



BID

Mejorando vidas

RESERVAS POTENCIALES DE AGUA COMO INSTRUMENTOS DE ADAPTACIÓN BASADOS EN LOS ECOSISTEMAS

CAMBIO CLIMÁTICO Y SUSTENTABILIDAD (CCS/CME) -
AGUA Y SANEAMIENTO (ASA/CME)

CONTENIDO

| | |
|---|------------|
| 1. Introducción y antecedentes | 3 |
| 2. Construcción, calibración y validación de modelos WEAP para las siete cuencas piloto y sus regiones hidrográficas | 5 |
| 2.1. Método General | 5 |
| 2.1.1. El modelo WEAP | 5 |
| 2.1.2. Delimitación de Cuencas | 5 |
| 2.1.3. Datos Climáticos | 7 |
| 2.1.4. Datos de Uso de Suelo | 7 |
| 2.1.5. Infraestructura | 8 |
| 2.1.6. Demanda de Agua | 9 |
| 2.1.7. Red de ríos | 10 |
| 2.1.8. Calibración del Modelo | 11 |
| 2.2. Resultados y discusión para las diferentes regiones hidrográficas | 18 |
| 2.2.1. Región hidrográfica Soto La Marina | 18 |
| 2.2.2. Región hidrográfica San Lucas | 33 |
| 2.2.3. Región hidrográfica Presidio San Pedro | 39 |
| 2.2.4. Región hidrográfica Coatzacoalcos | 53 |
| 2.2.5. Región hidrográfica Tehuantepec | 64 |
| 2.2.6. Región hidrográfica Casas Grandes | 72 |
| 3. Elaboración del sistema ‘prueba de estrés’ | 86 |
| 3.1. Metodología | 86 |
| 3.1.1. Desarrollo de los escenarios de decisión | 86 |
| 3.1.2. Modelación del Cambio Climático | 86 |
| 3.1.3. Modelación Hidrológica | 89 |
| 3.1.4. Definición de los indicadores de desempeño | 102 |
| 3.2. Resultados y discusión de la prueba de estrés | 102 |
| 4. Conclusión y Recomendaciones | 111 |
| 5. Referencias | 112 |
| 6. Anexo | 114 |
| 6.1 Anexo 1: Resultados de Caudal ecológico / Reservas de agua | 114 |
| 6.2 Anexo 2: Asignación de Agua en WEAP para cada modelo | 121 |
| 6.3 Anexo 3: Análisis de Metas por Región Hidrológica para la simulación en simgen (CC:50%) | 126 |
| 6.4 Anexo 4: Cambio fraccional en precipitación regional por grado de calentamiento global, para cada modelo (entrada a Simgen) | 126 |
| 6.5 Anexo 5: Comparación de la predicción del modelo del volumen anual con los valores observados | 127 |
| 6.6 Anexo 6: Detalle de embalses por región hidrológica | 130 |
| 6.7 Anexo 7: El resumen de las llamadas en conferencia del proyecto | 135 |

Cómo citar este documento:

Rojas P., Kuijk, F., y Verbist K, 2018. *Reservas Potenciales de Agua como Instrumentos de Adaptación Basados en los Ecosistemas*. Cambio Climático y Sustentabilidad (CCS/CME) – Agua y Saneamiento (ASA/CME), CAZALAC. Reporte de la cooperación técnica ATN/OC-15163-ME, Banco Interamericano de Desarrollo – World Wildlife Fund, México.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El Programa Nacional de Reservas de Agua (PNRA) es una iniciativa del gobierno y la sociedad civil para asignar agua al medio ambiente y forma parte del Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018, el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 y el Programa Especial de Cambio Climático. El PNRA tiene como propósito establecer reservas de agua en 356 cuencas del país para el 2018. Durante la primera fase (2012-2014), el programa mostró el beneficio de tener un volumen conjunto propuesto de reservas para el ambiente de 48.7 km³, que conectan 4,552 km de canales principales en un área de 92.000 km² e interactúan con 31 acuíferos, 17 ANPs y 13 humedales de importancia internacional (sitios Ramsar). A la fecha, el PNRA ha desarrollado 8 proyectos de reservas de agua que abarcan 54 cuencas hidrológicas.

En términos de protección del medio ambiente, las reservas de agua buscan establecer un fundamento legal para asegurar el respeto al caudal ecológico en cuencas seleccionadas que cuentan con una alta biodiversidad terrestre y de agua dulce, así como una baja presión en la demanda de agua. Son cuencas donde en la actualidad hay presencia de caudales ecológicos que proporcionan diversos servicios ecosistémicos tales como la provisión de agua a comunidades rurales y la protección contra eventos extremos, entre muchos otros.

Dada la tendencia de crecimiento económico del país, se espera que en varias de las cuencas del PNRA, se incremente la demanda de concesiones para el uso de agua en el futuro próximo, poniendo en riesgo los caudales ecológicos y la provisión de los servicios ecosistémicos asociados. En este sentido, el nivel de reservas de agua para uso ambiental representa un instrumento preventivo contra el uso no sostenible del agua superficial en el país. El cambio climático es ya una de las amenazas más importantes para los sistemas humanos y naturales. Algunos de los eventos que han sido observados en México asociados con este fenómeno incluyen la presencia de ciclones tropicales más intensos; sequías más fuertes y prolongadas, así como cambios en el régimen de precipitación.

Diversos estudios teóricos y prácticos han demostrado que la salud de un ecosistema es un elemento clave para la resiliencia climática, tal como afirma Abramovitz y otros (2002), Folke y otros (2004) y Munang y otros (2013), por citar solo algunos. En particular, la salud de los ríos y los ecosistemas riparios son de especial importancia para amortiguar los impactos negativos ocasionados por eventos hidrometeorológicos extremos, como las inundaciones y los deslaves, a la vez que impactan de forma positiva en la cantidad y calidad de agua disponible para el consumo humano durante periodos de escasez. En este sentido, es de esperarse que la protección e implementación jurídica del caudal ecológico adquiera un papel importante como instrumento de adaptación basado en los ecosistemas.

En el marco del proyecto ME-T1252, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) apoya a la Comisión Nacional del Agua, con el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) como agencia ejecutora, para continuar la implementación del PNRA y fortalecer su contribución como una estrategia de adaptación basada en los ecosistemas que reduzca la vulnerabilidad de la sociedad y de los ecosistemas a nivel nacional.

En este análisis, se seleccionaron siete cuencas piloto como casos de estudio, identificándose las vulnerabilidades en la asignación de los recursos hídricos a nivel de cuenca y considerando diversos impulsores de cambio, incluyendo el cambio climático, e impulsores no físicos, tales como el crecimiento demográfico, el incremento en las demandas de agua y los cambios en uso de suelo, entre otros. Se adoptó un enfoque de abajo hacia arriba, identificando los procesos hidrológicos actuales y analizando su vulnerabilidad bajo escenarios futuros.

En una fase previa del proyecto, 7 cuencas piloto fueron seleccionadas que en conjunto representan lo mejor de diversidad geográfica y regímenes hidroclimáticos en México. La selección se hizo a partir de las 750 cuencas hidrológicas del territorio nacional. El proceso de selección se basó en el análisis de descarga en cada una de las estaciones hidrométricas sobre los ríos, la disponibilidad y calidad de datos, las tendencias mostradas en las series temporales y la caracterización tanto de los estresores hidroclimáticos como antropogénicos. Las resultantes siete cuencas piloto se muestran en la siguiente tabla y de forma espacial en el mapa de la Figura 1.

| No | Drainage Area | North / South | Type of Current | Basin Name | Period of data | Gaps in data | Possible period to be used for calibration/validation | Population 2015 | Ramsar Site | Demand | National Protected Area (Pres ANP) | National Water Reserves Program |
|----|---------------|---------------|-----------------|-------------------------|------------------|---|---|-----------------|-------------|------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Pacific | North | Perennial | Rio San Pedro-Mezquitál | 1/1944 - 12/2011 | - | 1/1944 - 12/2011 | 162,584 | Yes | 2489.39525 | Yes | Yes |
| 2 | Pacific | North | Ephemeral | San Lucas + | P-R Model | - | 1/1994 - 12/2011 | 71,742 | Yes | 2.480432 | Yes | Yes |
| 3 | Pacific | South | Intermittent | Rio Zanatepec | 1/1954 - 12/2011 | 9/1988; 1/1993 - 6/1993; 1/1994 - 12/1994; 1/2006 - 5/2008; | 1/1954 - 12/1985 | 27,886 | No | 0.131994 | No | No |
| 4 | Atlantic | North | Intermittent | Rio Purificación 2 | 1/1972 - 12/2001 | 11/2001 - 12/2001 | 1/1972 - 12/ 2001 | 335,415 | No | 421.047308 | No | No |
| 5 | Atlantic | North | Ephemeral | Rio Corona | 6/1962 - 12/2011 | 1/2001 - 12/2002 | 6/1962 - 12/2011 | 349,485 | No | 208.45786 | No | No |
| 6 | Atlantic | South | Perennial | Alto Rio Coatzacoalcos | 3/1953 - 12/2011 | 1/1974 - 12/1974; 1/1977 - 12/1977; 1/1979 - 12/1980; 10/1984; 11/1985 - 2/1987; 9/1990; 12/1990; | 3/1953 - 12/2011 | 362,087 | No | 123.847979 | No | Si |
| 7 | Endorheic | North | Ephemeral | Rio Casas Grandes | 1/1942 - 12/1994 | 3/1988 - 5/1989; 10/1989 - 12/1994 | 1/1942 - 12/1987 | 104,004 | Yes | 4.020109 | No | Yes |

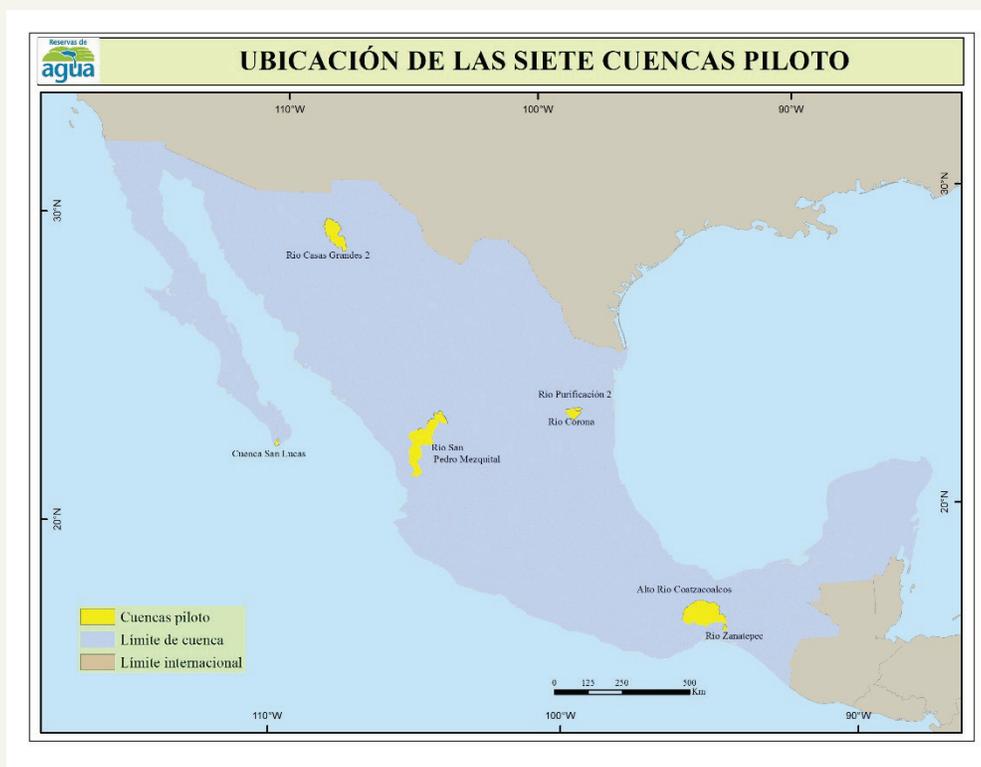


Figura 1. Descripción de las siete cuencas piloto

En el presente reporte, se desarrolla un modelo de sistema de cuencas para cada una de las regiones hidrográficas a las que pertenecen las cuencas piloto y se elabora una prueba de estrés para cada cuenca piloto, incluyendo escenarios de decisión e indicadores de desempeño, para evaluar las vulnerabilidades debido a la asignación de recursos hídricos y reservas de agua en cada cuenca, tanto en la actualidad como bajo escenarios futuros.

2. CONSTRUCCIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS WEAP PARA LAS SIETE CUENCAS PILOTO Y SUS REGIONES HIDROGRÁFICAS

El objetivo de esta sección es modelar cada región hidrográfica de cada cuenca piloto, previamente identificadas (figura 1), para crear un comportamiento hidrológico representativo que pueda ser utilizado para simular diversos escenarios y evaluar los resultados en términos del cumplimiento del caudal ecológico. El modelo “Sistema de Evaluación y Planeación de Agua” (WEAP, acrónimo en inglés de Water Evaluation And Planning) fue utilizado para establecer simulaciones realistas de descarga en cada nodo de las cuencas.

2.1. Método General

2.1.1. El modelo WEAP

El modelo desarrollado para desempeñar las simulaciones del comportamiento hidrológico en las cuencas seleccionadas utiliza el software Sistema de Evaluación y Planeación de Agua (WEAP) desarrollado por el SEI (Stockholm Environment Institute). WEAP es una herramienta de software para la planeación integrada de recursos hídricos con capacidad para simular procesos en cuencas –tales como evapotranspiración, escurrimientos e infiltración– como un modelo dinámico integrado de precipitación-escurrimiento que incluye varios componentes del ciclo hidrológico. También tiene la capacidad de evaluar un amplio rango de prácticas de intervención de manejo, tomando en cuenta múltiples usos, eficiencias de conducción, prioridades en el suministro de agua y caudales ecológicos.

WEAP opera sobre el principio básico de un equilibrio hídrico y puede aplicarse a sistemas urbanos y agrícolas, en una sola cuenca o en sistemas complejos de cuencas fluviales transfronterizas. Adicionalmente, WEAP puede simular un amplio rango de componentes naturales y de ingeniería en estos sistemas, incluyendo escurrimiento de precipitaciones, caudal base y recarga subterránea debido a la precipitación; análisis de demandas sectoriales; conservación de agua; derechos de aguas y prioridades de asignación, operación de embalses; generación de energía hidráulica; rastreo de contaminantes y calidad del agua; evaluaciones de vulnerabilidad; y requerimientos del ecosistema. Un módulo de análisis financiero también permite al usuario analizar análisis costo-beneficio comparativos para los proyectos (Stockholm Environment Institute, 2007).

El modelo representa el sistema en términos de sus varias fuentes de suministro (por ejemplo, ríos, arroyos, agua subterránea, embalses y plantas de desalinización); instalaciones de extracción, transmisión y tratamiento de aguas residuales; demandas hídricas; generación de contaminantes; y requerimientos del ecosistema. La estructura de datos y nivel de detalle puede personalizarse con facilidad para cumplir con los requerimientos y disponibilidad de datos para un sistema particular y su análisis.

Para la presente aplicación, se desarrollaron modelos independientes para cada cuenca de estudio. Éstos Incluyen la delimitación de las áreas homogéneas o ‘cuencas WEAP’; especificación de datos climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad de viento); representación de infraestructura (embalses y estaciones hidrométricas) y finalmente; la caracterización de los diversos usos del agua, usos de suelo y diferenciación de vegetación, delimitando la red hidrológica.

Enseguida, los modelos se calibraron y validaron utilizando series temporales de descarga para evaluar las hidrográficas simuladas. El periodo temporal de referencia considerado en los modelos es 1980-2010, ya que esta es la Norma Meteorológica Estándar oficial actual conforme a la Organización Meteorológica Mundial (OMM) con el objetivo específico del monitoreo a largo plazo del cambio climático. El propósito es evaluar los resultados de diversos escenarios de cambio climático en comparación con el comportamiento hidrológico en este periodo de referencia.

2.1.2. Delimitación de Cuencas

Los lineamientos de WEAP recomiendan, de acuerdo con Escobar y Vicuña (2009), intersectar una clasificación DEM (acrónimo en inglés de Digital Elevation Model) con polígonos subcuenca, creados por puntos de interés, para establecer zonas delimitadas o ‘cuencas WEAP’ dentro del proceso de modelación de WEAP. Estos puntos

de interés son usualmente los datos de infraestructura (embalses y estaciones hidrométricas) para asegurar que existan suficientes datos de calibración para cada cuenca WEAP. Sin embargo, esto resultó en algunas unidades difíciles de manejar; por ejemplo, en el caso de la región hidrográfica Soto La Marina, en la Figura 2, se generaron una alta cantidad de cuencas ya que existen múltiples estaciones de medición a cortas distancias.

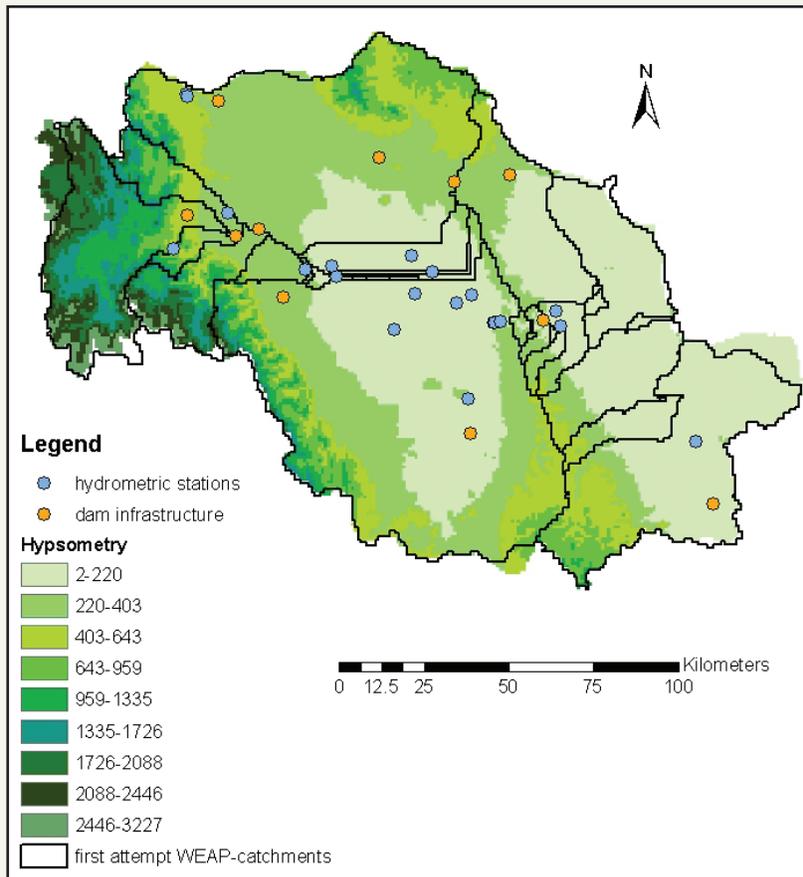


Figura 2. Primer intento de delimitación de cuencas WEAP conforme a los lineamientos WEAP, generando pequeñas subcuencas que no ofrecen un significado físico (líneas negras)

Las cuencas WEAP son utilizadas como zonas homogéneas con los mismos datos climatológicos para la construcción del modelo, así que lo más importante es que su comportamiento de precipitación y temperatura sea uniforme.

Suponiendo que la precipitación se incremente con la altitud en las áreas de cadenas montañosas predominantes, para construir las cuencas WEAP se utiliza una subdivisión de las cuencas oficiales con base en una clasificación hipsométrica. En sistemas geográficos más complejos, se utilizan clasificaciones similares de isoyetas climatológicas para subdividir las cuencas oficiales.

La hipsometría se obtuvo del Modelo de Elevación Digital de México del SRTM30 (espaciados de manera regular a 30 segundos de arco; aproximadamente 1km). Las Isoyetas se obtuvieron de los datos de la malla de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM), considerando la climatología de precipitación anual acumulada calculada sobre el periodo (1980-2008). Cada cuenca está caracterizada en WEAP y representa su área (en hectáreas), especificada en WEAP.

2.1.3. Datos Climáticos

El propósito de la modelación WEAP es encontrar datos representativos del clima y uso del suelo para cada una de las cuencas definidas en el apartado anterior. En el caso de los datos climáticos, si no hay estaciones de medición disponibles para una cuenca específica, se utilizaron las series históricas temporales de una estación próxima con condiciones similares (mismo rango de elevación), con suficientes años de mediciones dentro del periodo de referencia (1981-2010). Se asumió la condición de por lo menos 20 años de datos efectivos, para este periodo de 30 años, para seleccionar si las series históricas temporales de las estaciones meteorológicas son aptas para introducirse en el modelo.

Por lo tanto, para cada cuenca WEAP se seleccionó una estación representativa en relación a la serie temporal de precipitación y temperatura. Esto se hace utilizando una secuencia de comandos en el software de programación “R”, descargando la serie temporal de cada estación de medición potencial de la Biblioteca de Datos Climáticos (<http://www.climatedatalibrary.cl/SOURCES/.Mexico/.Meteorological/>) que contiene series temporales diarias de precipitación y temperaturas mínimas y máximas de la Base de Datos Climatológica Nacional CLICOM de CONAGUA. Los datos mensuales se conforman a partir de la suma de precipitación diaria y el promedio de los valores diarios mínimos y máximos de temperatura. La Biblioteca de Datos Climáticos brinda la posibilidad de automatizar el proceso de descarga de los datos deseados. La secuencia de comandos “R” elimina las estaciones que no cumplen con los requisitos mencionados arriba y elige para cada cuenca WEAP aquella estación con el menor número de huecos en los datos dentro del periodo 1981-2010.

Enseguida, se realizó un proceso de llenado de los huecos utilizando la función `mice` del paquete ‘`mice`’ (Buuren y Groothuis-Oudshoorn, 2011). Esta función atribuye a cada valor faltante un valor plausible (simula un valor para llenar el valor ausente) hasta que todos los valores faltantes han sido atribuidos y el conjunto de datos está completo. La simulación utiliza una estructura de correlación de los datos y atribuye valores faltantes para cada variable incompleta m veces por regresión de variables incompletas sobre las otras variables de forma iterativa. Si no hay resultado de la iteración, se utiliza la función `kNN` del paquete `VIM` (Templ et al., 2013), la cual atribuye valores conforme al método k-Vecinos Más Cercanos (Nearest Neighbor).

Los datos de humedad relativa se obtuvieron de NOAA NCEP EMC NARR datos de tres horas NARR-A Relative_humidity 2m asl (disponible en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/>) y se convierten a promedios mensuales y promedios espaciales sobre las cuencas WEAP específicas utilizando lenguaje de programación R. Se considera que la modelación resultante tiene una baja sensibilidad ante cambios en el parámetro de entrada de la humedad relativa (Amato et al., 2006).

Debido a la dificultad para medir la velocidad de viento y la falta de registros o de un conjunto de datos satelitales validados (como el NARR-A de NOAA NCEP EMC), esta variable se mantiene constante a 2m/s a una altitud de 2m sobre el nivel del suelo. Similar al parámetro de humedad relativa, la velocidad del viento solo afecta un poco al modelo en comparación con los otros parámetros y variables de entrada, de acuerdo con Jantzen y otros (2006).

2.1.4. Datos de Uso de Suelo

Para caracterizar los diferentes tipos de uso de suelo, se utilizó la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Serie V. En los modelos, el uso de suelo se considera como invariable en el tiempo. Sin embargo, INEGI proporciona datos de uso de suelo de diferentes años. Los años relevantes para la modelación son 1985, 1993, 2002 y 2007. Sin embargo, se utilizan diferentes clasificaciones a lo largo del tiempo y los primeros mapas de uso de suelo (1985) son menos detallados, lo cual puede distorsionar los resultados. Además, una prueba realizada para la región hidrográfica de Tehuantepec con los cambios en simulaciones de descarga, comparando el modelo con y sin datos variables en el tiempo de uso de suelo, resultó ser no significativa. Por lo tanto, solo los datos de uso de suelo de la Serie V se han introducido en el modelo y considerados como invariables a lo largo del tiempo. Las diversas entidades, caracterizadas en los shapefile de la serie V, se presentan en la Tabla 1. El objetivo fue encontrar valores plausibles para los diferentes parámetros requeridos en el método de humedad del suelo de WEAP para cada entidad.

Tabla 1 Diferentes Entidades - clasificación de uso de suelo y vegetación.

| | |
|---------------------------|------------------------------------|
| Área agrícola | Otros tipos de vegetación-pastizal |
| Área agrícola-pastizal | País extranjero |
| Área agrícola-selva | Pastizal |
| Área sin vegetación | Pastizal-área agrícola |
| Área urbana | Pastizal-selva |
| Bosque | Selva |
| Cuerpo de agua | Selva-área agrícola |
| Matorral | Selva-pastizal |
| Otros tipos de vegetación | |

En WEAP, cada cuenca se subdivide en las diferentes entidades conforme a este mapa de uso de suelo. Un porcentaje del área total de toda la cuenca se atribuye a cada subdivisión de uso de suelo. Se asigna a estas subdivisiones la anotación de la cuenca más las primeras tres letras de la entidad; por ejemplo 'Blanco_2000_AGR' indica el tipo de uso de suelo agrícola en la cuenca 'Blanco_2000'.

2.1.5. Infraestructura

El almacenaje en embalses se encuentra en general en el modelo WEAP dividido en cuatro zonas o estanques (Figura 3). Éstas incluyen de arriba abajo, la zona de control de inundaciones, zona de conservación, zona de amortiguamiento y zona inactiva. Las zonas de conservación y amortiguamiento, juntas, constituyen el almacenaje activo del embalse. WEAP asegura que la zona de control de inundaciones siempre se mantenga vacante, por ejemplo, el volumen de agua en el embalse no puede exceder la superficie de la zona de conservación (Stockholm Environment Institute, 2007).

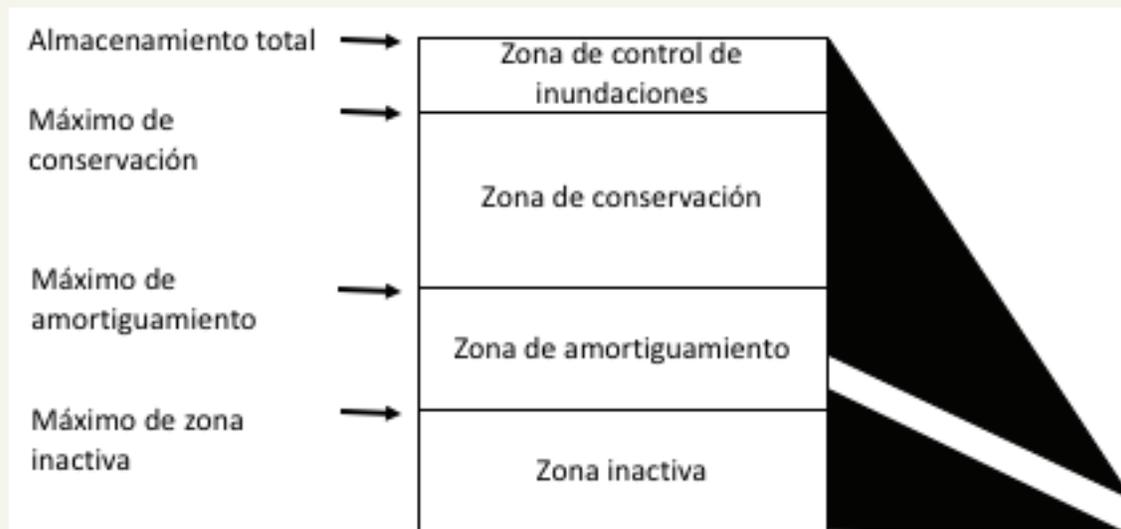


Figura 3. Los cuatro niveles característicos de un embalse en el modelo WEAP (Stockholm Environment Institute, 2007).

La información proporcionada de las grandes presas mexicanas (shapefile 'grandes_presas') contiene información sobre la capacidad de Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) expresada en hm^3 e igual a la capacidad de almacenaje, la cual es una variable de entrada crucial para WEAP. La elaboración de la curva de elevación de volumen es otro requerimiento para WEAP, cuando se trata de embalses, con el fin de calcular la cantidad de evaporación y/o la cantidad de producción de energía hidráulica. Esta curva se elabora con base en una serie de puntos (elevación (m) vs. volumen (hm^3)), los cuales son interpolados por WEAP. Sin embargo, esta información se proporcionó solo para el 38,5% de los embalses presentes en las cuencas piloto.

Para los embalses restantes, se asumieron y elaboraron curvas lineales, con base en la altura de su ubicación y NAMO particular. Un ejemplo de la elaboración de la curva de elevación de volumen en WEAP para un caso de estudio específico en Portugal (Kenov y Ramos, 2012) se muestra en la Figura 4.

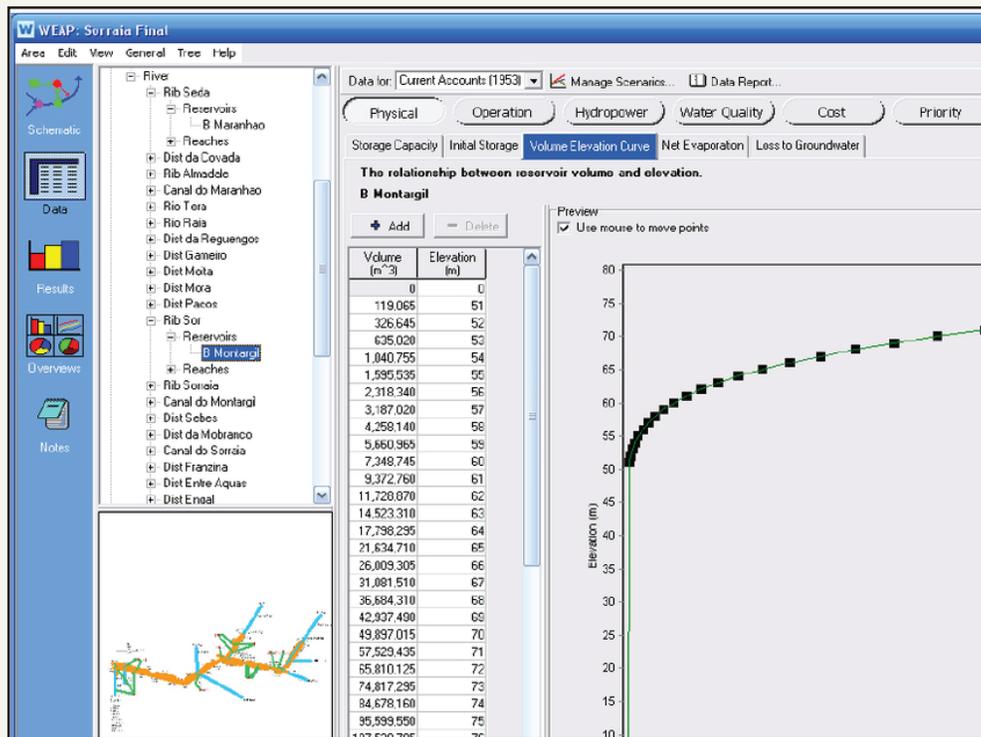


Figura 4 Hoja de captura de datos físicos Montargil: Curva Volumen-Elevación (Kenov y Ramos, 2012)

Las series temporales de los volúmenes almacenados para algunos embalses se encuentran en línea publicadas por CONAGUA (ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Presas/) y se incorporan a los modelos. Para los embalses restantes, los datos faltantes pueden influir sobre la bondad de ajuste de la calibración de los modelos.

Las estaciones hidrométricas son de gran importancia en la modelación WEAP, ya que determinan la precisión de la delimitación de la cuenca WEAP, y las series temporales de las medidas de descarga la calibración del modelo mismo. Los metadatos de estas estaciones son derivados de la tabla de atributos del shapefile 'estaciones_hidro' y las series temporales de descarga fueron proporcionadas por CONAGUA (ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas/), excepto los datos de descarga en la cuenca San Lucas, donde no hay estaciones hidrométricas disponibles. En este último caso, los datos fueron proporcionados por WWF-México, correspondiendo a una descarga simulada.

Se hicieron los siguientes supuestos para la modelación WEAP, relacionadas con las estaciones hidrométricas:

- Las estaciones de descarga de canales (irrigación) no fueron consideradas
- Como un medio de control de calidad de los datos de descarga, se eliminaron las medidas que indican un índice de caudal de cero cuando se observó una alta precipitación en dicho mes, y que de otro modo crearía inundaciones significativas o descargas altas. Esta situación surge del hecho de que la información del caudal mensual provino de un promedio de información diaria incompleta y por lo tanto pudo producir promedios mensuales incorrectos al faltar una gran cantidad de valores diarios.

2.1.6. Demanda de Agua

Los datos de demanda de agua se obtuvieron del registro nacional de títulos de agua de caudales de agua superficiales (31/12/2016). Asumimos que estos derechos de agua representan el consumo de agua real en las regiones

hidrográficas especificadas. No se considera el uso de agua subterránea ya que ésta no se toma en cuenta en la parte de la modelación. Se hace la siguiente subdivisión de tipos de usos de agua (Tabla 2).

Tabla 1. Caracterización de las cuencas piloto seleccionadas

| TIPO DE DEMANDA | PRIORIDAD |
|------------------------|-----------|
| DOMÉSTICO | 1 |
| PÚBLICO URBANO | 1 |
| GANADERÍA | 2 |
| AGRICULTURA | 3 |
| ACUACULTURA | 4 |
| ENERGÍA HIDROELÉCTRICA | 5 |
| INDUSTRIAL | 6 |
| SERVICIOS | 7 |
| MÚLTIPLE | 8 |

Para simplificar los usos de agua y el proceso de elaboración del modelo, se tomó la suma de los diferentes usos de agua del mismo tipo de uso de agua en la misma cuenca WEAP. Estos usos o demandas de agua se posicionan en la ubicación de los derechos de agua con el volumen más alto de extracción por año de la cuenca WEAP particular. Este cálculo se realiza con una secuencia de comandos en R. Se unen los usos de agua doméstico y público urbano para evitar un conteo doble. La asignación de este uso de agua de la ‘población’ en WEAP se realiza por medio de la caracterización de la cifra de población en 2015 y el índice de crecimiento demográfico (para extrapolar su cifra en el tiempo) por cuenca oficial. Un uso de agua doméstico de 155 litros de agua por día por persona, de conformidad con la OMS (Howard et al., 2003).

Se considera el suministro específico de agua por uso como el proveniente del caudal de agua superficial más próximo. En el caso de un embalse cercano, el uso específico de esta agua almacenada se verifica en los metadatos de los embalses como posiblemente atribuido a una posición de uso de agua. Debido a que estas son suposiciones o simplificaciones del vínculo real entre el suministro de agua y su demanda, no se considera en los resultados la modelación del caudal en partes específicas de la red de ríos.

El vínculo de transmisión entre el suministro de agua (río o embalse) y la demanda de agua es unidireccional, así que no se toman en consideración caudales de retorno. Además, se asume que las eficiencias de conducción son de 100%, así que fugas u otras pérdidas de agua no son consideradas.

En relación con las prioridades de suministro de los diferentes usos de agua: las prioridades se asignan conforme a la ley nacional de aguas, presentada en la tabla 2. El Anexo 2 muestra los sitios de demanda de agua tal como son utilizados en los modelos WEAP.

2.1.7. Red de ríos

El trazado del diagrama de la red de ríos en WEAP se elabora, utilizando los shapefiles ‘ríos_libres’ y ‘ríos_represados’ proporcionados por WWF, considerando los ríos principales y sus afluentes principales. En caso de ambigüedad o conflicto, por ejemplo si los elementos de infraestructura hídrica no están situados en esta red de ríos, se utiliza el shapefile ‘ríos_hydrosh_15s’ más detallado.

2.1.8. Calibración del Modelo

2.1.8.1. Los parámetros

Para fines de la modelación hidrológica en WEAP, puede utilizarse el método de humedad del suelo, el cual se basa en funciones empíricas que describen el comportamiento de la evapotranspiración, escurrimiento superficial, interflujo, caudal base y percolación profunda para una vertiente o grupo de cuencas interconectadas (Stockholm Environment Institute, 2007). El modelo considera el movimiento de agua a través de dos capas de suelo, como se presenta en la figura 5 (Ingol-Blanco y McKinney, 2009). La primera capa representa el agua retenida cerca de la superficie, la cual está disponible para las raíces de las plantas; la segunda capa es más profunda y el agua de ésta puede transmitirse como un caudal base o recarga de agua subterránea. Los parámetros de este modelo incluyen la capacidad de retención de agua de las capas, así como el movimiento del agua entre éstas. En una cuenca subdividida en un número de subcuencas con diferente uso de suelo fraccionado o áreas de tipo de suelo, la expresión matemática utilizada en este modelo es la siguiente (Yates et al., 2006):

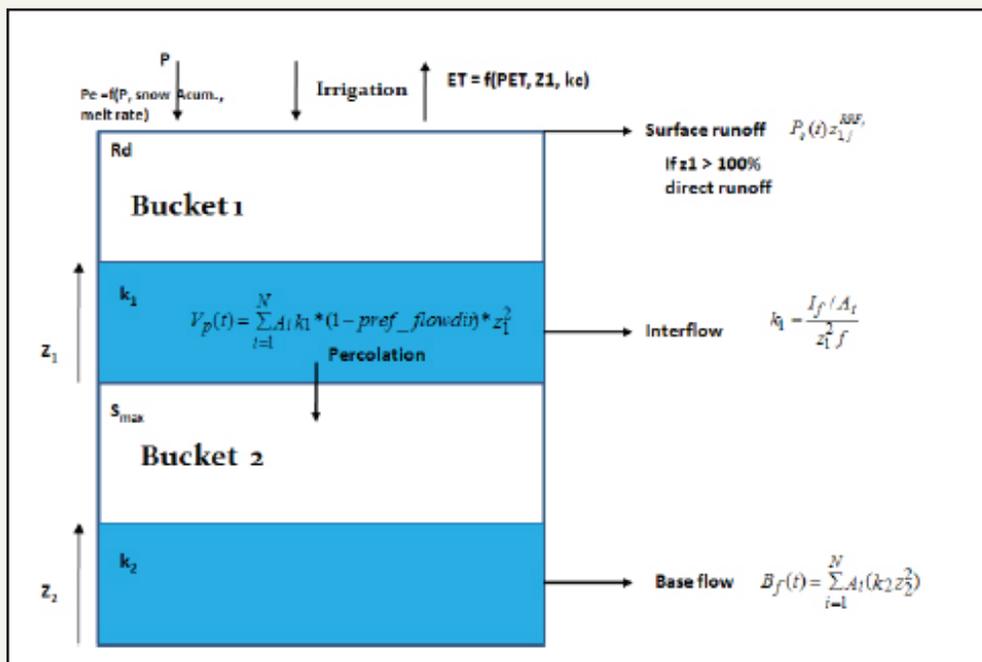


Figura 5. Sistematización de la hidrología de dos baldes en el modelo del método de humedad del suelo en WEAP (Yates et al., 2006).

Con los siguientes parámetros:

| | | | |
|--------------------|---|-------------------------|--|
| $z_{1j} \in [0,1]$ | relative soil water storage, a fraction of the total effective water storage in the root zone layer in area j [dimensionless]; | $P_s(t) z_{1j}^{RRF_j}$ | is the surface runoff |
| R_{d_j} | soil water holding capacity of area j [mm]; | $f_j k_{z,j} z_{1j}^2$ | interflow from the first soil layer for area j |
| P_e | effective precipitation [mm]; | f_j | partitioning coefficient related to the land cover type, soil, and topography for area j , that divides flow into horizontal f_j and vertical $(1 - f_j)$ flows; and |
| $PET(t)$ | reference potential evapotranspiration [mm/day]; | $k_{z,j}$ | saturated hydraulic conductivity of the root zone layer of area j [mm/time]. |
| $k_{c,j}$ | crop coefficient for area j ; | | |
| RRF_j | Runoff Resistance Factor for area j that depends of the land cover. Higher values of this factor result in higher evaporation and less runoff from the basin. | | |

A continuación se presentan los parámetros que serán variables en la calibración y sus anotaciones.

El coeficiente de cultivo K_c (-)

Este parámetro depende en el modelo WEAP solo en el tipo de uso de suelo. Los valores varían entre 0 y 1,5. Los valores de inicio para cada tipo de uso de suelo se basan en un estudio realizado en la cuenca del Río Bravo en México (Amato et al., 2006). El estudio evaluó la evapotranspiración actual y potencial. Estos valores fueron determinados para 15 categorías de uso de suelo del IMTA y de esta forma fueron utilizados en los modelos WEAP (tabla 3).

Tabla 3. Datos del coeficiente de cultivo de referencia.

| | ETact | ETpot | Kc | Suelo IMTA | | Kc Utilizado en |
|------------------------------------|-------|-------|-----|------------|------------------------------------|-----------------|
| | | (mm) | | | | WEAP |
| Área urbana | 803 | 1048 | 0.8 | 85 | Áreas Urbanas | 0.77 |
| Cuerpos de agua | | | | | | |
| Agua | 1578 | 1578 | 1 | 30 | Cuerpos de Agua | 1 |
| Agricultura de riego (delta) | 1202 | 1346 | 0.9 | | | |
| Agricultura de riego (valle) | 898 | 1040 | 0.9 | 40 | Áreas Irrigadas | 0.88 |
| Irrigación complementaria | 1242 | 1298 | 1 | 50 | Áreas con Irrigación Natural | 0.96 |
| Bosque abierto bajo | 483 | 1272 | 0.4 | 20 | Pastos de Bosque | 0.38 |
| Bosque de roble | 538 | 1747 | 0.3 | | | |
| Bosque de pino | 487 | 1272 | 0.4 | 10 | Bosque | 0.35 |
| Chaparral | 481 | 1424 | 0.3 | 70 | Pastos Altos y Matorral Pequeño | 0.34 |
| Matorrales micrófilos | 237 | 501 | 0.5 | | | |
| Matorral con Vegetación Rosetófila | 263 | 616 | 0.4 | | | |
| Matorral Espinoso Tamaulipeco | 583 | 1254 | 0.5 | 75 | Otra Vegetación | 0.45 |
| Matorral Submontano | 711 | 1605 | 0.4 | | | |
| Pastizal Cultivado | 516 | 1129 | 0.5 | 80 | Tierra de Pastoreo | 0.46 |
| Pastizal Natural | 342 | 642 | 0.5 | 60 | Pequeños Pastos de Pastoreo | 0.53 |
| - | - | - | - | 90 | Vegetación de Humedales Vegetación | 0.9 |
| - | - | - | - | 95 | Sin Vegetación Aparente | 0.3 |

El factor de resistencia al escurrimiento RRF (-)

Este parámetro también es conocido como el Índice de Área Foliar, el cual también depende en el tipo de uso de suelo o vegetación. El modelo WEAP es altamente sensible a estos valores ya que se expresa como el poder en la ecuación del escurrimiento superficial (Figura 5). En algunos modelos WEAP este factor se toma como una variable mensual. Sin embargo, simplificamos su entrada y basamos sus valores de inicio en el conjunto de datos globales de los valores promedio anuales del índice de área foliar, después de la eliminación de los valores atípicos (outliers), por Scurlock y otros (2001), disponible en [<http://www.daac.ornl.gov>]. Estos valores de inicio por tipo de uso de suelo se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Referencia para el factor de Resistencia al Escurrimiento.

| Scurlock et al., 2001 | Uso de Suelo IMTA | Categoría de Uso de Suelo IMTA | LAI Utilizado en Weap |
|------------------------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Promedio de Bosque | 10 | Bosque | 5.18 |
| Promedio de Bosque (BoDBL y BOENL) | 20 | Pastos de bosque | 3.07 |
| | 30 | Cuerpos de agua | 0.1 |
| Cultivos | 40 | Áreas irrigadas | 4.22 |
| Cultivos | 50 | Áreas con irrigación natural | 4.22 |
| Pastizal | 60 | Pequeños pastos de pastoreo | 2.5 |
| Matorral | 70 | Pastos altos y Matorral pequeño | 2.08 |
| Matorral | 75 | Otra vegetación | 2.08 |
| Pastizal | 80 | Tierras de pastoreo | 2.5 |
| | 85 | Áreas urbanas | 8 |
| Humedales | 90 | Vegetación de humedal | 6.34 |
| Desierto | 95 | Sin Vegetación aparente | 1.31 |

Capacidad de agua del suelo Rd , (mm)

La capacidad de agua del suelo depende del suelo y tipo de uso del suelo. Este factor está compuesto por la capacidad de campo (variando de 0,6-4,5mm/cm (Agricultural Bureau of South Australia, 1960)) en la profundidad de raíz efectiva (variando de 0-3m en suelo descubierto a árboles (FAO, 1998)). Ya que consideramos la capa superior del suelo, dejamos los valores variar dependiendo del tipo de uso de suelo. El valor default de WEAP (1000mm) es utilizado como el valor de inicio en la calibración. Los valores de referencia se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Capacidad de agua del suelo de referencia.

| Nombre de Cuenca | ID IMTA | Perfil de Suelo IMTA | WEAP |
|------------------|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| | | Capacidad de Almacenaje (mm) | Capacidad de la Zona de Raíz (mm) |
| Peguis | 1 | 20 | 20 |
| Sacramento | 2 | 20 | 20 |
| Las Burras | 3 | 10 | 10 |
| Luis L. León | 4 | 15 | 15 |
| Fco. Madero | 5 | 15 | 15 |
| Villalba | 6 | 9 | 9 |
| Conchos | 7 | 10 | 10 |
| Jiménez | 8 | 25 | 25 |
| Chuviscar | 9 | 10 | 10 |
| El Rejón | 10 | 5 | 5 |
| Chihuahua | 11 | 10 | 10 |
| Llanitos | 12 | 6 | 6 |
| Pico del Águila | 13 | 10 | 10 |
| San Antonio | 14 | 10 | 10 |
| San Gabriel | 15 | 8 | 8 |
| Puente FFCC | 16 | 8 | 8 |
| Parral | 17 | 15 | 15 |
| Colina | 18 | 10 | 10 |
| La Boquilla | 19 | 5 | 5 |
| Ojinaga | 20 | 20 | 20 |

Conductividad de la zona de raíz K_{sat} , (mm/mes)

La cual es la conductividad de agua del suelo a saturación completa en la zona de raíz. En general, la conductividad hidráulica del suelo varía de 0,4 hasta mayor a 150 $\mu\text{m/s}$ (USDA, n.d.). En el modelo WEAP empezaremos la calibración con el valor default de 20mm/mes. La información referencial es obtenida por IMTA (Tabla 6).

Tabla 6. Conductividad de zona de raíz de referencia.

| Nombre de Cuenca | ID IMTA | Perfil de Suelo IMTA | WEAP |
|------------------|---------|----------------------------------|--------------------------------|
| | | Índice Max de Percolación (mm/h) | Conductividad del Suelo (mm/d) |
| Peguis | 1 | 6 | 144 |
| Sacramento | 2 | 25 | 600 |
| Las Burras | 3 | 2 | 48 |
| Luis L. León | 4 | 8 | 192 |
| Fco. Madero | 5 | 25 | 600 |
| Villalba | 6 | 23 | 552 |
| Conchos | 7 | 1.25 | 30 |
| Jiménez | 8 | 26 | 624 |
| Chuviscar | 9 | 1.25 | 30 |
| El Rejón | 10 | 10 | 240 |
| Chihuahua | 11 | 1 | 24 |
| Llanitos | 12 | 2 | 48 |
| Pico del Águila | 13 | 5 | 120 |
| San Antonio | 14 | 25 | 600 |
| San Gabriel | 15 | 0.28 | 7 |
| Puente FFCC | 16 | 0.28 | 7 |
| Parral | 17 | 15 | 360 |
| Colina | 18 | 15 | 360 |
| La Boquilla | 19 | 5 | 120 |
| Ojinaga | 20 | 6 | 144 |

Capacidad de aguas profundas Rd_2 (mm)

Este parámetro depende solo del tipo de tierra o roca. En la calibración se usa el mapa nacional de suelos de INEGI disponible en [<http://gaia.inegi.org.mx/>] para diferentes tipos de suelos dentro de las cuencas. El valor de default de WEAP de 1000mm se utiliza como un valor de inicio. Los valores de referencia son obtenidos por IMTA (Gomez-Martinez et al., 2005), donde la capacidad de almacenaje y el índice de percolación fueron determinados a escala de subcuenca para la cuenca del Rio Conchos en México (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de referencia para la capacidad de aguas profundas.

| Nombre de Cuenca | ID IMTA | Agua Subterránea 1 IMTA | WEAP |
|------------------|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| | | Capacidad de Almacenaje (mm) | Capacidad de Aguas Profundas (mm) |
| Peguis | 1 | 4 | 4 |
| Sacramento | 2 | 5 | 5 |
| Las Burras | 3 | 1 | 1 |
| Luis L. León | 4 | 25 | 25 |
| Fco. Madero | 5 | 10 | 10 |
| Villalba | 6 | 8 | 8 |
| Conchos | 7 | 3 | 3 |
| Jiménez | 8 | 3 | 3 |
| Chuviscar | 9 | 3 | 3 |
| El Rejón | 10 | 10 | 10 |
| Chihuahua | 11 | 5 | 5 |
| Llanitos | 12 | 1 | 1 |
| Pico del Águila | 13 | 5 | 5 |
| San Antonio | 14 | 20 | 20 |
| San Gabriel | 15 | 25 | 25 |
| Puente FFCC | 16 | 25 | 25 |
| Parral | 17 | 8 | 8 |
| Colina | 18 | 15 | 15 |
| La Boquilla | 19 | 15 | 15 |
| Ojinaga | 20 | 4 | 4 |

Conductividad profunda Ksa_2 (mm/mes)

Esto se refiere al índice de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda ('balde' inferior) a saturación completa, lo que controla la transmisión del caudal base. El valor default de WEAP de 20 mm/mes se utiliza como el valor de inicio y se realizaron ajustes utilizando el mapa nacional de suelos de INEGI. Para esta variable, los valores de referencia utilizados por default fueron aquellos determinados por IMTA para el índice de percolación para cada cuenca (Tabla 8).

Tabla 8. Conductividad de aguas profundas de referencia.

| Nombre de Cuenca | ID IMTA | Agua Subterránea 1 IMTA | WEAP |
|------------------|---------|----------------------------------|-------------------------------|
| | | Índice Max de Percolación (mm/h) | Conductividad Profunda (mm/d) |
| Peguis | 1 | 4 | 96 |
| Sacramento | 2 | 20 | 480 |
| Las Burras | 3 | 5 | 120 |
| Luis L. León | 4 | 15 | 360 |
| Fco. Madero | 5 | 25 | 600 |
| Villalba | 6 | 25 | 600 |
| Conchos | 7 | 13 | 312 |
| Jiménez | 8 | 5 | 120 |
| Chuviscar | 9 | 13 | 312 |
| El Rejón | 10 | 20 | 480 |
| Chihuahua | 11 | 20 | 480 |
| Llanitos | 12 | 8 | 192 |
| Pico del Águila | 13 | 22 | 528 |
| San Antonio | 14 | 35 | 840 |
| San Gabriel | 15 | 10 | 240 |
| Puente FFCC | 16 | 10 | 240 |
| Parral | 17 | 30 | 720 |
| Colina | 18 | 10 | 240 |
| La Boquilla | 19 | 45 | 1080 |
| Ojinaga | 20 | 4 | 96 |

Dirección de caudal preferida (-)

Este es un ratio indicando la partición del caudal entre las capas superior e inferior del suelo. Varía conforme al tipo de suelo, variando de 0 (100% caudal vertical) a 1 (100% caudal horizontal). El valor default de WEAP de 0,15 se utiliza como valor de inicio y los mapas de suelos de INEGI se utilizan para calibrar este parámetro.

Almacenaje de agua relativa inicial z_1 y z_2 (%)

Este es un parámetro para ambas capas, que son las fracciones del total de agua efectiva en las capas superior e inferior. Ambos parámetros tienen un rol crucial en la calibración, a través de las ecuaciones del escurrimiento superficial, interflujo y caudal base. Se utiliza el valor default de WEAP de 30% como valor de inicio en la calibración.

2.1.8.2. Evaluación

El procedimiento de calibración consiste en el proceso de ajuste de todos los parámetros de suelo y uso de suelo mencionados arriba a la realidad, evaluando la salida de la simulación de descargas en locaciones específicas que disponen de series temporales de descarga observada en el periodo de tiempo dado (1981-2010). El comparar las hidrografías observadas y simuladas permite la evaluación de modificaciones de valor de parámetros específicos. Posiblemente la herramienta de calibración PEST (parameter estimation tool) pueda habilitarse para optimizar la calibración, permitiendo automatizar el proceso de comparar las salidas de WEAP con las observaciones históricas y modificar los parámetros del modelo para mejorar su precisión.

En la calibración se hacen las siguientes suposiciones:

- El escurrimiento de la cuenca está equitativamente distribuido sobre las alturas de los caudales tomados en cuenta en el modelo.
- El agua subterránea y los acuíferos no se toman en cuenta.
- La agricultura pluvial no influye en la hidrología, asumiendo que no se tome agua del río, no haya caudal de retorno al río y no haya influencia sobre la infiltración de la precipitación.

Para evaluar la calibración y aprobar el modelo WEAP como satisfactorio para uso posterior, los siguientes parámetros de bondad de ajuste son evaluados para el conjunto de series temporales de descarga observado y simulado por región hidrográfica o cuenca.

- R^2 - Parámetro de correlación lineal entre series temporales observadas y simuladas, con los rangos de valor dados en la tabla 9.

Tabla 9. Rangos de valor para R^2

| | |
|------------|--------------|
| <0.5 | INSUFICIENTE |
| 0.5 – 0.75 | ACEPTABLE |
| 0.75 – 0.9 | BUENO |
| ≥ 0.9 | MUY BUENO |

- Coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe NSE , utilizado con frecuencia para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Sus valores pueden variar de $[-\infty, 1]$. Los rangos de valor se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 Rangos de valor para NSE (Molnar, 2011)

| | |
|------------|---------------|
| <0.2 | INSUFICIENTE |
| 0.2 – 0.4 | SATISFACTORIO |
| 0.4 – 0.6 | BUENO |
| 0.6 – 0.8 | MUY BUENO |
| ≥ 0.8 | EXCELENTE |

Este proceso se realiza en el programa R utilizando el paquete '*hydrogof*' (Zambrano-Bigiarini, 2014). Se desplegarán otros parámetros de evaluación pero estarán enfocados en el R^2 y NSE para aceptar la calibración.

2.2. Resultados y discusión para las diferentes regiones hidrográficas

2.2.1. Región hidrográfica Soto La Marina

La región hidrográfica de Soto La Marina abarca tanto la cuenca del río Corona como las cuencas del Río Purificación 2 como casos de estudio piloto. Toda la RH Soto La Marina se subdivide en las siguientes cuencas oficiales (Tabla 11; Figura 6):

Tabla 11. Cuencas de la RH Soto La Marina.

| ID_2013 | Nombre | Área (ha) | Descripción |
|---------|----------------------|-----------|--|
| 208 | Río Pílon 1 | 24251 | Desde su nacimiento hasta la EH Magueyes. |
| 210 | Río Pílon 2 | 235307 | Desde la EH Magueyes hasta la EH Pílon III. |
| 217 | Río Blanco | 175080 | Desde su nacimiento hasta la EH Puerto de Valles. |
| 254 | Arroyo Grande | 187587 | Desde su nacimiento hasta la EH Paso de Molina II. |
| 260 | Río Palmas | 156289 | Desde su nacimiento hasta la EH Paso del Aura. |
| 205 | área no aforada | 501564 | Desde el nacimiento del río San Marcos y arroyos San Carlos, Las Puentes, El Moro y las EH Pílon III, Padilla II hasta la presa Vicente Guerrero |
| 213 | Río Soto la Marina 2 | 336257 | Desde la presa derivadora La Patria es Primero hasta la EH Soto la Marina. |
| 220 | Río San Antonio | 41495 | Desde su nacimiento hasta la EH El Tomaseño. |
| 229 | Río Purificación 1 | 121775 | Desde las EH Puerto Valles y El Tomaseño hasta la EH Barretal II. |
| 235 | Río Purificación 2 | 27830 | Desde la EH Barretal II hasta la EH Padilla II. |
| 237 | Río Corona | 137746 | Desde su nacimiento hasta la EH Corona. |
| 238 | Río Soto la Marina 1 | 13284 | Desde la presa Vicente Guerrero hasta la presa derivadora La Patria es Primero. |

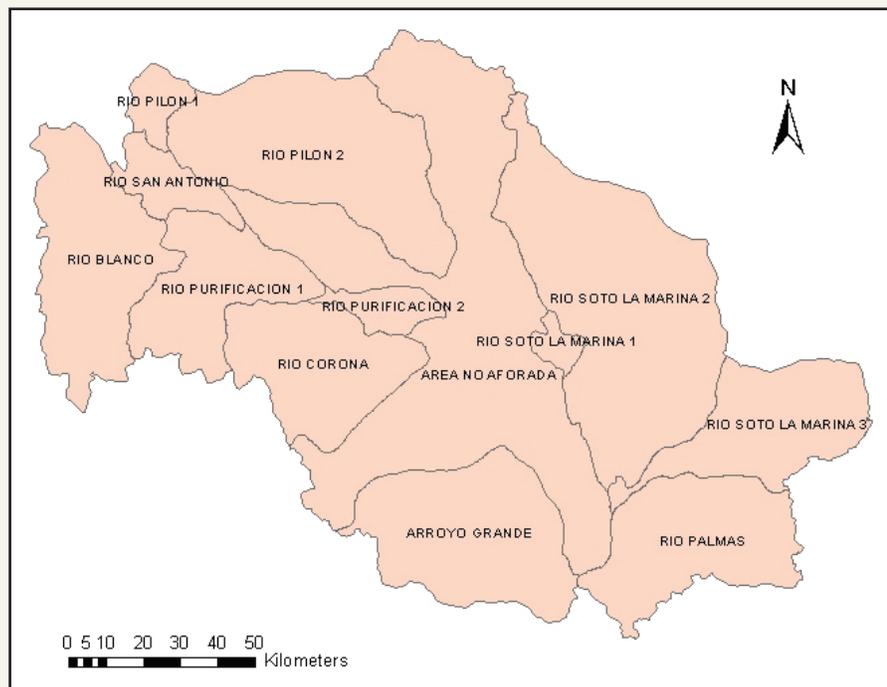


Figura 6 Cuencas oficiales de la RH Soto La Marina.

Debido a la baja disponibilidad de estaciones en algunas de estas cuencas WEAP, delimitadas conforme a los lineamientos de Escobar y Vicuña (2009) (figura 2), se aplicó el método de intersección de las cuencas oficiales con diferenciación de altitud. El DEM de la región se clasificó en 3 clases conforme a intervalo de 1000m (0-1000m; 1000-2000m; 2000-3000m). Posteriormente, se simplificaron las áreas; disolviendo cuencas WEAP menores de 2000 ha. Estas operaciones SIG tuvieron los siguientes resultados, presentados en la Tabla 12 y Figura 7.

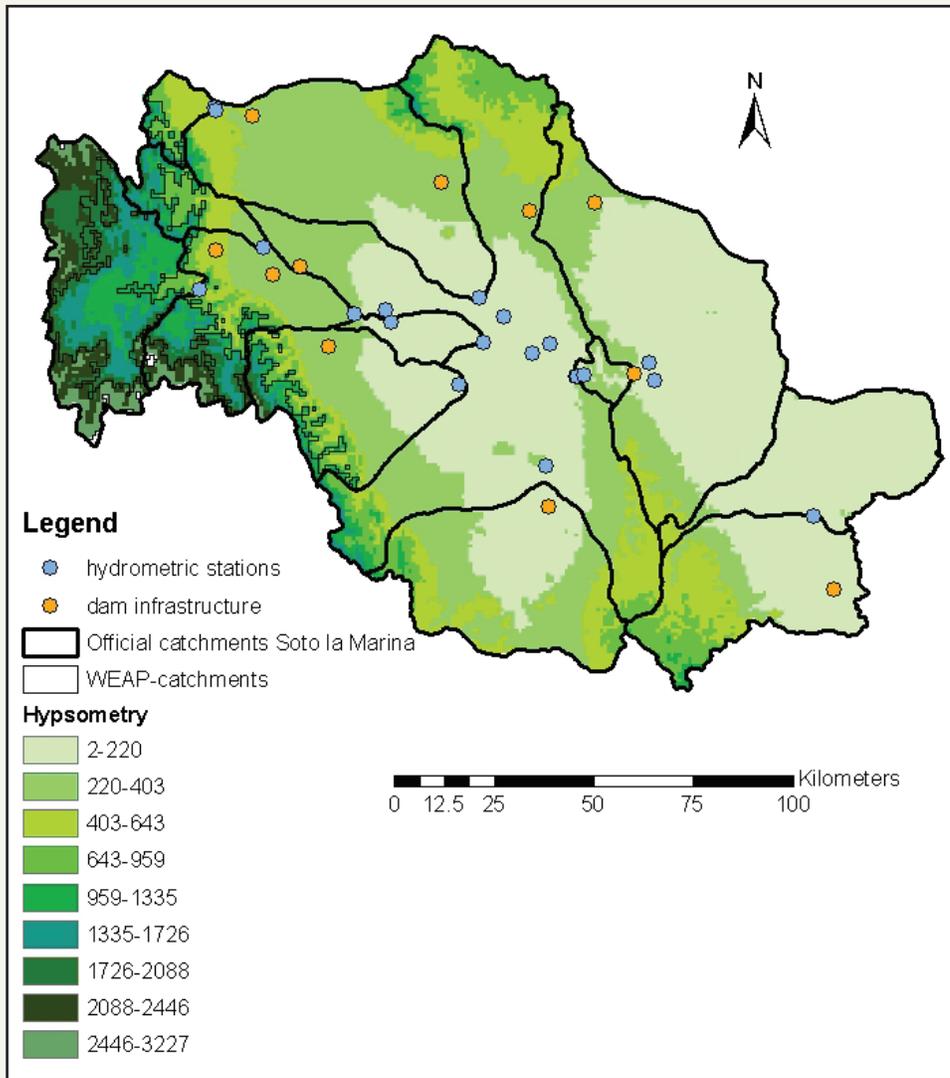


Figura 7 Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de altitud

Tabla 12. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de altitud

| ID | CLASE DEM | CUENCA | ÁREA (HA) |
|-------------|------------|----------------------|-----------|
| NoAf_0 | 0-1000m | ÁREA NO AFORADA | 506621 |
| ArrGr_0 | 0-1000m | ARROYO GRANDE | 189498 |
| Blanco_0 | 0-1000m | RIO BLANCO | 6892 |
| Cor_0 | 0-1000m | RIO CORONA | 118628 |
| Palm_0 | 0-1000m | RIO PALMAS | 157904 |
| Pil1_0 | 0-1000m | RIO PILÓN 1 | 18287 |
| Pil2_0 | 0-1000m | RIO PILÓN 2 | 237650 |
| Pur1_0 | 0-1000m | RIO PURIFICACIÓN 1 | 70073 |
| Pur2_0 | 0-1000m | RIO PURIFICACIÓN 2 | 28111 |
| SanAn_0 | 0-1000m | RIO SAN ANTONIO | 22111 |
| Soto1_0 | 0-1000m | RIO SOTO LA MARINA 1 | 13419 |
| Soto2_0 | 0-1000m | RIO SOTO LA MARINA 2 | 339677 |
| Soto3_0 | 0-1000m | RIO SOTO LA MARINA 3 | 137985 |
| Blanco_1000 | 1000-2000m | RIO BLANCO | 93457 |
| Cor_1000 | 1000-2000m | RIO CORONA | 20516 |
| Pil1_1000 | 1000-2000m | RIO PILÓN 1 | 6206 |
| Pur1_1000 | 1000-2000m | RIO PURIFICACIÓN 1 | 34644 |
| SanAn_1000 | 1000-2000m | RIO SAN ANTONIO | 19802 |
| Blanco_2000 | 2000m+ | RIO BLANCO | 74623 |
| Pur1_2000 | 2000m+ | RIO PURIFICACIÓN 1 | 17653 |

En el proceso de selección de las estaciones meteorológicas, se seleccionaron diferentes estaciones de medición para la precipitación y la temperatura. En las siguientes tablas, mapas y gráficos informativos, se presentan la climatología y acumulación o promedios anuales, respectivamente para la precipitación y temperatura, de las estaciones seleccionadas.

Tabla 13 Estaciones de precipitación seleccionadas para las diferentes cuencas WEAP la RH Soto La Marina, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes

| CUENCA WEAP | ID ESTACIÓN | NOMBRE DE ESTACIÓN | LATITUD | LONGITUD | DENTRO DE CUENCA WEAP (SÍ/NO) | % DE DATOS FALTANTES |
|-------------|-------------|--------------------|---------|----------|-------------------------------|----------------------|
| NoAf_0 | 28084 | San Carlos | 24.58 | -98.95 | SÍ | 4.3 |
| ArrGr_0 | 28185 | María Teresa | 23.6 | -99 | SÍ | 17.2 |
| Blanco_0 | 28077 | Puerto de Valles | 24.18 | -99.59 | SÍ | 0 |
| Cor_0 | 28036 | Guemez | 23.92 | -99 | SÍ | 5.11 |
| Palm_0 | 28045 | La Encarnación | 23.38 | -98 | SÍ | 1.34 |
| Pil1_0 | 28059 | Magueyes | 24.57 | -99.56 | SÍ | 1.61 |
| Pil2_0 | 28007 | Barranco Azul | 24.4 | -99.1 | SÍ | 6.99 |
| Pur1_0 | 28077 | Puerto de Valles | 24.18 | -99.59 | NO | 0 |
| Pur2_0 | 28028 | El Barretal 1 | 24.08 | -99.12 | SÍ | 0 |
| SanAn_0 | 28038 | Hidalgo | 24.25 | -99.44 | SÍ | 19.35 |

| | | | | | | |
|-------------|-------|------------------------|-------|---------|----|-------|
| Soto1_0 | 28151 | Presa Vicente Guerrero | 23.96 | -98.66 | SÍ | 29.57 |
| Soto2_0 | 28041 | Jiménez | 24.21 | "-99.48 | SÍ | 0 |
| Soto3_0 | 28072 | Paso Del Aura | 23.65 | -98.08 | SÍ | 7.8 |
| Blanco_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | SÍ | 9.95 |
| Cor_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | NO | 9.95 |
| Pil1_1000 | 19005 | Aramberri2 | 24.1 | -99.83 | NO | 12.63 |
| Pur1_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | NO | 9.95 |
| SanAn_1000 | 19005 | Aramberri2 | 24.1 | -99.83 | NO | 12.63 |
| Blanco_2000 | 19144 | Cieneguitas Y Crucitas | 24.52 | -99.98 | NO | 12.9 |
| Pur1_2000 | 19144 | Cieneguitas Y Crucitas | 24.52 | -99.98 | NO | 12.9 |

Figura 8 Estaciones de Precipitación y Temperatura seleccionadas en la RH Soto la Marina

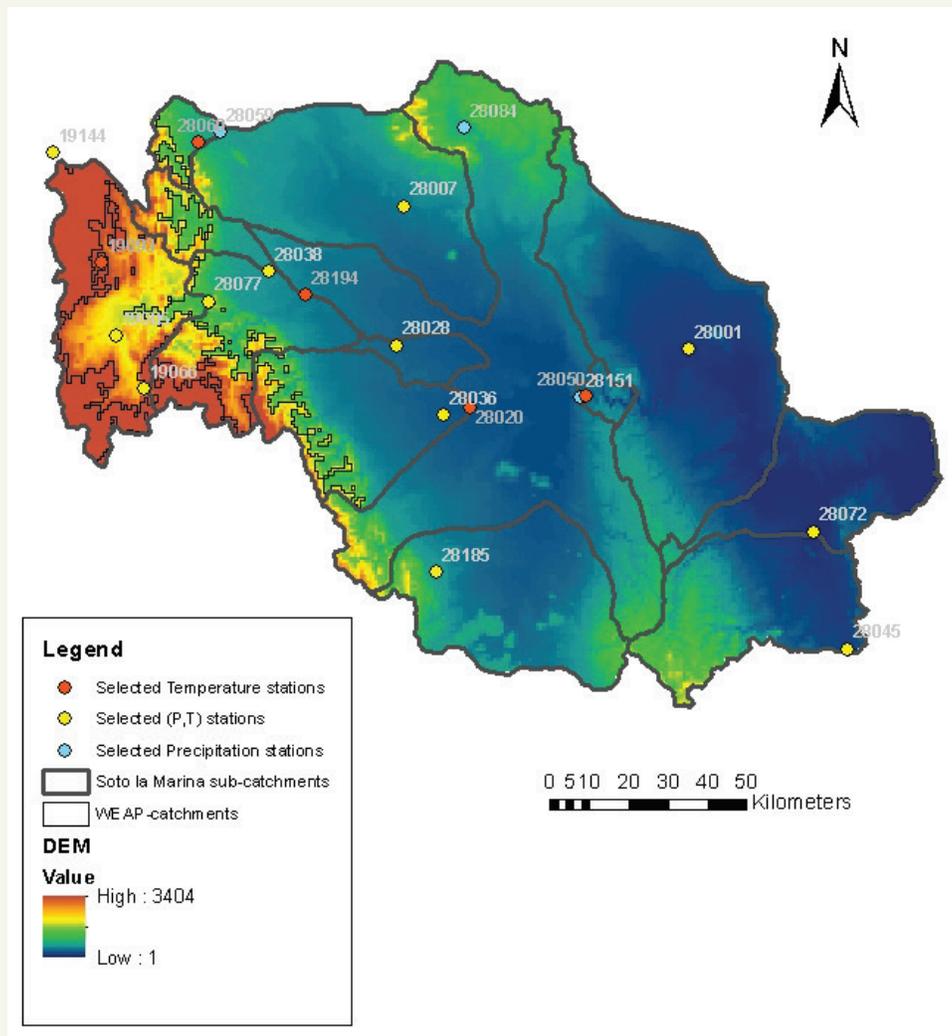


Tabla 14 Estaciones de Temperatura seleccionadas para las diferentes cuencas WEAP en la RH Soto La Marina, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes

| CUENCA WEAP | ID Estación | Nombre de Estación | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (SÍ / NO) | % de Datos Faltantes |
|-------------|-------------|-------------------------|---------|----------|---------------------------------|----------------------|
| NoAf_0 | 28020 | Corona | 23.90 | -98.90 | SÍ | 0.81 |
| ArrGr_0 | 28185 | María Teresa | 23.60 | -99.00 | SÍ | 4.44 |
| Blanco_0 | 28077 | Puerto de Valles | 24.18 | -99.59 | SÍ | 50.27 |
| Cor_0 | 28036 | Guemez | 23.92 | -99.00 | SÍ | 0.81 |
| Palm_0 | 28045 | La Encarnación | 23.38 | -98.00 | SÍ | 1.75 |
| Pil1_0 | 28060 | Villa Mainero | 24.50 | -99.60 | SÍ | 51.61 |
| Pil2_0 | 28007 | Barranco Azul | 24.40 | -99.10 | SÍ | 0.54 |
| Pur1_0 | 28194 | San Isidro | 24.20 | -99.30 | SÍ | 54.17 |
| Pur2_0 | 28028 | El Barretal 1 | 24.08 | -99.12 | SÍ | 50.27 |
| SanAn_0 | 28038 | Hidalgo | 24.25 | -99.44 | SÍ | 20.70 |
| Soto1_0 | 28050 | La Sonadora | 24.00 | -98.60 | SÍ | 64.78 |
| Soto2_0 | 28001 | Abasolo (DGE) | 24.07 | -98.39 | SÍ | 0.00 |
| Soto3_0 | 28072 | Paso Del Aura | 23.65 | -98.08 | SÍ | 1.08 |
| Blanco_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | SÍ | 9.95 |
| Cor_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | NO | 9.95 |
| Pil1_1000 | 19005 | Aramberri2 | 24.10 | -99.83 | NO | 12.63 |
| Pur1_1000 | 19066 | Zaragoza SMN | 23.98 | -99.76 | NO | 9.95 |
| SanAn_1000 | 19005 | Aramberri2 | 24.10 | -99.83 | NO | 12.63 |
| Blanco_2000 | 19093 | San Juanito de Reséndiz | 24.30 | -99.90 | SÍ | 47.31 |
| Pur1_2000 | 19144 | Cieneguitas Y Crucitas | 24.52 | -99.98 | NO | 12.90 |

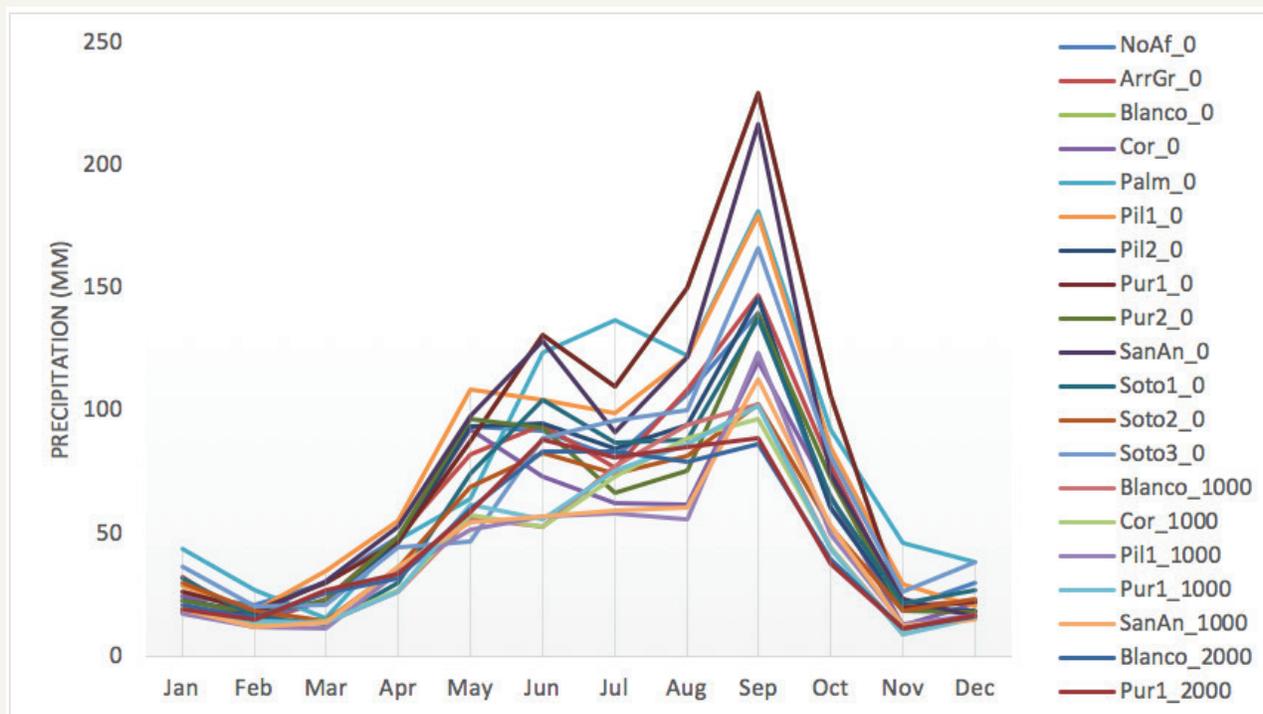


Figura 9. Climatología mensual de estaciones de precipitación seleccionadas para cada cuenca WEAP.

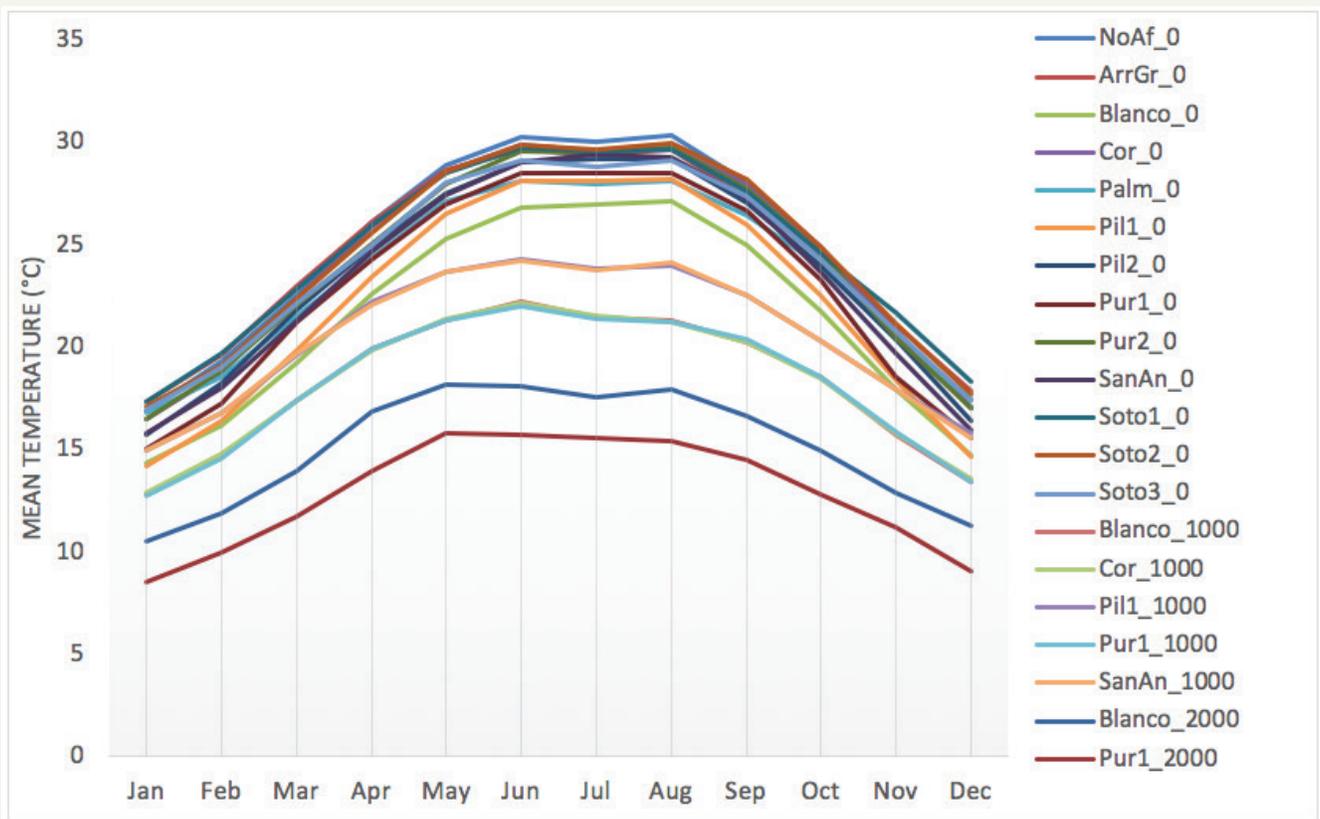


Figura 10. Climatología mensual de estaciones de temperatura seleccionadas para cada cuenca WEAP.

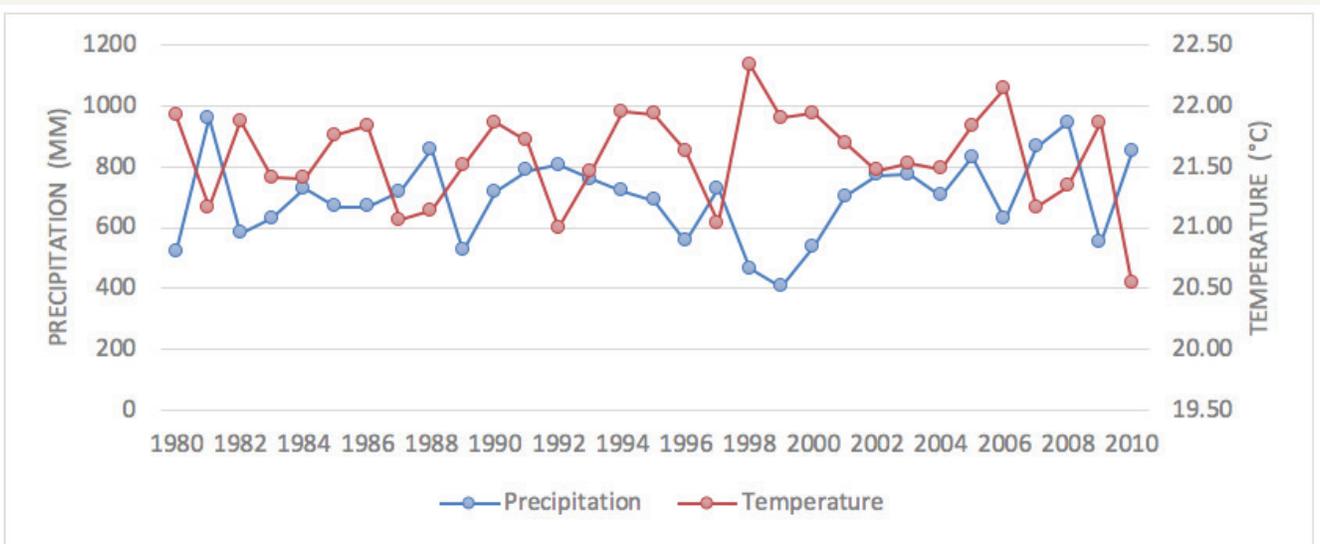


Figura 11. Precipitación acumulada anual y temperatura mensual promedio de todas las cuencas WEAP en la RH Soto la Marina.

Las diferentes entidades de uso de suelo y vegetación conforme a la INEGI para la cuenca Soto La Marina se presentan en el mapa de la Figura 12.

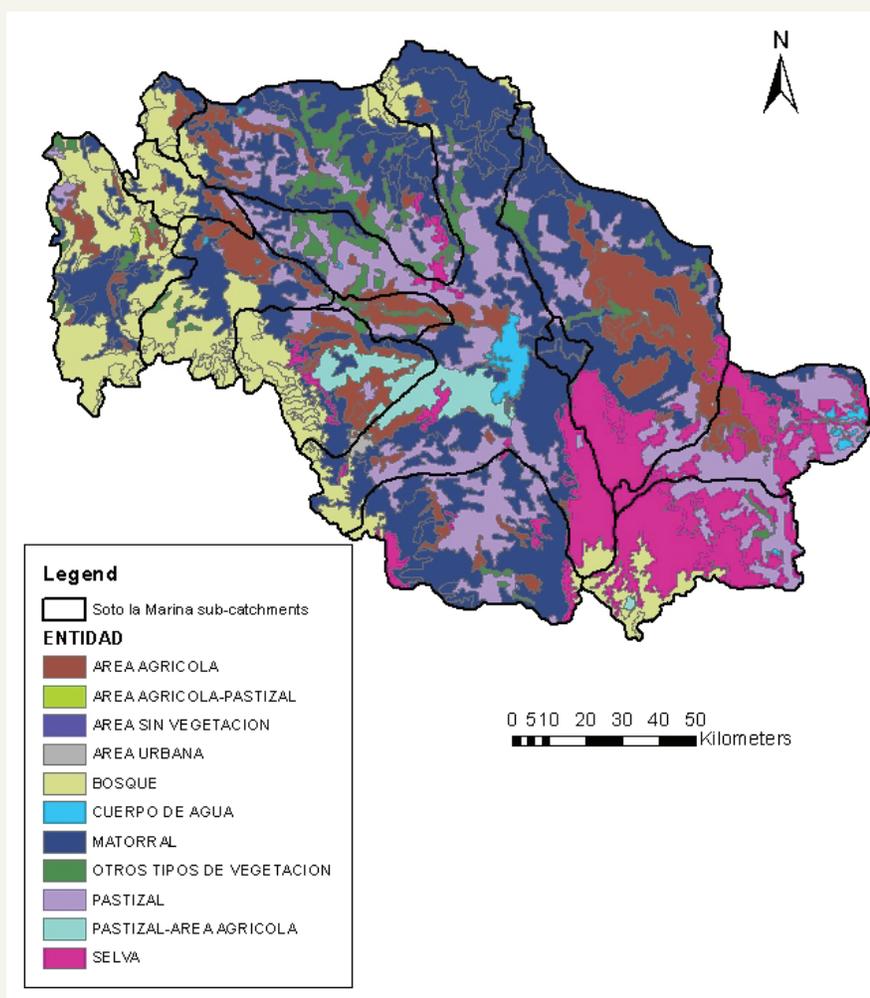


Figura 12. las diferentes entidades de clasificación de uso de suelo y vegetación de INEGI en la RH Soto La Marina.

Tabla 15. la contribución (en %) de las diferentes entidades de uso de suelo a cada una de las cuencas WEAP.

| CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) |
|------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| ArrGr_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 5.1 |
| | BOSQUE | 3.3 |
| | MATORRAL | 57.7 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 1.2 |
| | PASTIZAL | 25.6 |
| | SELVA | 7.0 |
| Blanco_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 3.4 |
| | BOSQUE | 24.2 |
| | MATORRAL | 68.4 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 4.0 |
| Blanco_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 9.4 |
| | ÁREA AGRÍCOLA-PASTIZAL | 0.8 |
| | ÁREA URBANA | 0.1 |
| | BOSQUE | 46.2 |
| | MATORRAL | 39.2 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 4.4 |
| | | |
| Blanco_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.5 |
| | ÁREA URBANA | 0.2 |
| | BOSQUE | 73.1 |
| | MATORRAL | 8.3 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 5.1 |
| Cor_0 | PASTIZAL | 4.8 |
| | ÁREA AGRÍCOLA | 24.7 |
| | ÁREA URBANA | 1.5 |
| | BOSQUE | 18.2 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.1 |
| | MATORRAL | 24.2 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.9 |
| | PASTIZAL | 6.3 |
| PASTIZAL-ÁREA AGRÍCOLA | 19.7 | |
| Cor_1000 | SELVA | 4.4 |
| | BOSQUE | 94.5 |
| | MATORRAL | 5.3 |
| NoAf_0 | SELVA | 0.2 |
| | ÁREA AGRÍCOLA | 4.6 |
| | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.1 |
| | ÁREA URBANA | 0.5 |
| | BOSQUE | 6.7 |
| | CUERPO DE AGUA | 3.3 |
| | MATORRAL | 43.0 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 5.6 |
| | PASTIZAL | 21.9 |
| | PASTIZAL-ÁREA AGRÍCOLA | 5.9 |
| SELVA | 8.5 | |
| Palm_0 | BOSQUE | 16.4 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.3 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 1.4 |
| | PASTIZAL | 19.2 |
| | PASTIZAL-ÁREA AGRÍCOLA | 0.5 |
| Pil1_0 | SELVA | 62.2 |
| | ÁREA AGRÍCOLA | 24.3 |
| | ÁREA URBANA | 0.2 |
| | BOSQUE | 47.4 |
| | MATORRAL | 28.1 |
| | BOSQUE | 100.0 |

| CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Pil2_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.6 |
| | ÁREA URBANA | 0.1 |
| | BOSQUE | 6.3 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.2 |
| | MATORRAL | 50.1 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 13.9 |
| | PASTIZAL | 18.3 |
| | SELVA | 2.5 |
| Pur1_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 28.6 |
| | ÁREA URBANA | 0.2 |
| | BOSQUE | 11.4 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.7 |
| | MATORRAL | 48.7 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.6 |
| | PASTIZAL | 9.8 |
| Pur1_1000 | BOSQUE | 82.3 |
| | MATORRAL | 9.5 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 8.1 |
| Pur1_2000 | BOSQUE | 99.5 |
| | MATORRAL | 0.0 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.5 |
| Pur2_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 51.2 |
| | ÁREA URBANA | 2.6 |
| | MATORRAL | 7.1 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 17.4 |
| | PASTIZAL | 21.7 |
| SanAn_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 28.9 |
| | ÁREA URBANA | 1.0 |
| | BOSQUE | 30.5 |
| | MATORRAL | 30.5 |
| | PASTIZAL | 9.1 |
| SanAn_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 0.4 |
| | BOSQUE | 94.4 |
| | MATORRAL | 5.2 |
| | PASTIZAL | 0.0 |
| Soto1_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 0.1 |
| | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.1 |
| | CUERPO DE AGUA | 4.4 |
| | MATORRAL | 91.8 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.0 |
| | PASTIZAL | 3.7 |
| Soto2_0 | SELVA | 0.0 |
| | ÁREA AGRÍCOLA | 26.7 |
| | ÁREA URBANA | 0.3 |
| | BOSQUE | 0.1 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.4 |
| | MATORRAL | 41.6 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 3.8 |
| | PASTIZAL | 11.5 |
| SELVA | 15.7 | |
| Soto3_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 10.1 |
| | ÁREA URBANA | 0.1 |
| | CUERPO DE AGUA | 4.9 |
| | MATORRAL | 8.4 |
| | PASTIZAL | 38.2 |
| | SELVA | 38.3 |

Con respecto a la infraestructura de presas, la ubicación de los diversos embalses en la región hidrográfica de Soto La Marina se indica en el mapa de la figura 7.

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo previo se representan en la captura de pantalla del mapa esquemático WEAP de la figura 13 y se resume en la Tabla 16 (en el Anexo 2, se presentan las demandas de agua detalladas tal como son utilizadas en el modelo WEAP).

Tabla 16 Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m ³] |
|----------------------------|---------------------------------|
| PÚBLICO URBANO / DOMÉSTICO | 25,561,687 |
| GANADERÍA | 2,252,574 |
| AGRICULTURA | 343,202,878 |
| ACUACULTURA | 25,603,600 |
| ENERGÍA HIDRÁULICA | 557,017,000 |

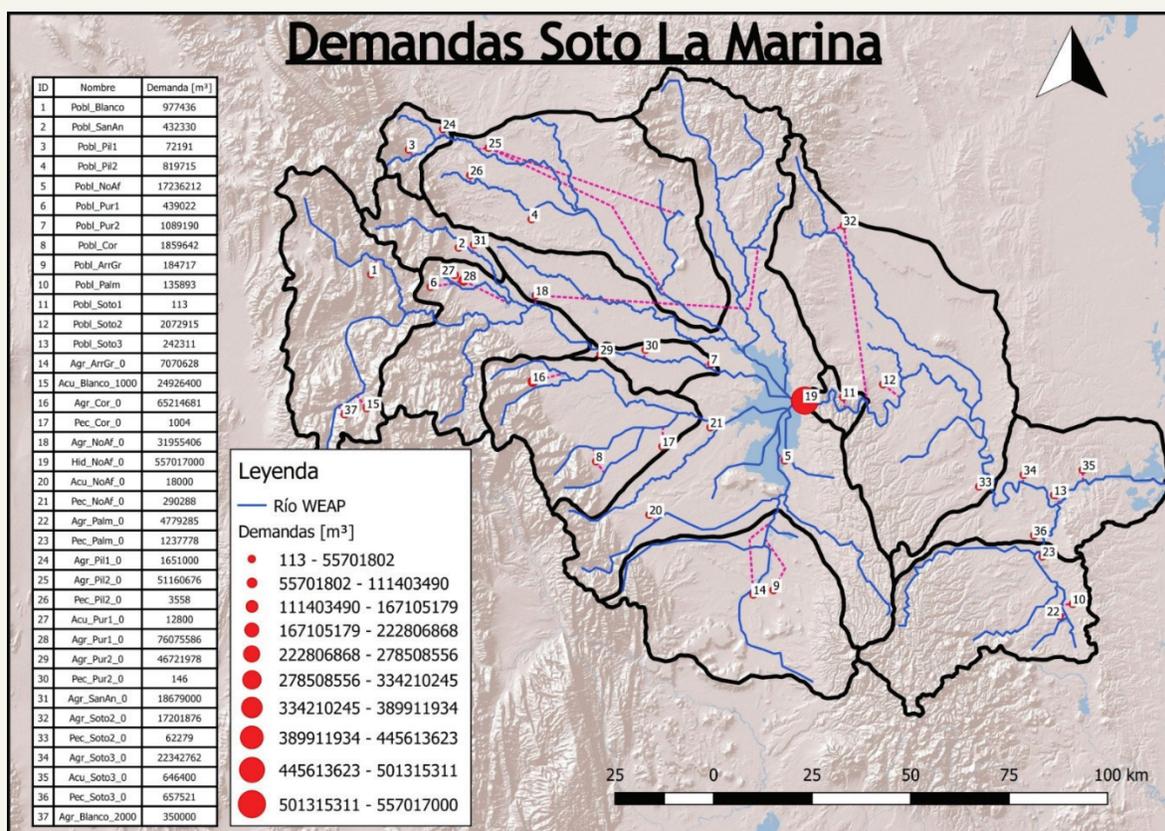


Figura 13. Principales sitios de demanda para los diferentes usos de agua en cada una de las cuencas WEAP en la RH Soto La Marina.

Se seleccionaron cinco estaciones de descarga para la evaluación de la calibración del modelo WEAP. Sus detalles y valores de desempeño se presentan en la tabla 17. La hidrografía de cada estación, mostrando simulaciones relativas a observaciones, se presentan en las figuras 14-18, para el periodo de enero de 1980 a diciembre de 2010.

Tabla 17. Las estaciones de descarga seleccionadas para la evaluación de desempeño de la calibración del modelo WEAP en Soto La Marina.

| CÓDIGO | NOMBRE DE ESTACIÓN | CAUDAL | LATITUD | LONGITUD | % DE DATOS FALTANTES | R ² | NSE |
|--------|--------------------|------------------|----------|----------|----------------------|----------------|------|
| 25038 | CORONA | RIO CORONA | -98.9519 | 23.9417 | 9.68 | 0.32 | 0.3 |
| 25040 | MAGUEYES | RIO PILÓN | -99.5583 | 24.5694 | 0.00 | 0.34 | 0.25 |
| 25043 | EL TOMASENO | RIO SAN ANTONIO | -99.4361 | 24.2514 | 0.00 | 0.37 | 0.23 |
| 25062 | PADILLA II | RIO PURIFICACIÓN | -98.8917 | 24.0361 | 0.54 | 0.64 | 0.63 |
| 25091 | EL BARRETAL II | RIO PURIFICACIÓN | -99.1342 | 24.1125 | 13.17 | 0.4 | 0.33 |

Los valores resultantes de los indicadores de desempeño para los diferentes pares de observaciones-simulaciones de la calibración en la región hidrográfica de Soto La Marina son más bajos que en las otras cuencas piloto. Aparte de la simplificación general en todos los datos de entrada para el modelo, los siguientes factores particulares juegan un rol:

- Hay pocas o ninguna estación climática, que proporcionen los diferentes datos de clima en el modelo WEAP, en la parte superior de la región hidrográfica. Se utilizan estaciones cercanas y ésta puede ser la razón de una baja representatividad para estas cuencas. Por ejemplo, hay solo datos derivados de estación para SanAn_1000, Pili_1000 and Blanco_2000.
- Las series temporales de datos batimétricos y volumen almacenado fueron proporcionados para solo 3 de los 11 embalses identificados en la región. Esto distorsiona la simulación de las corrientes río abajo de estos embalses en particular.
- Las áreas de las diversas cuencas WEAP varían de 6.000 ha a 510.000 ha. En estas escalas más grandes (especialmente desde 1000ha y mayores), los parámetros de uso de suelo y suelo pierden su significado físico y representan más una aglomeración de procesos que están ocurriendo en estas áreas, lo cual hace más difícil identificar un valor específico para uno de los parámetros y a la vez variar el otro.
- Corriente abajo y especialmente en la salida de la región hidrográfica no hay estaciones hidrométricas o hay estaciones sin datos para el periodo 1980-2010.

Podemos concluir que la cuenca que resultó con la mejor calibración es Río Purificación 2, representada por las estaciones 'Padilla 2' y 'El Barretal 2', con valores NSE satisfactorios a muy buenos.

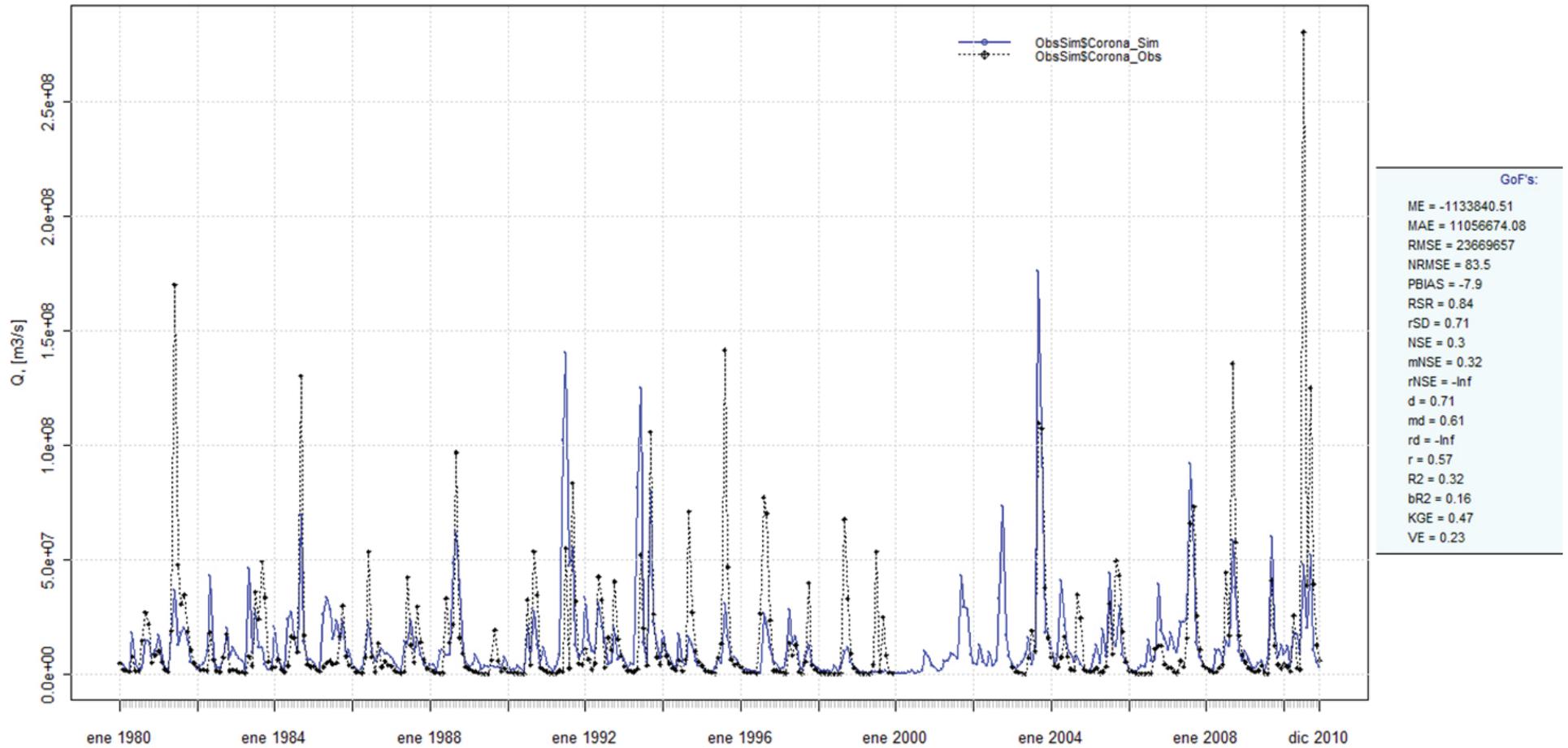


Figura 14. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 25038 'Corona', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

Observations vs Simulations

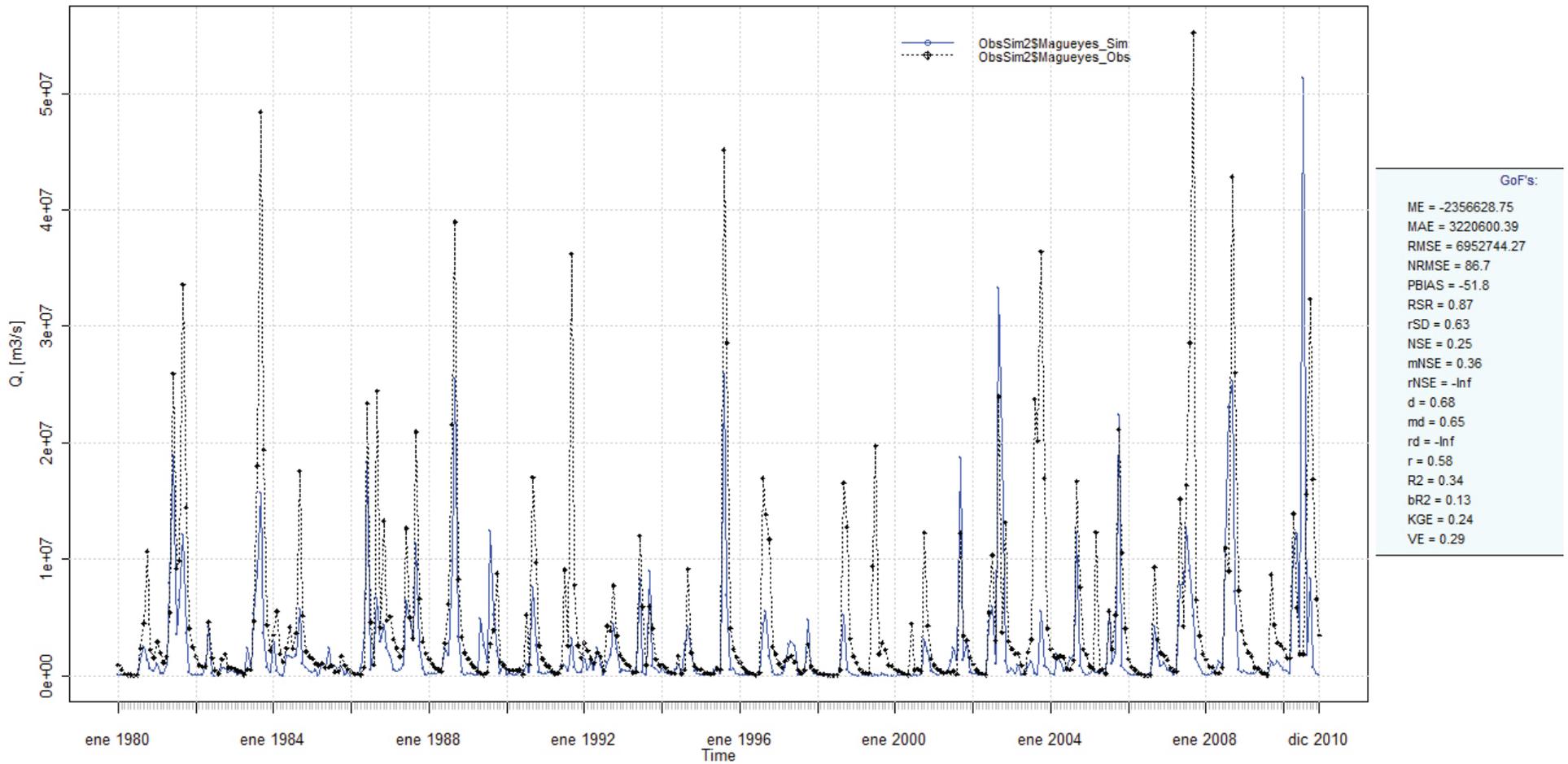


Figura 15. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 25040 'Magueyes', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

Observations vs Simulations

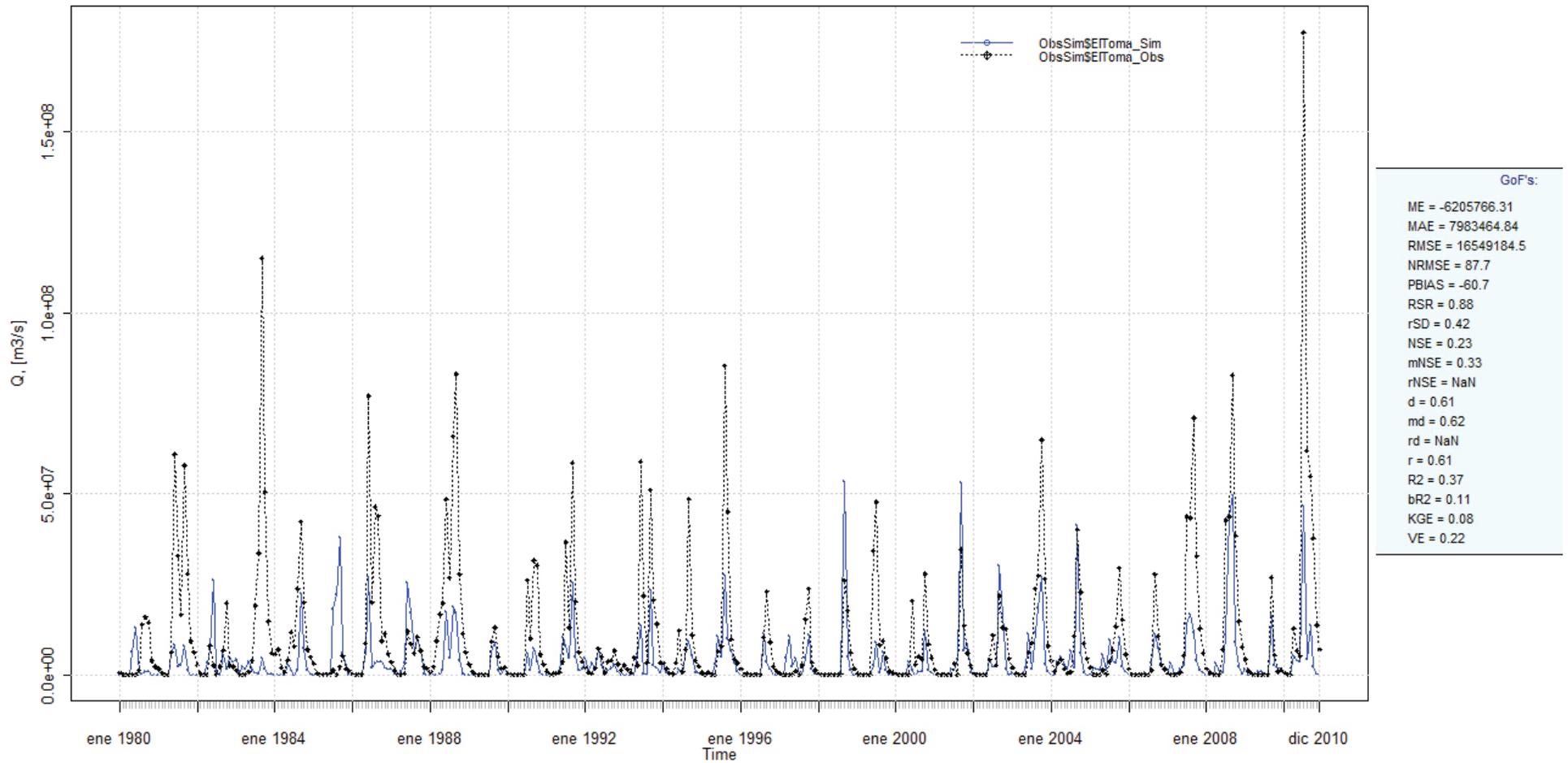


Figura 16. Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 25043 'El Tomaseno', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

Observations vs Simulations

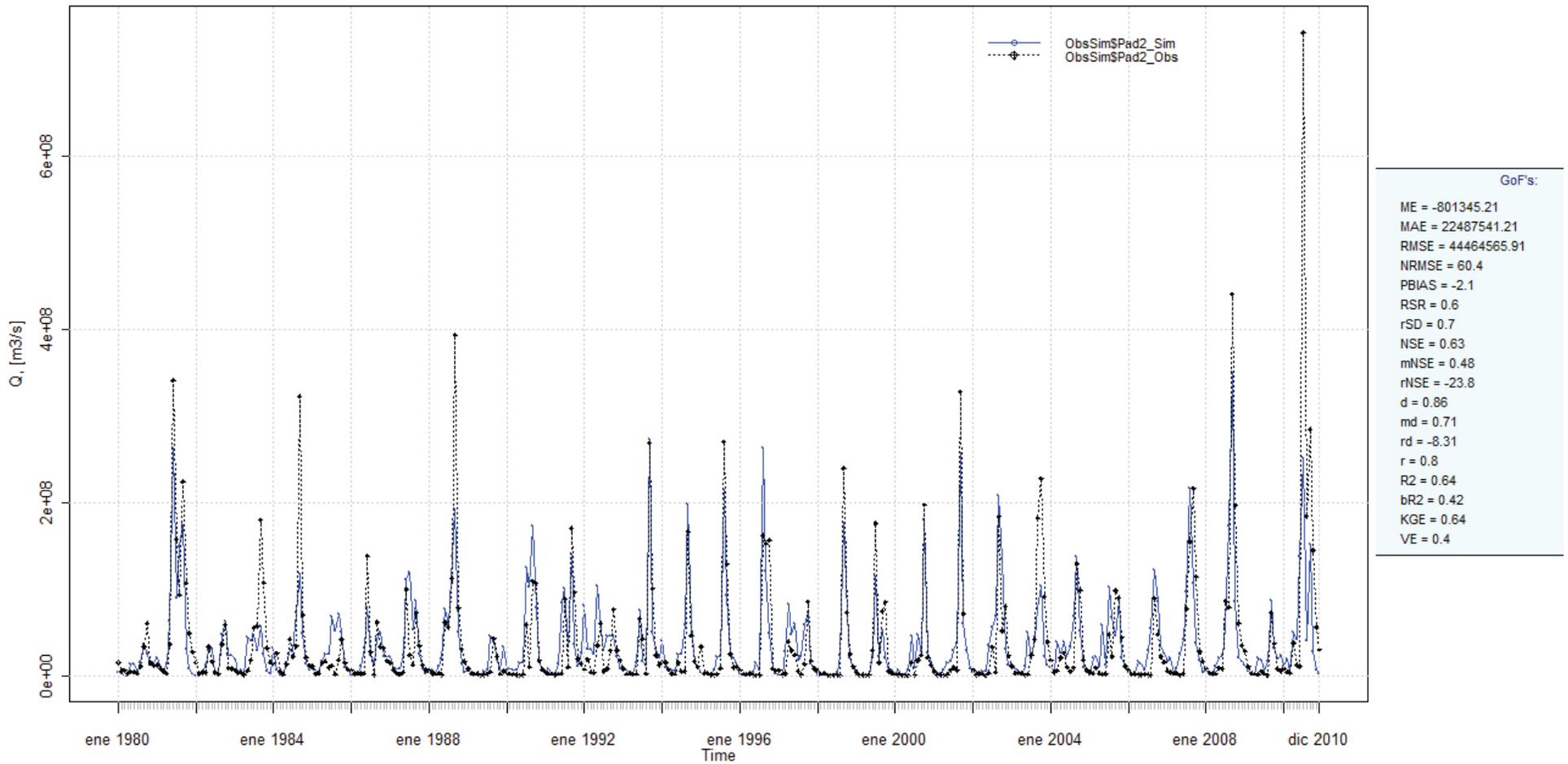


Figura 17 Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 25062 'Padilla 2', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

Observations vs Simulations

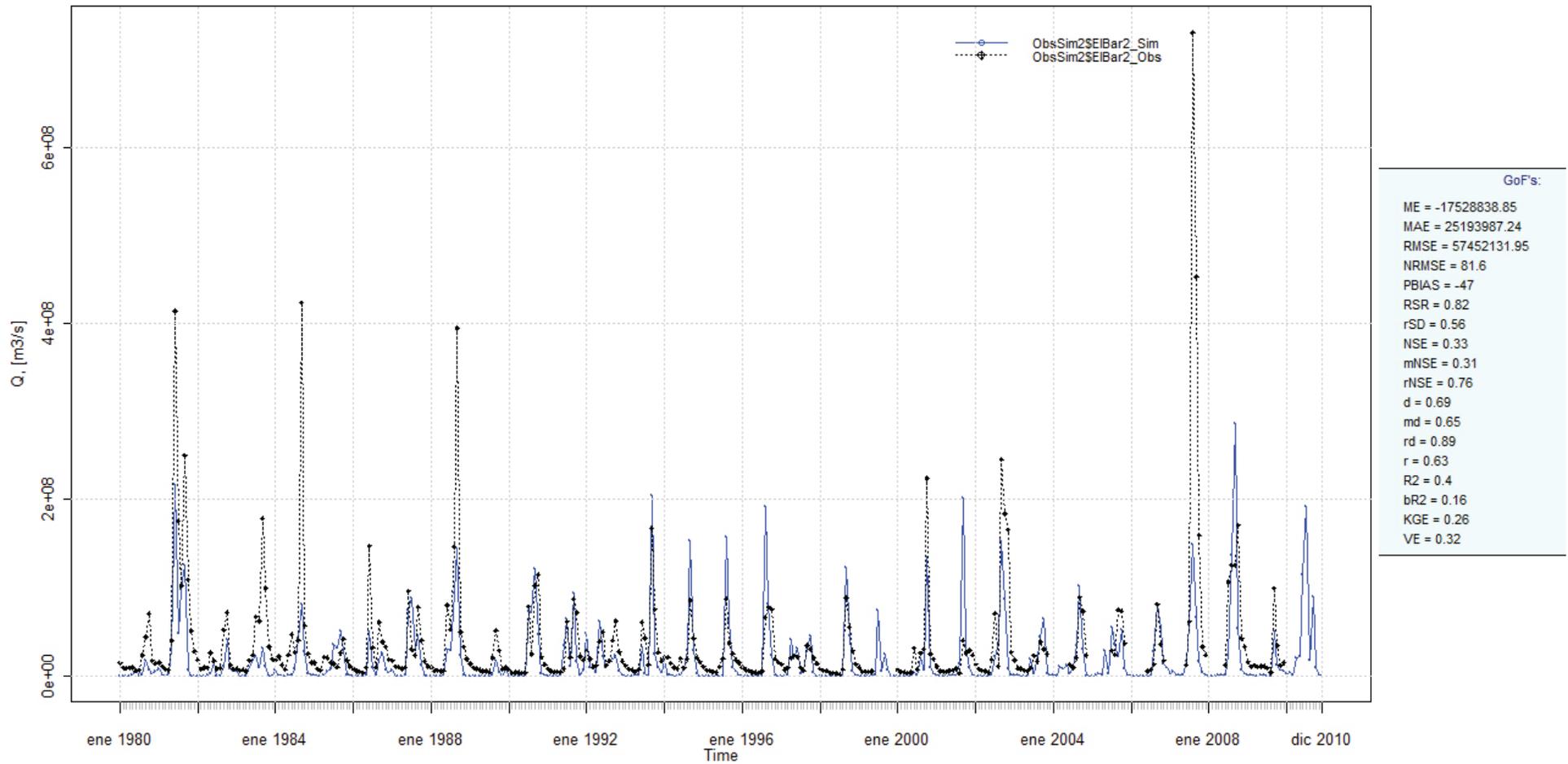


Figura 18. Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 25091 'El Barretal 2', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

2.2.2. Región hidrográfica San Lucas

La cuenca San Lucas se localiza en la punta de la Península de Baja California, donde se unen el Mar de Cortés y el Océano Pacífico; esta cuenca es parte de la región hidrológica llamada “B.C. SURESTE” (Figura 19).

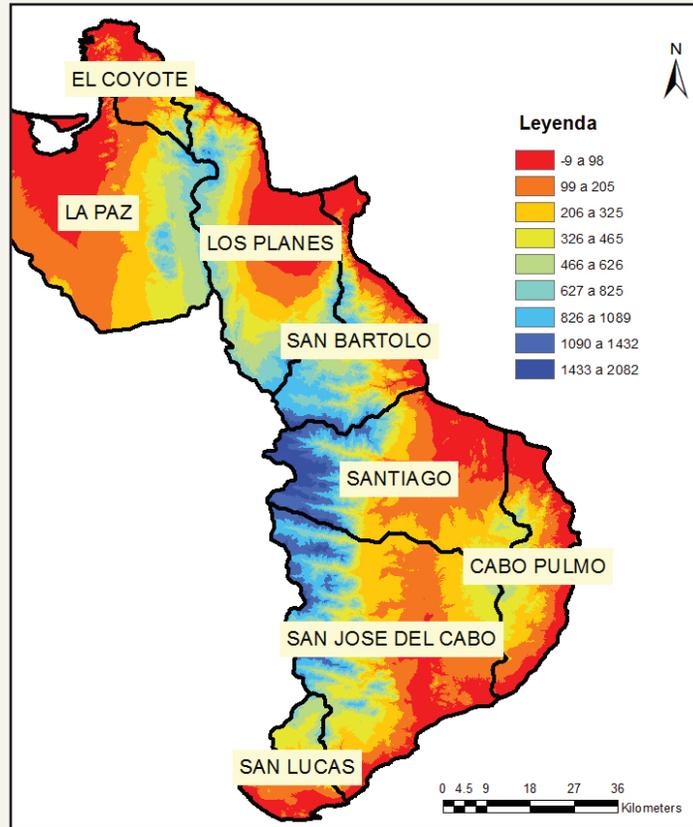


Figura 19. Localización de la cuenca en la región hidrológica B.C. Sureste

El área de la cuenca de San Lucas es de 271 km² y no tiene otras subcuencas (Figura 20).

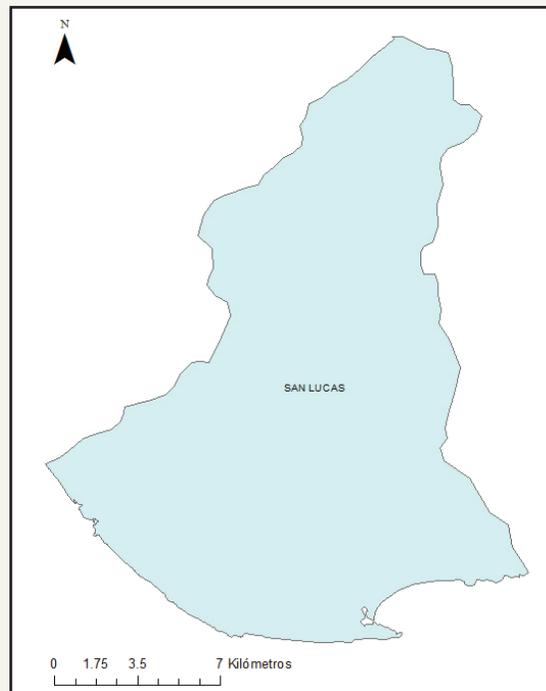


Figura 20 Delimitación de la cuenca San Lucas.

En el caso de la cuenca San Lucas, consideramos la información hidrométrica simulada proporcionada por WWF-México y la Distribución Espacial de la Precipitación para definir los polígonos subcuenca. El DEM se clasificó en 4 clases y la Distribución Espacial de la Precipitación cada 100 mm. Estas operaciones SIG tuvieron el siguiente resultado, visualizado en la Figura 21, Tabla 18 y Tabla 19.

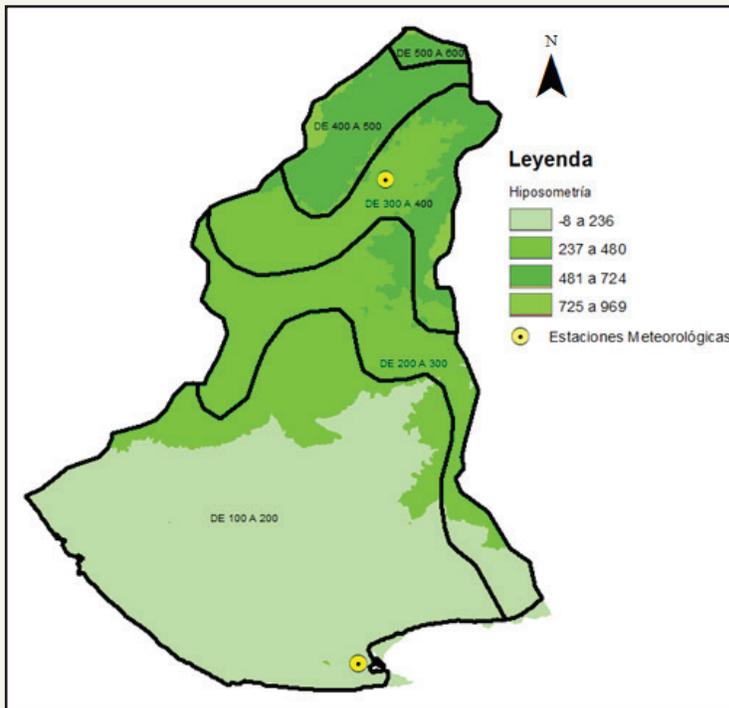


Figura 21. Primer intento de delimitación de cuencas WEAP

Tabla 18. Delimitación de la cuenca San Lucas por la estación “Cabo San Lucas”

| CLASES | MIN | MAX | PRECIPITACIÓN |
|--------|-----|-----|---------------|
| 1 | -8 | 236 | < 300 mm |
| 2 | 237 | 480 | < 300 mm |
| 3 | 481 | 724 | < 300 mm |
| 4 | 725 | 969 | < 300 mm |

Tabla 19. Delimitación de la cuenca San Lucas por la estación “El Sauzal”

| CLASES | MIN | MAX | PRECIPITACIÓN |
|--------|-----|-----|---------------|
| 1 | -8 | 236 | > 300 mm |
| 2 | 237 | 480 | > 300 mm |
| 3 | 481 | 724 | > 300 mm |
| 4 | 725 | 969 | > 300 mm |

En la Cuenca San Lucas fue utilizada la misma metodología descrita en la Cuenca Soto La Marina. Las siguientes tablas informativas, mapas y gráficas muestran los detalles de las estaciones seleccionadas.

Tabla 20 Estaciones de precipitación seleccionadas en la cuenca San Lucas.

| ID | NOMBRE | MUNICIPIO | AÑOS EFECTIVOS | LATITUD | LONGITUD | ALTITUD | DENTRO DE CUENCA WEAP (SÍ/NO) | % DE DATOS FALTANTES |
|------|----------------|-----------|----------------|---------|----------|---------|-------------------------------|----------------------|
| 3005 | CABO SAN LUCAS | LOS CABOS | 68.2 | 22.88 | -109.915 | 15 | SÍ | 11.3% |
| 3189 | EL SAUZAL | LOS CABOS | 16.32 | 23.05 | -109.915 | 420 | SÍ | 62.6% |

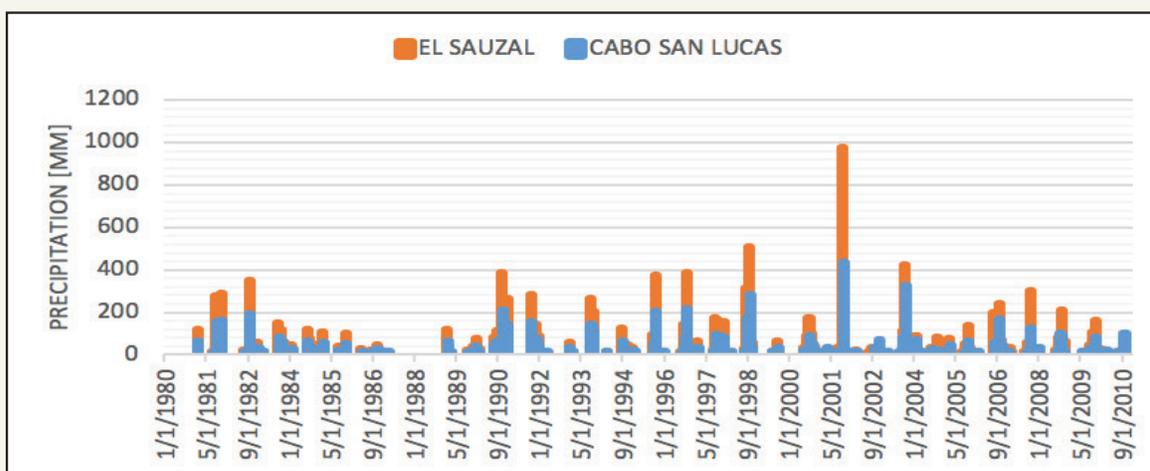


Figura 22. Precipitación mensual acumulada de la cuenca San Lucas por estación.

Para obtener los datos promedio de temperatura, se toma un promedio de la temperatura mínima mensual promedio y la temperatura máxima mensual promedio.

Tabla 21. Estaciones de Temperatura seleccionadas en la cuenca San Lucas.

| ID | NOMBRE | MUNICIPIO | AÑOS EFECTIVOS | LATITUD | LONGITUD | ALTITUD |
|------|----------------|-----------|----------------|---------|----------|---------|
| 3005 | CABO SAN LUCAS | LOS CABOS | 68.2 | 22.88 | -109.915 | 15 |
| 3189 | EL SAUZAL | LOS CABOS | 16.32 | 23.05 | -109.915 | 420 |

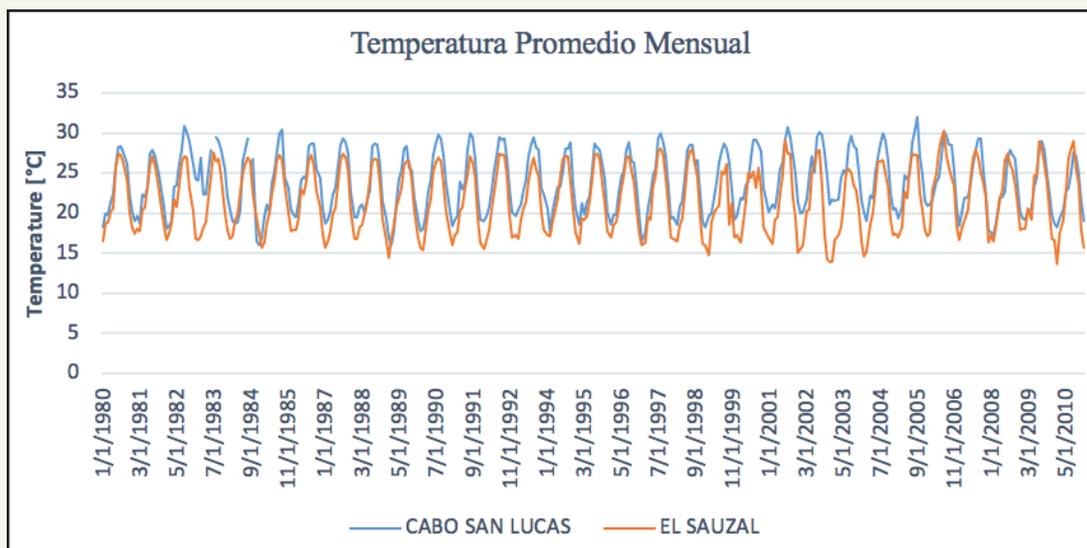


Figura 23. Temperatura Promedio Mensual de la cuenca San Lucas por estación.

Las diferentes entidades por uso de suelo y vegetación conforme a la INEGI para la cuenca San Lucas se presentan en el mapa de la Figura 24; la Tabla 22 y Tabla 23 muestran la distribución de suelo asignado por cuenca (a ser utilizado en el modelo WEAP).

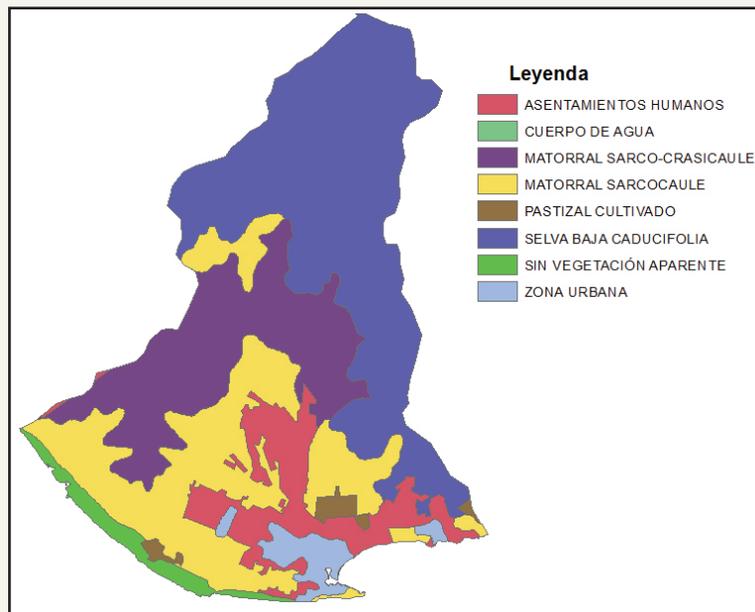


Figura 24. Las diferentes entidades de clasificación de uso de suelo y vegetación de INEGI en la cuenca San Lucas.

Tabla 22. Suelo asignado a la estación: "Cabo San Lucas".

| USO DE SUELO | Área Total[km ²] | CLASS1-2 [km ²] | CLASS3-4 [km ²] | Total [km ²] | %Área Total |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| ASENTAMIENTO HUMANO | 27.5 | 27.5 | 0 | 27.5 | 13.31% |
| CUERPO DE AGUA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| MATORRAL SARCOCAULE | 64.2 | 64.2 | 0 | 64.2 | 31.05% |
| MATORRAL SARCO-CRASICAULE | 55.1 | 55.1 | 0 | 55.1 | 26.66% |
| PASTIZAL CULTIVADO | 3.4 | 3.4 | 0 | 3.4 | 1.62% |
| SELVA BAJA CADUCIFOLIA | 42.6 | 39 | 3.6 | 42.6 | 20.60% |
| SIN VEGETACIÓN APARENTE | 6.5 | 6.5 | 0 | 6.5 | 3.16% |
| ZONA URBANA | 7.4 | 7.4 | 0 | 7.4 | 3.59% |
| TOTAL | 206.7 | 203.1 | 3.6 | 206.7 | 100.00% |

Tabla 23. Suelo asignado a la estación "El Sauzal"

| USO DE SUELO | Área Total[km ²] | CLASS1-2 [km ²] | CLASS3-4 [km ²] | Total [km ²] | %Área Total |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|
| ASENTAMIENTO HUMANO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| CUERPO DE AGUA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| MATORRAL SARCOCAULE | 0.76 | 0.76 | 0 | 0.76 | 1.23% |
| MATORRAL SARCO-CRASICAULE | 0.04 | 0.04 | 0 | 0.04 | 0.07% |
| PASTIZAL CULTIVADO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| SELVA BAJA CADUCIFOLIA | 60.60 | 25.02 | 35.58 | 60.60 | 98.70% |
| SIN VEGETACIÓN APARENTE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| ZONA URBANA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.00% |
| TOTAL | 61.40 | 25.82 | 35.58 | 61.40 | 100.00% |

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior se presentan en la figura 25 y se resumen en la Tabla 24 (en el Anexo 2 se presentan en detalle las demandas de agua tal como fueron utilizadas en el modelo WEAP).

Tabla 24. Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m³] |
|---------------------------|--------------------|
| PÚBLICO URBANO/ DOMÉSTICO | 783 |
| GANADERÍA | 40,044 |
| AGRICULTURA | 9,600 |

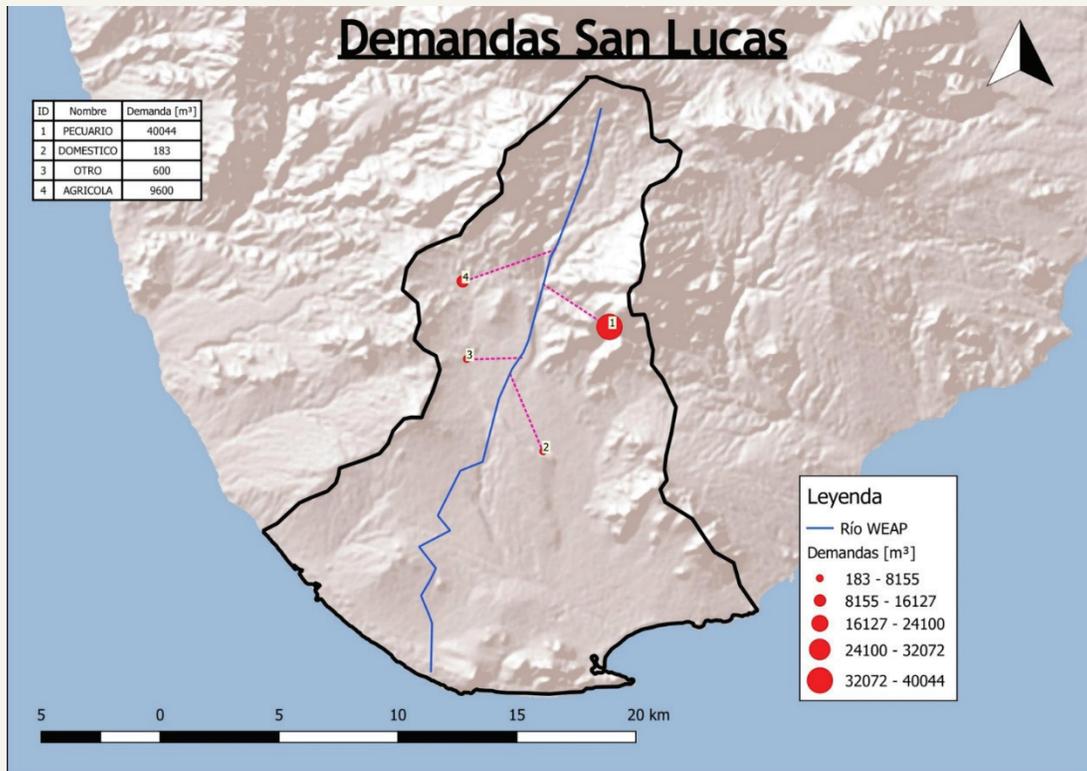


Figura 25. Principales sitios de demanda para los diferentes usos de agua en cada cuenca WEAP de la RH San Lucas.

Esta cuenca no tiene una estación pluviométrica, por lo tanto, se utilizó una estación simulada. Los datos para esta estación fueron proporcionados por WWF-México y se localizó al final de la cuenca (como captura de pantalla en WEAP).

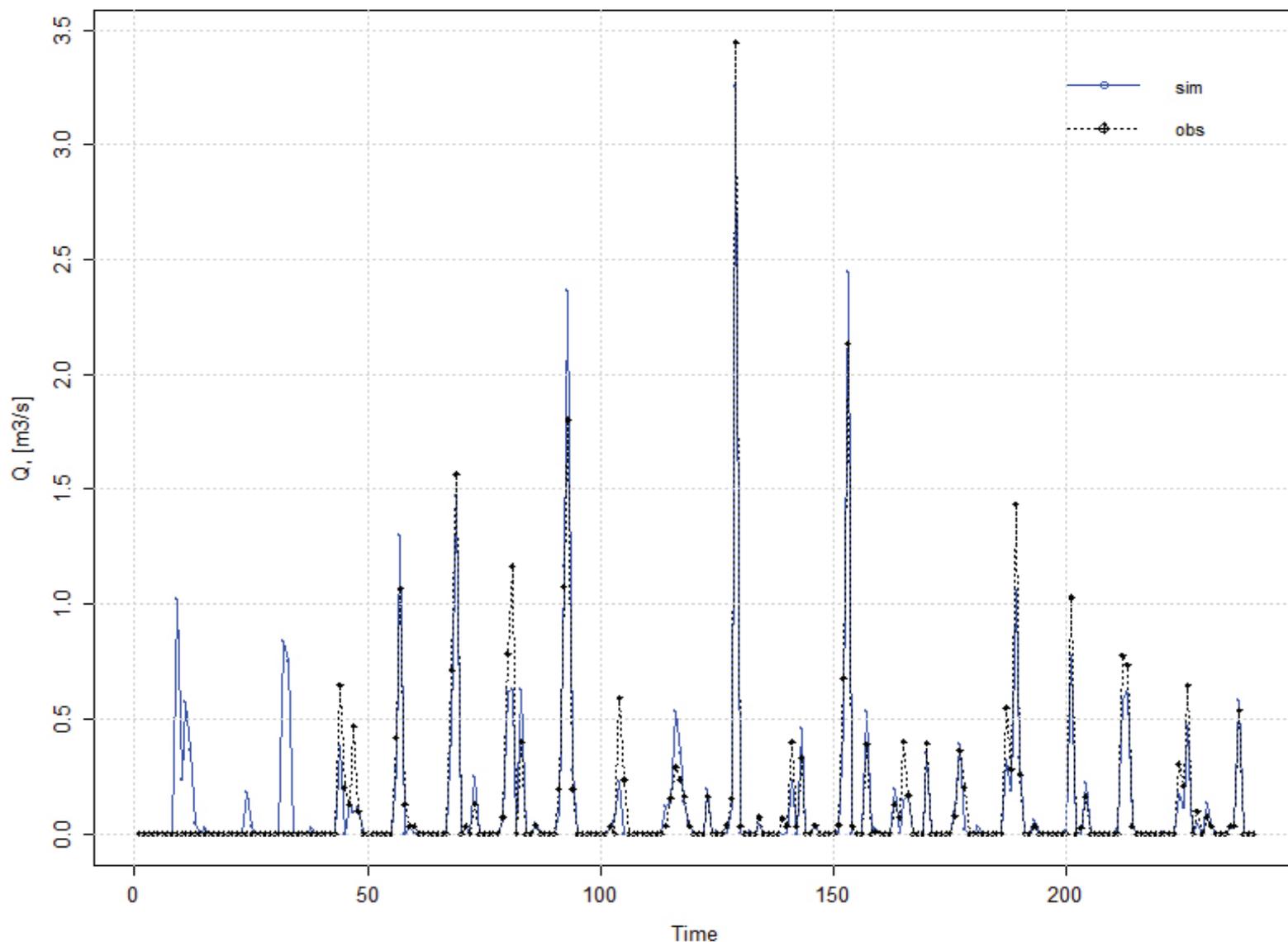
Los detalles y valores de desempeño se muestran en la tabla 25. La hidrografía de la estación, mostrando las simulaciones relacionadas con los datos proporcionados, se presenta en la figura 26, para el periodo de enero de 1993 a diciembre de 2010.

Tabla 25 Valores de desempeño del modelo WEAP en San Lucas.

| Código | Nombre de Estación | Río | Latitud | Longitud | R² | NSE |
|--------|--------------------|---------------|---------|----------|------|------|
| - | Simulada | Río San Lucas | - | - | 0.85 | 0.84 |

Puede aprobarse el desempeño general del modelo ya que la estación simulada, localizada en la salida de la cuenca, tiene un muy buen desempeño. Su simulación con respecto a los valores simulados proporcionados se muestra en la figura 26.

Observations vs Simulations



GoF's:

| |
|--------------|
| ME = 0 |
| MAE = 0.05 |
| RMSE = 0.14 |
| NRMSE = 39.6 |
| PBIAS = 3.1 |
| RSR = 0.4 |
| rSD = 1.02 |
| NSE = 0.84 |
| mNSE = 0.71 |
| rNSE = NaN |
| d = 0.96 |
| md = 0.86 |
| rd = NaN |
| r = 0.92 |
| R2 = 0.85 |
| bR2 = 0.81 |
| KGE = 0.91 |
| VE = 0.57 |

Figura 26. Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación simulada, para el periodo de (01/1993 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

2.2.3. Región hidrográfica Presidio San Pedro

La región hidrográfica Presidio San Pedro, con el Río San Pedro Mezquital como su río principal, está conformada por las siguientes cuencas, descritas en la tabla 26 y visualizadas en el mapa de la figura 27. Las cuencas principales se sitúan en el nacimiento del Río San Pedro Mezquital, que fluye aguas abajo hasta el Océano Pacífico.

Tabla 26 Las cuencas oficiales de la RH Presidio San Pedro

| ID_2013 | NOMBRE | ÁREA (HA) | DESCRIPCIÓN |
|---------|-----------------------------|-----------|--|
| 206 | RIO LA SAUCEDA | 248876 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO LA SAUCEDA HASTA LA PRESA PEÑA DEL ÁGUILA. |
| 224 | RIO DURANGO | 214940 | DESDE LAS PRESAS PEÑA DEL ÁGUILA, GUADALUPE VICTORIA Y CONFLUENCIA DEL RIO SANTIAGO BAYACORA HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO PAONAS. |
| 225 | RIO EL TUNAL | 181894 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO EL TUNAL HASTA LA PRESA GUADALUPE VICTORIA. |
| 234 | RIO POANAS | 149501 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO POANAS HASTA LA PRESA FRANCISCO VILLA. |
| 236 | RIO SAN PEDRO-MEZQUITAL | 1162905 | DESDE LA CONFLUENCIA DE LOS RIOS DURANGO Y POANAS, GRASEROS Y SÚCHIL, LA EH VICENTE GUERRERO Y LA PRESA FRANCISCO VILLA HASTA LA EH SAN PEDRO. |
| 239 | RIO SANTIAGO BAYACORA | 108082 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO SANTIAGO BAYACORA HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO DURANGO. |
| 251 | RIO GRASEROS | 59897 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO GRASEROS HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO SÚCHIL. |
| 258 | RIO SÚCHIL | 180071 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO SÚCHIL HASTA LA EH VICENTE GUERRERO. |
| 338 | RIO SAN PEDRO-DESEMBOCADURA | 80818 | DESDE LA EH SAN PEDRO HASTA SU DESEMBOCADURA EN EL OCÉANO PACIFICO. |

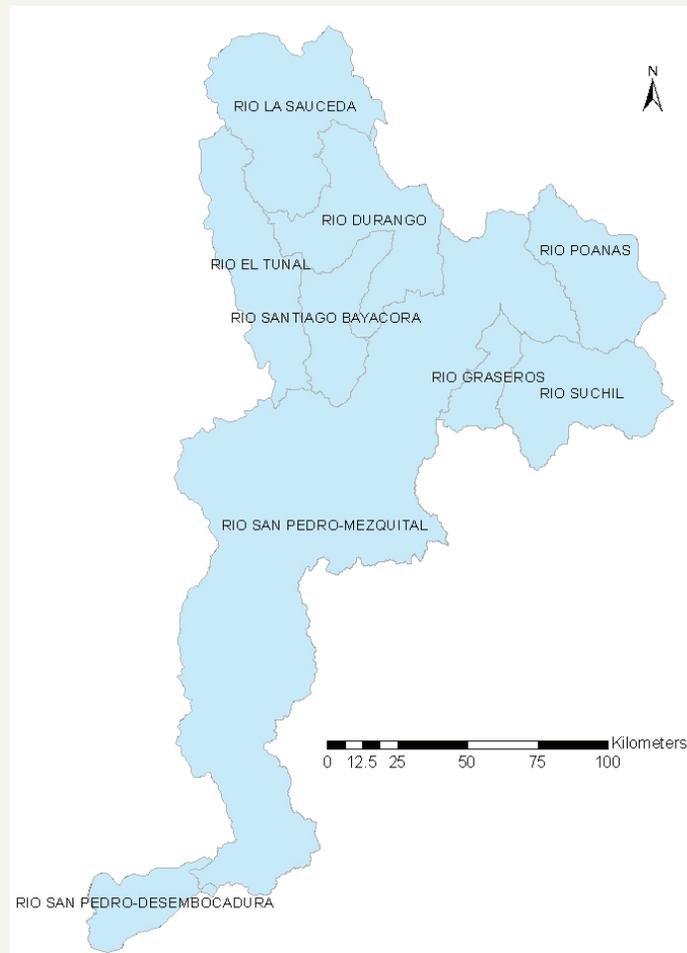


Figura 27. Las cuencas oficiales de la RH Presidio San Pedro.

Las cuencas WEAP se construyeron con la intersección de las cuencas oficiales con la clasificación de altitud cada 1000m, con los siguientes resultados (tabla 27, figura 28). Los puntos de interés (la infraestructura de presas y estaciones hidrométricas) se indican en la figura 28.

Tabla 27. Delimitación de las cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de altitud.

| ID | CLASE DEM | CUENCA | ÁREA (HA) |
|------------|------------|-----------------------------|-----------|
| SPDesemb_0 | 0-1000m | RIO SAN PEDRO-DESEMBOCADURA | 80400 |
| SPM_0 | 0-1000m | RIO SAN PEDRO-MEZQUITAL | 204657 |
| Dur_1000 | 1000-2000m | RIO DURANGO | 174233 |
| Gras_1000 | 1000-2000m | RIO GRASEROS | 10061 |
| Sauc_1000 | 1000-2000m | RIO LA SAUCEDA | 83063 |
| SPM_1000 | 1000-2000m | RIO SAN PEDRO-MEZQUITAL | 581797 |
| SBay_1000 | 1000-2000m | RIO SANTIAGO BAYACORA | 23232 |
| Such_1000 | 1000-2000m | RIO SÚCHIL | 5505 |
| Dur_2000 | 2000m+ | RIO DURANGO | 42600 |
| ElTun_2000 | 2000m+ | RIO EL TUNAL | 182914 |
| Gras_2000 | 2000m+ | RIO GRASEROS | 50121 |
| Sauc_2000 | 2000m+ | RIO LA SAUCEDA | 166771 |
| Poa_2000 | 2000m+ | RIO POANAS | 150116 |
| SPM_2000 | 2000m+ | RIO SAN PEDRO-MEZQUITAL | 382163 |
| SBay_2000 | 2000m+ | RIO SANTIAGO BAYACORA | 85952 |
| Such_2000 | 2000m+ | RIO SÚCHIL | 175354 |

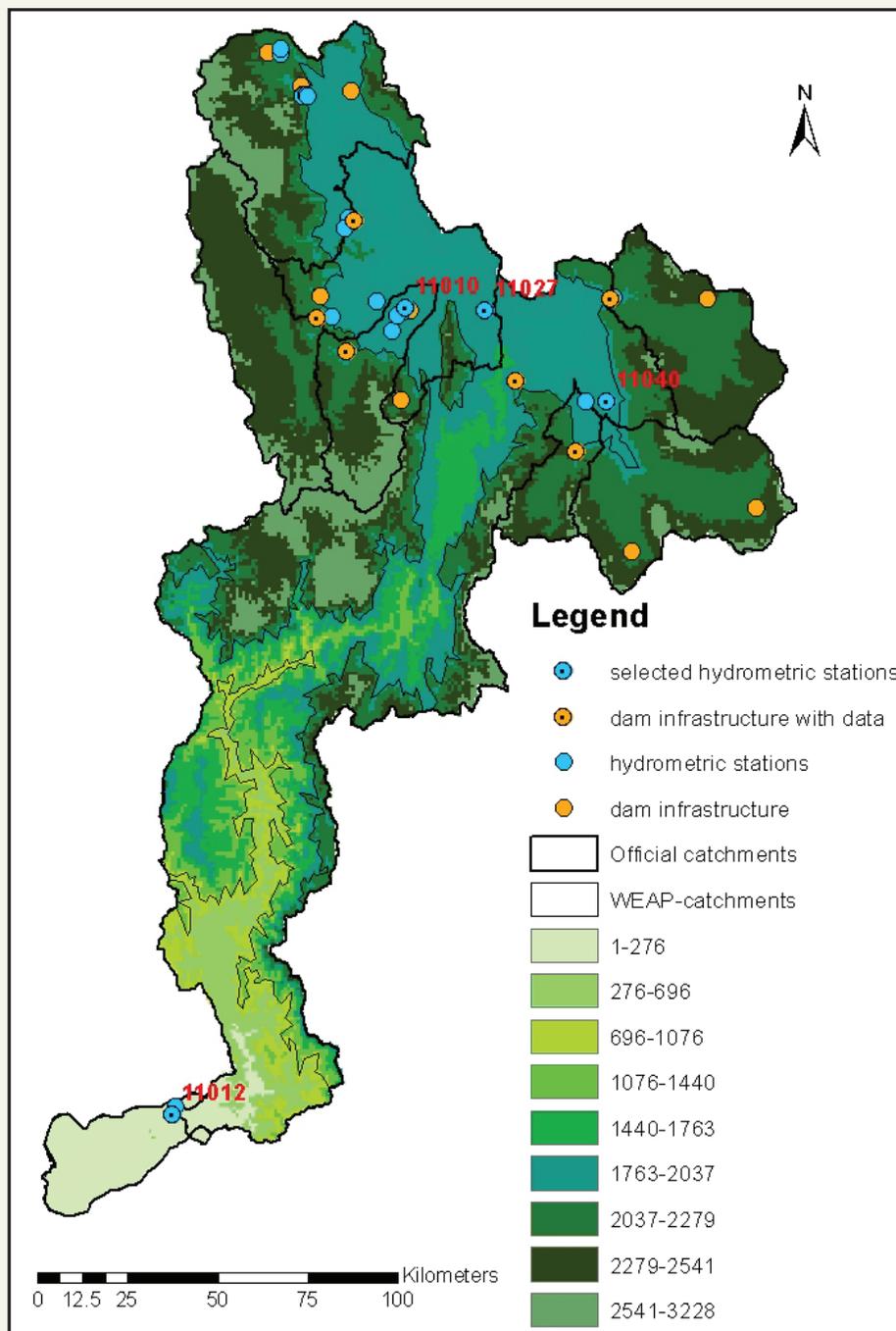


Figura 28. Delimitación de las cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de altitud.

La selección de las series temporales representativas de precipitación y temperatura resultaron en las mismas estaciones de medición; su localización se muestra en el mapa de la figura 29. En las siguientes tablas, mapas y gráficas informativas, se muestra la climatología y acumulación anual o promedios, respectivamente para la precipitación y temperatura, de las estaciones seleccionadas.

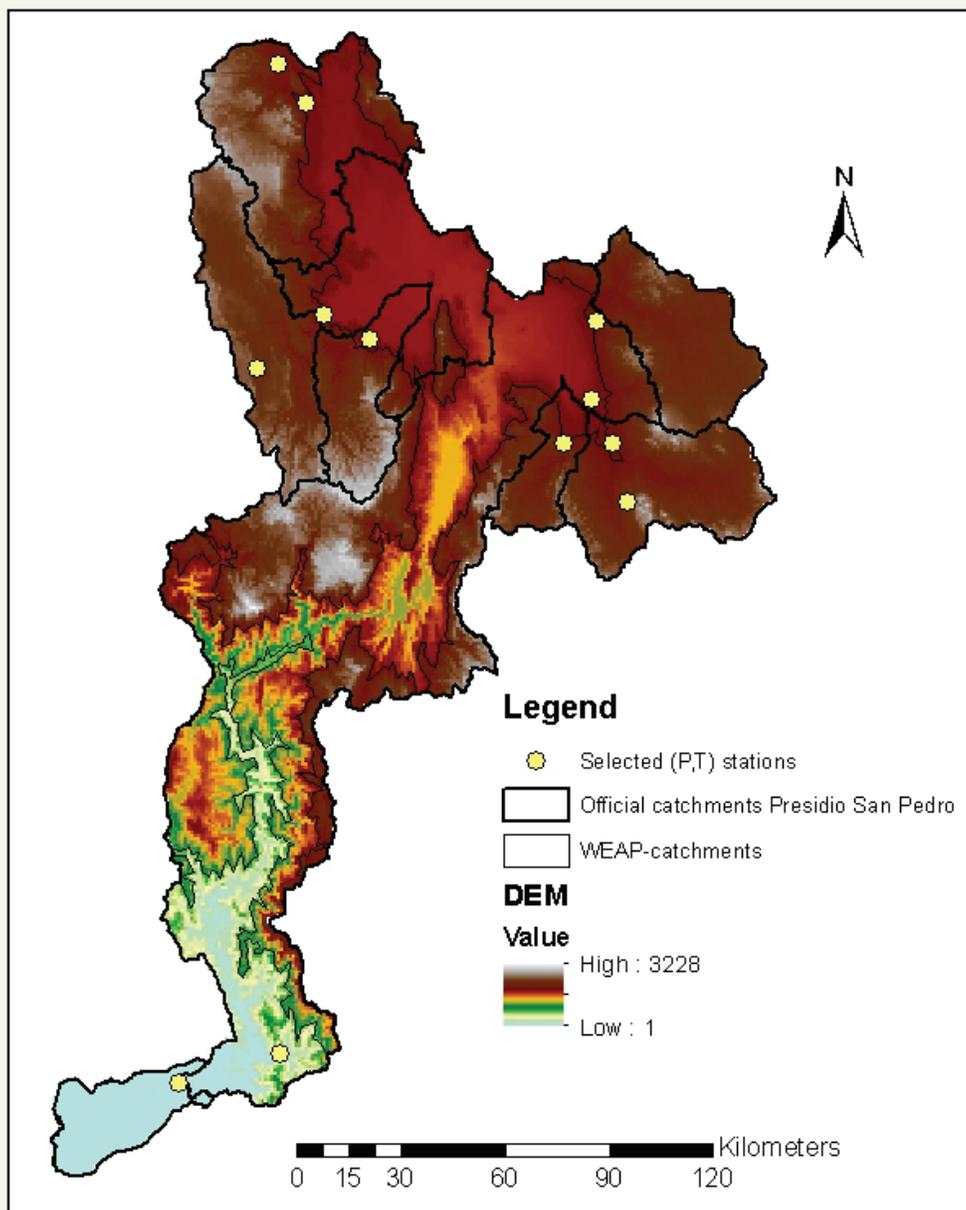


Figura 29 Estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas en la RH Presidio San Pedro.

Tabla 28. Estaciones seleccionadas de Precipitación y Temperatura para las diversas cuencas WEAP en la RH Presidio San Pedro, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes.

| Cuenca WEAP | ID de Estación | Nombre de Estación | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (SÍ/NO) | % de Datos Faltantes |
|-------------|----------------|---------------------|---------|----------|-------------------------------|----------------------|
| SPDesemb_0 | 18032 | SAN PEDRO | 21.96 | -105.14 | SÍ | 6.99 |
| SPM_0 | 18085 | EL NARANJO | 22.03 | -104.86 | SÍ | 4.30 |
| Dur_1000 | 10023 | EL PUEBLITO | 23.96 | -104.75 | SÍ | 4.30 |
| Gras_1000 | 10057 | PRESA SANTA ELENA | 23.63 | -104.05 | SÍ | 9.41 |
| Sauc_1000 | 10090 | CANATLAN (DGE) | 24.52 | -104.80 | SÍ | 11.29 |
| SPM_1000 | 10088 | VICENTE GUERRERO | 23.74 | -103.98 | SÍ | 24.19 |
| SBay_1000 | 10076 | SANTIAGO BAYACORA | 23.90 | -104.61 | SÍ | 24.19 |
| Such_1000 | 10081 | SÚCHIL | 23.62 | -103.93 | SÍ | 4.30 |
| Dur_2000 | 10088 | VICENTE GUERRERO | 23.74 | -103.98 | NO | 11.29 |
| ElTun_2000 | 10103 | SANTA BÁRBARA (DGE) | 23.82 | -104.93 | SÍ | 11.02 |
| Gras_2000 | 10088 | VICENTE GUERRERO | 23.74 | -103.98 | NO | 11.02 |
| Sauc_2000 | 10022 | EL PINO | 24.62 | -104.86 | SÍ | 26.61 |
| Poa_2000 | 10088 | VICENTE GUERRERO | 23.74 | -103.98 | NO | 6.99 |
| SPM_2000 | 10047 | NARCISO MENDOZA | 239.4 | -103.97 | SÍ | 4.30 |
| SBay_2000 | 10088 | VICENTE GUERRERO | 23.74 | -103.98 | NO | 4.30 |
| Such_2000 | 32065 | CHALCHIHUITES (SMN) | 23.47 | -103.88 | SÍ | 9.41 |

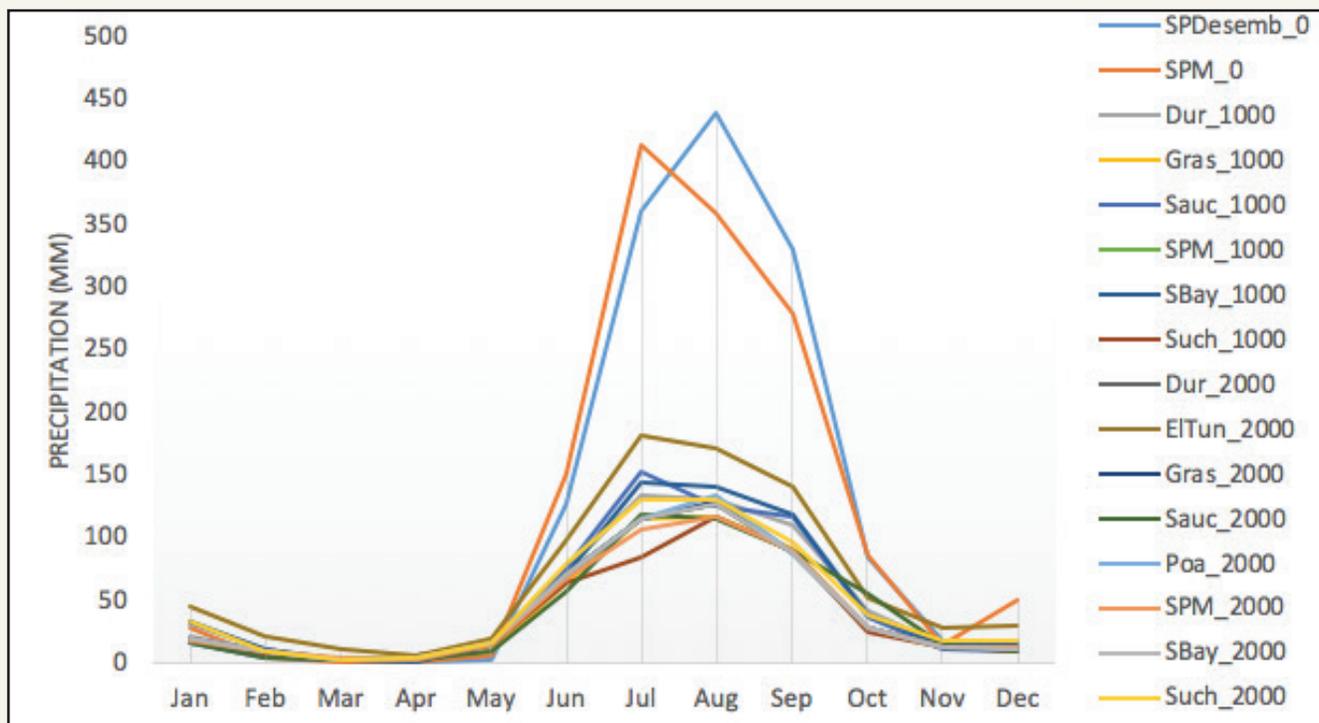


Figura 30. La climatología mensual de las estaciones de precipitación seleccionadas para cada cuenca WEAP.

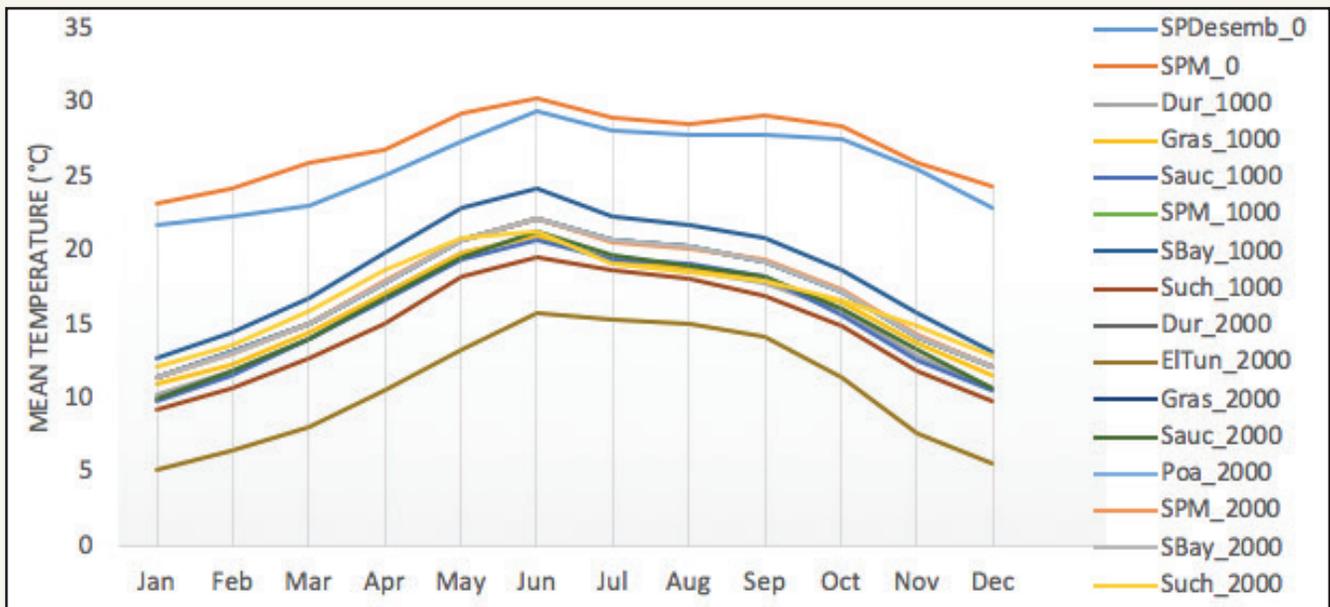


Figura 31. La climatología mensual de las estaciones de temperatura seleccionadas para cada cuenca WEAP.

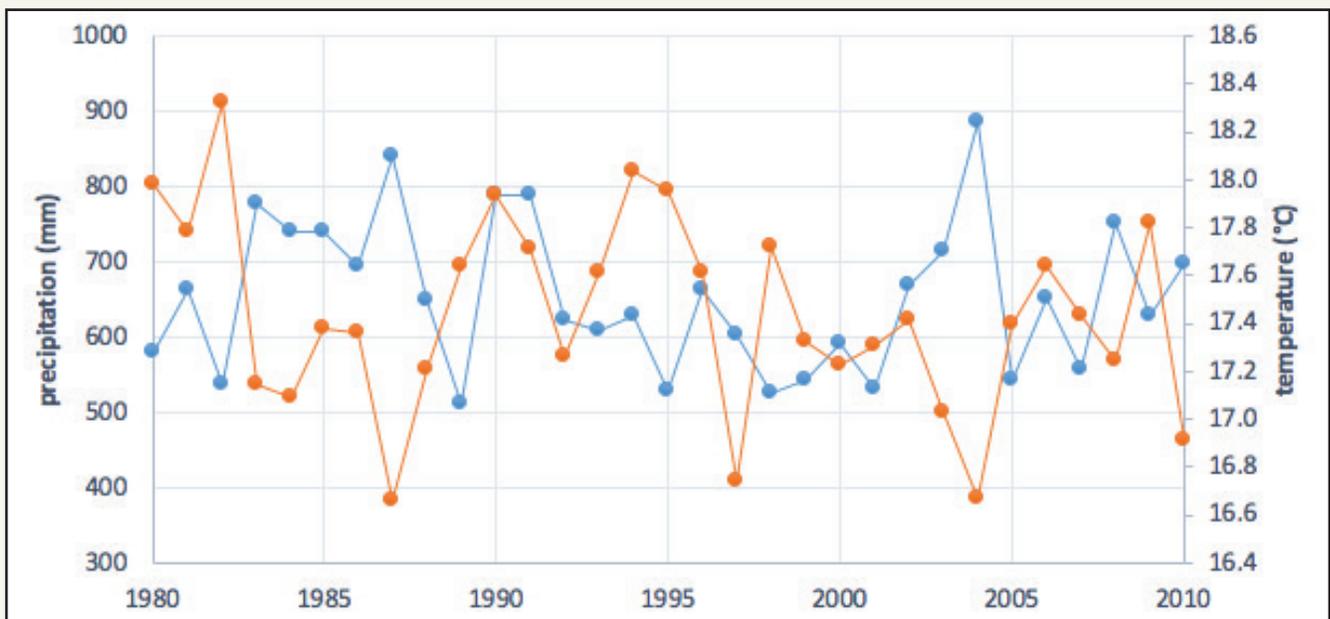


Figura 32. Precipitación anual acumulada (azul) y temperatura mensual promedio (naranja) de todas las cuencas WEAP en la RH Presidio San Pedro.

En el siguiente mapa (figura 33), se visualizan las diferentes entidades de uso de suelo presentes en la RH Presidio San Pedro. La tabla 29 muestra los porcentajes de las entidades posibles dentro de cada cuenca WEAP, como datos de entrada para el modelo WEAP.

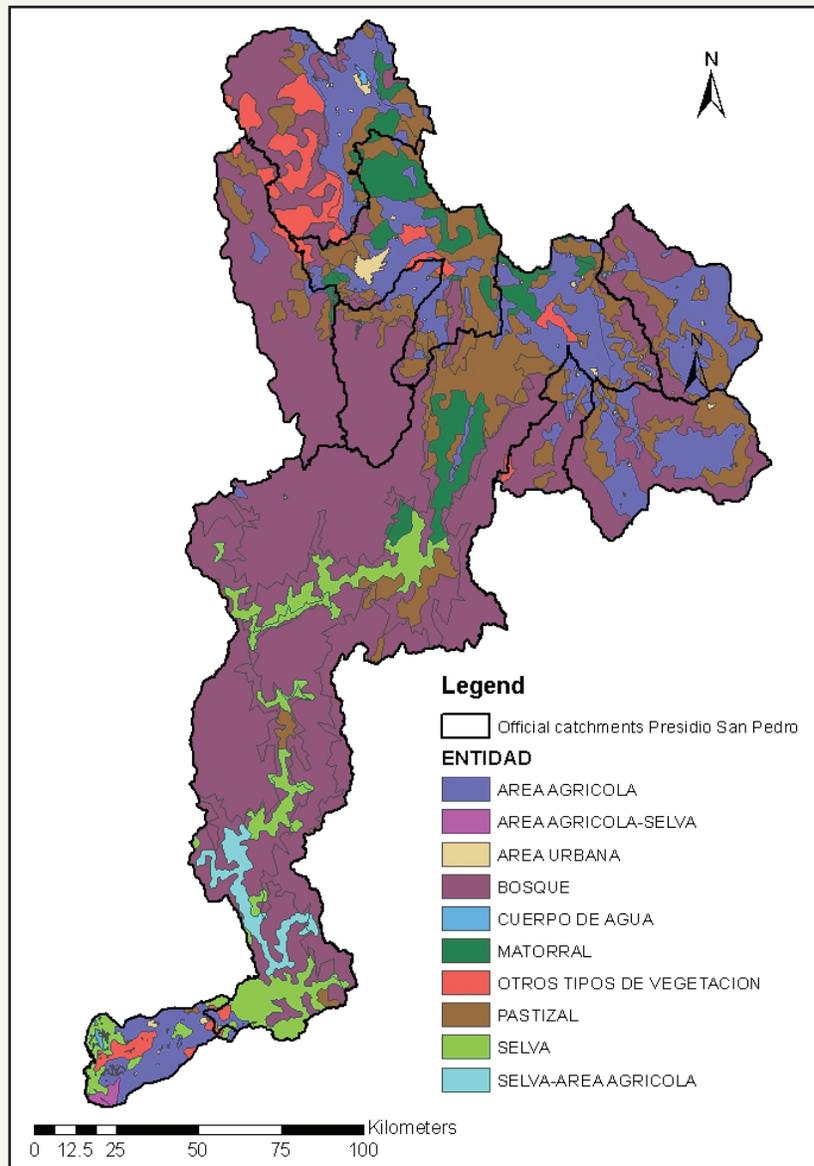


Figura 33. La RH Presidio San Pedro con la clasificación de las diferentes entidades de uso de suelo.

Tabla 29. La contribución (en %) de las diferentes entidades de uso de suelo a cada una de las cuencas WEAP.

| CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) | CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Dur_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 27.8 | Sbay_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 54.0 |
| | ÁREA URBANA | 7.0 | | ÁREA URBANA | 1.8 |
| | BOSQUE | 3.9 | | BOSQUE | 6.9 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.0 | | CUERPO DE AGUA | 0.2 |
| | MATORRAL | 24.6 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 6.0 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 4.0 | | PASTIZAL | 31.1 |
| | PASTIZAL | 32.7 | | Sbay_2000 | BOSQUE |
| Dur_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.3 | CUERPO DE AGUA | | 0.4 |
| | ÁREA URBANA | 0.1 | MATORRAL | | 0.0 |
| | BOSQUE | 41.7 | PASTIZAL | 6.4 | |
| | MATORRAL | 4.5 | SPDesemb_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 52.6 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 7.5 | | ÁREA AGRÍCOLA-SELVA | 5.0 |
| | PASTIZAL | 37.9 | | ÁREA URBANA | 3.5 |
| EITun_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 2.8 | | CUERPO DE AGUA | 3.0 |
| | ÁREA URBANA | 0.0 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 13.7 |
| | BOSQUE | 80.9 | | PASTIZAL | 0.8 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.2 | SELVA | 21.3 | |
| | MATORRAL | 1.0 | SPM_0 | ÁREA AGRÍCOLA | 1.4 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 3.4 | | ÁREA URBANA | 0.0 |
| | PASTIZAL | 11.7 | | BOSQUE | 48.8 |
| Gras_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 76.0 | | CUERPO DE AGUA | 0.0 |
| | ÁREA URBANA | 4.2 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 1.0 |
| | BOSQUE | 0.5 | | PASTIZAL | 3.2 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.3 | | SELVA | 30.9 |
| | PASTIZAL | 19.0 | SELVA-ÁREA AGRÍCOLA | 14.7 | |
| Gras_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.1 | SPM_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 10.4 |
| | BOSQUE | 68.0 | | ÁREA URBANA | 0.3 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.3 | | | 54.9 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 2.6 | | MATORRAL | 10.0 |
| | PASTIZAL | 21.0 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.9 |
| Poa_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 41.5 | | PASTIZAL | 14.6 |
| | ÁREA URBANA | 0.9 | | SELVA | 8.7 |
| | BOSQUE | 32.9 | SELVA-ÁREA AGRÍCOLA | 0.3 | |
| | CUERPO DE AGUA | 0.5 | SPM_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 3.8 |
| | MATORRAL | 0.1 | | ÁREA URBANA | 0.1 |
| | PASTIZAL | 24.1 | | BOSQUE | 85.0 |
| Sauc_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 61.0 | | MATORRAL | 0.5 |
| | ÁREA URBANA | 2.7 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 0.2 |
| | BOSQUE | 4.6 | | PASTIZAL | 10.3 |
| | CUERPO DE AGUA | 1.7 | | SELVA | 0.0 |
| | MATORRAL | 9.8 | Such_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 49.2 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 3.3 | | ÁREA URBANA | 2.7 |
| | PASTIZAL | 16.9 | | BOSQUE | 10.0 |
| Sauc_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.2 | PASTIZAL | 38.1 | |
| | ÁREA URBANA | 0.0 | Such_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 34.4 |
| | BOSQUE | 48.1 | | ÁREA URBANA | 0.3 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.1 | | BOSQUE | 40.6 |
| | MATORRAL | 3.5 | | CUERPO DE AGUA | 0.0 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 29.9 | | PASTIZAL | 24.6 |
| | PASTIZAL | 10.2 | | | |

Con respecto a la infraestructura de presas, la ubicación de los diversos embalses en la región hidrográfica Presidio San Pedro se muestra en el mapa de la figura 28.

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior se muestran en el mapa esquemático WEAP en la figura 34 y resumidos en la Tabla 30 (en el Anexo 2 se presentan las demandas de agua detalladas tal como son utilizadas en el modelo WEAP).

Tabla 30 Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m ³] |
|----------------------------|---------------------------------|
| PÚBLICO URBANO / DOMÉSTICO | 45,344,303 |
| GANADERÍA | 1,075,979 |
| AGRICULTURA | 67,079,537 |
| ACUACULTURA | 630,720 |
| INDUSTRIAL | 6,222 |
| SERVICIOS | 10,838,356 |

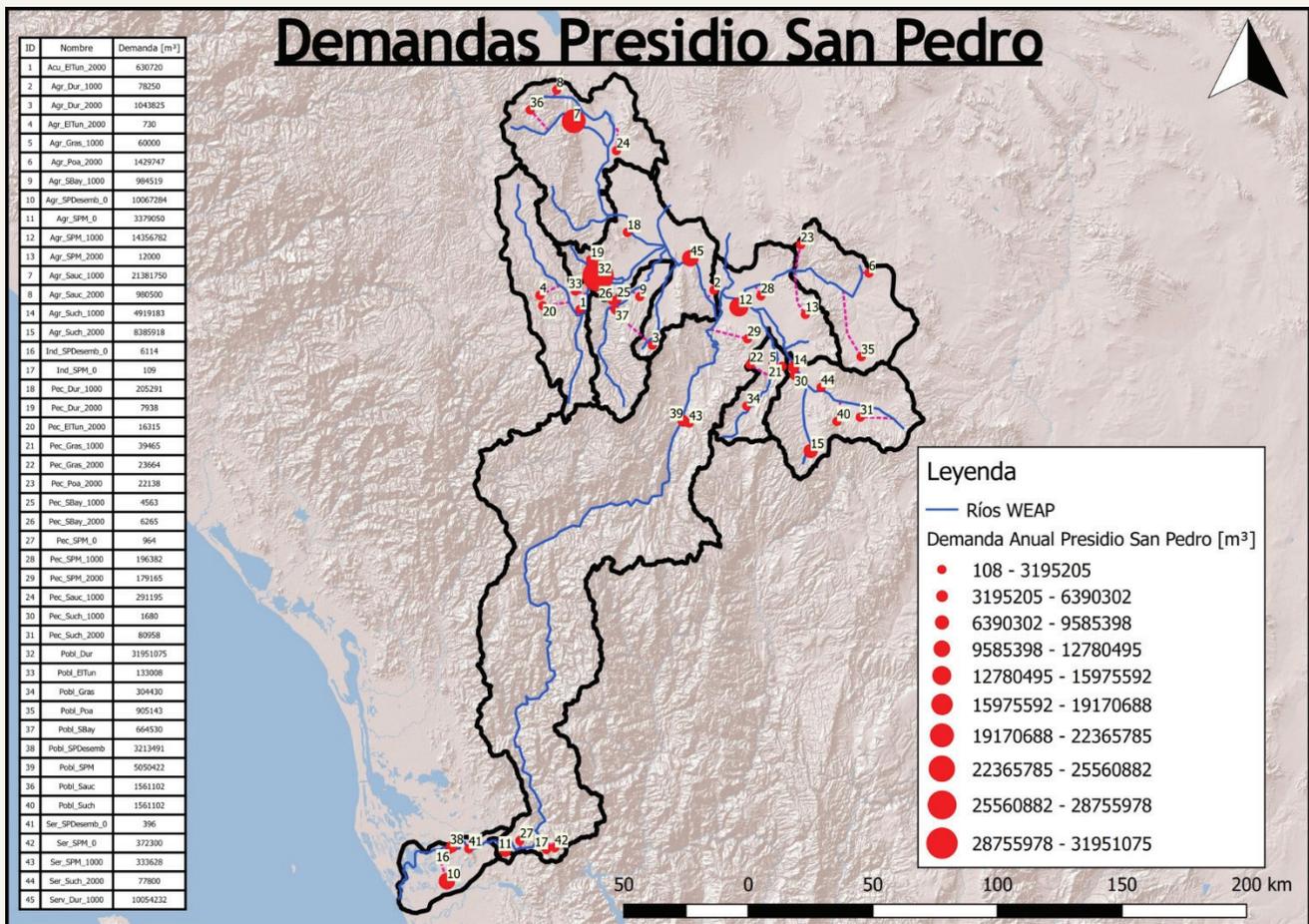


Figura 34 Sitios de demanda principales para los diferentes usos de agua en cada cuenca WEAP en la RH Presidio San Pedro.

Cuatro estaciones de descarga, distribuidas en toda la región hidrográfica, fueron seleccionadas para la evaluación de la calibración del modelo WEAP. Sus detalles y valores de desempeño se muestran en la tabla 31. La hidrografía de cada estación, mostrando simulaciones relacionadas con observaciones, se presentan en las figuras 35-38 para el periodo de enero de 1980 a diciembre de 2010.

Tabla 31 Las estaciones de descarga seleccionadas para la evaluación de desempeño de la calibración del modelo WEAP en Presidio San Pedro.

| Código | Nombre de Estación | Caudal | Latitud | Longitud | % de Datos Faltantes | R ² | NSE |
|--------|--------------------|-----------------------|-----------|----------|----------------------|----------------|------|
| 11010 | REFUGIO SALCIDO | RIO SANTIAGO BAYACORA | -104.5167 | 23.9833 | 9.68 | 0.43 | 0.41 |
| 11012 | SAN PEDRO | RIO SAN PEDRO | -105.1500 | 21.9667 | 0.81 | 0.71 | 0.71 |
| 11027 | EL SALTITO | RIO DURANGO | -104.3017 | 23.9767 | 22.58 | 0.47 | -0.1 |
| 11040 | VICENTE GUERRERO | RIO SÚCHIL | -103.9703 | 23.7467 | 11.02 | 0.52 | 0.5 |

Varias estaciones hidrométricas no dieron buenos resultados en las simulaciones porque están directamente influenciadas por embalses de los cuales no se proporcionaron volúmenes observados o datos de caudal de salida. Adicionalmente, la falta de información de la localización específica del suministro de cada sitio de demanda resultó en un bajo desempeño de simulación de las estaciones más centralmente posicionadas en la cuenca. Por ejemplo, la estación 11027 'El Saltito' resultó en un valor NSE bajo debido a la ausencia irregular de caudales pico (Figura 35), lo cual no pudo vincularse a la variación climática. Este comportamiento hidrográfico puede explicarse probablemente por una ausencia en el conocimiento de los requerimientos de caudal y restricciones operativas de los embalses.

Otros factores de incertidumbre de las simulaciones dentro de las cuencas puede ser la falta de información acerca de la distribución de los escurrimientos entre el nacimiento de los afluentes considerados para los ríos principales, la simplificación en la demanda por diferentes usos de agua, no contemplar las eficiencias de distribución, caudales de retorno, uso de aguas subterráneas, etc.

Independientemente de estas simplificaciones, se observan resultados satisfactorios en varias cuencas, como la estación 11010 'Refugio Salcido' que cubre la cuenca Santiago Bayacora y la estación 11040 'Vicente Guerrero' que representa la cuenca Súchil.

Puede aprobarse el desempeño general del modelo ya que la estación 11012 'San Pedro', localizada a la salida de la región hidrográfica, tiene un desempeño de aceptable a muy bueno. Su simulación con respecto a los valores de observación se muestra en la figura 36.

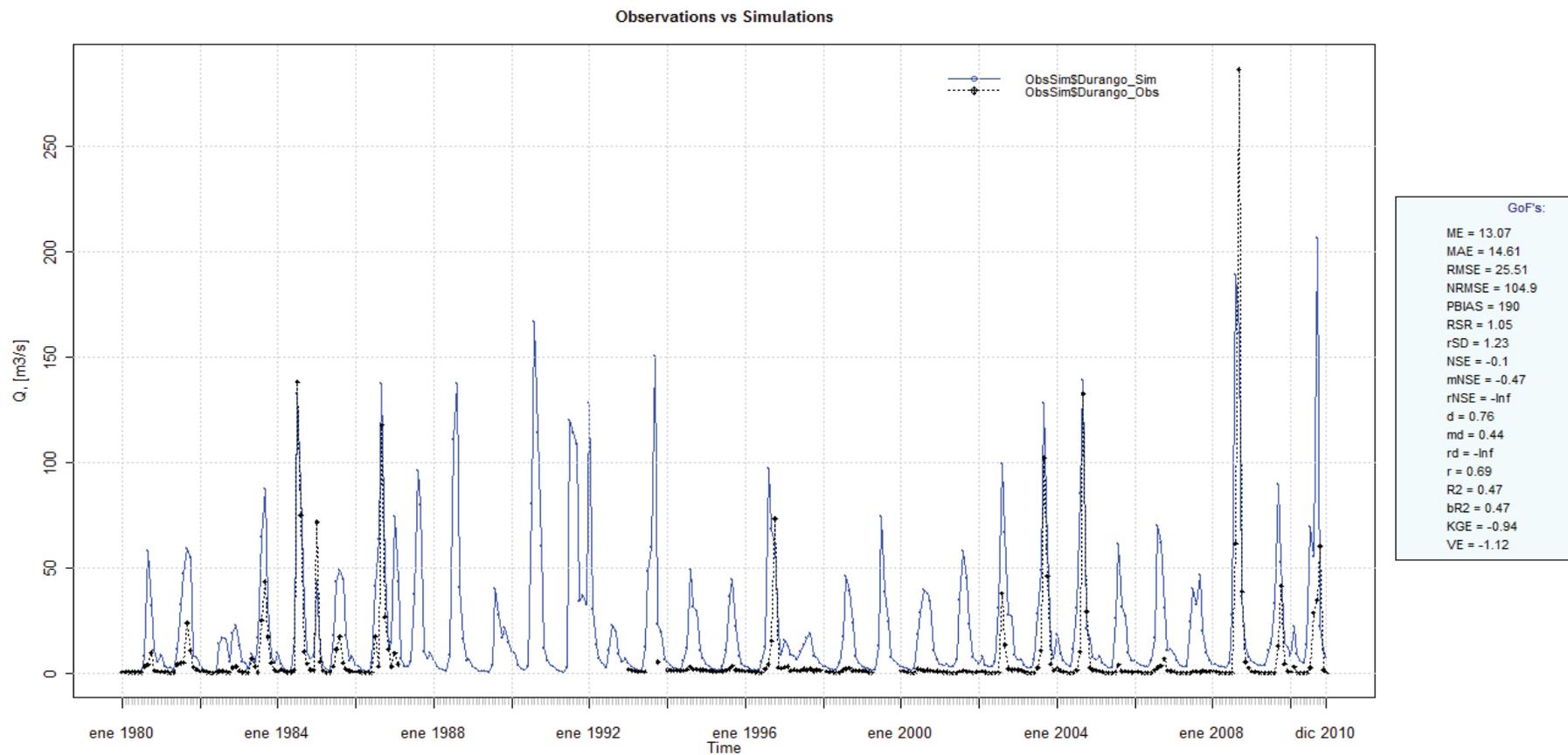


Figura 35. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 11027 'El Saltito', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

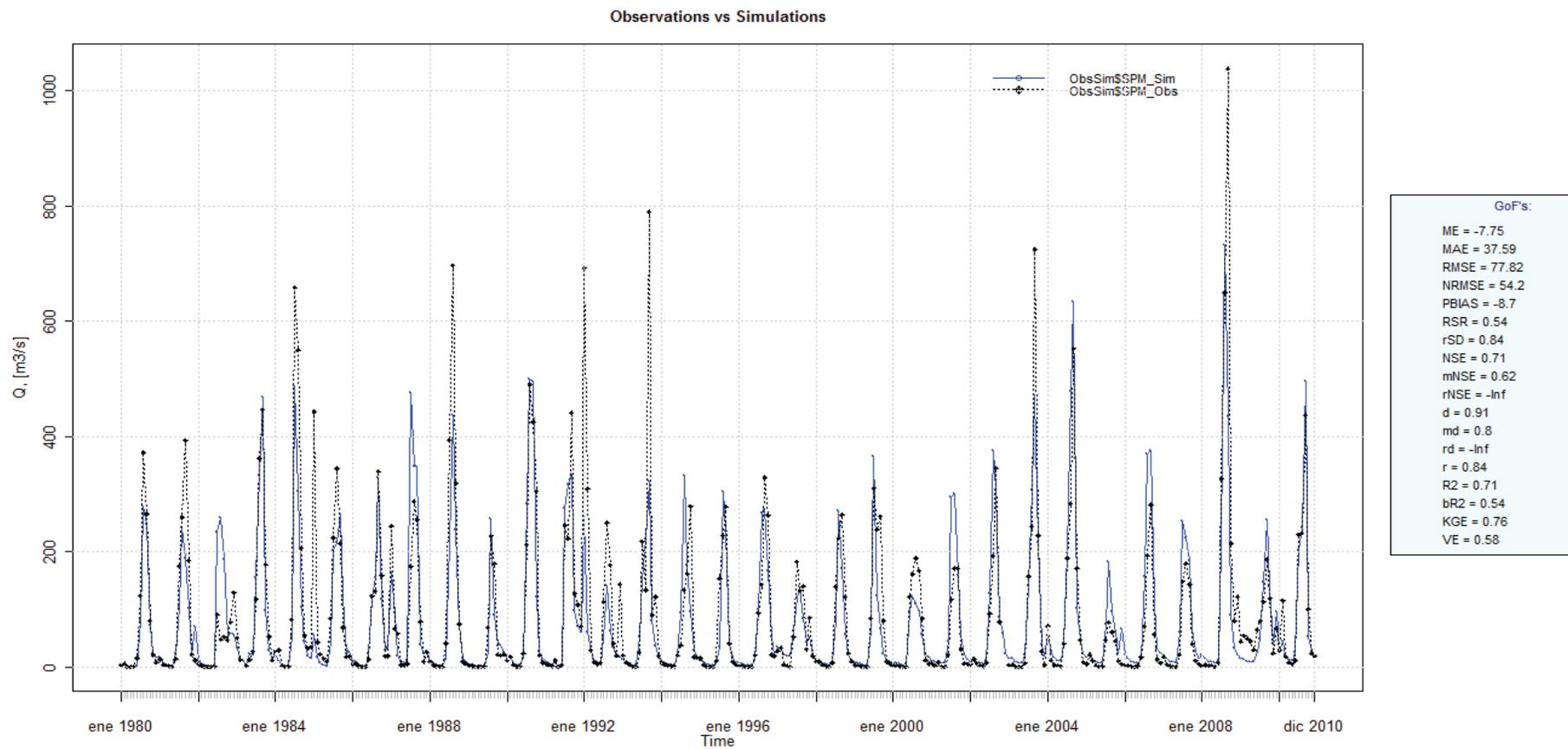


Figura 36. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 11012 'San Pedro', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

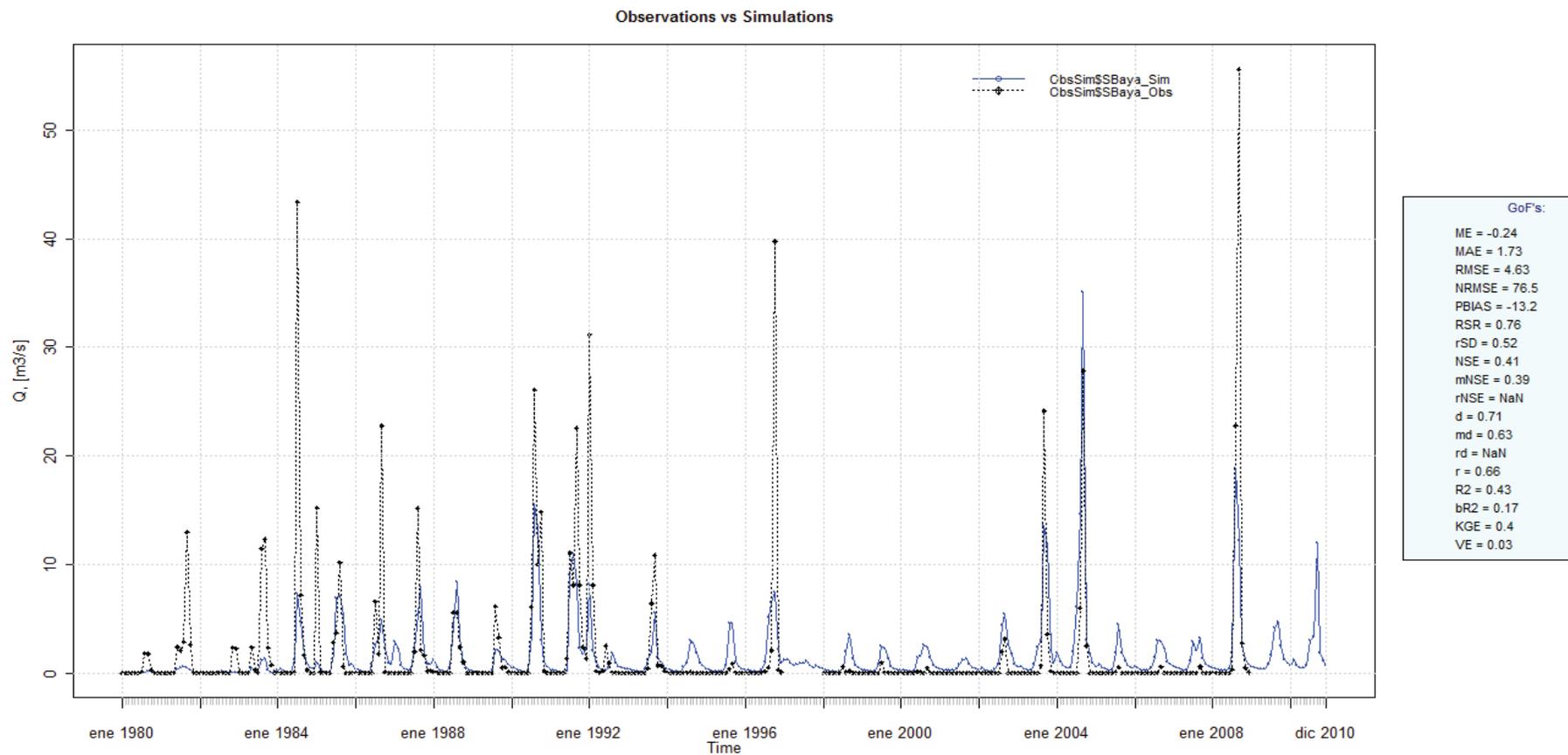


Figura 37. Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 11010 'Refugio Salcido', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

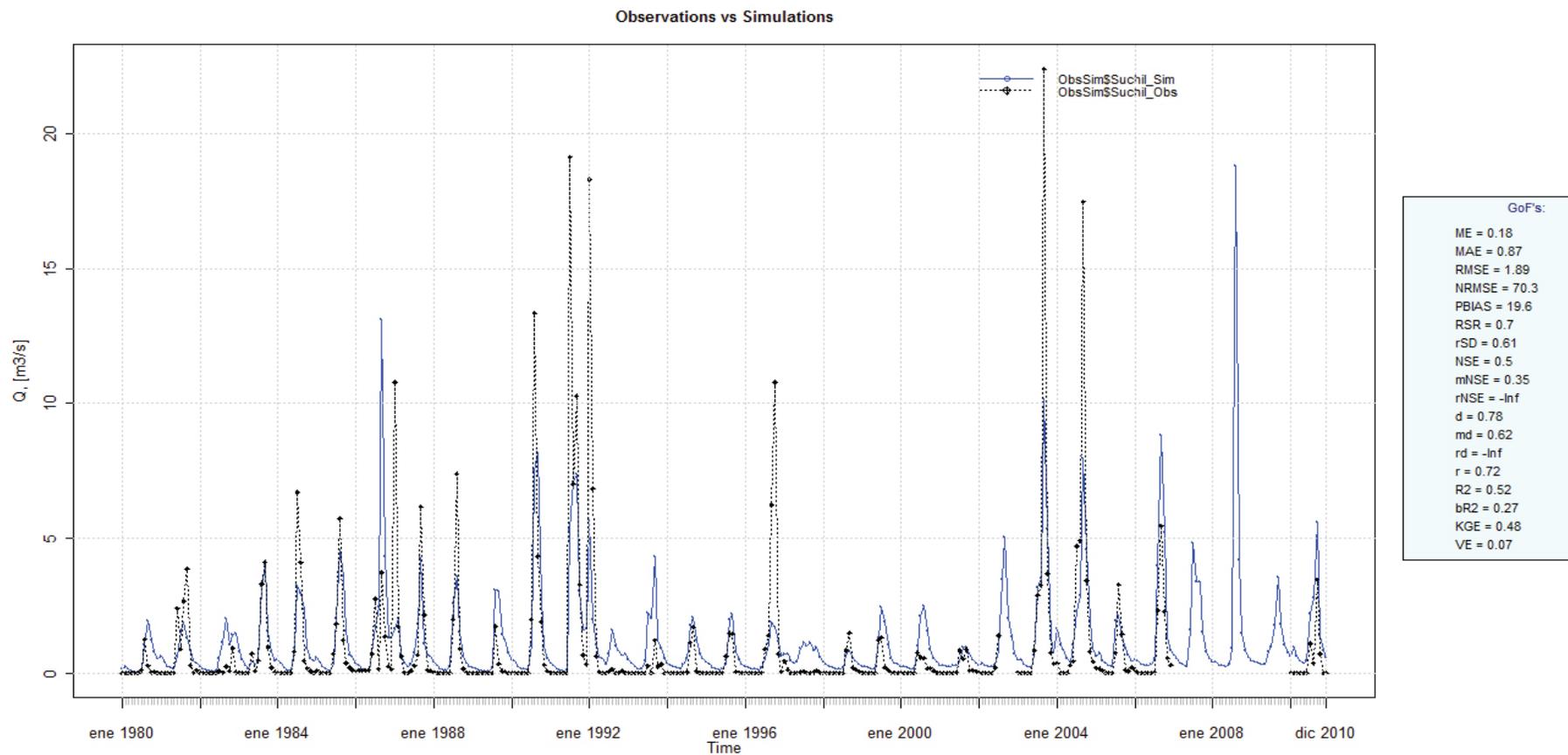


Figura 38. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 11040 'Vicente Guerrero', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

2.2.4. Región hidrográfica Coatzacoalcos

La región hidrográfica de Coatzacoalcos está situada en la parte sureste del país. Cubre 215,66 km² y está conformada por las cuencas descritas en la Tabla 32 y visualizadas en la figura 39.

Tabla 32 Las cuencas oficiales de la región hidrográfica Coatzacoalcos.

| ID_2013 | Nombre | Área (ha) | Descripción |
|---------|---------------------------|-----------|---|
| 549 | BAJO RIO COATZACOALCOS | 371921 | DESDE LA EH LAS PERLAS HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO UXPANAPA. |
| 579 | ALTO RIO COATZACOALCOS | 1065250 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO COATZACOALCOS HASTA LA EH LAS PERLAS. |
| 541 | BAJO RIO UXPANAPA | 193831 | DESDE LA EH TIERRA MORADA HASTA SU CONFLUENCIA CON EL RIO COATZACOALCOS. |
| 532 | LLANURAS DE COATZACOALCOS | 30503 | DESDE LA CONFLUENCIA DEL RIO HUAZUNTLAN CON EL RIO COATZACOALCOS HASTA SU DESEMBOCADURA EN EL GOLFO DE MÉXICO. |
| 531 | RIO HUAZUNTLAN | 163534 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO HUAZUNTLAN HASTA SU CONFLUENCIA CON EL COATZACOALCOS Y DESDE LA CONFLUENCIA DE LOS RÍOS UXPANAPA Y COATZACOALCOS. |
| 569 | ALTO RIO UXPANAPA | 331556 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO UXPANAPA HASTA LA EH TIERRA MORADA. |

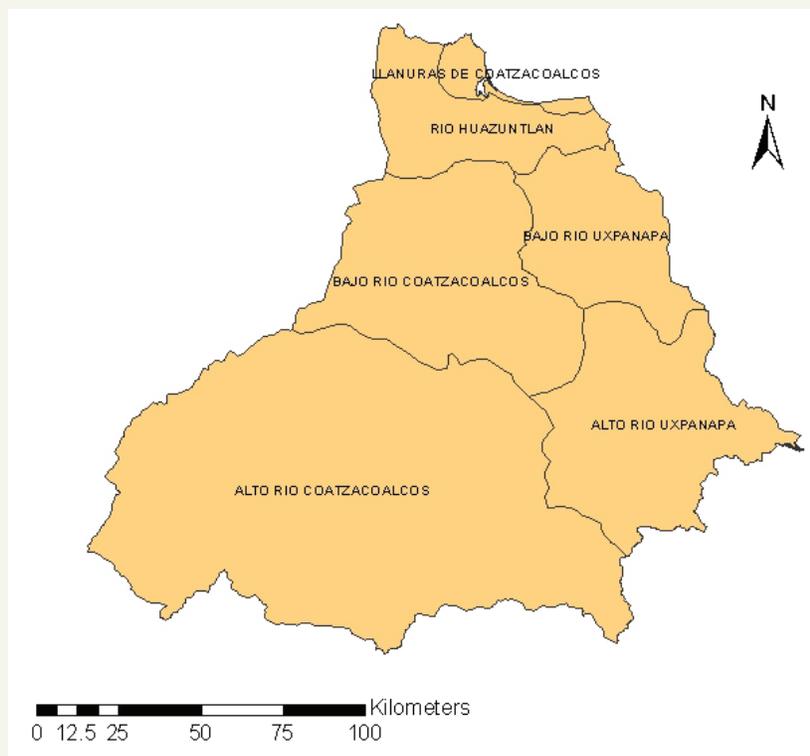


Figura 39 Las cuencas oficiales de la región hidrográfica Coatzacoalcos.

Debido al clima tropical y fuerte influencia tanto del Océano Pacífico y del Golfo de México, una relación lineal altitud-precipitación es menos relevante en esta área. Por esta razón se prefiere una clasificación isoyeta, intersectada por las cuencas oficiales de la región hidrográfica, para elaborar las cuencas WEAP. Un intervalo de 1000mm de precipitación por año se utiliza en la clasificación. Las cuencas WEAP resultantes se muestran en la tabla 33 y en el mapa de la figura 40.

Tabla 33. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de isoyetas.

| ID | Cuenca | Clase de isoyetas (mm/año) | Área (ha) |
|-----------|---------------------------|----------------------------|-----------|
| BCoa_2000 | BAJO RIO COATZACOALCOS | 2000-3000 | 245184 |
| BCoa_1000 | BAJO RIO COATZACOALCOS | 1000-2000 | 62947 |
| ACoa_2000 | ALTO RIO COATZACOALCOS | 2000-3000 | 484044 |
| ACoa_1000 | ALTO RIO COATZACOALCOS | 1000-2000 | 445750 |
| BUx_2000 | BAJO RIO UXPANAPA | 2000-3000 | 193956 |
| Llan_2000 | LLANURAS DE COATZACOALCOS | 2000-3000 | 30588 |
| Hua_2000 | RIO HUAZUNTLAN | 2000-3000 | 153323 |
| Hua_1000 | RIO HUAZUNTLAN | 1000-2000 | 10541 |
| AUx_2000 | ALTO RIO UXPANAPA | 2000-3000 | 198700 |
| BCoa_3000 | BAJO RIO COATZACOALCOS | 3000-4000 | 64029 |
| ACoa_3000 | ALTO RIO COATZACOALCOS | 3000-4000 | 134189 |
| AUx_3000 | ALTO RIO UXPANAPA | 3000-4000 | 132409 |

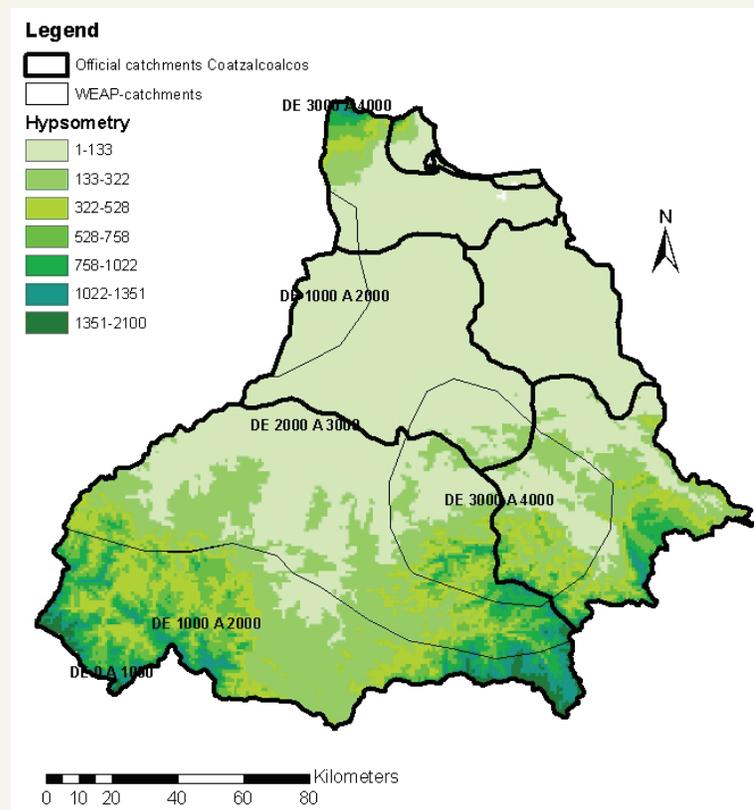


Figura 40. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de isoyetas.

En el proceso de selección de las estaciones meteorológicas, se seleccionaron diversas estaciones de medición para la precipitación y la temperatura, conforme a los criterios de las series temporales con la menor cantidad de datos faltantes. En las siguientes tablas, mapas y gráficos informativos, se dan las estaciones seleccionadas y sus características, así como la climatología y acumulación anual o promedios, respectivamente para la precipitación y temperatura, de estas estaciones.

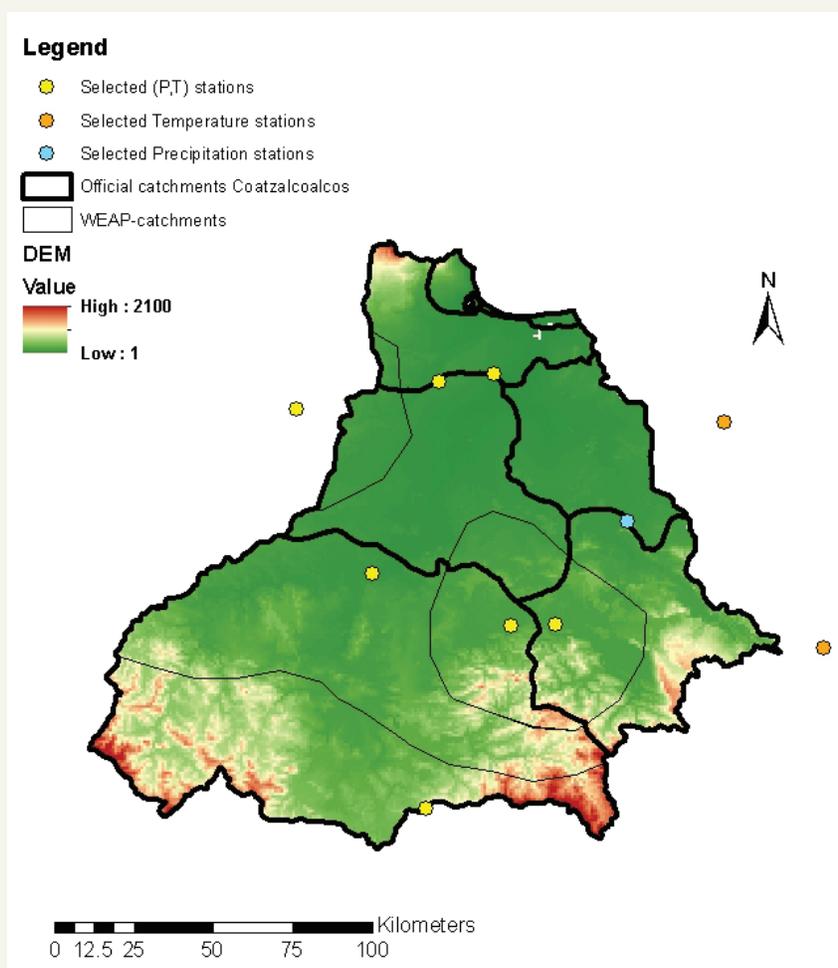


Figura 41. Las estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas en la RH Coatzacoalcos.

Tabla 34. Estaciones de Precipitación seleccionadas para las cuencas WEAP en la RH Coatzacoalcos, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes.

| Cuenca WEAP | ID de Estación | Nombre de Estación | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (SÍ/NO) | % de Datos Faltantes |
|-------------|----------------|----------------------------|---------|----------|-------------------------------|----------------------|
| BCoa_2000 | 30077 | JALTIPÁN DE MORELOS | 17.96 | -94.73 | SÍ | 6.99 |
| BCoa_1000 | 30147 | SAN JUAN EVANGELISTA (DGE) | 17.88 | -95.14 | NO | 4.30 |
| ACoa_2000 | 30090 | LAS PERLAS | 17.42 | -94.92 | SÍ | 4.30 |
| ACoa_1000 | 20325 | COFRADÍA | 16.75 | -94.76 | SÍ | 9.41 |
| BUx_2000 | 30327 | TIERRA MORADA | 17.57 | -94.15 | SÍ | 11.29 |
| Llan_2000 | 30107 | MINATITLÁN | 17.99 | -94.56 | NO | 24.19 |
| Hua_2000 | 30107 | MINATITLÁN | 17.99 | -94.56 | SÍ | 24.19 |
| Hua_1000 | 30147 | SAN JUAN EVANGELISTA (DGE) | 17.88 | -95.14 | NO | 4.30 |
| AUx_2000 | 30327 | TIERRA MORADA | 17.57 | -94.15 | NO | 11.29 |
| BCoa_3000 | 30281 | LA LAGUNA | 17.27 | -94.51 | NO | 11.02 |
| ACoa_3000 | 30281 | LA LAGUNA | 17.27 | -94.51 | SÍ | 11.02 |
| AUx_3000 | 30292 | RIO GRANDE | 17.28 | -94.37 | SÍ | 26.61 |

Tabla 35. Estaciones de Temperatura seleccionadas para las cuencas WEAP en la RH Coatzacoalcos, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes.

| Cuenca WEAP | ID de Estación | Nombre de Estación | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (SÍ/NO) | % de Datos Faltantes |
|-------------|----------------|----------------------------|---------|----------|-------------------------------|----------------------|
| BCoa_2000 | 30077 | JALTIPÁN DE MORELOS | 17.96 | -94.73 | SÍ | 6.72 |
| BCoa_1000 | 30147 | SAN JUAN EVANGELISTA (DGE) | 17.88 | -95.14 | NO | 4.30 |
| ACoa_2000 | 30090 | LAS PERLAS | 17.42 | -94.92 | SÍ | 4.30 |
| ACoa_1000 | 20325 | COFRADÍA | 16.75 | -94.76 | SÍ | 9.41 |
| BUx_2000 | 27037 | PUEBLO NUEVO | 17.85 | -93.88 | NO | 1.88 |
| Llan_2000 | 30107 | MINATITLÁN | 17.99 | -94.56 | NO | 34.95 |
| Hua_2000 | 30107 | MINATITLÁN | 17.99 | -94.56 | SÍ | 34.95 |
| Hua_1000 | 30147 | SAN JUAN EVANGELISTA (DGE) | 17.88 | -95.14 | NO | 4.30 |
| AUx_2000 | 7112 | MALPASO | 17.21 | -93.58 | NO | 37.90 |
| BCoa_3000 | 30281 | LA LAGUNA | 17.27 | -94.51 | NO | 13.71 |
| ACoa_3000 | 30281 | LA LAGUNA | 17.27 | -94.51 | SÍ | 13.71 |
| AUx_3000 | 30292 | RIO GRANDE | 17.28 | -94.37 | SÍ | 26.61 |

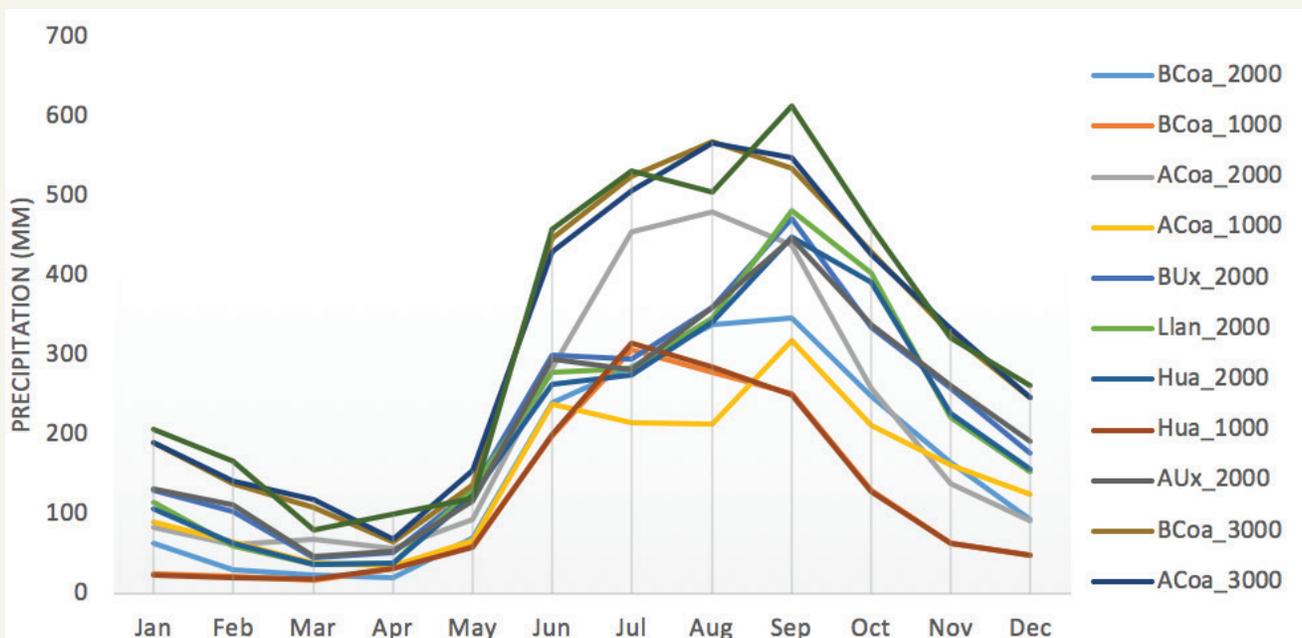


Figura 42. La climatología mensual de las estaciones de precipitación seleccionadas para cada cuenca WEAP.

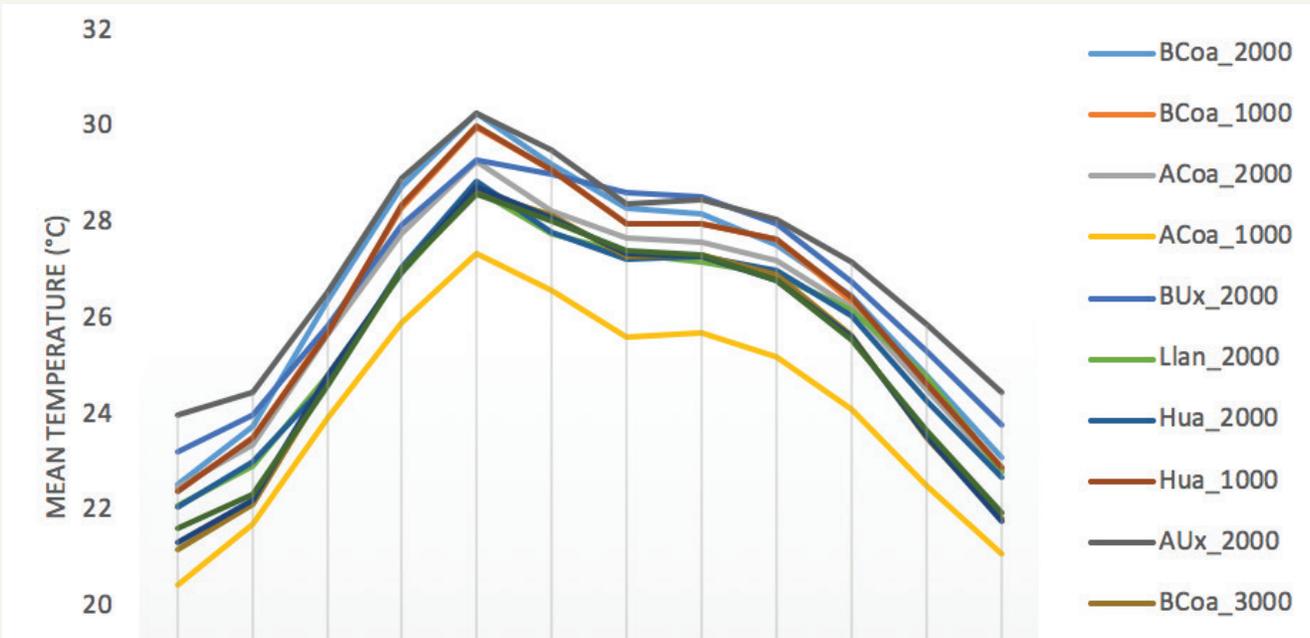


Figura 43. La climatología mensual de las estaciones de temperatura seleccionadas para cada cuenca WEAP.

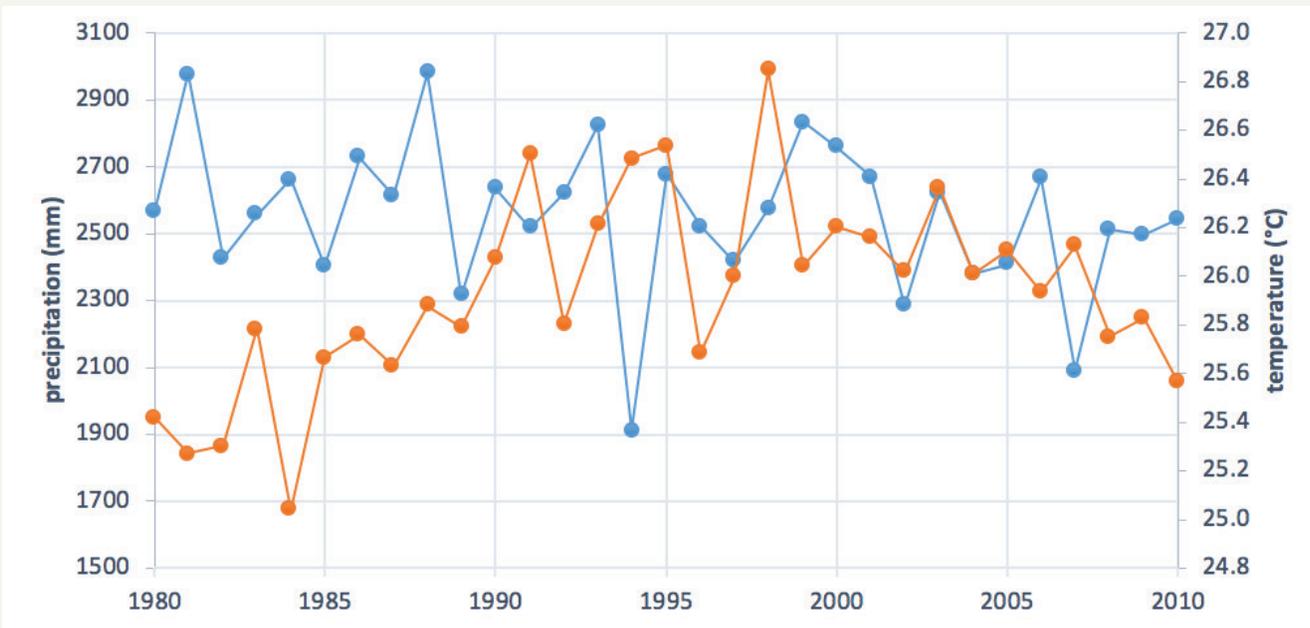


Figura 44. Precipitación anual acumulada (azul) y temperatura mensual promedio (naranja) de todas las cuencas WEAP en la RH Coatzacoalcos.

En el siguiente mapa (Figura 45) se visualizan las diferentes entidades de uso de suelo en la RH Coatzacoalcos. En la tabla 36 se dan los porcentajes de las entidades posibles dentro de cada cuenca WEAP, como entrada de datos para el modelo WEAP.

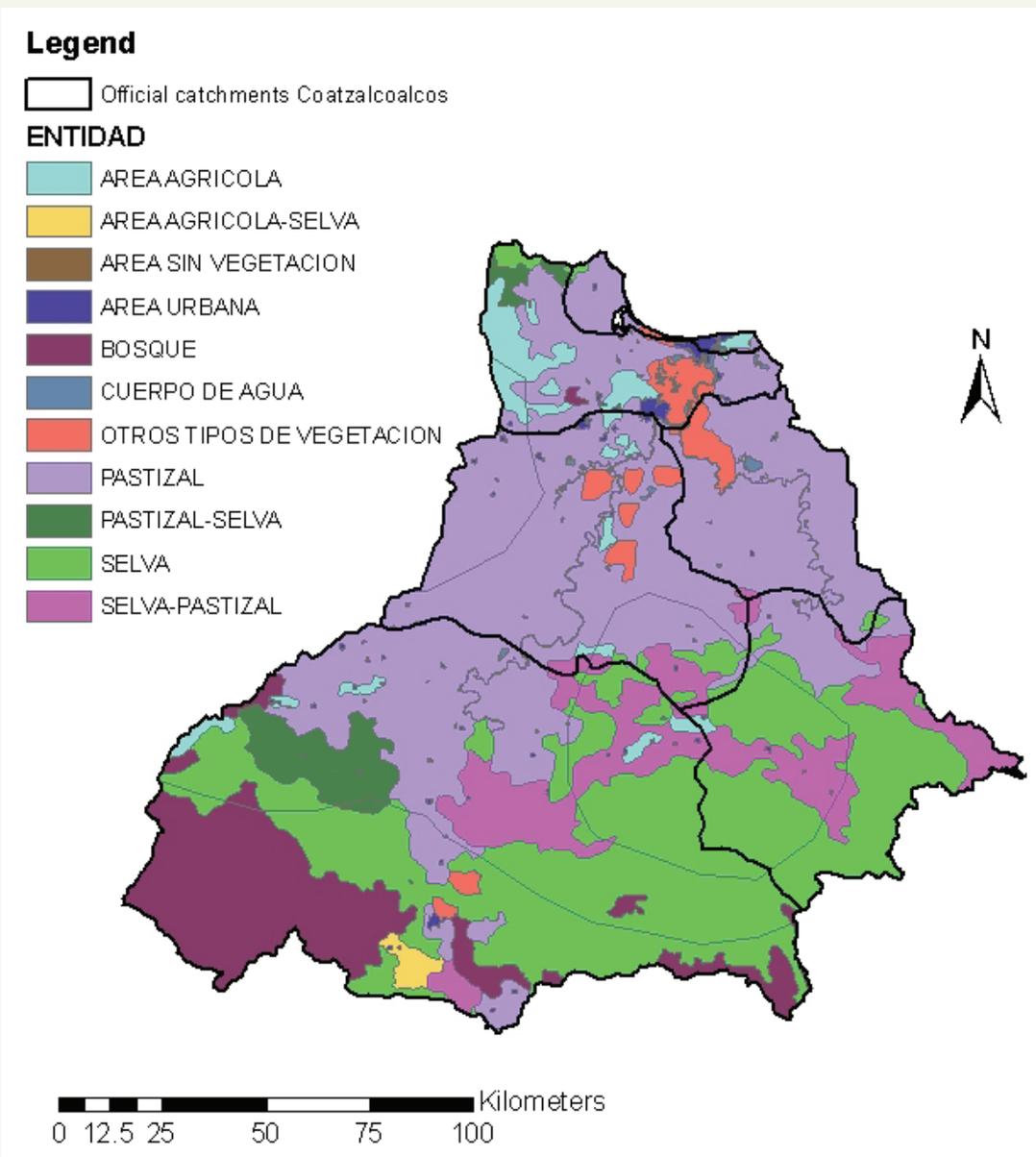


Figura 45. La RH Coatzacoalcos con la clasificación de las diferentes entidades de uso de suelo.

Tabla 36. Contribución (en %) de las diferentes entidades de uso de suelo a cada cuenca WEAP

| CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) | CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|
| ACoa_1000 | ÁREA AGRÍCOLA-SELVA | 2.4 | BCoa_3000 | ÁREA AGRÍCOLA | 1.9 |
| | ÁREA URBANA | 0.3 | | ÁREA URBANA | 0.3 |
| | BOSQUE | 47.6 | | PASTIZAL | 52.7 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 1.3 | | SELVA | 20.9 |
| | PASTIZAL | 7.2 | | SELVA-PASTIZAL | 24.2 |
| | PASTIZAL-SELVA | 0.5 | BUx_2000 | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.0 |
| | SELVA | 38.9 | | ÁREA URBANA | 0.2 |
| | SELVA-PASTIZAL | 1.9 | | CUERPO DE AGUA | 1.7 |
| ÁREA AGRÍCOLA | 1.9 | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | | 6.6 | |
| ÁREA URBANA | 0.3 | PASTIZAL | | 90.4 | |
| ACoa_2000 | BOSQUE | 3.1 | SELVA | 0.5 | |
| | CUERPO DE AGUA | 0.3 | SELVA-PASTIZAL | 0.5 | |
| | PASTIZAL | 39.9 | Hua_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 63.4 |
| | PASTIZAL-SELVA | 10.9 | | ÁREA URBANA | 1.0 |
| | SELVA | 32.0 | | PASTIZAL | 35.6 |
| | SELVA-PASTIZAL | 11.6 | Hua_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 22.0 |
| | ÁREA AGRÍCOLA | 3.9 | | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.2 |
| ÁREA URBANA | 0.4 | ÁREA URBANA | | 3.8 | |
| PASTIZAL | 1.4 | BOSQUE | | 1.0 | |
| SELVA | 64.7 | CUERPO DE AGUA | | 2.4 | |
| SELVA-PASTIZAL | 29.6 | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | | 11.0 | |
| ÁREA URBANA | 0.1 | PASTIZAL | | 50.8 | |
| AUx_2000 | CUERPO DE AGUA | 0.1 | PASTIZAL-SELVA | 5.5 | |
| | PASTIZAL | 22.8 | SELVA | 3.4 | |
| | SELVA | 52.5 | Llan_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 8.5 |
| | SELVA-PASTIZAL | 24.5 | | ÁREA URBANA | 6.6 |
| ÁREA AGRÍCOLA | 1.2 | CUERPO DE AGUA | | 2.3 | |
| ÁREA URBANA | 0.2 | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | | 4.4 | |
| PASTIZAL | 0.5 | PASTIZAL | | 74.6 | |
| SELVA | 70.6 | PASTIZAL-SELVA | | 0.5 | |
| SELVA-PASTIZAL | 27.5 | SELVA | 3.1 | | |
| BCoa_1000 | ÁREA URBANA | 0.9 | BCoa_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 2.8 |
| | PASTIZAL | 99.1 | | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.0 |
| BCoa_2000 | ÁREA AGRÍCOLA | 2.8 | | ÁREA URBANA | 0.8 |
| | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 0.0 | | CUERPO DE AGUA | 1.6 |
| | ÁREA URBANA | 0.8 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 6.6 |
| | CUERPO DE AGUA | 1.6 | | PASTIZAL | 86.3 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 6.6 | | SELVA | 0.0 |
| | PASTIZAL | 86.3 | | SELVA-PASTIZAL | 1.8 |
| | SELVA | 0.0 | | | |
| SELVA-PASTIZAL | 1.8 | | | | |

En relación a la infraestructura de presas, en el mapa de la figura 46 se señalan las diferentes localizaciones de los embalses.

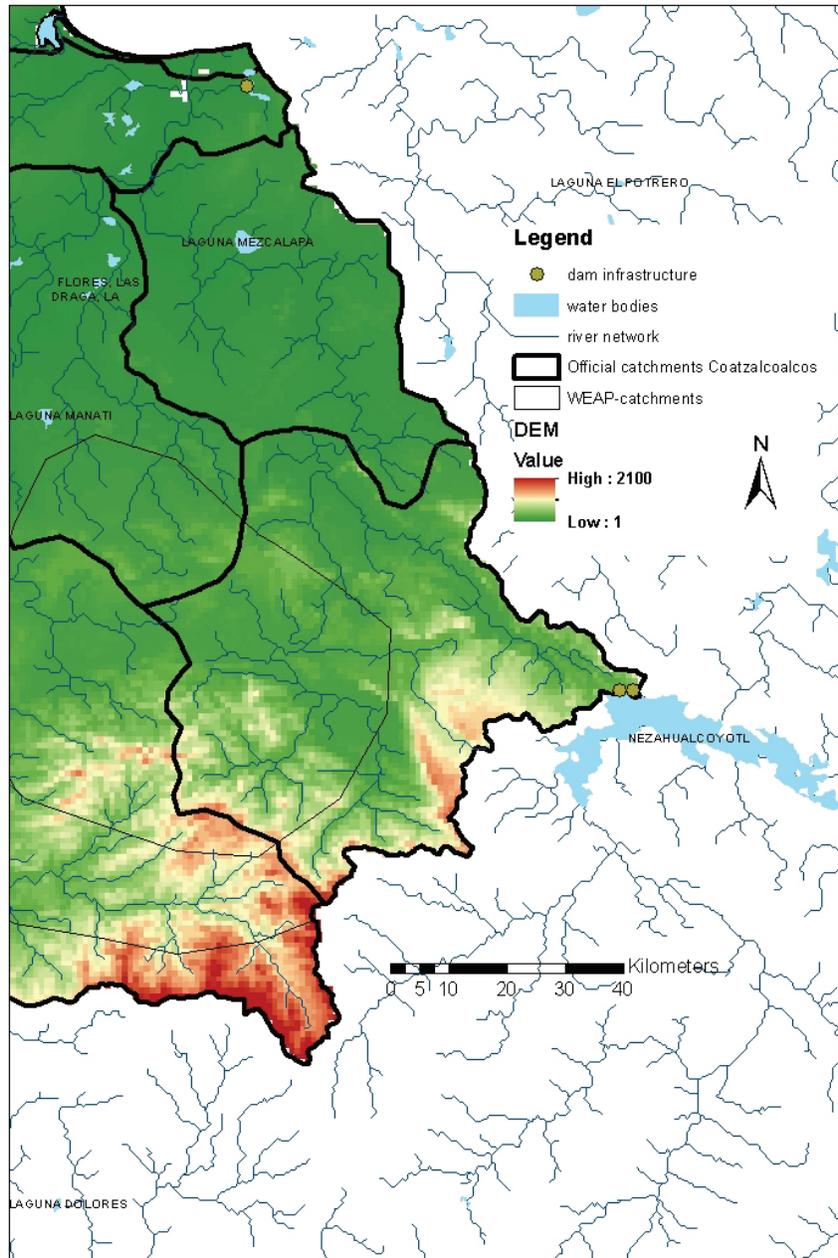


Figura 46. Infraestructura de presas localizada en la superficie de la RH Coatzacoalcos.

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior se presentan en la figura 47 y resumidos en la Tabla 37 (en el Anexo 2 se presentan las demandas de agua detalladas tal como son utilizadas en el modelo WEAP).

Tabla 37. Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m ³] |
|----------------------------|---------------------------------|
| PÚBLICO URBANO / DOMÉSTICO | 62,926,828 |
| GANADERÍA | 27,066 |
| AGRICULTURA | 3,478,004 |
| ACUACULTURA | 2,080 |
| INDUSTRIAL | 181,112,806 |
| SERVICIOS | 9,147 |

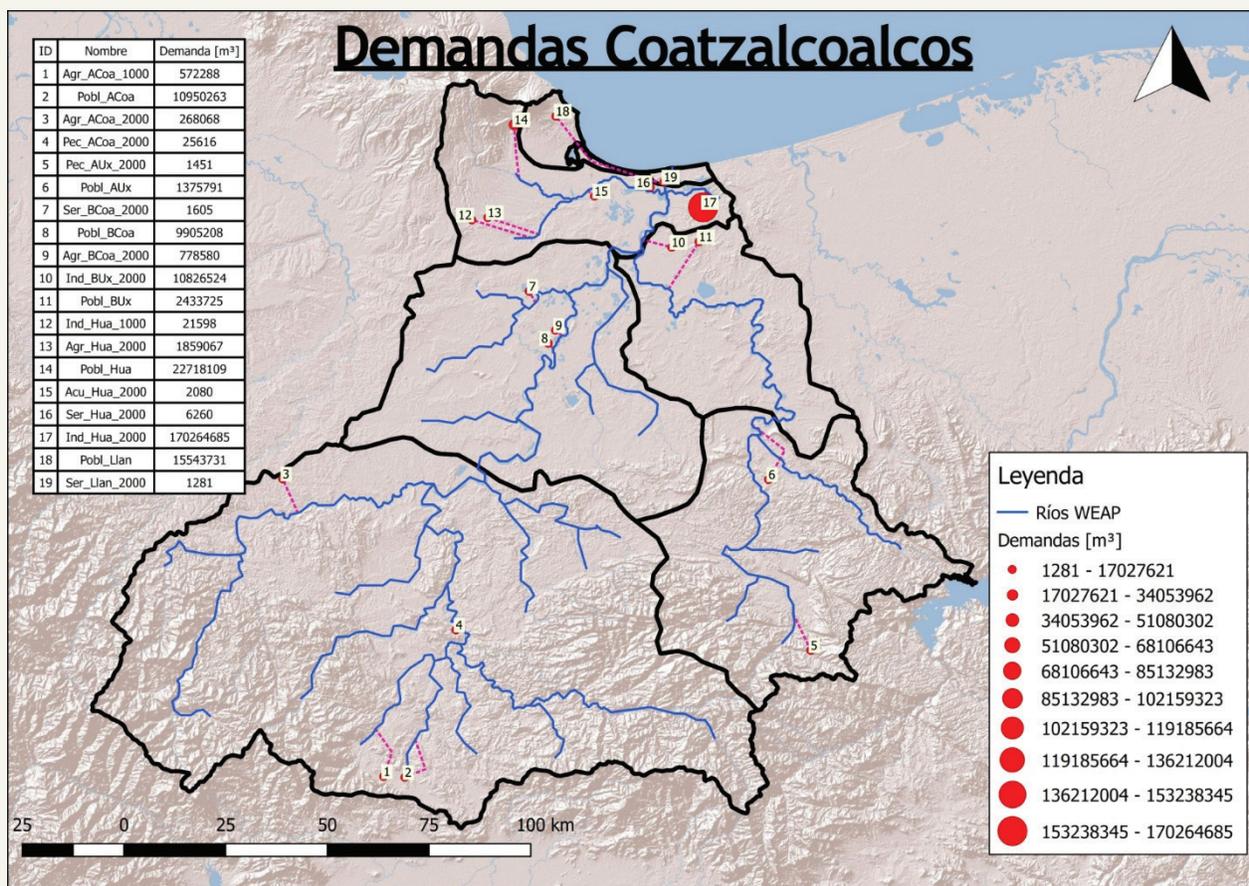


Figura 47 Principales sitios de demanda para los diferentes usos de agua en cada cuenca WEAP de la RH Coatzacoalcos.

En la tabla 38, se presentan las dos estaciones hidrométricas con suficientes observaciones dentro del periodo de enero de 1980 a diciembre de 2010 con sus valores de indicadores de desempeño del modelo. En las figuras 48-49 se muestra la comparación entre las hidrografías observadas y simuladas de ambas estaciones, para el periodo mencionado arriba.

Tabla 38 Las estaciones seleccionadas de descarga para la evaluación de desempeño de la calibración del modelo WEAP en Coatzacoalcos.

| Código | Nombre de Estación | Caudal | Latitud | Longitud | % de Datos Faltantes | R2 | NSE |
|--------|--------------------|-------------------|----------|----------|----------------------|------|------|
| 29005 | LAS PERLAS | RIO COATZACOALCOS | -94.8667 | 17.4381 | 8.33 | 0.54 | 0.51 |
| 29006 | JESUS CARRANZA II | RIO JALTEPEC | -95.0542 | 17.3917 | 4.84/16.13* | 0.31 | 0.18 |

*el segundo valor corresponde a la eliminación de medidas no plausibles en el conjunto de datos.

Las observaciones de descarga de la estación 29006 'Jesus Carranza 2' son dudosas. Un periodo de valor 0 (junio 1990-agosto 1993) de descarga fue eliminado del registro antes del análisis –como se indica en la tabla 34– ya que no pudo relacionarse con una ausencia de precipitación. Por lo tanto, la calidad de los datos de descarga para esta estación son cuestionados; por ejemplo, los bajos valores del caudal base en 1986-1989 y el fuerte incremento en el caudal base e interflujo de 2004 en adelante, que no pueden relacionarse ambos con los datos climáticos proporcionados.

Sin embargo, el modelo para la estación 29005 'Las Perlas' localizada aguas abajo tiene un buen desempeño ($r^2=0,54$ y $NSE=0,51$ – figura 49), así que la calibración puede ser aceptada.

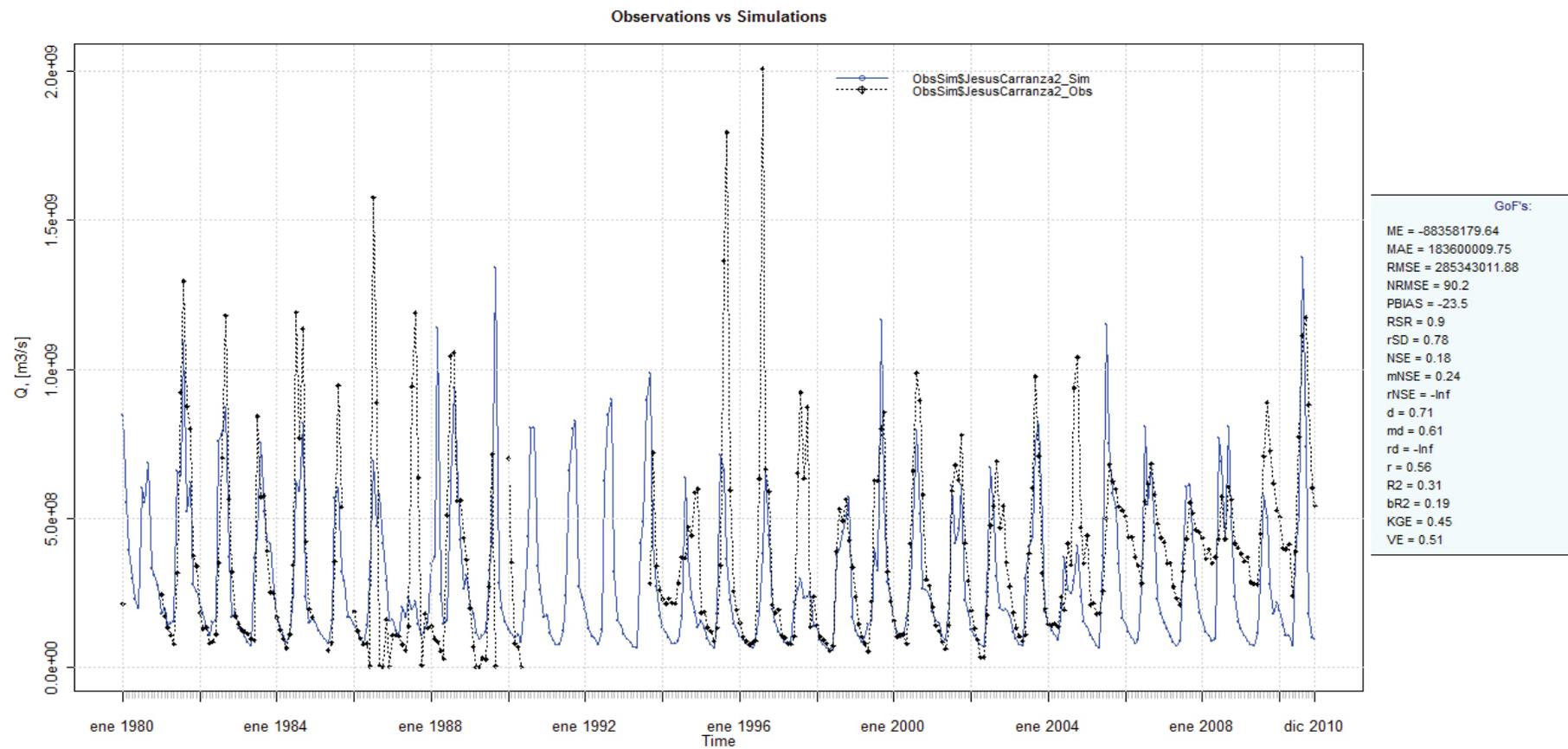


Figura 48. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 29006 'Jesus Carranza 2', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

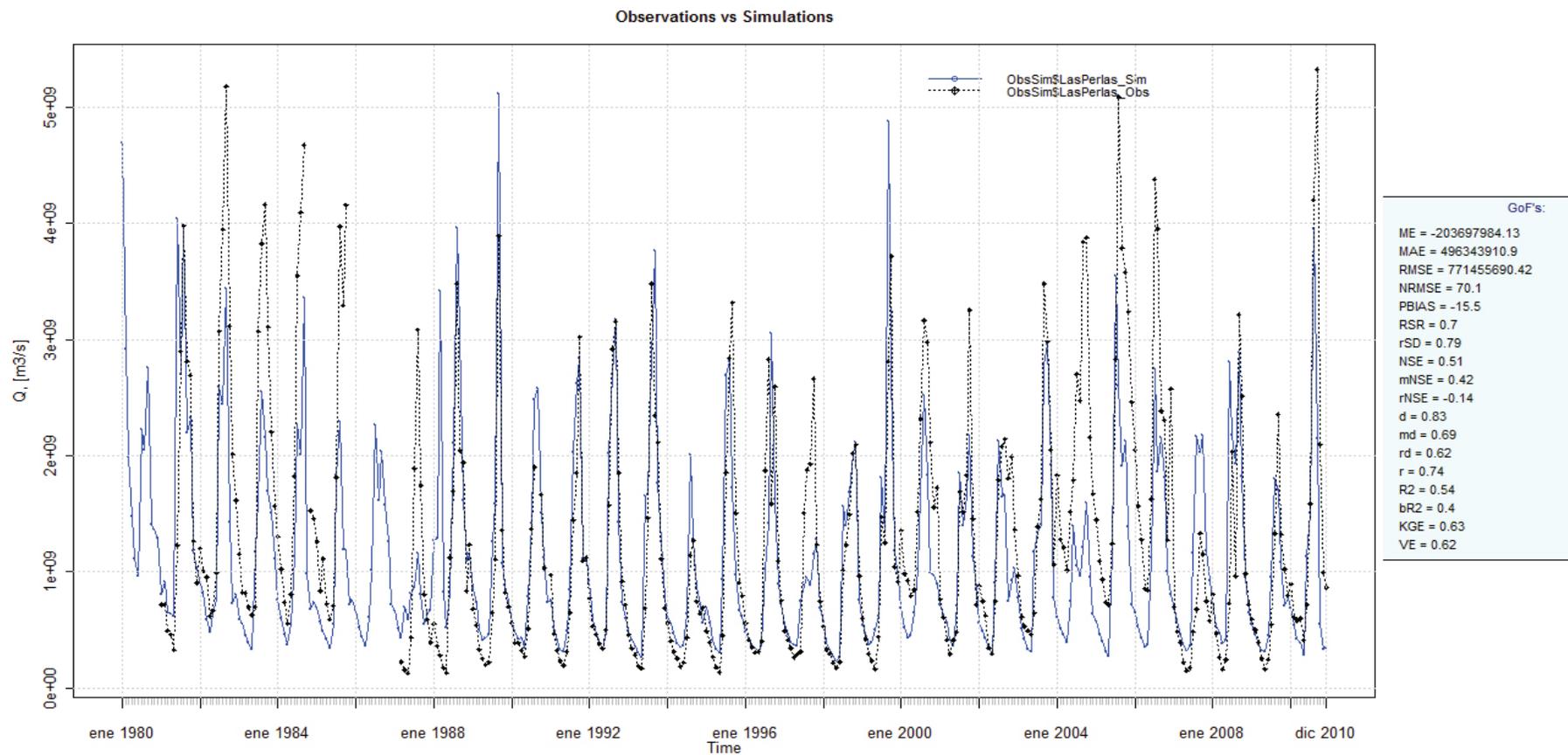


Figura 49. Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 29005 'Las Perlas', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

2.2.5. Región hidrográfica Tehuantepec

La región hidrográfica de Tehuantepec se encuentra adyacente a la RH Coatzacoalcos pero su red de ríos desemboca en el Océano Pacífico. Es una región más pequeña en comparación con las otras RH donde se localizan las cuencas piloto, cubriendo un área de 1557,25km². Sus cuencas oficiales se describen en la tabla 39 y visualizan en el mapa de la figura 50.

Tabla 39. Las cuencas oficiales de la RH Tehuantepec.

| ID_2013 | Nombre | Área (ha) | Descripción |
|---------|---------------|-----------|---|
| 640 | RIO OSTUTA 1 | 48282 | DESDE SU NACIMIENTO HASTA LA EH OSTUTA. |
| 644 | RIO ZANATEPEC | 27420 | DESDE SU NACIMIENTO HASTA LA EH ZANATEPEC. |
| 657 | RIO OSTUTA 2 | 80023 | DESDE LAS EH OSTUTA Y ZANATEPEC HASTA SU DESEMB A LA LAGUNA INFERIOR. |

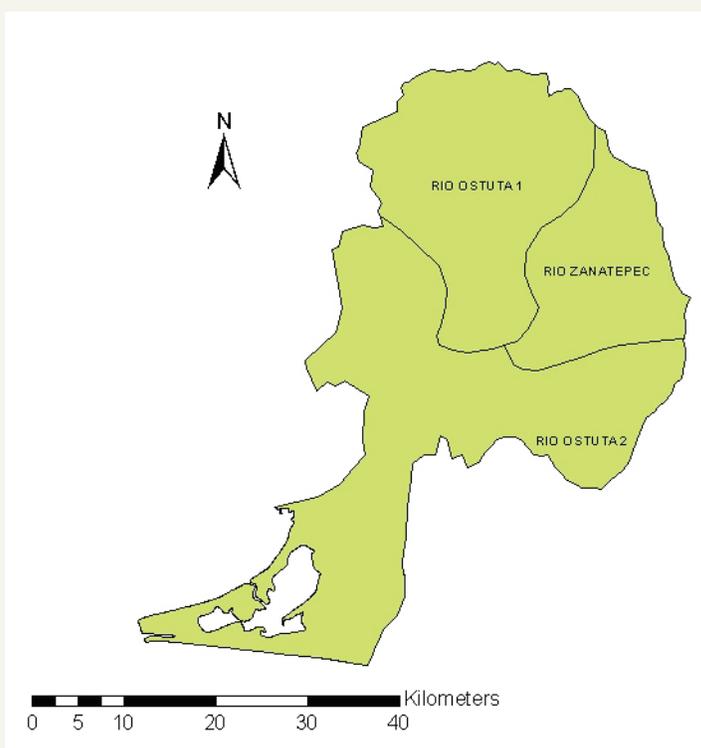


Figura 50. Las cuencas oficiales de la RH Tehuantepec.

Las cuencas WEAP están delimitadas de la misma manera que en la región hidrográfica de Coatzacoalcos, considerando una clasificación isoyeta cada 250mm/año dentro de 1000-2000mm por año, resultando en las cuencas mostradas en la tabla 40 y en el mapa de la figura 51.

Tabla 40. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de isoyetas.

| ID | Clase de isoyetas (mm/año) | NOMBRE_CUE | Área (ha) |
|-----------|----------------------------|---------------|-----------|
| Ost1_1000 | 1000-1250 | RIO OSTUTA 1 | 3505 |
| Ost1_1250 | 1250-1500 | RIO OSTUTA 1 | 40883 |
| Ost1_1500 | 1500-1750 | RIO OSTUTA 1 | 3727 |
| Ost2_1000 | 1000-1250 | RIO OSTUTA 2 | 43111 |
| Ost2_1250 | 1250-1500 | RIO OSTUTA 2 | 36548 |
| Zana_1000 | 1000-1250 | RIO ZANATEPEC | 13955 |
| Zana_1250 | 1250-1500 | RIO ZANATEPEC | 13357 |

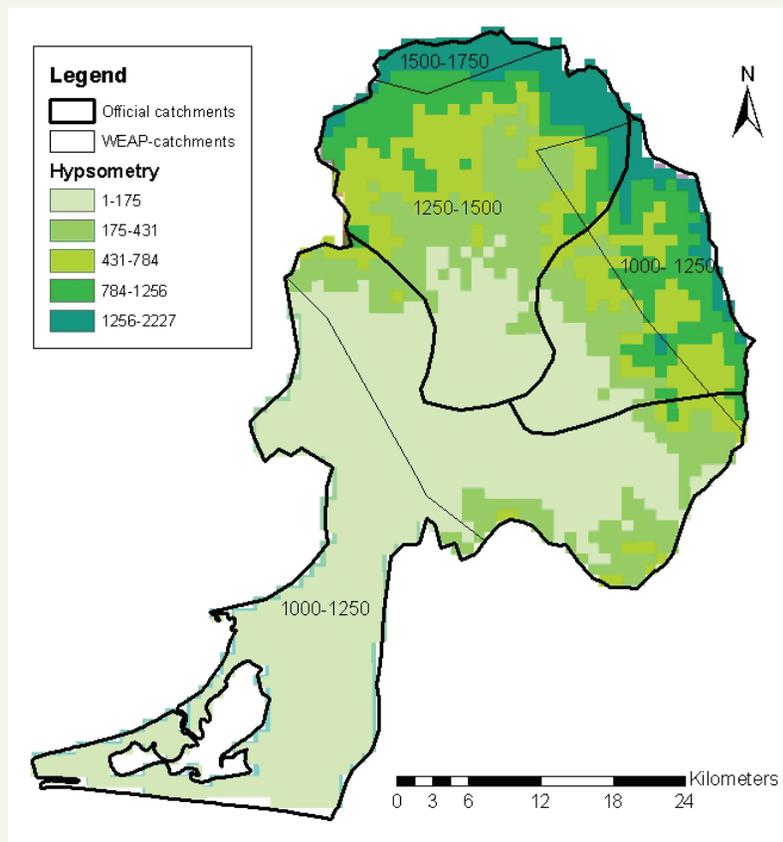


Figura 51. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de isoyetas.

En el proceso de selección de las estaciones representativas de la precipitación y temperatura como entrada crucial de datos para el modelo WEAP solo hubo una estación en la RH que cumplía con los criterios. Para las otras dos clases de isoyetas se seleccionaron estaciones de medición fuera de la RH dentro de los mismos rangos de isoyetas respectivamente. Las características de las tres estaciones se dan en la tabla 41 y su locación se muestra en el mapa de la figura 52. Mayores detalles relacionados con la climatología y comportamiento anual en el periodo de tiempo definido se muestran en las siguientes gráficas.

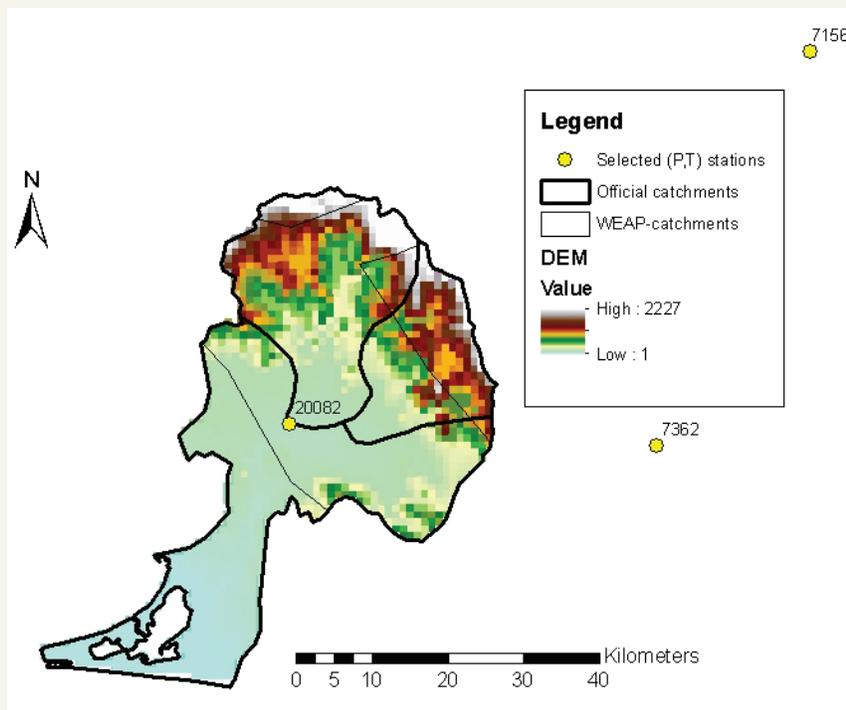


Figura 52. Las estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas en la RH Tehuantepec.

Tabla 41. Estaciones de Precipitación y Temperatura seleccionadas para las diferentes cuencas WEAP en la RH Tehuantepec, indicando su representatividad y porcentaje de datos faltantes.

| Cuenca WEAP | ID de Estación | Nombre de Estación | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (Sí/NO) | % de Datos Faltantes |
|-------------|----------------|--------------------|---------|----------|-------------------------------|----------------------|
| Ost1_1000 | 7362 | ROSENDO SALAZAR | 16.47 | -94.00 | NO | 9.41 |
| Ost1_1250 | 20082 | OSTUTA | 16.50 | -94.44 | NO | 0.00 |
| Ost1_1500 | 7156 | SANTA MARIA | 16.94 | -93.83 | NO | 29.30 |
| Ost2_1000 | 7362 | ROSENDO SALAZAR | 16.47 | -94.00 | NO | 9.41 |
| Ost2_1250 | 20082 | OSTUTA | 16.50 | -94.44 | SÍ | 0.00 |
| Zana_1000 | 7362 | ROSENDO SALAZAR | 16.47 | -94.00 | NO | 9.41 |
| Zana_1250 | 20082 | OSTUTA | 16.50 | -94.44 | NO | 0.00 |

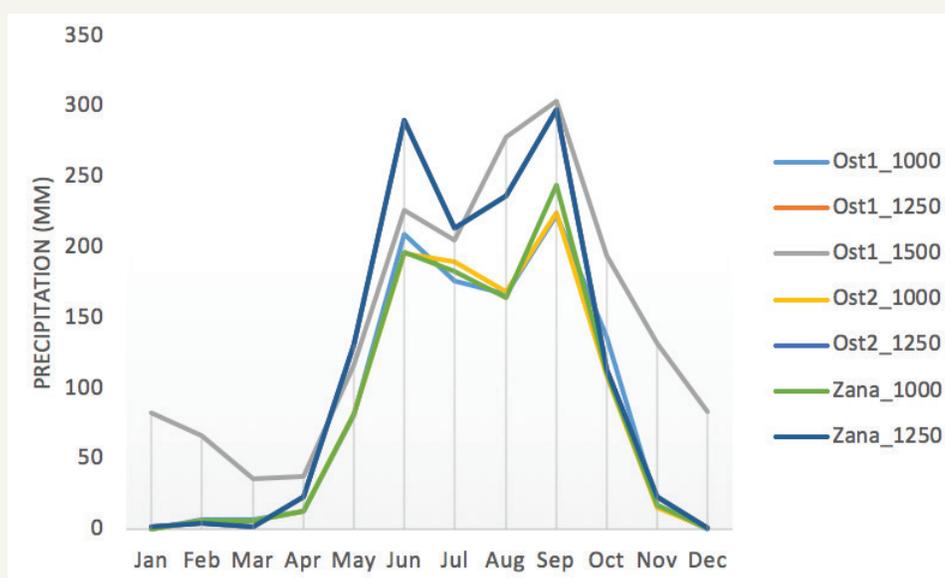


Figura 53 La climatología mensual de las estaciones de precipitación seleccionadas para cada una de las cuencas WEAP.

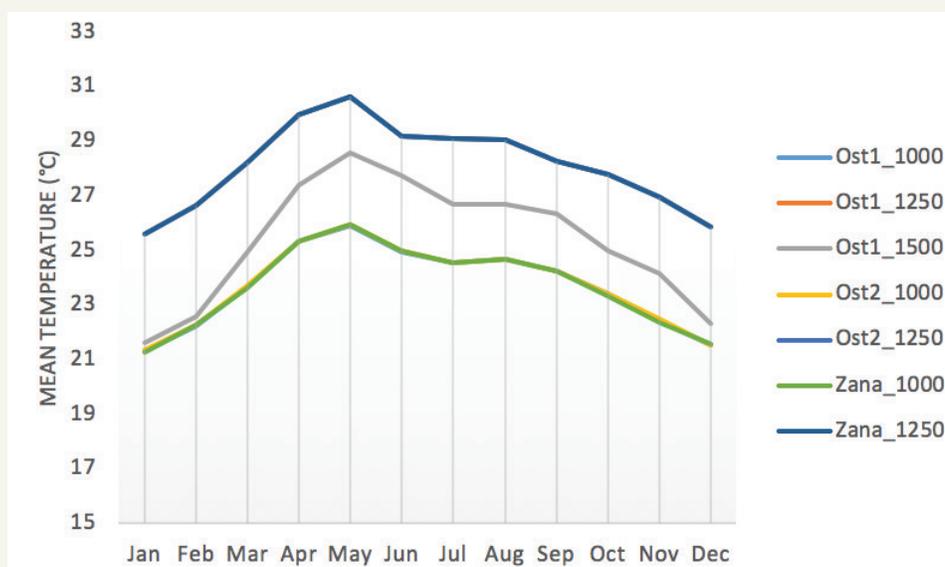


Figura 54 La climatología mensual de las estaciones de temperatura seleccionadas para cada una de las cuencas WEAP.

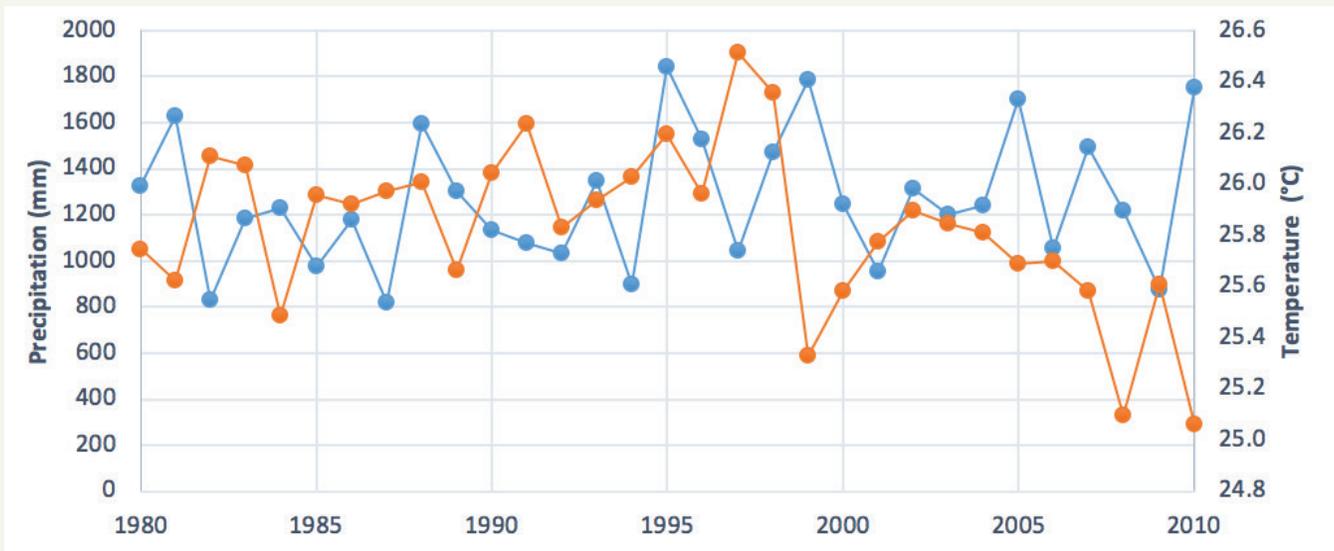


Figura 55 Precipitación anual acumulada (azul) y temperatura mensual promedio (naranja) de todas las cuencas WEAP en la RH Tehuantepec.

En el siguiente mapa (figura 56) se visualizan las diferentes entidades de uso de suelo en la RH Tehuantepec. En la tabla 42 se dan los porcentajes de las entidades posibles dentro de cada cuenca WEAP, como entrada de datos para el modelo WEAP.

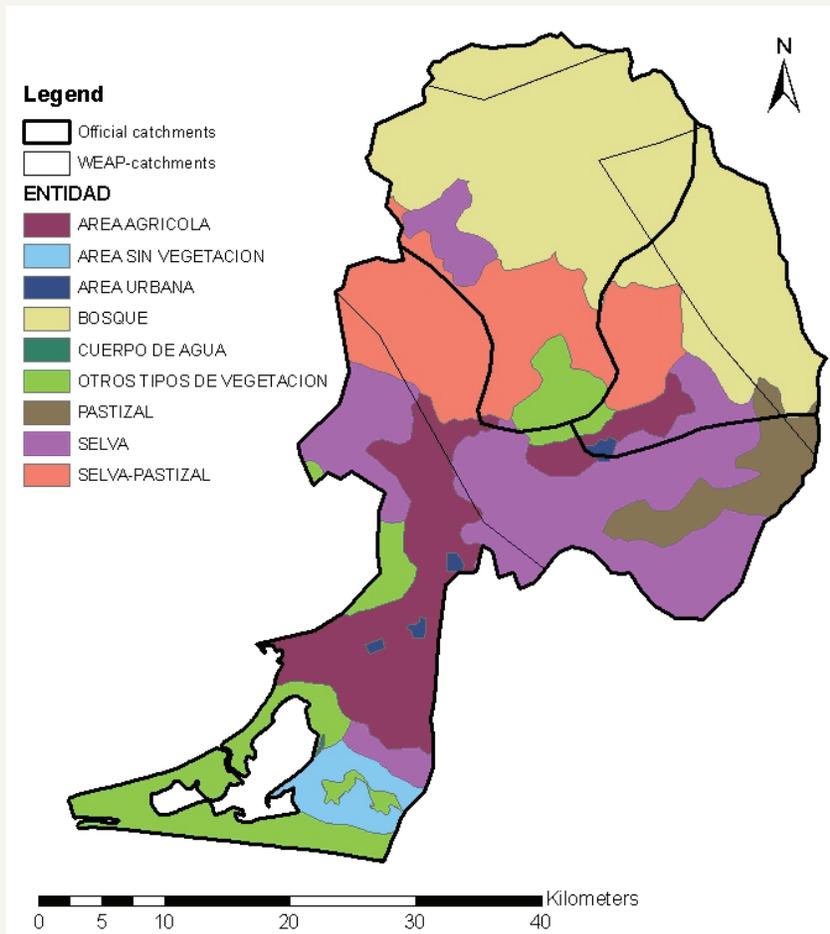


Figura 56. Las diferentes entidades de clasificación de uso de suelo y vegetación de INEGI en la RH Tehuantepec.

Tabla 42. Contribución (en %) de las diferentes entidades de uso de suelo a cada una de las cuencas WEAP.

| CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) | CUENCA WEAP | ENTIDADES POR CUENCA WEAP | PORCENTAJE DEL ÁREA TOTAL (%) |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| Ost1_1000 | BOSQUE | 100.0 | Ost2_1250 | ÁREA AGRÍCOLA | 5.8 |
| Ost1_1250 | ÁREA AGRÍCOLA | 0.3 | | ÁREA URBANA | 0.1 |
| | BOSQUE | 63.6 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 1.2 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 7.4 | | PASTIZAL | 15.8 |
| | SELVA | 6.9 | | SELVA | 52.5 |
| | SELVA-PASTIZAL | 21.9 | | SELVA-PASTIZAL | 24.6 |
| Ost1_1500 | BOSQUE | 100.0 | Zana_1000 | BOSQUE | 97.7 |
| Ost2_1000 | ÁREA AGRÍCOLA | 36.3 | PASTIZAL | 2.3 | |
| | ÁREA SIN VEGETACIÓN | 9.3 | Zana_1250 | ÁREA AGRÍCOLA | 13.9 |
| | ÁREA URBANA | 1.0 | | ÁREA URBANA | 1.8 |
| | BOSQUE | 0.1 | | BOSQUE | 21.8 |
| | CUERPO DE AGUA | 0.2 | | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 3.5 |
| | OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN | 29.1 | | PASTIZAL | 2.2 |
| | PASTIZAL | 1.0 | | SELVA | 19.1 |
| | SELVA | 19.8 | | SELVA-PASTIZAL | 37.8 |
| | SELVA-PASTIZAL | 3.2 | | | |

La región hidrográfica de Tehuantepec no cuenta con infraestructura de presas.

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior se presentan en la figura 57 y resumen en la Tabla 43 (en el Anexo 2 se presentan las demandas de agua detalladas tal como son utilizadas en el modelo WEAP).

Tabla 43 Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m³] |
|----------------------------|--------------------|
| PÚBLICO URBANO / DOMÉSTICO | 1560280 |
| AGRICULTURA | 506496 |

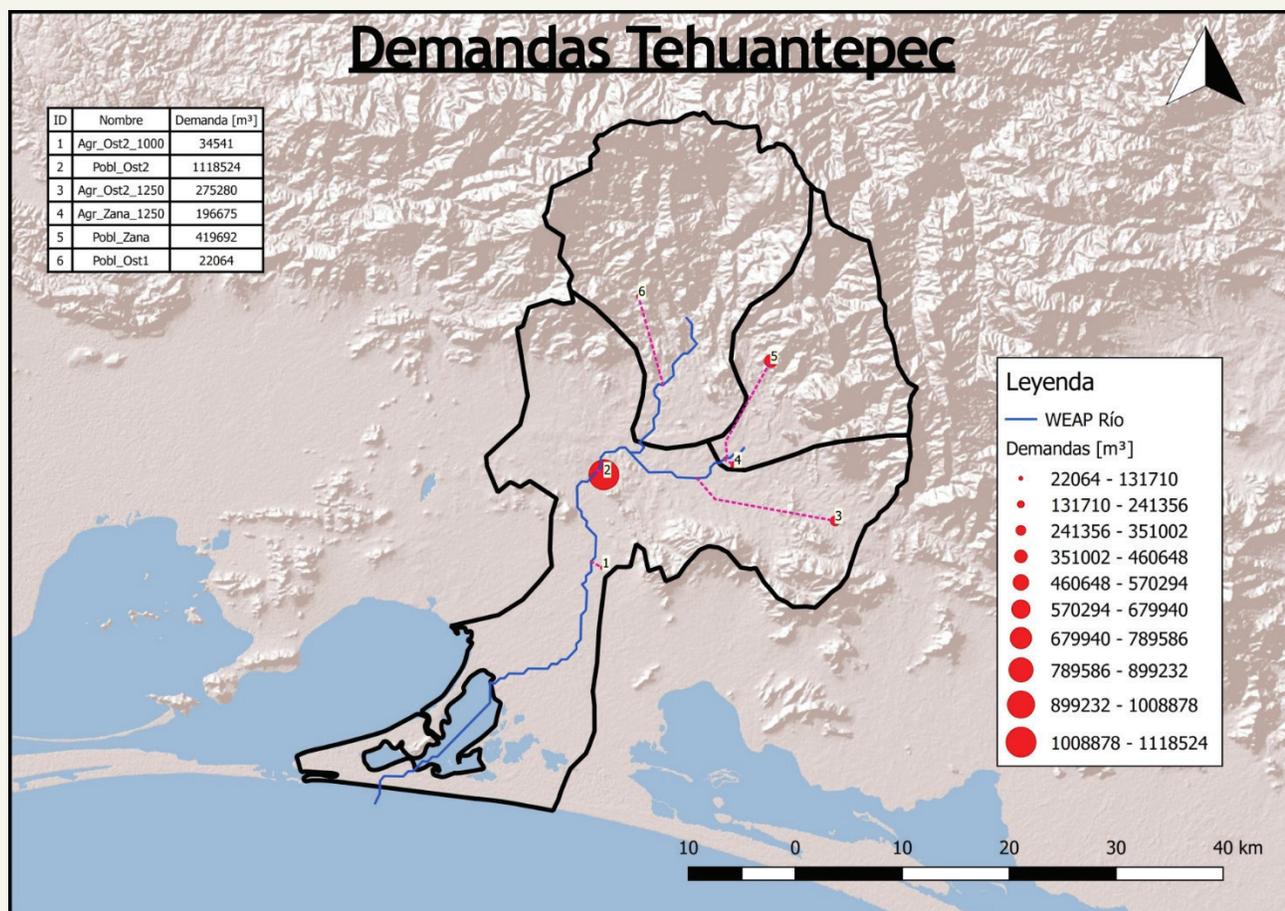


Figura 57. Sitios de demanda principales para los diferentes usos de agua en cada cuenca WEAP de la RH Tehuantepec.

En la tabla 44, las dos estaciones hidrométricas de la región hidrográfica Tehuantepec se presentan con sus valores de indicadores de desempeño del modelo. En las figuras 58-59 se hace la comparación entre las hidrografías observadas y simuladas en ambas estaciones, para el periodo de simulación de enero 1980-diciembre 2010.

Tabla 44. Las estaciones de descarga para la evaluación de desempeño de la calibración del modelo WEAP en Tehuantepec.

| CÓDIGO | NOMBRE ESTACIÓN | CAUDAL | LATITUD | LONGITUD | % DE DATOS FALTANTES | R2 | NSE |
|--------|-----------------|---------------|----------|----------|----------------------|------|------|
| 22018 | OSTUTA | RIO OSTUTA | -94.4375 | 16.5000 | 0.00 | 0.65 | 0.59 |
| 22026 | ZANATEPEC | RIO ZANATEPEC | -94.3667 | 16.4833 | 6.18 | 0.59 | 0.59 |

El modelo tuvo un buen desempeño para ambas estaciones. La variación aleatoria entre el caudal pico más alto y más bajo puede ser resultado del proceso de imputación de datos climáticos faltantes o, más probablemente, debido al uso de datos climáticos de estaciones próximas cuando no hay una estación representativa en la cuenca, lo cual es el caso para 6 de las 7 cuencas WEAP (tabla 37).

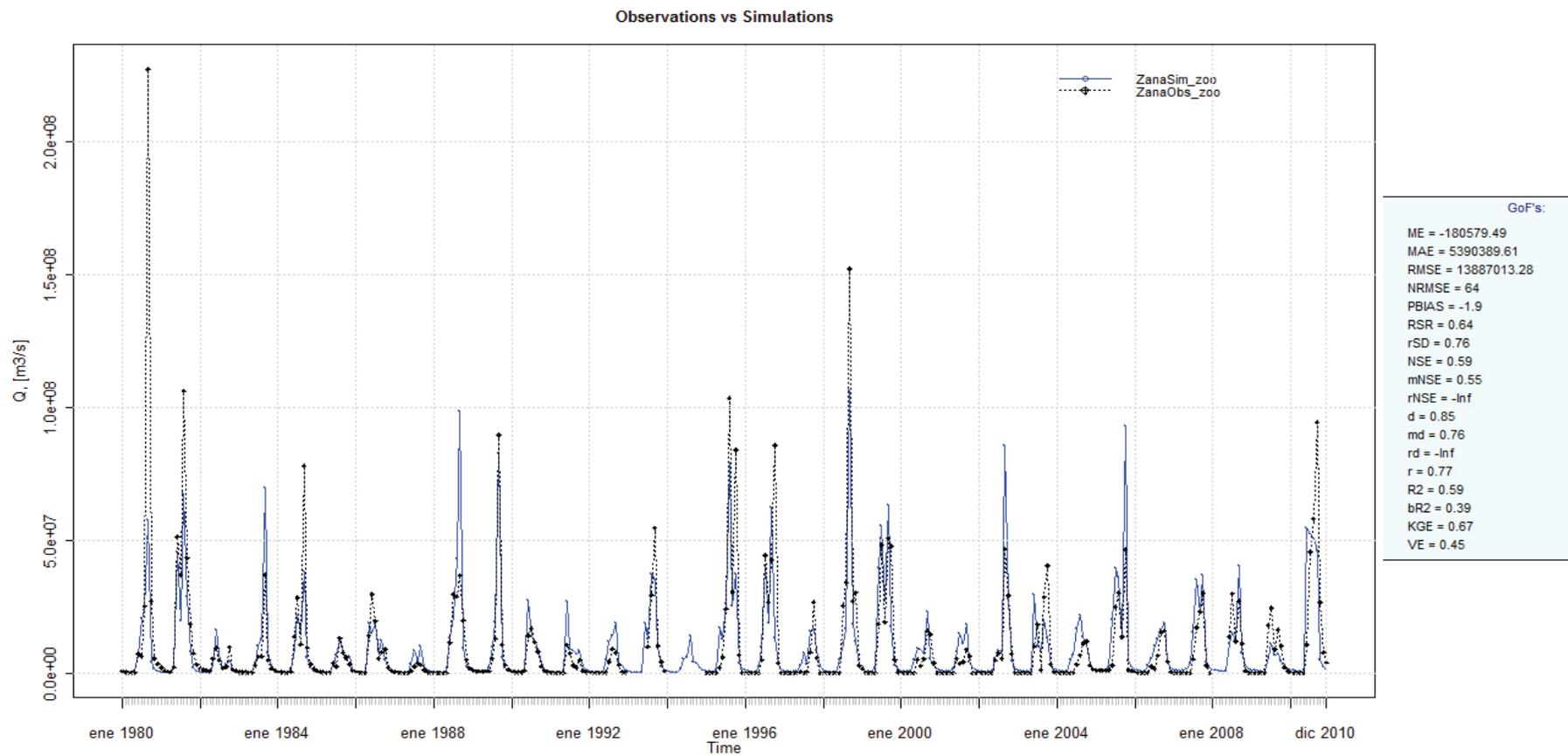


Figura 58 . Hidrografías observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 22026 'Zanatepec', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

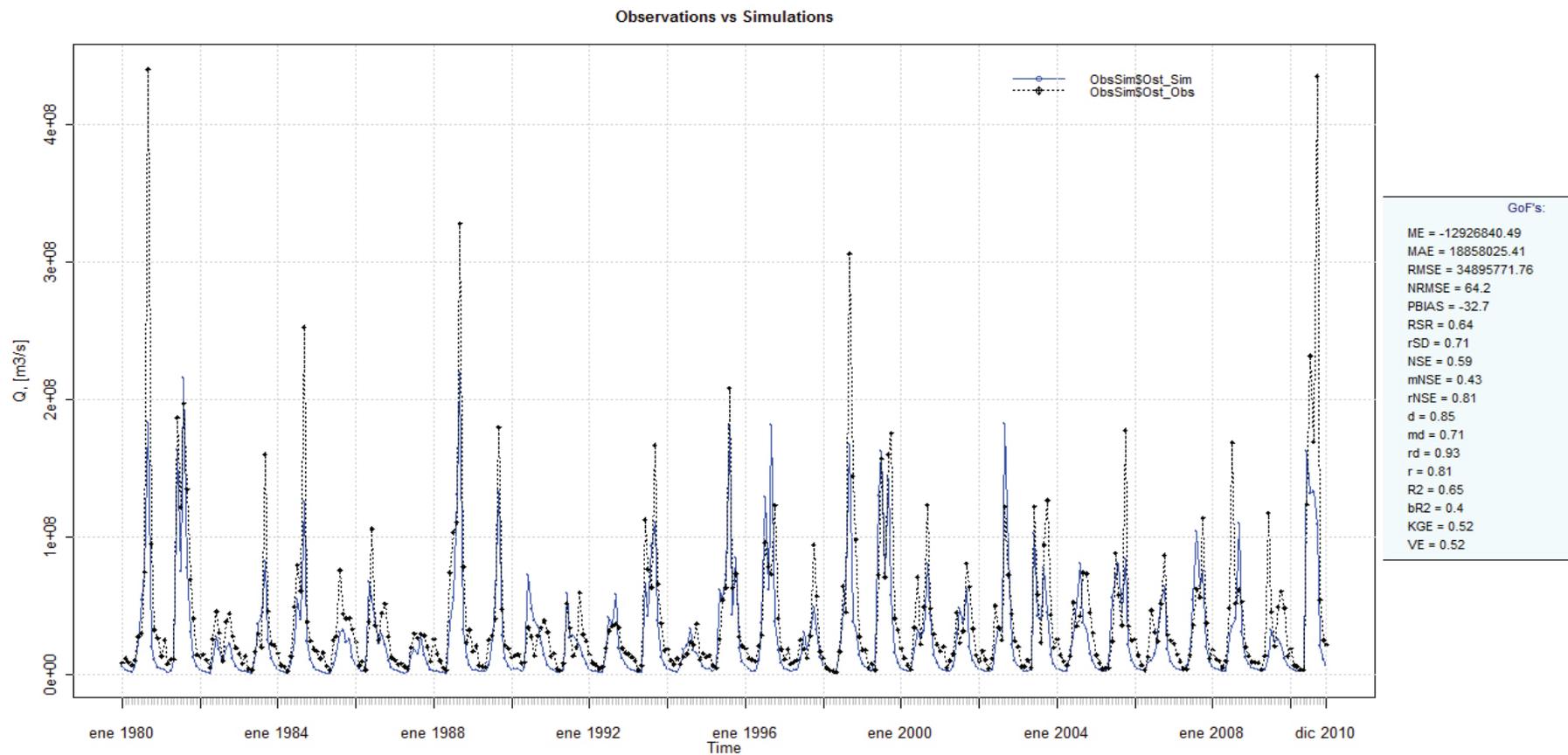


Figura 59 . Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 22018 'Ostuta', para el periodo de (01/1980 – 12/2010) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

2.2.6. Región hidrográfica Casas Grandes

La región hidrográfica de Casas Grandes (perteneciente a la región hidrológica “CUENCAS CENTRALES DEL NORTE”) consiste de las siguientes cuencas, descritas en la tabla 45 y visualizadas en el mapa de la figura 60.

Tabla 45 Las cuencas oficiales en la región de Casas Grandes

| ID_2013 | NOMBRE | ÁREA (ha) | DESCRIPCIÓN |
|---------|---------------------|-----------|--|
| 25 | RIO CASAS GRANDES 1 | 1306171 | DESDE EL NACIMIENTO DEL RIO SAN MIGUEL HASTA LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CASAS GRANDES. |
| 735 | RIO CASAS GRANDES 2 | 523905 | DESDE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA CASAS GRANDES, HASTA LA DESCARGA DEL RIO CASAS GRANDES A LA LAGUNA DE GUZMÁN. |

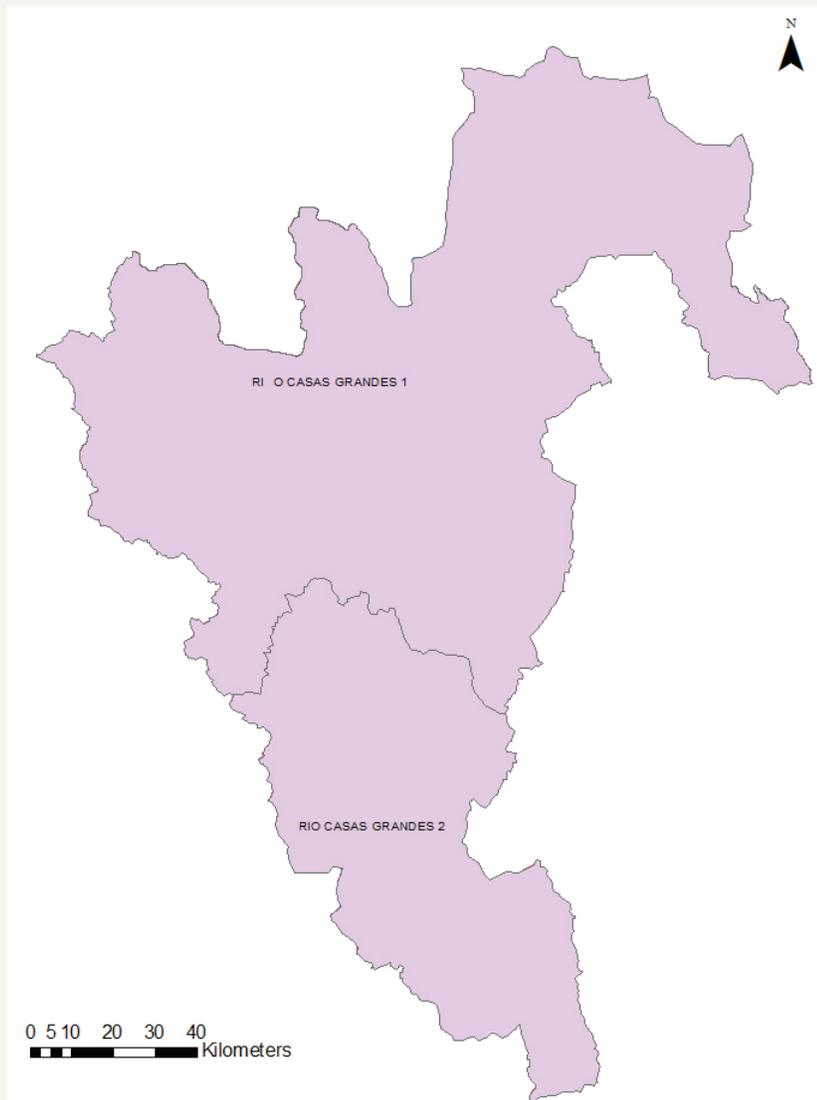


Figura 60. Las cuencas oficiales de la RH Casas Grandes

La reclasificación de la cuenca se muestra en la figura 61:

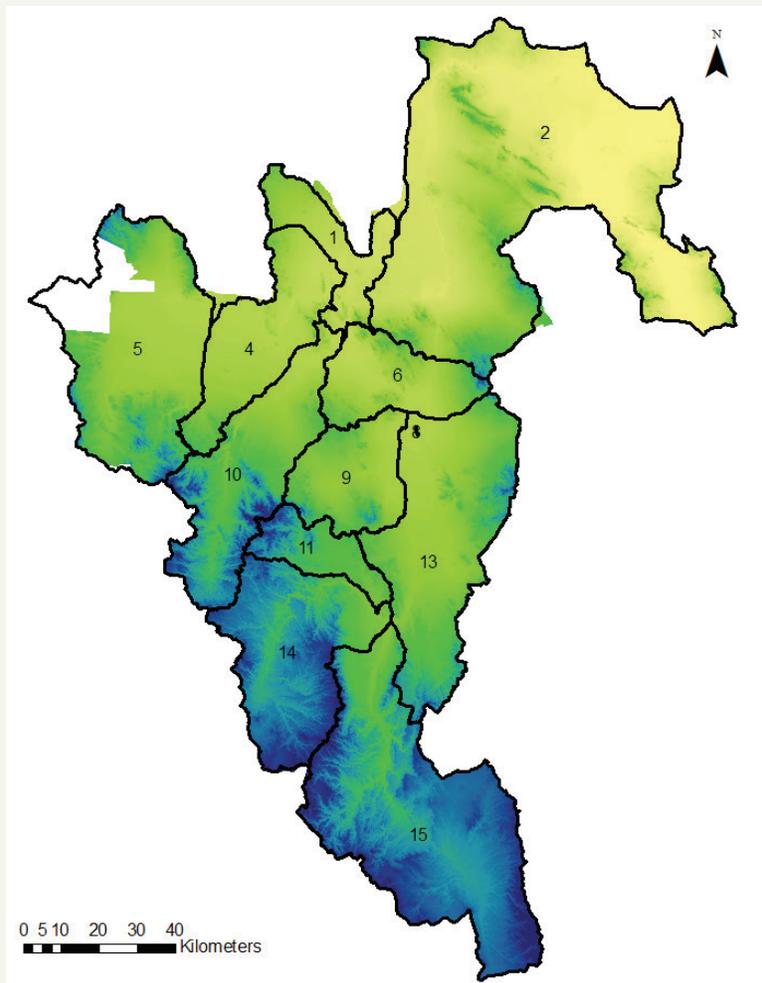


Figura 61. Reclasificación de la cuenca de Casas Grandes.

Las cuencas WEAP son elaboradas por la intersección de la cuenca (watershed) seleccionada con la clasificación de altitud cada 1000m, con los siguientes resultados (tabla 46, figura 62).

Tabla 46. Delimitación de cuencas WEAP conforme a las cuencas oficiales y clasificación de altitud.

| CUENCA | CLASIFICACIÓN DEL ÁREA [HA] | | | |
|--------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1187-1500 [m] | 1500-2000 [m] | 2000-2500 [m] | 2500-3000 [m] |
| 1 | 50459 | 5857 | 0 | 0 |
| 2 | 432998 | 44690 | 1702 | 0 |
| 4 | 91048 | 15061 | 35 | 0 |
| 5 | 87029 | 82093 | 8391 | 10 |
| 6 | 54907 | 19605 | 1057 | 0 |
| 9 | 35256 | 40004 | 1278 | 0 |
| 10 | 30674 | 74858 | 35112 | 507 |
| 11 | 0 | 31203 | 11699 | 93 |
| 13 | 77501 | 107128 | 8762 | 5 |
| 14 | 0 | 47348 | 101098 | 2203 |
| 15 | 0 | 68389 | 199026 | 10400 |

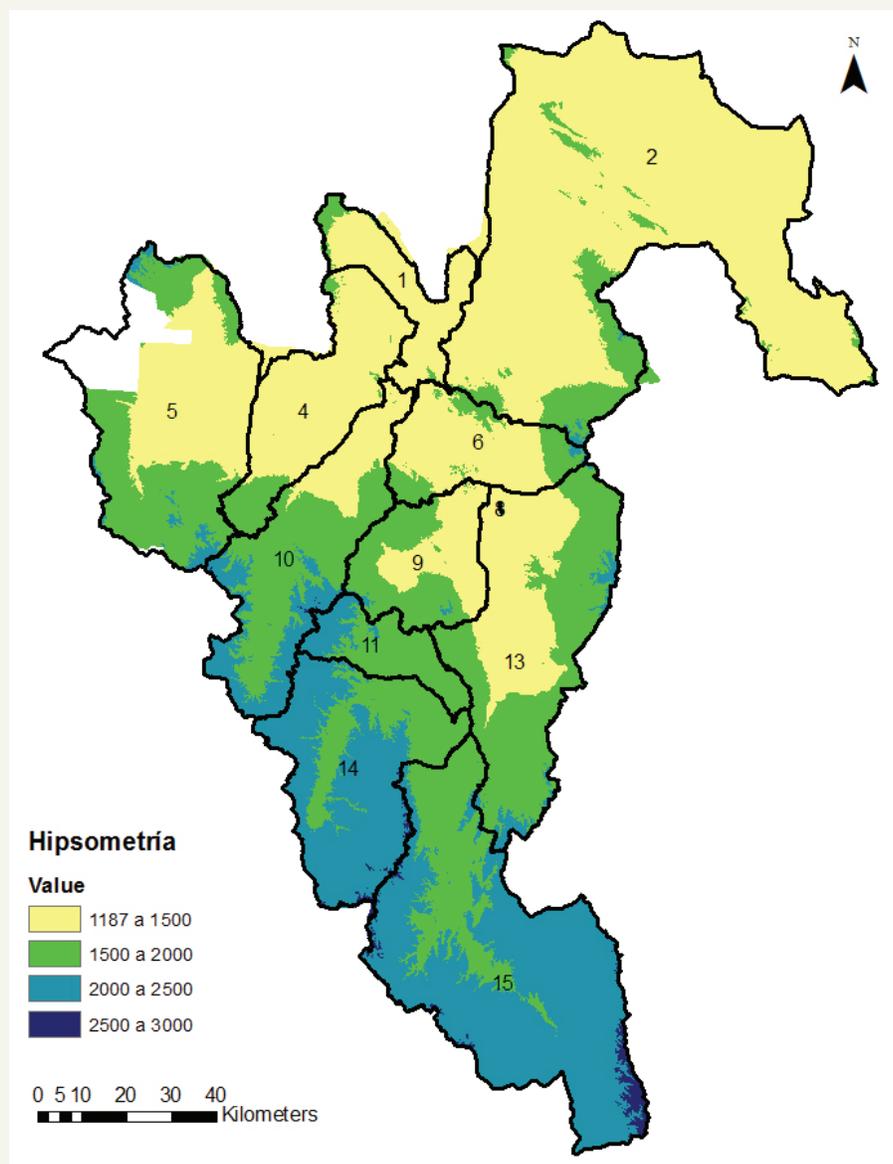


Figura 62 Delimitación de cuencas WEAP conforme a la clasificación de altitud.

La selección de las series temporales representativas para la precipitación y temperatura resultó en las mismas estaciones de medición; su localización se indica en el mapa de la figura 63. En las siguientes tablas, mapas y gráficas informativas se presentan la climatología y acumulación anual o promedios, respectivamente para la precipitación y temperatura, de las estaciones seleccionadas.

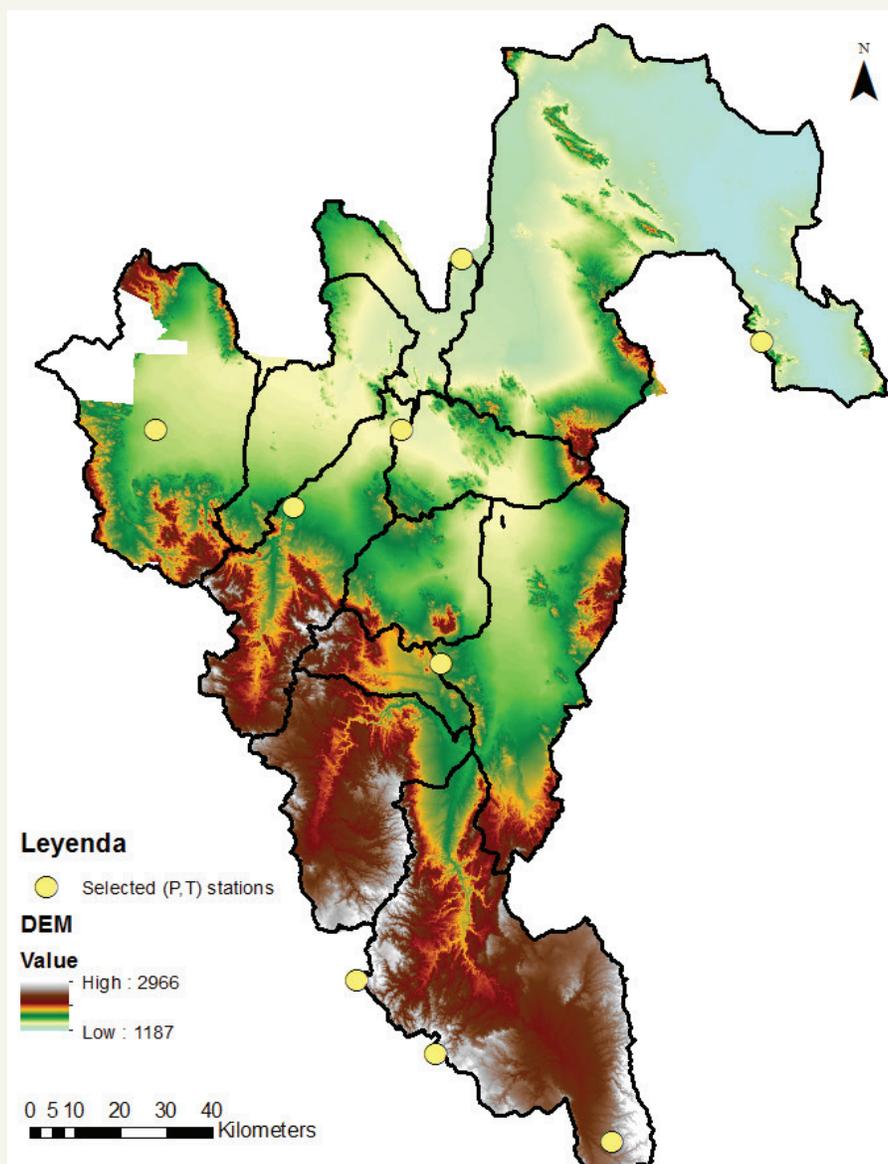


Figura 63 Estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas.

Tabla 47 Estaciones de precipitación y temperatura seleccionadas.

| ID | Nombre | Municipio | Años Efectivos | Latitud | Longitud | Dentro de Cuenca WEAP (SÍ / NO) | % de Datos Faltantes |
|------|--------------------|---------------|----------------|---------|----------|---------------------------------|----------------------|
| 8008 | BAVICORA | GÓMEZ FARÍAS | 29.54 | 29.37 | -107.75 | Y | 77% |
| 8103 | MESA DEL HURACÁN | MADERA | 33.63 | 29.63 | -108.24 | Y | 64% |
| 8125 | SAN JUAN DE ARRIBA | MADERA | 24.74 | 29.8 | -108.31 | Y | 77% |
| 8298 | DUBLAN | CASAS GRANDES | 21.69 | 30.47 | -107.95 | Y | 40% |
| 8211 | CASA DE JANOS | JANOS | 11.64 | 30.72 | -108.42 | N | 84% |
| 8129 | SANTA ANITA | JANOS | 25.25 | 30.86 | -108.75 | N | 78% |
| 8080 | JANOS (SMN) | JANOS | 22.64 | 30.89 | -108.19 | N | 84% |
| 8077 | GUZMÁN | ASCENSIÓN | 25.39 | 31.22 | -107.46 | N | 76% |
| 8084 | ASCENSIÓN (DGE) | ASCENSIÓN | 43.73 | 31.1 | -108 | Y | 1% |

Nota: Debido a la proporción de datos faltantes en el conjunto de datos seleccionados, fueron utilizadas las estaciones meteorológicas localizadas en la misma cuenca (en lugar de las estaciones seleccionadas) y próximas a la cuenca (watershed) para llenar los datos faltantes (ID): 8010, 8034, 8055, 8066, 8091, 8173, 8176, 8210, 8296, 8309, 8332, 26006, 26012, 26023, 26067, 26205, 26224, 26257, 26289.

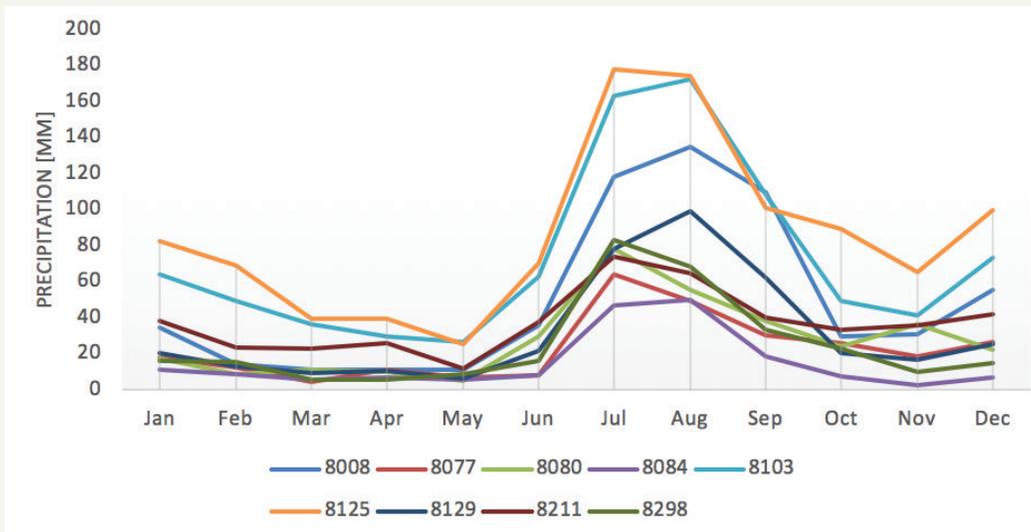


Figura 64. La climatología mensual de las estaciones de precipitación seleccionadas para cada una de las cuencas WEAP.

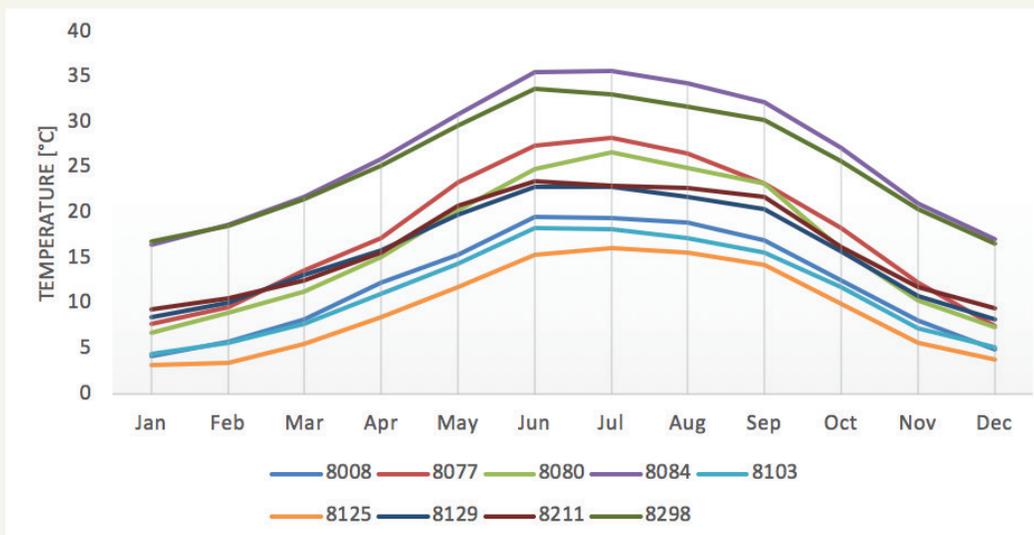


Figura 65. La climatología mensual de las estaciones de temperatura seleccionadas para cada una de las cuencas WEAP.

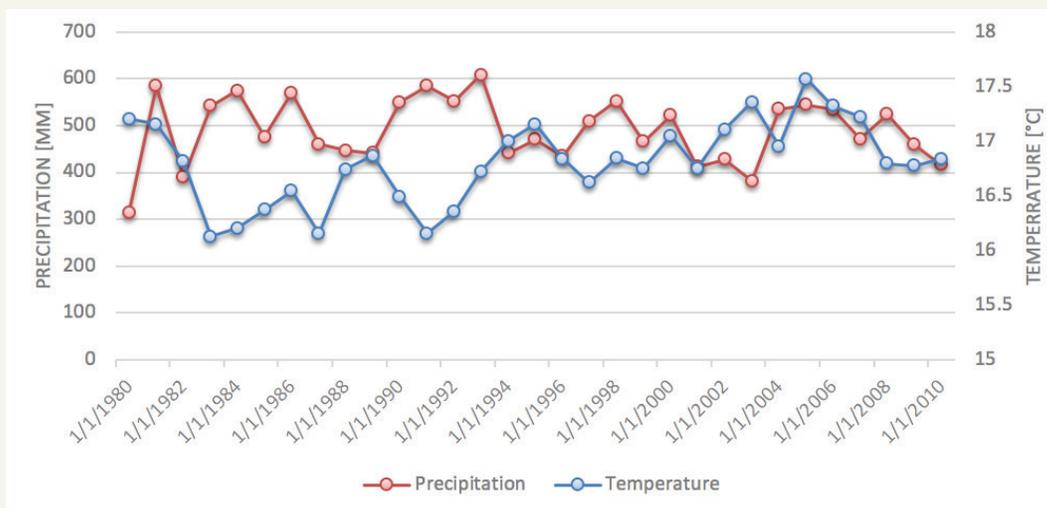


Figura 66. Precipitación anual acumulada y temperatura mensual promedio de todas las cuencas WEAP en la RH Casas Grandes.

En el siguiente mapa (figura 67) se visualizan todas las entidades de uso de suelo presentes en la RH Casas Grandes. En la tabla 48 se dan las hectáreas de las entidades posibles dentro de la cada cuenca WEAP, como entrada de datos para el modelo WEAP.

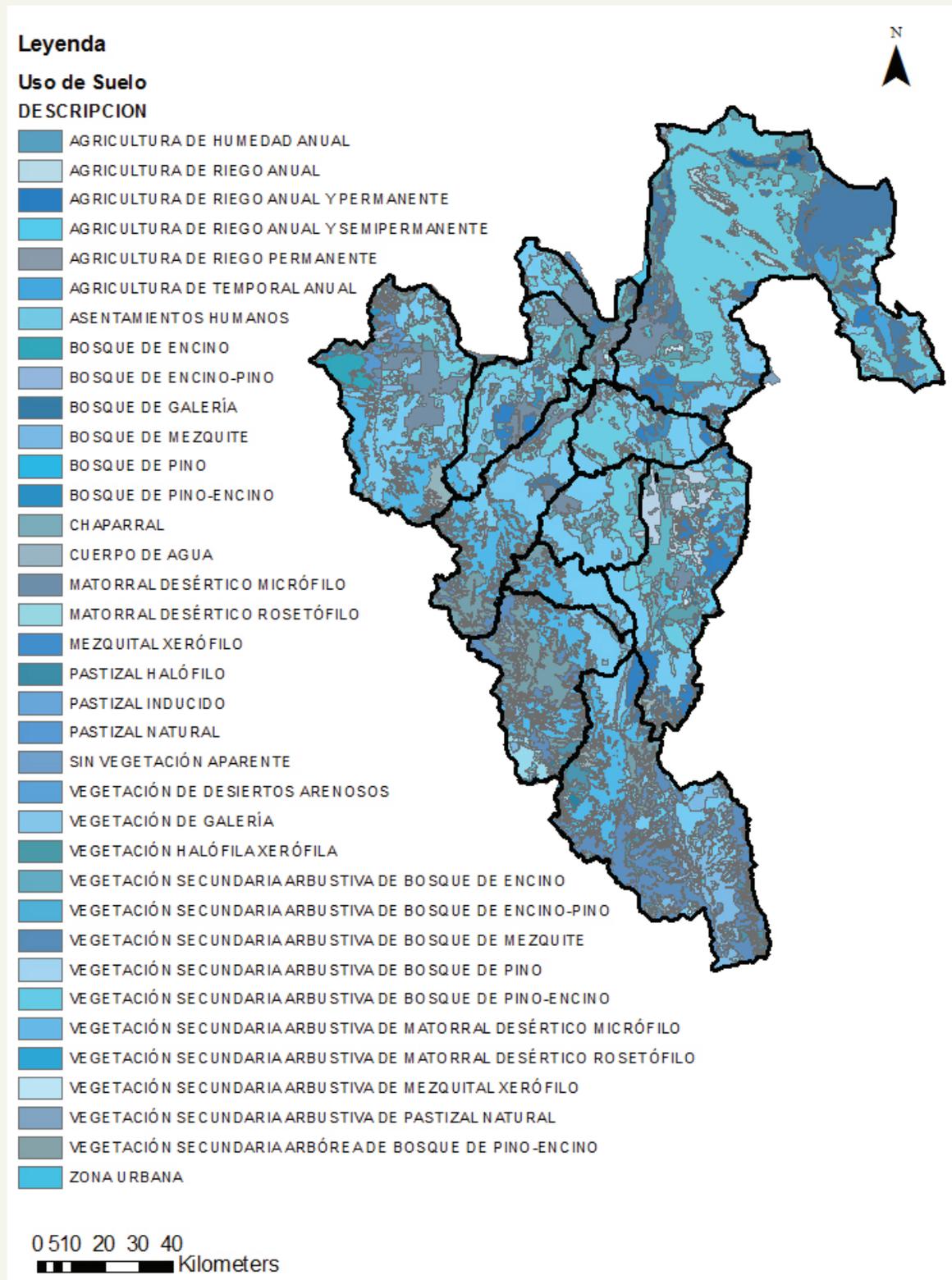


Figura 67. La RH Casas Grandes clasificada en las diferentes entidades de uso de suelo.

Tabla 48. Contribución (en ha) de las diferentes entidades de uso de suelo a cada una de las cuencas WEAP.

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|--------|--------|--------|
| | 1_1500 | 1_2000 | 1_2500 | 1_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 10721.8 | 5663.5 | 0.0 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 14977.6 | 193.1 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 11.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 592.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 5340.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 465.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 1444.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 12407.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 24.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 4474.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|--|---|---------|--------|--------|
| | 2_1500 | 2_2000 | 2_2500 | 2_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 25346.7 | 25768.4 | 551.0 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 211552.1 | 3997.4 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 110.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 1086.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 31671.2 | 68.4 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 3363.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 14274.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 16896.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 83906.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO | 1047.4 | 1074.0 | 47.9 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO | 5436.8 | 5173.3 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 12719.7 | 6232.1 | 56.9 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 5283.0 | 734.6 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 1645.0 | 1044.8 | 0.0 |
| SIN VEGETACIÓN APARENTE | 9098.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE MEZQUITE | 29.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| MEZQUITAL XERÓFILO | 8924.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE | 41.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS | 1362.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ZONA URBANA | 844.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|--------|--------|--------|
| | 4_1500 | 4_2000 | 4_2500 | 4_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 30377.2 | 9105.6 | 0.0 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 24142.8 | 107.0 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 336.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 36.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 8723.4 | 954.2 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 356.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 3469.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 11717.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 3049.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 7556.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 1283.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 4361.7 | 22.3 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 532.0 | 13.1 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|--|---|---------|--------|--------|
| | 5_1500 | 5_2000 | 5_2500 | 5_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 33178.5 | 33608.5 | 175.6 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 24800.2 | 1567.3 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 9.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 10.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 3034.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 1453.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 409.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 22010.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 1279.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 416.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 137.1 | 35204.2 | 2620.8 | 0.0 |
| BOSQUE DE MEZQUITE | 0.0 | 17.4 | 0.0 | 0.0 |
| ZONA URBANA | 292.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 6625.6 | 1273.1 | 0.0 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 2042.5 | 848.7 | 0.1 |
| BOSQUE DE PINO | 0.0 | 324.9 | 536.7 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 1762.6 | 587.2 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 868.0 | 2337.4 | 9.6 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 74.0 | 10.8 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|---------|--------|--------|
| | 6_1500 | 6_2000 | 6_2500 | 6_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 16418.2 | 14204.0 | 479.1 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 24976.1 | 2683.1 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 229.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 573.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 250.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 4150.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 2400.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 404.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 2681.1 | 2551.6 | 118.2 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 2827.0 | 5.5 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 161.4 | 459.2 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|---------|--------|--------|
| | 9_1500 | 9_2000 | 9_2500 | 9_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 8709.0 | 32385.5 | 800.9 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 15892.6 | 1829.9 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 25.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 4764.5 | 1578.5 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 200.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 4272.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 342.7 | 3286.2 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 81.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 0.0 | 225.6 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 690.5 | 274.3 | 0.0 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 4.7 | 201.3 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO | 965.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|---------|---------|---------|
| | 10_1500 | 10_2000 | 10_2500 | 10_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 8031.7 | 32822.2 | 57.7 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 12260.8 | 520.0 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 211.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 0.0 | 116.3 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 0.0 | 0.0 | 120.2 | 8.1 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 598.7 | 129.1 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 6624.4 | 1787.5 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 521.3 | 985.9 | 346.8 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 800.1 | 2111.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 1227.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 26794.7 | 13942.8 | 74.2 |
| ZONA URBANA | 397.5 | 43.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 386.3 | 901.5 | 0.0 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 335.4 | 7398.6 | 207.1 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 8313.8 | 9869.7 | 23.6 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 351.5 | 2112.5 | 162.9 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 162.9 | 359.5 | 31.2 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|---------|---------|---------|
| | 11_1500 | 11_2000 | 11_2500 | 11_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 0.0 | 20972.8 | 478.9 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 0.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 0.0 | 255.6 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 0.0 | 214.6 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 8287.0 | 6027.2 | 1.2 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 0.0 | 1024.6 | 91.6 |
| BOSQUE DE PINO | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 35.0 | 4169.0 | 0.1 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE | 0.0 | 1434.4 | 0.0 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|---|---|---------|---------|---------|
| | 13_1500 | 13_2000 | 13_2500 | 13_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 3410.0 | 38647.1 | 45.4 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 6667.0 | 19600.0 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 738.1 | 19.7 | 0.0 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 618.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 8101.1 | 1620.9 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 6032.9 | 6327.9 | 3.6 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 19064.1 | 3.3 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 5288.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO | 80.2 | 332.7 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 1034.5 | 25583.8 | 1582.2 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 586.7 | 2039.9 | 0.0 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 6623.8 | 3712.4 | 0.7 |
| MEZQUITAL XERÓFILO | 195.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS | 71.1 | 25.9 | 0.0 | 0.0 |
| ZONA URBANA | 2457.6 | 11.1 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 1552.1 | 773.6 | 0.0 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 486.2 | 89.3 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 1638.2 | 2419.1 | 4.7 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 211.8 | 133.1 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO | 20026.0 | 1893.4 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE | 2462.9 | 505.6 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE | 668.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|--|---|---------|---------|---------|
| | 14_1500 | 14_2000 | 14_2500 | 14_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 0.0 | 17278.9 | 323.9 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 0.0 | 620.4 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 0.0 | 18.0 | 0.0 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 0.0 | 60.5 | 671.5 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 0.0 | 2669.0 | 4986.2 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 13909.3 | 25085.8 | 151.1 |
| ZONA URBANA | 0.0 | 250.6 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 0.0 | 417.3 | 20.7 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 1293.2 | 25419.7 | 838.6 |
| BOSQUE DE PINO | 0.0 | 0.0 | 8309.7 | 502.3 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 9248.7 | 31278.1 | 90.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 0.0 | 3290.2 | 472.5 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 0.0 | 642.1 | 82.8 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE | 0.0 | 1951.6 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO | 0.0 | 0.0 | 674.5 | 44.5 |

| ENTIDADES POR CUENCA WEAP | ÁREA [ha] DE CUENCA WEAP (Cuenca_Altitud) | | | |
|--|---|---------|---------|---------|
| | 15_1500 | 15_2000 | 15_2500 | 15_3000 |
| PASTIZAL NATURAL | 0.0 | 16436.1 | 26940.7 | 0.0 |
| MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO | 0.0 | 80.6 | 0.0 | 0.0 |
| ASENTAMIENTOS HUMANOS | 0.0 | 213.4 | 413.3 | 0.0 |
| CUERPO DE AGUA | 0.0 | 0.0 | 180.9 | 0.0 |
| PASTIZAL HALÓFILO | 0.0 | 87.9 | 207.5 | 0.0 |
| PASTIZAL INDUCIDO | 0.0 | 1668.4 | 3014.7 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL | 0.0 | 4.9 | 201.7 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE | 0.0 | 2026.6 | 140.5 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL | 0.0 | 2185.7 | 36019.6 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL | 0.0 | 5916.8 | 156.4 | 0.0 |
| BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 27238.0 | 20307.5 | 127.4 |
| ZONA URBANA | 0.0 | 70.1 | 324.3 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO | 0.0 | 58.0 | 1981.4 | 52.8 |
| BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 3915.1 | 82050.2 | 6098.1 |
| BOSQUE DE PINO | 0.0 | 0.0 | 348.6 | 395.2 |
| BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 6860.5 | 10338.6 | 299.4 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 413.1 | 13475.7 | 3370.9 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO | 0.0 | 0.0 | 781.8 | 14.1 |
| AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE | 0.0 | 943.4 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO | 0.0 | 0.0 | 1082.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN DE GALERÍA | 0.0 | 188.3 | 0.0 | 0.0 |
| VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO | 0.0 | 26.0 | 895.2 | 41.7 |
| BOSQUE DE GALERÍA | 0.0 | 60.6 | 0.0 | 0.0 |
| AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL | 0.0 | 0.0 | 177.1 | 0.0 |

Los diferentes sitios de demanda en relación con la red de ríos conforme a la metodología descrita en el capítulo anterior se presentan en la figura 68 y resumen en la Tabla 49:

Tabla 49. Demanda Resumida.

| TIPO DE DEMANDA | DEMANDA TOTAL [m ³] |
|----------------------------|---------------------------------|
| PÚBLICO URBANO / DOMÉSTICO | 276,500 |
| GANADERÍA | 1,189,848 |
| AGRICULTURA | 38,629,401 |

Demandas Casas Grandes

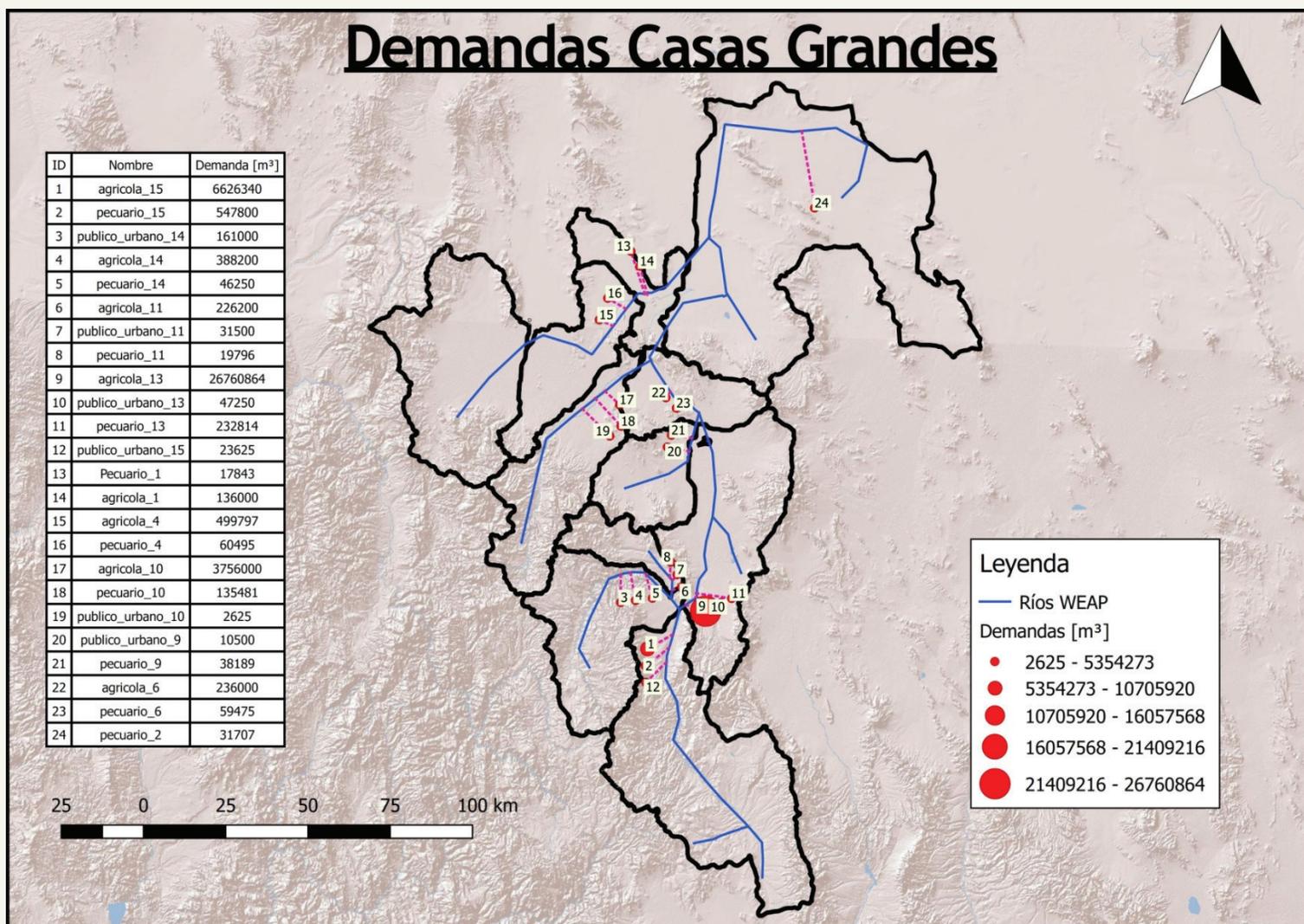


Figura 68. Sitios de demanda principales para los diferentes usos de agua en cada cuenca WEAP de la RH Casas Grandes

En la tabla 50, la estación hidrométrica de la región hidrográfica Casas Grandes se presenta con sus valores de indicadores del desempeño de la calibración. En la figura 69 se hace la comparación entre las hidrográficas observadas y simuladas de la estación.

Tabla 50. Las estaciones de descarga para la evaluación de desempeño de la calibración del modelo WEAP en Casas Grandes.

| CÓDIGO | NOMBRE ESTACIÓN | RÍO | LATITUD | LONGITUD | R2 | NSE |
|--------|-----------------|-------------------|---------|----------|------|------|
| 34004 | CASAS GRANDES | RIO CASAS GRANDES | 30.375 | -107.933 | 0.55 | 0.46 |

El modelo tiene un buen desempeño para la estación seleccionada. La variación aleatoria en el caudal pico más alto y más bajo puede ser el resultado de un proceso de imputación de datos climáticos faltantes o el uso de datos climáticos de una estación próxima cuando no hay una estación en la cuenca. En este caso específico, aparte de las simplificaciones generales en los datos de entrada del modelo, los siguientes factores particulares juegan un rol:

- Las series temporales de datos batimétricos y volumen almacenado no fueron proporcionados.
- Corriente abajo y especialmente en la salida de la región hidrográfica no hay estaciones hidrométricas.
- Antes de la estación pluviométrica hay un canal con un consumo de agua muy irregular.

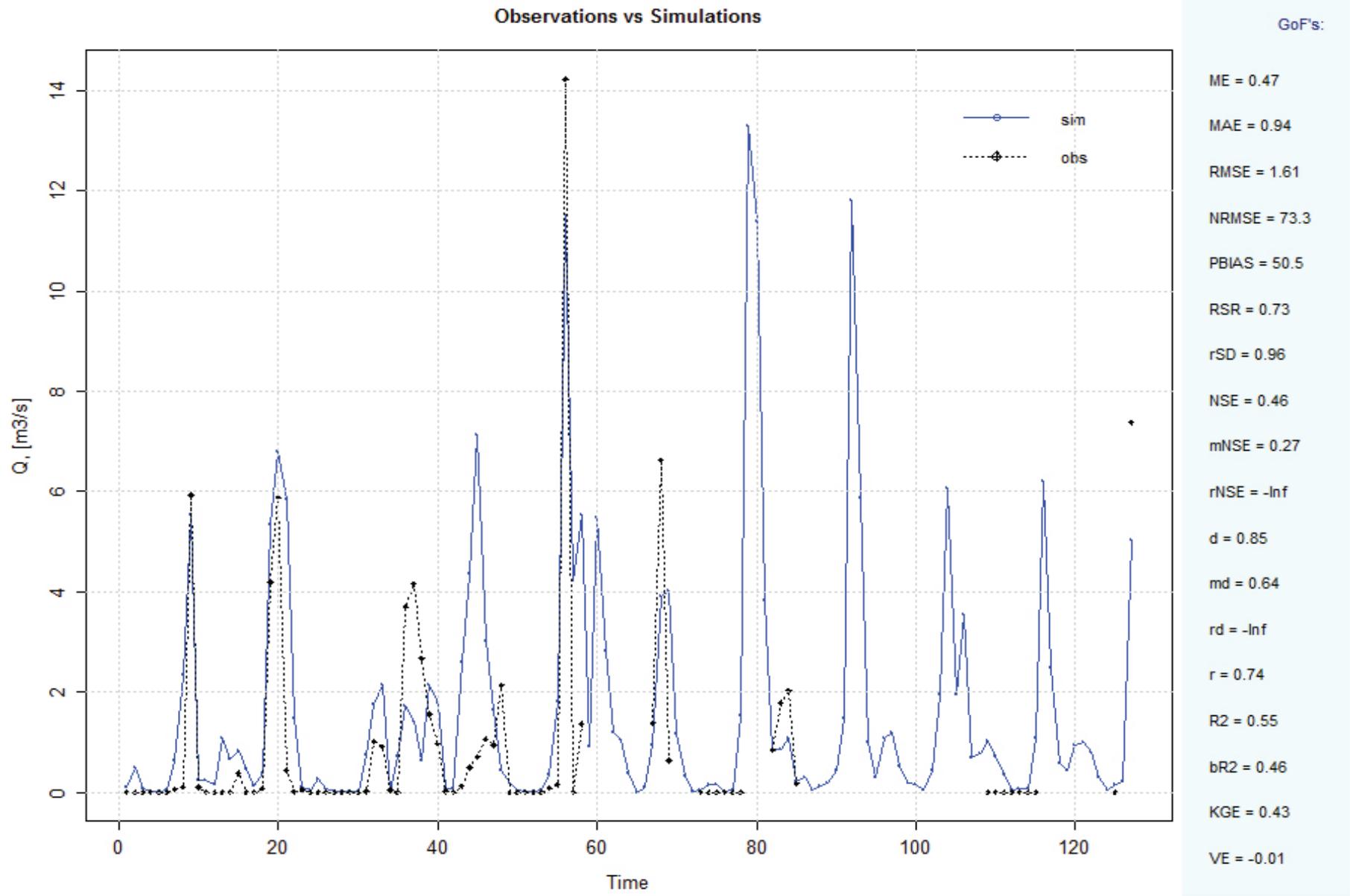


Figura 69. Hidrográficas observadas (línea negra punteada) y simuladas (línea azul continua) para la estación 34004 'Casas Grandes', para el periodo de (01/1980 – 12/1994) y sus indicadores de desempeño, elaborados con hydrogof en R.

3. ELABORACIÓN DEL SISTEMA ‘PRUEBA DE ESTRÉS’

3.1. Metodología

3.1.1. Desarrollo de los escenarios de decisión

Se elaboran escenarios de decisión que reflejen decisiones de manejo alternativos con respecto al uso esperado del recurso hídrico y diseño de la reserva de agua. Deben considerarse los escenarios futuros, enfocándose en las tendencias meteorológicas en diferentes escenarios de cambio climático, para considerar los recursos hídricos disponibles en los siguientes diez años.

Para evaluar la presión del uso de agua sobre el sistema hidrológico se hará una comparación entre el escenario de línea de base, el comportamiento de la cuenca con el uso de suelo y las demandas de agua actuales, y el escenario natural, considerando simulaciones de descarga sin intervención antropogénica, en relación con la extracción de agua de caudales superficiales.

Por lo tanto, los escenarios de decisión serán considerados como se muestran en la tabla 51.

Tabla 51. los diferentes escenarios de decisión para la prueba de esfuerzo, incluyendo los componentes de tiempo e intervención.

| | | INTERVENCIÓN | |
|--------|---|---|--|
| TIEMPO | Hidrología natural bajo condiciones meteorológicas observadas históricamente. | Hidrología con presiones actuales de uso de suelo y agua bajo condiciones meteorológicas observadas históricamente. | |
| | Hidrología natural bajo condiciones de cambio climático. | Hidrología con presiones de uso de suelo y agua actual bajo condiciones de cambio climático. | |

Debido a que todos los Modelos de Cambio Climático Globales (GCMs, acrónimo en inglés de Global Climate Change Models) resultan en un rango de posibles tendencias meteorológicas, el ‘escenario futuro’ se subdivide en los siguientes tres escenarios para cubrir un amplio rango de escenarios posibles en la distribución completa y permitir la visualización de la incertidumbre en las simulaciones:

- CC5%: las tendencias de precipitación y temperatura conforme a los GCMs que proyectan el 5% de los escenarios más secos.
- CC50%: las tendencias de precipitación y temperatura conforme al valor de la media de todos los GCMs.
- CC95%: las tendencias de precipitación y temperatura conforme a los GCMs que proyectan el 5% de los escenarios más húmedos.

3.1.2. Modelación del Cambio Climático

Para la elaboración de los escenarios futuros, se utilizó el generador de modelo meteorológico SIMGEN¹. El software SIMGEN, desarrollado por Arthur Greene del Instituto Internacional de Investigaciones para el Clima y la Sociedad (IRI, acrónimo en inglés de International Research Institute for Climate and Society) (Greene et al., 2015), es una herramienta de análisis de escenarios climáticos, haciendo uso de datos externos.

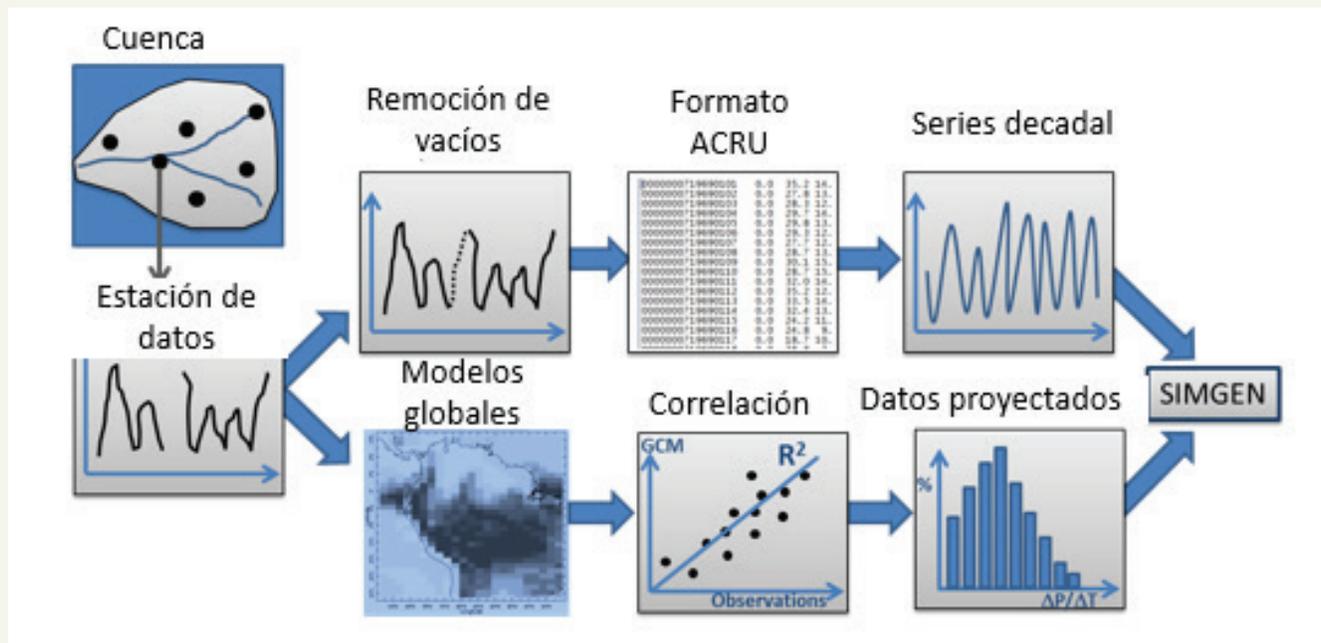
Los dos pasos principales para obtener las series temporales con las tendencias meteorológicas para los escenarios de cambio climático de la prueba de esfuerzo son el pre-procesamiento de los datos y la Prueba de Esfuerzo Climático en sí (Greene et al., 2015).

¹ Otra opción es utilizar el Paquete R weathergen, un Paquete R de Stochastic Weather Generator por UMass HydroSystems Research Group (Steinschneider y Brown, 2013)

3.1.2.1. Pre-procesamiento de los datos

Tanto los datos de entrada locales para el modelo SIMGEN, así como para los modelos de Cambio Climático Globales (GCMs), tienen que prepararse para el análisis. Por lo tanto, se desarrolló una serie de pasos de pre-procesamiento para preparar los conjuntos de datos para su captura en la herramienta de análisis de escenario climático (SIMGEN), tal como se presenta en la Figura 70.

Figura 70. Diagrama de flujo de los pasos de pre-procesamiento de la prueba de esfuerzo climática



Remoción de vacíos:

Éste consiste en el primer paso por medio de la lectura de la precipitación diaria y temperatura mínima y máxima de las estaciones meteorológicas localizadas en el área de interés. Estos conjuntos de datos se prueban para verificar su consistencia y se aplican métodos efectivos para llenar cualquier hueco en los mismos.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la Biblioteca de Datos Climáticos (<http://www.climatedatalibrary.cl/SOURCES/.Mexico/.Meteorological/>), utilizando una secuencia de comandos en el software de programación de R, similar a la adquisición de datos meteorológicos para la calibración WEAP. En el caso de la precipitación, se ejecutó la eliminación de huecos utilizando el producto CHIRPS versión 2.0 de UC Santa Barbara (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UCSB/.CHIRPS/.v2p0/.daily/.global/.op05/>) y en el caso de la temperatura (CPC). Estas series temporales meteorológicas fueron convertidas al formato requerido para su captura en el modelo SimGen.

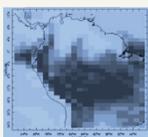
Formato Acru:

Se continúa la formatación de los conjuntos de datos de las estaciones para cubrir los requerimientos del generador meteorológico SIMGEN. Consiste en agregar una marca de la hora y fecha específicos, así como un formateado espacial de los datos diarios de precipitación y temperatura en un archivo para cada estación.

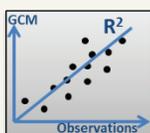
Serie decadal:

Una primera salida de datos del paso de pre-procesamiento es la generación de una serie temporal de decenio que representa la variabilidad natural de precipitación y temperatura en la cuenca, consistente con el registro histórico. Esto proporcionará el contexto contra el cual se agregarán los demás procesos (variabilidad diaria y tendencia de cambio climático).

Global Models

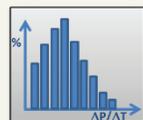


Independientemente de la preparación de datos, se analizan 43 Modelos de Circulación Global (GCMs, acrónimo en inglés de Global Circulation Models). Los GCMs son parte de la Fase 5 del Proyecto de Modelo Climático Comparativo (CMIP5, acrónimo en inglés de Climate Model Intercomparison Project Phase 5). Se descargaron series temporales mensuales de precipitación y temperatura para la cuenca de interés, tanto para el periodo histórico (1980-2010) como para el periodo proyectado (2030-2060).



Se agrega un control de calidad en este paso para detectar aquellos GCMs que no representen bien la variabilidad natural del registro observacional. Esto puede utilizarse para identificar aquellos GCMs que tienen un desempeño deficiente para la cuenca de interés y por lo tanto se anticipa que también serán menos representativos para los cambios proyectados. Se utilizó un umbral arbitrario de $R^2=0.15$ para detectar aquellos GCMs que tengan un débil desempeño al representar las condiciones observadas.

Projected Change



Con la lista de los GCMs seleccionados, se deriva el cambio en precipitación para cada incremento de temperatura, creando una distribución de posibles cambios. Este es un paso de pre-procesamiento importante ya que indica para la cuenca local de interés cuáles son los diferentes cambios en precipitación y temperatura que pueden esperarse, con base en GCMs que representen adecuadamente las condiciones locales.

3.1.2.2. El Análisis de Escenario Climático

El análisis de escenario climático es ejecutado en SIMGEN (Greene, 2012; Greene et al., 2012a; Greene et al., 2012b), el cual se aplicó con éxito en el sur de Sudamérica (Greene et al., 2015). La descripción general del paquete SIMGEN se presenta en la Figura 71.

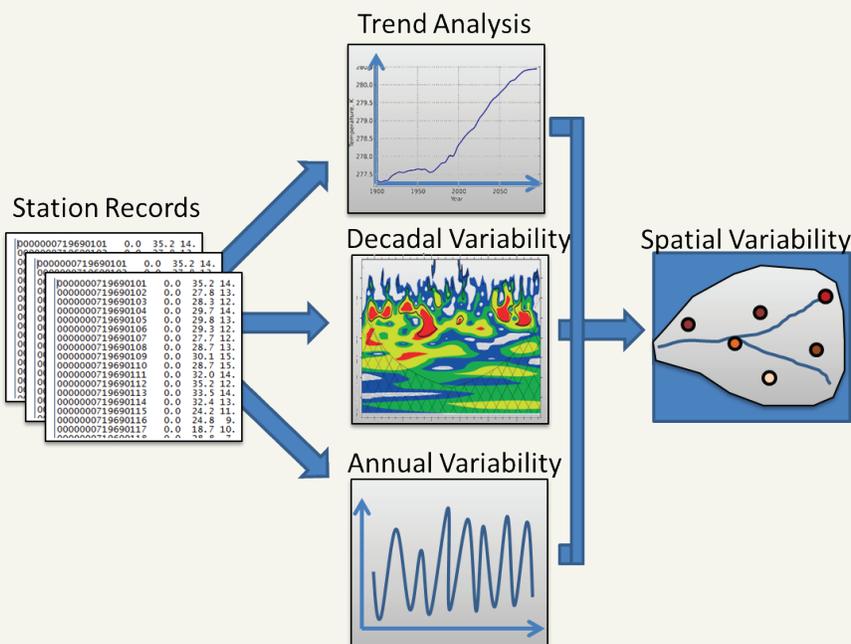
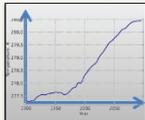


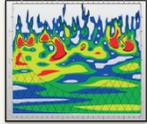
Figura 71. Diagrama de flujo del módulo de escenario climático de SIMGEN (Greene, 2012) como parte de la prueba de esfuerzo climática

Trend Analysis

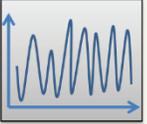


El generador meteorológico SIMGEN puede resumirse como sigue. Inicia a partir de un conjunto de observaciones por las estaciones de la precipitación diaria y temperaturas mínimas y máximas. Estos datos se evalúan para detectar posibles tendencias, debido al forzamiento antropogénico, lo cual se determina por medio de la comparación con el incremento de la temperatura global debido al cambio climático.

Decadal Variability



Annual Variability



La señal restante se considera como variabilidad natural y se divide en dos componentes. Por un lado, se evalúan las series para detectar una variabilidad sistemática por decenios, tales como oscilaciones recurrentes (por ejemplo, ‘El Niño’), y por otro lado, la señal restante se modela como eventos aleatorios al mismo tiempo que se conservan las características estadísticas de la señal original. Para generar futuros escenarios climáticos, se agrega una tendencia a las observaciones de precipitación y temperatura. La temperatura multi-modelo media global modelada se utiliza para proyectar la temperatura mínima y máxima, utilizando la sensibilidad de las observaciones de temperatura en las décadas anteriores comparadas con el calentamiento global promedio anterior determinado por los modelos de circulación global (GCMs, acrónimo en inglés de global circulation models) como un mecanismo para extenderlos hacia el futuro próximo, utilizando proyecciones modelo del calentamiento global promedio a partir de los

mismos modelos. En el caso de la precipitación, la proyección a futuro se obtiene de manera diferente, evaluando la distribución completa de 43 GCMs del proyecto de comparación de modelos CMIP5 e identificando el rango de posibles respuestas de precipitación.

Spatial Variability



Con base en este análisis se generan series sintéticas para la precipitación y temperatura, haciendo una reducción de escala de los valores anuales a series temporales diarias en las ubicaciones de las estaciones originales utilizando una técnica de K-vecinos más cercanos. Los escenarios se proyectan para el período 2030-2060.

Utilizando la herramienta de análisis de escenario climático SIMGEN, se pueden generar respuestas significativamente diferentes, ya que la distribución completa de las proyecciones GCM pueden muestrearse (posiblemente abarcando tanto escenarios de mayor humedad como mayor sequía), resultando en un número ilimitado de posibles series temporales. De tal forma, el generador meteorológico está bien adaptado para explorar el espacio climático completo que puede esperarse bajo escenarios de cambio climático, evaluando el impacto del calentamiento global sobre las tres variables mientras que se mantiene su inter-correlación variable.

3.1.3. Modelación Hidrológica

3.1.3.1. Elaboración de la Superficie de Respuesta

Un último paso en la prueba de esfuerzo climático consiste en planificar una ruta de los escenarios climáticos a través de una herramienta de evaluación del equilibrio hídrico. Este paso puede generarse con cualquier modelo hidrológico que proporcione conocimiento (insights) sobre el proceso de asignación de agua y que permite identificar los umbrales críticos. En este proyecto, se seleccionó el modelo WEAP, tal como se presentó en la primera parte del presente reporte. Los pasos en este proceso se ilustran en la Figura 72.

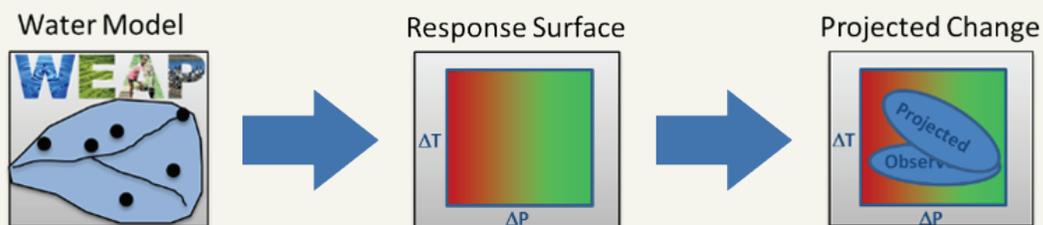
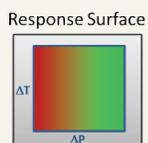


Figura 72. Diagrama de flujo de los pasos de la modelación hidrológica de la prueba de esfuerzo climática.

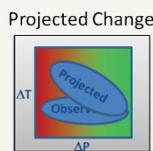
Water Model



Se requiere un modelo hidrológico para traducir los escenarios climáticos a escenarios de disponibilidad de agua. Ya que los escenarios climáticos solo proporcionan conocimiento (insights) en cuanto a los cambios de precipitación y temperatura, un modelo hidrológico puede procesar estos estados climáticos futuros y proporcionar un efecto plausible de estos cambios sobre la seguridad del agua en la cuenca.



Un primer paso analítico involucra las pruebas de sensibilidad del modelo de cuenca. El objetivo de este proceso es definir la respuesta del sistema a impulsores externos, tales como la temperatura y precipitación. El rango de condiciones probadas debe ser lo suficientemente amplio para abarcar todos los estados climáticos observados y futuros.



El segundo paso del proceso involucra la identificación del cambio proyectado de la disponibilidad y asignación del agua en la cuenca. Esto requiere correr primero el modelo de la cuenca en modo histórico, identificando el rango de condiciones normales, incluyendo episodios de exceso y déficit. Finalmente, los escenarios climáticos proyectados se corren a través del modelo, identificando cómo el rango de proyecciones del modelo podría alterar la disponibilidad de agua en la cuenca.

Los siguientes escenarios fijos serán trazados sobre la superficie de respuesta, mostrando la diferencia en respuesta entre las series temporales históricas y escenarios futuros (tal como se explica en 6.1.1):

Tabla 52 los diferentes escenarios trazados en las superficies de respuesta².

| ESCENARIO | DESCRIPCIÓN |
|---------------------------------|---|
| Percentil 5 – 1980-2010 | El 5% de los valores más secos observados en el periodo histórico |
| Percentil 50 – 1980-2010 | El 50% de los valores más secos observados en el periodo histórico |
| Percentil 95 – 1980-2010 | El 95% de los valores más secos observados en el periodo histórico |
| Proyección 2030-2060 CC5% P5% | El 5% de las series más secas generadas aleatoriamente del 5% de la cola de GCMs que muestran la tendencia más alta en reducción de precipitación e incremento de temperatura. |
| Proyección 2030-2060 CC50% P5% | El 5% de las series más secas generadas aleatoriamente de la tendencia promedio en la reducción de precipitación e incremento en temperatura de todos los GCMs seleccionados. |
| Proyección 2030-2060 CC50% P50% | El 50% de las series más secas generadas aleatoriamente de la tendencia promedio en reducción de precipitación e incremento de temperatura de todos los GCMs seleccionados. |
| Proyección 2030-2060 CC50% P95% | El 95% de las series más secas generadas aleatoriamente de la tendencia promedio en reducción de precipitación e incremento de temperatura de todos los GCMs seleccionados. |
| Proyección 2030-2060 CC95% P95% | El 95% de las series más secas generadas aleatoriamente del 5% de la cola de GCMs que muestran la tendencia más baja en reducción de precipitación e incremento de temperatura. |

Los límites del eje son determinados por la siguiente fórmula (eje-x, Eq. 1 y 2 – eje-y, Eq. 2 y 3):

$$x_{min} = \text{Precipitación de (CC5\% P5\%)} * 0.9 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$x_{max} = \text{Precipitación de (CC95\% P95\%)} * 1.1 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$y_{min} = \text{Temperatura de (CC95\% P95\%)} * 0.9 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$y_{max} = \text{Temperatura de (CC5\% P5\%)} * 1.1 \quad (\text{Eq. 4})$$

En las superficies de respuesta las metas de las reservas de agua medioambiental, propuestas por WWF México, son utilizadas como delimitación (indicadas por un tono de color diferente) de los niveles críticos o rangos de la hidrología en cada cuenca. Estas metas de las reservas de agua, y caudales ecológicos asociados, fueron determinadas por WWF para todas las cuencas en el país y se propone que se implementen dentro de la legislación nacional sobre aguas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México. En 3.1.3.2. se presenta una breve explicación del marco conceptual de los caudales ecológicos. En el anexo 1 se enlistan los valores mensuales de cada clase y para cada cuenca piloto. Más adelante, los diferentes indicadores de desempeño y umbrales que definan la vulnerabilidad de las cuencas en términos de reservas de agua pueden derivarse a partir de estos gráficos de superficie de respuesta.

² El paso temporal indica el año o meses/temporada más seca, dependiendo de la superficie de respuesta considerada, tal como se explica en 3.1.3.1.

Para cada cuenca piloto se crearon 3 gráficos diferentes, basados en un análisis anual y por temporada del comportamiento real de la cuenca, incluyendo el uso de suelo actual y demandas de agua, y un análisis por temporada de un escenario natural, excluyendo todas las demandas de agua antropogénicas. El análisis por temporada se enfoca en los meses más secos del año. Una caracterización de la variación por temporada de los caudales de los ríos se elabora en 3.1.3.3., independientemente de si un análisis anual de las reservas de agua represente o no lo suficiente la posible presión sobre el agua en los meses más secos.

Para las superficies de respuesta por temporada se determina una regla para definir los meses que serán incluidos en este análisis. Los meses con la menor descarga durante el año que acumulen no menos que el 10% de la suma anual de la descarga promedio mensual histórica.

3.1.3.2. Marco conceptual de los Caudales Ecológicos

- **Caudales naturales mensuales promedio:** Variabilidad intra-anual de caudales conforme a los caudales inter-anales promedio para un mes dado del periodo representativo de su condición natural.
- **Caudales de temporada ordinarios:** Caudales mensuales promedio para condiciones anuales hidrológicas húmedas, promedio, secas y muy secas calculadas conforme a percentiles 75avo, 25avo, 10mo y 0, respectivamente. Representan el patrón intra-anual o de temporada y la variabilidad inter-anual de caudales.
- **Régimen de inundaciones:** Un conjunto de por lo menos tres tipos de eventos de inundaciones extraordinarios (pequeño, mediano y grande) tipificados conforme a las magnitudes de caudales de 1.0, 1.5 y 5.0 años de periodos de retorno (frecuencias) a partir de todos los registros de caudal máximo histórico no alterados (inter-anual) a una escala diaria y caracterizados con su correspondiente duración, momento e índice de cambio.
- **Objetivo/blanco ambiental:** En el contexto de las evaluaciones de los caudales ecológicos, establecen un equilibrio entre el uso de agua y las necesidades medioambientales de la cuenca, río o cuerpo de agua. Se definen conforme a la presión sobre el agua de la cuenca, río o cuerpo de agua y su importancia ecológica³. Hay cuatro clases, “A”, “B”, “C” y “D”, y representan el estado ecológico o de conservación que se busca (“muy bueno”, “bueno”, “moderado” y “deficiente”, respectivamente) para mantener la integridad actual de los ecosistemas de agua dulce o, cuando estos ecosistemas son considerados degradados, su recuperación o rehabilitación. Por ejemplo, un objetivo ambiental clase “A” representa un estado ecológico o deseado de conservación “muy bueno” y, por lo tanto, la evaluación de los caudales ecológicos y eventual propuesta conservará los componentes y atributos del caudal natural en una alta proporción. En el caso opuesto, una clase “D” consiste en conservar o recuperar los componentes y atributos del caudal en por lo menos alguna proporción, normalmente alejada de su estado natural.
- **Caudales ecológicos:** Un conjunto de caudales de temporada ordinarios y un régimen de inundaciones con un conjunto particular de la frecuencia de su ocurrencia conforme al objetivo ambiental⁴. En el caso de México, el decreto de reserva de agua es solo un volumen anual y no una frecuencia intra-annual. La siguiente sección, por lo tanto, se da solo como información pero no ha sido implementada como parte de este estudio.
- **Caudales ecológicos integrados (y/o reservas de agua):** Los caudales ecológicos o reservas de agua que integran las condiciones hidrológicas anuales y régimen de inundaciones a una escala diaria, mensual o anual, conforme a la frecuencia de ocurrencia para un objetivo ambiental dado.

³ El Apéndice “A” de la Norma Mexicana de Caudal Ecológico enlista la presión sobre el agua, importancia ecológica y objetivos ambientales en todas las cuencas riparias del país que deben considerarse en las metodologías hidrológicas.

⁴ Frecuencia de ocurrencia es el criterio para integrar los caudales de temporada ordinarios y el régimen de inundaciones, y el ajuste de la propuesta de caudales ecológicos al objetivo ambiental seleccionado.

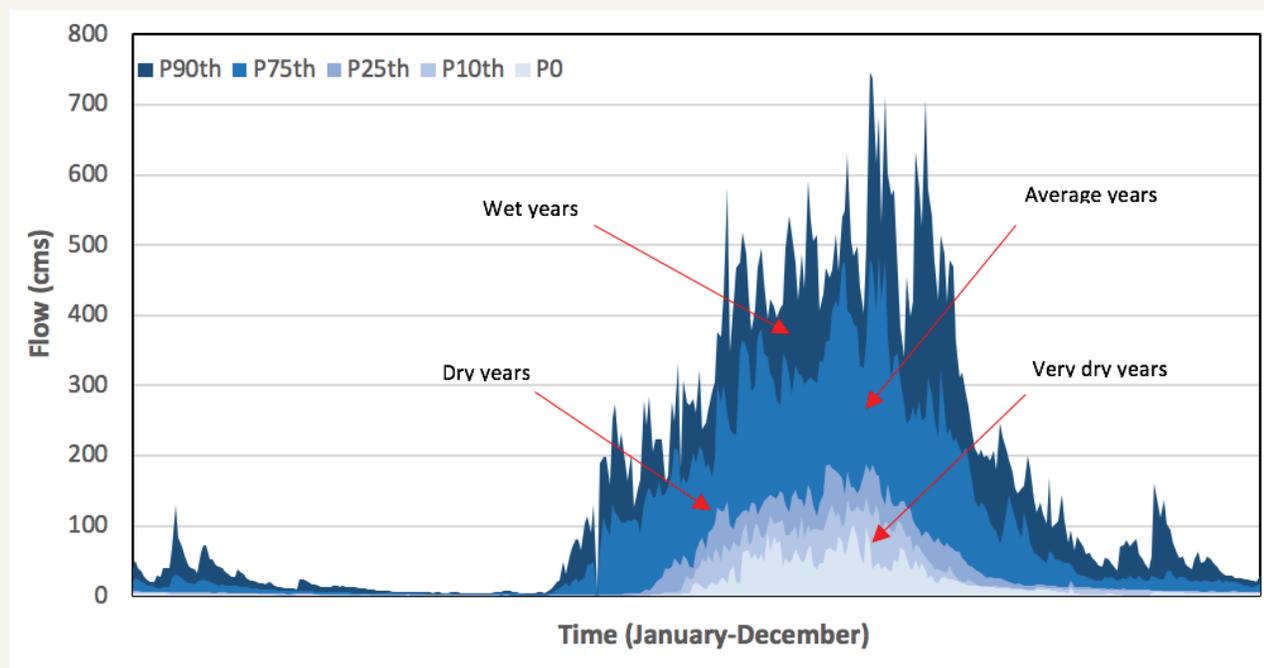


Figura 73. Caudales de temporada ordinarios en metros cúbicos por segundo –cms- a una escala diaria. Las áreas en tonos azul representan los umbrales de las condiciones hidrológicas (años húmedos, promedio, secos y muy secos).

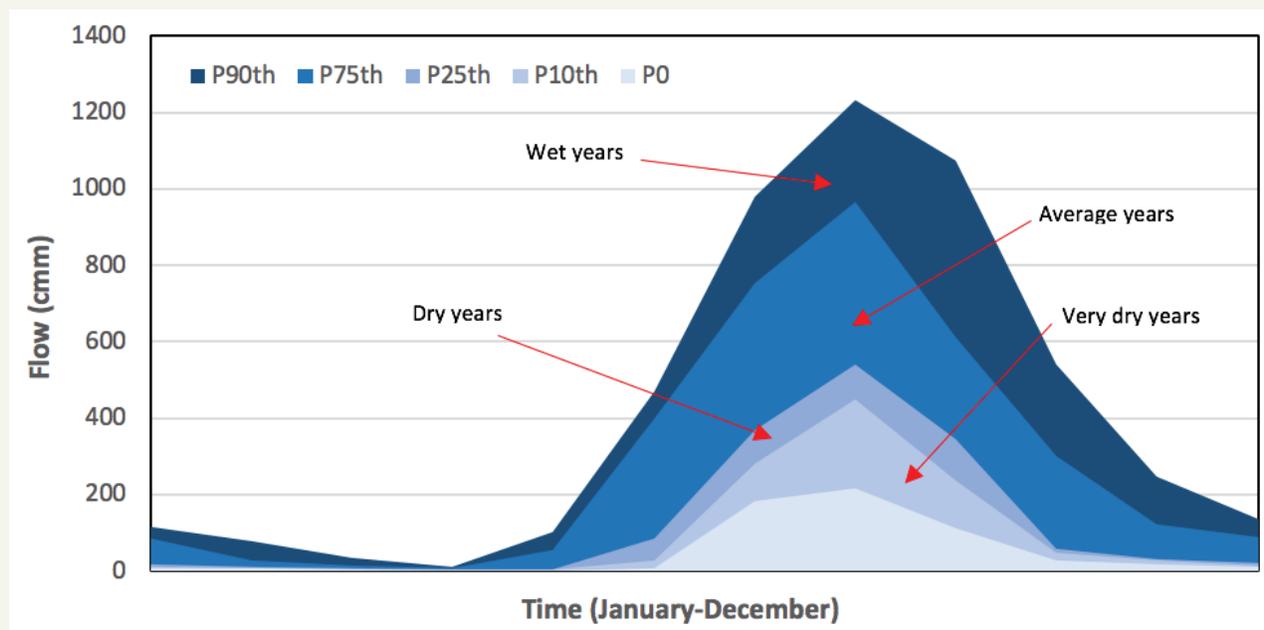


Figura 74. Caudales de temporada ordinarios en metros cúbicos por mes –cm. Las áreas en tonos azul representan los umbrales de las condiciones hidrológicas (años húmedos, promedio, secos y muy secos)

Tabla 53. Criterios para la integración de los caudales ordinarios empezando con las frecuencias de ocurrencia de diversas condiciones hidrológicas para los objetivos ambientales.

| Estado ecológico deseado | Objetivo ambiental | Frecuencia de ocurrencia de caudales de temporada ordinarios | | | |
|--------------------------|--------------------|--|----------|------|----------|
| | | Húmedo | Promedio | Seco | Muy Seco |
| Muy bueno | A | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 0.2 |
| Bueno | B | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.4 |
| Moderado | C | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.6 |
| Deficiente | D | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 |

Ecuación para integrar los caudales ordinarios.

$$Tv_{osf} = (fosf_W * Vosf_W) + (fosf_A * Vosf_A) + (fosf_D * Vosf_D) + (fosf_{VD} * Vosf_{VD})$$

Donde:

Tv_{osf} = Volumen total de caudales de temporada ordinarios;

$fosf$ = Frecuencia de ocurrencia de un régimen “i”;

$Vosf$ = Volumen del régimen de caudal ordinario “i”;

siendo “i” la condición anual (húmedo, promedio, seco o muy seco)

Tabla 54. Criterios para integrar los tipos de inundaciones (pequeña inundación = 1.0, inundación media = 1.5, e inundación grande 5.0 años de periodo de retorno) por la frecuencia de ocurrencia conforme a los objetivos ambientales.

| Estado ecológico deseado | Objetivo ambiental | Frecuencia de ocurrencia de régimen de inundaciones (# de eventos en 10 años) | | |
|--------------------------|--------------------|---|------------------|-------------------|
| | | Pequeña inundación | Inundación media | Inundación grande |
| Muy bueno | A | 10 | 6 | 2 |
| Bueno | B | 5 | 3 | 2 |
| Moderado | C | 3 | 2 | 1 |
| Deficiente | D | 2 | 1 | 1 |

Ecuación para integrar el régimen de inundaciones:

$$Tv_{fr} = ((f_{fr} * D_{fr} * V_{fr}) + (f_{frr} * D_{frr} * V_{frr}) + (f_{frrr} * D_{frrr} * V_{frrr}) / 10)$$

Donde:

Tv_{fr} = Volumen total (Hm³/año) de régimen de inundaciones;

f_f = Frecuencia de ocurrencia de inundación “i”;

D_f = Duración de inundación “i”;

V_f = Volumen por inundación “i”;

siendo “i” la categoría de la inundación.

3.1.3.3. Caracterización de la Temporalidad de la hidrología en las cuencas piloto

En el siguiente párrafo se evalúa la temporalidad de los caudales de cada cuenca riparia piloto. La temporalidad de los caudales varía regionalmente, dependiendo del momento de máxima precipitación, evapotranspiración y las contribuciones de la nieve y hielo.

En la tabla 1, el coeficiente de variación (en porcentaje) se calcula a partir de los valores de 12 caudales mensuales de cada año calendario y después se promedian para el periodo del registro. También se calcula para cada uno de los ríos en las cuencas piloto el porcentaje de caudal anual que ocurre durante el mes del año con caudales máximos a partir de los índices de los caudales mensuales promedio del periodo de registro (tabla 55), similar a la metodología utilizada en Dettinger y Diaz (2000). Un valor más bajo indica hidrografías promedio de largo plazo más uniformes en lugar de hidrografías con picos más acentuados.

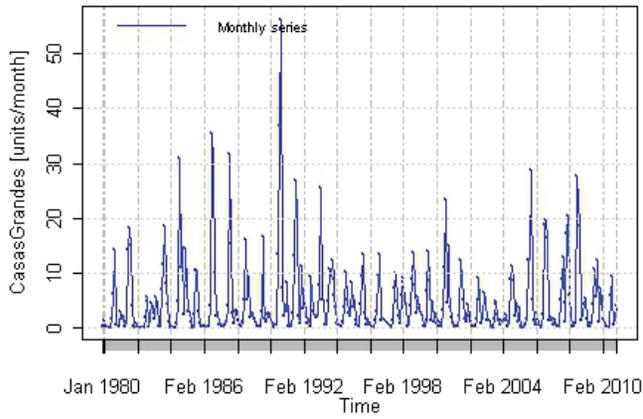
Tabla 55. Resultados de los parámetros (en %) de la temporalidad de los caudales seleccionados en las cuencas piloto.

| RÍO | % CV | % DE CAUDAL ANUAL |
|--------------------|--------|-------------------|
| CASAS GRANDES 2 | 144.00 | 30.31 |
| SAN LUCAS | 286.03 | 54.72 |
| RIO PURIFICACIÓN 2 | 140.66 | 33.70 |
| RIO CORONA | 152.18 | 27.99 |
| PRESIDIO SAN PEDRO | 148.09 | 34.59 |
| TEHUANTEPEC | 144.57 | 30.74 |
| COATZACOALCOS | 77.10 | 19.92 |

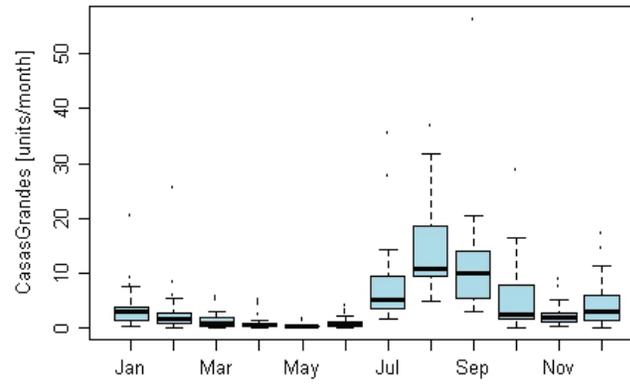
En las siguientes imágenes, se presenta la información hydroplot para los ríos considerados en cada cuenca piloto. Estos plots se construyen en R utilizando el paquete 'hydroTSM' (Zambrano-Bigiarini, 2012). Estas imágenes muestran los plots de las series temporales, hidrografías e histogramas mensuales y anuales. Los valores se expresan en Mm^3 por mes o año (las 'unidades' son Mm^3).

CASAS GRANDES 2

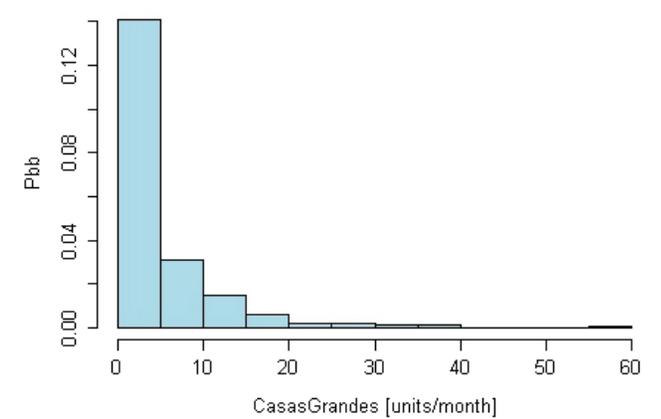
Monthly time series



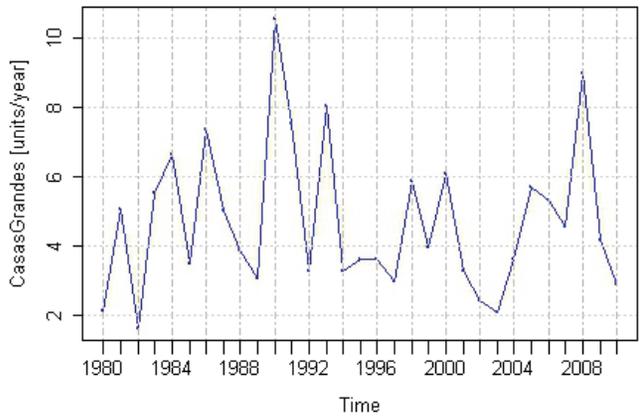
Monthly Boxplot



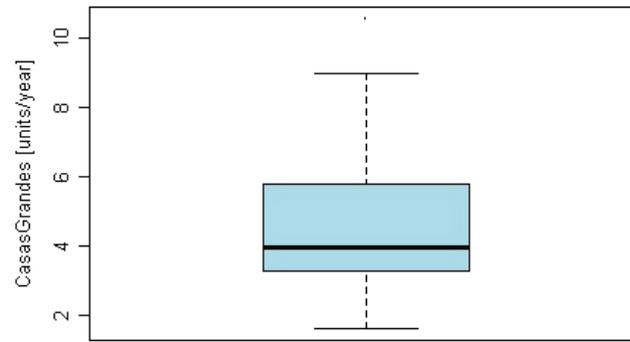
Monthly Histogram



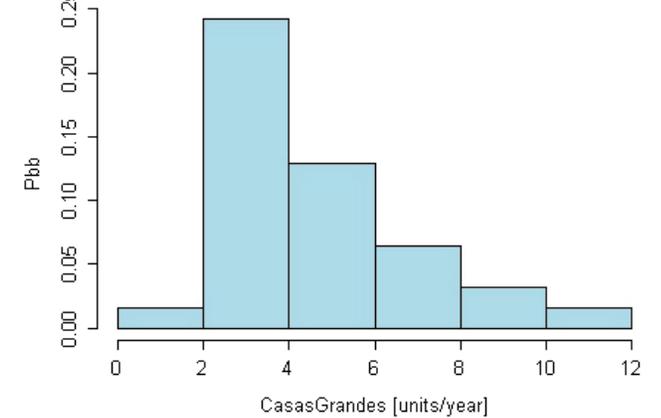
Annual time series



Annual Boxplot

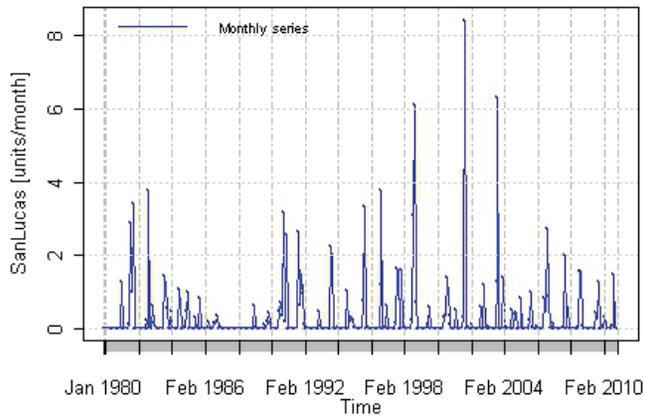


Annual Histogram

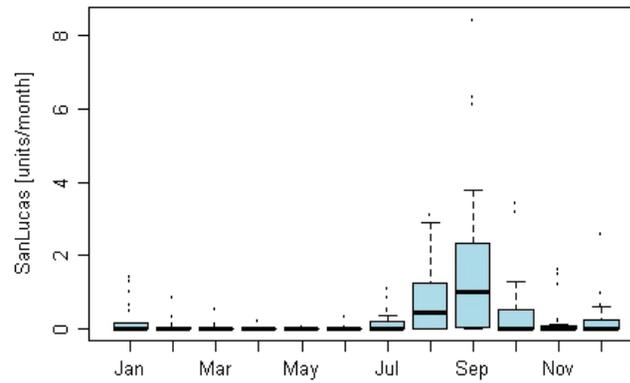


SAN LUCAS

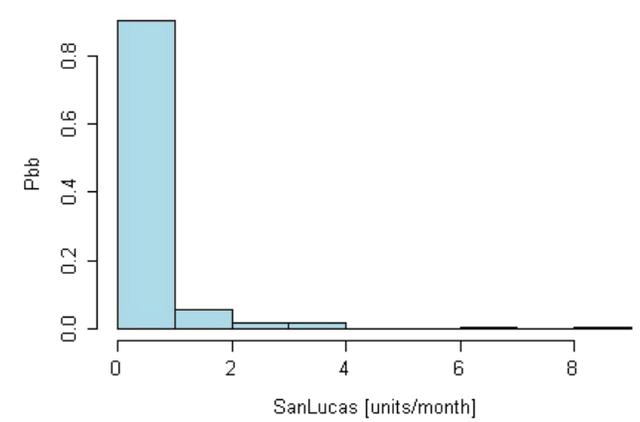
Monthly time series



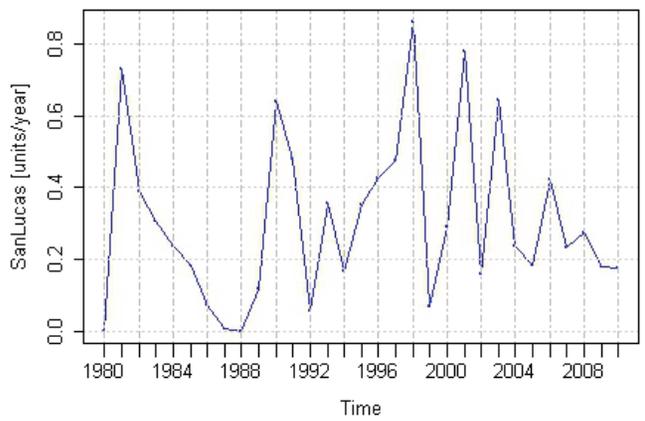
Monthly Boxplot



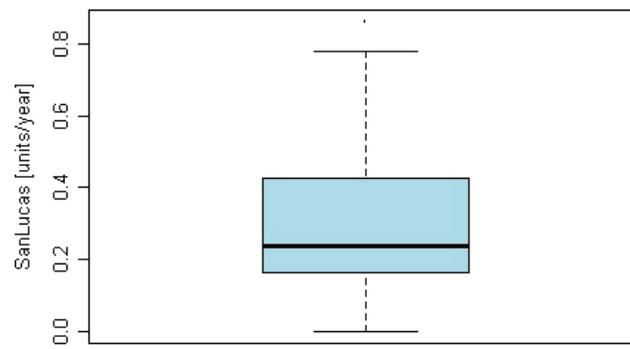
Monthly Histogram



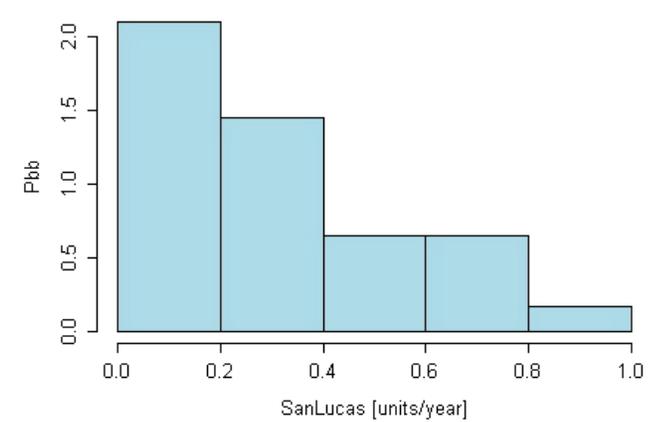
Annual time series



Annual Boxplot

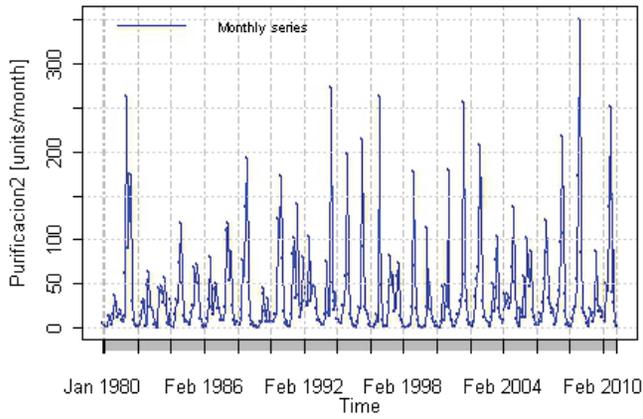


Annual Histogram

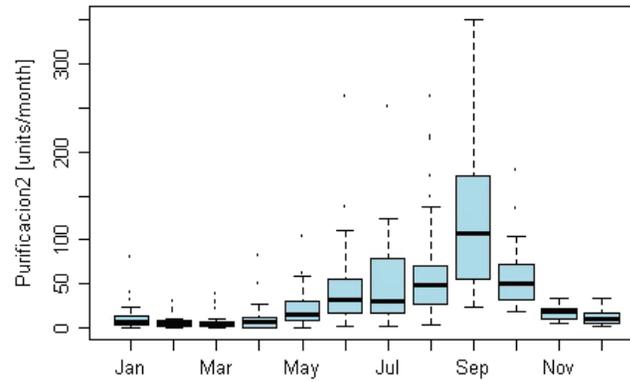


RÍO PURIFICACIÓN 2

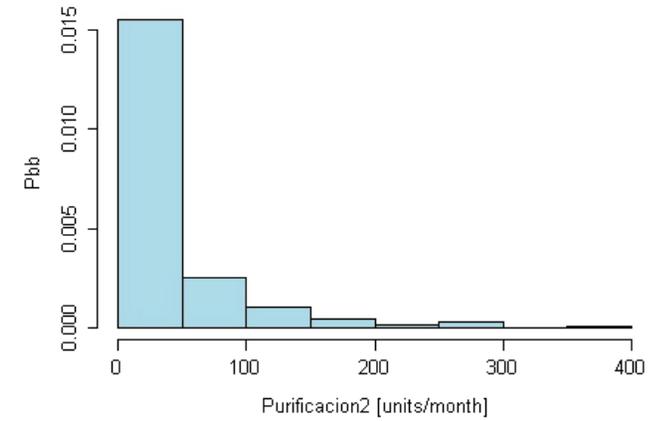
Monthly time series



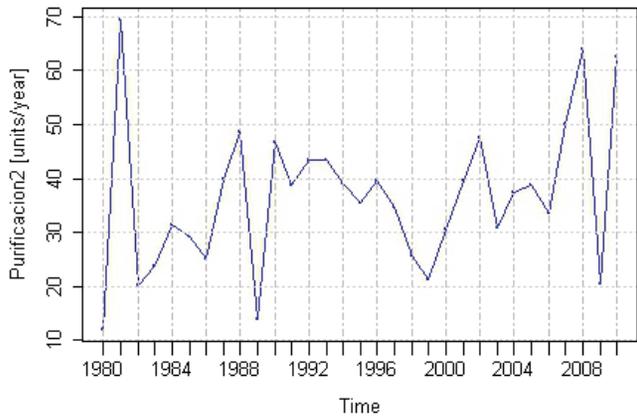
Monthly Boxplot



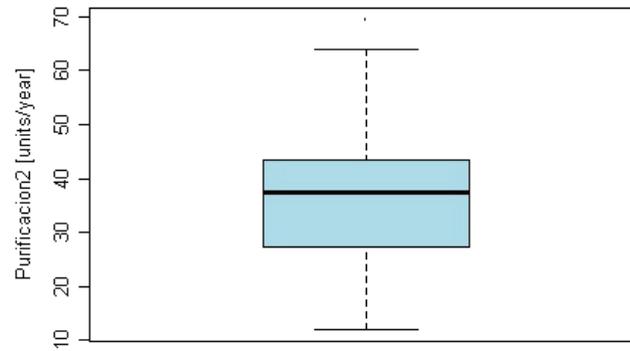
Monthly Histogram



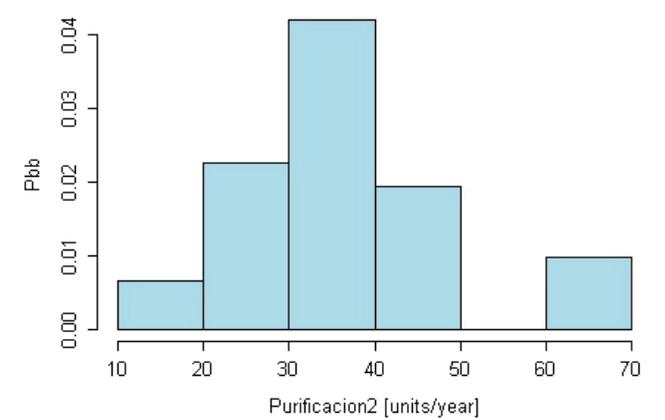
Annual time series



Annual Boxplot

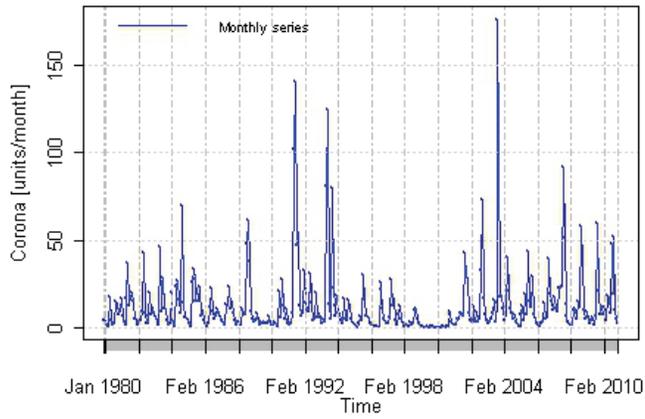


Annual Histogram

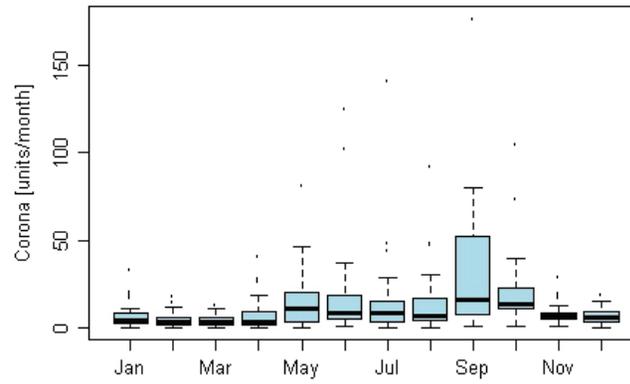


RÍO CORONA

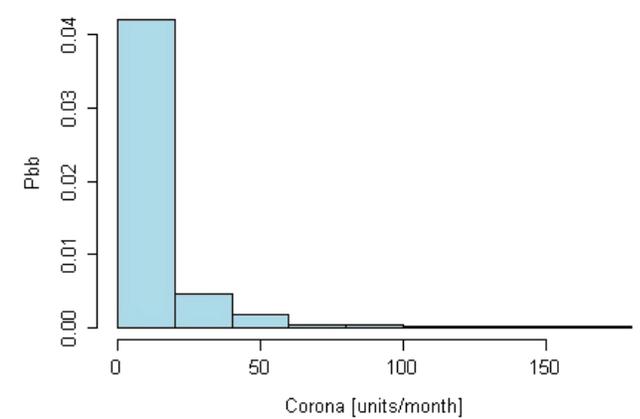
Monthly time series



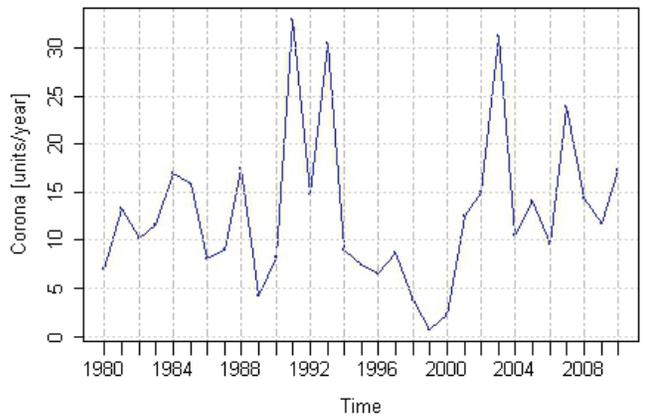
Monthly Boxplot



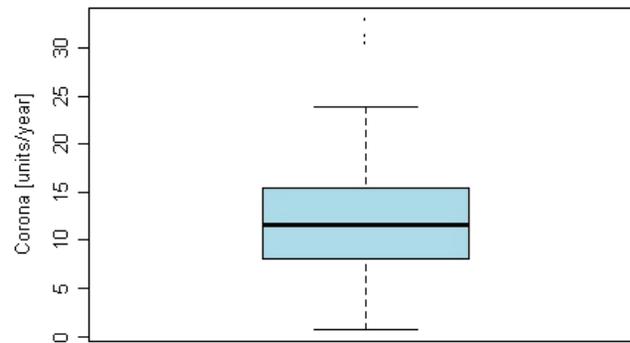
Monthly Histogram



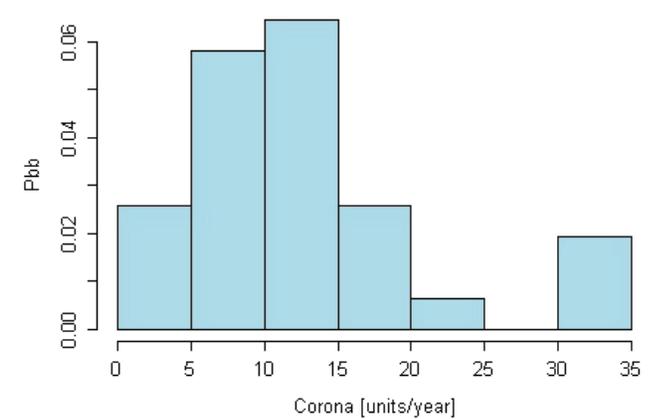
Annual time series



Annual Boxplot

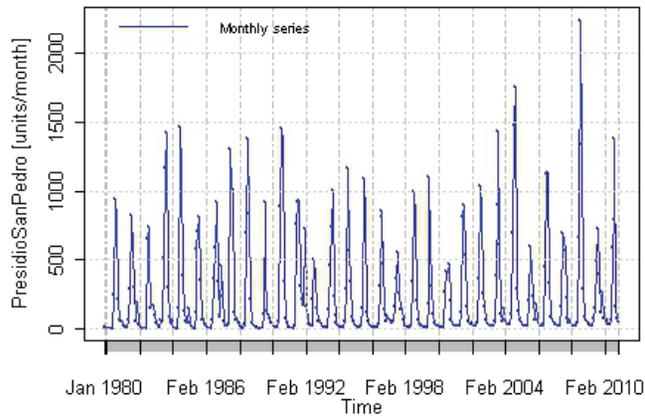


Annual Histogram

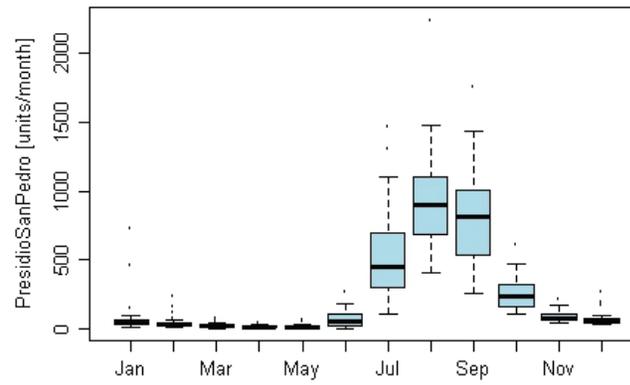


PRESIDIO SAN PEDRO

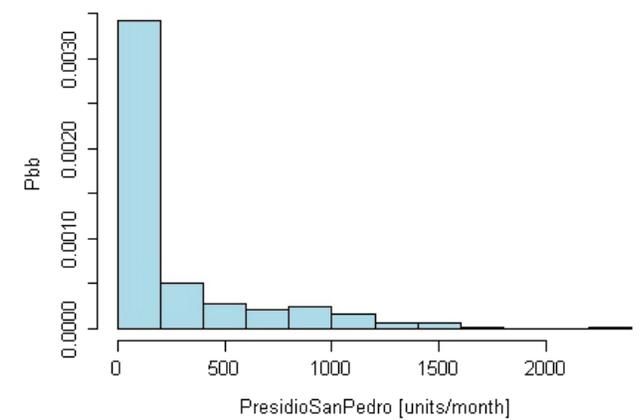
Monthly time series



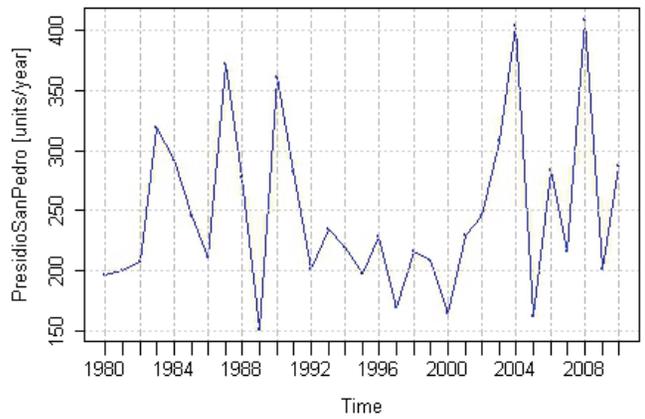
Monthly Boxplot



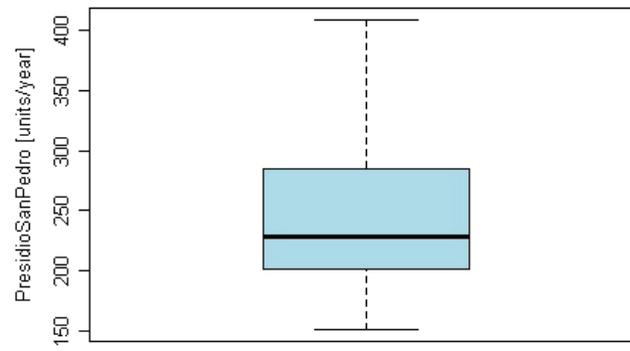
Monthly Histogram



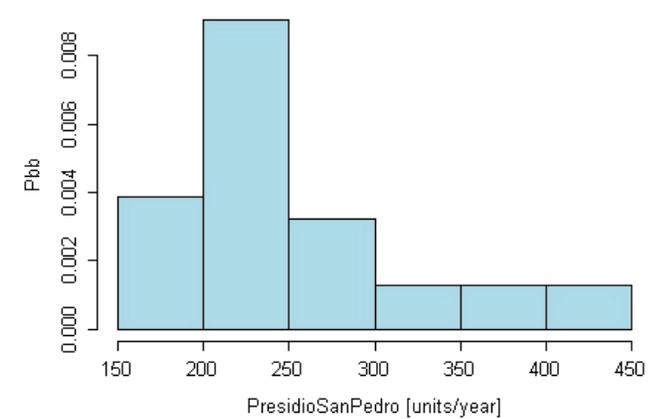
Annual time series



Annual Boxplot

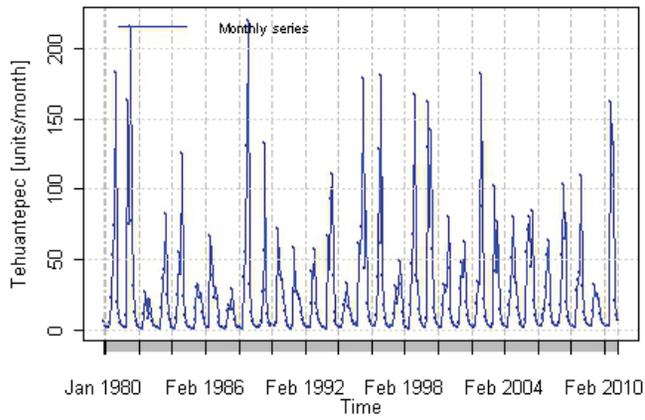


Annual Histogram

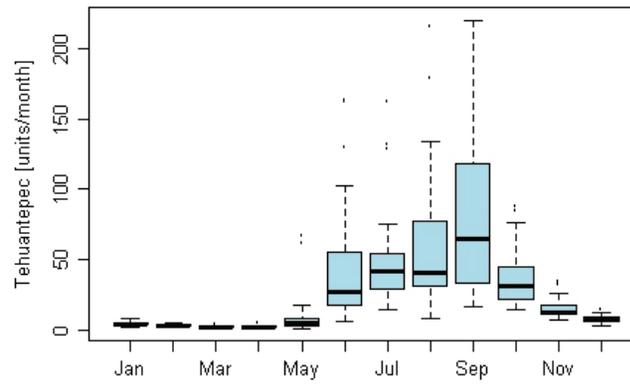


TEHUANTEPEC

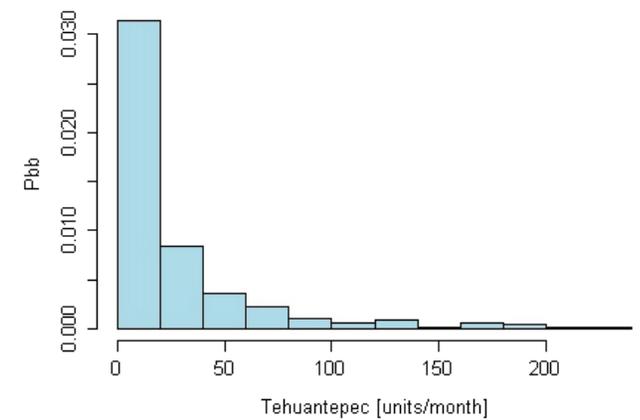
Monthly time series



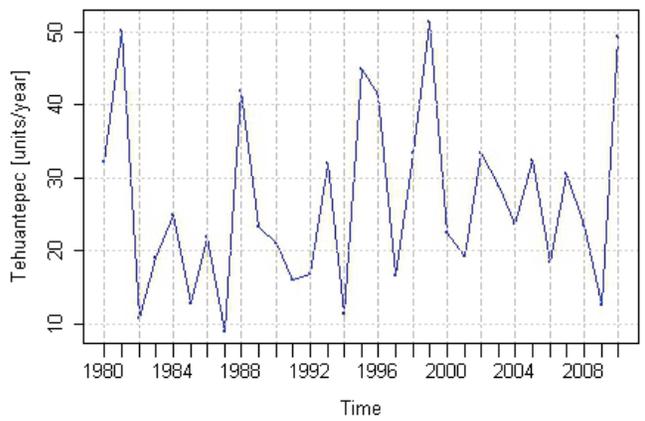
Monthly Boxplot



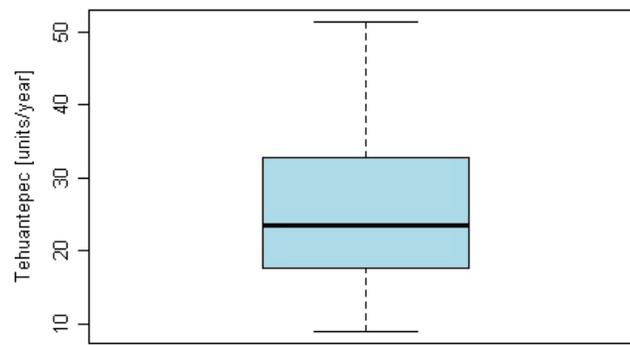
Monthly Histogram



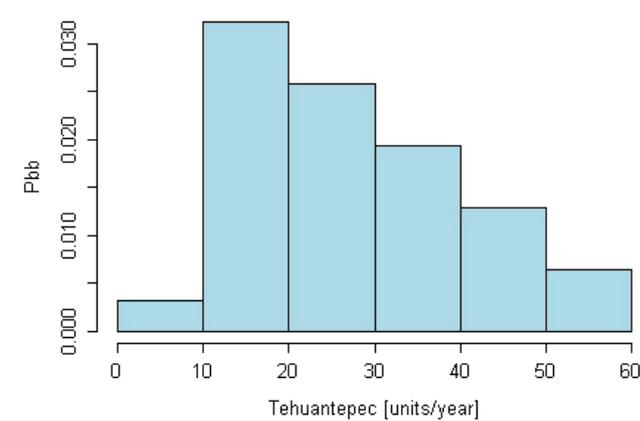
Annual time series



Annual Boxplot

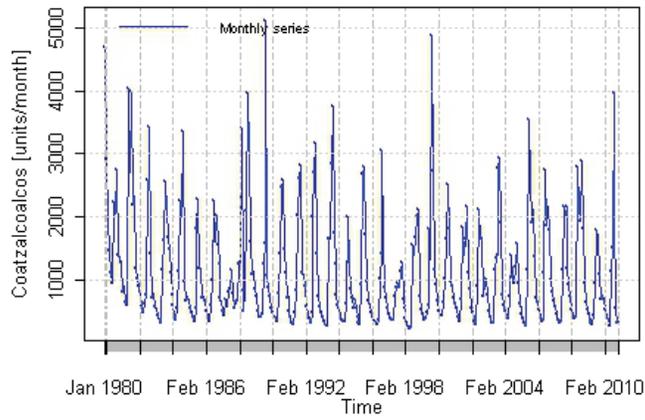


Annual Histogram

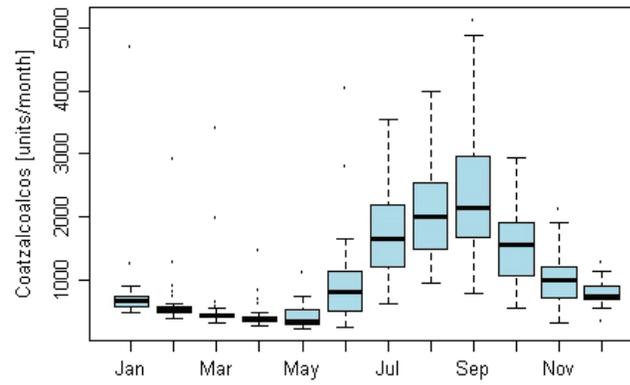


COATZACOALCOS

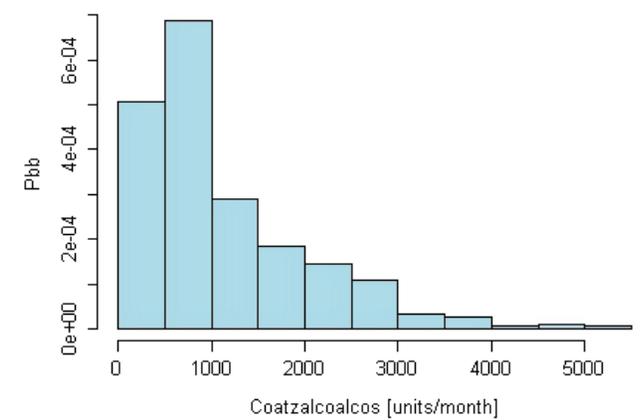
Monthly time series



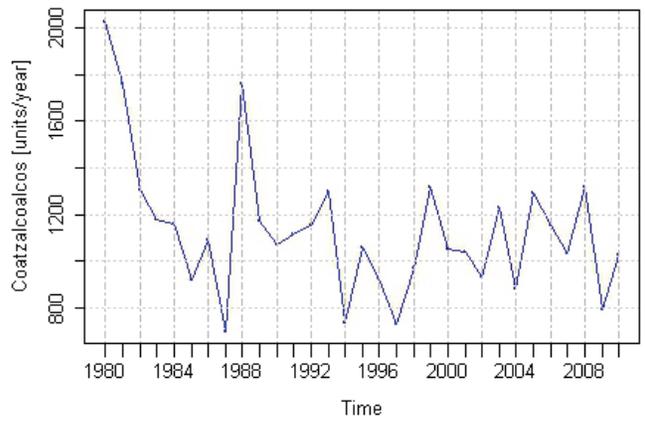
Monthly Boxplot



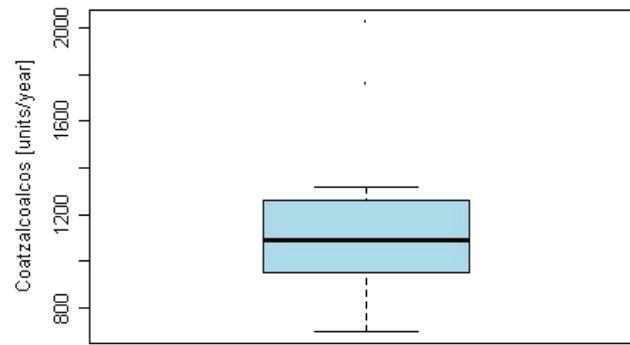
Monthly Histogram



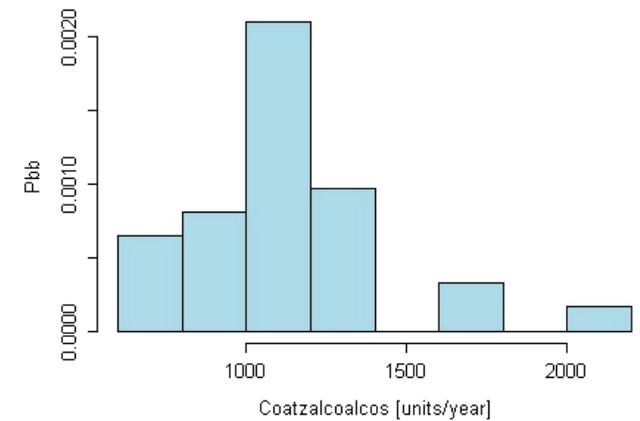
Annual time series



Annual Boxplot



Annual Histogram



Es claro que cada caudal ripario tiene un comportamiento de temporada expresado, cuando se observan los hidrógrafos en los hidroplots, y por lo tanto prueban la necesidad de un análisis por temporada. Excepto por la región hidrográfica de Casas Grandes 2 y Presidio San Pedro, el caudal pico ocurre en el mes de septiembre y los meses más secos, llegando al caudal base, abarcan de diciembre a mayo, dependiendo de la cuenca. Conforme a los resultados de los cálculos de la CV y el % de caudal anual en el mes de caudal pico, la variación por temporada más alta es para la cuenca San Lucas. Esta cuenca reacciona considerablemente a la precipitación y su caudal base es cercano a cero. La región hidrográfica de Coatzacoalcos (representada por la descarga de la estación hidrométricas de Las Perlas) se caracteriza por la menor variación temporal, con un % de CV de 77 y un %Caudal anual de 29. Las simulaciones de ríos de las otras cuencas piloto tienen una variación similar a lo largo del año.

La regla de decisión, de incluir los meses más secos con una acumulación máxima de 10% de la descarga anual dentro del análisis de temporada para construir las superficies de respuesta, resulta en los meses para cada cuenca piloto, enlistados en la tabla 56.

Tabla 56. los meses incluidos en el análisis de temporada para cada cuenca piloto, conforme a la regla de decisión.

| CUENCA | MESES EN ANÁLISIS POR TEMPORADA |
|---------------------|---------------------------------|
| CASAS GRANDES 2 | MARZO HASTA JUNIO |
| SAN LUCAS | FEBRERO HASTA JULIO |
| RÍO PURIFICACIÓN 2 | ENERO HASTA ABRIL |
| RÍO CORONA | FEBRERO Y MARZO |
| SAN PEDRO MEZQUITAL | ENERO HASTA JUNIO |
| TEHUANTEPEC | DICIEMBRE HASTA MAYO |
| COATZACOALCOS | ABRIL Y MAYO |

3.1.4. Definición de los indicadores de desempeño

El objetivo de la generación de indicadores de desempeño es representar variables que, por una parte, se relacionen de manera directa con el comportamiento de temperatura y precipitación en la cuenca y, por otra, representen la seguridad hídrica o un servicio ambiental clave en la cuenca.

En la elaboración de los indicadores de desempeño, los caudales ecológicos se utilizan como una expresión del resultado o desempeño ecológico de la hidrología.

Los indicadores de desempeño son valores únicos para cada cuenca piloto y se expresan por la frecuencia (%) de años en el periodo considerado que caigan bajo el umbral de una reserva de agua tipo A (estatus de Muy Bueno) y reserva de agua tipo C (estatus Moderado) para la proyección de Cambio Climático con percentil 50%, como se explica en la tabla 46.

Los indicadores de desempeño pueden utilizarse para comparar la presión sobre la hidrología entre cuencas piloto o entre el escenario actual (observaciones históricas) y posibles escenarios futuros, para el periodo 2030-2060, en la misma cuenca.

3.2. Resultados y discusión de la prueba de estrés

En las siguientes figuras se presentan las superficies de respuesta. Se muestran tres gráficas para cada cuenca: el análisis anual para la situación actual de extracción de agua, el análisis por temporada para la situación actual de extracción de agua y el análisis por temporada para una situación sin extracción de agua antropogénica.

En la tabla 57 se enlistan los indicadores de desempeño actuales y a futuro (para las frecuencias debajo de las Reservas de Agua Tipo A y C).

Tabla 57. los indicadores de desempeño actuales y a futuro expresados como el porcentaje de años dentro del periodo de evaluación en que el caudal ecológico no es alcanzado

| CUENCA | Actual (1980-2010) | | CC50% (2030-2060) | |
|---------------------|--|--|--|--|
| | Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo A* | Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo C* | Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo A* | Frecuencia debajo de Reserva de Agua Tipo C* |
| Casas Grandes 2 | 100 | 90.3 | 100.0 | 100.0 |
| San Lucas | 54.8 | 22.6 | 64.5 | 29.0 |
| Río Purificación 2 | 74.2 | 22.6 | 87.1 | 51.6 |
| Río Corona | 32.3 | 12.9 | 48.4 | 12.9 |
| San Pedro Mezquital | 45.2 | 9.7 | 100.0 | 74.2 |
| Tehuantepec | 54.8 | 22.6 | 87.1 | 38.7 |
| Coatzacoalcos | 12.9 | 0.0 | 45.2 | 9.7 |

*Las Reservas de Agua Tipo A y C corresponden respectivamente al estatus Muy Bueno y Moderado.

Como se observa en las superficies de respuesta, tanto los escenarios históricos como los escenarios de proyección del clima siguen un patrón sigmoide desde la cola de extremadamente seco a la cola de extremadamente húmedo de las distribuciones. Todos los escenarios de cambio climático muestran una tendencia hacia condiciones más secas y calientes.

En el caso específico de San Lucas, el análisis por temporada es retador ya que los meses más secos corresponden a periodos de cero precipitación. Esto plantea problemas para el desarrollo de las proyecciones a futuro debido a que el generador SIMGEN no está diseñado para operar bajo condiciones de ninguna precipitación. Como resultado, la precipitación está ligeramente sobrevalorada en la superficie de respuesta del análisis por temporada de esta cuenca y debe interpretarse con cautela.

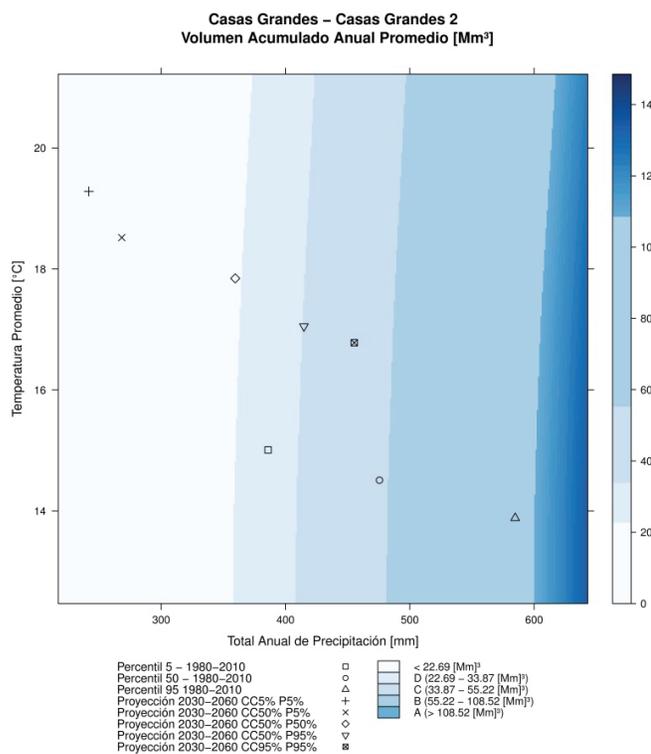
Aun cuando es la cuenca con la variabilidad más alta, también es una de las cuencas que tienen la menor demanda de agua superficial, probablemente porque es un arroyo efímero, lo que explica su pequeña a ninguna variación en caudales ecológicos. Otra cuenca con baja demanda de agua es el Alto Río Coatzacoalcos, resultando en una pequeña o ninguna diferencia entre las dos superficies de respuesta de temporada. Es claro que las cuencas con menores demandas de agua tienen una mejor adaptación a las variaciones de precipitación y temperatura proyectadas.

Es posible apreciar que las cuencas con menores coeficientes de variación son generalmente más capaces de proporcionar el caudal ecológico óptimo. En el caso de Casas Grandes 2, sin embargo, que tiene un coeficiente de variación más alto, es mucho menos probable que los caudales ecológicos sean provistos, en gran medida debido a las demandas del área. De hecho, se espera que tanto los tipos muy bueno y moderado de reservas de agua estén fuera de alcance todos los años (100%) en el periodo 2030-2060 (Tabla 51). Sin embargo, la situación actual ya muestra condiciones similares y críticas. Limitar la demanda de agua permite a la cuenca proveer los caudales ecológicos en la mayoría de los años, incluso bajo condiciones de cambio climático, subrayando el potencial para la adaptación.

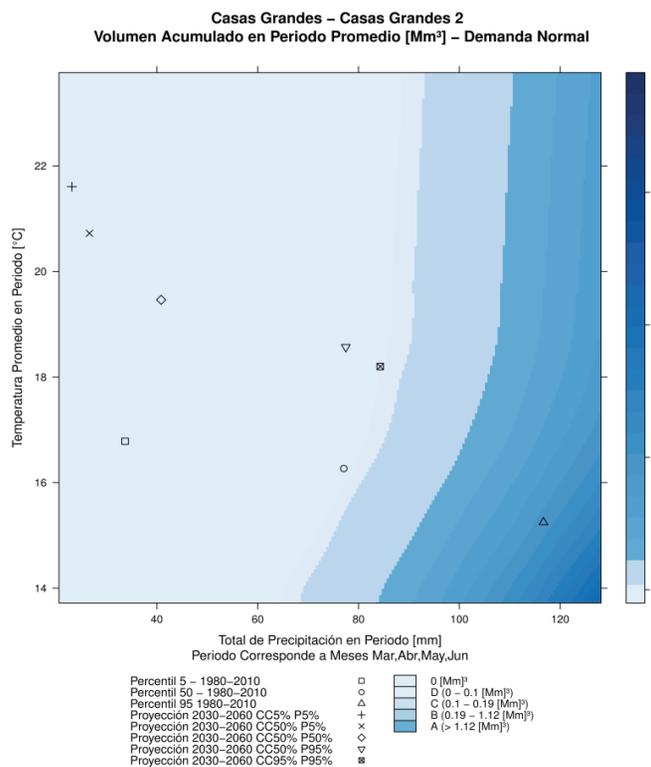
La cuenca de San Pedro Mezquital muestra el cambio más grande en vulnerabilidad, en relación a las metas de caudales ecológicos. La frecuencia actual que cae por debajo de la reserva de agua tipo C es 9.7% y se proyecta que incremente a 74.2% para el periodo futuro en CC50%, lo que hace a la cuenca altamente vulnerable, ya que se sospecha que se han tomado pocas medidas en relación con el uso eficiente de agua y una ruta detallada en caso de sequía.

Tanto la cuenca Ostuta en Tehuantepec y la cuenca Río Purificación² en Soto La Marina muestran cambios moderados. La cuenca Río Corona en Soto La Marina manifiesta el cambio más pequeño excediendo el objetivo de caudal ecológico entre el escenario actual y futuro. En valores absolutos, la cuenca del Alto Río Coatzacoalcos aparenta ser la menos vulnerable a un déficit de agua en el futuro, de acuerdo al promedio de las proyecciones de cambio climático para el periodo 2030-2060.

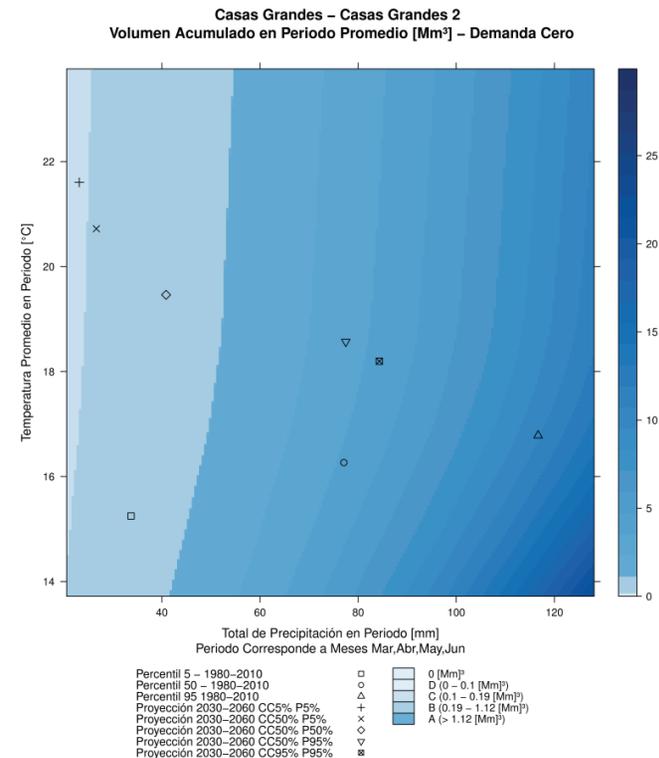
CASAS GRANDES 2



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca Casas Grandes 2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

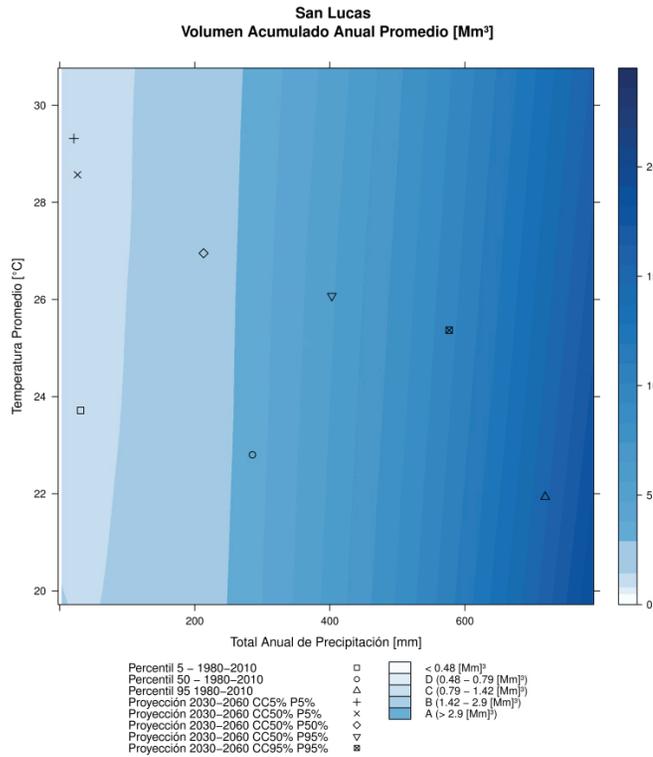


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (mar-jun) para la cuenca de Casas Grandes 2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

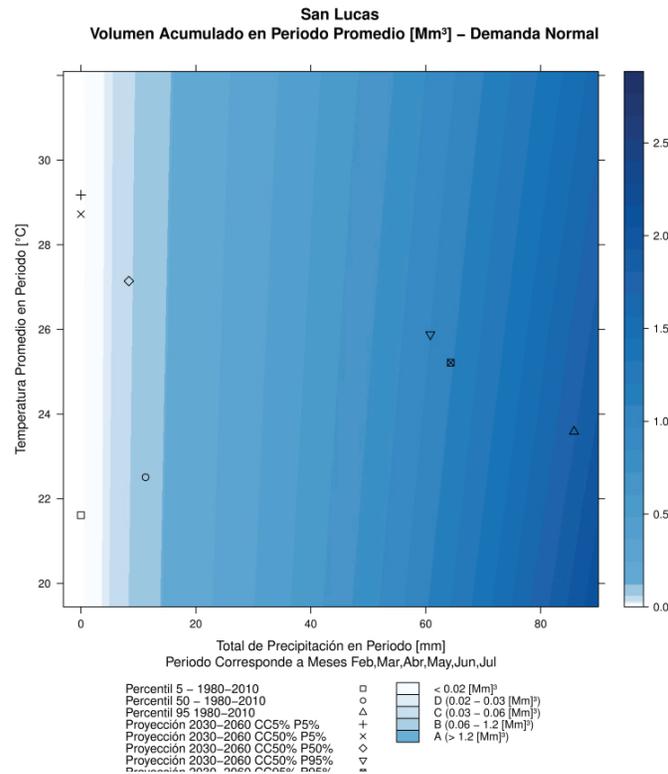


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (mar-jun) para la cuenca Casas Grandes 2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de sin extracción de agua antropogénica.

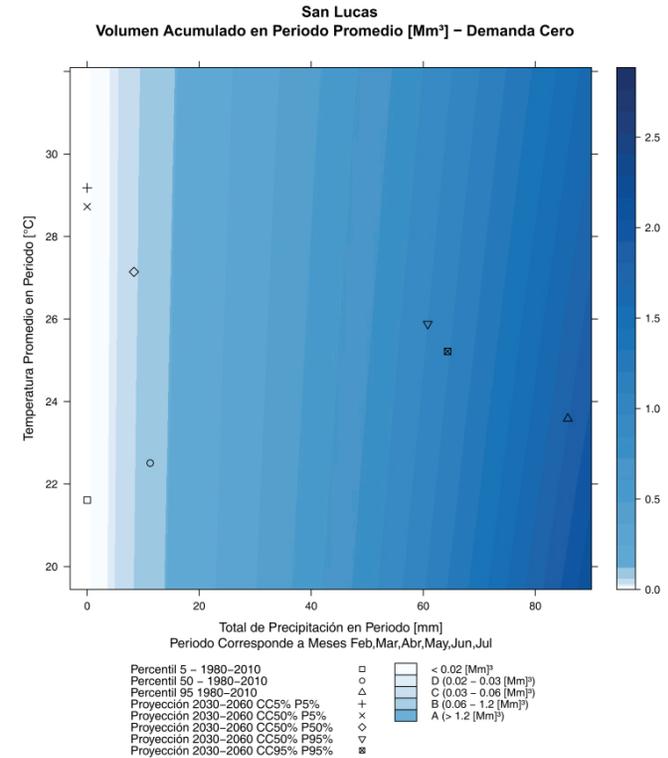
SAN LUCAS



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca San Lucas, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

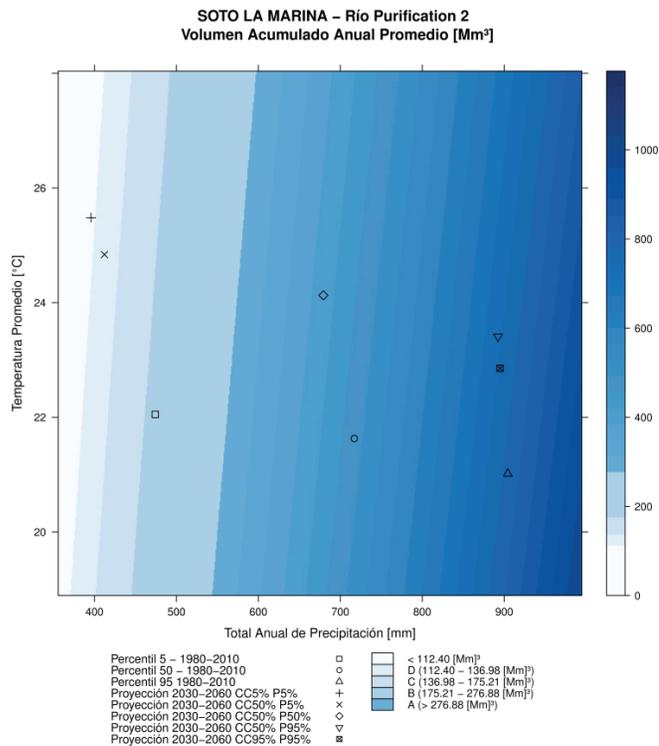


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (feb-jul) para la cuenca San Lucas, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

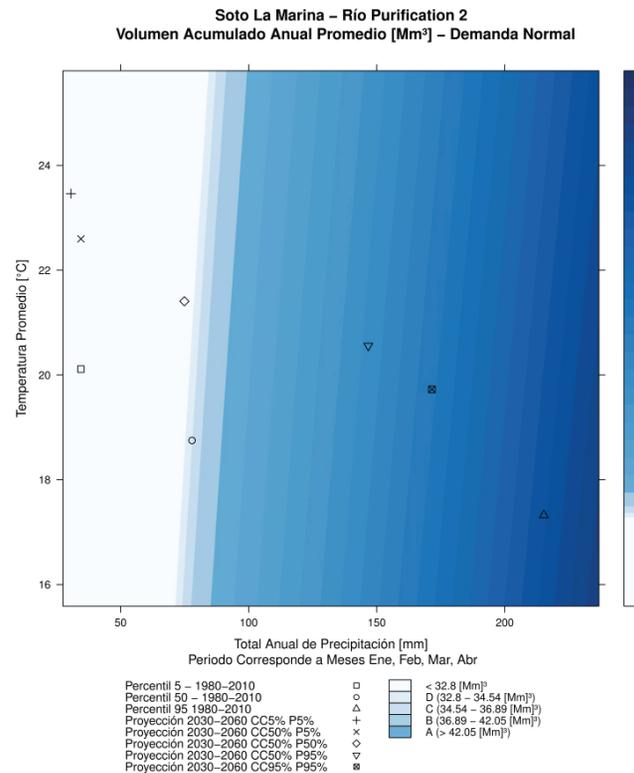


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (feb-jul) para la cuenca San Lucas, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

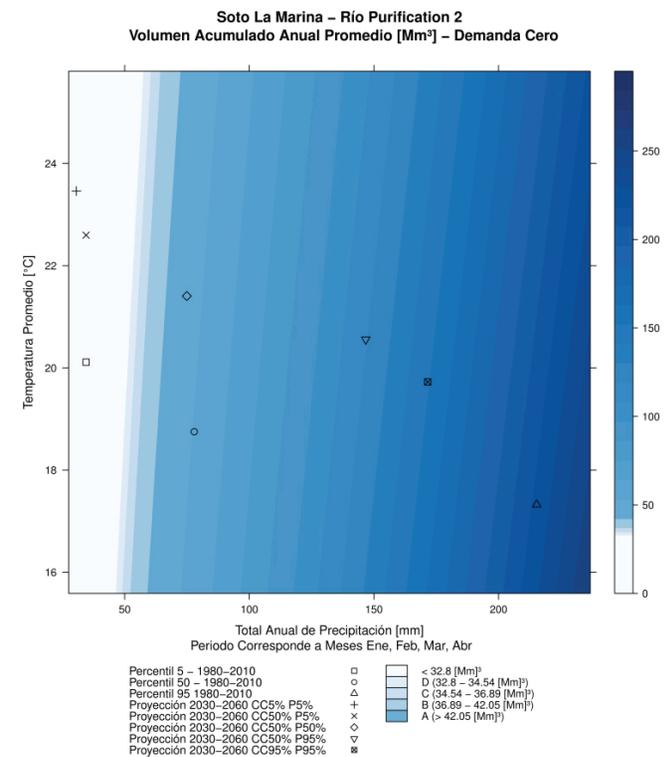
RÍO PURIFICACIÓN 2



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca Río Purificación2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

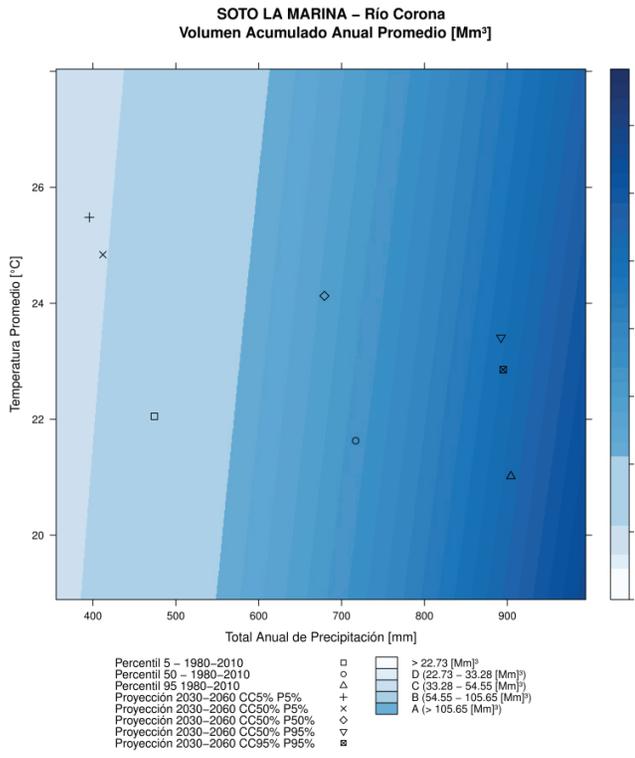


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-abr) para la cuenca Río Purificación2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

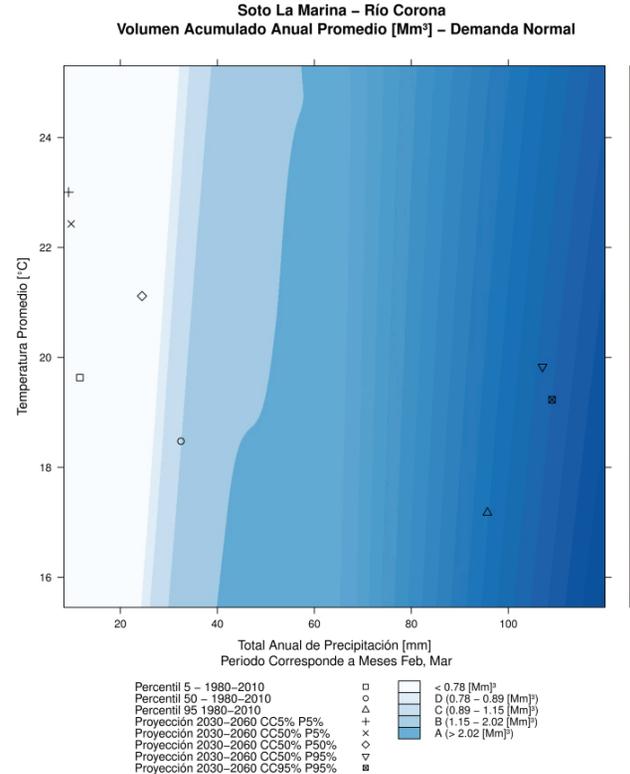


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-abr) para la cuenca Río Purificación2, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

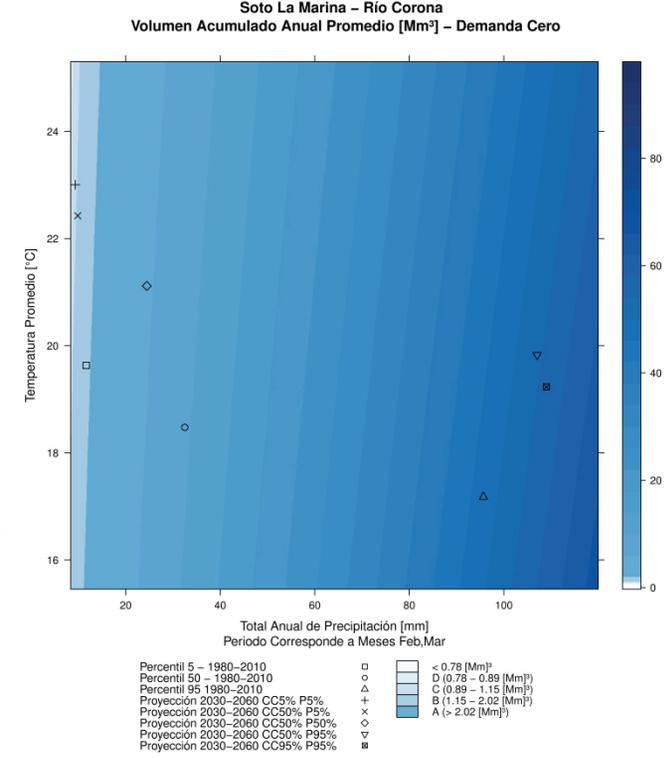
RÍO CORONA



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca Río Corona.

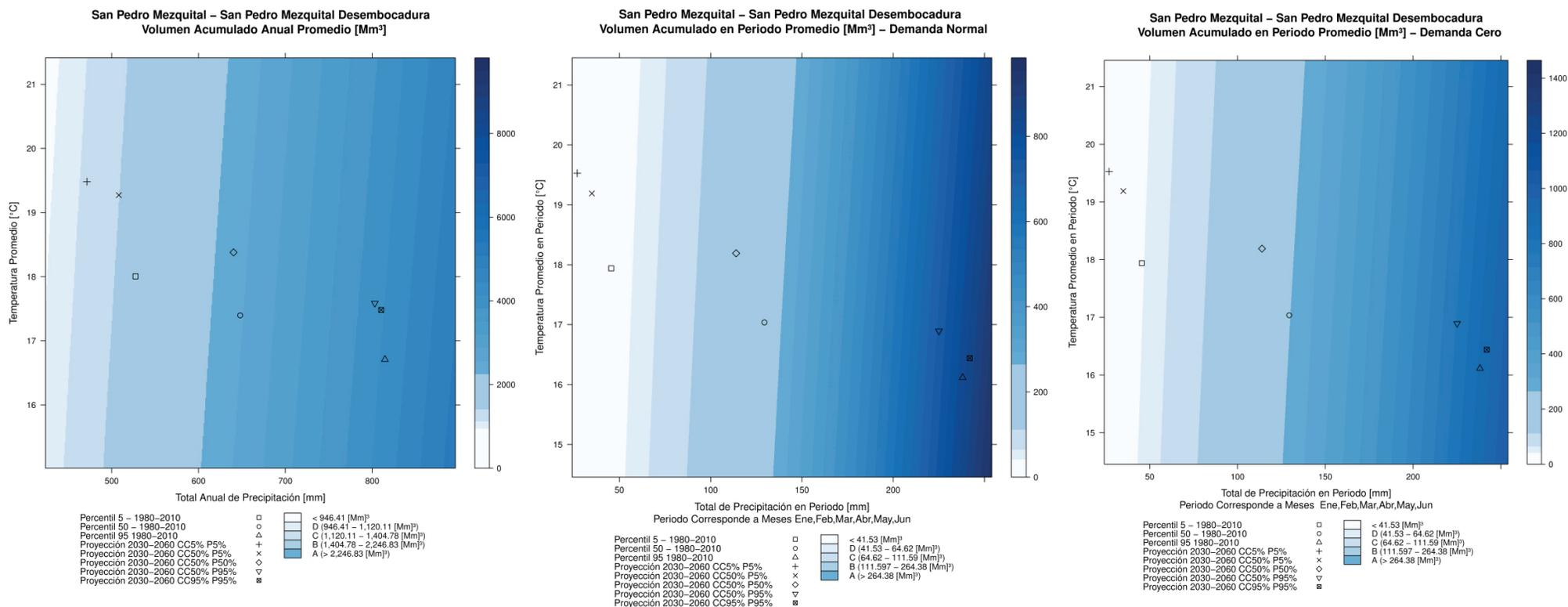


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (feb-mar) para la cuenca Río Corona, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.



La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (feb-mar) para la cuenca Río Corona, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

SAN PEDRO MEZQUITAL

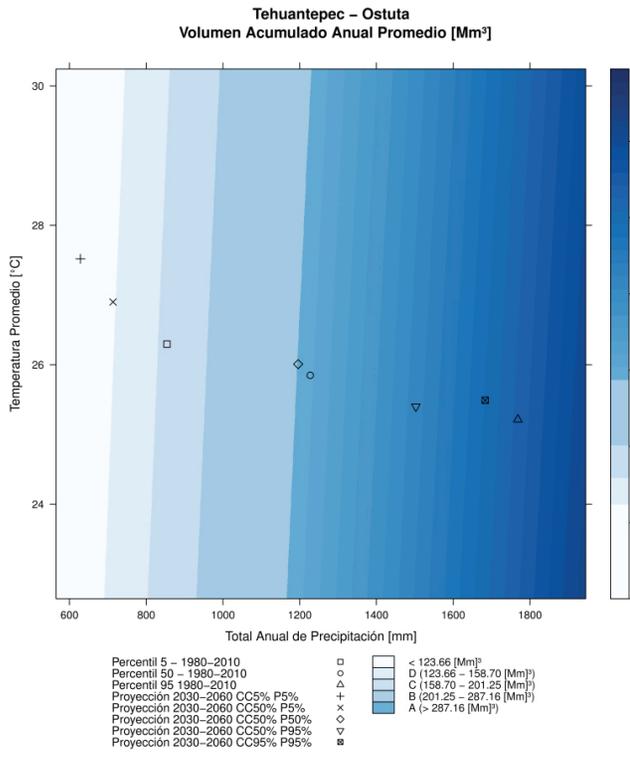


La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca San Pedro Mezquital Desembocadura, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

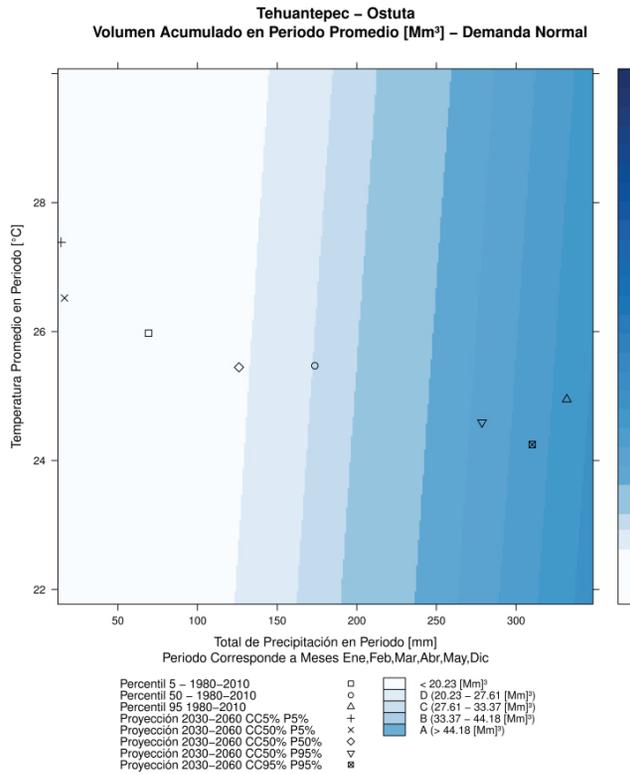
La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-jun) para la cuenca San Pedro Mezquital Desembocadura, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-jun) para la cuenca San Pedro Mezquital Desembocadura, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

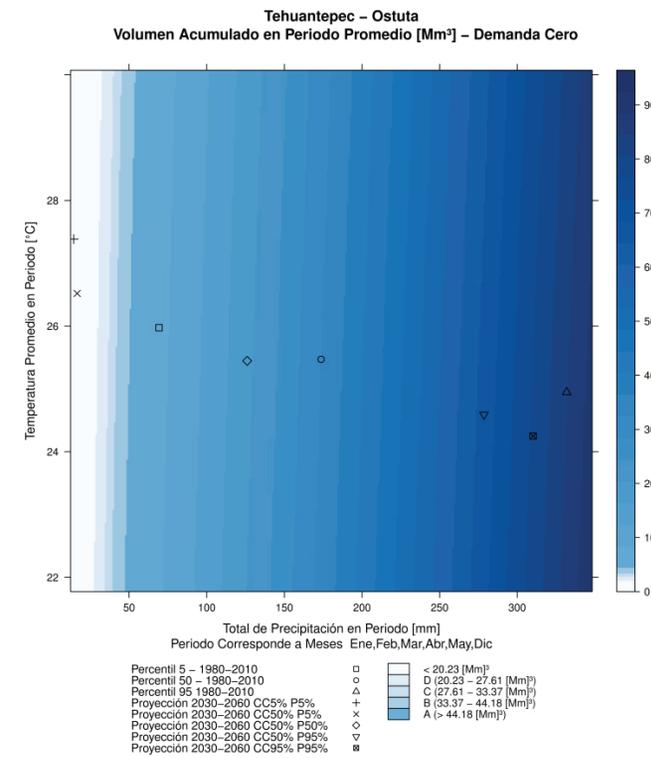
TEHUANTEPEC



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca Ostuta, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

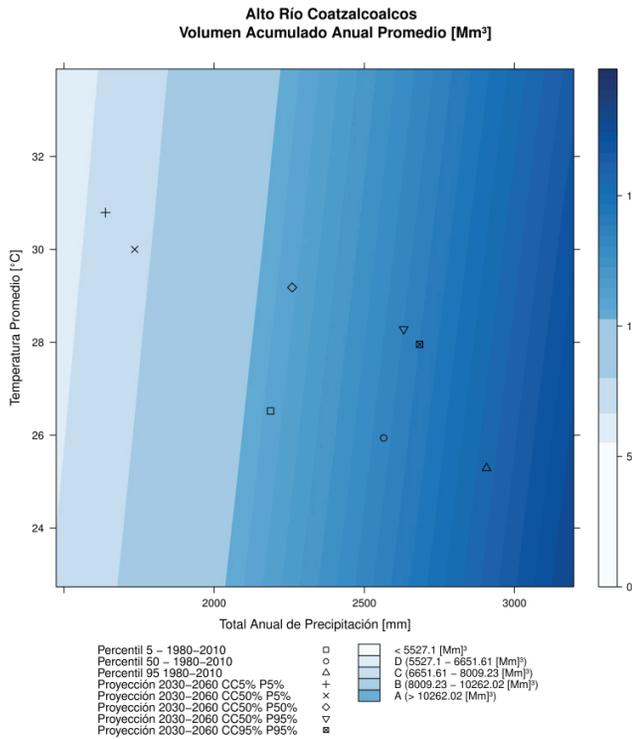


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-may) para la cuenca Ostuta, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.

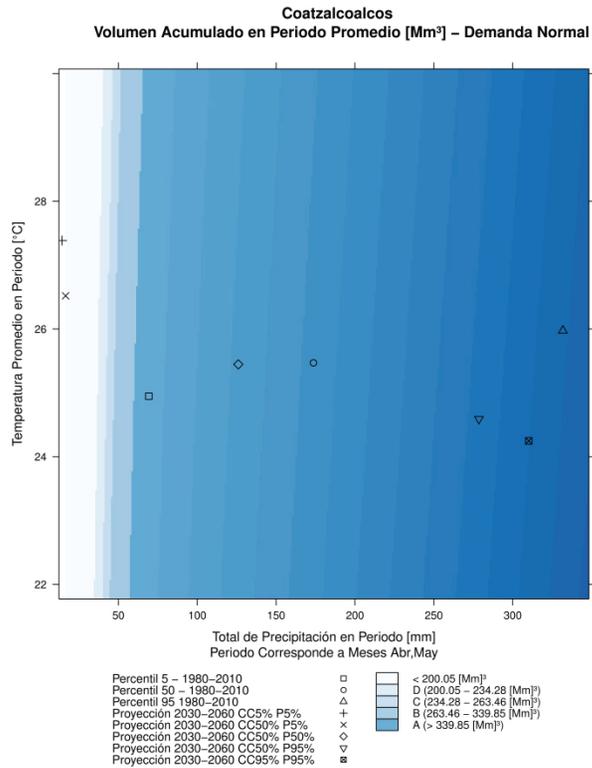


La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (ene-may) para la cuenca Ostuta, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

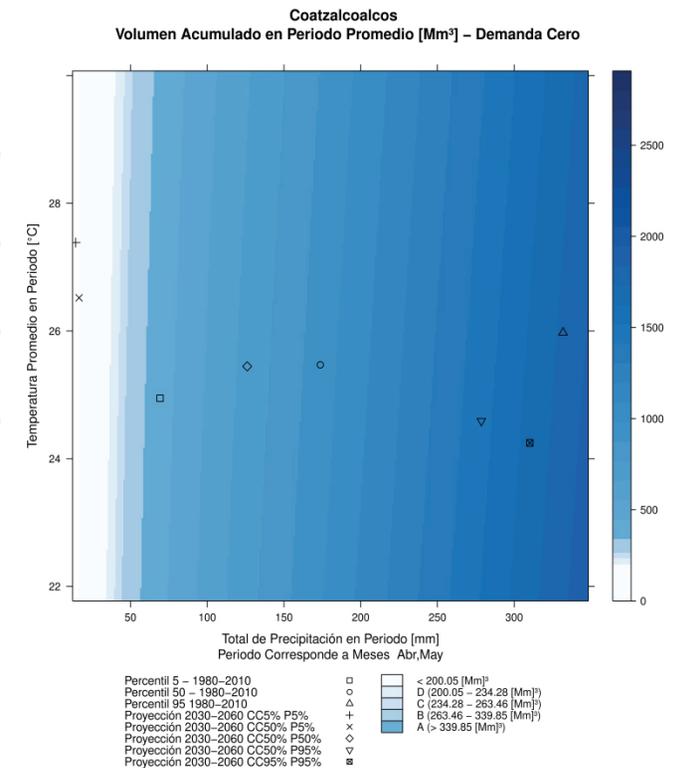
COATZACOALCOS



La superficie de respuesta del volumen acumulado anual promedio (en Mm³) para la cuenca Alto Río Coatzacoalcos, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.



La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (abr-may) para la cuenca Alto Río Coatzacoalcos, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación de extracción de agua actual.



La superficie de respuesta del volumen acumulado promedio (en Mm³) en los meses más secos (abr-may) para la cuenca Alto Río Coatzacoalcos, con los escenarios observados y proyectados bajo la situación sin extracción de agua antropogénica.

4. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se aplicó una prueba de estrés climática a siete cuencas piloto para identificar los riesgos de inseguridad hídrica bajo proyecciones de cambio climático en regiones con diversidades geográficas y/o diferentes regímenes hidroclimáticos en México. Previamente a la modelación del Cambio Climático, se modeló el comportamiento hidrológico y asignación de agua en WEAP para obtener las simulaciones de descarga. Se produjeron tanto respuestas anuales como por temporada, así como escenarios ‘naturales’, sin demanda antropogénica de agua. El análisis de las respuestas por temporada, basado en los meses con el caudal más bajo, es crucial, ya que estos son los meses cuando la demanda juega un factor clave para el cumplimiento de los caudales ecológicos. Se elaboraron y calcularon indicadores de desempeño y umbrales críticos más allá de los cuales ocurren impactos ambientales significativos para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad actual y futura al déficit de agua de las cuencas consideradas.

Este análisis resultó en diferentes respuestas en las diferentes cuencas. La mayoría muestran tendencias significativas de cambio climático resultando en un nivel de preocupación medio a alto ante el estrés climático. Algunas ya se encuentran en un estado crítico en referencia a un déficit en las reservas de agua, como es el caso de la cuenca Casas Grandes². Otras están actualmente en un bajo riesgo pero muestran altos cambios proyectados cuando se considera el cambio climático, como es el caso de la cuenca de San Pedro Mezquital. Es muy importante en estas áreas identificar las debilidades y espacios de mejora en referencia a un uso y asignación eficiente de agua, la necesidad de reducciones en las demandas de agua, preservación de áreas de recarga, mejoras en los sistemas de monitoreo y de alerta temprana en relación a variables meteorológicas y su variación anual, y otras estrategias de adaptación y medidas para el déficit de agua/sequía, tales como planes de prevención y mitigación.

La implementación de reservas de agua como una demanda extra con particular prioridad en la asignación de agua es crucial, así como su monitoreo, posiblemente a través de los indicadores de desempeño propuestos. En el estudio presente no se consideró la variación en el manejo del agua, sin embargo, este es un factor clave importante para el cumplimiento de los caudales ecológicos. Si se espera que se generen demandas de agua adicionales en las cuencas en un futuro próximo, el impacto sobre los caudales ecológicos puede ser significativo. La comparación del análisis con la demanda actual y la no demanda puede servir como un análisis de sensibilidad de la cuenca con respecto a las demandas de agua. En cuencas muy sensibles, se debe tener cuidado al expandir aún más las demandas de agua, ya que éstas pueden afectar directamente a los caudales ecológicos.

Si un análisis más detallado de las diferentes demandas de agua es deseado, sería necesaria una calibración WEAP más elaborada. Esto puede lograrse georeferenciando todas las demandas de agua, incluyendo las curvas de volumen-elevación de todos los embalses en las cuencas piloto, la integración del cambio del uso de suelo a lo largo del tiempo y especificación del tipo de suelo por categoría de uso de suelo, la incorporación de las series temporales de volúmenes de reserva, la consideración de agua subterránea y su extracción, la inclusión de un cambio de los derechos de agua otorgados al uso registrado de agua real, etc. Esto resultará en un modelo más preciso y realista, una posible mejor calibración y, por lo tanto, la posibilidad de obtener variables de salida más detallados del WEAP. Esto también haría posible, por ejemplo, enfocarse en un embalse crucial en la cuenca y utilizar su volumen a lo largo del tiempo como un indicador de desempeño.

Como una consideración para análisis futuros, la información hidrométrica es fundamental para la calibración de los modelos. Uno de los problemas con los datos diarios de caudal faltantes es que afectó los valores promedio mensuales, generando dispersión entre las series observadas y previstas. Por otra parte, la demanda se consideró con base en la información administrativa pero no en la información real, lo cual implica un nivel de incertidumbre en la modelación y calibración, ya que se utilizaron valores anuales en lugar de mensuales.

La metodología de este estudio está proveyendo conocimientos innovadores en relación con la seguridad del agua y el mantenimiento de los caudales ecológicos bajo escenarios de cambio climático. Utilizando esta demostración conceptual, la metodología aplicada en estos casos de estudio puede extrapolarse a otras cuencas o a un país completo para permitir una evaluación general de las reservas de agua ambientales, proyecciones del cambio climático y el impacto de la demanda de agua en México.

5. REFERENCIAS

- Abramovitz, J., Banuri, T., Girot, P.O., Orlando, B., Schneider, N., Spanger-Siegfried, E., Switzer, J., Hammill, A., 2002. Adapting to climate change: Natural resource management and vulnerability reduction. World Conserv. Union–IUCN Worldwatch Inst. Int. Inst. Sustain. Dev. Stockh. Environ. Institute Boston.
- Agricultural Bureau of South Australia, 1960. Soil Water Holding Capacity.
- Amato, C.C., McKinney, D.C., Ingol-Blanco, E., Teasley, R.L., 2006. WEAP hydrology model applied: the Rio Conchos Basin. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn, K., 2011. mice: Multivariate imputation by chained equations in R. *J. Stat. Softw.* 45.
- Dettinger, M.D., Diaz, H.F., 2000. Global characteristics of stream flow seasonality and variability. *J. Hydro-meteorol.* 1, 289–310.
- Escobar, M., Vicuña, S., 2009. Guía Metodológica: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo Weap.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Chapter 3: Meteorological data.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C.S., 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35.
- Gomez-Martinez, J., Mejia-Zermenó, R., Gutierrez-Lopez, A., 2005. Estudio de modelos distribuidos para la simulación del escurrimiento en cuencas: Aplicación a la cuenca del Río Conchos afluente del Río Bravo. *Inst. Mex. Tecnol. Agua Cuernavaca Mex. Esp.*
- Greene, A.M., Goddard, L., Gonzalez, P.L.M., Ines, A.V.M., Chryssanthacopoulos, J., 2015. A climate generator for agricultural planning in southeastern South America. *Agric. For. Meteorol.* 203, 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.008>
- Greene, A.M., Goddard, L., Hansen, J., 2012. A framework for the simulation of regional decadal variability for agricultural and other applications.
- Howard, G., Bartram, J., Water, S., World Health Organization, 2003. Domestic water quantity, service level and health.
- Ingol-Blanco, E., McKinney, D.C., 2009. Hydrologic model for the Rio Conchos Basin: calibration and validation. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin.
- Kenov, K., Ramos, H., 2012. Water and energy sustainable management in irrigation systems network. *Int. J. Energy Environ. IJEE* 3, 833–860.
- Molnar, P., 2011. Calibration. *Watershed Modelling, SS 2011. Inst. Environ. Eng. Chair Hydrol. Water Resour. Manag. ETH Zür. Switz.*
- Munang, R., Thiaw, I., Alverson, K., Liu, J., Han, Z., 2013. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5, 47–52.

- Scurlock, J., Asner, G., Gower, S., 2001. Global leaf area index data from field measurements, 1932–2000. Oak Ridge Natl. Lab. Distrib. Act. Arch. Cent. Oak Ridge Tenn. USA.
- Steinschneider, S., & Brown, C. (2013). A semiparametric multivariate, multisite weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. *Water Resources Research*, 49(11), 7205–7220. doi:10.1002/wrcr.20528
- Stockholm Environment Institute, 2007. Water Evaluation and Planning System, WEAP.
- Templ, M., Alfons, A., Kowarik, A., Prantner, B., 2013. VIM: Visualization and Imputation of Missing Values (Version 4.0. 0.)[Conjunto de datos]. Recuperado HttpCRAN R-Proj. Orgpackage VIM.
- USDA, n.d. Saturated Hydraulic Conductivity.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., West, J., Galbraith, H., 2006. A physically-based, water resources planning model of the Sacramento Basin, California. *ASCE J. Water Resour. Manag.*
- Zambrano-Bigiarini, M., 2014. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. R Package Version 03-8.
- Zambrano-Bigiarini, M., 2012. HydroTSM: Time series management, analysis and interpolation for hydrological modelling. R Package Version 03 3.

6. ANEXO

6.1 Anexo 1: Resultados de Caudal ecológico / Reservas de agua

San Pedro Mezquital

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1944 - 1974) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|----------|----------|--------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 58.38 | 38.84 | 17.94 | 12.01 | 10.42 |
| Feb | 41.22 | 20.43 | 10.21 | 8.16 | 7.72 |
| Mar | 19.97 | 10.40 | 5.56 | 4.31 | 3.70 |
| Abr | 10.27 | 6.02 | 3.88 | 3.04 | 2.31 |
| May | 33.96 | 19.42 | 4.49 | 3.33 | 2.78 |
| Jun | 230.76 | 169.27 | 69.51 | 33.77 | 14.60 |
| Jul | 595.00 | 515.76 | 338.82 | 269.42 | 235.47 |
| Ago | 797.42 | 716.89 | 521.89 | 448.76 | 389.97 |
| Sep | 566.28 | 506.55 | 320.77 | 251.75 | 208.97 |
| Oct | 205.81 | 145.07 | 63.95 | 44.20 | 32.97 |
| Nov | 101.28 | 59.79 | 29.66 | 26.31 | 23.87 |
| Dic | 55.40 | 38.39 | 18.11 | 15.05 | 13.65 |
| Total (Mm ³) | 2,715.75 | 2,246.83 | 1,404.78 | 1,120.11 | 946.41 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|----------|----------|--------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 2,246.83 | 1,404.78 | 1,120.11 | 946.41 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 83.19 | 52.01 | 41.47 | 35.04 |

Alto Río Coatzacoalcos

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1953-2011) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|----------|----------|----------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 851.8 | 539.02 | 471.97 | 444.51 | 415.14 |
| Feb | 617.0 | 388.54 | 331.52 | 299.16 | 258.00 |
| Mar | 513.2 | 280.09 | 232.61 | 206.97 | 167.57 |
| Abr | 391.0 | 191.25 | 156.88 | 142.30 | 125.89 |
| May | 379.0 | 148.60 | 106.58 | 91.98 | 74.16 |
| Jun | 660.1 | 306.32 | 225.12 | 191.26 | 156.38 |
| Jul | 1607.2 | 1,278.31 | 843.05 | 590.97 | 490.98 |
| Ago | 2247.0 | 1,740.76 | 1,308.50 | 1,036.93 | 793.89 |
| Sep | 2607.1 | 2,264.46 | 1,790.85 | 1,463.82 | 1,243.33 |
| Oct | 2232.9 | 1,624.69 | 1,265.40 | 1,028.33 | 811.90 |
| Nov | 1305.1 | 867.23 | 753.36 | 691.11 | 608.48 |
| Dic | 1085.4 | 632.75 | 523.39 | 464.26 | 381.36 |
| Total (Mm ³) | 14,496.7 | 10,262.02 | 8,009.23 | 6,651.61 | 5,527.10 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|----------|----------|----------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 10,262.02 | 8,009.23 | 6,651.61 | 5,527.10 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 70.29 | 54.86 | 45.56 | 37.86 |

Casas Grandes 2

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1942-1987) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|-------|-------|-------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 7.25 | 9.28 | 7.49 | 6.64 | 5.61 |
| Feb | 2.81 | 3.88 | 2.78 | 2.46 | 2.11 |
| Mar | 0.27 | 0.89 | 0.14 | 0.07 | 0.00 |
| Abr | 0.06 | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 0.00 |
| May | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul | 5.45 | 11.85 | 5.46 | 2.70 | 1.79 |
| Ago | 22.28 | 45.79 | 22.85 | 12.85 | 7.63 |
| Sep | 10.97 | 23.98 | 10.41 | 5.62 | 3.86 |
| Oct | 4.19 | 8.81 | 4.22 | 2.39 | 1.37 |
| Nov | 1.29 | 2.58 | 1.44 | 0.90 | 0.26 |
| Dic | 0.47 | 1.22 | 0.39 | 0.22 | 0.06 |
| Total (Mm ³) | 55.07 | 108.52 | 55.22 | 33.87 | 22.69 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 108.52 | 55.22 | 33.87 | 22.69 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 36.48 | 18.57 | 11.08 | 7.27 |

Río Corona

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1967-1998) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|-------|-------|-------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 5.1 | 2.40 | 1.46 | 1.08 | 1.00 |
| Feb | 3.1 | 1.24 | 0.74 | 0.57 | 0.50 |
| Mar | 2.4 | 0.78 | 0.41 | 0.32 | 0.28 |
| Abr | 2.4 | 0.64 | 0.30 | 0.20 | 0.07 |
| May | 8.5 | 1.58 | 0.53 | 0.26 | 0.17 |
| Jun | 32.7 | 10.19 | 4.64 | 2.49 | 1.57 |
| Jul | 31.4 | 10.56 | 4.32 | 2.38 | 1.35 |
| Ago | 36.3 | 8.72 | 4.02 | 2.31 | 1.11 |
| Sep | 71.4 | 40.95 | 22.39 | 13.72 | 9.22 |
| Oct | 42.1 | 21.45 | 11.62 | 6.84 | 4.84 |
| Nov | 12.1 | 4.13 | 2.08 | 1.41 | 1.18 |
| Dic | 7.0 | 3.01 | 2.04 | 1.71 | 1.43 |
| Total (Mm ³) | 254.5 | 105.65 | 54.55 | 33.28 | 22.73 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 105.65 | 54.55 | 33.28 | 22.73 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 41.65 | 21.51 | 13.12 | 8.96 |

Río Purificación 2

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1972-2011) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|--------|-------|-------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 11.8 | 5.95 | 4.21 | 3.49 | 2.69 |
| Feb | 5.4 | 2.09 | 1.38 | 1.10 | 0.78 |
| Mar | 4.0 | 2.33 | 1.60 | 1.21 | 0.69 |
| Abr | 5.3 | 1.40 | 0.87 | 0.57 | 0.24 |
| May | 8.9 | 1.62 | 0.50 | 0.37 | 0.27 |
| Jun | 47.4 | 6.41 | 1.51 | 1.12 | 0.69 |
| Jul | 83.1 | 28.11 | 12.47 | 7.17 | 5.02 |
| Ago | 50.9 | 18.87 | 6.87 | 3.87 | 2.67 |
| Sep | 169.5 | 99.95 | 53.09 | 32.30 | 22.80 |
| Oct | 99.3 | 53.22 | 34.33 | 24.18 | 15.04 |
| Nov | 32.6 | 12.71 | 7.01 | 4.25 | 1.98 |
| Dic | 17.4 | 7.61 | 5.14 | 4.15 | 3.20 |
| Total (Mm ³) | 535.5 | 240.27 | 128.98 | 83.77 | 56.07 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|--------|-------|-------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 240.27 | 128.98 | 83.77 | 56.07 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 44.89 | 24.10 | 15.65 | 10.48 |

San Lucas

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1994-2014) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|------|------|------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 0.1 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Feb | 0.1 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Mar | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Abr | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| May | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jun | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Jul | 0.2 | 0.11 | 0.06 | 0.03 | 0.02 |
| Ago | 1.1 | 0.43 | 0.17 | 0.10 | 0.05 |
| Sep | 2.2 | 1.79 | 0.94 | 0.52 | 0.30 |
| Oct | 0.7 | 0.50 | 0.25 | 0.13 | 0.10 |
| Nov | 0.3 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dic | 0.1 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Total (Mm ³) | 4.8 | 2.90 | 1.42 | 0.79 | 0.48 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|-------|-------|------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 2.90 | 1.42 | 0.79 | 0.48 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 60.62 | 29.58 | 16.42 | 9.92 |

Tehuantepec

| MES | CAUDALES NATURALES MENSUALES PROMEDIO (1954-1985) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|--------------------------|---|--|-------|-------|-------|
| | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Ene | 1.0 | 0.50 | 0.32 | 0.24 | 0.12 |
| Feb | 0.5 | 0.24 | 0.17 | 0.12 | 0.07 |
| Mar | 0.4 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.05 |
| Abr | 0.3 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.02 |
| May | 0.8 | 0.20 | 0.05 | 0.04 | 0.03 |
| Jun | 15.8 | 3.91 | 2.26 | 1.94 | 1.47 |
| Jul | 16.6 | 7.74 | 4.45 | 3.00 | 2.11 |
| Ago | 20.2 | 7.09 | 3.58 | 2.18 | 1.55 |
| Sep | 56.4 | 27.68 | 14.82 | 7.67 | 4.57 |
| Oct | 22.5 | 9.95 | 5.92 | 3.93 | 1.95 |
| Nov | 6.4 | 2.62 | 1.55 | 1.08 | 0.76 |
| Dic | 2.2 | 0.98 | 0.60 | 0.46 | 0.29 |
| Total (Mm ³) | 143.1 | 61.14 | 33.86 | 20.75 | 13.00 |

| MILLONES DE METROS CÚBICOS (Mm ³) | Volúmenes de reservas de agua ambientales integradas (millones de metros cúbicos = Mm ³) por clase de objetivo ambiental | | | |
|---|--|-------|-------|-------|
| | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Total | 61.14 | 33.86 | 20.75 | 13.00 |
| Porcentaje de escurrimiento promedio anual | 42.43 | 23.50 | 14.40 | 9.02 |

6.2 Anexo 2: Asignación de Agua en WEAP para cada modelo

Casas Grandes

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m ³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de Casas Grandes 2 por objetivo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|------------------------------|---|--|------------|-------------|-------------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| agricola_15 | 3 | 6626340 | 12% | 6.1% | 12.0% | 19.6% | 29.2% |
| pecuario_15 | 2 | 547800 | 1% | 0.5% | 1.0% | 1.6% | 2.4% |
| publico_urbano_14 | 1 | 161000 | 0% | 0.1% | 0.3% | 0.5% | 0.7% |
| agricola_14 | 3 | 388200 | 1% | 0.4% | 0.7% | 1.1% | 1.7% |
| pecuario_14 | 2 | 46250 | 0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 0.2% |
| agricola_11 | 3 | 226200 | 0% | 0.2% | 0.4% | 0.7% | 1.0% |
| publico_urbano_11 | 1 | 31500 | 0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 0.1% |
| pecuario_11 | 2 | 19796 | 0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% |
| agricola_13 | 3 | 26760864 | 49% | 24.7% | 48.5% | 79.0% | 117.9% |
| publico_urbano_13 | 1 | 47250 | 0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 0.2% |
| pecuario_13 | 2 | 232814 | 0% | 0.2% | 0.4% | 0.7% | 1.0% |
| publico_urbano_15 | 1 | 23625 | 0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% |
| Pecuario_1 | 2 | 17843 | 0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% |
| agricola_1 | 3 | 136000 | 0% | 0.1% | 0.2% | 0.4% | 0.6% |
| agricola_4 | 3 | 499797 | 1% | 0.5% | 0.9% | 1.5% | 2.2% |
| pecuario_4 | 2 | 60495 | 0% | 0.1% | 0.1% | 0.2% | 0.3% |
| agricola_10 | 3 | 3756000 | 7% | 3.5% | 6.8% | 11.1% | 16.6% |
| pecuario_10 | 2 | 135481 | 0% | 0.1% | 0.2% | 0.4% | 0.6% |
| publico_urbano_10 | 1 | 2625 | 0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| publico_urbano_9 | 1 | 10500 | 0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| pecuario_9 | 2 | 38189 | 0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 0.2% |
| agricola_6 | 3 | 236000 | 0% | 0.2% | 0.4% | 0.7% | 1.0% |
| pecuario_6 | 2 | 59475 | 0% | 0.1% | 0.1% | 0.2% | 0.3% |
| pecuario_2 | 2 | 31707 | 0% | 0.0% | 0.1% | 0.1% | 0.1% |
| Total | | 40095749 | 73% | 37% | 73% | 118% | 177% |

Coatzacoalcos

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de Coatzacoalcos por objetivo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|------------------|---|--|-------------|-------------|-------------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Agr_ACoa_1000 | 3 | 572288 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Pobl_ACoa | 1 | 10950263 | 0.08% | 0.11% | 0.14% | 0.16% | 0.20% |
| Agr_ACoa_2000 | 3 | 268068 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_ACoa_2000 | 2 | 25616 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_AUx_2000 | 2 | 1451 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pobl_AUx | 1 | 1375791 | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.02% | 0.02% |
| Ser_BCoa_2000 | 7 | 1605 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pobl_BCoa | 1 | 9905208 | 0.07% | 0.10% | 0.12% | 0.15% | 0.18% |
| Agr_BCoa_2000 | 3 | 778580 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Ind_BUx_2000 | 6 | 10826524 | 0.07% | 0.11% | 0.14% | 0.16% | 0.20% |
| Pobl_BUx | 1 | 2433725 | 0.02% | 0.02% | 0.03% | 0.04% | 0.04% |
| Ind_Hua_1000 | 6 | 21598 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Agr_Hua_2000 | 3 | 1859067 | 0.01% | 0.02% | 0.02% | 0.03% | 0.03% |
| Pobl_Hua | 1 | 22718109 | 0.16% | 0.22% | 0.28% | 0.34% | 0.41% |
| Acu_Hua_2000 | 4 | 2080 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Ser_Hua_2000 | 7 | 6260 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Ind_Hua_2000 | 6 | 170264685 | 1.17% | 1.66% | 2.13% | 2.56% | 3.08% |
| Pobl_Llan | 1 | 15543731 | 0.11% | 0.15% | 0.19% | 0.23% | 0.28% |
| Ser_Llan_2000 | 7 | 1281 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Total | | 247555931 | 1.71% | 2.4% | 3.1% | 3.7% | 4.5% |

Nota: Población calculada como el promedio entre 1980 y 2010

San Lucas

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de San Lucas por objetivo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------------|---|--|--------------|--------------|--------------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| PECUARIO | 3 | 40044 | 0.83% | 0.07% | 0.14% | 0.24% | 0.40% |
| DOMÉSTICO | 1 | 183 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| OTRO | 1 | 600 | 0.01% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% |
| AGRÍCOLA | 4 | 9600 | 0.20% | 0.02% | 0.03% | 0.06% | 0.10% |
| Total | | 50427 | 1.05% | 0.08% | 0.17% | 0.31% | 0.51% |

Corona - Soto La Marina

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m ³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de Soto La Marina (Purificación 2) por objetivo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|------------------------------|---|--|-------------|--------------|--------------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Pobl_Blanco | 1 | 977436 | 0.18% | 0.41% | 0.76% | 1.17% | 1.74% |
| Pobl_SanAn | 1 | 432330 | 0.08% | 0.18% | 0.34% | 0.52% | 0.77% |
| Pobl_Pil1 | 1 | 72191 | 0.01% | 0.03% | 0.06% | 0.09% | 0.13% |
| Pobl_Pil2 | 1 | 819715 | 0.15% | 0.34% | 0.64% | 0.98% | 1.46% |
| Pobl_NoAf | 1 | 17236212 | 3.22% | 7.17% | 13.36% | 20.58% | 30.74% |
| Pobl_Pur1 | 1 | 439022 | 0.08% | 0.18% | 0.34% | 0.52% | 0.78% |
| Pobl_Pur2 | 1 | 1089190 | 0.20% | 0.45% | 0.84% | 1.30% | 1.94% |
| Pobl_Cor | 1 | 1859642 | 0.35% | 0.77% | 1.44% | 2.22% | 3.32% |
| Pobl_ArrGr | 1 | 184717 | 0.03% | 0.08% | 0.14% | 0.22% | 0.33% |
| Pobl_Palm | 1 | 135893 | 0.03% | 0.06% | 0.11% | 0.16% | 0.24% |
| Pobl_Soto1 | 1 | 113 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pobl_Soto2 | 1 | 2072915 | 0.39% | 0.86% | 1.61% | 2.47% | 3.70% |
| Pobl_Soto3 | 1 | 242311 | 0.05% | 0.10% | 0.19% | 0.29% | 0.43% |
| Agr_ArrGr_0 | 3 | 7070628 | 1.32% | 2.94% | 5.48% | 8.44% | 12.61% |
| Acu_Blanco_1000 | 4 | 24926400 | 4.65% | 10.37% | 19.33% | 29.76% | 44.46% |
| Agr_Cor_0 | 3 | 65214681 | 12.18% | 27.14% | 50.56% | 77.85% | 116.31% |
| Pec_Cor_0 | 2 | 1004 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Agr_NoAf_0 | 3 | 31955406 | 5.97% | 13.30% | 24.78% | 38.15% | 56.99% |
| Hid_NoAf_0 | 5 | 557017000 | 104.02% | 231.83% | 431.86% | 664.94% | 993.43% |
| Acu_NoAf_0 | 4 | 18000 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.03% |
| Pec_NoAf_0 | 2 | 290288 | 0.05% | 0.12% | 0.23% | 0.35% | 0.52% |
| Agr_Palm_0 | 3 | 4779285 | 0.89% | 1.99% | 3.71% | 5.71% | 8.52% |
| Pec_Palm_0 | 2 | 1237778 | 0.23% | 0.52% | 0.96% | 1.48% | 2.21% |
| Agr_Pil1_0 | 3 | 1651000 | 0.31% | 0.69% | 1.28% | 1.97% | 2.94% |
| Agr_Pil2_0 | 3 | 51160676 | 9.55% | 21.29% | 39.67% | 61.07% | 91.24% |
| Pec_Pil2_0 | 2 | 3558 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% |
| Acu_Pur1_0 | 4 | 12800 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.02% |
| Agr_Pur1_0 | 3 | 76075586 | 14.21% | 31.66% | 58.98% | 90.81% | 135.68% |
| Agr_Pur2_0 | 3 | 46721978 | 8.72% | 19.45% | 36.22% | 55.77% | 83.33% |
| Pec_Pur2_0 | 2 | 146 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Agr_SanAn_0 | 3 | 18679000 | 3.49% | 7.77% | 14.48% | 22.30% | 33.31% |
| Agr_Soto2_0 | 3 | 17201876 | 3.21% | 7.16% | 13.34% | 20.53% | 30.68% |
| Pec_Soto2_0 | 2 | 62279 | 0.01% | 0.03% | 0.05% | 0.07% | 0.11% |
| Agr_Soto3_0 | 3 | 22342762 | 4.17% | 9.30% | 17.32% | 26.67% | 39.85% |
| Acu_Soto3_0 | 4 | 646400 | 0.12% | 0.27% | 0.50% | 0.77% | 1.15% |
| Pec_Soto3_0 | 2 | 657521 | 0.12% | 0.27% | 0.51% | 0.78% | 1.17% |
| Agr_Blanco_2000 | 3 | 350000 | 0.07% | 0.15% | 0.27% | 0.42% | 0.62% |
| Total | | 953637739 | 178.08% | 397% | 739% | 1138% | 1701% |

Nota: Población calculada como el promedio entre 1980 y 2010

San Pedro Mezquital

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m ³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de San Pedro Mezquital por objetivo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|------------------------------|---|--|-------|-------|-------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Acu_EITun_2000 | 4 | 630720 | 0.02% | 0.03% | 0.04% | 0.06% | 0.07% |
| Agr_Dur_1000 | 3 | 78250 | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Agr_Dur_2000 | 3 | 1043825 | 0.04% | 0.05% | 0.07% | 0.09% | 0.11% |
| Agr_EITun_2000 | 3 | 730 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Agr_Gras_1000 | 3 | 60000 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% |
| Agr_Poa_2000 | 3 | 1429747 | 0.05% | 0.06% | 0.10% | 0.13% | 0.15% |
| Agr_Sauc_1000 | 3 | 21381750 | 0.79% | 0.95% | 1.52% | 1.91% | 2.26% |
| Agr_Sauc_2000 | 3 | 980500 | 0.04% | 0.04% | 0.07% | 0.09% | 0.10% |
| Agr_SBay_1000 | 3 | 984519 | 0.04% | 0.04% | 0.07% | 0.09% | 0.10% |
| Agr_SPDesemb_0 | 3 | 10067284 | 0.37% | 0.45% | 0.72% | 0.90% | 1.06% |
| Agr_SPM_0 | 3 | 3379050 | 0.12% | 0.15% | 0.24% | 0.30% | 0.36% |
| Agr_SPM_1000 | 3 | 14356782 | 0.53% | 0.64% | 1.02% | 1.28% | 1.52% |
| Agr_SPM_2000 | 3 | 12000 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Agr_Such_1000 | 3 | 4919183 | 0.18% | 0.22% | 0.35% | 0.44% | 0.52% |
| Agr_Such_2000 | 3 | 8385918 | 0.31% | 0.37% | 0.60% | 0.75% | 0.89% |
| Ind_SPDesemb_0 | 6 | 6114 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Ind_SPM_0 | 6 | 109 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Dur_1000 | 2 | 205291 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.02% |
| Pec_Dur_2000 | 2 | 7938 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_EITun_2000 | 2 | 16315 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Gras_1000 | 2 | 39465 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Gras_2000 | 2 | 23664 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Poa_2000 | 2 | 22138 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Sauc_1000 | 2 | 291195 | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.03% |
| Pec_SBay_1000 | 2 | 4563 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_SBay_2000 | 2 | 6265 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_SPM_0 | 2 | 964 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_SPM_1000 | 2 | 196382 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.02% |
| Pec_SPM_2000 | 2 | 179165 | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.02% |
| Pec_Such_1000 | 2 | 1680 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Pec_Such_2000 | 2 | 80958 | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Pobl_Dur | 1 | 31951075 | 1.18% | 1.42% | 2.27% | 2.85% | 3.38% |
| Pobl_EITun | 1 | 133008 | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Pobl_Gras | 1 | 304430 | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.03% |
| Pobl_Poa | 1 | 905143 | 0.03% | 0.04% | 0.06% | 0.08% | 0.10% |
| Pobl_Sauc | 1 | 1561102 | 0.06% | 0.07% | 0.11% | 0.14% | 0.16% |
| Pobl_SBay | 1 | 664530 | 0.02% | 0.03% | 0.05% | 0.06% | 0.07% |

| | | | | | | | |
|----------------|---|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Pobl_SPDesemb | 1 | 3213491 | 0.12% | 0.14% | 0.23% | 0.29% | 0.34% |
| Pobl_SPM | 1 | 5050422 | 0.19% | 0.22% | 0.36% | 0.45% | 0.53% |
| Pobl_Such | 1 | 1561102 | 0.06% | 0.07% | 0.11% | 0.14% | 0.16% |
| Ser_SPDesemb_0 | 7 | 396 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| Ser_SPM_0 | 7 | 372300 | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.03% | 0.04% |
| Ser_SPM_1000 | 7 | 333628 | 0.01% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | 0.04% |
| Ser_Such_2000 | 7 | 77800 | 0.00% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | 0.01% |
| Serv_Dur_1000 | 7 | 10054232 | 0.37% | 0.45% | 0.72% | 0.90% | 1.06% |
| Total | | 124975117 | 4.60% | 5.56% | 8.90% | 11.16% | 13.21% |

Nota: Población calculada como el promedio entre 1980 y 2010

Tehuantepec

| NOMBRE (Type_WEAP-Catchment) | PRIORIDAD | DEMANDA [m ³] | DEMANDA SOBRE CAUDALES NATURALES ANUALES PROMEDIO [%] | Demanda sobre volumen de reserva de agua de Tehuantepec por objeti- vo ambiental [%] | | | |
|---------------------------------|-----------|------------------------------|---|--|--------------|--------------|---------------|
| | | | | "A" | "B" | "C" | "D" |
| Agr_Ost2_1000 | 3 | 34541 | 0.02% | 0.06% | 0.10% | 0.17% | 0.27% |
| Pobl_Ost2 | 1 | 1118524 | 0.78% | 1.83% | 3.30% | 5.39% | 8.60% |
| Agr_Ost2_1250 | 3 | 275280 | 0.19% | 0.45% | 0.81% | 1.33% | 2.12% |
| Agr_Zana_1250 | 3 | 196675 | 0.14% | 0.32% | 0.58% | 0.95% | 1.51% |
| Pobl_Zana | 1 | 419692 | 0.29% | 0.69% | 1.24% | 2.02% | 3.23% |
| Pobl_Ost1 | 1 | 22064 | 0.02% | 0.04% | 0.07% | 0.11% | 0.17% |
| Total | | 2066776 | 1.44% | 3.38% | 6.10% | 9.96% | 15.90% |

Nota: Población calculada como el promedio entre 1980 y 2010

6.3 Anexo 3: Análisis de Metas por Región Hidrológica para la simulación en simgen (CC:50%)

Clasificación de reservas de caudal ecológico (expresada como porcentaje) con niveles de demanda de agua actuales.

| NOMBRE | 1980-2010 | | | | |
|---------------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D | E |
| Casas Grandes | 0% | 10% | 19% | 6% | 65% |
| Coatzacoalcos | 87% | 13% | 0% | 0% | 0% |
| Tehuantepec | 45% | 32% | 6% | 13% | 3% |
| Corona | 68% | 19% | 6% | 3% | 3% |
| Purificación | 26% | 52% | 6% | 6% | 10% |
| SPM | 55% | 35% | 10% | 0% | 0% |
| San Lucas | 45% | 32% | 3% | 10% | 10% |

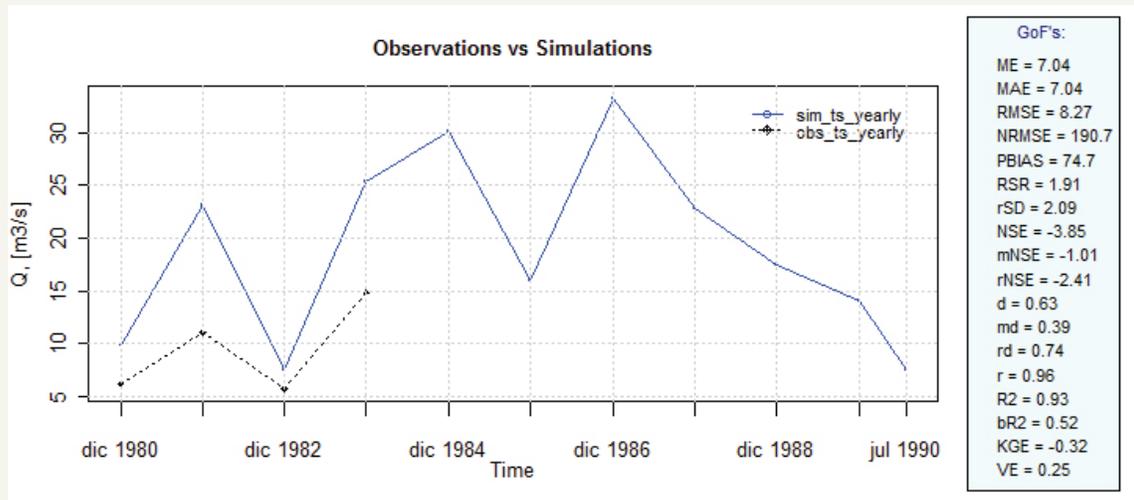
| NOMBRE | 2030-2060 - CC-50% | | | | |
|---------------|--------------------|-----|-----|-----|------|
| | A | B | C | D | E |
| Casas Grandes | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% |
| Coatzacoalcos | 55% | 35% | 10% | 0% | 0% |
| Tehuantepec | 13% | 48% | 6% | 13% | 19% |
| Corona | 52% | 35% | 6% | 3% | 3% |
| Purificación | 13% | 35% | 35% | 13% | 3% |
| SPM | 0% | 26% | 23% | 26% | 26% |
| San Lucas | 35% | 35% | 13% | 6% | 10% |

6.4. Anexo 4: Cambio fraccional en precipitación regional por grado de calentamiento global, para cada modelo (entrada a Simgen)

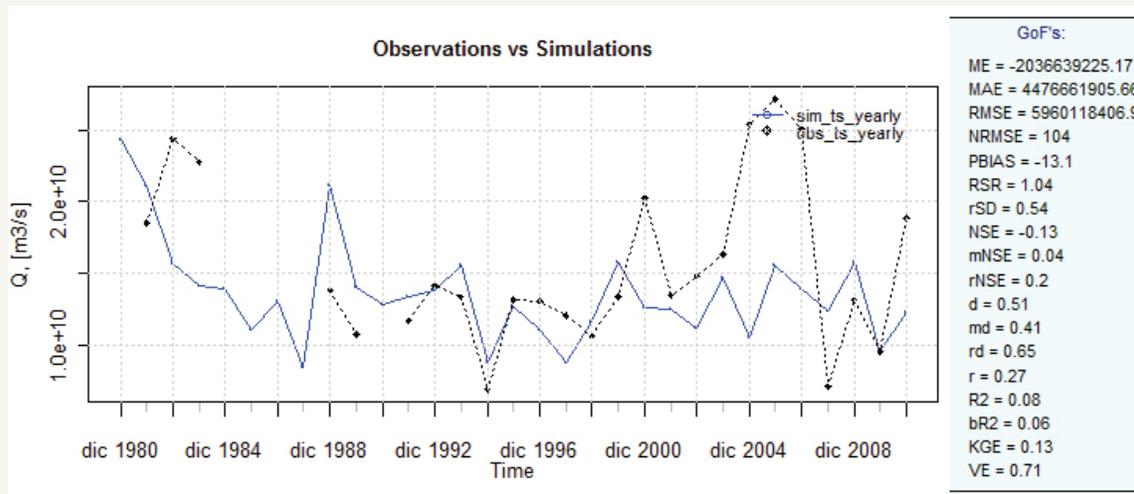
| REGIÓN | CAMBIO FRACCIONAL | DESVIACIÓN ESTÁNDAR |
|--------------------|-------------------|---------------------|
| Casas Grandes | -0.0234 | 0.0641 |
| Coatzacoalcos | -0.0429 | 0.0472 |
| Tehuantepec | -0.0417 | 0.0474 |
| Soto La Marina | -0.00464 | 0.0201 |
| Presidio San Pedro | -0.0242 | 0.025 |
| San Lucas | -0.0335 | 0.0418 |

6.5. Anexo 5: Comparación de la predicción del modelo del volumen anual con los valores observados

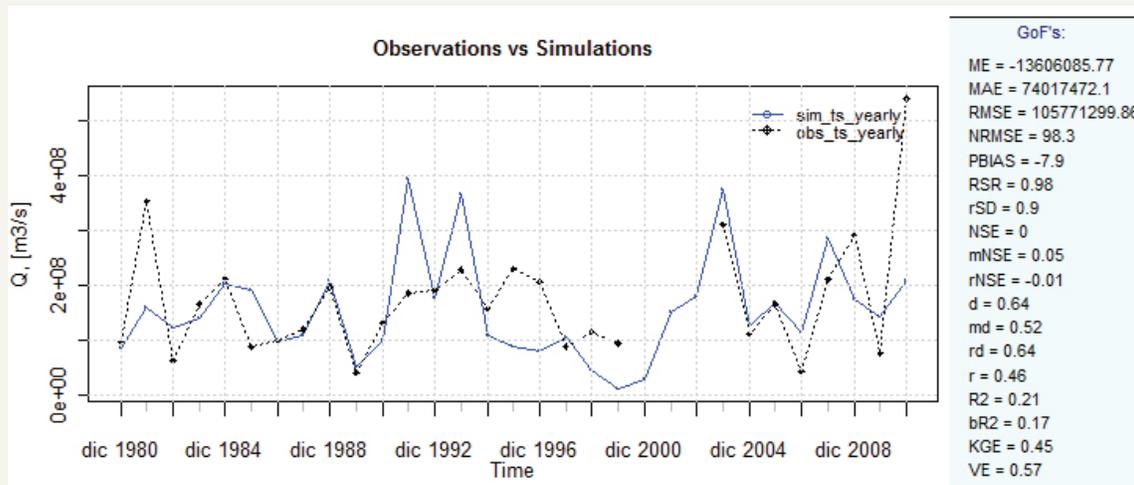
Casas Grandes



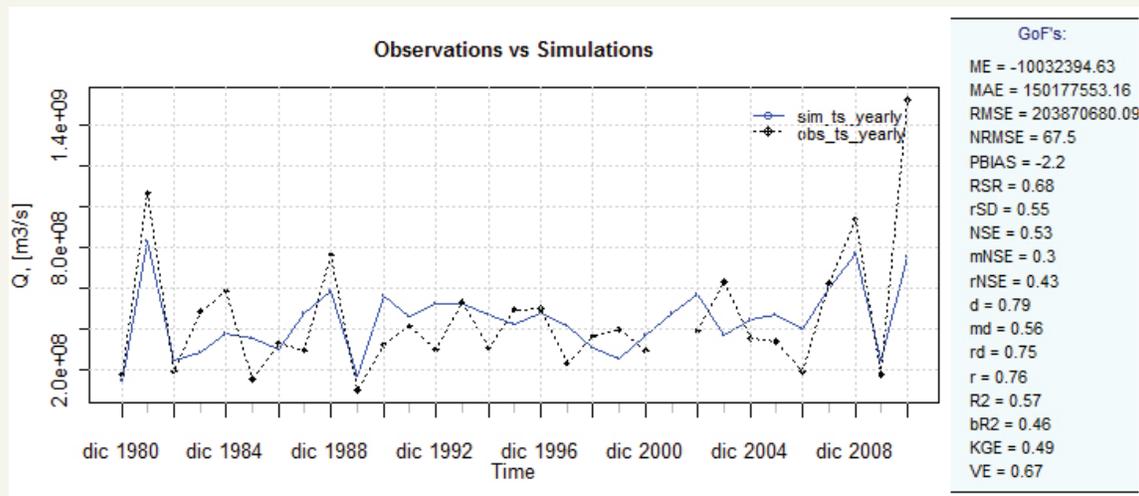
Coatzacoalcos



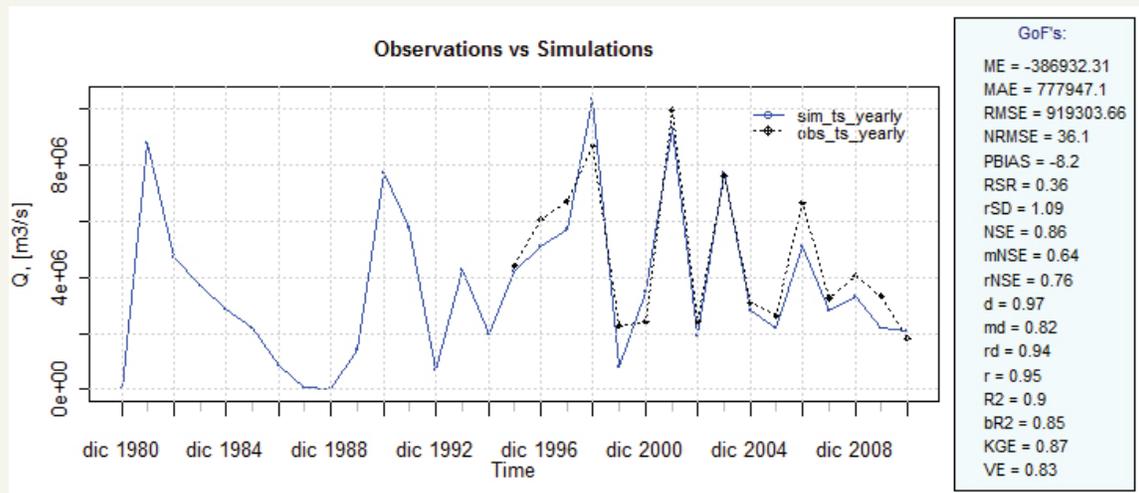
Río Corona



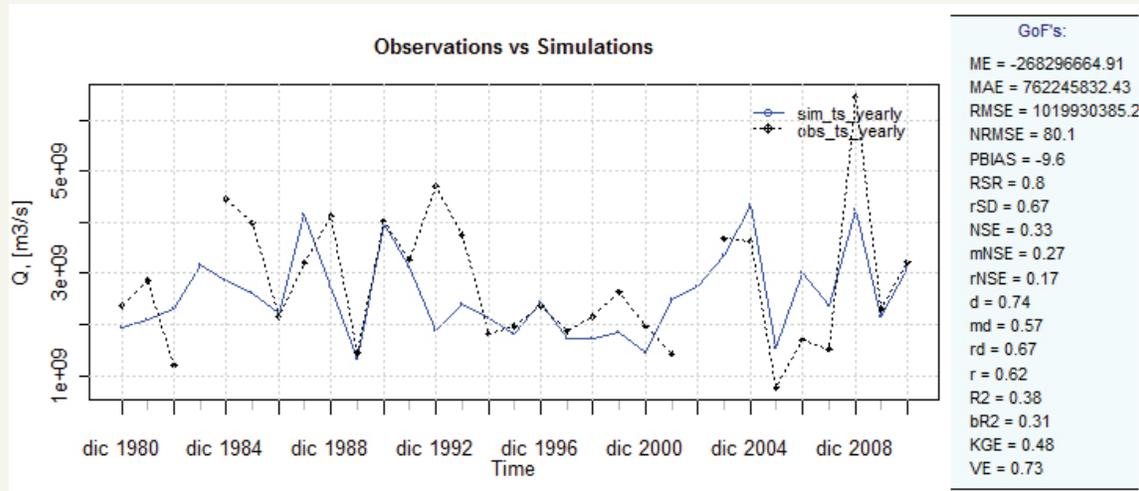
Río Padilla



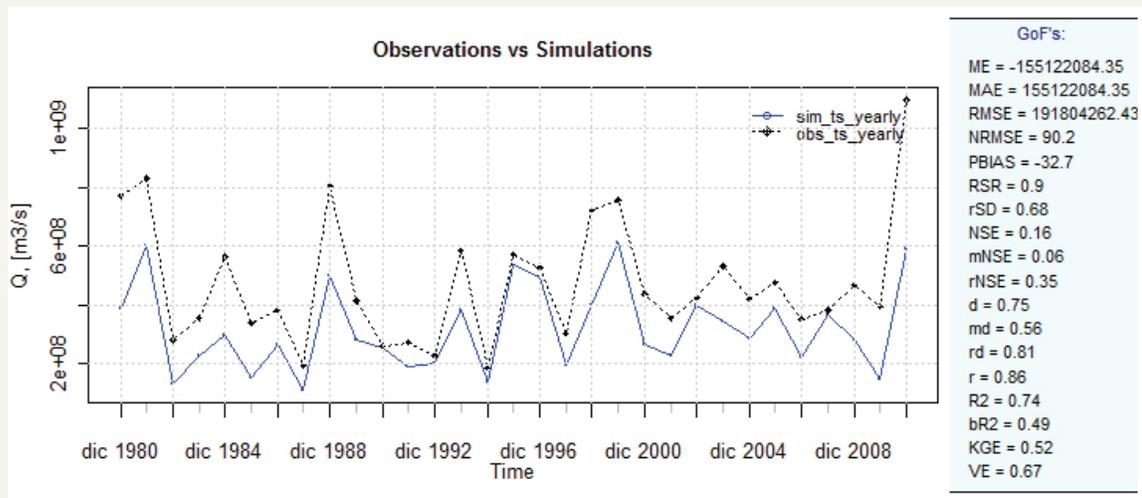
San Lucas



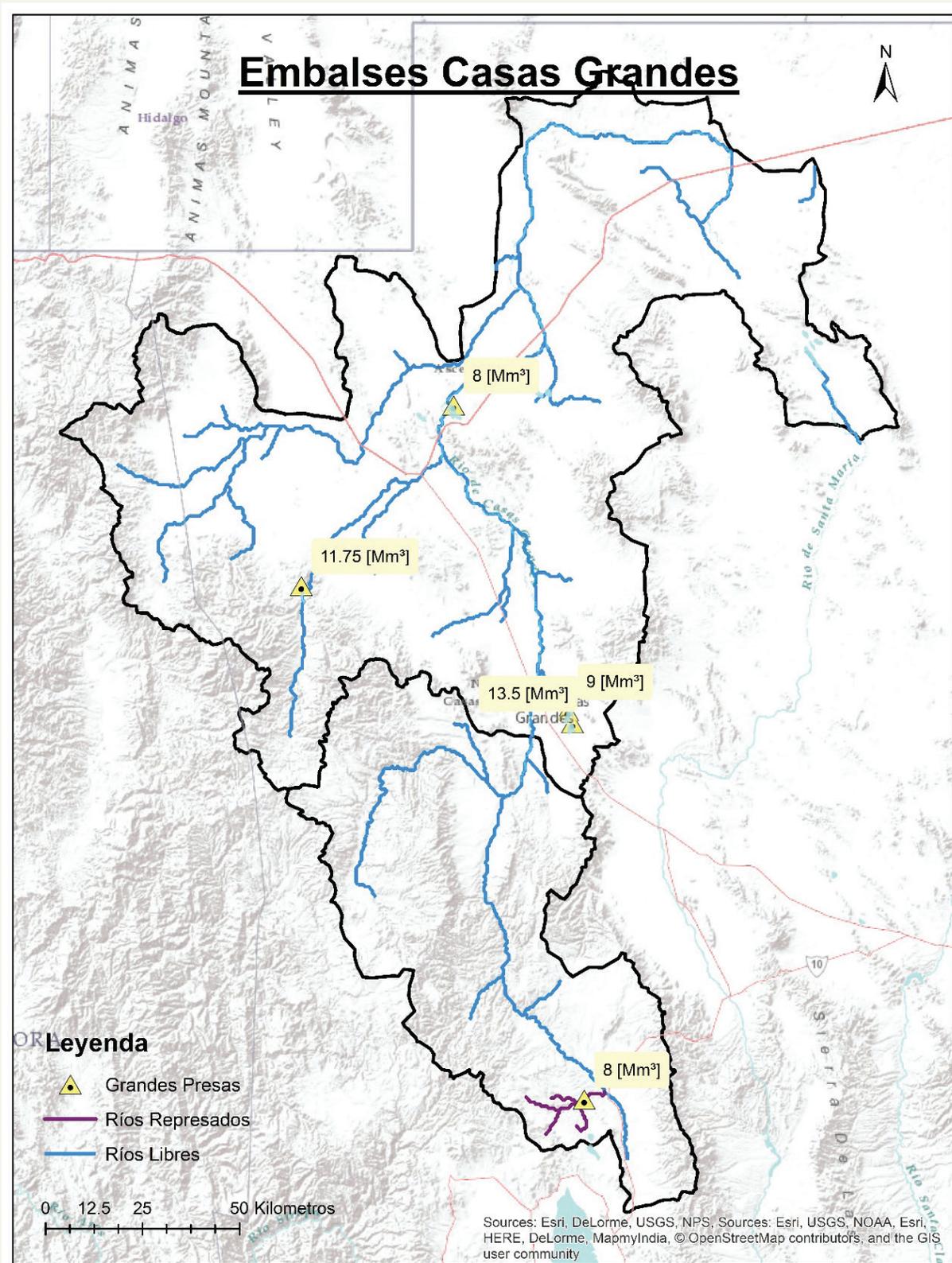
San Pedro Mezquital



Tehuantepec



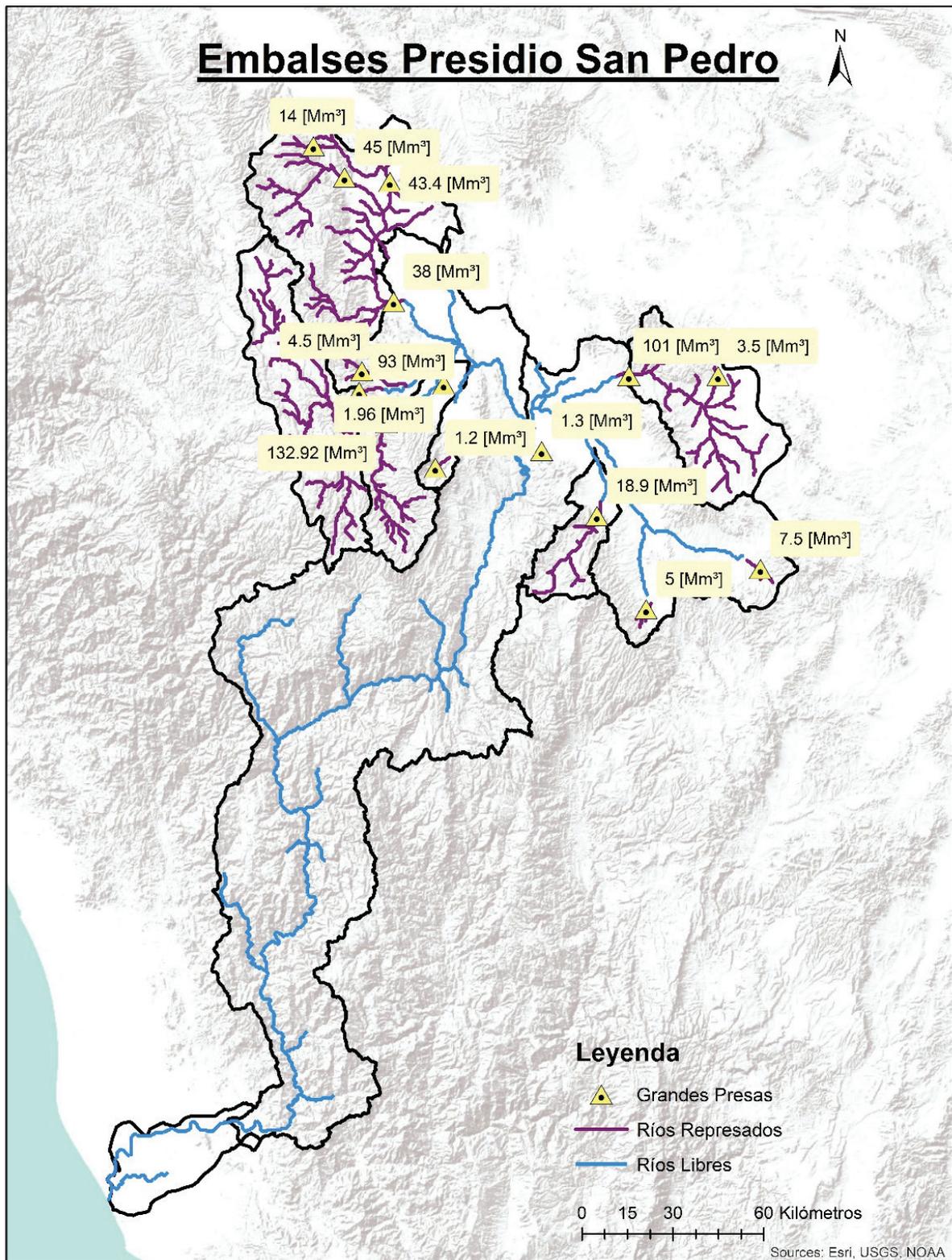
6.6. Anexo 6: Detalle de embalses por región hidrológica



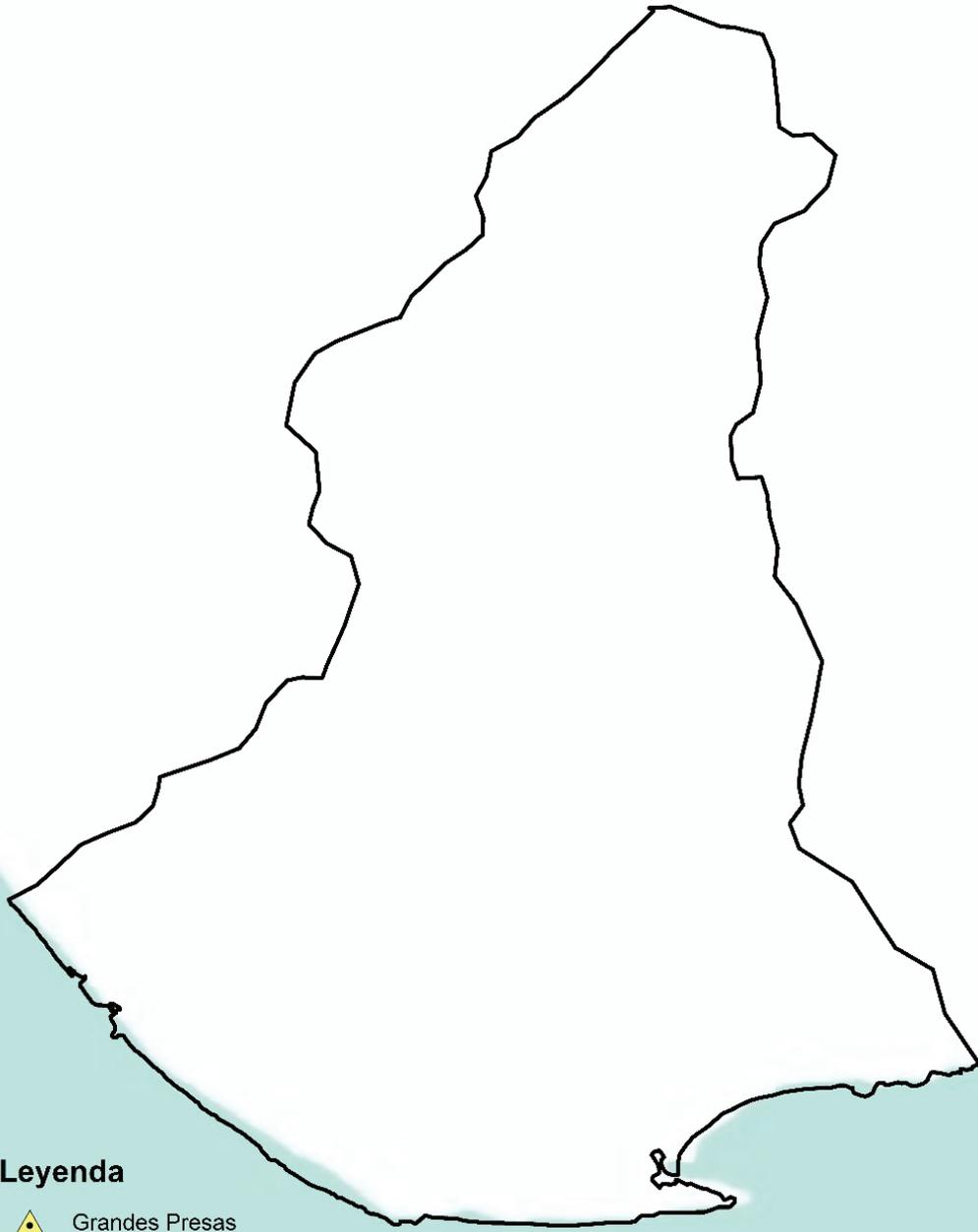
Embalses Coatzacoalcos & Tehuantepec



Embalses Presidio San Pedro

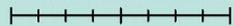


Embalses San Lucas



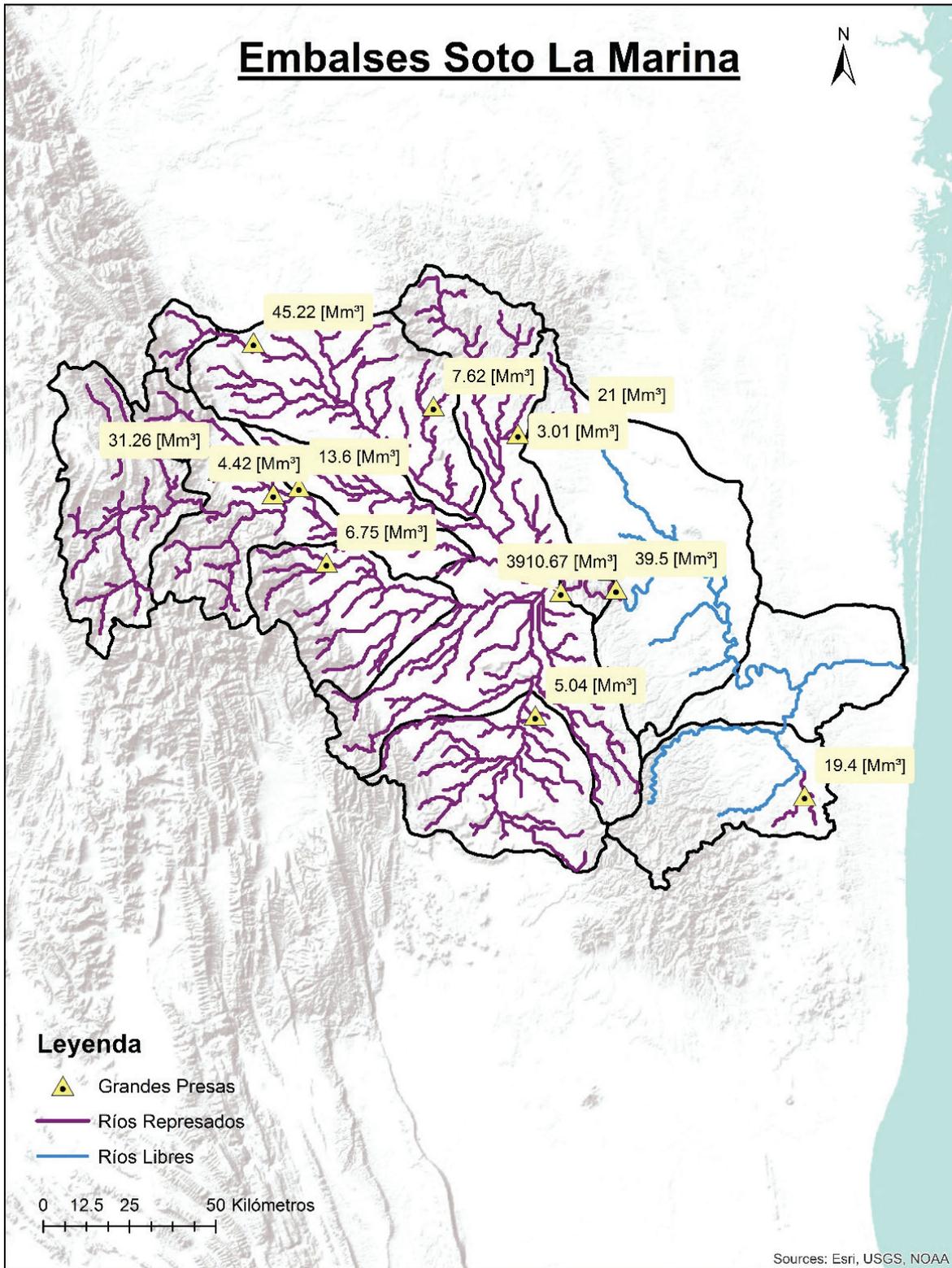
Leyenda

 Grandes Presas

0 1.25 2.5 5 Kilometros


Sources: Esri, USGS, NOAA

Embalses Soto La Marina



6.7. Anexo 7: El resumen de las llamadas en conferencia del proyecto

| Fecha | Tema | Participantes | Discusión / Resultados | Documentos compartidos |
|--------|---|---|--|---|
| 19 Jun | Progreso de la calibración WEAP para las cuencas piloto | Ted Grantham, Alex Mauroner, John Matthews, Ninel Escobar, Pablo Rojas, Koen Verbist, Froukje Kuijk | Propuesta y explicación de la metodología en WEAP | |
| 27 Jun | Conjunto de datos de demandas de agua | Froukje Kuijk and Ninel Escobar | <ul style="list-style-type: none"> - Discusión sobre la incorporación de las demandas de agua en los modelos WEAP de las cuencas piloto. - Revisión del conjunto de datos oficial de México sobre derechos de agua. - Argumentación sobre los niveles de prioridad oficial del suministro de agua para diferentes usos de agua. | Conjunto de datos oficial sobre Derechos de Agua |
| 30 Jun | Progreso de la calibración WEAP de todas las cuencas piloto | Ninel Escobar, Pablo Rojas, Froukje Kuijk, Koen Verbist | Discusión detallada sobre los diferentes datos de entrada y conjuntos de datos en la modelación WEAP | Avances_Informe1 |
| 3 Jul | Casos en conflicto (Estaciones de descarga y presas) | Ninel Escobar y Froukje Kuijk | Primera identificación de los casos en conflicto de las estaciones hidrométricas y embalses en la cuenca piloto | Shapefiles de los casos en conflicto para cada una de las cuencas piloto con comentarios en la tabla de atributos. |
| 13 Jul | Casos en conflicto (Estaciones de descarga y presas) | Ninel Escobar, Froukje Kuijk y expert en SIG | Identificación detallada de las diferentes locaciones de los casos en conflicto de las estaciones hidrométricas y embalses en las cuencas piloto | Shapefiles de los casos en conflicto para cada una de las cuencas piloto con comentarios. |
| 18 Jul | Entrega y presentación de reporte de avance sobre la calibración WEAP de las cuencas piloto | Ninel Escobar, Pablo Rojas, Froukje Kuijk, Koen Verbist | <ul style="list-style-type: none"> • Discusión detallada de los diferentes datos de entrada y conjuntos de datos en la modelación WEAP • Intercambio de información sobre las simulaciones de descarga en la cuenca San Lucas • Planeación de los siguientes pasos en la parte de calibración. | <ul style="list-style-type: none"> • Informe EEDSMexico_130717 • Reporte_Final-SIMex_WWF_P137_22dic2016 • Modelo_Prec-Esc-San Lucas |
| 21 Ago | Datos de CONAGUA sobre la curva de Volumen-Elevación para la calibración WEAP | Ninel Escobar y Froukje Kuijk | Discusión de los datos de entrada de los embalses en las cuencas piloto en Soto La Marina y Presidio San Pedro. | |
| 5 Sep | Estatus de la modelación WEAP y planeación de siguientes pasos en el proyecto | | <ul style="list-style-type: none"> • Revisar el estatus de los modelos WEAP para las 5 regiones. • Revisar los escenarios de manejo de agua sin reservas de agua vs reservas de agua a diferentes niveles. • Discutir escenarios climáticos a ser aplicados. • Seleccionar indicadores de desempeño, pruebas de esfuerzo y gráficas esperadas. • Revisar el reporte sobre la modelación WEAP de las cuencas piloto. | <ul style="list-style-type: none"> • Reporte sobre la modelación WEAP y calibración de las diferentes cuencas piloto. • Primer resultado de la superficie de respuesta para Presidio San Pedro. |
| 5 Sep | Discusión de la modelación WEAP | Ninel Escobar, Froukje Kuijk, Pablo Rojas, Ricardo Domínguez | Discusión sobre los comentarios de los detalles en la metodología de la modelación WEAP por el hidrólogo Ricardo Domínguez | <ul style="list-style-type: none"> • EEDSMexico_ProgressReport_Summary (Español) • Comentarios Ricardo Domínguez |
| 28 Sep | Primer resultado de la superficie de respuesta para la cuenca San Lucas | Ted Grantham, Alex Mauroner, John Matthews, Ninel Escobar, Pablo Rojas, Koen Verbist, Froukje Kuijk | <ul style="list-style-type: none"> • Discusión del primer resultado de la prueba de esfuerzo (superficie de respuesta para Presidio San Pedro) • Disposición de diferentes escenarios y posible elaboración de indicadores de desempeño. | Primera versión de la gráfica de superficie de respuesta de Presidio San Pedro (indicando el escenario histórico real) |
| 4 Oct | Nueva versión del primer resultado de la superficie de respuesta para la cuenca San Lucas | Ted Grantham, John Matthews, Alex Mauroner, Pablo Rojas, Ninel Escobar, Froukje Kuijk | <ul style="list-style-type: none"> • Comentarios sobre el gráfico de superficie de respuesta • Discusión sobre la temporalidad de los ríos seleccionados en las cuencas piloto. | Primera gráfica elaborada de superficie de respuesta con diferentes escenarios GCM para la cuenca de San Lucas |
| 19 Oct | Seguimiento prueba de esfuerzo y superficies de respuesta | Ted Grantham, John Matthews, Alex Mauroner, Pablo Rojas, Froukje Kuijk | <ul style="list-style-type: none"> • Incorporación de los ajustes en la superficie de respuesta y elaboración para las otras cuencas piloto. • Discusión de los diferentes escenarios de manejo e indicador de desempeño. • Últimos ajustes para finalizar el Proyecto. | Gráfica de superficie de respuesta para San Lucas, Casas Grandes, Coahuila de Zaragoza, Tehuantepec y Soto La Marina |

CAMBIO CLIMÁTICO, CAUDAL ECOLÓGICO Y SEGURIDAD HÍDRICA

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD PARA SIETE CUENCAS DE MÉXICO



Por qué estamos aquí

Para detener la degradación del ambiente natural del planeta y construir un futuro en el cual los humanos convivan en armonía con la naturaleza.

www.wwf.org.mx

© 1986 Logotipo del Panda de WWF

® “WWF” es una Marca Registrada de WWF.

WWF México, Ave. México #51, Col. Hipódromo, México, D.F., C.P. 06100— Tel. (55) 5286-5631.

Para más información visite www.wwf.org.mx