuerdo a los valores que sugiere la literatura de Soria 2015.

Tabla 4.66 Valores estimados para los parámetros del modelo de humedad del suelo

Parámetro		CCGUC-SEI, 2009	SEI, 2015b	SEI,2014	Espejo A.,2015	González, 2015	Soria, 2015
Área (km ²)	Máx.	11.600	22.171	2.880	1.900	11.500	270
	Mín.	512			33	500	60
Dw (mm)	Máx.	7.500	1.200	800	500	300	320
	Mín.	300					70
Kd (L/T)	Máx.	600 mm/mes	500 mm/mes	80 mm/mes	200 mm/mes	20 mm/mes	816 mm/mes
	Mín.	140 mm/mes					492 mm/mes
Z ₁ %	Máx.	-	20	30	80		30
	Mín.		10				
Z ₂ %	Máx.	-	40	30	15		30
	Mín.		30				
Sw (mm)	Máx.	4.320	1.300	800	155	1.800	180
	Mín.	80	600	400	210	100	31
Kc	Máx.	-	1,00	1,10	0,85	1,05	1,05
	Mín.		0,6	0,75	0,40	0,7	0,5
RRF	Máx.	250	4,0	6,5	6,0	7,0	4,2
	Mín.	0,8	0,5	3,0	3,0	1,0	1,3
Ks (L/T)	Máx.	500 mm/mes	1.050 mm/mes	190 mm/mes	80 mm/mes	50 mm/mes	10.239 mm/mes
	Mín.		80 mm/mes	80 mm/mes	40 mm/mes	20 mm/mes	141 mm/mes
f	Máx.	1,00	0,9	0,80	0,90	0,90	0,50
	Mín.	0,20	0,30	0,30	0,55	0,15	0,15

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA y VRHR, 2016

Tabla 4.67 Valores de capacidad de agua profunda incorporados al modelo WEAP

Unidades Hidrológicas	Dw
Cuenca Calderas	250
Cuenca Yesera	300

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.66

Factor de resistencia a la escorrentía RRF, está en función de la cobertura vegetal; sus valores se definieron de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 4.68 Índices de área foliar LAI para distintos tipos de cobertura

Cobertura	LAI		
	Promedio	Mínimo	Máximo
Desiertos (sin cobertura vegetal)	1,31	0,59	2,84
Pastura (zonas templadas y tropicales)	1,71	0,29	5,00
Pastizales alto, arbusto	2,08		
Otra vegetación	2,08		
Pastizales para actividades ganaderas	2,50		
Pastizales	2,50		
Cultivos (zonas templadas y tropicales)	3,62	0,20	8,70
Cultivos (agricultura intensiva, extensiva)	4,22		
Humedales	6,34	2,50	8,40
Áreas urbanas	8		
Plantación forestal	8,72	1,55	18,00

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA y VRHR, 2016

Tabla 4.69 Valores de Factor de resistencia a la escorrentía para la cuenca Calderas incorporados al modelo WEAP

Cobertura	RRF
Agricultura	4,22
Embalse Calderas	1
Matorral	2,5
Pastos	4

Fuente: Elaboración propia en base a los valores de la tabla 4.68

Tabla 4.70 Valores de Factor de resistencia a la escorrentía para la cuenca Yesera incorporados al modelo WEAP

Cobertura	RRF
Agricultura	4,22
Bosque	4,5
Matorral	2,5
Pastos	4

Fuente: Elaboración propia en base a los valores de la tabla 4.68

Conductividad en la zona de raíces Ks, está en función del tipo de textura, sus valores se definieron de acuerdo a la tabla 4.71.

Tabla 4.71 Valores de Ks para diferentes texturas

Textura	Promedio (cm/d)	Mínimo (cm/d)	Máximo (cm/d)
Arena	727,2	403,2	1520,64
Arena francosa	1025,28	25,92	1897,92
Franco arenoso	239,04	16,56	430,56
Franco	70,56	5,04	60,48
Franco limoso	27,36	6,48	61,92
Franco arcillo arenoso	64,8	23,472	118,08
Franco arcilloso	38,88	1,008	92,16
Franco arcillo limoso	18,72	1,44	28,8
Arcilla arenosa	30,24	7,2	61,92
Arcilla limosa	21,6	1,296	56,16
Arcilla	14,4	3,456	28,8

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA y VRHR, 2016

Tabla 4.72 Valores de conductividad en la zona de raíces para la cuenca Calderas incorporadas al modelo WEAP

Textura	Ks (cm/d)
Franco arcillo arenoso	64,8
Arcillo arenoso	30,24
Arcillo limoso	21,6

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.71

Tabla 4.73 Valores de conductividad en la zona de raíces para la cuenca Yesera incorporadas al modelo WEAP

Textura	Ks (cm/d)
Arcillo arenoso	30,24
Arcillo limoso	21,6
Franco arcillo arenoso	64,8

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.71

Conductividad saturada en la zona profunda Kd, es un parámetro que se considera como un valor único en las cuencas porque no se conoce bien las características subterráneas del suelo, este valor se determina en base a la tabla 4.66 y los valores adoptados en el Balance Hídrico Nacional y el Balance Hídrico Integral del río Guadalquivir.

Tabla 4.74 Valores del factor de conductividad saturada en la zona profunda incorporados al modelo

Unidad Hidrológica	Kd (mm/mes)
Cuenca Calderas	100
Cuenca Yesera	200

Fuente: Elaboración propia en base a la tabla 4.66 y MMAyA, 2016

Dirección de flujo f, está en función de la cobertura vegetal; sus valores varían desde 0 para flujo vertical a 1 para flujo horizontal en base a este criterio se analizó la cobertura vegetal para asignar los valores.

Tabla 4.75 Valores de dirección de flujo para la cuenca Calderas incorporados al modelo WEAP

Cobertura	F
Agricultura	0,65
Embalse Calderas	0,8
Matorral	0,6
Pastos	0,55

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA y VRHR, 2016

Tabla 4.76 Valores de dirección de flujo para la cuenca Yesera incorporados al modelo WEAP

Cobertura	F
Agricultura	0,65
Bosque	0,5
Matorral	0,6
Pastos	0,55

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA y VRHR, 2016

Nivel de humedad inicial en la zona de raíces Z_1 y Nivel de humedad en la zona profunda inicial Z_2 , se consideraron como valores únicos en ambas cuencas

Tabla 4.77 Valores de Z_1 y Z_2 incorporados al modelo WEAP

Unidad Hidrológica	Z_1	Z_2
Cuenca Calderas	70	30
Cuenca Yesera	70	30

Fuente: Elaboración propia en base al MMAyA, 2016

4.6. Calibración y validación del modelo hidrológico

La calibración consistió en modificar los parámetros del Método de Humedad del Suelo hasta que se asemejen a los caudales aforados.

4.6.1. Unidad Hidrológica Calderas

Para la calibración de la cuenca Calderas se tomó en cuenta los caudales aforados en los años 2004-2006. Dentro de esta serie hay meses que no fueron medidos y algunos datos se depuraron, en el proceso de calibración para el ajuste de las medidas estadísticas de Nash y Bias, no se consideraron los caudales simulados en los meses con datos faltantes.

Los parámetros adoptados en el proceso de calibración son los valores que se describieron en el apartado de supuestos clave.

El proceso de calibración se realiza mediante tanteos de ensayo y error para calibrar el modelo hidrológico con el fin de comparar los datos observados con los datos simulados.

Luego de realizar varias corridas del modelo, se logró obtener los valores de los parámetros que más se ajustan al comportamiento hidrológico de la cuenca Calderas, donde se logró obtener un mejor ajuste de las medidas de Nash 0,51, y Bias 20,85.

En la tabla 4.78 se muestra los valores finales a los cuales se ajustó cada parámetro.

Tabla 4.78 Parámetros definidos para la calibración de la UH Calderas

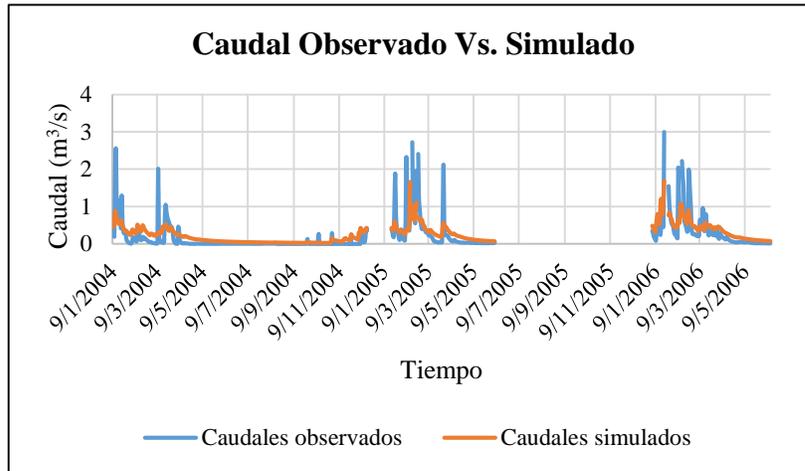
Parámetro		Valor
Kc	Agricultura	0,75
	Embalse Calderas	0,4
	Matorral	0,75
	Pastos	0,85
Sw	Agricultura_FYA	168
	Agricultura_YA	120
	Embalse Calderas	10,4
	Matorral_FYA	156
	Matorral_YA	108
	Matorral_YL	156
	Pastos_FYA	112
RRF	Agricultura	4
	Embalse Calderas	1
	Matorral	4,5
	Pastos	3,5
Dw		300
Ks	FYA	11,8
	YA	4
	YL	1,5
Kd		15
F	Agricultura	0,665
	Embalse Calderas	0,42
	Matorral	0,693
	Pastos	0,63
Z ₁ (%)		80
Z ₂ (%)		15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.79 Medidas de bondad de ajuste para la UH Calderas

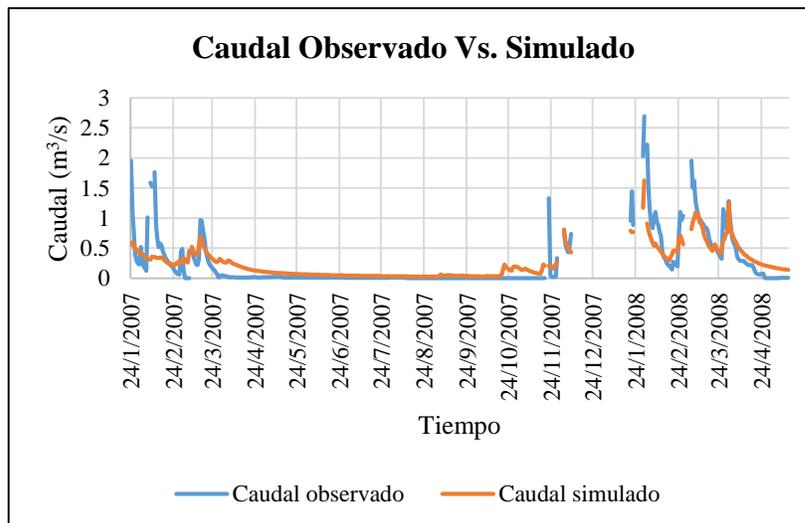
Medidas de bondad de ajuste	Valor obtenido	Descripción
Nash- Sutcliffe	0,51	Satisfactorio
Bias	20,85	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.73** Caudal observado vs. simulado definido para la calibración de la UH Calderas

Fuente: Elaboración propia

Para la validación se consideró el periodo de 2007-2008, obteniendo como resultado un Nash 0,66 (Bueno) y un Bias 5,85 (Muy bueno)

**Figura 4.74** Caudal observado vs. simulado definido para la validación de la UH Calderas

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de caudales de aporte diario de la cuenca Calderas se muestran en el anexo 10.

4.6.2. Unidad Hidrológica Yesera

El periodo de calibración de la cuenca Yesera es de 2005-2006, al igual que en la cuenca Calderas no se consideraron los datos simulados en los meses donde no se tenía caudales aforados.

Los parámetros usados en la primera corrida son los que se describieron en el apartado de supuestos clave, después de realizar varias corridas se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 4.80 Medidas de bondad de ajuste para la UH Yesera

Medidas de bondad de ajuste	Valor obtenido	Descripción
Nash- Sutcliffe	0,70	Bueno
Bias	0,32	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia

Los valores finales de los parámetros ajustados para la UH Yesera son los que se muestra en la tabla 4.81.

Tabla 4.81 Parámetros definidos para la calibración de la UH Yesera

Parámetro		Valor
Kc	Agricultura	0,7
	Bosque	0,8
	Matorral	0,7
	Pastos	0,75
Sw	Agicultura_YA	120
	Agricultura_YL	168
	Bosque_FYA	224
	Bosque_YL	224
	Matorral_FYA	156
	Matorral_YA	108
	Matorral_YL	156
	Pastos_FYA	112
	Pastos_YA	80

	Pastos_YL	112
RRF	Agricultura	4,22
	Bosque	4,5
	Matorral	2,5
	Pastos	4
Dw		300
Ks	YA	8
	YL	2
	FYA	25
Kd		15
F	Agricultura	0,65
	Bosque	0,5
	Matorral	0,6
	Pastos	0,55
Z ₁ (%)		80
Z ₂ (%)		20

Fuente: Elaboración propia

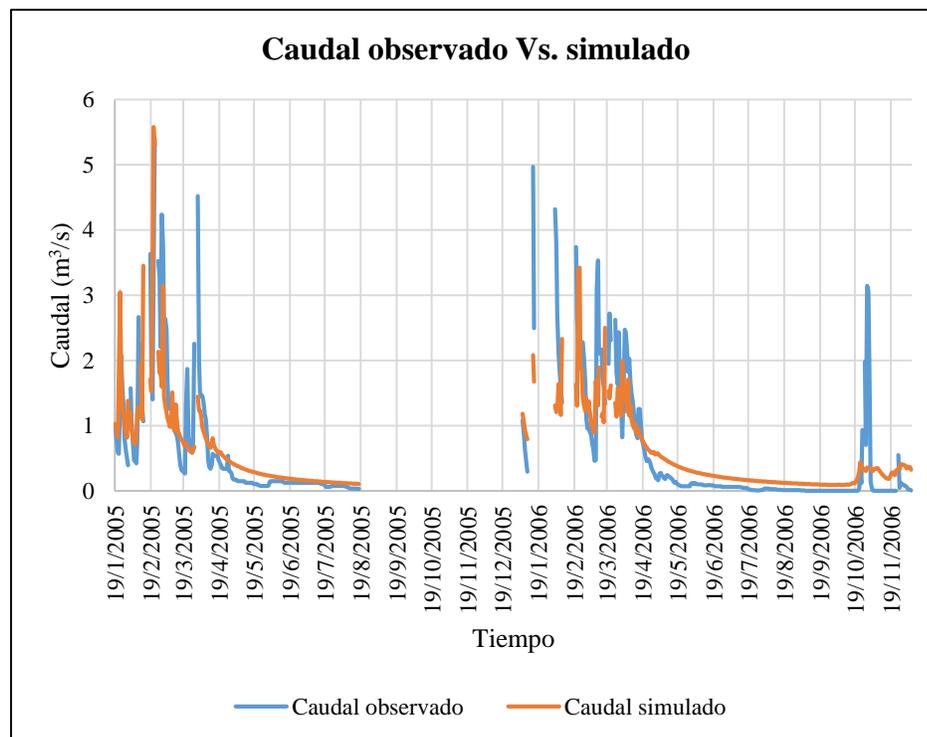


Figura 4.75 Caudal observado vs. simulado definido para la calibración de la UH Yesera

Fuente: Elaboración propia

Para la validación se consideró el periodo de 2007-2008, obteniendo como resultado un Nash 0,69 (Bueno) y un Bias 0,95 (Muy bueno).

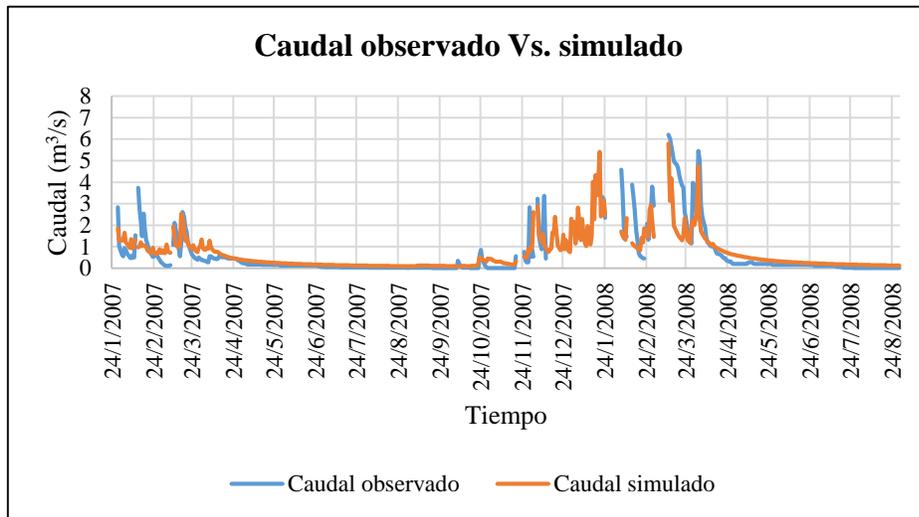


Figura 4.76 Caudal observado vs. simulado definido para la validación de la UH Yesera

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de caudales de aporte a nivel diario de la cuenca Yesera se muestran en el anexo 10.

4.6.3. Comparación de caudales simulados con estudios anteriores

Con el objeto de poder comparar y validar los resultados obtenidos con el modelo WEAP, se identificó el siguiente estudio aplicado a la cuenca de Calderas y Yesera:

Construcción obras complementarias a la presa Calderas – Estudio de diseño técnico de pre inversión

Este estudio fue realizado por el Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA) con la finalidad de complementar el estudio hidrológico realizado en el estudio del diseño final de la presa Calderas, concerniente a la cuantificación del potencial hídrico en las cuencas de aporte. Se realizó la simulación de caudales medios mensuales en un periodo de 2002 al 2016 mediante el modelo Thronthwaite - Mather modificado.

En la tabla 4.82 se muestran los caudales medios mensuales obtenidos con el modelo modelo WEAP y Thronthwaite - Mather modificado de la cuenca Calderas.

Tabla 4.82 Caudales medios mensuales simulados en la cuenca Calderas

MES	Q SIM. (m ³ /s) WEAP	Q SIM. (m ³ /s) THRONTHWAITE- MATHER
SEP	0,027	0,049
OCT	0,041	0,033
NOV	0,093	0,024
DIC	0,239	0,284
ENE	0,484	0,477
FEB	0,482	0,627
MAR	0,405	0,415
ABR	0,211	0,291
MAY	0,095	0,197
JUN	0,057	0,142
JUL	0,041	0,096
AGO	0,032	0,068

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

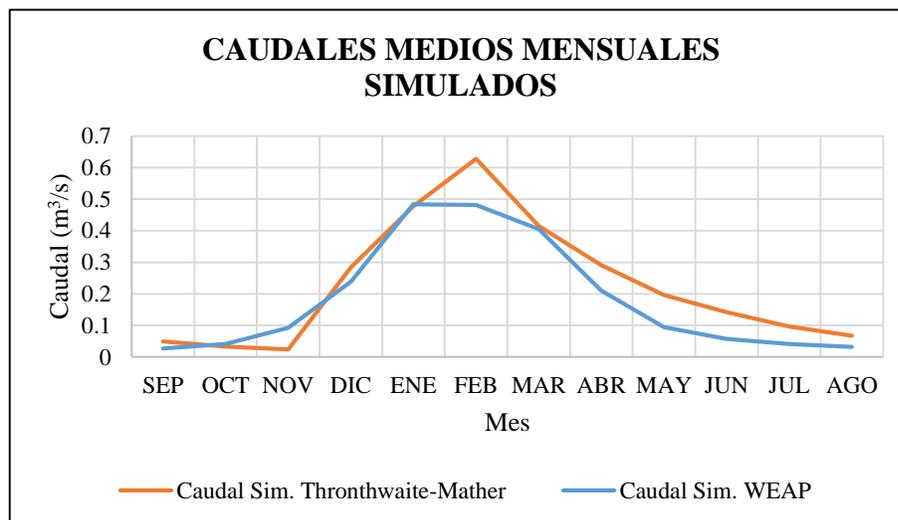


Figura 4.77 Caudales medios mensuales simulados para la cuenca Calderas

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.77 se puede observar que existe una mayor variación en la época de crecidas mientras que en la época de estiaje la variación disminuye. También se puede ver que los hidrogramas de salida tienen el mismo comportamiento a lo largo de todo el año, esto nos indica que los caudales obtenidos con el modelo WEAP son válidos

para la cuenca Calderas y que los parámetros asumidos en la calibración del modelo representan el comportamiento hidrológico de la cuenca sobre todo la escorrentía superficial de la misma.

En la tabla 4.83 se detallan los caudales medios mensuales de la cuenca Yesera mediante el modelo WEAP y Thronthwaite – Mather modificado.

Tabla 4.83 Caudales medios mensuales simulados en la cuenca Yesera

MES	Q SIM. (m ³ /s) WEAP	Q SIM. (m ³ /s) THRONTHWAITE-MATHER
SEP	0,095	0,014
OCT	0,127	0,008
NOV	0,280	0,012
DIC	0,832	0,998
ENE	1,707	2,249
FEB	1,767	2,545
MAR	1,464	1,154
ABR	0,692	0,250
MAY	0,335	0,101
JUN	0,204	0,063
JUL	0,146	0,037
AGO	0,114	0,022

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

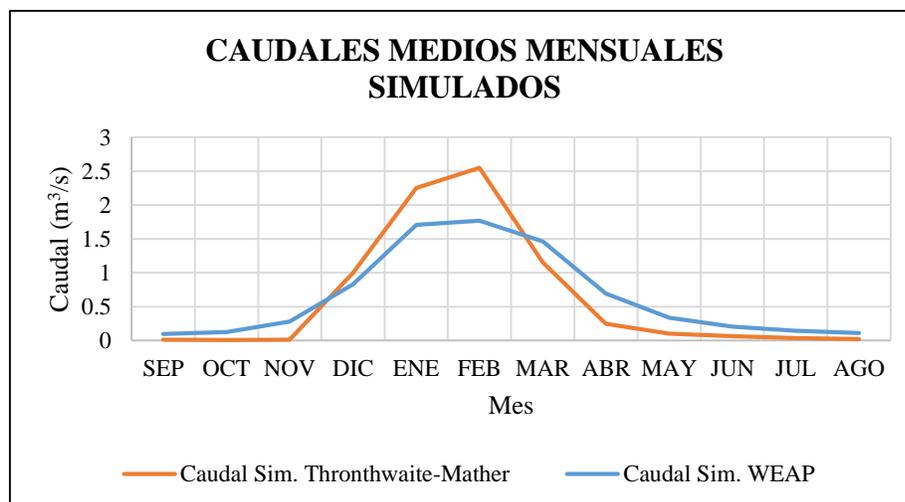


Figura 4.78 Caudales medios mensuales simulados para la cuenca Yesera

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.78 se observa que existe una variación de los caudales mayormente en la época de crecidas con respecto a la época de estiaje donde la variación disminuye. Los hidrogramas de salida tienen el mismo comportamiento durante el año, lo cual nos indica que los caudales simulados por el modelo WEAP son válidos para la cuenca Yesera y que los parámetros asumidos en la calibración del modelo representan el comportamiento hidrológico de la cuenca sobre todo la escorrentía superficial.

4.7. Selección de escenarios de aporte para el modelo HEC-ResSim

La simulación desde el periodo 1980 hasta el 2016, genera una muestra de los caudales de escurrimiento representativo de la cuenca de aporte directo e indirecto al embalse Calderas, permitiendo realizar una clasificación de acuerdo a la probabilidad de no excedencia. Esta información es de suma importancia para caracterizar año húmedo, medio y seco (75, 50 y 30% de probabilidad de no excedencia), condiciones sobre las que se deberán generar escenarios para evaluar el funcionamiento del embalse Calderas.

Los caudales para estas probabilidades se presentan en el anexo 11.

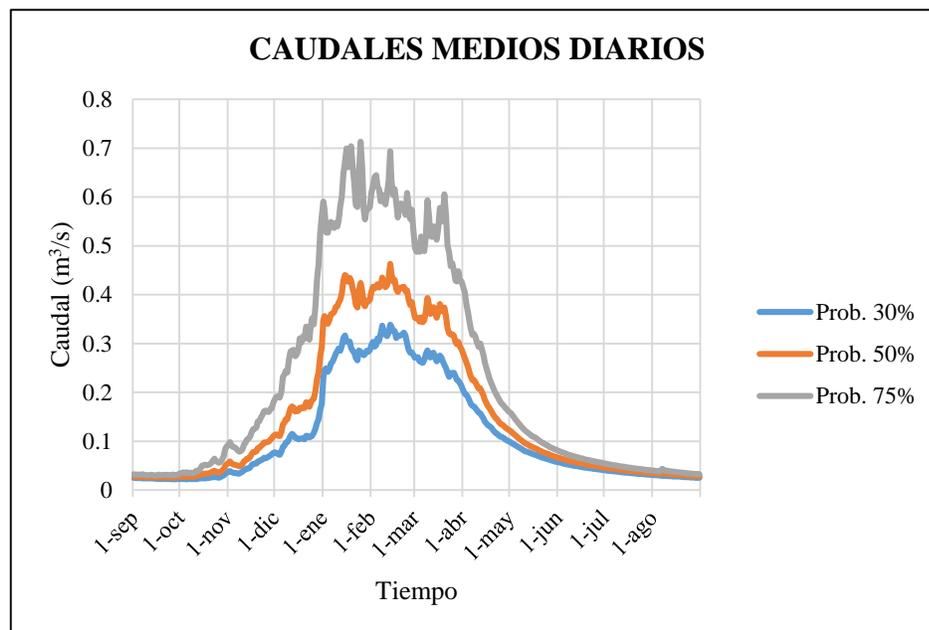


Figura 4.79 Caudales medios diarios de la cuenca Calderas disponibles para el 30, 50 y 75% de probabilidad de no excedencia

Fuente: Elaboración propia

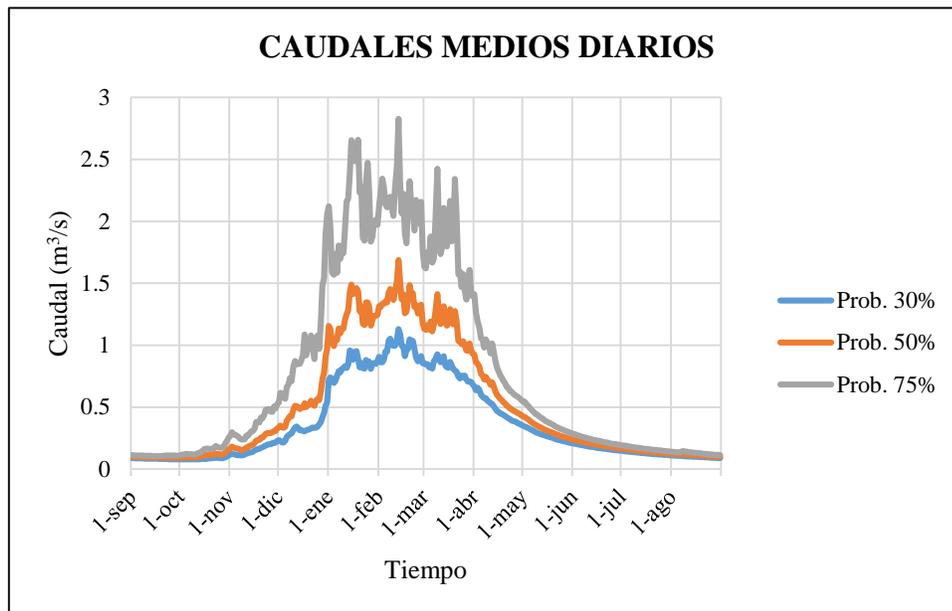


Figura 4.80 Caudales medios diarios de la cuenca Yesera disponibles para el 30, 50 y 75% de probabilidad de no excedencia

Fuente: Elaboración propia

4.8. Caracterización general del embalse

4.8.1. Balance Hídrico para el embalse

Para realizar el balance hídrico del embalse Calderas se considerarán 3 escenarios de tiempo los cuales son: un año normal, un año seco y un año húmedo.

El balance hídrico está representado a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación de almacenamiento}$$

En el presente estudio se considerarán las siguientes entradas y salidas:

Entradas:

Caudal de trasvase del río Yesera al embalse Calderas: aportará un caudal constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ durante la época húmeda en los meses de enero, febrero y marzo.

Caudal de aporte de la cuenca Calderas: está definido a través de los caudales medios diarios generados por el modelo WEAP.

Salidas:

Riego: Se considerarán los datos de caudales medios mensuales de entrega porque no se cuenta con la información al nivel de detalle requerido. Estos datos son proporcionados por el Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA), debido a que dicha institución es la encargada de monitorear la presa Calderas.

Anteriormente en el modelo WEAP se realizó el cálculo de la demanda actual, pero para poder simular la operación del embalse Calderas a lo más cercano a la realidad se trabajó con los datos proporcionados por SEDEGIA.

Caudal ecológico: Se tomará como un caudal constante de 15 l/s, este dato es proporcionado por SEDEGIA.

Agua en exceso: Es el agua que sobre pasa la capacidad máxima del embalse y esta agua retorna al cause Calderas aguas debajo de la presa a través del vertedero de excedencias.

4.9. Construcción del modelo de funcionamiento del embalse en HEC-ResSim**4.9.1. Procedimiento general de ingreso de datos**

Se realizó el ingreso de las características y datos del embalse en los diferentes módulos de HEC-ResSim, luego se definió el set de operación, cada una de las alternativas y finalmente la simulación para los escenarios propuestos.

4.9.1.1. Módulo Watershed

En este módulo se define el sistema de unidades y las coordenadas, posteriormente se ingresan los shapefiles de las cuencas (delimitación, red hídrica y el espejo de agua del embalse) con la finalidad de que sirvan de apoyo al momento de realizar la esquematización de la red hídrica en un cauce principal de aporte hacia el embalse, se crearon los alineamientos de los ríos, el canal de trasvase y el embalse.

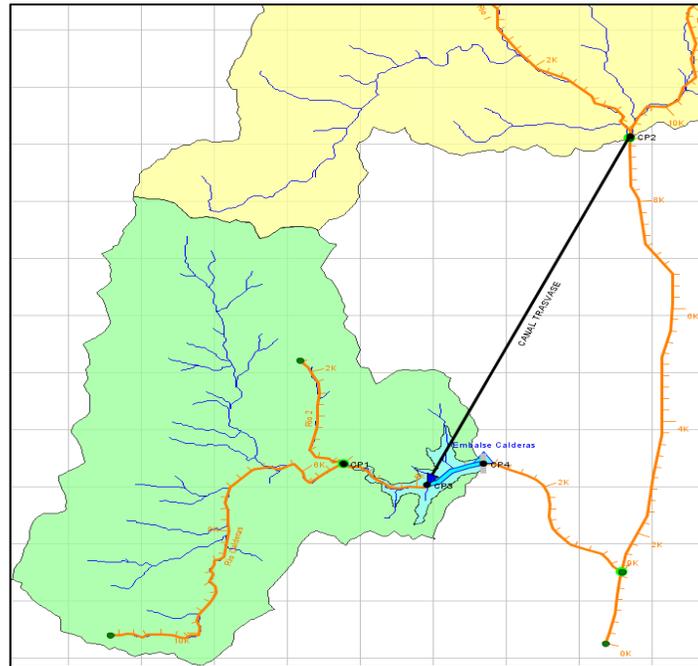


Figura 4.81 Esquematación del modelo HEC-ResSim en el módulo Watershed

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

4.9.1.2. Módulo Reservoir Network

Los datos que se ingresan en este módulo son las características físicas de la presa, de las estructuras de salida, las pérdidas por evaporación y las demandas.

Como se ilustra en la figura 4.82 se añaden los datos físicos del embalse mediante la pestaña Physical. Se ingresa la curva característica del embalse (Curva elevación-volumen-área, ver tabla 4.47) y las curvas de descarga para las estructuras de salida (ver anexo 13).

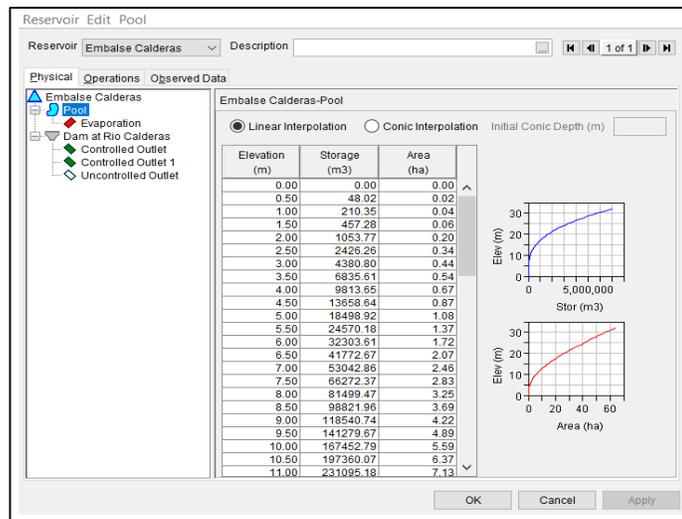


Figura 4.82 Introducción de información física del embalse

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

En cuanto a las pérdidas en el embalse solo se consideraron las que son producidas por la evaporación y no las que son ocasionadas por la infiltración debido a la complejidad del análisis que requiere este tipo de parámetro.

En la figura 4.83 se muestra los datos de evaporación utilizados para el embalse Calderas.

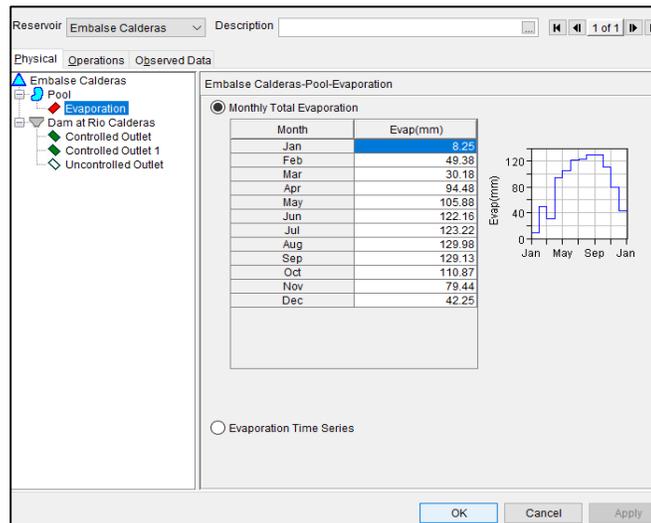


Figura 4.83 Introducción de información de evaporación

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Seleccionando la pestaña operations se ingresan los niveles máximos, normales y mínimos del reservorio, así como el set de operación, demandas y caudal ecológico.

En cuanto a la operación del embalse este va a satisfacer dos demandas de riego una para el margen derecho y otra para el margen izquierdo con respecto al río Calderas, durante todos los meses del año.

Los datos de caudales de salida proporcionados por SEDEGIA se detallan en la tabla 4.84.

Tabla 4.84 Caudales medios mensuales de salida

MES	Q (m ³ /s) Margen Derecho	Q (m ³ /s) Margen izquierdo
ENE	0,111	0,064
FEB	0,084	0,056
MAR	0,190	0,144
ABR	0,130	0,051
MAY	0,091	0,065
JUN	0,027	0,012
JUL	0,035	0,024
AGO	0,051	0,022
SEP	0,099	0,035
OCT	0,075	0,058
NOV	0,134	0,071
DIC	0,085	0,056

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

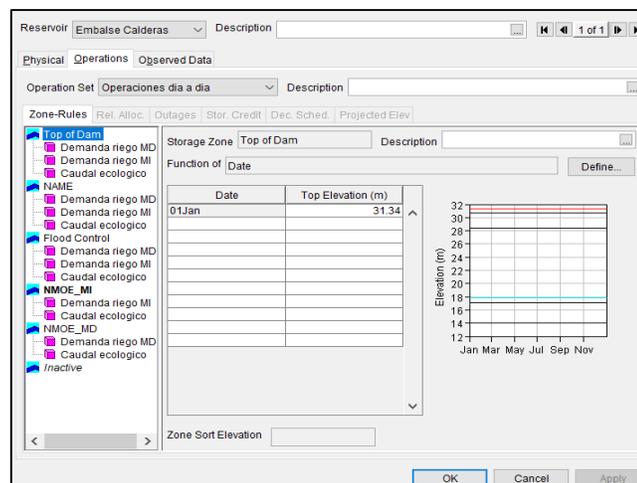


Figura 4.84 Introducción de niveles de operación

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

4.9.1.3. Alternativas

En este apartado se presentan las alternativas a ser simuladas. Se define una alternativa al combinar un Reservoir Network (Datos del embalse: curva característica actual, curvas de descarga de las estructuras de salida y pérdidas), un set de operaciones (niveles del embalse, demandas y caudal ecológico), las series de tiempo (aporte del canal de trasvase, aporte de la cuenca Calderas año húmedo, medio y seco) y condiciones iniciales (nivel de inicio de la elevación del embalse, caudales iniciales de aporte del canal de trasvase y salidas de las obras de toma).

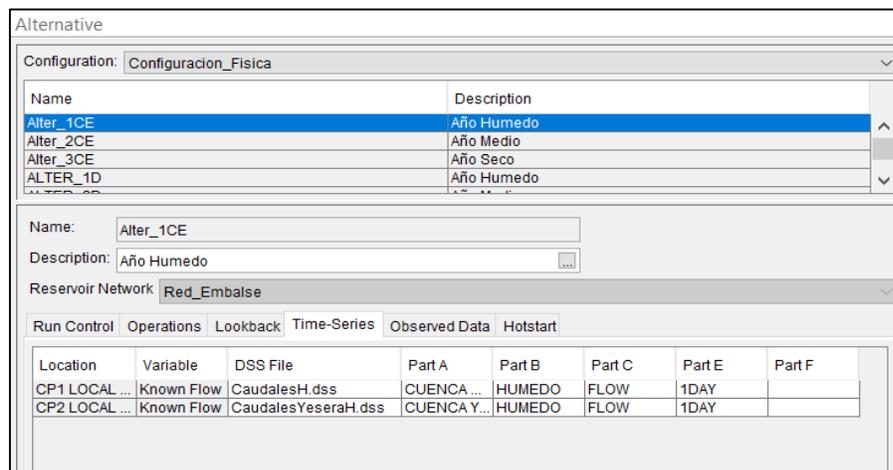


Figura 4.85 Definición de alternativas

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

4.9.1.4. Módulo Simulation

En este módulo se realizan las corridas para las diferentes alternativas planteadas, se eligió el intervalo de un año que empezará desde el mes de abril cuando el embalse se encuentra lleno.

Se simularán 3 escenarios con diferentes probabilidades de no excedencia de una serie de 36 años de caudales generados. En el capítulo de Análisis de resultados se muestran los resultados obtenidos de las diferentes alternativas simuladas.

4.10. Funcionamiento del embalse y análisis de escenarios

Para analizar los escenarios se propone lo siguiente:

Capacidad útil del embalse

El nivel mínimo operacional para la obra de toma del margen derecho se encuentra a una altura de 2073,11 msnm (3,11 m a partir del nivel de sedimentos) y para la obra de toma del margen izquierdo se encuentra a una altura de 2073,80 msnm (3,80 m a partir del nivel de sedimentos). Estas alturas garantizan el correcto funcionamiento de las estructuras de salida. Por lo tanto, el volumen útil del embalse está comprendido entre el nivel mínimo operacional y el nivel de la cresta del vertedero.

Funcionamiento del embalse – Balance Hídrico

En el programa se simulará el funcionamiento del embalse Calderas, tomando en cuenta las entradas por la cuenca Calderas y el canal de trasvase, las salidas (Demanda de riego para el margen derecho e izquierdo).

Se trabajará con los caudales de entrega mensuales y las características físicas actuales del embalse. Se proyectaba trabajar con caudales de entrega diarios, pero no se cuenta con esta información solo se simulará con caudales de entrega a nivel mensual proporcionados por SEDEGIA.

Entradas y salidas

De la propuesta del balance hídrico el elemento de riego tendrá una variación de mes a mes durante todo el periodo en el que debe actuar. Esto se realiza para simplificar las operaciones y puesto que son los datos que se posee. Por lo tanto, los datos de demanda son caudales mensuales durante todo el año.

Niveles de operación del embalse

De acuerdo a lo antes mencionado y considerando las entradas y salidas del embalse, así como sus niveles característicos se establecen los siguientes niveles de operación para el embalse.

Tabla 4.85 Niveles de operación para el embalse

NIVEL	ALTURA
Nivel de terreno	0
Nivel de sedimentos	14
Nivel mínimo operacional Margen Derecho	17,11
Nivel mínimo operacional Margen Izquierdo	17,8
Nivel máximo de operación	28,44
Nivel de aguas máximo	30,66

Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las condiciones anteriores y tomando en cuenta las restricciones en cuanto salidas y entradas de caudales, simularon los siguientes escenarios:

Tabla 4.86 Escenarios de simulación

ESCENARIO	APORTE DIRECTO AL EMBALSE	DEMANDA
1	Año Húmedo	Riego margen derecho e izquierdo
2	Año Medio	
3	Año Seco	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los escenarios propuestos se muestran en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de oferta y demanda en el modelo WEAP

5.1.1. Demanda no cubierta diario promedio anual

En este escenario se consideró una demanda que el mismo programa la calcula al introducir los datos de la cédula de cultivos actual de las zonas de riego que satisface el embalse Calderas.

Como se puede observar en la figura 5.1 y 5.2 la demanda calculada con respecto a los caudales que se entregan varían mayormente en la época húmeda y en la época seca existe una menor variación.

Tabla 5.1 Demanda de riego media mensual actual en el margen derecho

CAUDALES (m ³ /s)		
MES	DEMANDA CALCULADA WEAP	CAUDALES DE ENTREGA (SEDEGIA)
ENERO	0,112	0,111
FEBRERO	0,176	0,084
MARZO	0,188	0,190
ABRIL	0,171	0,130
MAYO	0,092	0,091
JUNIO	0,029	0,027
JULIO	0,000	0,035
AGOSTO	0,012	0,051
SEPTIEMBRE	0,041	0,099
OCTUBRE	0,084	0,075
NOVIEMBRE	0,109	0,134
DICIEMBRE	0,109	0,085

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por SEDEGIA

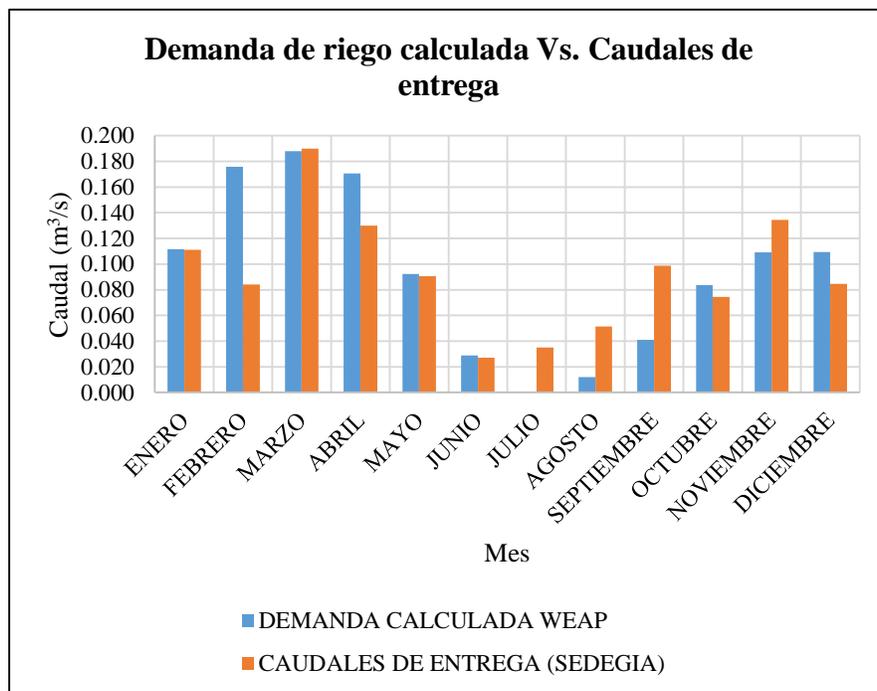


Figura 5.1 Demanda de riego calculada media mensual vs. caudales de entrega medios mensuales en el margen derecho

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por SEDEGIA

Tabla 5.2 Demanda de riego media mensual actual en el margen izquierdo

CAUDALES (m³/s)		
MES	DEMANDA CALCULADA WEAP	CAUDALES DE ENTREGA (SEDEGIA)
ENERO	0,092	0.064
FEBRERO	0,140	0,056
MARZO	0,144	0,144
ABRIL	0,137	0,051
MAYO	0,065	0,065
JUNIO	0,027	0,012
JULIO	0,000	0,024
AGOSTO	0,018	0,022
SEPTIEMBRE	0,032	0,035
OCTUBRE	0,064	0,058
NOVIEMBRE	0,083	0,071
DICIEMBRE	0,080	0,056

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por SEDEGIA

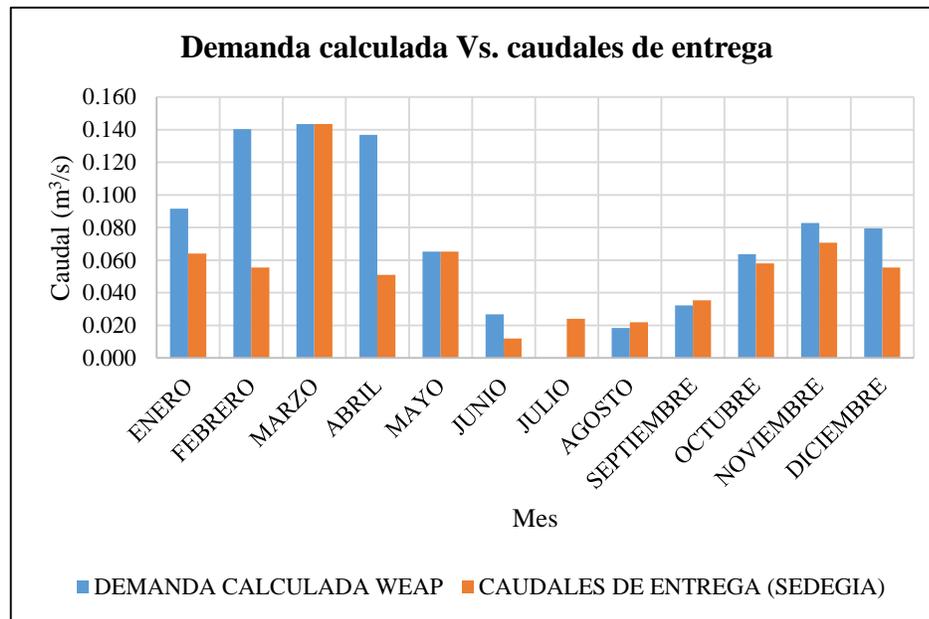


Figura 5.2 Demanda de riego calculada media mensual vs. caudales de entrega medios mensuales en el margen izquierdo

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por SEDEGIA

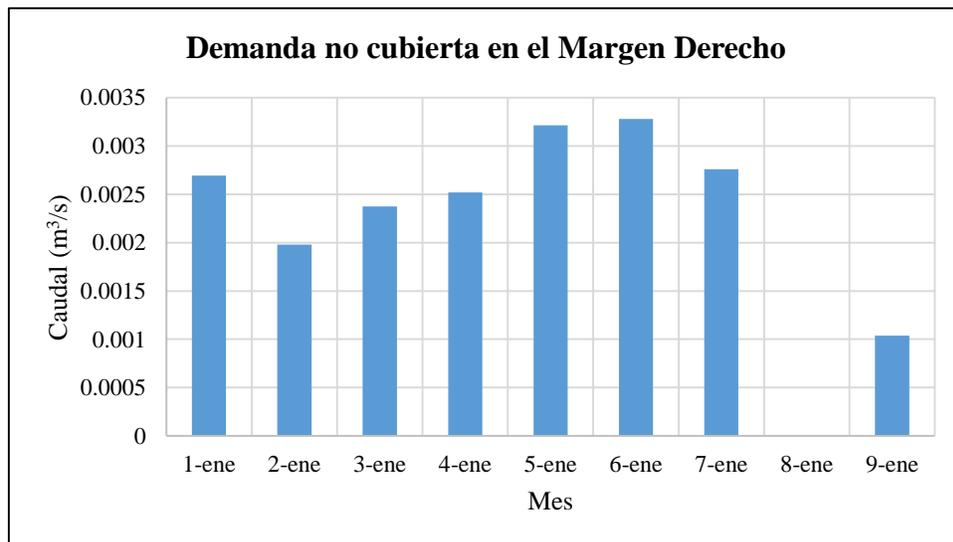


Figura 5.3 Demanda no cubierta media diaria para un año promedio en el margen derecho

Fuente: Elaboración propia en base al modelo WEAP

Como se puede observar en la figura 5.3 desde el 01 de enero al 9 de enero no se llega a cubrir la demanda.

El caudal máximo que puede circular por el canal primario del margen derecho es de 0,424 m³/s.



Figura 5.4 Demanda no cubierta media diaria para un año promedio en el margen izquierdo

Fuente: Elaboración propia en base al modelo WEAP

En la figura 5.4 se ilustran los caudales de la demanda insatisfecha del canal margen izquierdo desde el 01 de enero al 28 de abril.

La capacidad máxima del canal primario del margen izquierdo es de 0,173 m³/s.



Figura 5.5 Nivel de almacenamiento medio anual del embalse Calderas

Fuente: Elaboración propia en base al modelo WEAP

Como se puede observar en la gráfica 5.5 el nivel de almacenamiento del embalse se encuentra dentro de los niveles de operación por lo tanto la demanda que no se cubre tanto para el margen derecho como el izquierdo no se debe a la falta de oferta sino a la capacidad máxima de los canales primarios.

Los caudales que no se cubrieron en ambos márgenes son muy pequeños es por ello que no se consideran como demanda insatisfecha. Además, se conoce que el caudal de demanda que se requiere en un día se va distribuyendo por partes de acuerdo al requerimiento de los usuarios, lo cual quiere decir que no habría inconvenientes al distribuir el caudal requerido debido a la limitación en la capacidad máxima de los canales principales.

Pero como esta demanda no es la que se entrega en la realidad posteriormente se analiza la operación del embalse con respecto a los datos de caudales de entrega proporcionados por SEDEGIA.

5.2. Análisis de oferta y demanda en el modelo HEC-ResSim

Antes de realizar este análisis se realizó una comparación de los niveles que se midieron en la batimetría del embalse realizado en el año 2019 al 2020 con respecto a los niveles simulados. Para ello se realizó la caracterización de los años 2019 y 2020 donde se obtuvo que estos años corresponden a un año seco. En la siguiente figura se ilustran los niveles simulados en un año seco con respecto a los niveles reales que corresponden también a un año seco.

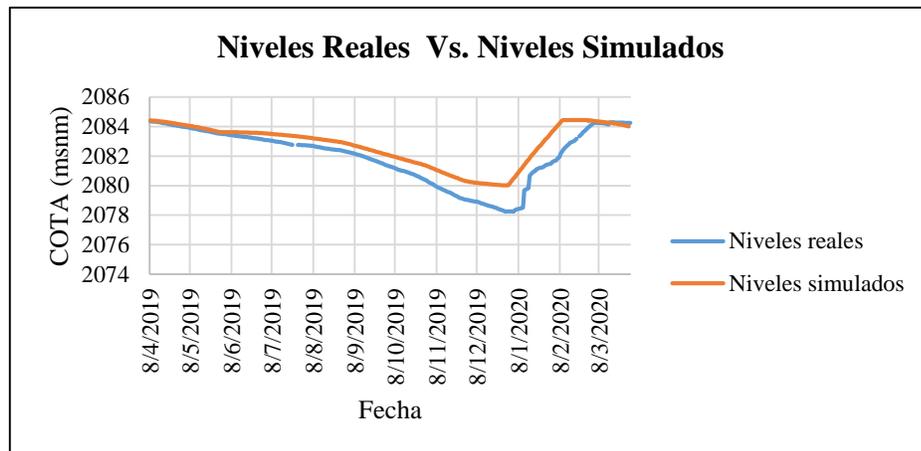


Figura 5.6 Niveles reales vs. Niveles simulados

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por CIAGUA

En la figura 5.6 se puede observar que los niveles simulados varían mayormente en los meses de diciembre, enero y febrero y la variación disminuye en la época de estiaje. Los niveles generados tienen la misma tendencia que los niveles reales lo cual nos indica que la simulación del modelo de operación es válida para el embalse Calderas.

Escenario 1 – Año Húmedo

Analizando los resultados para el embalse, se partió de una elevación de 28,44 m, suponiendo que el embalse está inicialmente lleno, se empezó a simular a partir del mes de abril.

En este escenario se producen las mayores descargas por el vertedero. En la figura 5.7 se puede observar que se satisface la demanda en todo el año tanto para el margen izquierdo como para el margen derecho, el 13 de enero el embalse alcanza su nivel máximo de operación con un volumen de almacenamiento de 4,93 hm³, el caudal de descarga vía vertedero es de 0,50 m³/s, el cual se va incrementando haciendo un volumen de descarga de 0,06 hm³ desde el 13 de enero al 31 de marzo (78 días) y el nivel mínimo que llega a alcanzar es de 25,70 m el 29 de noviembre y se utiliza un volumen de 1,29 hm³, el cual representa el 26% de la capacidad del embalse, por lo tanto la curva de almacenamiento se encuentra dentro de los límites definidos para el buen funcionamiento de las obras de toma.

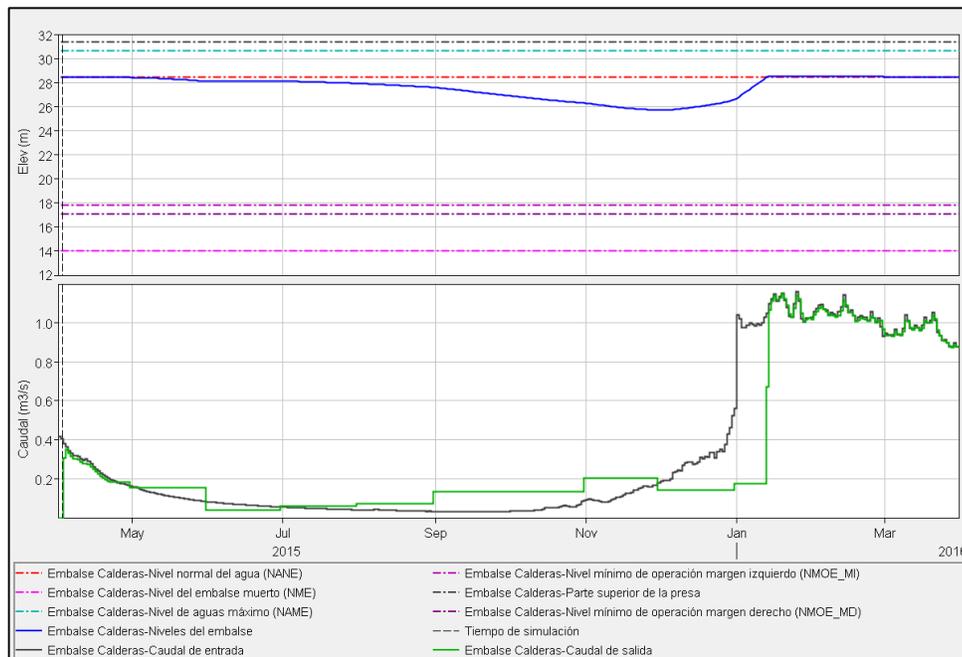


Figura 5.7 Niveles - Entradas y salidas para el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC- ResSim

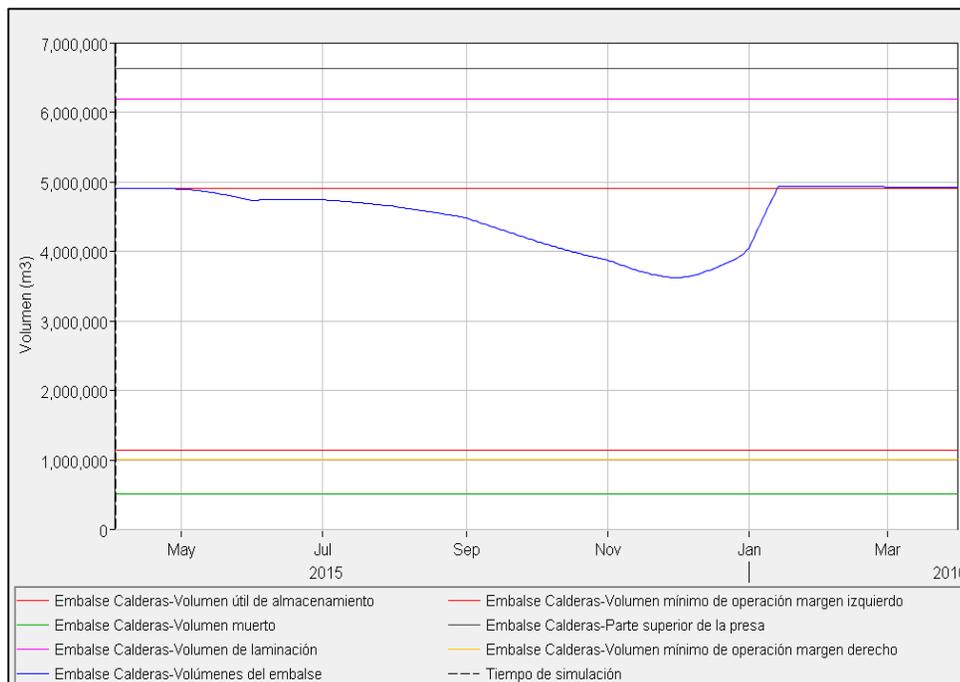


Figura 5.8 Volúmenes del embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

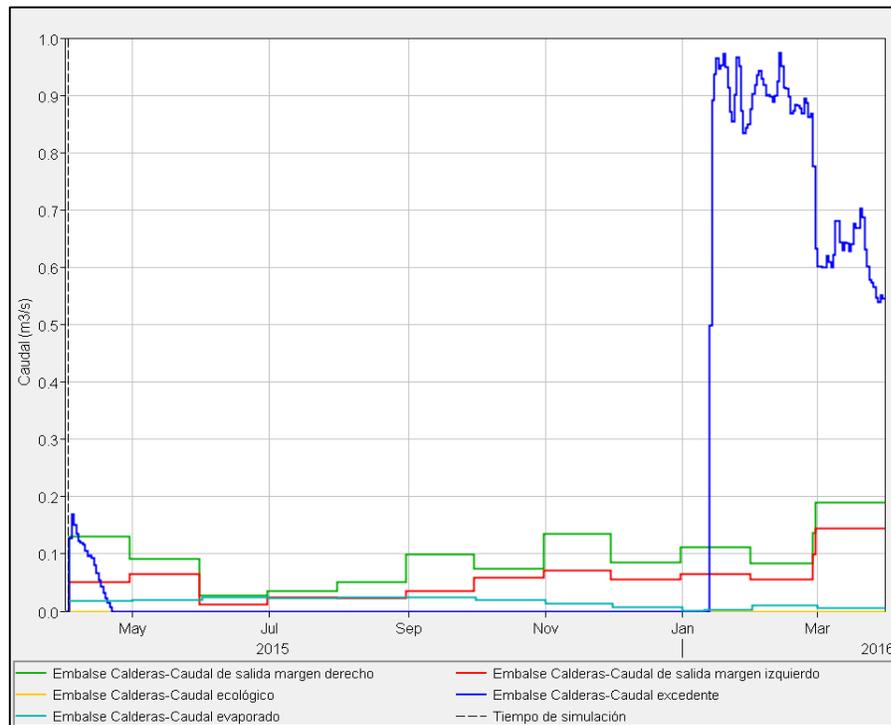


Figura 5.9 Salidas desde el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 2 – Año Normal

En este escenario se puede observar que se cubre la demanda en su totalidad, alcanzando su máximo nivel el 28 de enero con un volumen de almacenamiento de $4,92 \text{ hm}^3$, el caudal de descarga vía vertedero es de $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ haciendo un volumen total de $0,02 \text{ hm}^3$ desde el 28 de enero al 31 de marzo (63 días) y el nivel mínimo que alcanza el embalse es de $24,85 \text{ m}$ el 9 de diciembre donde se llega a consumir un volumen de $1,65 \text{ hm}^3$ el cual representa el 34% de la capacidad del embalse, quedando la curva de almacenamiento entre los límites máximo y mínimo de operación.

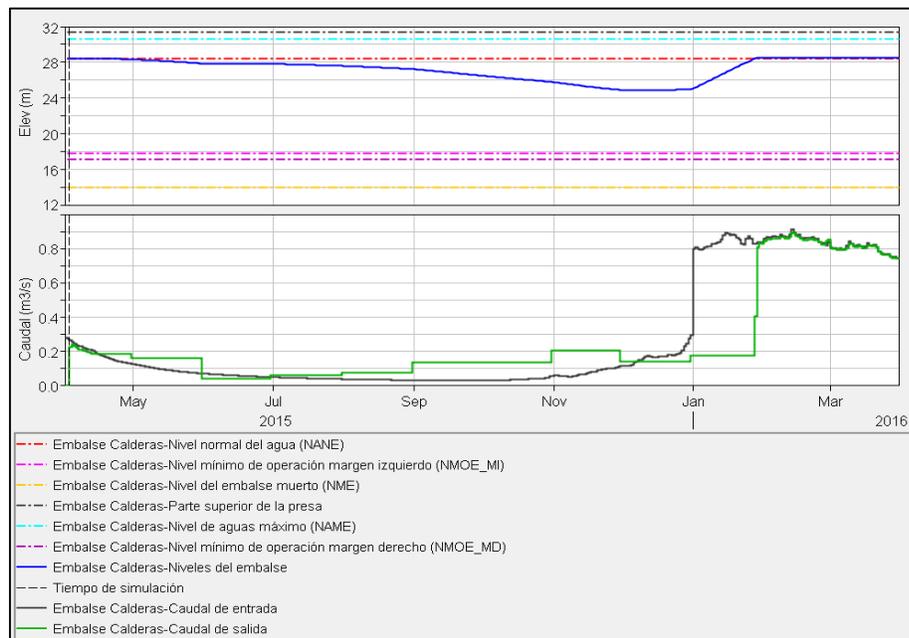


Figura 5.10 Niveles - Entradas y salidas para el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

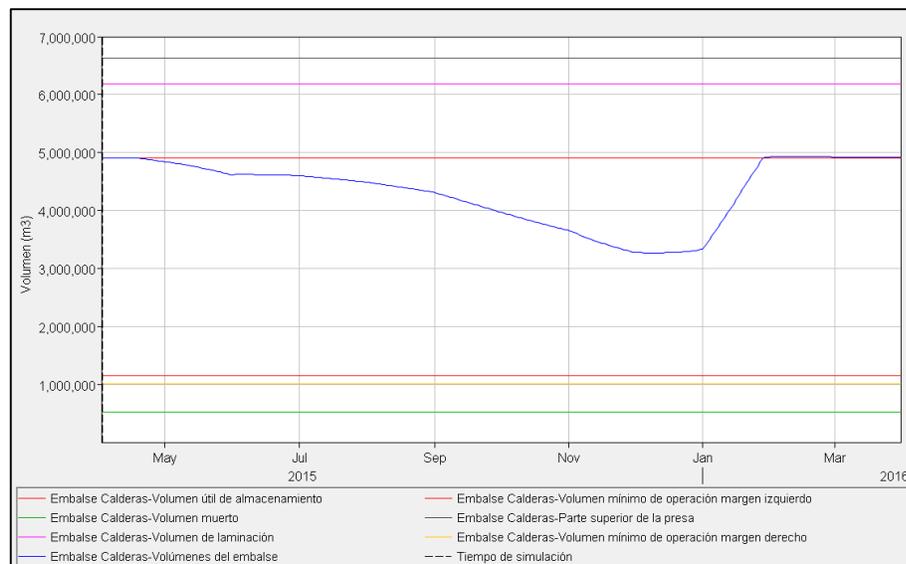


Figura 5.11 Salidas desde el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

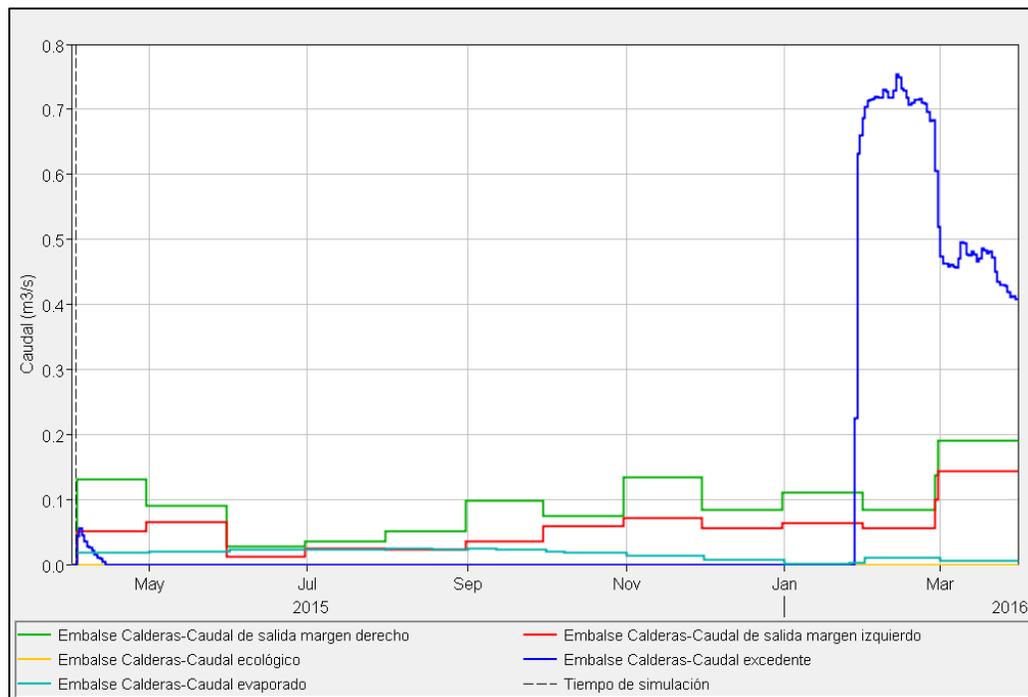


Figura 5.12 Salidas desde el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 3 - Año Seco

En este escenario al igual que en los anteriores las demandas se cubren por completo. El nivel máximo se alcanza el 10 de febrero con un volumen de almacenamiento de $4,92 \text{ hm}^3$, el caudal de descarga vía vertedero es de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ haciendo un volumen total de $0,01 \text{ hm}^3$ desde el 10 de febrero hasta el 31 de marzo (49 días) y el nivel mínimo se alcanza el 29 de diciembre a la altura de $24,02 \text{ m}$ donde se llega a utilizar un volumen de $1,97 \text{ hm}^3$ el cual representa el 40% de la capacidad del embalse. La curva de almacenamiento se encuentra dentro de los parámetros definidos de operación.

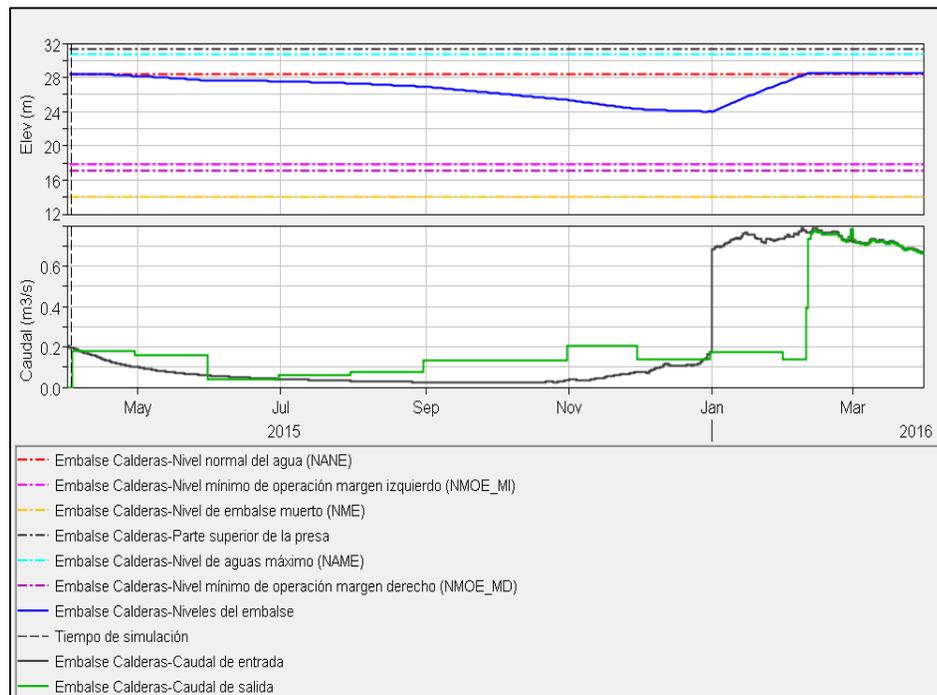


Figura 5.13 Niveles - Entradas y salidas para el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

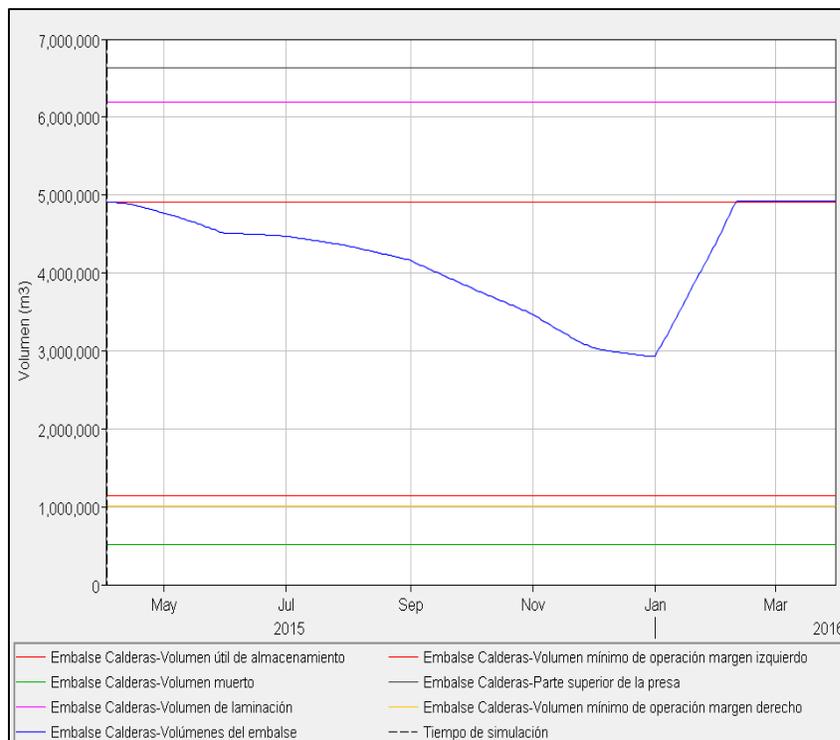


Figura 5.14 Volúmenes del embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

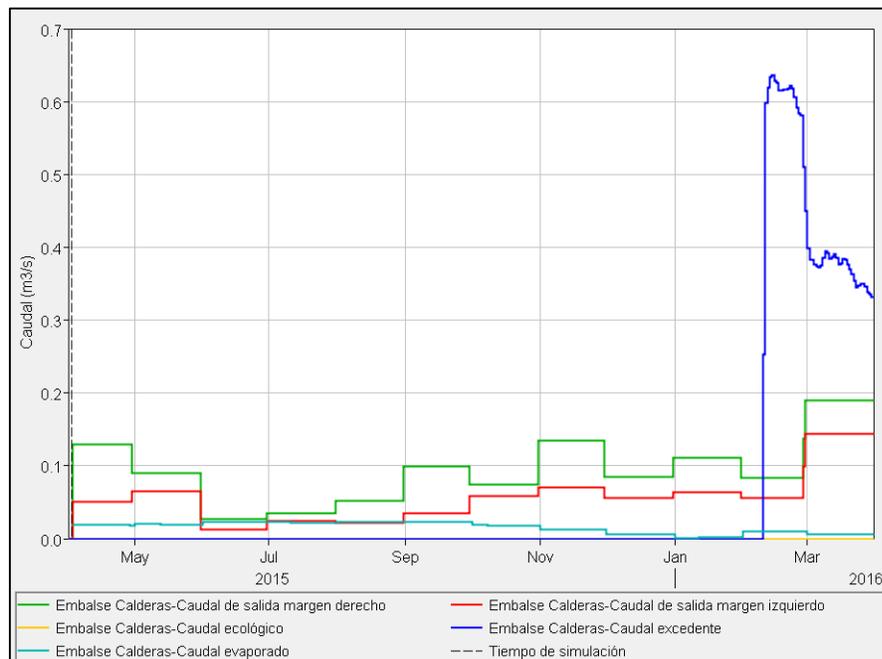


Figura 5.15 Salidas desde el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

En los tres escenarios simulados el volumen utilizado no sobrepasa el 50 % de la capacidad del embalse, lo cual quiere decir que no se está aprovechando el volumen útil en su totalidad, esto se debe a que no todos los usuarios tienen acceso al riego porque no se realizó la implementación del riego tecnificado a las comunidades beneficiarias como se tenía previsto al inicio del proyecto de la presa Calderas.

Debido a que todavía no se cuenta con el riego tecnificado y este proyecto se encuentra en una fase de evaluación, el cual al momento de su implementación aumentaría en gran medida la demanda por que el riego llegaría a todas las comunidades que se tomaron en cuenta al realizar el proyecto de la presa Calderas, pero como todo el proceso de evaluación lleva años entonces se propone realizar una rotación de cultivos en las comunidades donde llega el riego (surcos) esto permitirá aumentar el requerimiento de caudal y por ende la eficiencia del embalse.

Una rotación de cultivos consiste en alternar cultivos de diferentes familias y con necesidades nutritivas diferentes en un mismo trozo de terreno. Dado que las especies

de plantas cultivadas requieren del suelo distintas sustancias y también le aportan sustancias distintas, sabiéndolas rotar se consigue paliar las deficiencias del suelo e incluso aumentar su contenido de minerales y compuestos orgánicos.

Además, la rotación de cultivos ayuda a erradicar malezas, insectos y otras plagas de los cultivos, porque las plagas tienden a especializarse en atacar familias e incluso especies concretas de plantas, por eso al cambiar el cultivo se interrumpen los ciclos de los parásitos y disminuye el número de sus individuos potencialmente atacantes.

A continuación, se presenta la cédula de cultivos actual añadiendo 4 rotaciones de cultivos en el año tanto para el margen derecho como para el margen izquierdo.

Tabla 5.3 Cédula con rotación de cultivos para el margen derecho y áreas de cultivo

ROTACION	CULTIVO	INVIERNO						VERANO					
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Rotación 1	Maíz grano							43,56	43,56	43,56	43,56	43,56	43,56
	Arveja verde R1			43,56	43,56	43,56	43,56						
	Arveja verde				5,41	5,41	5,41	5,41					
	Arveja verde	27,4							27,4	27,4	27,4	27,4	27,4
	Papa temprano				22,53	22,53	22,53	22,53					
	Papa intermedia									13,6	13,6	13,6	13,6
	Vid			10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09		
Rotación 2	Maíz choclo			2,72	2,72	2,72	2,72	2,72					
	Cebolla verde R2								2,72	2,72	2,72	2,72	
	Durazno			0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06		
	Trigo								2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Rotación 3	Cebolla cabeza	3,58	3,58	3,58	3,58								
	Arveja verde R3					3,58	3,58	3,58	3,58				
	Cebolla verde R3									3,58	3,58	3,58	3,58
Rotación 4	Tomate			1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68				
	Arveja verde R4									1,68	1,68	1,68	1,68

ROTACION	CULTIVO	INVIERNO						VERANO					
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Total (ha)		30,98	3,58	61,69	89,63	89,63	89,63	89,63	92,07	105,67	105,67	95,52	92,8

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

Tabla 5.4 Cédula con rotación de cultivos para el margen izquierdo y áreas de cultivo

ROTACIÓN	CULTIVO	INVIERNO						VERANO					
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M
Rotación 1	Maíz grano							26,65	26,65	26,65	26,65	26,65	26,65
	Arveja verde R1			26,65	26,65	26,65	26,65						
	Arveja verde				5,02	5,02	5,02	5,02					
	Arveja verde	25,46							25,46	25,46	25,46	25,46	25,46
	Papa temprano				12,53	12,53	12,53	12,53					
	Papa intermedia								7,56	7,56	7,56	7,56	
Rotación 2	Maíz choclo			2,72	2,72	2,72	2,72	2,72					
	Cebolla verde R2								2,72	2,72	2,72	2,72	
	Durazno			5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	5,07	
	Orégano			5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04	
	Trigo								1,5	1,5	1,5	1,5	
Rotación 3	Cebolla cabeza	0,63	0,63	0,63	0,63								
	Arveja verde R3					0,63	0,63	0,63	0,63				
	Cebolla verde R3									0,63	0,63	0,63	0,63
Total (ha)		26,09	0,63	40,11	57,66	57,66	57,66	57,66	67,07	74,63	74,63	69,56	61,8

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

Tabla 5.5 Área regable total de cultivos

ÁREA REGABLE TOTAL DE CULTIVOS					
CÉDULA	MARGEN DERECHO		MARGEN IZQUIERDO		ÁREA TOTAL (ha)
	Invierno (ha)	Verano (ha)	Invierno (ha)	Verano (ha)	
Cédula de cultivos actual	49,05	84,56	32,51	59,67	225,79
Cédula de cultivos con rotación de cultivos	93,21	95,52	58,29	64,52	311,54

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

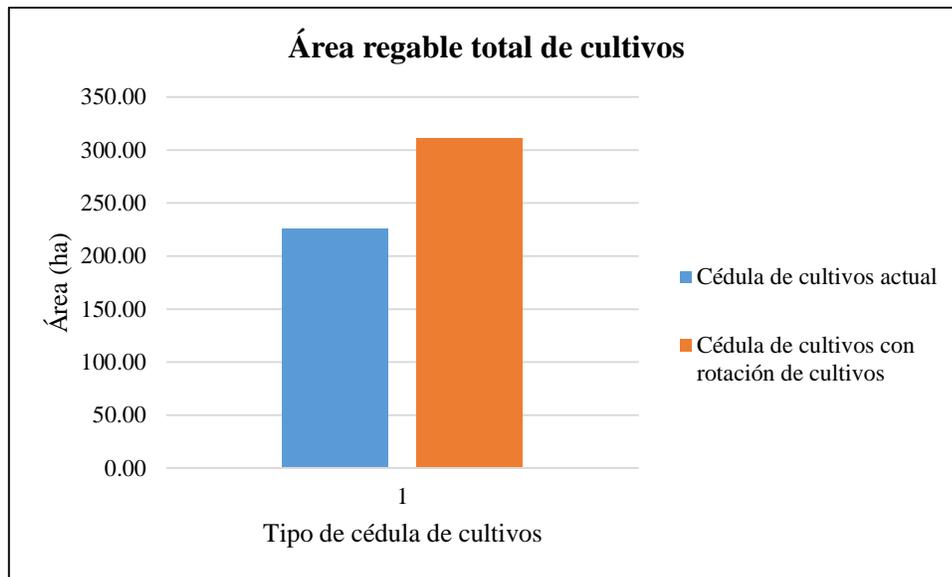


Figura 5.16 Área regable total de cultivos

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por SEDEGIA

Posteriormente se realiza el cálculo de la demanda al implementar la rotación de cultivos mediante el método del coeficiente simplicado en el modelo WEAP.

En la tabla 5.6 se detallan los nuevos caudales de demanda para el margen izquierdo y derecho.

Tabla 5.6 Caudales de demanda con la implementación de la rotación de cultivos

CAUDALES DE DEMANDA (m ³ /s)	
Margen Derecho	Margen Izquierdo
0,115	0,090
0,169	0,132
0,198	0,147
0,174	0,133
0,107	0,071
0,039	0,033
0,006	0,001
0,058	0,043
0,121	0,081
0,201	0,138

0,210	0,145
0,109	0,079

Fuente: Elaboración propia en base al programa WEAP

5.2.1. Optimización de la entrada de caudal por el canal de trasvase

En los escenarios anteriores se consideró un caudal de trasvase constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 3 meses en la época húmeda (90 días del 1 de enero al 31 de marzo).

En los 3 escenarios planteados se puede observar que el volumen del excedente en el año no es muy grande, pero se producen descargas por el vertedero mientras se está trasvasando el caudal de aporte indirecto, para ello se optimizara la operación del canal de trasvase evitando que se produzcan derrames en el embalse cuando se esté transfiriendo el caudal de aporte indirecto. La optimización se realiza cuando se satisface la demanda actual sin implementar la rotación de cultivos.

Escenario 1 – Año Húmedo

En este escenario no se requiere transferir el caudal de aporte indirecto de la cuenca Yesera debido a que con solo el caudal de aporte de la cuenca Calderas se llena el reservorio y se producen caudales excedentes. El nivel máximo se produce el 26 de enero con una altura de 28,46 m y un volumen de almacenamiento de $4,92 \text{ hm}^3$, el caudal de descarga vía vertedero es de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ haciendo un volumen total de $0,05 \text{ hm}^3$ desde el 26 de enero hasta el 30 de marzo (64 días). El nivel mínimo del embalse se produce el 29 de noviembre a una altura de 25,70 m quedando la curva de almacenamiento dentro de los límites permisibles de operación.

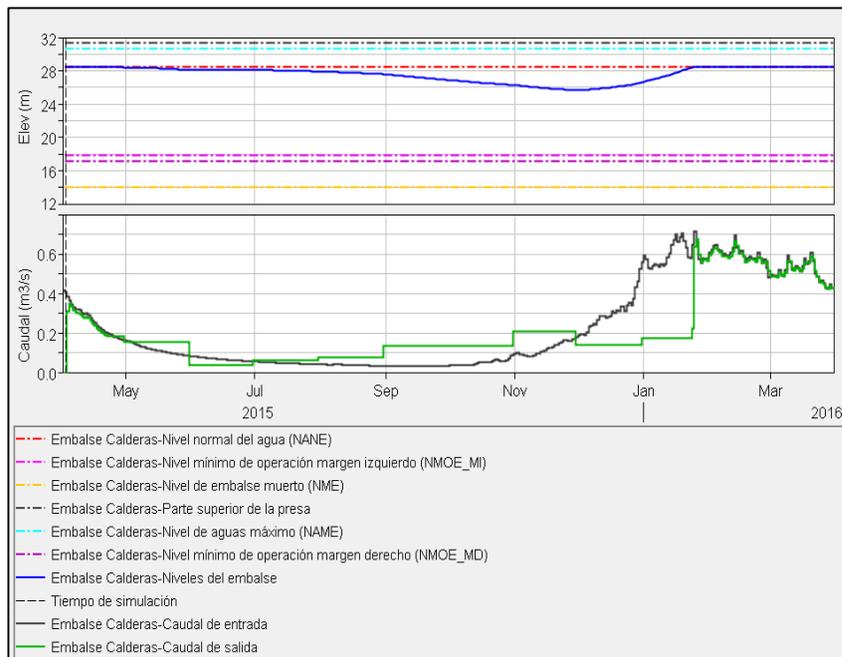


Figura 5.17 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

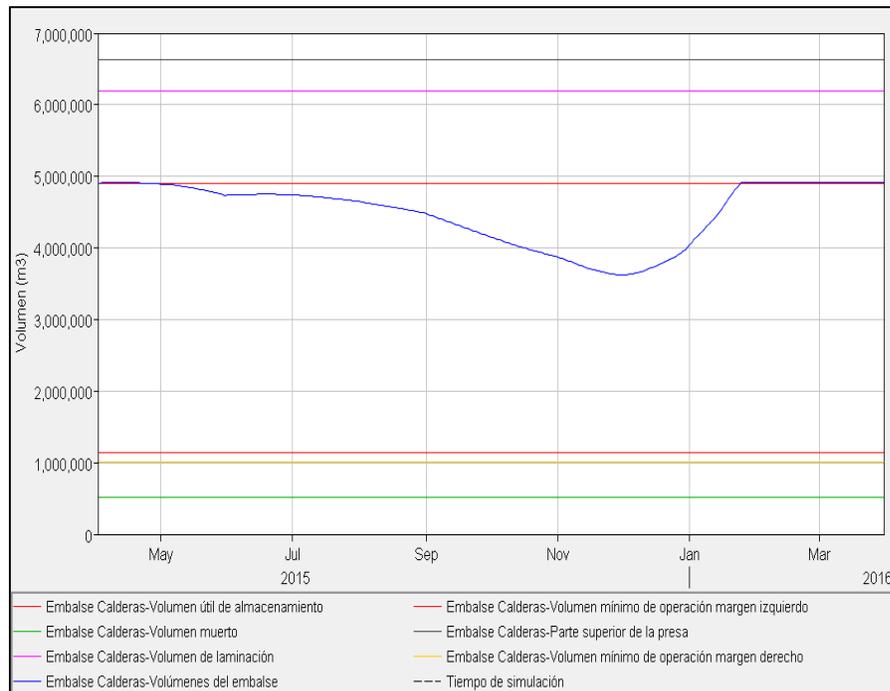


Figura 5.18 Volúmenes del embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

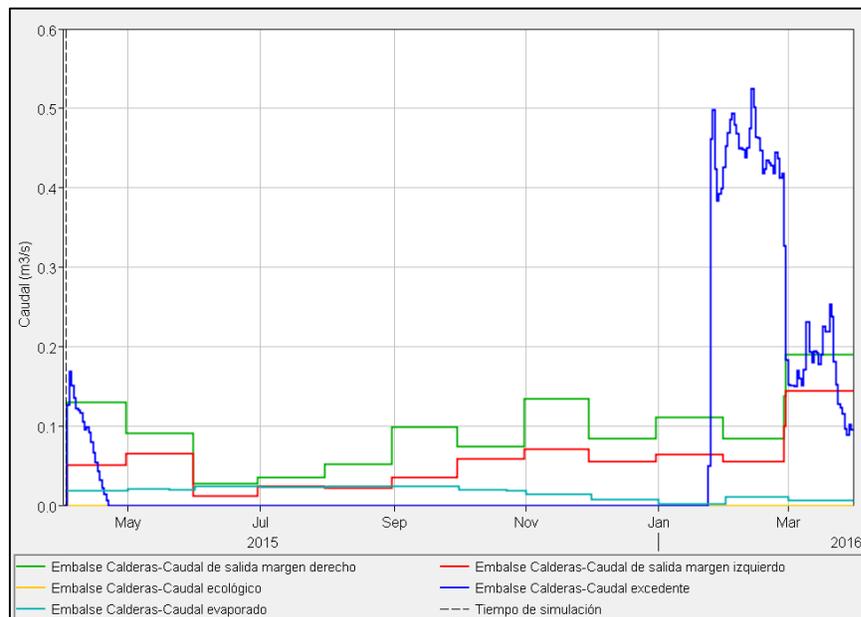


Figura 5.19 Salidas desde el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 2 – Año Normal

Para este escenario el embalse se llena con solo transferir un caudal constante durante el 01 enero al 27 de enero (27 días).

El nivel máximo se produce el 29 de enero con un volumen de almacenamiento de 4,91 hm³, el caudal de vertido es de 0,10 m³/s haciendo un volumen total de 0,02 hm³ desde el 29 de enero al 21 de marzo (52 días). El nivel mínimo se alcanza el 7 de diciembre a la altura de 24,85 m. Al igual que en el escenario anterior la curva de almacenamiento se encuentra dentro de los límites.

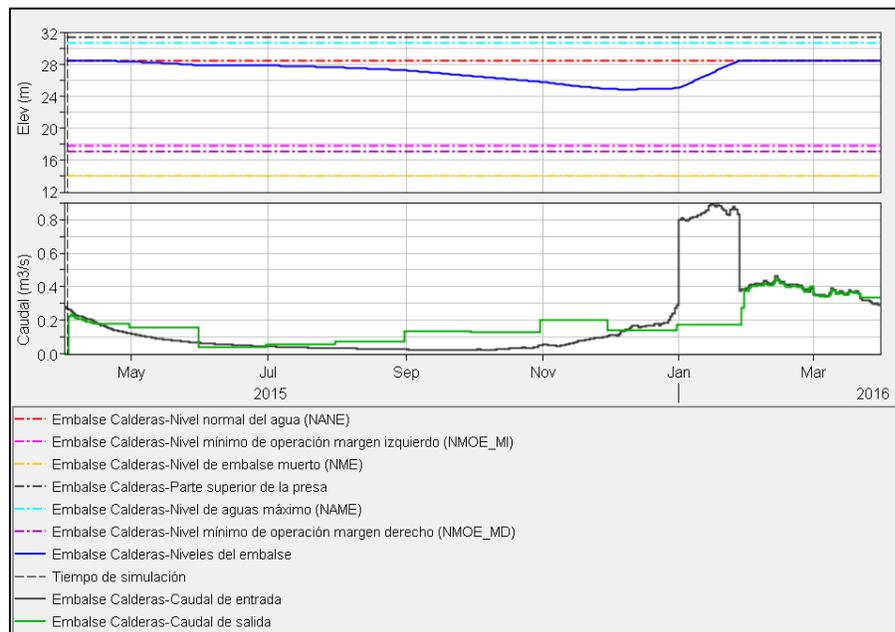


Figura 5.20 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

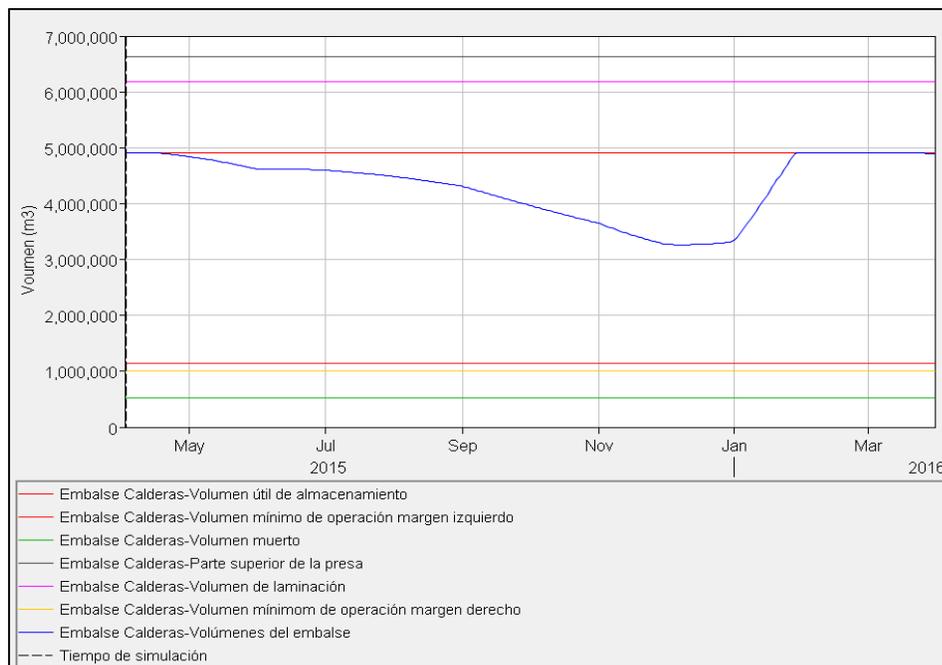


Figura 5.21 Volúmenes del embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

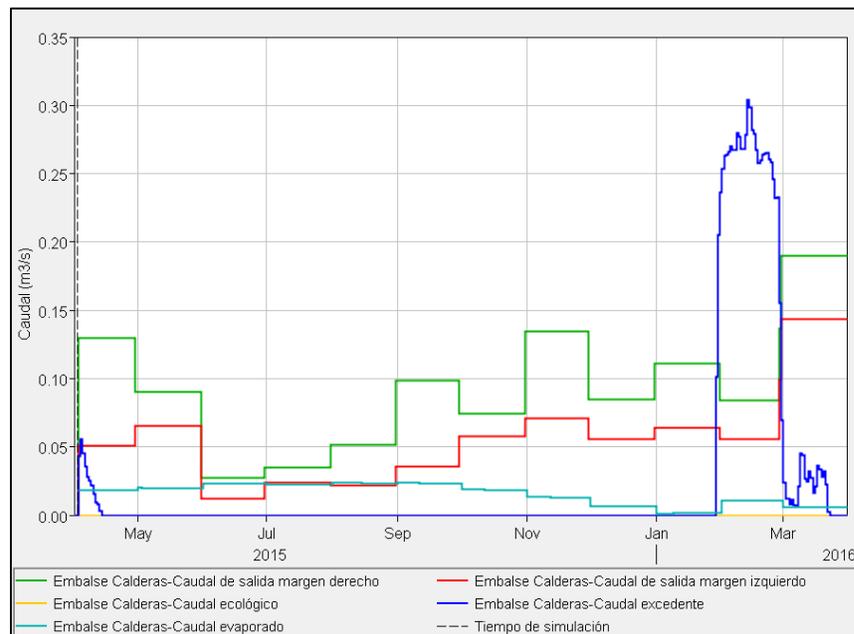


Figura 5.22 Salidas desde el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 3 – Año Seco

En este escenario se requiere trasvasar un caudal constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ desde el 01 enero hasta el 09 de febrero (40 días).

El 11 de febrero se presenta el nivel máximo en el embalse con una altura de $28,45 \text{ m}$ con un volumen de almacenamiento de $4,91 \text{ hm}^3$, el caudal de vertido es de $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ haciendo un volumen total de $0,01 \text{ hm}^3$ desde el 11 de febrero hasta el 28 de febrero (17 días). El nivel mínimo del embalse se produce el 29 de diciembre a una altura de $24,02 \text{ m}$. La curva de almacenamiento se encuentra dentro de los parámetros permisibles de operación.

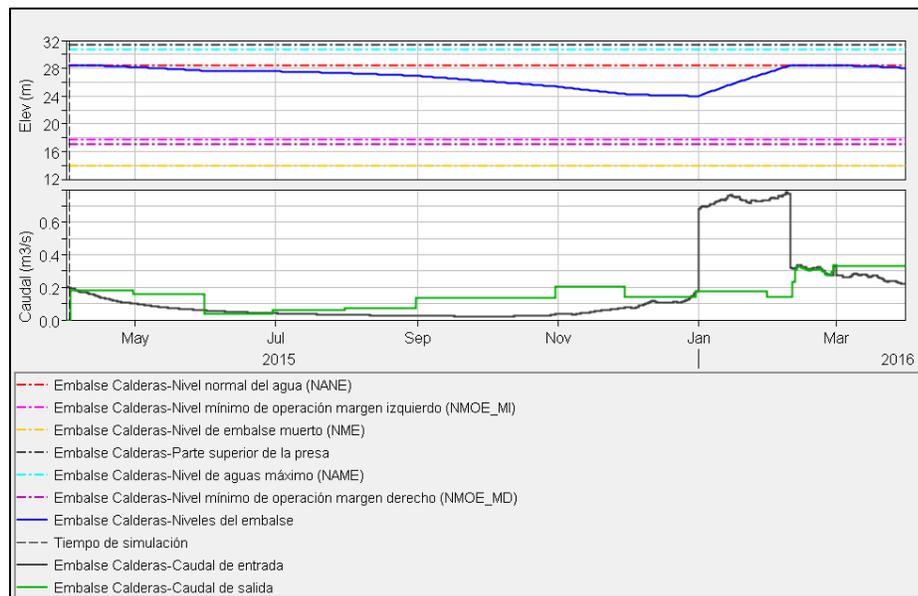


Figura 5.23 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

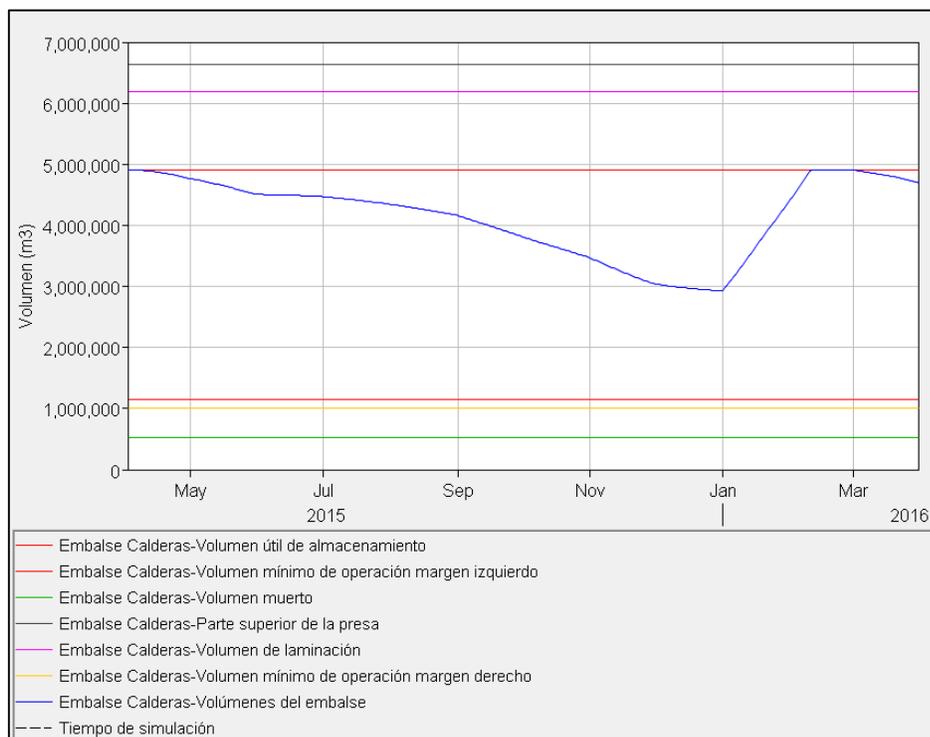


Figura 5.24 Volúmenes del embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

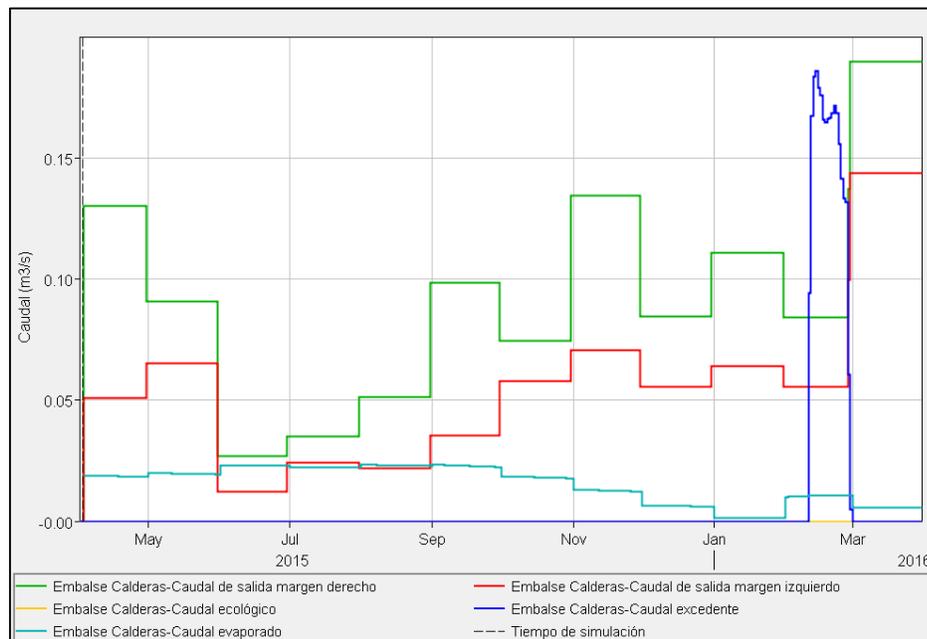


Figura 5.25 Salidas desde el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

5.2.2. Aumento del requerimiento del caudal en base a una rotación de cultivos

En los escenarios donde se evalúa el funcionamiento del embalse con respecto a la demanda actual se puede observar que el volumen utilizado no sobre pasa el 50% de la capacidad del embalse lo que quiere decir que no se está usando eficientemente el agua embalsada. Es por ello que se evalúa el funcionamiento del embalse con la demanda de la nueva cédula de cultivos al implementar la rotación.

Escenario 1 – Año Húmedo

En este escenario solo se requiere trasvasar un caudal constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ desde el 1 de enero hasta el 1 de febrero (32 días).

En la figura 5.26 se puede observar que se cubre toda la demanda, alcanzando su nivel máximo el 2 de febrero con una altura de 28,48 m y un volumen de almacenamiento de $4,93 \text{ hm}^3$, el caudal de vertido es de $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ inicialmente haciendo un volumen total de $0,05 \text{ hm}^3$ desde el 2 de febrero hasta el 31 de marzo (57 días), el nivel mínimo se produce el 4 de diciembre a una altura de 22,17 m donde se llegaría a utilizar un

volumen de 2,72 hm³ el cual representa el 55% de la capacidad del embalse. La curva de almacenamiento se encuentra dentro de los parámetros definidos de operación.

Con la implementación de la rotación de cultivos se puede observar que el volumen aumenta en 1,43 hm³ más con respecto al volumen utilizado actualmente que es de 1,29 hm³. Al aumentar el requerimiento del caudal se puede usar de manera eficiente el agua embalsada.

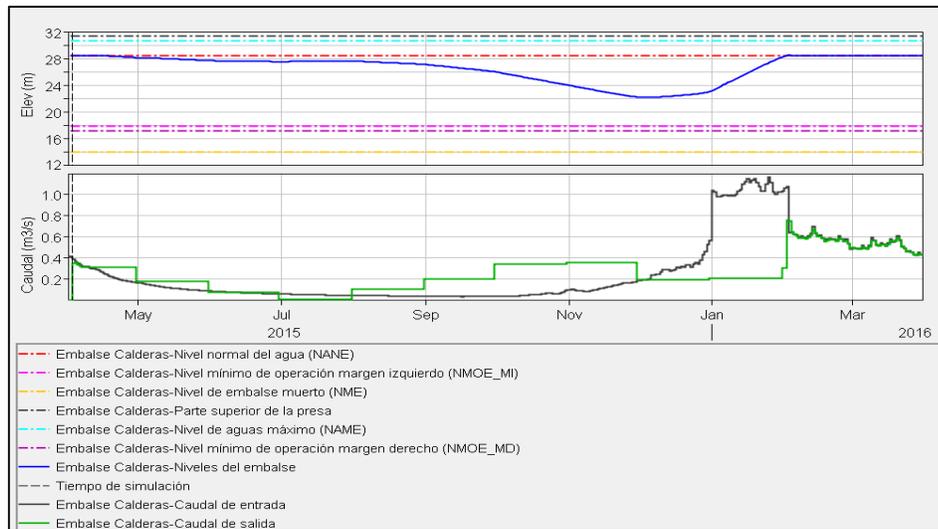


Figura 5.26 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

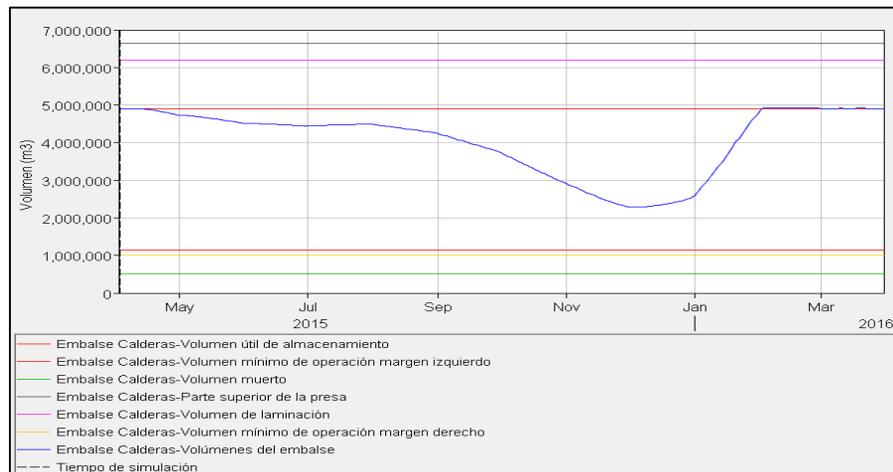


Figura 5.27 Volúmenes del embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

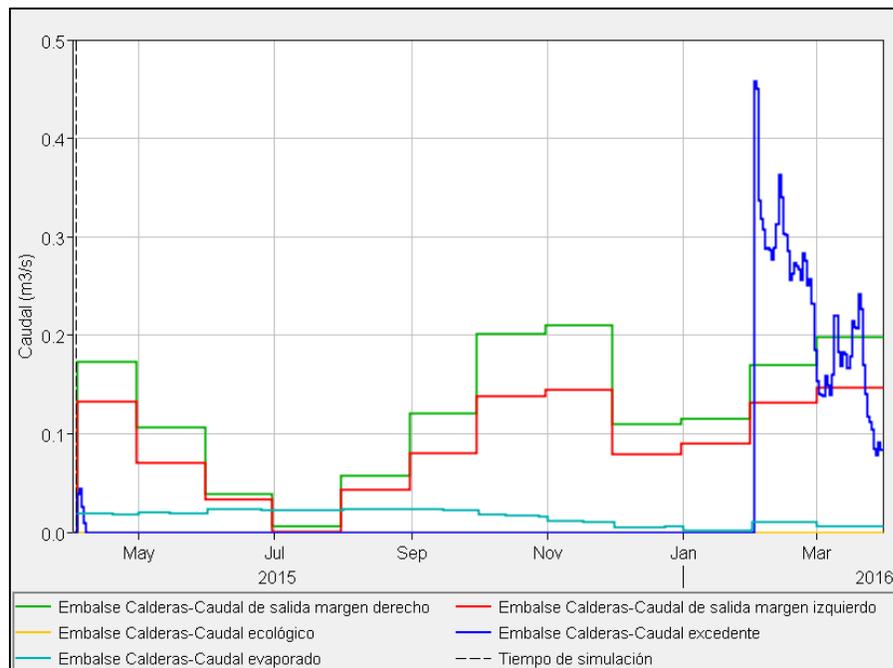


Figura 5.28 Salidas desde el embalse Calderas en año húmedo

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 2 – Año Normal

Para este escenario solo se requiere trasvasar un caudal constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ desde el 1 de enero hasta el 1 de marzo (60 días).

La demanda se cubre en su totalidad, alcanzando el nivel máximo el 2 de marzo a una altura de $28,46 \text{ m}$ y un volumen de almacenamiento de $4,92 \text{ hm}^3$, el caudal de vertido es de $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ inicialmente haciendo un volumen total de $0,02 \text{ hm}^3$ desde el 2 al 21 de marzo (19 días). El nivel mínimo se da el 26 de diciembre a una altura de $20,38 \text{ m}$ donde se llegaría a utilizar un volumen de $3,21 \text{ hm}^3$ el cual representa el 65% de la capacidad del embalse. En este escenario la curva de almacenamiento se encuentra dentro de los parámetros de operación.

En este escenario el volumen utilizado aumenta en $1,56 \text{ hm}^3$ más con respecto al volumen actual que es de $1,65 \text{ hm}^3$.

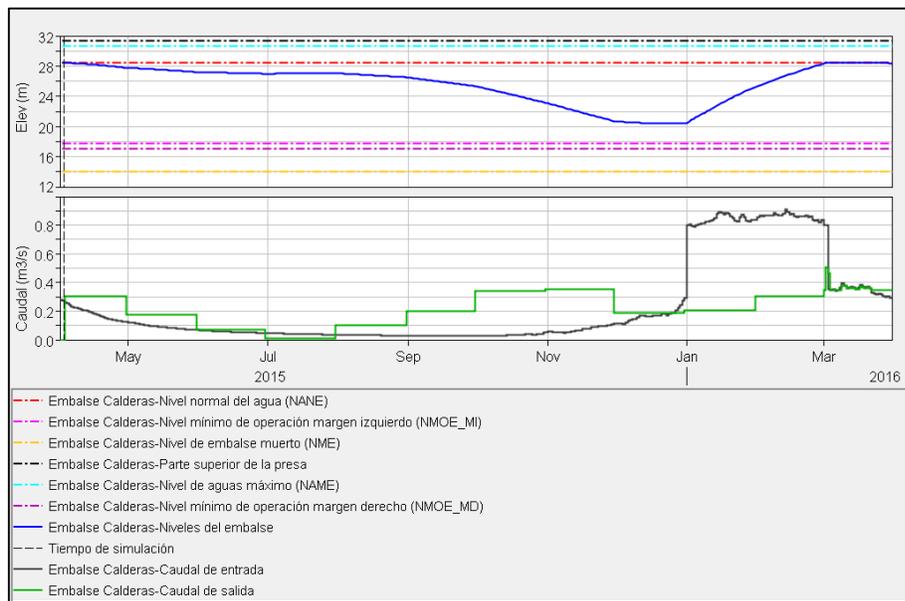


Figura 5.29 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

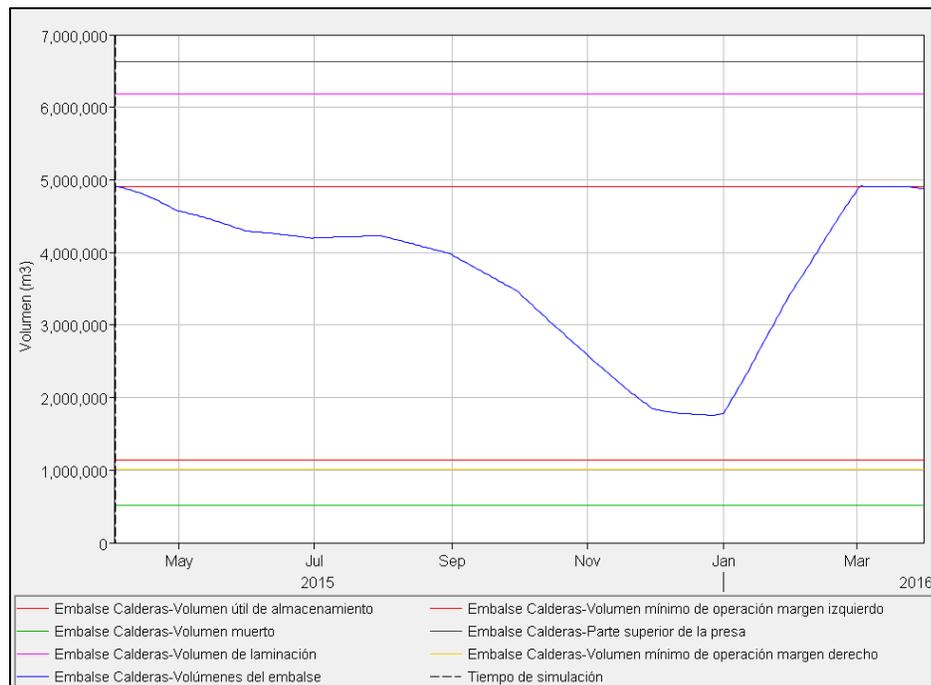


Figura 5.30 Volúmenes del embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

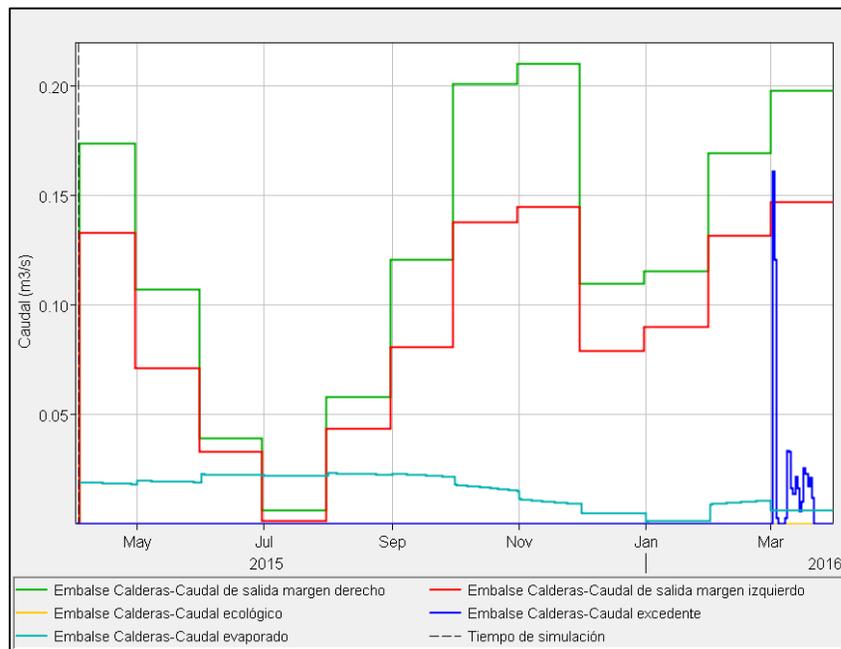


Figura 5.31 Salidas desde el embalse Calderas en año normal

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

Escenario 3 – Año Seco

En este escenario es necesario trasvasar un caudal constante de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de enero, febrero y marzo (90 días) con esto se logra que el embalse vuelva a llenarse sin producirse derrames por el vertedero de excedencias.

El nivel máximo se alcanza solo al inicio de la simulación y el requerimiento del caudal de demanda se cubre totalmente en todos los meses, alcanzando el nivel mínimo el 31 de diciembre a una altura de $18,77 \text{ m}$ donde se llegaría a utilizar un volumen $3,58 \text{ hm}^3$ el cual representa el 72% de la capacidad del embalse. La curva de almacenamiento continua dentro de los parámetros definidos de operación.

El volumen que se utiliza en este escenario aumenta en $1,61 \text{ hm}^3$ más con respecto al volumen actual que es de $1,97 \text{ hm}^3$.

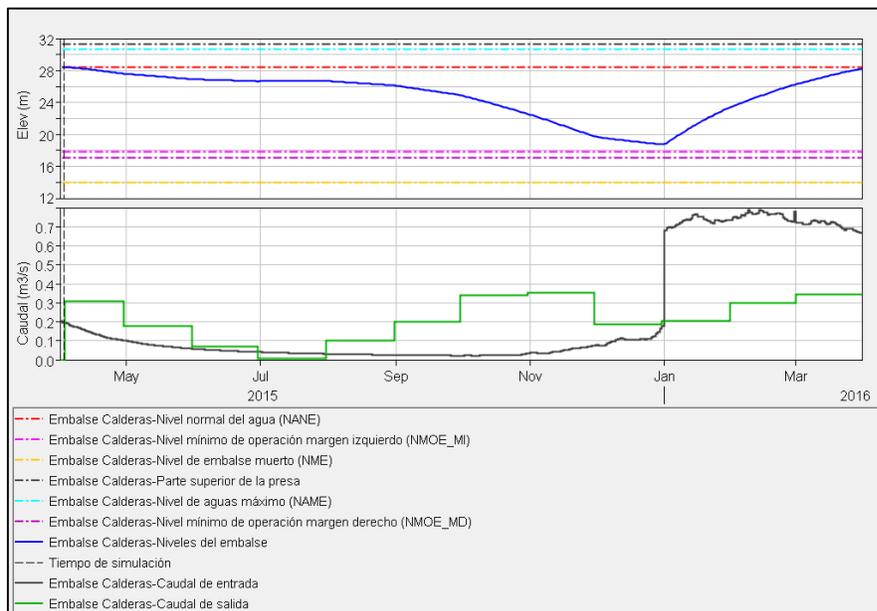


Figura 5.32 Niveles – Entradas y salidas para el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

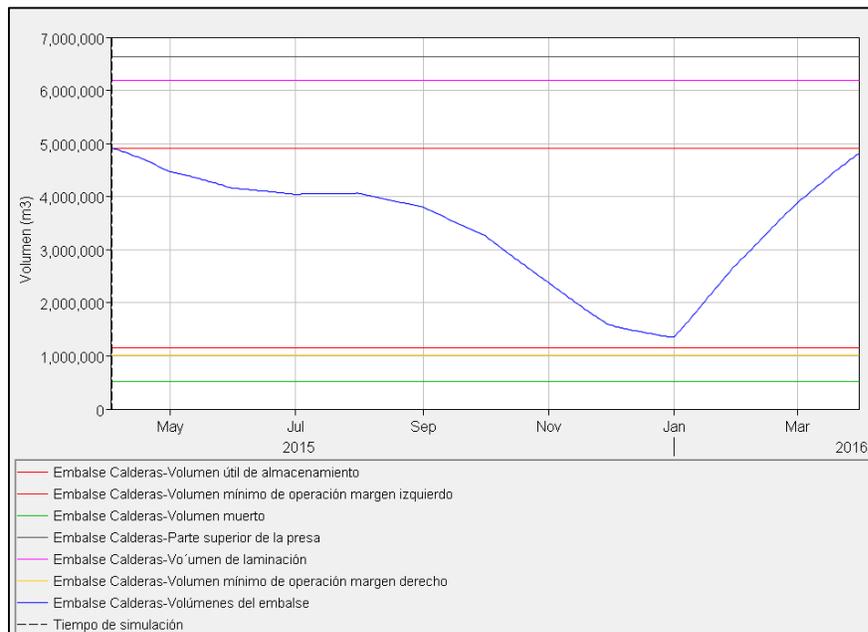


Figura 5.33 Volúmenes del embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

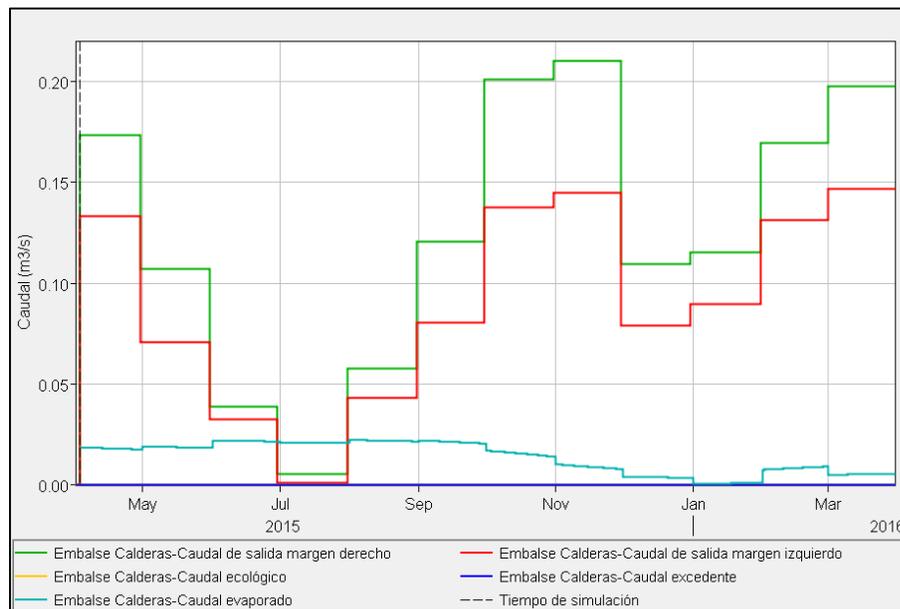


Figura 5.34 Salidas desde el embalse Calderas en año seco

Fuente: Elaboración propia en base al programa HEC-ResSim

En los tres escenarios se observa que al implementar la rotación de cultivos se puede realizar un uso eficiente del recurso hídrico de la presa sin comprometer su buen funcionamiento porque la curva de operación del embalse, en todos los escenarios analizados, se encuentra dentro de los límites permisibles de operación y además se está haciendo un buen aprovechamiento de las áreas de cultivo dando un mayor rendimiento en la producción lo que ayudaría a mejorar la economía de las comunidades beneficiarias.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se planteó realizar una rotación de cultivos en base a la cédula de cultivos actual, debido a que no se cuenta con la implementación del riego tecnificado, con la finalidad de aumentar el requerimiento del caudal de demanda, y se propuso la optimización del tiempo de transferencia del caudal de trasvase en los tres escenarios planteados con respecto a la demanda actual con el propósito de que el caudal transferido no se derrame en el tiempo de su trasvase. Al evaluar la propuesta de planificación mencionada se evidencio que esto permitirá hacer un uso eficiente del recurso hídrico de la presa Calderas.
- Se recolecto y proceso la información necesaria para aplicar el modelo WEAP y realizar el balance hídrico de las cuencas Calderas y Yesera.
- Se ha realizado una simulación hidrológica de la cuenca de aporte Calderas y de la cuenca de aporte indirecto Yesera mediante el método de Humedad del Suelo que usa el modelo hidrológico WEAP. El periodo de modelación fue desde 1980 al 2016 a un nivel diario, dando como resultado 36 años de caudales simulados los cuales sirvieron para realizar la caracterización de año húmedo, normal y seco que posteriormente se usaron para realizar la simulación del embalse Calderas bajo esas condiciones de oferta.
- La información de caudales aforados en el río Calderas era insuficiente para poder usar en la calibración de la cuenca Calderas. Por ello se crearon curvas de descarga con los datos de caudales aforados y escalas medidas en el río, y posteriormente se estimaron los caudales diarios usando los datos de escalas medias diarias, medidas en el río Calderas, mediante las ecuaciones de las curvas de descarga definidas para cada año de medición. El mismo procedimiento se realizó para obtener los caudales medios diarios en el río Yesera. Estos caudales se utilizaron para poder calibrar el modelo WEAP.

- Realizamos la calibración del modelo WEAP para la cuenca Calderas con 3 años (2004-2006) con lo que se obtuvo un coeficiente Nash de 0,51 (Satisfactorio) y un valor de sesgo de Bias igual a 20,85% (Satisfactorio).
- Realizamos la validación del modelo WEAP para la cuenca Calderas con 2 años (2007-2008) donde se obtuvo un coeficiente Nash de 0,66 (Bueno) y un valor de sesgo de Bias de 5,85 (Muy bueno).
- Realizamos la calibración del modelo WEAP para la cuenca Yesera con 2 años (2005-2006), obteniendo un coeficiente Nash de 0,70 (Bueno) y un valor de sesgo de Bias de 0,32% (Muy bueno).
- Con la validación del modelo WEAP para la cuenca Yesera con 2 años (2007-2008) se obtuvo un coeficiente Nash de 0,69 (Bueno) y un valor de sesgo de Bias de 0,95 (Muy bueno).
- La modelación hidrológica de la cuenca Calderas y Yesera, en el departamento de Tarija, mediante el uso de la herramienta de planificación integrada de recursos hídricos WEAP, aporta el conocimiento de la oferta hídrica para un periodo de simulación histórico de 1980 al 2016 que consta en 36 años.
- Realizamos la caracterización de año húmedo a una probabilidad de 75% de no ocurrencia, año normal a la probabilidad de 50% de no ocurrencia y año seco a una probabilidad de 30% con los caudales simulados para la cuenca Calderas y Yesera.
- Realizamos la simulación de la operación del embalse en el modelo HEC-ResSim con los escenarios de oferta para un año húmedo, normal y seco con respecto a los caudales de entrega para un periodo de 1 año que empieza desde el 01 de abril al 31 de marzo con la finalidad de evaluar su funcionamiento en las condiciones que se acerquen más a la realidad y poder realizar una planificación ante situaciones futuras donde se presente esas condiciones de oferta.
- Las salidas del sistema son una demanda de riego para el margen derecho e izquierdo y un caudal ecológico aguas debajo de la presa.

- El embalse Calderas recibe un caudal constante de la cuenca Yesera durante el periodo lluvioso que son los meses de enero, febrero y marzo así mismo los caudales de aporte directo de la cuenca Calderas son de mayor magnitud en ese tiempo.
- El modelo HEC-ResSim permite simular el comportamiento operacional del embalse para diferentes temporadas del año, y así poder regular el funcionamiento de todas las estructuras tanto de entradas y salidas de tal manera que permita el máximo aprovechamiento del embalse y el adecuado funcionamiento de sus componentes.
- De acuerdo al estudio Construcción obras complementarias a la presa Calderas se indica un caudal de trasvase de $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de enero, febrero y marzo para llenar el embalse, en las simulaciones se observó que en los tres escenarios planteados (año húmedo, normal y seco) se satisface la demanda de riego en un 100%, pero se producen caudales excedentes en el periodo en el que se está trasvasando caudal, de manera que se presentó para cada escenario de tiempo y demanda una alternativa para minimizar este vertido, cuidando de que el embalse vuelva a llenarse, como resultado se llegó en un caso (año húmedo) a no necesitar del aporte por el trasvase porque solo basta con el caudal de aporte directo para el llenado del embalse, para un año normal se necesita trasvasar un caudal desde el 01 de enero al 27 de enero y en un año seco desde el 01 de enero al 09 de febrero.
- El embalse puede satisfacer las demandas solicitadas actualmente y con la construcción de las obras complementarias se podrá beneficiar con riego a todas las comunidades beneficiarias y así se podrá mitigar el problema de falta de agua para el riego que reportaron algunos comunarios.
- El volumen utilizado no pasa el 50% de la capacidad del embalse, para ello se evaluó el funcionamiento del embalse al aumentar la demanda con la implementación de la rotación de cultivos. En el escenario de año húmedo el volumen utilizado aumenta a un 55% de la capacidad del embalse, en un año

normal el volumen aumenta a un 65% de la capacidad del embalse y en un año seco a un 72% de la capacidad del mismo.

- Si se dispone de todos los datos requeridos por el modelo HEC-ResSim este programa resulta como una excelente herramienta para simular el comportamiento de embalses. Si se tiene definida la funcionalidad de un embalse o en su lugar un sistema de embalses, el programa permite conocer la operación del mismo de acuerdo a las restricciones que se impongan en la liberación de agua tanto a nivel horario como diario, y de esta manera a través del mismo optimizar el recurso hídrico.

Recomendaciones

- Es necesario que el Servicio de Gestión Integral del Agua (SEDEGIA) realice un monitoreo continuo de la presa Calderas, registrando diariamente aforos de los cursos de agua del río Calderas y Yesera, canal de trasvase y demandas del margen izquierdo y derecho, porque esta información es indispensable a la hora de tomar decisiones para una óptima planificación de los recursos hídricos de la presa.
- En cuanto al modelo WEAP, antes de utilizar las grillas climáticas GMET (precipitación y temperatura) en un estudio sea cual sea su fin, se debe revisar que las estaciones tierra cercanas o dentro del área de estudio hayan sido consideradas para la elaboración de la grilla, debido a que las grillas solo tienen un buen desempeño en lugares en donde se encuentran ubicadas estaciones que fueron consideradas para la elaboración de la misma.
- Al momento de comenzar cualquier tarea de modelación hidrológica se requiere recopilar toda la información disponible para construir la relación que mejor represente lo que efectivamente está sucediendo en la cuenca definida. Sin embargo, existe una limitante, no se tiene una cobertura de estaciones meteorológicas apropiadas en nuestro departamento.

- Es preciso actualizar los mapas de uso de suelo y vegetación porque al contar con esta información actualizada se podrá obtener una mejor representación del comportamiento hidrológico de las cuencas.
- En el presente estudio se tuvo limitantes en cuanto a la información climática e hidrológica, debido a la escasa información con la que se cuenta actualmente en la zona de estudio. Hasta la fecha no se cuenta con información actual de caudales en los ríos Calderas y Yesera es por ello que se vio la necesidad de utilizar la serie de caudales medios mensuales de 2002 al 2008 proporcionados por el SENAMHI, los cuales fueron utilizados para realizar la estimación de caudales medios diarios mediante las curvas de descarga porque se contaba con datos de escalas medias diarias en este periodo de medición. Esta serie generada se utilizó para calibrar el modelo WEAP donde se logró llegar a un Nash y Bias Satisfactorio en la calibración y bueno en la validación. El coeficiente Bias resulto ser positivo para ambas cuencas, lo cual nos indica una sobre estimación de los caudales. Es por ello que se exhorta a mejorar la calidad de información hidrológica y climática en la zona de estudio porque al corregir este déficit de información se podrá obtener una mejor estimación de la oferta hídrica de las cuencas.
- El nivel de ingreso de datos en el programa HEC-ResSim es muy completo y para una buena simulación se necesita el ingreso de varios parámetros que deben estar definidos de manera adecuada para que el programa sea aplicado correctamente.
- Medir la evaporación generada en el embalse Calderas para poder estimar el volumen de evaporación que se produce en el mismo y realizar un estudio geológico detallado del embalse que proporcione los elementos necesarios para realizar la estimación del volumen infiltrado, porque al contar con estos datos se puede obtener una simulación del comportamiento del embalse más preciso.
- Actualizar el presente estudio tomando en cuenta las perdidas por infiltración y caudales diarios de demanda debido a que en la realidad estos caudales varían

de acuerdo al requerimiento de los usuarios día tras día, esto permitirá una evaluación más cercana a la realidad.