# Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero mediante el modelo Water Evaluation and Planning System (WEAP) en Guanacaste, Costa Rica

Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias Sociales

Escuela de Geografía

Postulante: Melisa Mena Benavides

Carné: B24063

2019

**Agradecimientos**

Quiero agradecer a mi director de tesis Dr. Christian Birkel, por su confianza en mí, su acompañamiento académico incondicional y sus innumerables palabras de aliento sin las que esta tesis no habría sido posible. Así mismo el apoyo de la Dra. Isabel Avendaño Flores y el Dr. Rafael Arce Mesén fue fundamental para la realización de esta investigación.

A todas las personas que participan del proyecto TropiSeca les agradezco su apoyo y consejos. En particular a la Dr. Alexandra Nauditt, Ms.C. Juan Ramírez, Ms.C. Justyna Sycz, Dr. Patricio Crespo y Dr. Alex Manuel Áviles. A la Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD) por el financiamiento del proyecto TropiSeca el cual hizo posible el intercambio entre estudiantes y profesores del Observatorio de Agua y Cambio Global de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica y el "Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics" de la "TH Koeln University of Applied Sciences" y las demás instituciones que participan de este proyecto.

También quiero agradecer al Ms.C. Javier Artiñano del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), a Herbert Villavicencio de la Dirección de Aguas, a Dr. Ana María Durán Quesada del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, por los datos facilitados. Así mismo agradezco los consejos brindados por Ms.C. Karina Palacios, Dra. Alicia Correa Barahona y el DEA. Pascal Girot.

Por último, quiero agradecer de todo corazón a mi familia por su apoyo incondicional y a mis amigos cercanos, quienes en conjunto forman una red de apoyo fundamental a mí.

**Resumen**

Las cuencas Tempisque y Bebedero, al norte de Costa Rica, se caracterizan por una clara estacionalidad lluviosa marcada por una definida estación seca que se extiende de diciembre a mayo en el promedio a largo plazo. La variabilidad climática natural se ve agravada por fenómenos regionales de océano y atmósfera como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que provoca sequías hidrometeorológicas de gravedad variable en la región costera del Pacífico oriental tropical; así como la ocurrencia de inundaciones que dependen de otros factores a gran escala. En esta investigación se propone el modelo WEAP (por sus siglas en inglés "Water Evaluation and Planning System") como una herramienta para evaluar la disponibilidad de agua, así como el efecto que las demandas sectoriales tienen en disponibilidad. También se discute que tan sustentable es el manejo del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero.

El caudal seminatural en las cuencas Tempisque y Bebedero se simuló para el periodo 1993 y 2016. Las cabeceras de cada cuenca fueron calibradas para el periodo entre 1993-2003, con énfasis en la calibración de los caudales mínimos, logrando una notoria eficiencia de simulación en la cabecera del río Tempisque (logNSE 0,79). Los resultados muestran una adecuada variabilidad intra y una clara disminución del caudal entre 1997 y 1998 a causa de la sequía provocada por el fenómeno El Niño. Debido a falta de datos las partes medias y bajas de ambas cuencas no se calibraron por lo que se recomienda instalar medidores de caudal en la parte alta y baja de las cuencas del Tempisque y Bebedero.

Del agua superficial concesionada, un 0,48% se utiliza para uso doméstico, un 0,56% para uso turístico y un 99% para uso agrícola. Debido a que el agua que se destina al sector doméstico y turístico es muy poca en comparación al agrícola, estos dos sectores no representan una amenaza para la disponibilidad presente y futura del agua superficial. Caso contrario, la demanda del sector agrícola, puede superar la disponibilidad en particular durante la época seca, bajo un

escenario de consumo máximo, situación que comprometería los ecosistemas fluviales. En el caso del río Bebedero se estimó que existe un excedente que proviene del trasvase de agua a través de los proyectos ARCOSA y DRAT. Se registró un aumento máximo porcentual de 375% entre el caudal simulado y el caudal después del aporte adicional.

La sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero está en peligro por los siguientes aspectos: 1) un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua 2) Al no contar con un caudal ambiental establecido no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua 3) ante la variabilidad climática propia del área de estudio y los efectos en el clima producto del cambio climático, si no se toman medidas de adaptación hacia un escenario de menor disponibilidad hídrica, no habrá agua suficiente durante todo un año para abastecer a todas las demandas.

**Cuadro de contenido**

I. Capítulo: Aspectos generales ..... 10

1.1. Introducción ..... 10

1.2. Caracterización del área de estudio ..... 10

1.3. Planteamiento del problema ..... 15

1.4. Justificación ..... 15

1.5. Objetivo General ..... 18

1.6. Objetivos Específicos ..... 18

1.7. Antecedentes ..... 18

1.7.1. Estado del marco legal sobre agua en Costa Rica ..... 19

1.7.2. Manejo del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero desde finales del siglo XX hasta la actualidad ..... 20

1.7.3. Estudios sobre la cuenca del río Tempisque ..... 22

II. Capítulo: Marco Conceptual ..... 26

2.1. Método de Interpolación: Distancia Inversa Ponderada ..... 26

2.2. Modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía ..... 27

2.3. Método de simulación en WEAP: Humedad del Suelo ..... 27

2.4. Calibración, sensibilidad de parámetros y eficiencia ..... 31

2.5. Escenarios en WEAP ..... 33

2.6. La sustentabilidad del recurso hídrico ..... 33

III. Capítulo: Marco Metodológico ..... 34

3.1. Procedimientos para cuantificar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP ..... 35

3.1.1. Datos de entrada para el modelo WEAP ..... 35

3.1.2. Calibración del modelo, periodo 1993-2003 ..... 39

3.2. Procedimientos para estimar el efecto de las concesiones en el agua superficial disponible en las cuencas del Tempisque y Bebedero ..... 41

3.3. Procedimientos para evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP ..... 43

IV. Capítulo: Cuantificación de la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP ..... 49

4.1. Datos de entrada para el modelo WEAP ..... 49

4.2. Calibración visual del modelo, periodo 1993-2003 ..... 56

4.3. Calibración a partir de la prueba de sensibilidad y medición de la eficiencia periodo 1993-2003 ..... 59

4.4. Caudal simulado para el periodo 1993-2016 ..... 63

4.5. Conclusiones ..... 65

V. Capítulo: Estimación del efecto de las concesiones en la disponibilidad de agua superficial en las cuencas del Tempisque y Bebedero ..... 66

5.1. Caudales concesionados por uso y subcuenca ..... 67

VI. Capítulo: Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios hipotéticos incorporados en el programa WEAP ..... 85

6.1. Demandas de agua para el sector doméstico y turístico y su efecto en la disponibilidad ..... 86

6.2. Demanda agrícola y su efecto en la disponibilidad ..... 88

6.3. El estado de la sostenibilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ..... 98

6.4. Conclusiones ..... 102

VII. Capítulo: Conclusiones y Recomendaciones ..... 103

VIII. Bibliografía citada ..... 106

**Índice de Cuadros**

Cuadro 1: Indicadores poblacionales para los cantones en las cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica, 2011 ..... 13
Cuadro 2: Dotaciones de uso doméstico poblacional ..... 45
Cuadro 3: Consumo de agua según cultivo (m3/ha/año) ..... 47
Cuadro 4: Calibración visual, valores asignados a los parámetros dependientes e independientes de las coberturas de la tierra ..... 57
Cuadro 5: Valores asignados a los parámetros independientes a los cambios de cobertura determinados mediante la calibración por eficiencia, Subcuencas 1 y 2 ..... 61
Cuadro 6: Comparación de la eficiencia global entre la calibración visual y la de sensibilidad 63
Cuadro 7: Caudales máximo, mínimos y acumulados por subcuenca para el periodo 1993-2016 ..... 64
Cuadro 8: Caudal concesionado en litros por segundo (l/s) para todos los usos por subcuenca, agua superficial, actualizado al 2017 ..... 67
Cuadro 9: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y subcuenca, para las concesiones con expediente tipo “Acueducto rural”, actualizado al 2017 ..... 71
Cuadro 10: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y subcuenca, para las concesiones con expediente tipo “Agua superficial”, actualizado al 2017 ..... 72
Cuadro 11: Caudales concesionados para consumo turístico según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017 ..... 75
Cuadro 12: Caudales concesionados para riego según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017 ..... 76
Cuadro 13: agua superficial concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca .... 77
Cuadro 14: Personas abastecidas en un año, actualizada al 2017 ..... 86
Cuadro 15: Caudal de requerimiento para los sectores doméstico, turístico y agrícola ..... 88

Cuadro 16: Área agrícola, según cultivo, en las cuencas Tempisque y Bebedero ..... 92
Cuadro 17: Recomendaciones para asegurar la sustenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica ..... 98

**Índice de Figuras**

Figura 1: Área de Estudio, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica. .....12
Figura 2: Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo ..... 29
Figura 3: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey) y secciones de los ríos principales..... 35
Figura 4: Flujo de procesos automatizados con la herramienta Model Builder de ArcMap..... 38
Figura 5: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey), secciones de ríos principales, las demandas (doméstica, turística y agrícola) y las líneas de desviación de flujo . ..... 45
Figura 6: Promedio Anual de Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Viento resultado de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016, área de estudio ..... 50
Figura 7: Promedios mensuales de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento extraídos de las interpolaciones mensuales para cada subcuenca entre 1993-2016..... 53
Figura 8: Cobertura de la tierra, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica, año 2010 ..... 54
Figura 9: Tipos de cobertura por fracción del área de cada subcuenca ..... 55
Figura 10: Variación mensual en los valores Kc según cultivo ..... 56
Figura 11: Resultados de la calibración visual entre caudal observado y la escorrentía simulada ..... 58
Figura 12: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z1 yZ2 para la Subcuenca 1 cabecera del Tempisque..... 59
Figura 13: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z1 yZ2 para la Subcuenca 2 cabecera del Bebedero..... 60

Figura 14: Resultados de la calibración con sensibilidad y eficiencia de parámetros ..... 62
Figura 15: Caudales simulados por subcuenca, cuencas del río Tempisque y Bebedero, 1993-2016 ..... 64
Figura 16: Agua para consumo doméstico en el área de estudio, 2017, A) Concesiones tipo Acueducto Rural B) Concesiones tipo Agua Superficial C) Caudales concesionados bajo la categoría de Acueducto Rural D) Caudales concesionados bajo la categoría de Agua Superficial. Fuente de datos Dirección de Aguas, MINAE y AtlasTEC, Proyección CRTM05, Datum WGS84 ..... 70
Figura 17: Agua para consumo agrícola y turístico en el área de estudio, 2017, A) Concesiones para uso agrícola B) Concesiones para uso turístico C) Caudales de agua superficial concesionados para uso agrícola D) Caudales de agua superficial concesionados para uso turístico, Fuente de datos Dirección de Aguas, MINAE y AtlasTEC, Proyección CRTM05, Datum WGS84 ..... 73
Figura 18: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Tempisque ..... 79
Figura 19: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Bebedero ..... 81
Figura 20: Volumen de la demanda para el sectores doméstico, turístico y agrícola ..... 87
Figura 21: Tipo de cobertura para las cuencas del Tempisque y Bebedero ..... 90
Figura 22: Cobertura de la tierra por tipo de cultivo, DRAT, II semestre, 2013-2016 ..... 91
Figura 23: Caudal simulado y después de las demandas, río Tempisque ..... 95
Figura 24: Caudales promedio mensuales entregados al SENARA para abastecer al DRAT entre 2013 y octubre del 2016 ..... 96
Figura 25: Caudal del Bebedero después de aporte del trasvase ..... 97

**Índice de Ecuaciones**

Ecuación 1: Interpolación inverso de la distancia ..... 27
Ecuación 2: Nash & Sutcliffe ..... 32

Ecuación 3: Versión logarítmica de Nash & Sutcliffe ..... 32

Ecuación 4: Método de humedad del suelo en WEAP para calcular el balance hídrico ..... 36

# I. Capítulo: Aspectos generales

## 1.1. Introducción

Las cuencas Tempisque y Bebedero, al norte de Costa Rica, se caracterizan por una clara estacionalidad lluviosa marcada por una definida estación seca que se extiende de diciembre a mayo en el promedio a largo plazo. La variabilidad climática natural se ve agravada por fenómenos regionales de océano y atmósfera como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) que provoca sequías hidrometeorológicas de gravedad variable en la región costera del Pacífico oriental tropical; así como la ocurrencia de inundaciones que dependen de otros factores a gran escala. En el país la última actualización de la ley de aguas fue en 1942 y no existen planes integrales para el manejo del agua.

Cuando ocurren eventos meteorológicos extremos o cuando se anuncian planes de proyectos privados, surgen dudas sobre la idoneidad de la gestión que realizan las instituciones correspondientes. La mayor duda que existe es si las cuencas están sobre concesionadas y si el uso del agua es sustentable. La respuesta a estas preguntas no es simple y depende de muchos factores, pero urgen herramientas técnicas que ayuden e informen las decisiones a tomar sobre un recurso natural tan delicado como el agua.

Con el fin de contribuir en esa tarea, se propone el uso del modelo WEAP (por sus siglas en inglés “Water Evaluation and Planning System”) como una herramienta para evaluar la disponibilidad de agua, así como el efecto que las demandas sectoriales tienen en disponibilidad. También se discute a partir de los resultados y comparando con otros estudios, que tan sustentable es el manejo del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero.

## 1.2. Caracterización del área de estudio

Las cuencas de los ríos Tempisque y Bebedero se ubica en la región Pacífico Norte de Costa Rica. A pesar de que estos son dos ríos distintos en esta investigación se considera como un

área de estudio en conjunto, que comprende 5.460 $km^2$. Ya que ambos ríos desembocan en Puerto Moreno en el Golfo de Nicoya (ver Figura 1) el área de estudio se puede considerar una sola cuenca, Tempisque-Bebedero, sin embargo, para evitar conflictos con la división tradicional de las cuencas en el país se hablará de cuencas en plural. El área de estudio total limita al norte con el Parque Nacional Guanacaste, bordeando la cordillera de Guanacaste. Se extiende hacia el sur por la margen derecha del río Tempisque bordeando la fila montañosa costeña y las serranías de Nicoya. En la margen izquierda limita con la cordillera de Guanacaste y bordeando la cordillera de Tilarán.

La región Pacífico Norte tiene un régimen climático tropical seco. El promedio anual de temperatura es de 27,4°C; marzo es el mes más caliente (en promedio de 30°C). Los meses con temperatura mínima, oscilan entre setiembre y diciembre (en promedio de 24°C). La precipitación promedio anual ronda los 1.800 mm, típicamente la época lluviosa se produce entre los meses de mayo a noviembre y la época seca entre diciembre y abril. La primera máxima se registra

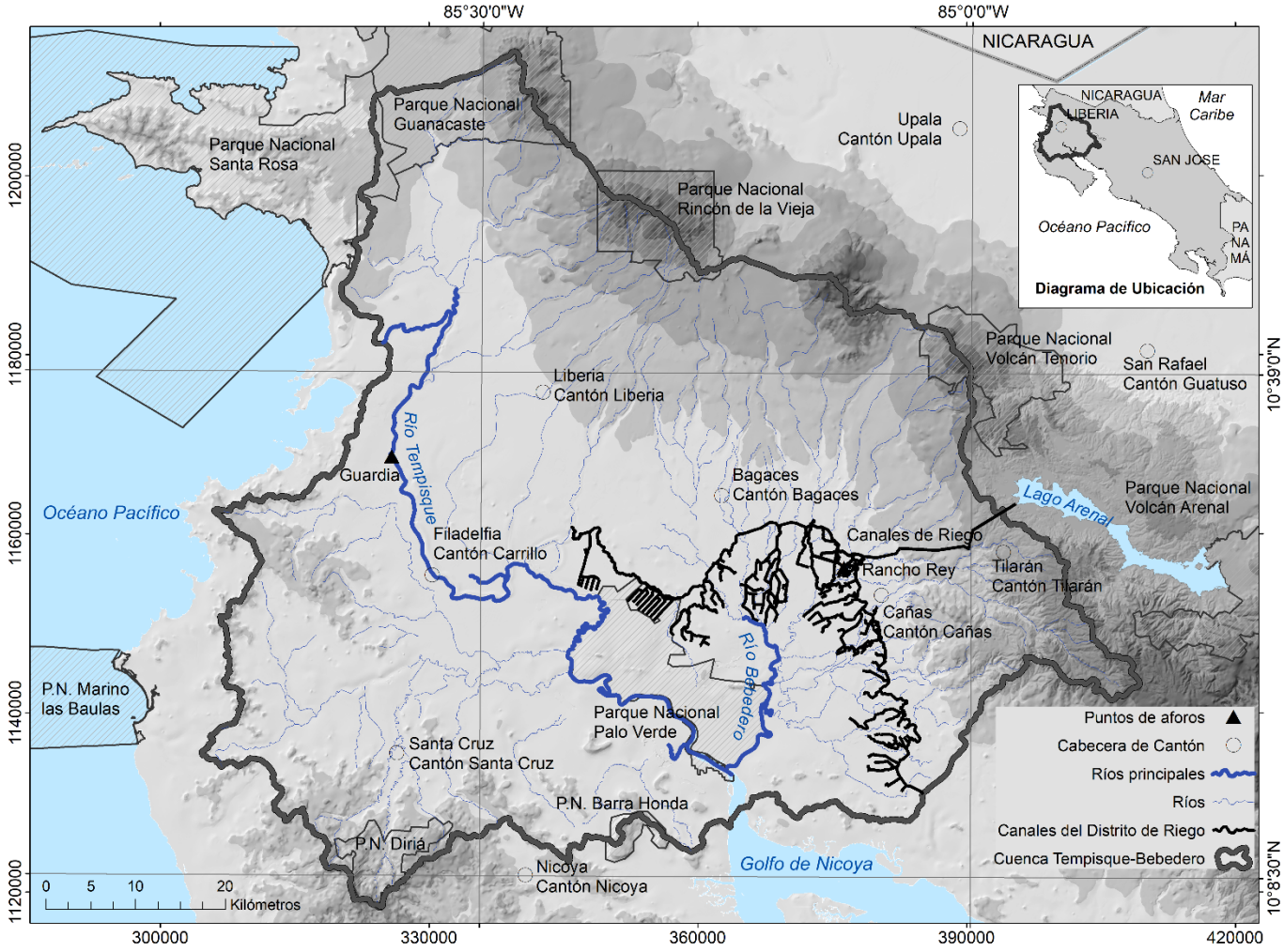


Figura 1: Área de Estudio, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica.

en mayo o junio seguido de unas semanas con poca lluvia en julio, conocido como el veranillo de San Juan, mientras que la máxima precipitación se registra en el mes de octubre. Las variaciones interanuales de las precipitaciones se asocian al movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), fenómeno responsable de las lluvias en la Región Pacífico norte. Aquellos sectores que poseen la mayor precipitación se ubican en los sectores de mayor altitud debido al efecto orográfico (Instituto Meteorológico Nacional, 2008).

El área de estudio cubre los cantones Liberia, Nicoya, Santa Cruz, Bagaces, Carrillo, Cañas, Abangares, La Cruz y Tilarán. Como se muestra en la Cuadro 1, la población total de estos cantones es de 290.596,00 personas con un promedio de densidad de población de 34,78 habitantes por $km^2$. El total de viviendas ocupadas es de 82.249,00 y el promedio de ocupantes por vivienda de 3,55. La población económicamente activa labora principalmente en el sector terciario (64.97%).

Cuadro 1: Indicadores poblacionales para los cantones en las cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica, 2011

| Cantones | Superficie (km2) | Población total | Viviendas individuales ocupadas | Densidad de población (hab/$km^2$) | Promedio | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Ocupantes | Población ocupada sector primario | Población ocupada sector secundario | Población ocupada sector terciario |
| Liberia | 1.436,50 | 62.987 | 16.577 | 44 | 3,75 | 8,4 | 13 | 78,6 |
| Nicoya | 1.333,70 | 50.825 | 15.038 | 38 | 3,38 | 16,9 | 14,5 | 68,6 |
| Santa Cruz | 1.312,30 | 55.104 | 16.645 | 42 | 3,31 | 12,2 | 10,9 | 76,9 |
| Bagaces | 1.273,50 | 19.536 | 5.615 | 15 | 3,48 | 29,2 | 12,6 | 58,2 |
| Carrillo | 577,50 | 37.122 | 10.141 | 64 | 3,65 | 13,3 | 16 | 70,6 |
| Cañas | 682,20 | 26.201 | 7.172 | 38 | 3,65 | 24,9 | 13,8 | 61,3 |
| Abangares | 675,80 | 18.03 | 5.311 | 27 | 3,39 | 24,2 | 23,8 | 51,9 |
| La Cruz | 1.383,90 | 19.181 | 4.732 | 14 | 4,05 | 37,2 | 9,5 | 53,3 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tilarán | 638,4 | 19.640 | 6.018 | 31 | 3,26 | 20 | 14,8 | 65 |
| Total | 9.313,80 | 290.596,00 | 87.249,00 | 34,78 | 3,55 | 20,69 | 14,32 | 64,97 |
| Fuente: ("Indicadores cantonales - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2000 y 2011", 2013) | | | | | | | | |

A principios del siglo XX, el río Tempisque se utilizaba para el cabotaje con fines comerciales ya que se daba una importante explotación y comercialización de madera. El caudal del río era tal, que en 1939 a solicitud de los pobladores del cantón de Filadelfia, iniciaron los trámites para la construcción de defensas de concreto contra las inundaciones del río Tempisque (Pizarro-Méndez, 2009). Una de las últimas inundaciones de importancia, ocurrieron en el año 1999 por el Huracán Mitch, 2016 por el Huracán Otto y en el 2017 por el huracán Nate.

La cuenca del río Tempisque se caracteriza por una vegetación de bosque tropical seco que fue modificada primeramente por los pobladores precolombinos a través de la agricultura itinerante. Más tarde, durante el periodo colonial, predominaban las haciendas ganaderas, y para inicios del siglo XX era importante la extracción maderera (Pizarro-Méndez, 2009). A partir de 1978, con el Proyecto de Riego Arenal-Tempisque surgió la agricultura intensiva, sobre todo de arroz, caña de azúcar y melón (Coto, 2001). En la actualidad al menos un 27% del área de estudio se utiliza para la producción agrícola, entre los cuales resaltan los cultivos de caña de azúcar, el arroz y el melón (Birkel et al., 2017). Otra de las actividades importantes es el turismo, que depende de los ríos por su valor paisajístico y por su función para mantener los ecosistemas ripiaros y de manglar, que son atractivos de la zona.

El trasvase de agua de la vertiente Caribe es producto del proyecto hidroeléctrico Arenal que se abastece del Lago Arenal, cuerpo de agua que se agrandó considerablemente para funcionar como reservorio. El agua del Lago Arenal pasa por tres casas de máquinas, con lo que se produce energía eléctrica para diferentes sitios del país. La primera máquina se ubica en Arenal, la segunda en Corobicí y la tercera en Sandillal, lo que conforma el complejo ARCOSA, construido y administrado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) desde 1974 (Rodríguez Vega,

2004). El agua residual de las turbinas se canaliza a través del Distrito de Riego, administrado por el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) o se deposita en el río. El agua de riego se utiliza en la producción agropecuaria sobre todo en los meses secos.

### 1.3. Planteamiento del problema

La variabilidad climática de las cuencas Tempisque y Bebedero causa sequías e inundaciones periódicas. La solución de mitigación adoptada el siglo pasado para enfrentar las inundaciones fue la construcción de diques, por ejemplo, en Filadelfia; mientras que la falta de agua para la producción agrícola se mitigó con el trasvase de agua desde la vertiente Caribe a través del Distrito de Riego Arenal-Tempisque. Ahora hay nuevos retos que enfrentar como la variabilidad climática, que exacerbada por el cambio climático podría contribuir a periodos de sequía más extensos. Adicionalmente, no hay certeza de sí bajo el actual régimen de concesiones de agua, es posible abastecer a todos los sectores ante diferentes escenarios climáticos y de manejo. Ambas situaciones confrontadas, actúan en materia ambiental, económica y social promoviendo el deterioro ambiental de las cuencas Tempisque y Bebedero, y generando preocupación entre las personas e industrias.

Para el adecuado manejo de los recursos se necesita en primera instancia cuantificar la disponibilidad del recurso para luego definir cómo distribuirlo. Es por ello que se necesita una herramienta que permita cuantificar la oferta de agua y contrastarlo con la demanda para evaluar si el consumo de agua es sustentable en las cuencas Tempisque y Bebedero. En específico, las preguntas a responder son: ¿Cuál es el balance hídrico? ¿Cuánta y para qué usos se extrae el agua? ¿Existe sobre extracción? ¿Qué pasaría si no existiese el trasvase de agua proveniente del Lago Arenal o aumentara la población?

### 1.4. Justificación

En esta investigación se utilizará el modelo matemático WEAP como herramienta técnica para simular la cantidad de agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero. Así como incorporar la parte de demandas por diferentes sectores, plantear diversos escenarios climáticos, demoFiguras y de infraestructura. Con el fin de evaluar de forma integral si el uso del agua superficial en las cuencas Tempisque y Bebedero es sustentable. Los resultados serán de utilidad para la toma de decisiones en la gestión del agua, sobre todo porque estas cuencas son propensas a una alta variabilidad climática.

En esta investigación, la sequía, es de espacial interés al ser una condición hidrometeorológica que implica grandes retos para la gestión del agua. Ante la sequía el agua se vuelve heterogéneamente escasa, inclusive dentro de una misma cuenca, pero de igual importancia para el uso doméstico, la agroindustria, la generación hidroeléctrica, el turismo y los ecosistemas de manglar. El Parque Nacional Palo Verde resalta en importancia al ser un sitio RAMSAR. Bajo condiciones de escases de agua la competencia entre los sectores aumenta y los problemas que generan la mala gestión se vuelven evidentes y polémicos. Esta situación quedó registrada por los periódicos nacionales El Tico Times (Reploge & García, 2017) y el Semanario Universidad (Mora Rojas, 2016) donde evidencian la extracción desmesurada del agua del río Tempisque, consecuencia de tomas ilegales y  a la sobre extracción de dueños de concesiones.

Precisamente, en el 2014 el gobierno creó el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG) como respuesta a la sequía del 2014-2015. El PIAAG es hasta ahora el plan en materia hídrica más integral para la provincia Guanacaste. Tiene como ejes “la seguridad hídrica para las comunidades, la seguridad alimentaria, las necesidades de agua para los ecosistemas y la gestión del aprovechamiento sostenible” (Ministerio de Comunicación, 2015), sin embargo tiene dudosa continuidad una vez que termine el gobierno del presidente Luis Guillermo Solís. Los problemas en cuanto a la gestión del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero no son novedad, ya desde el 2003 se señaló la necesidad de “definir los límites de desarrollo de la cuenca, establecer un plan de uso del agua que contemple la oferta versus

demanda para cada sector, un inventario y control de flujos de concesiones, así como monitoreo de cantidad y calidad de agua" (Jiménez & González, 2003) la mayoría de tareas aún sin cumplir.

En esta investigación se realizará un estudio de la oferta versus la demanda de agua haciendo uso del programa WEAP. El motivo para utilizar este programa es que está especializado la contabilidad del balance hídrico más allá de la modelación hidrológica de la relación entre precipitación-escorrentía, ya que permite incorporar una amplia variedad de condiciones referentes al uso y manejo del recurso hídrico. La capacidad que tiene este programa para integrar en una sola herramienta el cálculo de balance hídrico, más simular las demandas, sistemas de transmisión, reservorios, requerimientos ecosistémicos, entre otros, es único. Además, una vez simulado el escenario real de la cuenca se pueden evaluar diferentes escenarios hipotéticos basados en la pregunta ¿Qué pasaría sí ...?

Para las cuencas Tempisque y Bebedero la atención se centrará en modelar el flujo superficial de ambos ríos e incorporar las concesiones sectoriales de agua superficial registradas ante la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía, para evaluar si existe una sobre concesión. Adicionalmente se evaluarán los siguientes escenarios: disminución de las precipitaciones, aumento del consumo de agua producto del crecimiento demoFigura y agrícola, así como el efecto del trasvase de agua de la vertiente Caribe a través del Distrito de Riego Arenal-Tempisque; que es posible gracias a la generación de hidroelectricidad del proyecto Arenal.

La aplicación del modelo WEAP en las cuencas Tempisque y Bebedero, representaría un precedente ya que no se encontró una publicación donde se haya utilizado este programa en Costa Rica. El uso de este programa es internacional y está respaldado por la Organización de las Naciones Unidas. En América Latina y el Caribe se ha utilizado en: Chile (Bonelli, Vicuña, Meza, Gironás, & Barton, 2014; Henriquez Dole, Gironas, & Vicuna, 2015; Linsen, 2009; Linsen & Rodríguez, 2010; Meza, Vicuña, Jelinek, Bustos, & Bonelli, 2014; Vicuña, Garreaud, &

McPhee, 2011; Vicuña, McPhee, & Garreaud, 2012; Vicuña, Meza, Jelinek, Bustos, & Bonelli, 2010; Wagnitz, Núñez, & Ribbe, 2014); México (Ingol-Blanco & McKinney, 2013; Sandoval-Solis, McKinney, Teasley, & Patino-Gomez, 2011); Brasil (Linsen, 2009; Linsen & Rodríguez, 2010); Perú (Condezo-Montes, Mejía-Marcacuzco, & Ingol-Blanco, 2016; T. Condom et al., 2011; Thomas Condom et al., 2012; Purkey & Escobar, 2009; Vergara, Deeb, & Leino, 2011; Yi & Sandoval Solis, 2015; Yi, Sandoval Solis, & Bombardelli, 2014); Colombia (Ospina Noreña, Gay Garcia, Conde, Magaña, & Sánchez Torres Esqueda, 2009); Guatemala (Harris, 2007) y República Dominicana (FitzHugh, 2006). De modo que sería una oportunidad para aportar desde la Geografía con información cuantitativa y con estándares internacionales, para el manejo del recurso hídrico. Además, con la ejecución del modelo WEAP existiría un gran potencial de generar las herramientas necesarias para impulsar la creación de un plan de manejo del recurso hídrico para las cuencas Tempisque y Bebedero.

### 1.5. Objetivo General

Evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero con el fin de generar insumos para el manejo del agua mediante la aplicación del modelo Water Evaluation and Planning System, WEAP.

### 1.6. Objetivos Específicos

- Cuantificar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP
- Estimar si hay una sobre concesión del agua superficial en las cuencas del Tempisque y Bebedero
- Evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP

### 1.7. Antecedentes

En la sección anterior se plantea la incertidumbre de una sobre explotación de los ríos como la principal problemática a abordar. En esta sección se hace una breve reseña sobre el

panorama ilustrado en el capítulo cuatro “Armonía con la Naturaleza” del XXII Estado de la Nación (2016) en el tema de gobernanza del agua en Costa Rica. Se repasan los proyectos de estado en las cuencas del Tempisque y Bebedero en el siglo XX y XXI. Finalmente se hace un repaso sobre los modelos hidrológicos aplicados, algunos estudios en Geografía y publicaciones internacionales sobre el recurso hídrico en el área de estudio.

### 1.7.1. Estado del marco legal sobre agua en Costa Rica

El capítulo cuatro “Armonía con la Naturaleza” del XXII Estado de la Nación resalta que la legislación sobre recurso hídrico existe desde el año 1884 y el tema hídrico acapara más de la mitad de las leyes ambientales en el país, producidas entre 1951 y 1982. Con respecto a los instrumentos legales 102 se aprobaron entre 1982-2015. Más de la mitad de los artículos en legislación hídrica priorizan el uso público sobre el privado y algunos de los elementos para la gestión del agua están regulados en las leyes más antiguas. La gran mayoría de la normativa está dirigida a la regulación o a la promoción de proyectos en materia hídrica, tradicionalmente dirigida a temas de infraestructura. En cuanto a la contaminación del agua y las sanciones respectivas, la legislación es abundante, pero se aplica poco y existe desactualización en materia de tarifas e impuestos asociados a las concesiones.

Algunos de los vacíos identificados en el XXII Estado de la Nación con respecto la normativa vigente sobre agua fueron: la ausencia de una instancia de coordinación institucional; la inexistencia de incentivos para el desarrollo sustentable; la carencia de instrumentos para la planificación, uso racional y sustentable y conservación del agua; la falta de canales de comunicación para la participación ciudadana en temas de gobernanza; reiteración y desorden en las prohibiciones y sanciones; falta de evaluación sobre la implementación de compromisos internacionales y la necesidad de fortalecer el marco jurídico de las ASADAS. Finalmente, en lo referente a la normativa y legislación hídrica, en la normativa vigente no queda explícito si el derecho al acceso al agua para uso humano y doméstico es un tema constitucional o no.

En cuanto al estado del recurso hídrico, en términos generales, el XXII Estado de la Nación, señala que el 99,4% de la población tuvo acceso a servicios de suministro de agua por tubería, pero existen preocupaciones en cuanto a la disponibilidad y calidad del agua ya que el país no cuenta con sistemas efectivos para controlar la contaminación superficial y subterránea de los cuerpos de agua. No sobra resaltar que la Asamblea General de la ONU ha reconocido los derechos humanos al agua y al saneamiento. Ante el debate público sobre la ley de aguas en Costa Rica, es importante asegurar el derecho humano al agua y que se procure enmendar los vacíos legales vigentes, para que a futuro la gestión sobre agua sea más efectiva.

### 1.7.2. Manejo del agua en las cuencas Tempisque y Bebedero desde finales del siglo XX hasta la actualidad

Desde el 2005 hay antecedentes que llaman la atención con respecto a que la cuenca del río Tempisque muestra signos de conflictividad social y deterioro ambiental a raíz de un uso no planificado del agua (Jiménez-Ramón, Calvo-Alvarado, González-Jiménez, Pizarro, & Jiménez, 2005), situación que se mantiene en la actualidad y que se agrava con futuros escenarios de variabilidad climática. La cuenca del río Tempisque tiene valor ambiental por sus ecosistemas de pantanos, marismas, manglares y bosques secos tropicales, por lo que desde 1998 la Estación Biológica Palo Verde realiza esfuerzos para mantener la integridad ecológica de ese Parque Nacional Palo Verde (Jiménez & González, 2003). Por otra parte, las estrategias de desarrollo en la provincia de Guanacaste, desde el año 1970, se enfocan en la industrialización de la agricultura y a partir del año 2000 el turismo masivo; ambas tendencias se mantienen.

Las dos grandes obras propuestas a mediados de la década de 1970, construidas en los años setenta y ochenta son, el complejo de generación hidroeléctrica Arenal-Corobicí-Sandillal (ARCOSA) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para el abastecimiento del Sistema Eléctrico Nacional y el Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT) que se nutre

de las aguas que descarta el complejo ARCOSA. La Central Hidroeléctrica Arenal constituye el primer aprovechamiento del complejo ARCOSA, se ubica en la división entre la vertiente del Caribe y la vertiente del Pacífico. A través del DRAT, se trasvasa agua de la vertiente Caribe hacia las cuencas del Tempisque y Bebedero. Esto permite regar los cultivos intensivos durante la época seca en el Pacífico.

El Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT) cubre una extensión aproximada de 45.000 hectáreas de los cuales 30.000 son regables. Tiene como objetivo mejorar el nivel de vida de los habitantes de la zona incrementando la producción de alimentos básicos y de exportación (Programa en Investigación en Desarrollo Economía y Ambiente, División de Investigación y Desarrollo, 2014) pero quienes hacen mayor uso del sistema son los grandes productores.

Recientemente, como consecuencia de la grave sequía de los años 2014-2015 y de conflictos anteriores, el gobierno de Solís puso en marcha en el 2014, el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG). Este proyecto tiene como ejes "la seguridad hídrica para las comunidades, la seguridad alimentaria, las necesidades de agua para los ecosistemas y la gestión del aprovechamiento sostenible" (Ministerio de Comunicación, 2015). El plan consta de cuatro acciones específicas de gestión del recurso hídrico que son: el abastecimiento de agua para la margen derecha del río Tempisque y comunidades costeras a través del embalse en río Piedras; un Sistema Nacional de Monitoreo para Aguas Subterráneas en Tiempo Real; una planta desalinizadora privada y la regionalización de la gestión de Dirección de Aguas. Adicionalmente, el plan contempla ayudar a los productores agropecuarios y pesqueros de la Región Chorotega a través de entregas de materiales para la producción y la construcción de centros de distribución de productos (Ministerio de Comunicación, 2015).

Entre mayo del 2014 y julio del 2015, según el Ministerio de Comunicación, se habilitaron pozos en Liberia y tanques de abastecimiento; se inauguraron acueductos; se puso a

funcionar las plantas de tratamiento de arsénico en Bebedero de Cañas, Falconia y Montenegro de Bagaces; y se trabaja en el tratamiento de las aguas del embalse Sardillal. El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas y Avenamiento (SENARA) construye una ampliación en el Canal Sur del Distrito de Riego para irrigar 8.800 hectáreas entre el río Cañas y la quebrada Piñuela en Colorado de Abangares. Paralelamente, como respuesta a las demandas del sector agropecuario y la fuerte crítica por la sobre concesión de la cuenca del río Tempisque se hacen estudios para hacer un embalse en el río Enmedio, afluente del río Piedras para el riego total de 1.425 hectáreas (Presidencia, 2016).

Es evidente que el Estado hace y ha realizado una gran inversión en materia hídrica en las cuencas del Tempisque y Bebedero a favor de sector agropecuario sin embargo no hay certeza del impacto que estos proyectos tiene en los demás usuarios del agua en esas cuencas y queda la duda de si estos esfuerzos son sustentables a largo plazo.

### 1.7.3. Estudios sobre la cuenca del río Tempisque

Los estudios de tesis más antiguos en la Universidad de Costa Rica (UCR), empiezan en la década de 1970 motivo de los proyectos de Estado con relación al Distrito Arenal-Tempisque, donde sobre salen los estudios de suelo. Por parte de la UCR, la modelación hidrológica en la cuenca del Tempisque o Bebedero ha sido realizada por la escuela de Ingeniería Civil. Recientemente el Tecnológico Nacional de Costa Rica, La Universidad Nacional junto con la Universidad Estatal a distancia y la Universidad de Georgia, han conducido investigaciones en el área geográfica de interés y sobre temas relacionados a los que esta investigación desarrollará.

Con respecto a la modelación hidrológica la tesis “Evaluación de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Tempisque” (Somarriba, 2003) desarrolla un modelo ajustado al original de Thornthwaite y Mather de 1957. Este modelo ajustado fue utilizado posteriormente en dos tesis. Una sobre modelado del balance hídrico basado en cambios de uso del suelo en la cuenca del río Abangares (Umaña Salas, 2007). El segundo sobre escorrentía superficial de la cuenca alta del río Tempisque ante diferentes escenarios de cambio climático (Leitón-Montero, 2011)

que adicionalmente utiliza los modelos climáticos globales (MCG) para evaluar los distintos escenarios de cambio climático. Todos estos trabajos presentaron dificultadas con la disponibilidad de datos meteorológicos, ya que las estaciones suelen presentar vacíos de información.

En el 2015, el Tecnológico Nacional generó un estudio sobre los escenarios climáticos y los caudales medios de la cuenca del río Tempisque, en relación con el uso del suelo, utilizando el modelo Hydrological Land Use Change (Calvo-Alvarado & Calvo-Obando, 2015). En el 2016 la Universidad de Georgia junto con aportes de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, bajo el programa Develop de la NASA, calcularon el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés) y Índice de Condiciones de Sequía Escalonada (SDCI, por sus siglas en inglés) a partir de imágenes satelitales de tipo re-análisis y datos de estaciones meteorológicas para monitorear la sequía y el balance hídrico. El proyecto pretendía dotar de herramientas técnicas al SENARA para el monitoreo climático y la gestión del agua (Durham et al., 2016) pero presentó dificultades en la etapa de calibración.

En la Escuela Geografía se han realizado tres tesis de licenciatura que tienen como área de estudio la cuenca del río Tempisque. La primera tesis es sobre el uso del suelo en la I etapa del Distrito de Riego (Corella-Rivers, 1979). Años después, se publica una tesis sobre el impacto socioeconómico de la primera etapa del proyecto de riego Arenal-Tempisque (Wong, 1993) que a través de métodos cualitativos tenía como objetivo determinar el impacto socioeconómico para los beneficiarios del proyecto. Como parte de las conclusiones se señala que, con el proyecto de riego el tipo de producción agrícola pasa de ser extensiva a intensiva y que ocurría una desigual distribución del agua para riego debido a una mala administración de las instituciones gubernamentales, sin embargo, los beneficiarios consideraban que el proyecto tenía un impacto positivo en su condición socioeconómica. La última tesis identifica los impactos socioeconómicos y ambientales de la construcción del puente sobre el río Tempisque en Nicoya (Bermúdez Morales, Rodríguez Alvarado, & Vargas Pineda, 2002) trabajo en el que se resalta el valor de

los ecosistemas de manglar y la estrecha relación de las personas con el río Tempisque, no solo por razones económicas y comerciales, sino porque el río es un elemento fundamental del territorio guanacasteco.

En el 2008 el Banco Interamericano de Desarrollo financió la elaboración de un balance hídrico que considera las demandas para 15 cuencas utilizando la metodología de UNESCO (2006). Para calcular la oferta esta metodología combina una serie de variables que dio como resultado una oferta potencial anual media de 8052 $hm^3$/año para las cuencas Tempisque y Bebedero en conjunto. En este valor se incluye la importación de agua de otras cuencas y los retornos de los diferentes usos, estos dos valores suman 5836,22 $hm^3$/año, según los datos en el informe (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008). El inconveniente que tiene esta investigación es que no especifica el periodo de los datos utilizados para realizar los cálculos y esto dificulta realizar comparaciones.

La tesis doctoral de (Guzmán-Arias, 2013) "Base para la Planificación del Recurso Hídrico Superficial en la Cuenca Alta y Media del Río Tempisque, Costa Rica", es la única que aborda tanto la disponibilidad de agua como la demanda. En esta tesis se hace un repaso sobre la planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe, así como Costa Rica. Se realiza una recolección de datos de caudales registrados, usos y concesiones para la cuenca Alta del Río Tempisque. Se estima el balance hídrico anual, a partir de fuentes secundarias y se restan los caudales de uso con lo que se concluye que "la oferta del recurso hídrico es insuficiente para satisfacer la demanda según diferentes usuarios y concesionarios" (Guzmán-Arias, 2013). Finalmente se realiza propuesta de planificación del recurso hídrico superficial para la cuenca baja del río Tempisque; en este caso la disponibilidad se estimó tomando datos de otro estudio.

Una de las más recientes publicaciones se enfoca en la conexión que existe entre el agua, la producción de energía y la producción de alimento en las cuencas Tempisque y Bebedero (Birkel et al., 2017). Tiene un valor importante porque explica en detalle la variabilidad climática natural de las cuencas Tempisque y Bebedero, resaltando las variaciones de precipitación interanuales,

así como los periódicos eventos de estrés hídrico e inundación. Precisamente, la publicación resalta que considerando la relevancia de la producción agropecuaria y energética que se lleva a cabo en las cuencas Tempisque y Bebedero las variaciones en las precipitaciones, representan un riesgo para Guanacaste por el impacto socioeconómico que conlleva.

La más reciente publicación elabora un Indicador de recarga de agua subterránea como herramienta para los tomadores de decisiones para aumentar la resiliencia socio-hidrológica a la sequía estacional (Hund, Allen, Morillas & Johnson, 2018). En el acuífero de Potrero y Caimital ubicados en Nicoya Guanacaste investigadores de la Universidad de "British Colombia" desarrollaron un indicador de recarga de agua subterránea como herramienta para los tomadores de decisiones para aumentar la resiliencia socio-hidrológica a la sequía estacional. Para esta investigación realizaron monitoreo de ríos y acuíferos por dos años y en combinación con datos adicionales modelaron la recarga de acuíferos entre el 2005 y 2016, utilizaron el programa WEAP. Esto les permitió caracterizar la relación entre la precipitación y la recarga de acuíferos, permitiendo estimar la recarga durante la época lluviosa a partir de datos actuales. Además, con el indicador desarrollado los gestores del agua pueden evaluar si en ese año la recarga disminuirá antes de que termine la época lluviosa. Con esta información a disposición se pueden desencadenar medidas de adaptación a corto plazo que permitan proteger el agua para la recarga en la época lluviosa cuando todavía se dispone de agua superficial. Para lograr esto último discuten que sería necesario contar con un plan de contingencia en el que se considera tomar medidas de control de la demanda que procure la conservación del agua, así como considerar alternativas de suministro como el agua superficial o agua llovida (Hund, Allen, Morillas & Johnson, 2018)

En conclusión, el manejo y legislación sobre materia hídrica en Costa Rica tiene un gran camino que recorrer, sobre todo en lo que respecta a la claridad y efectividad de la legislación y la comunicación entre las instituciones del Estado. En las cuencas Tempisque y Bebedero, no existe un plan de manejo del recurso hídrico, aunque se reconoce la necesidad de regular la extracción

de agua para procurar un desarrollo sustentable. Los modelos aplicados hasta ahora solo cubren secciones específicas del río Tempisque y son sumamente especializados en temas hídricos. De modo que, la aplicación de un modelo para la totalidad de las cuencas Tempisque y Bebedero, es necesario, sumado al valor agregado de que WEAP permite realizar un análisis integrando las demandas.

## II. Capítulo: Marco Conceptual

En la sección anterior se hace en recuento sobre el manejo del agua en Costa Rica y de las cuencas Tempisque y Bebedero. Se plantea que la aplicación del modelo WEAP es una novedad y una necesidad en el área es estudio. Ahora se revisarán algunos conceptos como la interpolación espacial, modelos hidrológicos precipitación-escorrentía, el cálculo de balance hídrico a través del método Humedad del Suelo, la calibración y eficiencia del modelo. Por último, se plantea lo que se entiende por sustentabilidad del recurso hídrico.

### 2.1. Método de Interpolación: Distancia Inversa Ponderada

El método de interpolación Distancia Inversa Ponderada, más conocido como IDW por sus siglas en inglés, es un método determinista local. Esto quiere decir que calcula superficies a partir de similitudes en los puntos de medición y es local porque calcula los predictores usando puntos dentro de un radio de cercanía, en lugar de usar todo el conjunto de datos. Además, el método IDW está dentro de la categoría de métodos exactos ya que para la superficie resultante predice un valor idéntico al medido en el punto de medición. Este método presupone que aquellas cosas ubicadas más cerca una de las otra, se asemejan más que aquellas ubicadas a mayor distancia. De modo que, cada punto de medición tiene una influencia local que disminuye con la distancia (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2003).

Para predecir un valor en una celda sin datos, el algoritmo usará los datos medidos alrededor de la celda a predecir, de este modo, los valores más cercanos a la celda a predecir tendrán más

influencia o peso en el valor a predecir que aquellos más lejanos. Entre más cerca al punto de medición, dentro del radio, mayor es el peso relativo en la ecuación:

Ecuación 1: Interpolación inverso de la distancia

$$T(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i T(s_i)$$

Donde $T(s_0)$ es el valor estimado por celda $s_0$, N es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación, $\lambda_i$ es el peso dado al valor observado $T(s_i)$ en las cercanías del valor $s_0$.

### 2.2. Modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía

Los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía se clasifican de forma básica en dos tipos, los distribuidos y los agregados. Los modelos distribuidos discretizan la cuenca en una grilla cuadricular y establece variables representadas en promedios. Estas variables están representadas en la grilla y las ecuaciones se resuelven cuadro a cuadro. Los modelos agregados tratan la cuenca como una sola unidad con variables establecidas que representan porcentajes a lo largo del área (Beven, 2012). Los modelos semi-distribuidos calculan el balance hídrico y la contribución de flujos, por áreas o sub-cuencas separadas que son consideradas homogéneas entre ellas. El modelo WEAP se considera un modelo semi-distribuido conceptual. Conceptual quiere decir que el modelo consideran leyes físicas pero de forma sumamente simplificada, estas actúan sobre las variables de entrada y generan los resultados (Xu, 2002).

### 2.3. Método de simulación en WEAP: Humedad del Suelo

WEAP cuanta con cinco métodos a escoger para la simulación de procesos como la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración y el riego. Los métodos son: demandas exclusivas de irrigación (coeficiente simplificado), precipitación-escorrentía (coeficiente simple), precipitación-escorrentía (humedad del suelo), MABIA y Crecimiento de plantas (PGM, por sus siglas en inglés) (Stockholm Enviromente Institute SIE., 2015). El método que se utilizará en esta investigación es el de humedad del suelo porque es el más robusto en la modelación de caudal y no está enfocado en cultivos.

El método de humedad del suelo es unidimensional pero el más complejo dentro de las opciones de WEAP, ya que representa la cuenca en dos capas de suelo. También tienen la capacidad de simular el aporte de flujo por descongelamiento de la nieve, aunque evidentemente en el área de estudio de esta investigación, no aplica. Las dos capas de suelo están representadas por dos compartimentos o baldes. Se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea y percolación profunda para una cuenca. Este método se caracteriza porque se debe especificar la cobertura de la tierra para así simular el efecto que tiene en los procesos hidrológicos (Stockholm Enviromente Institute SIE., 2015).

En seguida se explica el modelo conceptual que divide el suelo en dos compartimentos o baldes. En el primer balde, que representara la parte superior del suelo, se simula la evapotranspiración, la escorrentía, el interflujo superficial y cambios en la humedad del suelo. Mientras en que la parte inferior se simula la circulación del flujo base hacia el río y los cambios en la humedad del suelo (Stockholm Enviromente Institute SIE., 2015). El siguiente diagrama conceptual del método de Humedad del Suelo ejemplifica el esquema de dos compartimentos y las ecuaciones incorporadas.

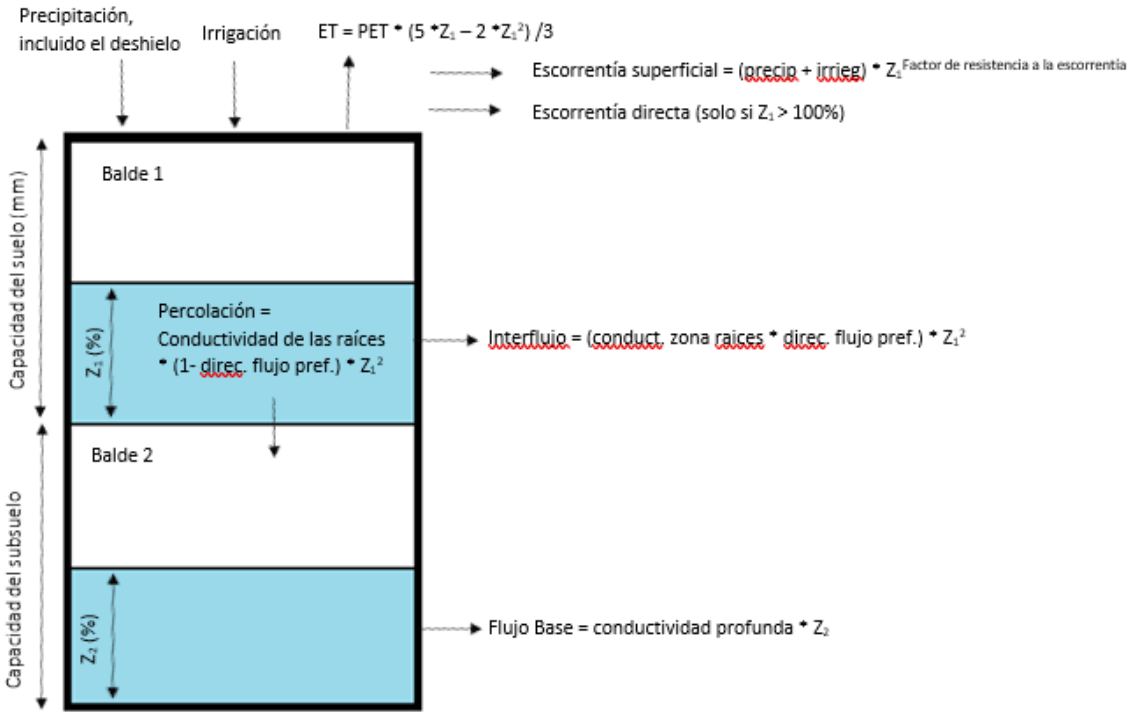


Figura 2: Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo

Elaboración propia con base en (Stockholm Enviromente Institute SIE., 2015)

Las variables meteorológicas que WEAP utiliza son: precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y factor de nubosidad, con excepción de la precipitación, las demás variables se utilizan para calcular la evapotranspiración potencial. Otra de las variables es el área ($km^2$), esta se subdivide por áreas según las categorías de cobertura de la tierra, que sumadas cubren el total de la cuenca. El Kc es el coeficiente de cultivo para cada tipo de cobertura, usualmente se toman como referencia variaciones mensuales basadas en referencias bibliográficas.

El método de humedad del suelo cuenta con 8 parámetros, esto quiere decir que son variables que se ajustan en el proceso de calibración. El primer y segundo parámetro se denominan: la capacidad para contener agua del suelo y subsuelo (mm), SWc y DWc, respectivamente por sus

siglas en inglés en otras palabras, la altura del primer balde y segundo balde (ver figura 1). La capacidad de contención del suelo se define con respecto a la altura de las raíces según el tipo de cobertura, usualmente el valor se determina con referencia a bibliografía. La capacidad de contención del subsuelo, en otras palabras, la altura del balde inferior, se puede definir con respecto referencias bibliográficas que se refieran a la profundidad de pozos.

El tercer parámetro se denomina el factor de resistencia a la escorrentía (RRf, por sus siglas en inglés), en una escala de 1 a 1000 que se refiere al agua que se escapa del primer balde o que fluye como flujo superficial. El cuarto parámetro se denomina la conductividad de la zona de las raíces (RZc, por sus siglas en inglés) y hace referencia al agua, conceptualmente hablando, que percola del primer al segundo balde cuando el balde superior está saturado, en mm/mes. El tercer y cuarto parámetro se definen separadamente para cada tipo de cobertura, los valores introducidos no se derivan de datos reales, sino que simulan el efecto que cada cobertura tendría en el movimiento del agua.

Por ejemplo, para la resistencia a la escorrentía se asume que el bosque es la cobertura que causa más resistencia seguido del pasto y la agricultura. En el caso de la conductividad de la zona de las raíces se considera la influencia de las raíces para transportar agua hacia el subsuelo. En este caso se asume que el bosque es la cobertura que transporta más agua al subsuelo, seguido del pasto y la agricultura. Debido a que el factor de resistencia a la escorrentía y la conductividad de la zona de las raíces son valores conceptuales, estos se definen de modo aleatorio, y se ajustan dependiendo de la respuesta a la calibración visual.

El quinto parámetro se llama conductividad subterránea (Dc, por sus siglas en inglés) se refiere a la tasa de conductividad de agua (mm/mes) en la capa inferior cuando el balde está saturado, por tanto, simula el flujo base. El secto parámetro se llama la dirección preferida del flujo (PFd, por sus siglas en inglés), definido en un rango de 0 a 1, que hace referencia al grado de inclinación que tiene el balde y se define para cada tipo de cobertura. El grado de inclinación define cuánta agua va al balde superior para la escorrentía superficial o al balde inferior para la

infiltración. Eso quiere decir que el parámetro dirección preferida de flujo, se encarga de proveer agua al sexto parámetro, conductividad de la zona de las raíces. El séptimo y octavo parámetro son $Z_1$ y $Z_2$ (%) son el valor inicial del balde superior e inferior, respectivamente. El $Z_1$ está dividido por cobertura mientras que el $Z_2$ es independiente de la cobertura.

### 2.4. Calibración, sensibilidad de parámetros y eficiencia

La calibración de un modelo se compone de una estimación general de mejor ajuste, seguido de un análisis de sensibilidad de parámetros para afinar la calibración. Simultáneamente estos procesos se validan con una prueba cuantitativa que indique el rendimiento general del modelo. La calibración es el proceso de ajuste de parámetros de un modelo para lograr que, en este caso, el caudal simulado se asemeje al observado por el fluviógrafo. La calibración requiere un análisis de sensibilidad de parámetros para determinar qué cambios en qué parámetros afectan en mayor medida el resultado del caudal simulado; esto se puede hacer de forma manual o computarizada utilizando un algoritmo de optimización. Sin embargo, toda calibración y subsiguientes predicciones está sujeta incertidumbre, que a la vez resulta en que ningún modelo de precipitación-escorrentía es cien por ciento fidedigno en reflejar los procesos naturales que generan escorrentía (Beven, 2012).

El análisis de sensibilidad se puede hacer con una valoración visual o con diferentes métodos cuantitativos que miden estadísticamente el mejor ajuste. En el análisis de sensibilidad cuantitativo se explora la totalidad del rango de valores del parámetro para encontrar un pico de mejor ajuste. Esto se hace utilizando un Figura que contenga en el eje vertical el rango explorado y en el eje horizontal los resultados del indicador estadístico de mejor ajuste. En el Figura se busca el punto más alto de la superficie del parámetro para obtener el valor óptimo. Puede suceder que un parámetro sea insensible, esto ocurre cuando no se identifica un efecto significativo en el modelo al alterar los valores del parámetro; lo que resultaría en un Figura plano. Debido a que las simulaciones son el resultado de la interacción entre los diferentes parámetros del modelo, es usual que la sensibilidad varíe dentro de la superficie de respuesta del parámetro.

De modo que las sensibilidades se suelen evaluar dentro un rango estimado de mejor ajuste resultado de un proceso de calibración preliminar; esto se denomina el óptimo local (Beven, 2012).

Existe una variedad de métodos para cuantificar la eficiencia del mejor ajuste, sin embargo, los de mayor uso se basan en la suma del error cuadrado a la varianza del error. El método más utilizado es el (Nash & Sutcliffe, 1970), es un estadístico normalizado que determina la magnitud de la varianza del error contra la varianza de los datos observados. La ecuación del NSE (por sus siglas en inglés) es

Ecuación 2: Nash & Sutcliffe

$$\mathrm{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(Y_t^{obs} - Y_t^{sim}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(Y_t^{obs} - Y^{prom}\right)^2}\right]$$

Donde $Y_t^{obs}$ el valor de variable observada a un tiempo de cambio *t*, $Y_t^{sim}$ es el valor simulado de la variable y $Y^{prom}$ es el promedio de la variable observado y *n* es el número total de observaciones. Este indicador de eficiencia funciona como un coeficiente de determinación, donde 0 indica que modelo hidrológico no es mejor que el promedio de las observaciones para todos los intervalos de tiempo. Los valores negativos indican que el modelo funciona peor que el promedio de las observaciones, o sea inaceptable y 1 es el valor óptimo. El NSE hace énfasis en los picos de caudal, para revertir esto y hacer énfasis en lo mínimos, que son de mayor interés cuando el enfoque está en el caudal mínimo, se usa la versión logarítmica del NSE

Ecuación 3: Versión logarítmica de Nash & Sutcliffe

$$\mathrm{NSE} = 1 - \log\left[\frac{\sum_{t=1}^{n}\left(Y_t^{obs} - Y_t^{sim}\right)^2}{\sum_{t=1}^{n}\left(Y_t^{obs} - Y^{prom}\right)^2}\right]$$

## 2.5. Escenarios en WEAP

El análisis de demandas en WEAP se desglosa según los requerimientos por uso final para un área. Se agregan como nodos de consumo con una línea de transmisión del río al punto de demanda y de ser el caso con una línea de transmisión de regreso para simular el agua que retorna al sistema natural. El formato que requiere WEAP para simular las demandas es una actividad por nivel (ej. número de viviendas, personas o área irrigada) y una tasa de consumo de agua asociada al nivel de actividad (ej. Volumen de consumo anual por persona). Los datos se ingresan para un año, que es la referencia y se puede proyectar mediante el uso de tasas de crecimiento o funciones de interpolación. En esencia el consumo se de agua se calcula multiplicando el nivel de actividad por la tasa de consumo. Es así como WEAP incorpora las actividades antrópicas a un modelo para la planificación del recurso hídrico.

## 2.6. La sustentabilidad del recurso hídrico

Los recursos naturales se denominan bienes o servicios que proporciona la naturaleza sin implicar el uso de mano de obra humana. Se clasifican en renovables o no renovables de acuerdo con la disponibilidad en el espacio y tiempo, la tasa de regeneración y el ritmo de uso. Los recursos renovables son aquellos que tienen un ciclo de regeneración por encima de su extracción, mientras que los no renovables tienen ciclos de regeneración muy por debajo de los ritmos de extracción (Mastrangelo, 2009). El agua se clasifica como un recurso no renovable ya que su distribución espacial y temporal no es fija y el ritmo de consumo, es mucho más acelerado que el ritmo de regeneración en la misma cantidad y calidad. Al ser el agua dulce un recurso no renovable en términos globales es necesario contar con mecanismos técnicos y políticos para el uso su sustentable.

El concepto de sustentabilidad está precedido al cuestionamiento sobre los límites del crecimiento y a la dificultad de encontrar un término de referencia homogéneo. Antes de 1982 no existía un término preciso para referirse a la conciliación entre la producción de bienes y la capacidad de los ecosistemas para sostener patrones de consumo. Esto cambió con el Informe Brundtland

"Nuestro Futuro Común", elaborado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas. En este informe se define el desarrollo sustentable como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones (Mastrangelo, 2009). Con respecto, a la sustentabilidad del recurso hídrico, se define como cuencas manejados para satisfacer con las cambiantes demandas actuales y futuras sin que el sistema se degrade (Loucks, 2000).

Si bien la sustentabilidad está sujeta a factores de riesgo e incertidumbre sobre un futuro incierto, se asume que a través de prácticas adecuadas se puede influir de forma positiva, a pesar de la incertidumbre, para producir la menor degradación del recurso hídrico. Loukus identifica nueve aspectos como guía para la planificación y manejo sustentable del recurso hídrico. Entre los que enumera son: desarrollar una visión compartida de manejo, fomentar la coordinación entre actores e instituciones, recordar que la sustentabilidad es un tema ecológico, social y económico por lo tanto las relaciones entre estas esferas son complejas, dinámicas, cambiantes y típicamente heterogenias en tiempo y espacio de modo que hay que desarrollar enfoques de gestión adaptables.

## III. Capítulo: Marco Metodológico

En el capítulo anterior se plantean los conceptos más importantes para comprender lo que se desarrolla en esta tesis. En este capítulo tres se describe cómo se desarrollarán los tres objetivos que se plantearon. Primero, cómo se cuantificó la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero en el programa WEAP. Segundo, cómo se estimar el efecto de las concesiones en el agua superficial disponible. Tercero, cómo incorporar diferentes escenarios de demanda en WEAP y la evaluación de sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero.

## 3.1. Procedimientos para cuantificar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP

### 3.1.1. Datos de entrada para el modelo WEAP

Para simular el balance hídrico en WEAP, bajo el método de Humedad del Suelo, son fundamentales varios datos climatológicos y de cobertura de la tierra. El primer paso fue dividir el área de estudio en subunidades a llamarse subcuencas; el criterio para realizar la división fue la ubicación de los datos fluviométricos, la estación Guardia y la estación Rancho Rey (ver Figura 1). Por consiguiente, la subcuenca 1 representa la cuenca alta del río Tempisque, en otras palabras, el área aguas arriba de la estación fluviométrica Guardia. La subcuenca 2 es el área aguas arriba de la estación Rancho Rey, la subcuenca 3 es el área aguas abajo de esta estación hasta la boca del río Bebedero. La subcuenca 4 es el área aguas debajo de la estación Guardia hasta la desembocadura del río Tempisque, como se observa en la siguiente figura 1

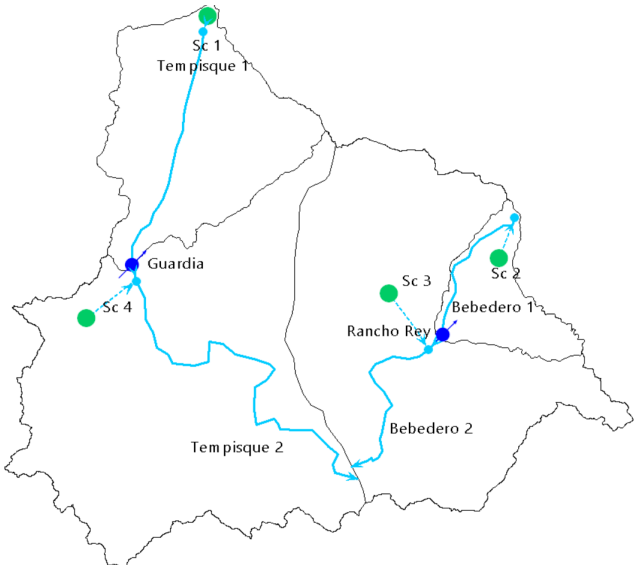


Figura 3: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey) y secciones de los ríos principales

WEAP calcula el balance hídrico para cada fracción de área, o subcuenca y asume que el clima es uniforme, con base a la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Método de humedad del suelo en WEAP para calcular el balance hídrico

$$Rd_j \frac{d_{z_1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - \left(1 - f_j\right)k_{s,j}Z_{1,j}^2$$

Donde $\mathrm{d}_{z_1,j}$ = [1,0] es el almacenamiento relativo dado como una fracción del total del almacenamiento efectivo de la zona de la raíz (mm) para cada fracción de cobertura, j. La precipitación efectiva $P_e$, incluye el deshielo de cada subcuenca pero que en este caso no se considera. La evaporación potencial, PET, se basa en la ecuación de Penman-Monteith y el $k_{c,j}$ es el coeficiente de cultivo para cada tipo de cobertura de la tierra. El tercer término se refiere a la escorrentía superficial donde RRF es el factor de resistencia a la escorrentía (figura 1). El cuarto término se refiere al interflujo, donde $k_{s,j}$ es una estimación de la conductividad cuando la zona raíz (mm/tiempo) está saturada. El quinto término se refiere a la percolación profunda donde $f_j$ es un coeficiente de división relacionado al suelo que fracciona el agua tanto horizontal como verticalmente.

El manual de WEAP especifica con respecto a la ecuación de Penman-Monteith, que el programa utiliza la versión modificada para un cultivo estandarizado de pasto con 0,12m de altura y una superficie de resistencia de 69 s/m. También señala que en su implementación se hicieron dos modificaciones a la ecuación: el valor de albedo varía en un rango entre 0,15 y 0,25 como función de la capa de nieve, y el de calor del suelo con el término G, fue ignorado. La ecuación de Penman-Monteith requiere datos de temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar, mismos que requiere WEAP, de la radiación solar que el programa calcula a partir de la fracción de nubosidad.

En este caso los datos de precipitación utilizados fueron tomados de un set de datos mensuales para el periodo 1950-2014 (Bocanegra, 2017; Munoz et al., 2018). El set de datos cuenta con 54 puntos de medición que corresponden a estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Los registros contenían vacíos de información, que fueron completados con un

set de datos satelitales, formato grilla, tipo re-análisis, de alta resolución temporal, 1900-2014, y espacial ~25km, obtenidos en los servidores públicos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre, División de Ciencias Físicas, ((NOAA/ESRL/PSD, 2017) por sus siglas en inglés. La correlación entre las mediciones observadas y las satelitales fue de 0,8 por lo que el producto se consideró adecuado para rellenar la información de lluvia mensual faltante y completar una serie de precipitación mensual, para el periodo 1950-2014 en el área de estudio Tempisque-Bebedero. Para completar la serie de tiempo hasta el 2016, para los años 2015 y 2016, lo que se utilizó fue el promedio del registro anterior hasta 1993.

Los datos de temperatura mensual se obtuvieron de siete estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional, que cubrían el periodo de estudio de 1993-2016. Las estaciones Aeropuerto Liberia, Santa Cris, Motezuma contaban con datos promedio mientras que Hacienda Mojica, Ingenio Taboga, Santa Rosa y Tilarán, solo con datos mensuales de temperatura mínima y máxima, a partir de los que se calculó un promedio. Como no se contaban con observaciones en sitio de velocidad del viento y humedad relativa, los datos se obtuvieron de la página POWER - Prediction of Worldwide Energy Resources (NASA, 2017). También son datos satelitales tipo re-análisis pero en este caso los datos se bajan como archivos de texto para un punto con coordenadas específicas. La muestra de puntos para ambas variables, velocidad del viento y humedad relativa, corresponde a las coordenadas de las estaciones de temperatura, esto con el fin de procurar consistencia.

Una vez recopilados los datos de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, para el periodo de estudio 1993-2016 se procedió a la interpolación mensual de cada una de las variables con el fin de sacar un valor promedio para cada subcuenca.

Para ello se empleó la herramienta de análisis espacial en ArcGis 10.4.1 y el algoritmo Distancia Inversa Ponderada, más conocido como IDW por sus siglas en inglés. Los parámetros utilizados para la interpolación fueron los asignados por defecto: potencia de dos y radio de 12 puntos,

para todas las variables climáticas. La interpolación se realizó con el propósito de que el valor promedio por cuenca de cada variable climática tuviera representatividad espacial, sin embargo, no hubo mucha rigurosidad en encontrar los mejores parámetros para la interpolación, ya que, en todo caso, WEAP solo acepta un valor promedio por cada variable para cada subcuenca. En el caso de la precipitación se hubiera podido calcular un simple promedio en Excel con las estaciones de cada subcuenca ya que la muestra era una densa red de puntos, sin embargo, no hubiera sido idóneo para las variables temperatura, velocidad del viento y humedad relativa porque la muestra era menos densa, motivo por el cual se empleó la interpolación IDW.

Las interpolaciones IDW se realizaron de forma manual con la herramienta de análisis espacial mientras en ArcMap 10.4.1. Seguidamente, en el mismo programa, pero con la herramienta *Model Builder* se automatizó el proceso de calcular el valor promedio mensual de cada variable climática para cada subcuenca como se puede ser en la siguiente figura:

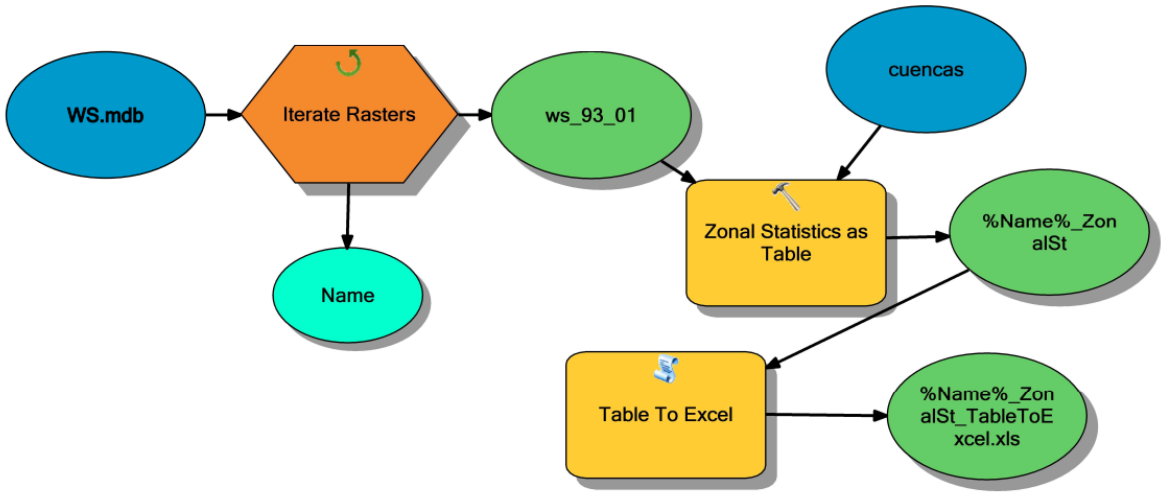


Figura 4: Flujo de procesos automatizados con la herramienta Model Builder de ArcMap

En el primer término se iteran los raster mensuales producto de la interpolación, en el segundo término se emplea la herramienta Estadísticas Zonales como Cuadro usando las subcuencas

como máscara. Esto resulta en una Cuadro con diferentes estadísticos en las columnas, de relevancia el promedio y en las columnas se desagrega por subcuenca. Pero la Cuadro que genera esta herramienta solo se puede consultar en el programa ArcMap, así que en el tercer término se convierte la Cuadro a formato Excel con el fin de poder consultarla como un archivo independiente.

A partir de las Cuadros que contienen los promedios climáticos por mes, para cada subcuenca, se crean nuevas Cuadros para poblar el modelo WEAP. WEAP lee Cuadros para cada variable climática, esto quiere decir que se creó una Cuadro con datos de lluvia, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, indicando el año, mes y promedio, para cada subcuenca.

Por otra parte, el dato de fracción de nubosidad se obtuvo mediante consulta al Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI) quienes indicaron que la fracción de nubosidad promedio para Guanacaste es de 0.6. Para estimar la variación interanual se hizo una aproximación informada con respecto a los meses de lluvia del área de estudio, asumiendo 0,4 en los meses más lluviosos y 0,8 en los más despejados.

Antes de incorporar los datos meteorológicos al modelo WEAP, se contabilizó las áreas por tipo de cobertura según datos de (FONAFIFO, 2012), para cada subcuenca y se aproximó el valor Kc para cada tipo de cobertura según la (FAO, 2006), información que luego se introdujo en WEAP.

### 3.1.2. Calibración del modelo, periodo 1993-2003

Una vez introducidos los datos de entrada requeridos en el modelo se procede a la calibración, que es el proceso de ajuste de parámetros del modelo para procurar que la serie de caudal simulado se asemeje al observado. En la presente la calibración se hizo para el período 1993-2003 con datos de caudal mensual (ICE) y consistió en tres pasos. Primero un ajuste visual manipulando uno a uno los valores de los parámetros del modelo para que el caudal simulado se asemeje en el eje *y* al caudal observado. Segundo, una prueba de eficiencia utilizando el

coeficiente NSE y su versión logarítmica para los parámetros que no distinguen entre las coberturas de la tierra. Por último, la prueba de eficiencia general, comparando la calibración visual y la calibración basada en la mejor eficiencia de ciertos parámetros.

La calibración en WEAP para el método de Humedad del Suelo es laboriosa porque ciertos parámetros se desagregan por tipo de cobertura, lo que potencialmente implica ajustes según categorías de cobertura para cada parámetro que lo requiera. Los parámetros que se desagregan por cobertura son la Capacidad del Suelo (SWc), la Resistencia a la Escorrentía (RRf), la Conductividad en la Zona de las Raíces (RZc), la Dirección preferida de flujo (PFd) y el Z1. Mientras que la Capacidad del Subsuelo (DWc), la Conductividad profunda (Dc) y Z2 tienen un único valor.

Para guiar la asignación de algunos valores, para ciertos parámetros se utilizó como referencia criterios físicos. En el caso de la Capacidad del Suelo (SWc) se tomó como referencia el tamaño de las raíces de los pastos y la caña de azúcar, mientras que para la Capacidad del Subsuelo (DWc) se consideró la profundidad de posos. Los parámetros Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRf) y Conductividad en la Zona de las Raíces (RZc), se desagregan por tipo de cobertura y se refieren respectivamente al movimiento vertical y lateral del agua en el suelo. De modo que se asumió que la resistencia era menor en la cobertura agrícola, seguida de los pastos, la cobertura forestal y que el agua y manglas casi no producían resistencia. Para la conductividad se asumió que había mayor infiltración del suelo al subsuelo, en la cobertura agrícola, seguida del pasto, la cobertura forestal y que el agua y manglar tenían las dos capas de suelo saturadas. Estos criterios se asumieron como una base para guiar la calibración, pero los valores finales responden a la mejor respuesta del modelo.

De igual forma, aunque sin un criterio preestablecido se realizó la calibración visual para los parámetros Dirección Preferida del Flujo (PFd), Conductividad Profunda (Dc), $Z_1$ y $Z_2$. De estos, los parámetros Dirección Preferida del Flujo (PFd) y $Z_1$ se desagregan por cobertura, pero se encontró que el modelo respondía mejor cuando se utilizaba el mismo valor en todas las

coberturas. Entonces, del rango posible y ante una ausencia de respuesta clara del modelo a los cambios en estos parámetros ¿cuál valor es el más adecuado?; para responder esta pregunta se empleó la prueba de eficiencia NSE y logNSE.

La prueba de eficiencia se realiza evaluando la eficiencia para simular el caudal observado en el rango de valores para cada parámetro. Para ello se emplea la fórmula NSE y logNSE y se grafica; si se dibuja una curva positiva el modelo es sensible a ese parámetro y el pico de esta curva sería el valor con mayor eficiencia. La prueba se realizó solo para los parámetros Dirección Preferida del Flujo (PFd), Conductividad Profunda (Dc), $Z_1$ y $Z_2$ al no lograrse automatizar el proceso debido a restricciones del software. Para cubrir el rango de posibilidades para cada rango se realizó una prueba sistemática con intervalo de 5; en el caso de $Z_1$ y $Z_2$ el rango va de 0 - 100. La Dirección Preferida del Flujo (PFd) tiene un rango de 0-1, por lo que se hicieron saltos de 0,5 y la Conductividad Profunda (Dc) tiene un rango indefinido por lo que en la presente se definió de 0-1000 y se cubrió con intervalos de 5.

Los resultados de caudal generados se procesaron en una hoja Excel para hacer el cálculo de los coeficientes NSE y logNSE, que luego se graficaron en SigmaPlot. El criterio final para la calibración se basó en el resultado del logNSE, ya que el interés primordial era simular lo mejor posible los mínimos de caudal al ser los más críticos para el manejo del recurso hídrico. Finalmente se comparó la eficiencia del resultado final entre la calibración visual y la que incorpora la eficiencia de parámetros, utilizando de nuevo el coeficiente NSE y logNSE. De este modo se procuró disminuir la subjetividad de la calibración visual utilizando un método cuantitativo, sistemático y replicable.

### 3.2. Procedimientos para estimar el efecto de las concesiones en el agua superficial disponible en las cuencas del Tempisque y Bebedero

WEAP calcula el balance hídrico basado en ellos datos meteorológicos y los referentes a la cobertura de la tierra cuando se usa, como en este caso, el método de Humedad del Suelo. La calibración del modelo se hizo con series de caudal para el periodo 1993-2003, ubicadas en las

partes altas de las cuencas Tempisque y Bebedero. Con respecto a este paso, se asumió que los registros de caudal representan un caudal seminatural, omitiendo que los registros del fluviógrafo podrían estar alterados por extracciones y vertidos de las concesiones agua arriba. Precisamente en el desarrollo del segundo objetivo se contabilizan las extracciones por concepto de concesiones, se representan en el programa WEAP y se analizaron los resultados.

Los datos de concesiones fueron suministrados por la Dirección de Aguas, dependencia del Ministerio de Ambiente y Energía, MINAE. La información fue facilitada en formato Excel con información del número de expediente, nombre, tipo (superficial, subterránea), estado del expediente, tipo de fuente, coordenadas geográficas y el caudal por uso en litros por segundo. Lo primero fue extraer los expedientes tipo A, aguas superficiales, ya que el modelo que se desarrolló es para agua superficial. En este caso se excluye las tres concesiones a nombre del SENARA, dos con volúmenes de 1500 l/s y una con 7000 l/s, ya que al ser una enorme cantidad de agua no es posible que sea parte del sistema natural, por lo que corresponde al trasvase de agua. También se analizaron los expedientes tipo R, acueducto rural, ya que toda el agua extraída en estas concesiones es para consumo humano. En este caso se describieron las concesione de agua subterráneas, tanto como las superficiales, aunque posteriormente en la contabilización de las extracciones se excluye el agua subterránea.

Lo segundo fue discretizar los expedientes por estado, separando lo otorgados y morosos de los demás. Los otros estados de expediente corresponden a: archivar sin trámite, cancelado, cancelado por vencimiento, denegado, en trámite, inscripción nueva, inscrito, inscrito-artesanal, pendiente, resuelto, solicitud nueva. Debido al alcance de esta investigación no se indagó en el manejo que hace la Dirección de Aguas de los expedientes, por lo que se asumió que los expedientes con estado de otorgados cumplen con todos los requisitos y los morosos simplemente deben el canon, pero operan normalmente. La última clasificación que se realizó fue limitar las concesiones a las que tenían estatus de otorgadas del año 1993 en adelante.

Se asume que las concesiones otorgadas extraen únicamente la cantidad de agua para la que se dio el permiso, aunque en realidad los litros por segundo que se asignan no representan la extracción real. Así mismo se asumió que extraen el máximo del volumen especificado sin fluctuaciones temporales. No se contabiliza las extracciones de agua no registradas en la Dirección de Aguas, o ilegales, ni tampoco el sobre uso de los permisos otorgados. Los datos de concesiones s se procesaron en Excel, ArcMap y los Figuras se realizaron en Sigmaplot. En primera instancia los datos de caudales se analizaron como venían con la unidad volumétrica l/s, sin embargo, para poder comparar con los datos generados en WEAP y los de los fluviógrafos, se transformaron a $m^3/s$ posteriormente.

En primera instancia para demostrar el efecto de las concesiones en el caudal disponible, se realizó una resta simple del total de caudal concesionado al caudal simulado. Para eso se consideraron las concesiones tipo A y el tipo R que toman el agua de fuentes superficiales. Las concesiones se consideran como volúmenes que se escapan el sistema o el balance hídrico a pesar de que esto sea una simplificación. En realidad, parte del agua extraída regresa de forma indirecta a la cuenca a causa de un uso parcial del agua concesionada, por fugas en los sistemas de abastecimiento o como agua efluente del punto de consumo que regresa el sistema en su mayoría contaminada. Para ejemplificar el consumo parcial se asumió que del caudal concesionado se consume el 80%, 60%, 40% o el 20% y eso se le restó la caudal simulado. También se asumió el consumo del 100% ya que a falta de datos que nos permitan saber con certeza estas variaciones se debe valorar el peor escenario.

### 3.3. Procedimientos para evaluar la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios incorporados en el programa WEAP

Para poder representar las extracciones de agua en el modelo WEAP, el programa pide ciertas especificaciones que obligaron a reinterpretar los datos de la base de datos de concesiones. El programa pide que se ingrese un valor anual para una actividad que genere demanda como

número de personas, número de casas, o un área agrícola. Asociado a cada unidad de actividad se debe ingresar una tasa de consumo de agua anual, o sea el consumo anual de agua por persona o cultivo. Así el consumo se multiplica por la unidad de consumo y se estima la demanda, de modo que esta ya no es solo un valor de concesión sino una demanda referida a las necesidades

Para introducir en WEAP las demandas hay que crear los puntos en el esquema de trabajo. Los puntos de consumo se clasifican según tipo de uso, por ejemplo, doméstico, turístico o agrícola. El punto de demanda se conecta al suministro, en este caso el río, con una línea de conexión, así como una línea de conexión de retorno, por la que fluye el agua que no se consumió en el sitio de demanda (ver figura 3). En todos lo casos se especificó un valor aleatorio de 10% de perdida en los sistemas de abastecimiento, lo que representaría la pérdida en las tuberías. También se realizaron corridas del modelo asumiendo un consumo del 100%, 80%, 60%, 40% o el 20%, en el caso cuando no se consume toda el agua, el agua efluente del punto de demanda regresa al río por la línea de conexión de retorno.

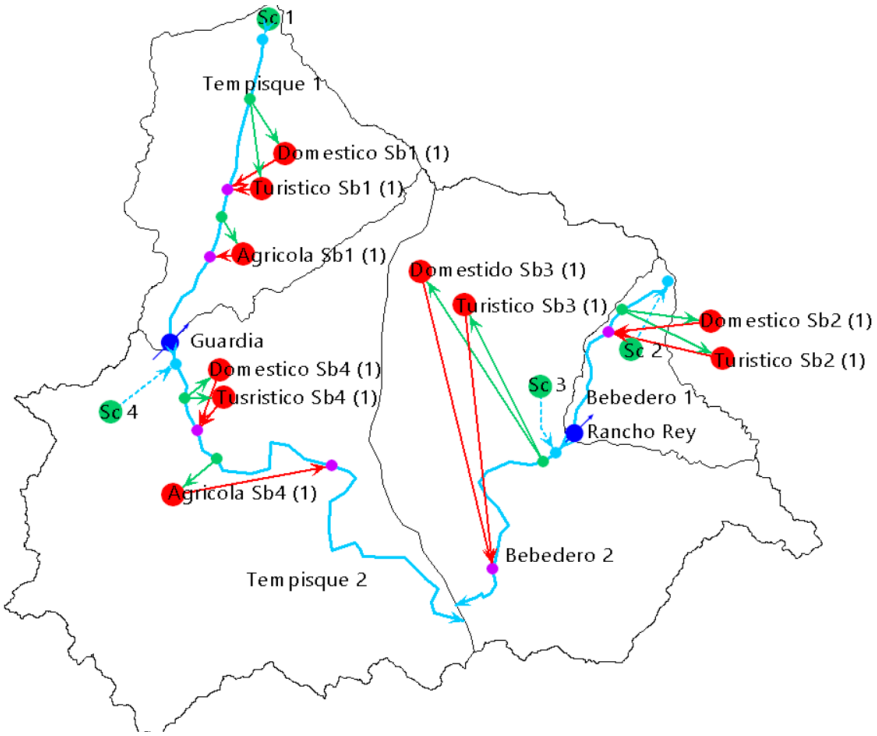


Figura 5: Esquema de trabajo en WEAP con las cuatro subcuencas, fluviógrafos (Guardia y Rancho Rey), secciones de ríos principales, las demandas (doméstica, turística y agrícola) y las líneas de desviación de flujo .

Como se observa en la figura 3, con base a los datos disponibles las demandas se clasificaron en tres: la domestica, turística y agrícola. El motivo, es que, al requerirse un valor de consumo y una unidad de consumo, esta información solo se pudo aproximar para los usos mencionados. El consumo promedio por persona para el sector doméstico y turístico se tomó del Reglamente de Dotación de Agua para Costa Rica, publicado en La Gaceta del 20 de mayo de 2004, elaborado por el Departamento de Aguas, donde se estipula las dotaciones de uso doméstico poblacional según zonas.

Cuadro 2: Dotaciones de uso doméstico poblacional

| Zonas | Litros/día/persona | |
|---|---|---|
| Urbana | 300 | |

| | | |
|---|---|---|
| Rural | 200 | Factor de proyección de crecimiento poblacional: 3% anual |
| Turística o costera | 350 | |
| Fuente: (Instituto Meteorológico Nacional, 2004) | | |

Para ello primero se transformaron los datos del cuadro 2 a $m^3$/diarios/persona y luego se multiplicó por 365, para saber el valor anual. Así mismo se transformó el caudal concesionado para el sector doméstico y turístico a $m^3$/s y luego se multiplicó por los segundos en un año. El caudal concesionado se dividió entre el valor de referencia para aproximar la cantidad de personas abastecidas. Los valores se ingresan a WEAP y el programa multiplica la cantidad de personas por el consumo anual para calcular la demanda.

Por otro lado, la estimar la demanda agrícola es necesario conocer el área cultivada y el consumo de agua por cultivo. El área agrícola considerada en esta investigación proviene de dos fuentes de datos. La primera fuente es del SENARA, donde el archivo *shape* facilitado cuenta con un registro de las parcelas y su uso histórico para las áreas que son parte del proyecto DRAT. Mientras que el área agrícola que no es parte del DRAT es una aproximación utilizando métodos de teledetección y fotointerpretación.

La información espacial de cobertura de la tierra de SENARA está clasificada según cultivo por semestre y se extiende desde el 2007 el primer semestre del 2017. Solo se consideró la cobertura del periodo entre 2013 al 2016 porque en estos años se cuenca con datos de caudal trasvasado y esta área agrícola se abastece de esa agua a través de los canales de riego del proyecto DRAT. Por otro lado, el área agrícola de la cuenca del Tempisque se abastece del agua que produce la cuenca. En este caso se partió de una clasificación de cobertura de la tierra para Guanacaste que realizó la Escuela de Geografía. De los productos facilitados, se utilizó la cobertura del 2010, ya que es la más reciente sometida a un proceso de revisión y control de calidad.

Adicionalmente, se contrastó el mosaico de imágenes Landsat del año 2010 que se utilizó para crear la clasificación de cobertura, con el producto ya clasificado. Se determinó que para el propósito de esta investigación lo más conveniente era combinar las clases tituladas “Cultivos remanentes” y “Terreno descubierto”. Es posible que debido a diferencias en los ciclos de cultivo la reflectancia fuera diferente y por ello durante el proceso de clasificación se determinaran dos categorías distintas, pero al revisar el producto contra la imagen satelital era evidente que ambas clases correspondían a áreas parceladas. Por tanto, el área agrícola digitalizada en la cuenca del Tempisque es el resultado de una reclasificación del producto facilitados por la escuela, así como la discretización visual o fotointerpretación del mosaico de imágenes satelitales Landsat para el año 2010. La desventaja es que en esta nueva digitalización no se distinguió entre áreas agrícolas y pastos. Esto representa una incertidumbre en los datos ya que algunas parcelas se podrían dedicar a actividades agropecuarias en lugar de agrícolas.

En el caso de área agrícola del proyecto del DRAT y con la información brindada por SENARA podemos saber el área por tipo de cultivo. Por lo contrario, para el área agrícola en la cuenca del Tempisque solo se pudo inferir tres tipos: caña, arroz y melón. Esta información se infirió al combinar conocimiento previo de la zona de estudio, así como una revisión de los propietarios de concesiones con caudal para riego según ubicación. Por otro lado, el consumo de agua por cultivo se aproximó según referencias bibliográficas, donde el consumo diario de referencia se multiplicó por los días en los meses en que los cultivos requieren riego.

Cuadro 3: Consumo de agua según cultivo (m3/ha/año)

| Tipo de cultivo | $m^3$/ha/año | Fuente |
|---|---|---|
| Arroz | 26.000 | Organización para Estudios Tropicales (2006) |
| Caña | 3.910 | Santana Segura, R. (2018) |

| | | |
|---|---|---|
| Pasto | 16443,7 | Murillo Solano, J. et al (2014) |
| Melón | 5.230 | Marín Thiele, F (2014) |
| Varios cultivos | 8527,9 | Promedio de melón, caña y pasto según este cuadro |

Ya que WEAP requiere la tasa de consumo anual por cultivo los valores utilizados se detallan en el cuadro 3. El consumo anual del pasto es mayor que del melón, el motivo es que el ciclo de cultivo que se asumió para cada cultivo varía. Para el melón se asumió un consumo diario de 48 m3/ha entre enero y marzo, en abril 20 m3/ha/día y en diciembre de 10 m3/ha/día. En el caso del pasto se asumió como un cultivo que se da a lo largo del año con el fin de alimentar el ganado. Se asumió una variación de consumo según los meses basada en (Murillo Solano, J. et al, 2014) con un consumo entre 47 y 49 m3/ha/día para los meses de diciembre a abril, mientras que entre junio y noviembre el consumo diario varió en un rango entre 42 y 45 m3/ha/día. A sumar el consumo mensual, en un año el pasto consume más agua que el melón, ya que este último no necesita agua de riego entre mayo y noviembre.

Como se observa en la figura 5, la demanda agrícola (punto rojo) en el Tempisque se abastece directamente del río, pero falta la demanda agrícola del Bebedero. Lo anterior se debe a que como la demanda agrícola de la cuenca del Bebedero se abastece principalmente del DRAT, sistema que a su vez se abastece de agua trasvasada, se tuvo que modelar de forma distinta. En este caso se utilizó un elemento en WEAP llamado “Otros suministros”, funciona como un reservorio al que se le especifica el caudal de entrada, libera agua según demandas aguas abajo, pero no almacena agua, lo que no se consumó se asume como pérdida. Este elemento se incluyó solo para el periodo entre el 2013 y el 2016 ya que es el momento para el que existen datos de caudal manejados por el SENARA para el DRAT. Los datos vienen clasificados como caudal de: generación, que es el que ARCOSA le entrega al DRAT; derivado, que es el agua que se distribuye entre los caudales sur y oeste; y el no aprovechado, que es el agua que no entra a los

canales y se desvía al río Corobicí. Como se observa en la siguiente figura, debido a que el suministro es independiente, solo se modeló para un periodo específico, y solo abastece a la demanda agrícola, se trabajó de forma independiente, pero en base a los caudales inicialmente simulados.

Con lo anterior se estimó el efecto que la demanda doméstica y turística tienen en la disponibilidad de agua superficial, así como el efecto de la demanda agrícola. También se simuló el trasvase de agua proveniente del complejo ARCOSA y distribuido para uso agrícola a través del DRAT. Con ello se discute el efecto que esto tiene en la disponibilidad de agua de la parte media y baja de la cuenca del Bebedero. Por último, para discutir con amplitud el tema de la sustentabilidad hídrica, se analiza las recomendaciones emitidas por la Contraloría General de la República (2014) sobre medidas para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica, puntualizando en la realidad y hallazgos encontrados para el área de estudio.

## IV. Capítulo: Cuantificación de la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, entre 1993-2016, con el uso del programa WEAP

En el capítulo cuatro se detalla toda la información que se utilizó para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero entre 1993 y 2016, así como los resultados y conclusiones para este objetivo. Primero se especifica la información de entrada que se utilizó en WEAP incluyendo datos climáticos, de cobertura de la tierra y valores de Kc. Segundo, se puntualiza sobre el proceso de calibración que incluye la calibración visual y la prueba de sensibilidad y eficiencia para el periodo 1993 a 2003. Por último, se describen los resultados obtenidos para 1993 al 2016 y una sección de conclusiones breves este capítulo.

### 4.1. Datos de entrada para el modelo WEAP

En la figura 1 se visualiza la distribución espacial del promedio anual de a) precipitación, b) temperatura, c) humedad relativa y d) velocidad del viento producto de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016 en el área de estudio. En cada área interpolada se

delimitan las subcuencas utilizadas para procesar los datos en WEAP, así como los puntos de muestreo.

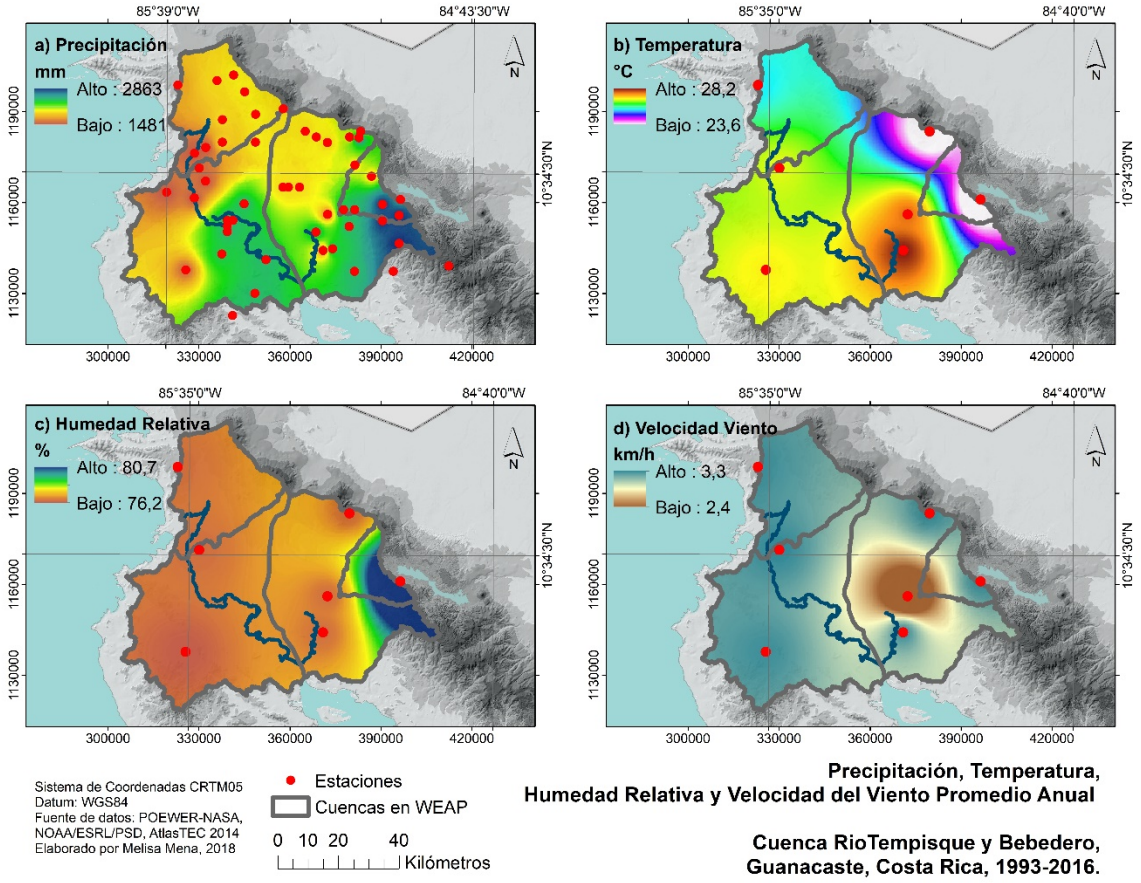


Figura 6: Promedio Anual de Precipitación, Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Viento resultado de las interpolaciones mensuales, para el periodo 1993-2016, área de estudio

La distribución de la precipitación (figura 4.a) se divide en dos tendencias, hacia el noroeste menores precipitaciones (~1500-2500 mm) que al sureste (~2000-3000 mm). Esto se debe a la agrupación de valores similares, porque a pesar de que la red de muestreo es muy densa los valores se repiten en estaciones adyacentes. Lo anterior sucede porque la fuente de datos utilizada para para rellenar las series de datos de las estaciones tiene una resolución de ~30km$^2$ lo que genera que varios puntos caigan dentro de un mismo píxel que tiene un mismo valor. No

obstante, hacia el sureste, en el área más lejana, se ubican las mayores precipitaciones y en este caso sí responde la topografía y cambios altitudinales.

La interpolación de la temperatura fue la que mejor refleja las variaciones altitudinales y en el caso de la humedad relativa solo en la parte sureste. La temperatura promedio anual (figura 4.b) varía de entre 23,6 a 28,2°C y la interpolación refleja que las temperaturas más altas se ubican en las partes más planas y cercanas a las costas, mientras que con el aumento altitudinal la disminución en la temperatura es proporcional. En el caso de la humedad relativa, esta se distribuye casi homogéneamente en 76-75 % alrededor del área de estudio, con excepción de la punta que se extiende al sureste, donde la humedad llega a 80,7%, precisamente en el territorio más montañoso y lluvioso. La velocidad del viento también es relativamente homogénea de ~3 km/h por excepción de un punto cerca de Cañas, donde la velocidad baja aproximadamente 1km/h a 2,4 km/h, este efecto es conocido como "ojo de buey". Como las interpolaciones de temperatura, viene de estaciones meteorológicas en sitio, este producto es el que mejor refleja la gradiente ambiental asociada al aumento en altitud que es de esperar.

Los puntos donde las interpolaciones presentan los conocidos "ojos de buey", puntos de concentración o islas, es producto de un diseño metodológico mejorable, al ajustar el peso de los puntos y el radio de búsqueda de valores vecinos, y de la debilidad propia del método al no realizarse una evaluación del error de predicción. Este efecto está presente en todas las interpolaciones, y en menor medida en la de humedad relativa. Es posible que la cercanía de los dos puntos al sureste cause este efecto. A pesar de algunas posibilidades de mejora en las interpolaciones, que podrían incluir cambiar la fuente de datos para el rellenado de datos o mejorar la distribución de la red de muestreo, para esta investigación es suficiente porque lo que se utiliza en el modelo es el valor promedio por subcuenca.

Precisamente en la figura 7 observamos las series de tiempo con los promedios mensuales para cada subcuenca extraídos de las interpolaciones entre 1993-2016 para las variables meteorológicas a) precipitación, b) temperatura, c) humedad relativa y d) velocidad del viento.

El promedio mensual de humedad relativa varía entre 60-90% y velocidad del viento entre 1,5 y 6,7 km/h. Se puede observar que la variabilidad entre los promedios es casi imperceptible cuando se comparan los valores entre subcuencas, esto responde precisamente a la homogeneidad de las interpolaciones que es de donde se extrae el promedio.

La precipitación mensual varía de 0,0 a 660 mm y de igual forma sutilmente entre cuencas, siendo la número dos la más lluviosa en general. En el área de estudio los valores de temperatura varían entre 23 y 29°C pero las diferencias entre subcuencas son significativas. A grandes rasgos, la subcuenca 2 maneja un rango entre 23 y 26°C, o sea el rango bajo entre las tres subcuencas, las subcuencas 1 y 3 representan el rango medio entre los 24 y 28°C, mientras que la subcuenca 4 varía entre los 25- 29°C, siendo este el rango más alto.

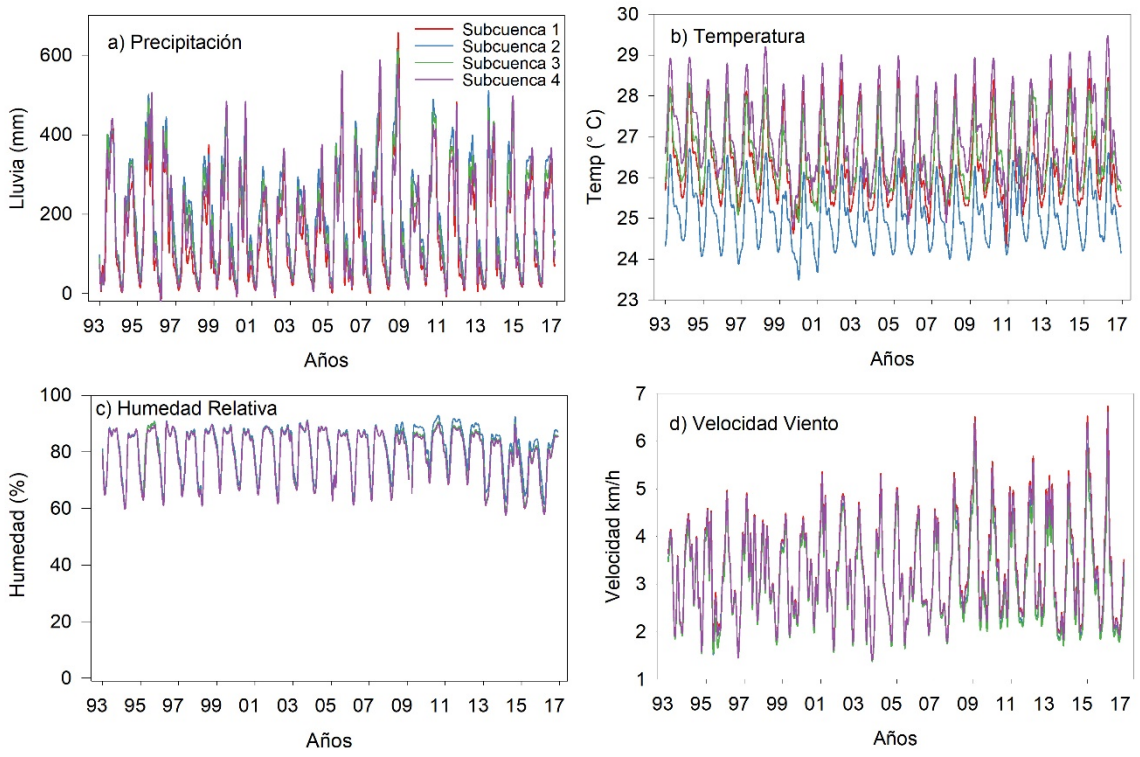


Figura 7: Promedios mensuales de precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento extraídos de las interpolaciones mensuales para cada subcuenca entre 1993-2016

Además de las variables climáticas, para realizar el método de humedad del suelo es necesario ingresar información sobre la cobertura de la tierra. La distribución espacial de los diferentes tipos de cobertura se puede apreciar en la figura 8 donde se distingue entre las categorías: forestal, no forestal, agrícola, manglares, cuerpos de agua y nubes. La distinción que hace FONAFICO, la fuente de datos es muy gruesa pero suficiente para un área tan grande. En la figura se observa que las extensiones más grandes de cultivos se ubican en las márgenes de los cursos de agua, ya sea en forma de ríos o canales de irrigación; así como estar contenidos fuera de las áreas de protección nacionales. Los manglares se ubican únicamente en la desembocadura de los ríos Bebedero y Tempisque, en la línea de costa. La cobertura forestal se concentra en la subcuenca 1 y en las áreas de mayor altitud, así come en el sector oeste de la cuenca 3. La categoría de

no forestal, en esta investigación se clasificó como pasto, y se concentra en la subcuenca 2 y al sur de la subcuenca 3.

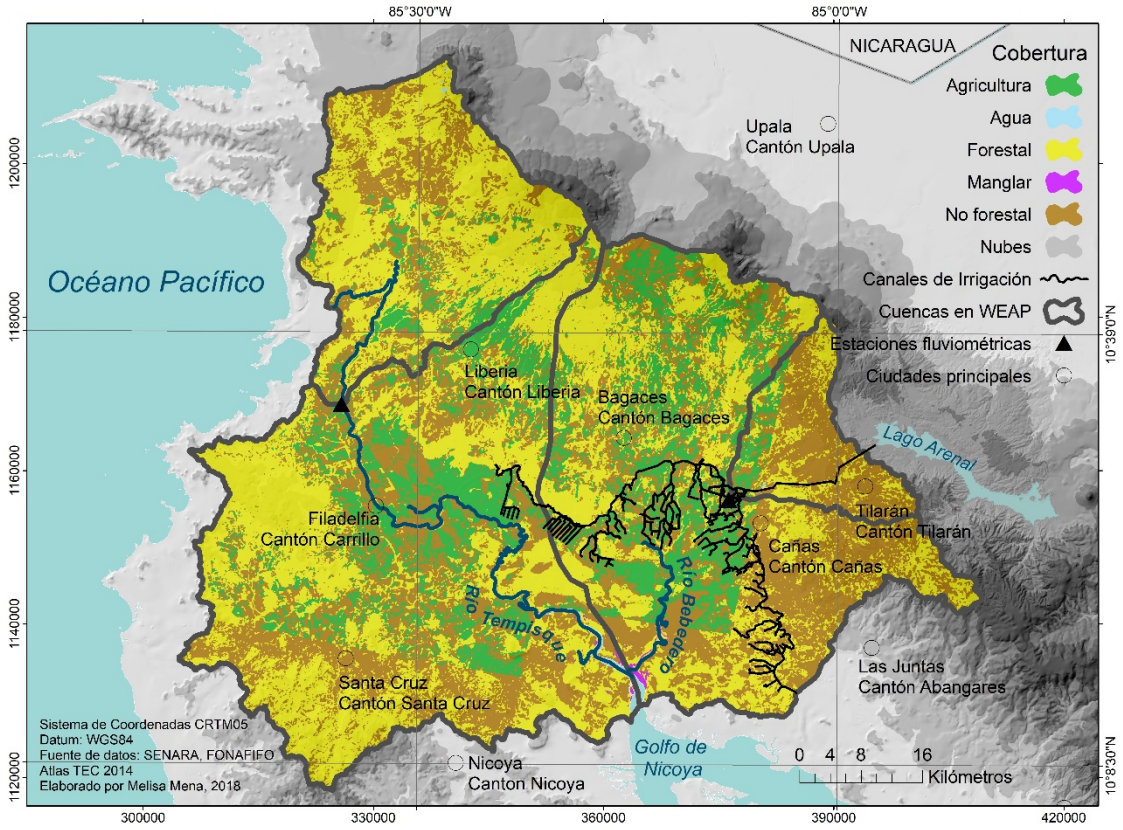


Figura 8: Cobertura de la tierra, Cuencas Tempisque y Bebedero, Guanacaste, Costa Rica, año 2010

La Figura 9 permite comparar las fracciones de área por tipo de cobertura con respecto al área total por subcuenca. La subcuenca 2 tiene la porción más grande de pasto con respecto al área total de la cuenca, la cobertura forestal predomina en la subcuenca 1 y la porción de área dedicada a la agricultura es muy similar entre las subcuencas 1,2 y 3,4. La subcuenca 2 es la más pequeña de las cuatro, con un área de 314 km2, donde prevalecen los pastos con 195,7 km2, un área de 87,4 km2 de tipo forestal, 30,7 km2 de agricultura. La subcuenca 1, es la siguiente en tamaño (área de 959,19 km2) en la que prevalece el uso forestal con un área de 588,2 km2, seguido 299,4 km2 de pastos y por último 71,5 km2 de agricultura. Debido a que

ambas subcuencas son las cabeceras de los ríos Bebedero y Tempisque, respectivamente, es un buen indicador para la salud de los ríos aguas abajo que las áreas de cultivo no predominen.

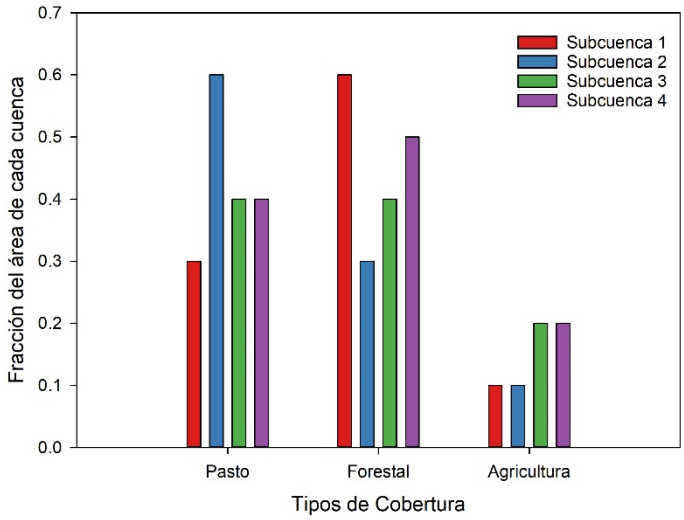


Figura 9: Tipos de cobertura por fracción del área de cada subcuenca

En el caso de la subcuenca 3 con un área de 1857,37 km2, 755,3 km2 están cubiertos por pastos, 682,1 km2 tiene cobertura forestal y 415,4 km2 se dedican a la agricultura. En la subcuenca 4, la más grande con un área de 2299,78 km2, predomina la cobertura forestal con 1050.2 km2, seguido de pastos con 826.1 km2 y la agrícola con 421,1 km2; estas últimas dos categorías levemente por encima de la subcuenca 3. La porción de manglar en la subcuenca 3 es de 4,1 km2 y en la subcuenca 4 de 2,1 km2.

Además de las áreas por cobertura se deben incluir los valores de Kc, este coeficiente que contabiliza por la transpiración del cultivo y la evapotranspiración del suelo en las diferentes fases de crecimiento. Considerando que la época lluviosa empieza en mayo/abril y que se extiende hasta noviembre, los valores Kc de inicio, medio y fin de los cultivos, se adaptaron de forma tal que los valores mínimos se ubicaran en la época seca y los máximos en la lluviosa. Particularmente para la cobertura agrícola, se tomó como referencia el ciclo de cultivo de la caña. En el caso de humedales y cuerpos de agua se usó el valor 1 ya que los valores de referencia

estaban muy cerca del 1 y estas áreas no son extensas. Las curvas con el valor Kc, para cada tipo de cobertura, quedaron de la siguiente manera:

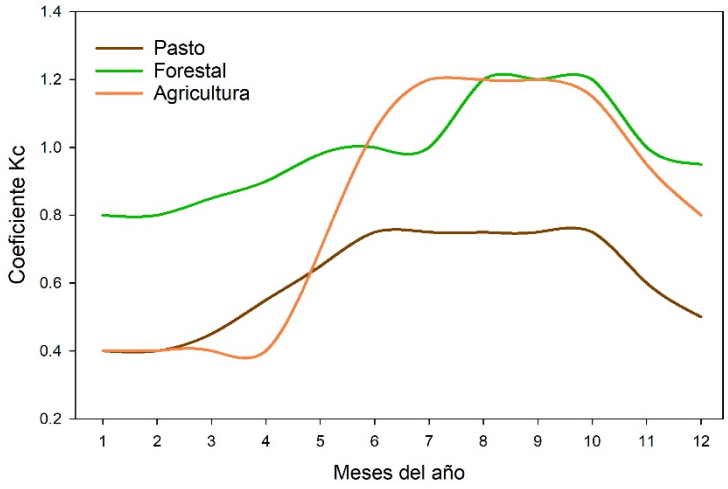


Figura 10: Variación mensual en los valores Kc según cultivo

Una vez que se incorpora toda esta información WEAP genera simulaciones de caudal que deben ser calibradas, esto proceso se describe a continuación.

### 4.2. Calibración visual del modelo, periodo 1993-2003

Para ajustar el caudal simulado con el observado, se debe calibrar el modelo y esto implica ajustar los valores de los diferentes parámetros que conforman el modelo conceptual de dos baldes. Los primeros parámetros por definir son la profundidad de la capa superior e inferior del suelo, Capacidad del suelo (SWc) y Capacidad del subsuelo (DWc), estos valores se desagregan según cobertura de la tierra (ver cuadro 5). Como las categorías de cobertura de la tierra son iguales para toda el área de estudio, se utilizaron los mismos valores en las dos cuencas de calibración, la 1 y la 2. Como regla general se asumió que el tamaño de las raíces del terreno agrícola es menor al de pastos y a su vez este es mucho menor que el forestal. La capacidad de la capa inferior del suelo se definió en 20 000 mm tomando como referencia la profundidad de los pozos en Bagaces (SENARA, 2010).

En el cuadro 5 se especifican los valores utilizados para los parámetros sensibles o dependientes a la cobertura de la tierra. Estos son, factor de resistencia a la escorrentía (RRf), conductividad de la zona de las raíces (RZc), capacidad del suelo (SWc) y capacidad del subsuelo (DWc). También se incluyen los parámetros independientes o insensibles al cambio de cobertura de la tierra, que son: conductividad profunda (Dc), dirección Preferida de Flujo (PFd) Z2 y Z1.

Cuadro 4: Calibración visual, valores asignados a los parámetros dependientes e independientes de las coberturas de la tierra

| | **Parámetros dependientes del cambio de cobertura** | | | | | **Parámetros independientes del cambio de cobertura** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Subcuenca 1** | **Cobertura** | **RRf** | **RZc** | **SWc (mm)** | **DWc (mm)** | **Cobertura** | **Dc (mm)** | **PFd** | **$Z_1$** | **$Z_2$** |
| | Pasto | 40 | 200 | 400 | 20000 | Pasto | 20 | 0,26 | 10 | 5 |
| | Bosque | 60 | 500 | 2000 | | Bosque | | 0,26 | 10 | |
| | Agua | 2 | 80 | 20 | | Agua | | 0 | 100 | |
| | Manglar | 2 | 80 | 20 | | Manglar | | 0 | 100 | |
| | Agricultura | 40 | 200 | 250 | | Agricultura | | 0,26 | 10 | |
| **Subcuenca 2** | Pasto | 400 | 200 | 400 | 20000 | Pasto | 60 | 0,58 | 5 | 60 |
| | Bosque | 600 | 500 | 2000 | | Bosque | | 0,58 | 5 | |
| | Agua | 2 | 80 | 20 | | Agua | | 0 | 100 | |
| | Manglar | 2 | 80 | 20 | | Manglar | | 0 | 100 | |
| | Agricultura | 400 | 200 | 250 | | Agricultura | | 0,58 | 5 | |

El Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRf), varían entre cuencas por 100 números absolutos, esto posiblemente se deba a que en la subcuenca 2 hay más área con pasto y por tanto se deba compensar el Factor de Resistencia. En WEAP, los parámetros Dirección Preferida de Flujo (PFd) y Z1 también están desagregados por cobertura, pero se determinó que en este caso no son sensibles a las diferencias de cobertura para una misma subcuenca. Las coberturas Agua y Manglar no tendrían una dirección de flujo ya que el balde superior estaría saturado desde el inicio, por lo que se les asignó el valor cero. También en el agua y manglar, al $Z_1$ se le asignó el

valor de 100, ya que representa que el balde superior estaría completamente saturado al iniciar la simulación.

El Figura 3 muestra el caudal simulado (línea roja) obtenido por la calibración visual versus el observado (línea azul) entre 1994 y 2003. Se observa que el caudal simulado refleja la estacionalidad del área de estudio, directamente relacionado a las precipitaciones, aunque no logra simular picos de caudal observado. Lo más satisfactorio es que el caudal mínimo se asemeja al observado, esto es de vital interés porque el modelo no sobre estima la disponibilidad mínima de agua. En situaciones particulares como en el año 1993, tanto en la subcuenca 1 como en la subcuenca 2 y en el 2000 en la subcuenca 2, el caudal simulado es menor que el observado. La falla al inicio de la simulación para ambas cuencas demuestra que el modelo se acopla mejor después de los primeros meses de la serie.

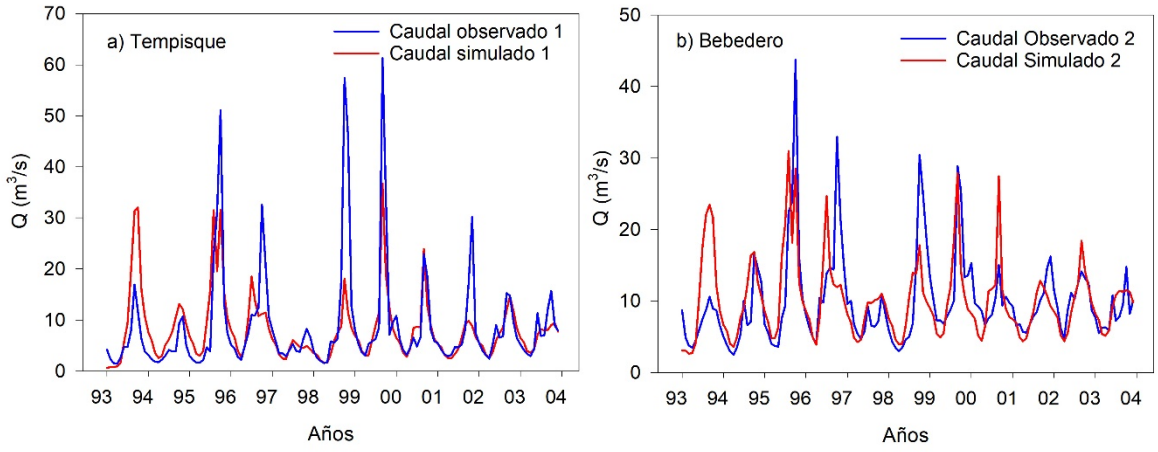


Figura 11: Resultados de la calibración visual entre caudal observado y la escorrentía simulada

Si bien el ajuste visual es satisfactorio, porque demuestran una adecuada variabilidad intra e interanual es necesario probar la eficiencia de aquellos parámetros que resultaron ser insensibles a los tipos de cobertura durante la calibración visual (ver Cuadro 5), con el propósito de usar el valor más eficiente y lograr la mejor calibración y resultados.

### 4.3. Calibración a partir de la prueba de sensibilidad y medición de la eficiencia periodo 1993-2003

La prueba de sensibilidad y eficiencia, no se puedo hacer de forma automatizada y aleatoria, debido a las limitaciones del programa WEAP. Así como se detalla en la metodología, se realizó una prueba por intervalos del indicador de eficiencia NSE (línea negra) y logNSE (línea roja), para los parámetros Dirección preferida de flujo (PFd), Conductividad profunda (Dc), valor de inicio del balde superior (Z1), y valor de inicio del balde inferior (Z2). Los resultados de las corridas para cada parámetro se observan en las figuras 11 y 12.

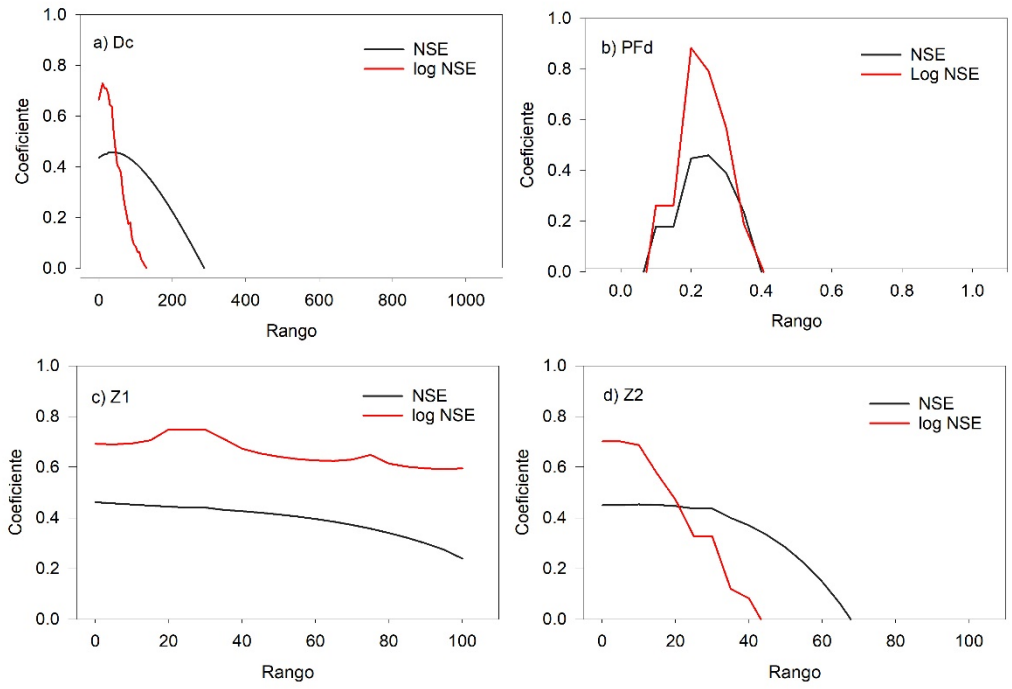


Figura 12: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z1 yZ2 para la Subcuenca 1 cabecera del Tempisque

En la subcuenca 1, cabecera del Tempisque los parámetros Conductividad profunda (Dc), Dirección preferida de flujo (PFd) y el Balde inferior (Z2) demostraron una clara sensibilidad de eficiencia y un mejor desempeño que la versión logarítmica del NSE (logNSE). El desempeño superior del logNSE quiere decir que hay mayor eficiencia en la calibración de flujos mínimos, que en los picos de caudal. El parámetro Conductividad profunda (Dc) es sensible en un rango

entre 0-35 y una eficiencia logNSE de 0,75. El parámetro Dirección preferida de flujo (PFd) es sensible al logNSE en un rango entre 0,06-0,4 con una diferencia del logNSE de 0,88. En el caso del valor de inicio del balde superior (Z1) el parámetro es más sensible en la versión logarítmica sin embargo no se distingue una eficiencia significativa. Por otro lado, para el balde inferior (Z2), el logNSE es más eficiente en un rango entre 0,30-0,70, mientras que el NSE en un rango de 0,03-15., con una diferencia de 0,24 en el coeficiente.

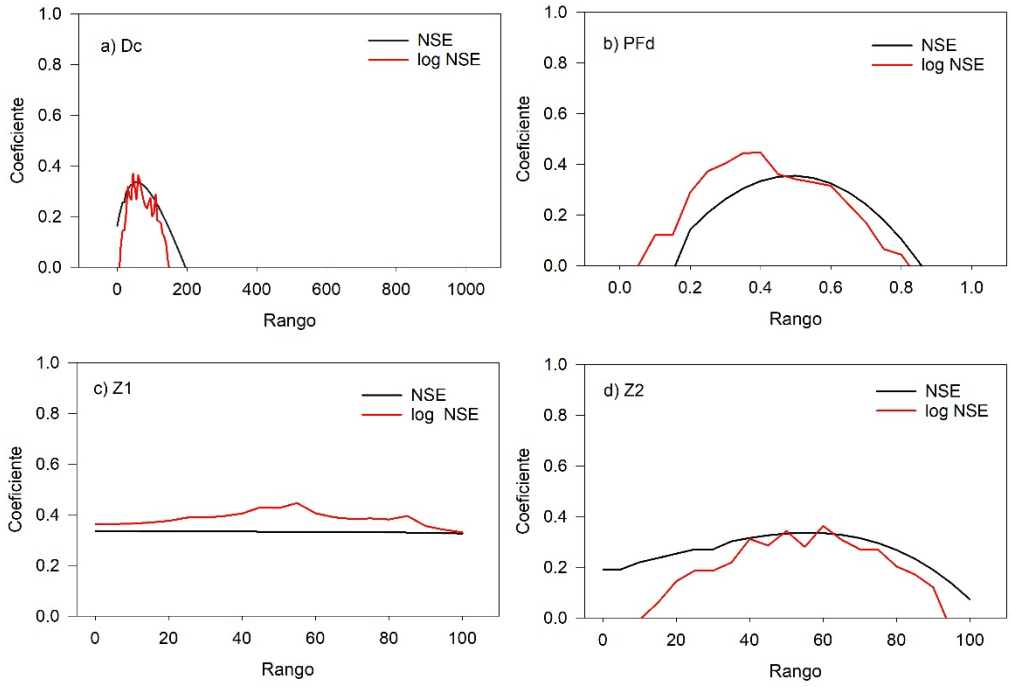


Figura 13: Sensibilidad de parámetros Dc, PFd, Z1 yZ2 para la Subcuenca 2 cabecera del Bebedero

En la subcuenca 2, cabecera del Bebedero los parámetros Conductividad profunda (Dc), Dirección preferida de flujo (PFd) y el balde inferior (Z2) demostraron una clara sensibilidad en eficiencia, pero poca diferencia en el desempeño entre el NSE y su versión logarítmica. El desempeño similar de ambos indicadores de eficiencia significa que la diferencia de calibrar entre

el NSE o el logNSE no variaría mucho, no obstante, en este caso se utiliza la mejor eficiencia en el logNSE por haber interés en modelar adecuadamente los flujos mínimos. El parámetro Conductividad profunda (Dc) es sensible en un rango de 0-134 en logNSE particularmente entre 45-50. El parámetro Dirección preferida de flujo (PFd) es sensible en un rango entre 0,05-0,85 donde el logNSE es superior solo por 0,05 puntos con respecto al NSE. Para el parámetro Inicio del balde superior (Z1) el NSE es insensible y el logNSE es ligeramente más sensible solo por 0,11 puntos en el coeficiente. El balde inferior (Z2) en logNSE tiene un ligero pico de eficiencia con respecto al NSE en el valor 60.

Los valores finales utilizados para cada parámetro se encuentran en el siguiente cuadro. En la subcuenca 2 los valores por parámetro son más altos que en la subcuenca 1. En el caso de la subcuenca 3 se utilizaron estos mismos parámetros que en la subcuenca 2 a diferencia del Dc, caso en que se utilizó un valor de 0,1 con el fin de reducir la tendencia positiva que se generaba a partir del año 2003 si se utiliza en el mismo valor que en la cuenca alta. De igual forma, los parámetros que se utilizaron en la subcuenca 4, fueron los de la subcuenca 1 a excepción del valor Dc que también se utilizó el valor 0,1.

Cuadro 5: Valores asignados a los parámetros independientes a los cambios de cobertura determinados mediante la calibración por eficiencia, Subcuencas 1 y 2

| | **Cobertura** | **Dc (mm)** | **PFd** | **Z1** | **Z2** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Subcuenca 1** | Pasto | 10 | 0.2 | 20 | 10 |
| | Forestal | | 0.2 | 20 | |
| | Agricultura | | 0.2 | 20 | |
| | Agua | | 0 | 100 | |
| | Manglar | | 0 | 100 | |
| **Subcuenca 2** | Pasto | 45 | 0.4 | 55 | 60 |
| | Forestal | | 0.5 | 55 | |
| | Agricultura | | 0.8 | 55 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Agua | | 0 | 100 | |
| | Manglar | | 0 | 100 | |

En el Figura 5 se observa la serie de tiempo de caudal observado y simulado después de hacer la calibración sistemática con los valores de mejor desempeño para el logNS. Para ambos métodos de calibración, en la subcuenca 2, se observa una mejor simulación de los caudales mínimos hasta 1998, después de esta fecha en ambos métodos el caudal simulado disminuye con respecto al observado. Realizando una comparación visual entre las ver figuras 10.a/b y 13.a/b no se observa mayor diferencia situación que se comprueban con los resultados de eficiencia total en el cuadro 6.

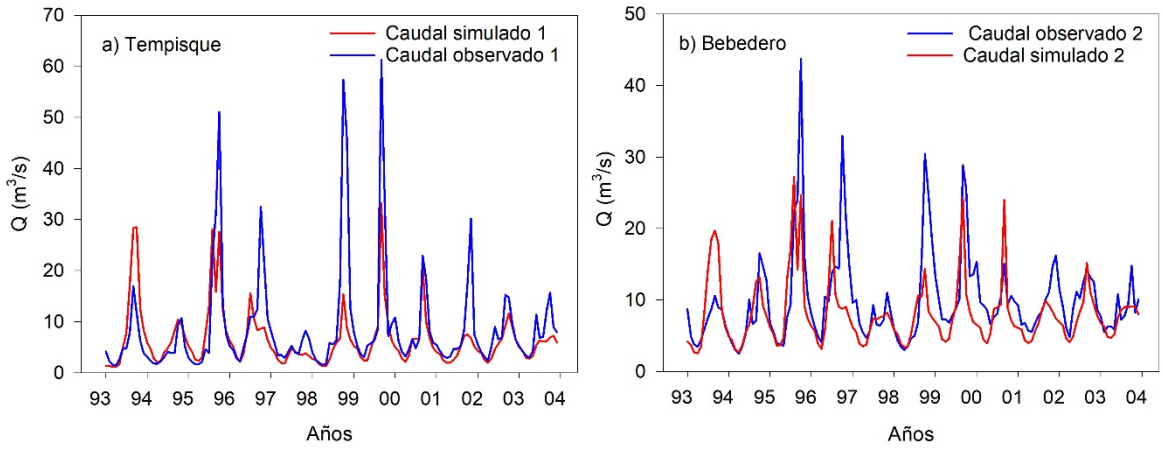


Figura 14: Resultados de la calibración con sensibilidad y eficiencia de parámetros

Al realizarse la comprobación de la eficiencia de los resultados finales, en la subcuenca 1, se observa una mejoría de 0,10 entre el logNSE de la calibración visual y la realizada a través de la eficiencia de parámetros. Mientras que en la subcuenca 2 no hubo diferencia entre los dos tipos de calibración para el caso de logNSE. La eficiencia de la simulación es dos veces mejor en la subcuenca 1 que en la subcuenca 2

Cuadro 6: Comparación de la eficiencia global entre la calibración visual y la de sensibilidad

| | **Subcuenca 1** | | **Subcuenca 2** | |
|---|---|---|---|---|
| Calibración | NSE | logNSE | NSE | logNSE |
| Visual | 0,45 | 0,69 | 0,33 | 0,36 |
| Eficiencia por parámetros | 0,43 | 0,79 | 0,28 | 0,36 |

Para las subcuencas 3 y 4 no se pudo replicar el proceso de calibración realizado en las subcuencas 1 y 2 ya que no se contaba con caudales observados que permitieran comparar las simulaciones con datos en el sitio. Por lo que, los valores utilizados en los parámetros fueron los mismos de las partes altas de cada cuenca (ver cuadro 5); los de la subcuenca 1 se utilizaron en la subcuenca 4 y de la subcuenca 2 en la subcuenca 3. A excepción del parámetro Conductividad profunda (Dc) que se le asignó un valor mínimo de 0,1 para evitar crear una tendencia positiva en el caudal simulado.

### 4.4. Caudal simulado para el periodo 1993-2016

En la sección anterior se detallan los parámetros de calibración de las subcuencas 1 y 2 así como los resultados de caudal obtenidos para el periodo entre 1993 y 2003. En esta sección veremos los resultados de caudal simulado para cada subcuenca de trabajo en WEAP durante el periodo de estudio que comprende el periodo entre 1993-2016. Para el periodo entre 1993 y 2003, al comparar los resultados de la simulación con los observados se observa una adecuada variabilidad intra e interanual que se mantiene del 2004 en adelante. En la figura X se observa toda la serie de caudal simulado para las subcuencas del río Bebedero (2 y 3) y para las subcuencas del río Tempisque (1 y 4). Las cuencas 1 y 2 fluctúan en un rango similar con caudales menores que las subcuencas 3 y 4. Mientras que las subcuencas 3 y 4 generan más caudal ya que cubren un área mayor, en general la subcuenca 3 es la que más agua genera.

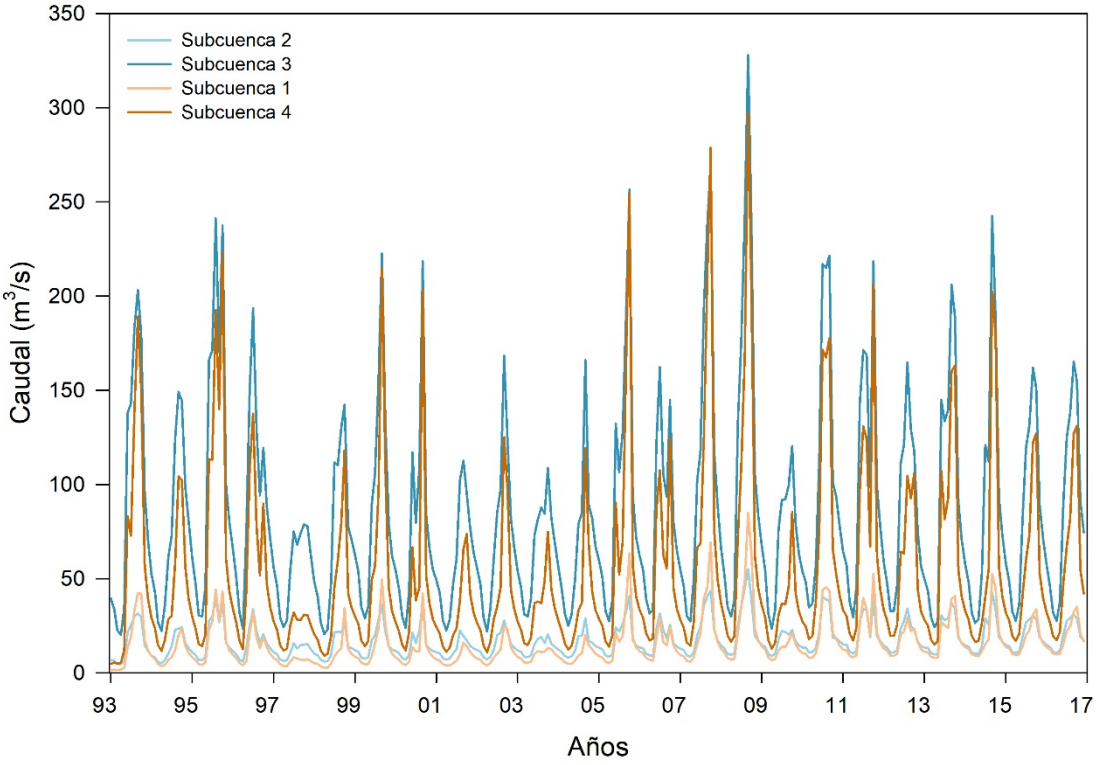


Figura 15: Caudales simulados por subcuenca, cuencas del río Tempisque y Bebedero, 1993-2016

Según el caudal simulado, para el periodo 1993-2016 la subcuenca 1 tiene un caudal mínimo de 1,1 $m^3/s$ y máximo de 68,5 $m^3/s$, mientras que la subcuenca 2 tiene un caudal mínimo de 2,5 $m^3/s$ y máximo de 40,7 $m^3/s$. Por otro lado, la subcuenca 3 tiene un caudal máximo de 328 $m^3/s$ y mínimo de 20,1 $m^3/s$. En la subcuenca 4 se simuló un caudal máximo de 297,2 $m^3/s$ y uno mínimo de 4,7 $m^3/s$. El caudal medio anual de la subcuenca 1 es de 15,4 $m^3/s$ y el de la subcuenca 2 es mayor solo por 2 $m^3/s$ para un promedio de 17,4 $m^3/s$, lo que indica que las cabeceras del Tempisque y el Bebedero producen una cantidad del agua similar.

Cuadro 7: Caudales máximo, mínimos y acumulados por subcuenca para el periodo 1993-2016

| | **Subcuenca 1** | **Subcuenca 2** | **Subcuenca 3** | **Subcuenca 4** |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Área ($km^2$) | 959,2 | 314,0 | 1857,4 | 2.299,8 |
| Caudal máximo ($m^3/s$) | 84,9 | 54,9 | 328,0 | 297,2 |
| Caudal mínimo ($m^3/s$) | 1,5 | 4,5 | 20,1 | 4,7 |
| Caudal medio anual ($m^3/s$) | 15,4 | 17,4 | 86,4 | 55,1 |

Antes habíamos mencionado que la subcuenca 3 es la que más agua produce, pero según la información del cuadro *7* se determina que esta diferencia no se atribuye al agua que se produce en la cabecera del Bebedero sino en la parte media baja, en la subcuenca 3. En la cuenca del Tempisque en general la temperatura es mayor que en la cuenca del Bebedero, generando mayor evapotranspiración y con ello menos agua en los ríos. La evapotranspiración actual tanto en la subcuenca 1 y 4 (Tempisque) es en promedio de 23 mm, mientras que en la subcuenca 2 la evapotranspiración actual es en promedio 18 mm y en la subcuenca 3 de 22 mm. Aunque la diferencia entre la evapotranspiración de la cuenca del Tempisque y la del Bebedero no es mucha, esta leve diferencia se traduce en menos disponibilidad de agua superficial

### 4.5. Conclusiones

Uno de los aspectos más importantes a resaltar de este primer capítulo es que los datos de entrada utilizados reflejaron exitosamente la disponibilidad de agua superficial en el área de estudio. Por un lado, los datos satelitales permitieron completar la información faltante y se demostró que pueden ser utilizados efectivamente cuando se carece de observaciones en el sitio como fue en este caso de las variables humedad relativa y velocidad del viento. A partir de los datos se realizaron interpolaciones que permitieron pasar de datos puntuales en el territorio a valores distribuidos espacialmente que reflejaron diferencias altitudinales.

Los datos para ingresar en WEAP fueron las ponderaciones por subcuenca para cada variable. Si bien esta es una metodología muy completa es poco eficiente debido al tiempo de procesamiento que requiere generar las interpolaciones. Para mejorar este aspecto se recomienda realizar las interpolaciones en programas diseñados para manejar altos volúmenes de datos como R o Python. Así mismo, para otros casos y cuando existe una alta cobertura de estaciones meteorológicas, se podría considerar prescindir de las interpolaciones e ingresar únicamente los valores ponderados de las estaciones dentro de las subcuencas.

En cuanto a la calibración del modelo se realizó una combinación entre una calibración visual y una sistemática con énfasis en los caudales mínimos. El coeficiente logNSE demostró mayor eficiencia en la simulación para la subcuenca 1 que para la subcuenca 2 (0,36), con una mejoría al realizar la calibración sistemática en el caso de la subcuenca 1 (0,79). Las subcuencas 3 y 4 no se pudieron calibrar ya que se carecía de datos sobre caudales en la parte del área de estudio. Se recomienda instalar medidores de caudal tanto en la parte alta como baja de las cuencas del Tempisque y Bebedero ya que los datos existentes son viejos. Lo anterior permitiría realizar más ejercicios de modelación, más certeros y asegurar los datos a futuro para este tipo de ejercicios. También se recomienda explorar las posibilidades de calibrar el modelo utilizando el complemento que trae WEAP, llamado PEST para la calibración o buscar cómo programar una calibración aleatoria utilizando por ejemplo R o Python. Los resultados de la simulación reflejan una adecuada variabilidad intra e interanual y el modelo es adecuado para la simulación de caudales mínimos, sobre todo en la cuenca el Tempisque.

## V. Capítulo: Estimación del efecto de las concesiones en la disponibilidad de agua superficial en las cuencas del Tempisque y Bebedero

En el capítulo anterior se calculó la oferta o disponibilidad superficial de agua en las cuencas Tempisque y Bebedero, en este se analizan las concesiones de agua superficial y su posible efecto en los ríos. Se describen las concesiones por uso y subcuenca, así como su ubicación, fuente y caudales concesionados. Después de realiza una resta simple del agua concesionada

al caudal simulado para ver el efecto de las concesiones en la disponibilidad, por último, se realizan unas conclusiones para este apartado.

### 5.1. Caudales concesionados por uso y subcuenca

La Cuadro 8 resume el acumulado del caudal concesionado por uso y subcuenca de fuentes superficiales según datos de la Dirección de Aguas. La cuenca del Tempisque (subcuenca 1 y 4) es la que en conjunto tiene más caudal concesionado con 16.703,22 l/s, mientras que en el Bebedero (subcuenca 2 y 3) el caudal concesionado suma a 7.177,61 l/s, esto es 2,3 veces menos que en el Tempisque.

Cuadro 8: Caudal concesionado en litros por segundo (l/s) para todos los usos por subcuenca, agua superficial, actualizado al 2017

| | **Tempisque** | | **Bebedero** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Usos | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 1 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 4 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 2 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 3 | Caudal concesionado (l/s) Total |
| Fuerza hidráulica | 0 | 0 | 0 | 0 | **0** |
| Industrial | 6 | 0 | 0 | 2 | **8** |
| Comercial | 0 | 0,03 | 0,92 | 8,09 | **9,04** |
| Consumo humano | 107,31 | 0,46 | 0,97 | 5,03 | **113,77** |
| Turismo | 29,66 | 3,3 | 0,57 | 99,77 | **133,3** |
| Agropecuario | 2,16 | 137,21 | 222,47 | 2.054,32 | **2.416,16** |
| Agroindustrial | 0 | 3568 | 0 | 0 | **3.568** |
| Riego | 1.999,25 | 10.849,84 | 2.220,07 | 2.563,4 | **17.632,56** |
| **Total** | **2.144,38** | **14.558,84** | **2.445** | **4.732,61** | **23.880,83** |

En cuanto a los usos, en el área de estudio no se destina agua para producir fuerza hidráulica. Los otros dos usos con poco caudal son el industrial y comercial. El uso industrial existe en la

subcuenca 3 y 1 con un total de 8 l/s concesionados. El uso comercial se concentra en la subcuenca 3 con 8 l/s y un total de 9 l/s. En orden de cantidad, siguen los usos para consumo humano y turístico. En el caso del uso para consumo humano, el caudal concesionado se concentra en la subcuenca 1 con 107 l/s y en el caso del uso turístico se acumula en la subcuenca 3, seguido de la subcuenca 1. Seguidamente, los usos con valores acumulados de más de 2000 l/s son el agropecuario, agroindustrial y por último el riego con la mayor cantidad (17.632,6 l/s). En el caso del uso agropecuario el caudal concesionado es mayor en la cuenca del Bebedero (2276,79 l/s) que en la del Tempisque (139,37 l/s) y se concentra el área de la subcuenca 3. El uso agroindustrial solo existe en la subcuenca 4, con 3.568 l/s concesionados, repartidos en dos concesiones, una por 3000 l/s y la otra por 568 l/s, pertenecientes a dos ingenios que procesan la caña. Por último, el uso con mayor caudal concesionado es el riego con un total de 17.632,56 l/s que se reparte entre las subcuencas 3 y 4, siendo la subcuenca 4 en la que más caudal se destina al riego 14.558,84 l/s.

## 5.2. Descripción de la distribución, fuente y caudales concesionados para consumo humano, agrícola y turístico,

Según la base de datos de concesiones, las concesiones dedicadas a abastecer la demanda doméstica se dividen en dos tipos de expedientes, los de tipos A que corresponden a aguas superficiales y los de tipo R que corresponden a acueductos rurales. El factor diferenciador, a pesar de que en los dos casos el agua se usa para abastecer el consumo doméstico, es el ente administrador, ya que, en el caso de los expedientes tipo R todos pertenecen al AyA. Al analizar la información se concluye que 2243,84 l/s concesionados para abastecer la demanda doméstica en el área de estudio, de esos 63% provienen de acuíferos y 37% de agua superficial. Se realiza una descripción de cómo se abastece la demanda doméstica, incluyendo los acuíferos, aunque posteriormente estos volúmenes no se incluyen en el análisis sobre el efecto de las demandas en el caudal, ya que representa un alto porcentaje del agua utilizada para abastecer la demanda doméstica.

La distribución de las concesiones que toman el agua de acuíferos (puntos rosados) se ubica en las planicies del área de estudio, mientras que las otras fuentes se ubican en las partes altas. En la figura 1.a se observa la distribución de las concesiones con el tipo de expediente "acueducto rural" y su fuente de suministro. Varios de los pozos se agrupan cerca de las cabeceras de cantón, u otros poblados donde se concentra la mancha urbana, por ejemplo, Liberia, Cañas, Tilarán, Santa Cruz, Sardinal y Palmira. En términos generales, los acuíferos más importantes en la zona de estudio son: Liberia-Bagaces, Tempisque y parte de El Coco, Basilito y Juntas. No es casualidad que las concesiones que pertenecen a acueductos rurales se agrupen cerca de poblados, justamente porque su propósito es abastecer la demanda doméstica. Tampoco es que casualidad que las concesiones abastecidas por fuentes superficiales se ubiquen en las partes altas del área de estudio, ya que en estos sitios es donde potencialmente hay más agua disponible.

En la figura 1.c se especifica el volumen concesionado de las concesiones de tipo acueducto rural (R). Los volúmenes concesionados se distinguen por símbolos graduados, así como colores distintos para facilitar su interpretación. Del total de concesiones, 131 (41,2%) tienen un caudal concesionado entre los 0,15- 47 l/s, cuatro (1,23%) un caudal entre 155 - 188,8 l/s y dos un caudal de 220 l/s; la otra mitad (57,5%) registra un caudal de cero. Estas concesiones con un caudal concesionado de cero se abastecen tanto a fuentes acuífero como aguas superficiales, pero se incluyen en la figura 1.a y c, justamente porque son la mitad de los expedientes R. En realidad, llama la atención que las concesiones estén vigentes, pero no se especifique un caudal concesionado, lo cual hace pensar que existe la posibilidad de extraer agua sin medida alguna, sobre todo porque ninguna concesión tiene fecha de caducidad.

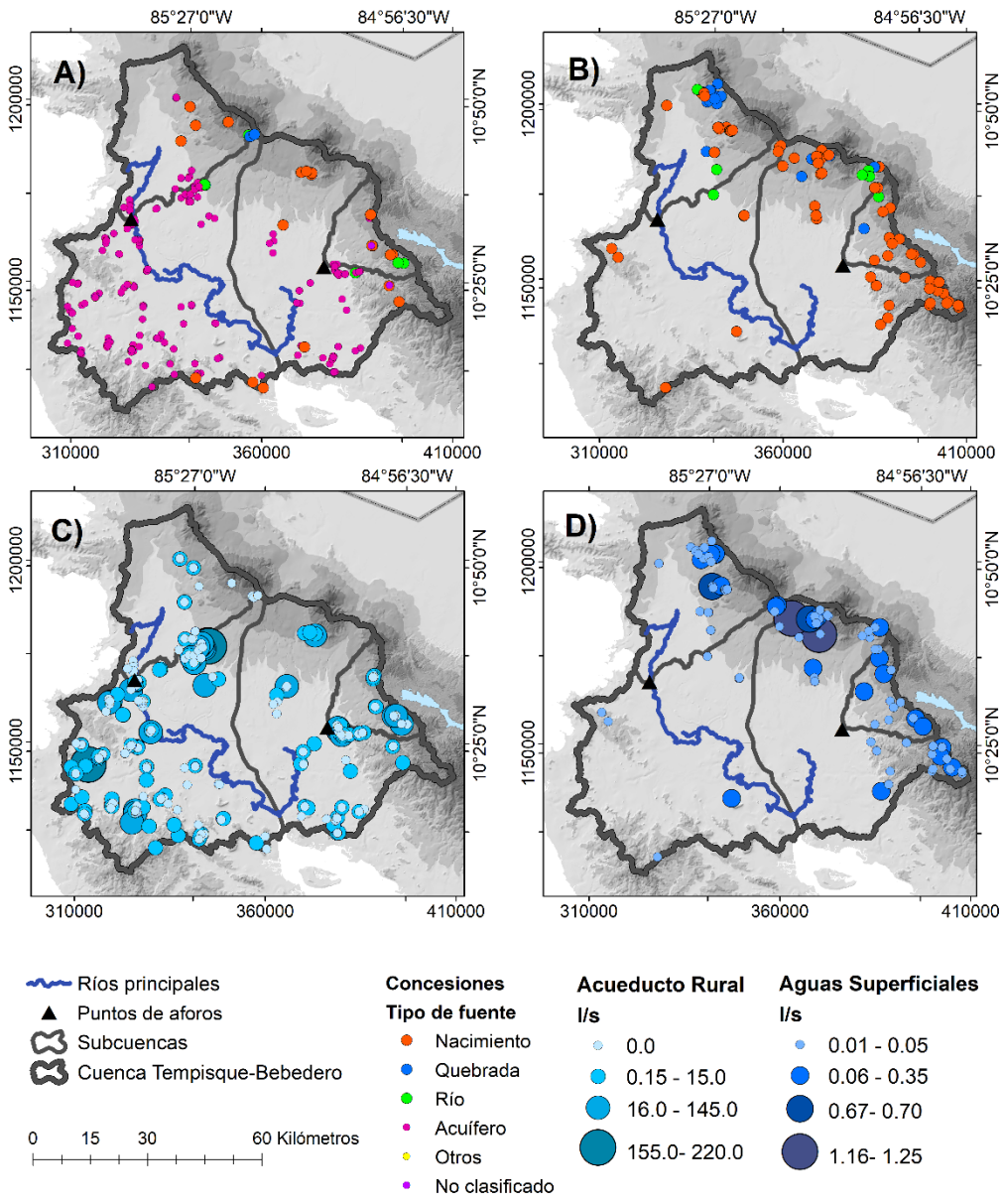


Figura 16: Agua para consumo doméstico en el área de estudio, 2017, A) Concesiones tipo Acueducto Rural B) Concesiones tipo Agua Superficial C) Caudales concesionados bajo la categoría de Acueducto Rural D) Caudales concesionados bajo la categoría de Agua Superficial. Fuente de datos Dirección de Aguas, MINAE y AtlasTEC, Proyección CRTM05, Datum WGS84

Las concesiones pertenecientes al tipo de expediente, acueducto rural, se abastecen en su mayoría de acuíferos, seguido de los ríos. Un total de 1412,2 l/s provienen de acuíferos, 631 l/s de ríos y 192,1 l/s de nacimientos; estas últimas dos fuentes suman a 823 l/s de fuentes

superficiales administradas por el AyA. Excluyendo los acuíferos, los 823 l/s se distribuyen por subcuenca y fuente como se observa en la Cuadro 9. En la subcuenca 1, la cabecera del Tempisque, hay un total de 24 l/s concesionados todos provenientes de nacimientos. En la subcuenca 2, cabecera del Bebedero, hay un total de 106 l/s concesionados, 76 l/s provienen de nacimientos y 30 l/s de ríos. En la subcuenca 3, parte media y baja del Bebedero, 87,8 l/s provienen de nacimientos y 6 l/s de ríos. En la subcuenca 4, parte media y baja del Tempisque, se concentra la mayor cantidad de agua concesionada al AyA, con un total de 599,3 l/s, repartidos en 440 l/s provenientes de ríos y 159,3 l/s de nacimientos.

Cuadro 9: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y subcuenca, para las concesiones con expediente tipo "Acueducto rural", actualizado al 2017

| | **Caudal (l/s) Subcuenca 1** | **Caudal (l/s) Subcuenca 2** | **Caudal (l/s) Subcuenca 3** | **Caudal (l/s) Subcuenca 4** |
|---|---|---|---|---|
| Nacimiento | 24 | 76 | 87,83 | 159,3 |
| Quebrada | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Río | 0 | 30 | 6 | 440 |
| **TOTAL** | **24** | **106** | **93,83** | **599,3** |

Las concesiones tipo A (aguas superficiales) utilizadas para abastecer el consumo humano, se distribuyen en la parte alta del área de estudio donde abundan las nacientes (puntos color naranja), seguido de las quebradas y ríos (figura 15.b). Todas las concesiones de fuentes superficiales tienen expedientes bajo nombres de personas o empresas y en todos los casos una concesión se destina a más de un uso (entre de los que destaca el agropecuario, riego y turismo) siendo el consumo humano la porción más pequeña del total del volumen concesionado por punto. En los expedientes tipo A, predominan las nacientes como suministro para consumo humano, posiblemente porque presentan la ventaja de que se pueden entubar desde la fuente y se podría prescindir de sistemas para la potabilización.

El agua superficial para consumo humano (expedientes tipo A) suma un total de 8,64 l/s y 106 concesiones. Del total de concesiones, noventa (84,9%) tienen un caudal concesionado menor a 0,1 l/s, cinco (4,7%) son de 0,1 l/s, siete (6,6%) están en el rango entre 0,14 y 0,35 l/s, dos (1,8%) entre 0,67 y 0,70 l/s y otras dos (1,8%) con 1,16 y 1,25 l/s siendo las más altas. Esto quiere decir que predominan las concesiones de poco caudal repartidas entre muchos concesionarios. En la siguiente Cuadro 10 se detallan los volúmenes agregados de las concesiones para uso doméstico, según el tipo de fuente y subcuenca, de los expedientes tipo A. En este caso, las nacientes son las fuentes más importantes para abastecer el consumo doméstico, en particular en las subcuencas 1 (cabecera del Tempisque) y subcuenca 3 (área media y baja de la cuenca del Bebedero). El agua concesionada para consumo doméstico en la cuenca del Tempisque es de 2,62 l/s y en la cuenca del Bebedero es tres veces más con 6,02 l/s.

Cuadro 10: Caudales concesionados para consumo humano según fuente y subcuenca, para las concesiones con expediente tipo “Agua superficial”, actualizado al 2017

| Agua Superficial | Caudal (l/s) Subcuenca 1 | Caudal (l/s) Subcuenca 2 | Caudal (l/s) Subcuenca 3 | Caudal (l/s) Subcuenca 4 |
|---|---|---|---|---|
| Nacimiento | 1,21 | 0,55 | 4,13 | 0,44 |
| Quebrada | 0,87 | 0,07 | 0,88 | 0 |
| Río | 0,08 | 0,35 | 0,04 | 0,2 |
| **TOTAL** | **2,16** | **0,97** | **5,05** | **0,46** |

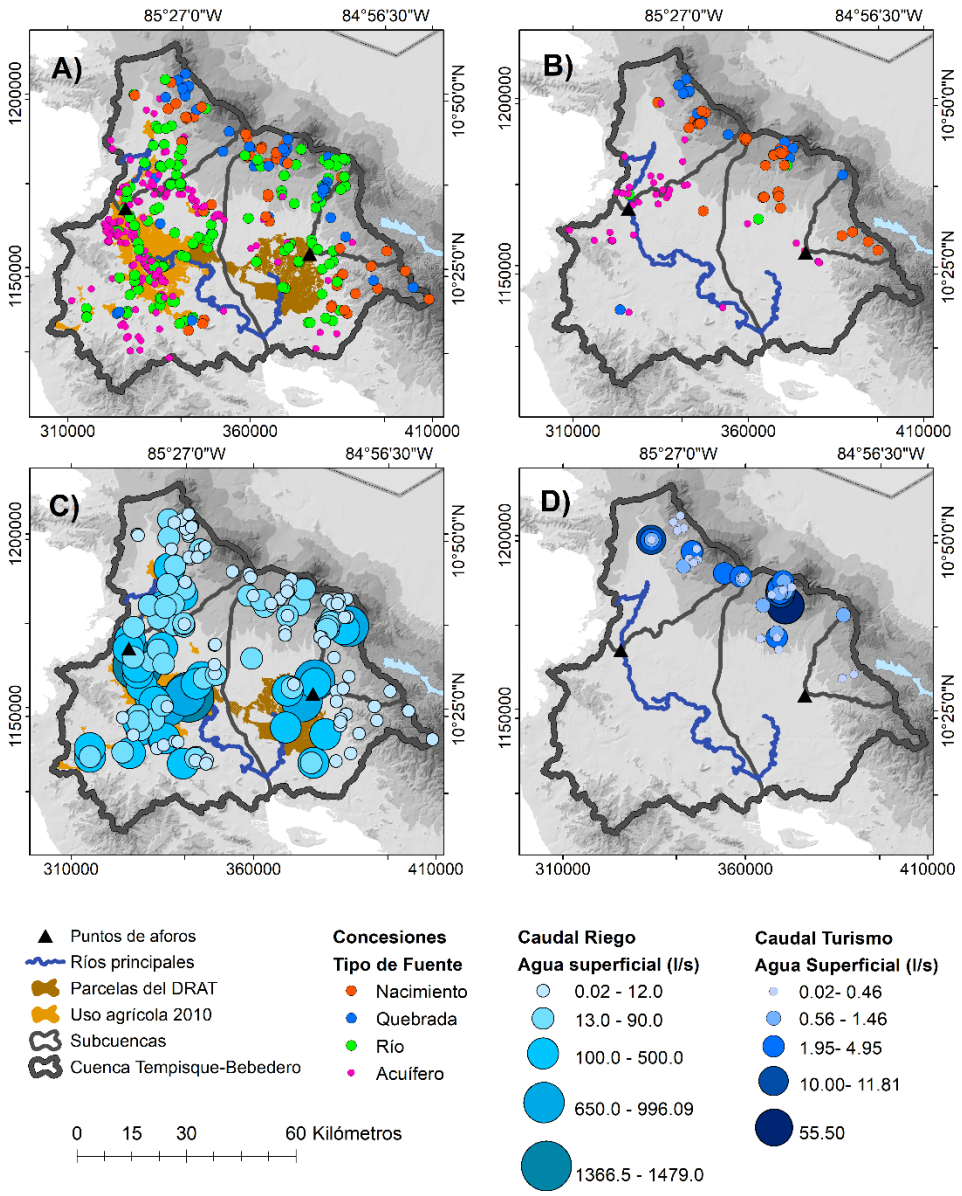


Figura 17: Agua para consumo agrícola y turístico en el área de estudio, 2017, A) Concesiones para uso agrícola B) Concesiones para uso turístico C) Caudales de agua superficial concesionados para uso agrícola D) Caudales de agua superficial concesionados para uso turístico, Fuente de datos Dirección de Aguas, MINAE y AtlasTEC, Proyección CRTM05, Datum WGS84

Sobre el uso del agua para el sector turismo, como se observa en la figura 16.b. las concesiones turísticas utilizan agua que proviene tanto de fuentes subterráneas como superficiales. Las fuentes superficiales se ubican sobre todo en las partes altas del área de estudio y las

subterráneas en las partes planas cerca de los poblados de Liberia, Sardinal y Palmira. En la figura 16.d se muestran los volúmenes por concesión, pero únicamente para aquellas que tienen fuentes superficiales, ya que como se mencionó anteriormente esta investigación se enfoca en la disponibilidad de agua superficial.

Las concesiones para uso turístico que se abastecen de fuentes superficiales son en total 58, suman un caudal de 133,3 l/s y se ubican en la parte alta del área de estudio (ver figura 2.b). La concesión con mayor caudal otorgado es de 55,5 l/s, se ubica en La Fortuna y proviene del río Peje; esta misma concesión también destina 24,5 l/s para actividades agropecuarias. Tres concesiones (5,1%) tienen un caudal de entre 10 – 11,81 l/s y todas toman el agua de nacimientos; una de las concesiones indica que es termal y se ubica también en La Fortuna. En el rango de 1,95 a 4,95 l/s hay once concesiones (19%) y en el rango entre 0,56 a 1,46 l/s hay doce concesiones que representan el 20,7%. Mientras que 31 concesiones, el 53,4%, tienen aprobados entre 0,02 y 0,46 l/s. De modo que solo cuatro concesiones tienen más de 11,81 l/s concesionados, de estas una está muy por encima con 55,5 l/s concesionados, el resto de las concesiones llega a un máximo de 5 l/s.

La fuente más importante para abastecer el uso turístico son los ríos (ver Cuadro 11), pero este valor corresponde a una sola concesión. Esta concesión de 55,5 l/s, es la única de las turísticas, que toma el agua de un río y se ubica en la subcuenca 3. La segunda fuente en importancia son las nacientes, sobre todo en la subcuenca 1 (cabecera del Tempisque) y en la subcuenca 3 (área media y baja de la cuenca del Bebedero). En la subcuenca 3 el agua se utiliza para abastecer la zona de La Fortuna, que es un conocido pueblo turístico ubicado en la parte alta de la cuenca del Bebedero y zona de influencia del Parque Nacional Arenal. En la subcuenca 1 el agua se utiliza para desarrollos turísticos pequeños en las cercanías de Cañas Dulces y hacia el NNE de Mayorga, zona de influencia del Parque Nacional Rincón de la Vieja. En total, en la cuenca del Tempisque 32,96 l/s de agua superficial se destinan a satisfacer la demanda turística y en la cuenca del Bebedero son 100,34 l/s.

Cuadro 11: Caudales concesionados para consumo turístico según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017

| | Caudal (l/s) Subcuenca 1 | Caudal (l/s) Subcuenca 2 | Caudal (l/s) Subcuenca 3 | Caudal (l/s) Subcuenca 4 |
|---|---|---|---|---|
| Nacimiento | 24,27 | 0,57 | 36,01 | 3,3 |
| Quebrada | 5,39 | 0 | 8,26 | 0 |
| Río | 0 | 0 | 55,5 | 0 |
| **TOTAL** | **29,66** | **0,57** | **99,77** | **3,3** |

Por otra parte, las concesiones cuyo caudal se dedica al riego proviene de fuentes superficiales como subterráneas. De las 343 concesiones en el área de estudio destinadas a este uso, 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales y otras 157 (45,7%) se abastecen de aguas subterráneas. En la cuenca del Tempisque existen los dos tipos de fuentes mientras que en la del Bebedero predominan las fuentes superficiales, en esta cuenca en particular, la mayoría del agua para riego proviene de los canales del DRAT. Las concesiones que se observan en la figura 2.a abastecen áreas agrícolas pequeñas que no son parte del DRAT. En la figura 2.a se observa la distribución de las concesiones para riego según la Dirección de Aguas, los colores diferencian los tipos de fuente. Se contabiliza un total de 18422,36 l/s y 343 concesiones, de esas 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales y 157 (45,7%) de aguas subterráneas, estas últimas concentradas en la parte baja de la cuenca del Tempisque. Los propietarios de concesiones de agua subterránea para riego, tiene la posibilidad de tener acceso a agua durante la época seca o en periodos de sequía, cuando el agua superficial escasea.

En las figuras 2.c se distingue, gracias a símbolos graduados y con distintos colores, los volúmenes de agua superficial concesionados para riego. Las concesiones con mayor caudal se encuentran en un rango entre 1365,5 l/s y 1479 l/s, representan el 1,1% del total, se ubican en la cuenca del río Tempisque y extraen el agua directamente de este río. Seguidamente, con un

rango de caudal concesionado entre 650 – 996 l/s hay 6 concesiones (3,2%). Estas 6 suman a un total de 7580,5 l/s y toman el agua de tres ríos: tres del río Tempisque (2400 l/s); dos del río Corobicí (1686 l/s); y una del Tenorio por 650 l/s. En el rango entre 100 y 500 l/s hay 31 concesiones (16,8 %) de estas 24 se ubican en la cuenca del Tempisque, 6 en la cuenca del Bebedero. Cincuenta concesiones (27 %) tienen permiso de extraer entre 13 y 90 l/s y, 94 concesiones (50,8%) extraen entre 0,02 y 12 l/s. Del total de concesiones para riego 78% tienen permiso de extraer entre 0,02 y 90 l/s, 21% entre 100-996 l/s y un 1% entre 1365,5 l/s- 1479 l/s.

Cuadro 12: Caudales concesionados para riego según fuentes superficiales y subcuencas, actualizado al 2017

| | Caudal (l/s) Subcuenca 1 | Caudal (l/s) Subcuenca 2 | Caudal (l/s) Subcuenca 3 | Caudal (l/s) Subcuenca 4 |
|---|---|---|---|---|
| Nacimiento | 8,98 | 3,29 | 15,53 | 12,93 |
| Quebrada | 199,74 | 4,38 | 211,96 | 101 |
| Río | 1890,53 | 2.202,93 | 3.035,38 | 10.735,91 |
| **TOTAL** | **2.099,25** | **2.210,6** | **3.262,87** | **10.849,84** |

La parte media y baja de la cuenca del Tempisque (subcuenca 4), es el área con más agua concesionada para riego (Cuadro 12). Con respecto a la subcuenca 3, que es la segunda con más agua concesionada para riego, en la subcuenca 4 se destinan 3,3 veces más agua. En la toda la cuenca del río Tempisque hay concesionados 12.949,09 l/s para riego y en la cuenca del Bebedero 5. 473,47 l/s, 2,4 veces menos que en el Tempisque. Tal como queda claro en la Cuadro 5 la mayoría del caudal concesionado para riego proviene directamente de los ríos, seguido de las quebradas y nacimientos.

### 5.3. Caudal remanente después de la extracción motivo de las concesiones

Seguidamente se estima el efecto de las concesiones abastecidas por fuentes superficiales, podrían tener en la disponibilidad de agua. En el cuadro 13 se resume el total del agua superficial

concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca. En caso de los expedientes tipo A se incluyen todos los tipos usos y en el caso de los expedientes tipo R, los caudales indicados corresponden únicamente al uso doméstico. La subcuenca con más extracciones es la 4 ya que en ambos tipos de expedientes es la cuenca con más caudal concedido. Como se observa en la Cuadro XX, las cuencas altas, tanto la subcuenca 1 como la 2 tienen un caudal concesionado total entre 2 mil y 2500 l/s. La subcuenca 3, la parte media y baja del río Bebedero, tiene concesionado el doble de caudal, unos 4826,44 l/s. Mientras que la subcuenca 4 está siete veces más concesionada que las cuencas altas, con un total de 15.158,14 l/s.

Cuadro 13: agua superficial concesionada según tipo de expediente para cada subcuenca

| | **Tempisque** | | **Bebedero** | | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|
| Agua superficial | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 1 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 4 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 2 | Caudal concesionado (l/s) Subcuenca 3 | Caudal concesionado (l/s) |
| Expedientes tipo A | 2.144,38 | 14.558,84 | 2.445,00 | 4.732,61 | 2.880,83 |
| Expedientes tipo R | 24,00 | 599,30 | 106,00 | 93,83 | 823,13 |
| Total | 2.168,38 | 15.158,14 | 2.551,00 | 4.826,44 | 24.703,96 |

Se toma como base el caudal simulado y se le resta el volumen concesionado asumiendo varios escenarios. Los escenarios consisten en asumir diferentes porcentajes de consumo del caudal concesionado, como un 100%, 80%, 60%, 40% o 20%. En los siguientes Figuras, para cada subcuenca, se graficó el caudal simulado, el caudal después de un consumo del 100%, el caudal después de un consumo del 60% y la diferencia porcentual entre el caudal simulado y el caudal después de un consumo del 100%. El motivo por el cual se decide enfocar el análisis en un escenario de consumo del 100%, aunque sea poco realista, es porque de esta forma nos apegamos al registro de caudales concesiones. Por otro lado, el escenario de consumo del 60%

representa un punto intermedio, alejado de los extremos, representando un escenario de consumo moderado.

En el Tempisque la posibilidad de que el río se seca consecuencia de las concesiones es más alta en la subcuenca 4 que en la subcuenca 1. Asumiendo un consumo del 100%, en la subcuenca 1, en los primeros 4 meses del año 1993 el río se habría secado (ver figura 18.a), la diferencia porcentual es del 100%, lo que indica que el río se seca. El río se seca solo en ese momento y no en otros ya que al inicio de la serie los caudales son muy bajos consecuencia de la inexactitud propia de todo modelo hidrológico. En esta misma cuenca los meses más críticos habrían sido entre marzo y mayo del año 1997 y 1998 donde el río se habría secado por 3 meses. Esto es producto de una disponibilidad de agua reducida resultado de la sequía de 1997-1998, periodo en que las lluvias disminuyeron. En el periodo entre 1993 y 2004, cada año, en los meses entre marzo, abril y mayo se registran disminuciones de entre -40% y -60%, lo que ejemplifica que durante esos meses hay más posibilidad de que las concesiones tengan un efecto negativo en la disponibilidad de agua en el río. Del 2005 hasta el 2016, la disminución entre el caudal simulado y el caudal después de las extracciones disminuyen, resultado de una leve tendencia positiva en el caudal simulado a partir del 2005 que compensa por las extracciones, sin embargo, marzo, abril y mayo se mantienen como los meses con registros de caudal más bajo.

La disponibilidad del agua en la subcuenca 4 es mucho más que en la 1, con un máximo de 297 $m^3/s$ frente a 85 $m^3/s$ en la 1, no obstante, debido a que el caudal concesionado es significativamente mayor en la subcuenca 4 el caudal puede verse seriamente reducido por las concesiones. Por ejemplo, durante el primer semestre del año 1993 entre enero y junio (ver figura 18.b) el caudal concesionado supera la disponibilidad, resultando en valores de déficit del 100% lo que indica que el río se seca. Al igual que en la parte alta de la cuenca, a lo largo del periodo entre 1993 y el 2016 en los meses de marzo, abril y mayo las extracciones tienen el potencial de disminuir considerablemente el caudal natural, ya sea que se asuma un consumo

del 100% como de un 60%. El peor escenario es asumir un consumo del 100%, donde en los meses mencionados, según una resta simple, el río se seca o el caudal es menor a 2 $m^3/s$. Bajo ese escenario, entre 1993-2000, en el mes de abril el río se seca, del año 2000 en adelante la disminución en el caudal se mantiene, aunque no se llega a secar.

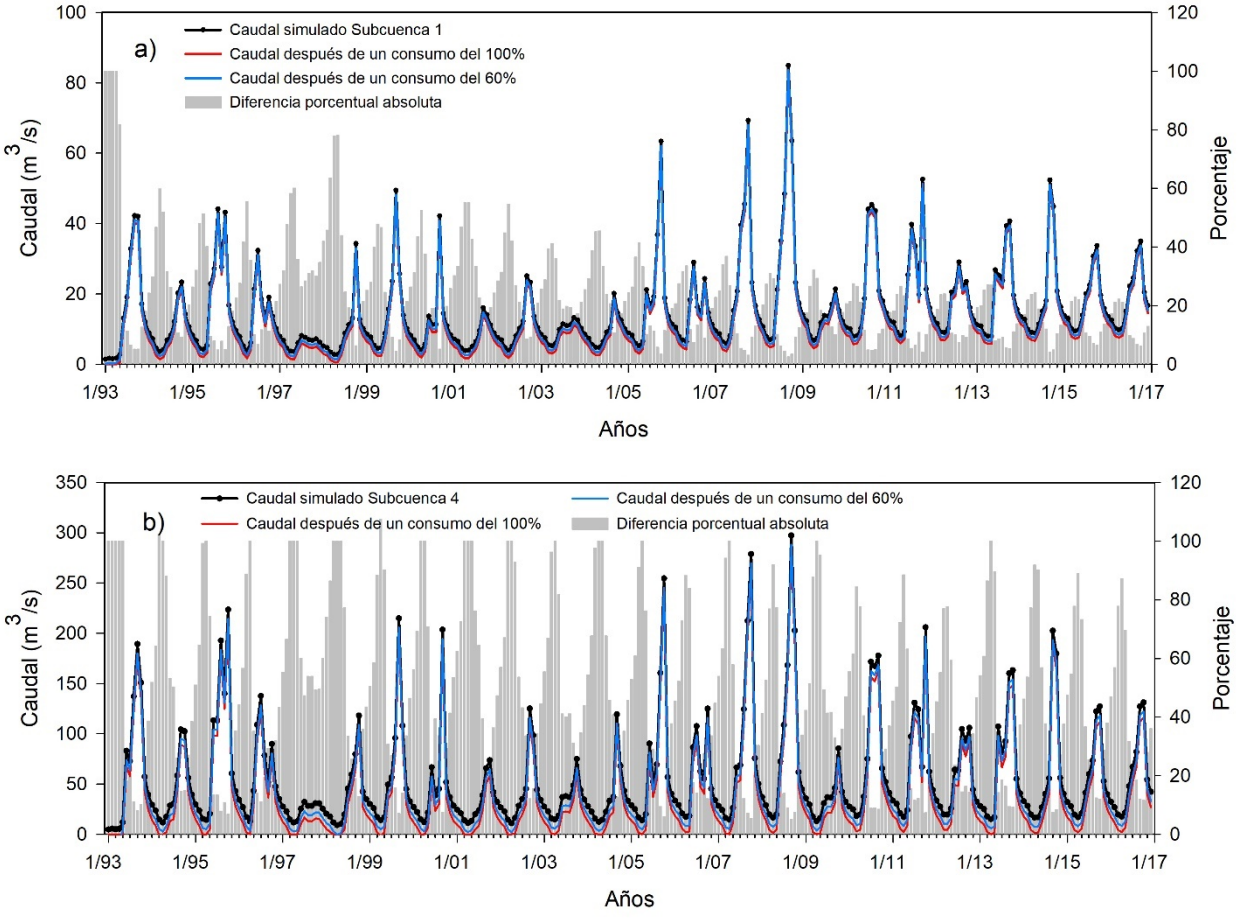


Figura 18: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Tempisque

En el caso de la cuenca del río Bebedero el caudal concesionado no tiene un efecto significativo en la disponibilidad de agua. Como se observa en la figura 18.a, en la subcuenca 2, la diferencia

porcentual entre el caudal simulado y el que quedaría después de un consumo del 100% llega a un máximo de -53% en el mes de abril de 1993. Así como en la cuenca del Tempisque, en los primeros meses de 1993 WEAP genera simulaciones bajas producto de las inexactitudes propias de cualquier modelo. A pesar de esto, en ningún momento, en toda la cuenca del río Bebedero (ver figura 19.a y b), existe la posibilidad de que el río se seque cuando al sumir que el caudal concesionado se consume en un 100%. En la subcuenca 3 la diferencia entre el caudal simulado y el caudal remanente después de una extracción del 100% es mínima, con una disminución porcentual máxima de -23%. Esta parte de la cuenca del Bebedero tiene el doble de agua concesionada con respecto a la parte alta y a pesar de eso el caudal no se ve tan afectada por las concesiones con en la subcuenca 4. Lo anterior se debe a que la subcuenca 3 genera más agua que la subcuenca 4, con mínimos más altos, y además el agua concesionada en la subcuenca 3 es tres veces menos que en la 4.

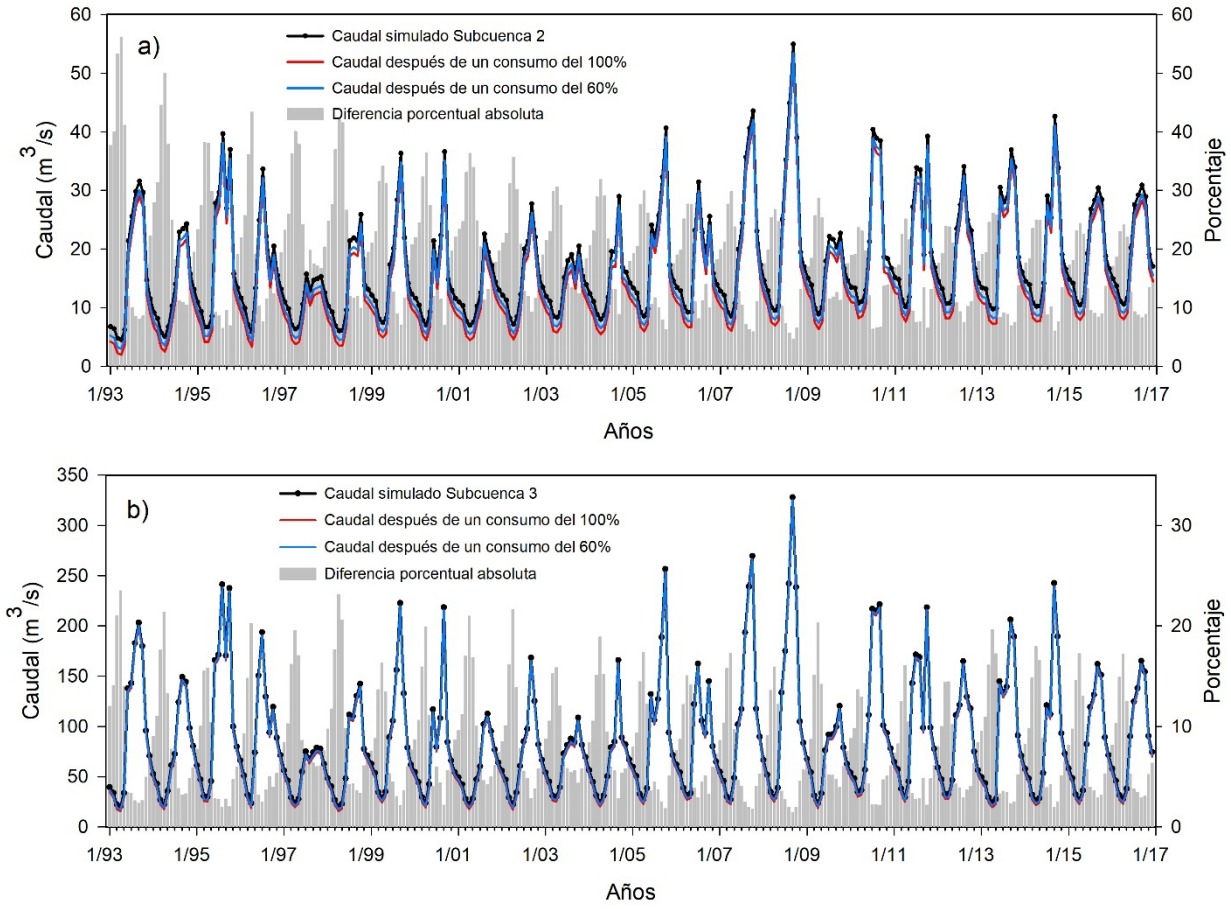


Figura 19: Resultados del efecto de las concesiones en el caudal al realizar una resta simple, río Bebedero

En la investigación de Guzmán-Arias (2013) se determina que la cuenca alta del río Tempisque la posibilidad de que la disponibilidad de agua sea insuficiente para satisfacer las demandas es alta. En esa investigación se contabilizó un total concesionado de 12 $m^3/s$ al 2008, caudal que, según sus datos, supera la disponibilidad en los meses de marzo (10,5 $m^3/s$) o abril (8,9 $m^3/s$) al asumir que se extrae el total de los valores concesionados. Además, señala que en caso de implementarse un caudal ambiental existe la posibilidad de generar conflictos con los concesionarios ya que tendrían que disminuir la cuota que se les permite extraer.

En nuestro caso, para la subcuenca 1 se contabilizó un caudal concesionado total de 2,1 $m^3/s$ en base a información de la Dirección de Aguas actualizada al 2017. Puede que la diferencia de

10 $m^3/s$ entre lo contabilizado en esta investigación y lo contabilizado por Guzmán-Arias (2013) se deba al acceso y disposición de los datos, ya que en su caso la información no se limita a la base de datos de la Dirección de Aguas, sino que se complementa con visitas a otras instituciones clave. Por otro lado, en el tema de agua disponible ella estima una disponibilidad de 10,5 $m^3/s$ en marzo y de 8,9 $m^3/s$ en abril, lo que también difiere con nuestros resultados ya que en promedio para esos meses nuestro caudal simulado en la subcuenca 1 es de 6,5 $m^3/s$ en marzo y de 5,8 $m^3/s$ en abril. Aquí el factor que marca la diferencia es que en el trabajo de Guzmán-Arias el caudal modelado es para el periodo entre 1951-1969 con datos de precipitación esa fecha, así como caudales de ese entonces para la calibración. Ella argumenta que el motivo por el que eligió utilizar esos datos es que es el periodo que mejor representa lo que sería el caudal natural. En promedio, la diferencia entre sus resultados de caudal y los de esta investigación es de 3,5 $m^3/s$, sin embargo, habría que ahondar con mayor profundidad para saber si los resultados son comparables.

A pesar de las diferencias de resultados encontramos puntos de conciencia. A diferencia de los resultados de Guzmán-Arias (2013) en esta investigación no se encontró que para la cuenca alta del Tempisque hubiera una sobre concesión, aunque sí lo determinamos para la subcuenca 2, la parte media y baja del Tempisque. Donde encontramos similitudes, es que en ambos casos se tuvo que asumir que el caudal concesionado en los expedientes equivale a la extracción real, cuando en realidad la extracción real no es la que se registra en los permisos. Cuando los datos son deficientes, poco confiables o peor aún no reflejan la realidad, los resultados de los ejercicios de análisis siempre dependerán del manejo que se les dé a los datos, lo que imposibilita que la información de una investigación pueda compararse con otra. Para revertir esto en necesario mejorar los sistemas de monitoreo, en este caso en particular y monitoreo de cuánta agua se extrae de las fuentes de agua superficial, para lo que se requeriría instalar medidores en las tomas de las concesiones.

## 5.4. Conclusiones

No se realizó un análisis de la normativa y administración de la Dirección de Aguas, pero al revisar la base se identificaron aspectos de mejora para el control de las concesiones. En el caso particular de las concesiones del AyA de tipo “acueducto rural”, ante la falta de información, sobre todo por concesiones que registran un caudal concesionado de cero, esto hace pensar que hay poco control de los permisos otorgados. El agua que administra el AyA es de prioridad, ya que abastece el consumo doméstico, si se quiere velar por la sustentabilidad del sistema hídrico, estas concesiones deben ser vigiladas para asegurar que no se perjudique el sistema a largo plazo. En todo caso, para todas las concesiones y bajo el mismo principio de velar por la sustentabilidad del recurso a largo plazo hace falta conocer la variabilidad interanual del agua que se toma por concesión. Es decir, para realizar una contabilidad real de la demanda con es suficiente un dato de caudal concesionado, hace falta colocar medidores en las tomas, para contabilizar las variaciones de extracción en el tiempo. Si Costa Rica y Guanacaste desean contar con un balance hídrico completo y comparable, hay que tomar medidas que nos permitan tener los datos necesarios para lograrlo, porque la información actual es insuficiente.

El caudal concesionado para cubrir la demanda doméstica suma a 2243,84 l/s, de ese 1412,21 l/s provienen de acuíferos y 831,64 l/s de nacientes, ríos y quebradas. Los 831,64 l/s se dividen en: 823 l/s asociados a expedientes del tipo R, acueducto rural, administrados por AyA; 8,64 l/s asociados a expedientes tipo A, expedientes de agua superficial, que pertenecen a personas particulares. En este caso, las concesiones también se destinan a otros usos y esos otros usos tienen un caudal concedido mayor. En el caso de los expedientes tipo A, las cuencas están concesionadas en el siguiente orden de menor a mayor: subcuenca 4, 2, 1 y 3. Esto quiere decir que la subcuenca 3, la parte media y baja del Bebedero, con 5 l/s es la que más agua concesionada tiene para abastecer el consumo humano. En los expedientes tipo R, el orden de cuencas concesionadas cambia por completo y al dedicar mucha más agua, cambia el orden, en definitiva. En este caso, en la subcuenca 4, se destinan 599,3 l/s provenientes de ríos, nacientes y quedaras, para abastecer la demanda doméstica. Seguido de la subcuenca 2 con 106 l/s, la

subcuenca 3 con l/s y la subcuenca 1 con 24 l/s. En conjunto entre los expedientes tipo A y R, en el Tempisque se destinan 625,92 l/s para abastecer la demanda doméstica y en el Bebedero 205,85 l/s.

Para el sector turismo en la cuenca del Tempisque hay un total concesionado de 32,96 l/s y en la cuenca del Bebedero 100,34 l/s. En la cuenca del Tempisque, el caudal concesionado para turismo se concentra en la subcuenca 1 y se utiliza para abastecer pequeños desarrollos turísticos en las cercanías de Cañas Dulces y hacia el NNE de Mayorga, zona de influencia del Parque Nacional Rincón de la Vieja. En la cuenca del Bebedero, el caudal concesionado se concentra en la subcuenca 3, con las mayores concesiones ubicadas cerca de La Fortuna, que es un conocido pueblo turístico ubicado en la parte alta de la cuenca del Bebedero y zona de influencia del Parque Nacional Arenal.

Para riego se contabilizan 343 concesiones en el área de estudio, de esas 185 (53,9%) provienen de aguas superficiales, con un aporte primario de ríos, sobre todo en la parte media y baja del río Tempisque. En el caso del agua para riego que proviene de nacientes y quebradas, estas se ubican en su mayoría en las zonas altas de la cuenca. Del total de concesiones para riego de fuentes superficiales 78% tienen permiso de extraer entre 0,02 - 90 l/s, 21% entre 100 - 996 l/s y un 1% entre 1365,5 l/s- 1479 l/s, lo que indica que 1% de los concesionarios tienen derecho a 16,4 veces más de agua que el otro 78%.

Asumiendo un 100% de consumo del total de agua superficial concesionada en los expedientes tipo A y R, la subcuenca 4 tiene el potencial de secarse producto de las concesiones. La disponibilidad de agua en la subcuenca 4 es mucho más que en la 1, con un máximo de 297 $m^3/s$ frente a 85 $m^3/s$ en la 1, no obstante, debido a que el caudal concesionado es significativamente mayor en la subcuenca 4el caudal puede verse seriamente reducido por las concesiones. Sobre todo, durante los meses de marzo abril y mayo, siendo el mes de abril la constante. Si bien este ejercicio no representa la realidad, sí permite identificar que realizar una extracción de agua indistinta entre la época lluviosa y la seca, aumenta la posibilidad de que el

caudal disminuya considerablemente; en particular en la parte media y baja del río Tempisque motivo de grandes concesiones para el sector agrícola.

Finalmente, mientras Guzmán-Arias (2013) determina que la cuenca alta del Tempisque está sobre concesionada en esta investigación no se obtienen los mismos resultados. A pesar de que en esta investigación se aproxima una disponibilidad de agua menor que los resultados de Guzmán-Arias, el caudal concesionado que se determina en esta investigación para la cuenca alta del Tempisque es 6 veces menos. Lo anterior refleja que los registros de caudal concesionado varían según las instituciones que se consulte. Esto no solo refleja un problema de registro, sino que agrava la inminente realidad de que el consumo real de las concesiones es desconocido. Lo anterior causa que las investigaciones que consideren demandas de agua no sean comparables y en general pone en riesgo la sustentabilidad del recurso hídrico.

## VI. Capítulo: Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero ante diferentes escenarios hipotéticos incorporados en el programa WEAP

En el capítulo anterior se concluye que realizando una resta simple y asumiendo un consumo del 100% del caudal concesionado la parte media y baja del Tempisque está sobre concesionada. En este capítulo seis, se realiza una aproximación de la demanda para el sector doméstico, turístico y agrícola basado en el consumo promedio de las personas y los cultivos. Esa información se agrega a WEAP y se calcula si la disponibilidad de agua es suficiente para abastecer todas las demandas. Se concluye que en la cuenca media y baja del Tempisque la demanda del sector agrícola puede superar la disponibilidad. Mientras que en la parte media y baja del Bebedero existe un excedente de agua motivo del trasvase proveniente del proyecto ARCOSA. Luego se discute la sustentabilidad hídrica general de las cuencas Tempisque y Bebedero al contrastar nuestros resultados e información con las disposiciones sobre la sustentabilidad hídrica en el país emitidas por la Contraloría General de la República en el 2014.

## 6.1. Demandas de agua para el sector doméstico y turístico y su efecto en la disponibilidad

En este capítulo exploraremos el efecto de la demanda desde el punto de vista de las necesidades de abastecimiento por sector. En el caso de la demanda doméstica y turística, a pesar de que el agua proviene en su mayoría de fuentes subterráneas como se discutió en el capítulo anterior, nos enfocamos solo en las tomas superficiales. La demanda por sector se calcula aproximando la necesidad de agua por unidad de consumo, por ejemplo, en el caso de la demanda doméstica se refiere a las personas. También se es necesario conocer el consumo promedio por persona o en el caso de sector agrícola el consumo promedio por cultivo. En este capítulo primero discutiremos los resultados de incluir la demanda doméstica y turística en WEAP y por último los resultados de incluir la demanda agrícola y sus efectos en el caudal.

No obtuvimos información de cuántas personas se abastecen de cada tipo de fuente, información que es necesaria para incluir las demandas en WEAP, de modo que el dato de personas abastecidas se aproximó. Según los valore publicados por la gaceta, se asumió que el consumo por persona es de 200 litros de agua al día y que en caso de los turistas el consumo es de 350 litros al día (Instituto Meteorológico Nacional, 2004). Luego se tomó el caudal concesionado por subcuenca y se dividió entre el consumo por persona, con lo que se obtuvo el aproximado de personas abastecidas como se observa en el siguiente Figura.

Cuadro 14: Personas abastecidas en un año, actualizada al 2017

| | Subcuenca 1, personas en un año | Subcuenca 2, personas en un año | Subcuenca 3, personas en un año | Subcuenca 4, personas en un año | Total personas en un año |
|---|---|---|---|---|---|
| Consumo humano | 11.301 | 47.974 | 40.733 | 259.317 | 359.547 |
| Turismo | 7.322 | 141 | 24.629 | 815 | 32.983 |
| Total | 18.623 | 48.114 | 65.362 | 260.131 | 392.531 |

En toda el área de estudio, se abastece aproximadamente a 292 mil personas con agua de fuentes superficiales, de esas, 359.547 mil personas usan el agua para fines domésticos y 32.983 son turistas. Del total de personas abastecidas para consumo doméstico la mayoría se ubica en la subcuenca 4 un 72%. En el caso de la demanda turística la mayoría se ubica en la subcuenca 3 con un 75% que corresponde a las concesiones ubicadas en La Fortuna San Carlos.

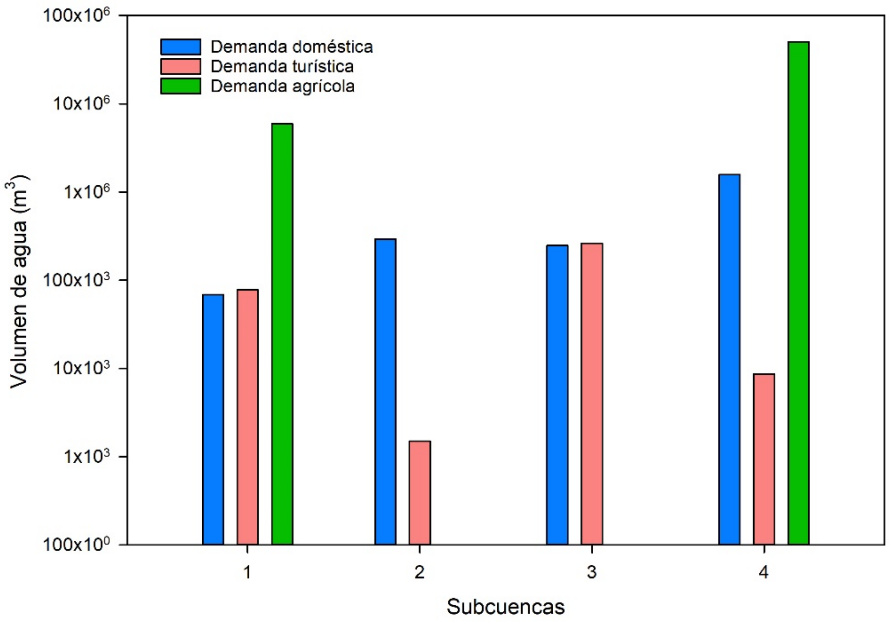


Figura 20: Volumen de la demanda para el sectores doméstico, turístico y agrícola

En el Figura 20 se detalla el volumen ($m^3$) promedio de demanda para cada sector, la demanda se refiere al volumen necesario para satisfacer las necesidades. La demanda está directamente relacionada a la unidad de consumo, en el caso de la demanda doméstica y turística a las personas, y en el caso de la agricultura al área cultivada por cultivo. En la subcuenca 4 se donde se ubica la mayor demanda agrícola y doméstica, en promedio por mes se requieren aproximadamente 1,5 millones de $m^3$ para abastecer la demanda doméstica y 50,2 millones de $m^3$ para abastecer la demanda agrícola; la demanda turística es de 8 mil de $m^3$. En la subcuenca

1, la demanda promedio por mes es de 68, mil $m^3$ para el sector doméstico, 77,9 mil $m^3$ para el sector turismo y 5,9 millones de $m^3$ para el sector agrícola.

Cuadro 15: Caudal de requerimiento para los sectores doméstico, turístico y agrícola

| Promedio mensual | Subcuenca 1 | Subcuenca 2 | Subcuenca 3 | Subcuenca 4 | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|
| Caudal de requerimiento doméstico ($m^3/s$) | 0,03 | 0,12 | 0,10 | 0,67 | **0,92** |
| Caudal de requerimiento turístico ($m^3/s$) | 0,03 | 0,001 | 0,11 | 0004 | **0,15** |
| Caudal de requerimiento agrícola ($m^3/s$) | 2,51 | | | 21,22 | **23,74** |

Se concluye que la demanda doméstica y turística no representan una amenaza a la disponibilidad de agua. En la Cuadro 15 se especifican los caudales de requerimiento por sector para cada subcuenca, esto quiere decir que los valores incluyen un 10% de perdida en los sistemas de abastecimiento y aun contabilizando este valor de pérdida adicional, el requerimiento es muy bajo en comparación a la disponibilidad. Tampoco habría problema si la población aumenta, el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC 2012) estima que la tasa anual de crecimiento por cada 100 habitantes se mantendrá hasta el 2025 en 1,5%. Si asumiéramos que más personas se abastecen de fuentes superficiales, el crecimiento es tan poco que no representa una amenaza para la disponibilidad. Mientras que la demanda agrícola sí tiene el potencial de disminuir considerablemente la disponibilidad en la subcuenca 4, inclusive secar el río según el análisis realizado.

### 6.2. Demanda agrícola y su efecto en la disponibilidad

El sector doméstico y turístico no tienen el potencial de afectar significativamente la disponibilidad de agua superficial el sector agrícola sí lo tiene. Como se observa en la última columna del cuadro 15, en la cuenca del Tempisque el caudal de requerimiento para el sector agrícola es del 23,74

$m^3/s$ y la demanda es de 19 $m^3/s$. El otro aspecto que resalta en el cuadro 15 es que no hay información para las subcuencas 3 y 4 que en conjunto representan la cuenca del río Bebedero. El motivo es que la gran mayoría del área agrícola en esa cuenca se abastece de los canales de riego, parte del Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT), proyecto que a su vez se abastece del agua sobrante del complejo ARCOSA y que es el medio para trasvasar agua de la vertiente Caribe. Por lo tanto, si bien existen similitudes en los cultivos que se producen, el tipo y periodo de los datos varía, motivo por el que cada cuenca se trabajó por separado.

En la figura 21 se observan las áreas agrícolas de la cuenca del Tempisque y la del Bebedero con colores distintos, la diferenciación de color tiene el propósito de resaltar la diferencia en la fuente de datos. La mancha café es el área agrícola del Bebedero con 33.405 hectáreas y conforma el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT), proyecto administrado por el SENARA. El área agrícola de la cuenca del Tempisque (polígono naranja) es de 62.733 hectáreas, el doble que la del Bebedero, y se obtuvo a partir de una reclasificación de información suministrada por la Escuela de Geografía. Considerando que la cuenca del Bebedero cuenta con el DRAT, aportando agua adicional a la naturalmente disponible. Llama la atención que el área agrícola en la cuenca del Tempisque sea el doble que en la del Bebedero, considerando que las condiciones que facilita el DRAT posibilitan más posibilidades de mitigar y adaptarse a la época seca y en particular a los efectos del Niño (ENOS).

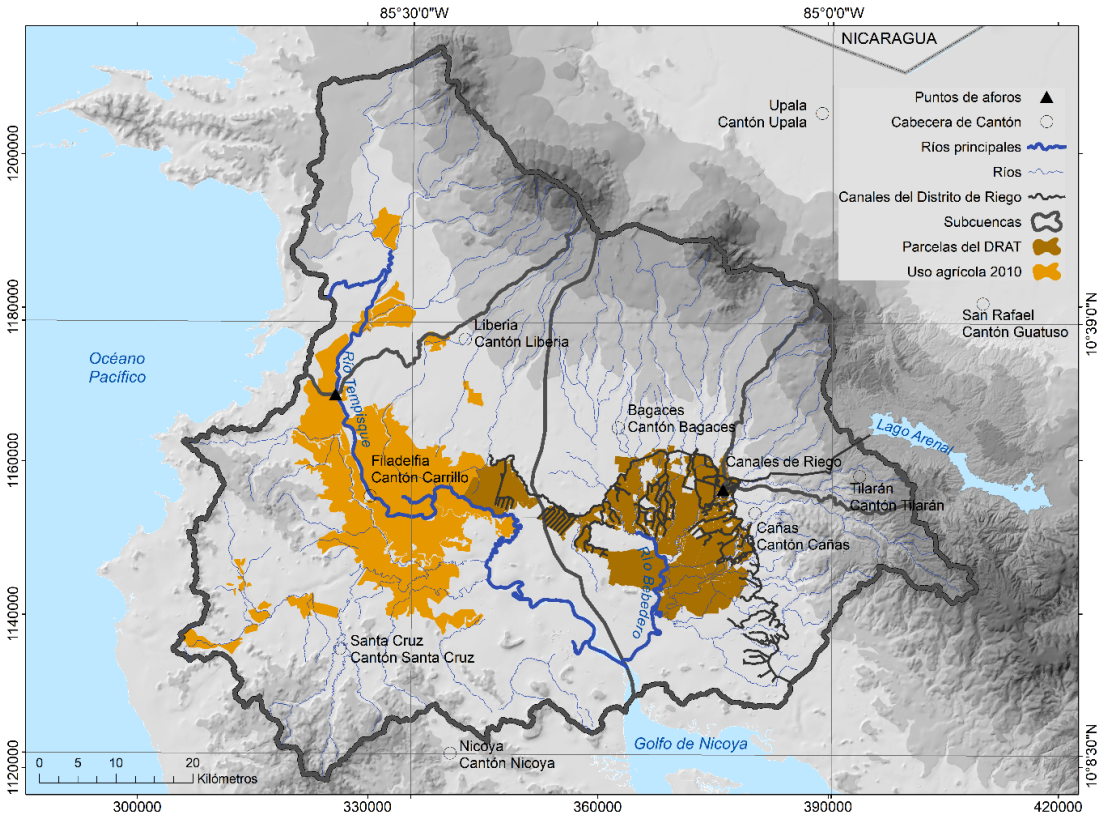


Figura 21: Tipo de cobertura para las cuencas del Tempisque y Bebedero

Conocer el área agrícola total no es suficiente, se requiere conocer las áreas cultivadas según cultivo para estimar la demanda. En el caso del área agrícola en la cuenca del Tempisque, las diferencias según cultivo son un aproximado inferido a partir de los nombres de las concesiones dentro del área agrícola. Mientras que en la cuenca del Bebedero sí se cuenta con detalles por cultivo ya que la información fue suministrada por el SENARA. En este caso, el área de cultivo se ubica en la subcuenca 3 entre los cantones de Bagaces y Cañas, con un total de 33.405,4 hectáreas correspondiente a 954 parcelas de cuales 37 no tienen ninguna información de cobertura. En la figura 22 se detalla el tipo de cobertura para el segundo semestre de cada año entre el 2013 y el 2016 y en el caso del 2017 la información corresponde al primer semestre.

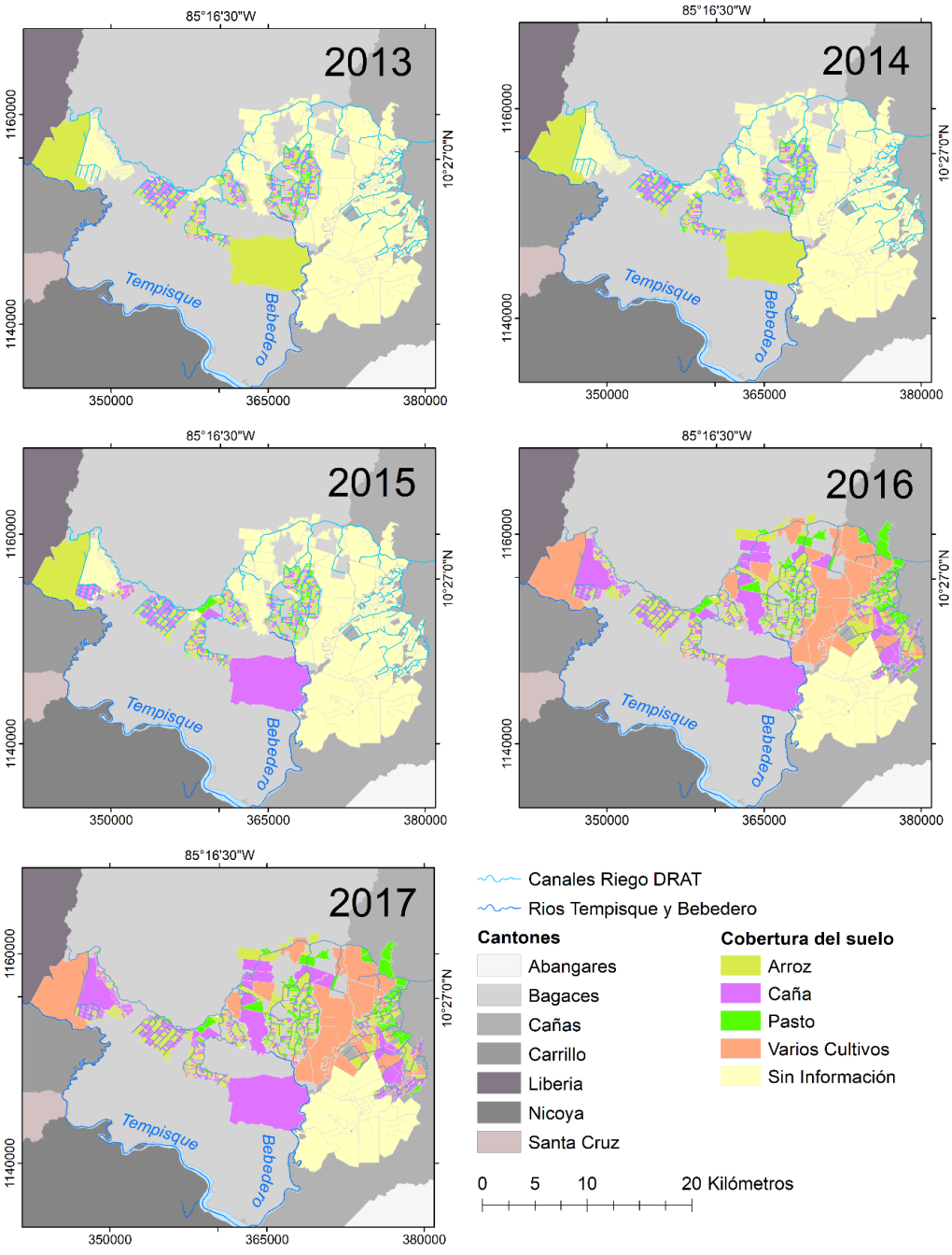


Figura 22: Cobertura de la tierra por tipo de cultivo, DRAT, II semestre, 2013-2016

A lo largo del tiempo, aparte de haber una mejoría en la cobertura espacial de la información, no se detectan cambios significativos en el tipo de cultivo. Entre el II semestre del 2013 y 2014 no

se detectan cambios. La parcela ubicada en el centro del área agrícola, que colinda al este con el río Bebedero (área de 3285 ha) cambia de cultivar arroz (verde) a caña (morado) entre el I semestre del 2014 y II semestre del 2015. Entre el 2015 y el 2016, además de completarse información donde antes no la había, existe un cambio de cobertura del polígono ubicado al extremo oeste (área de 2317 ha), que pasó de cultivar arroz (verde) a varios cultivos (naranja). En este caso la parcela se dedicó al cultivo del arroz desde el 2007 hasta el II semestre del 2015, en el I semestre del 2016 pasó a cultivar arroz y caña, en el II semestre de ese año se registra arroz y pasto al igual que en el I semestre del 2017. El último cambio ocurre en el segundo semestre del 2016 donde la información de cobertura es más completa que en años anteriores, y entre el 2016 y el 2017 no hay cambios de cultivo significativos.

Cuadro 16: Área agrícola, según cultivo, en las cuencas Tempisque y Bebedero

| | Cuenca Tempisque | | | Cuenca Bebedero | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Área (ha) Subcuenca 1 | Área (ha) Subcuenca 4 | Área (ha) Sub total | Área (ha) Subcuenca 3 | Número de parcelas Subcuenca 3 | Área (ha) total |
| Arroz | 0 | 13.342,47 | *13.342,47* | 4.984,99 | 429 | **18327,46** |
| Caña | 0 | 29.032,49 | *29.032,49* | 8.765,1 | 259 | **37797,59** |
| Melón | 1.933,01 | 0 | *1933,01* | | | **1933,01** |
| Pasto | | | | 2.454,08 | 153 | **2454,08** |
| Varios cultivos | | | | 9.402,58 | 70 | **9402,58** |
| Sin determinar | 7.183,11 | 16.693,52 | *18.425,12* | | | **18425,12** |
| Sin información | | | | 7.798,72 | 43 | **7798,72** |
| **Total** | **9.116,12** | **59.068,48** | ***62.733,09*** | **33.405,47** | **954** | |

En la Cuadro 16 se detalla el área agrícola según cultivo que se utilizó en WEAP, la información del Tempisque es del año 2010 y la del Bebedero del 2016. Según las fuentes de información

disponibles, en la cuenca del Tempisque hay 62.733 ha, de las cuales poco más de 9 mil se ubican en la subcuenca 1 y las otras 59 mil en la subcuenca 4. En la subcuenca 1 solo se pudo identificar el cultivo de melón, mientras que en la subcuenca 4 se identificó el cultivo de arroz y caña, este último es el cultivo que predomina. Para las 18.425,12 ha a las que no se les determinó un cultivo, el consumo de agua se estimó como el promedio entre melón, caña y pasto, excluyendo el arroz para no incluir un valor extremo. En cambio, en la cuenca del Bebedero el tipo de cobertura que predomina es la categoría "varios cultivos" (9.403 ha), seguido de la caña (8.765 ha), el arroz (4.985 ha), el pasto (2.454 ha) y 7798 ha que no tienen información. Cabe resaltar que a pesar de que el área donde se cultivan varios cultivos es la mayor, se reparte en 70 parcelas, lo que demuestra el tamaño de las parcelas. Por otro lado, las 8.765 ha de caña se reparten en 259 parcelas y las 4.985 ha de arroz en 429, esto último indicando que el arroz se cultiva en áreas más pequeñas en comparación a los demás cultivos.

La demanda agrícola se estimó multiplicando el área cultivada por el consumo de agua por cultivo y luego se estimó su efecto en el caudal. En ambas cuencas se asumió que el consumo por cultivo fue el mismo para todo el periodo de estudio y que el área cultivada por cultivo no varía en el tiempo. El analices sobre el efecto de la demanda agrícola en los ríos, cubrió el periodo entre 1993 y el 2016 para el Tempisque y entre el 2013 y 2016 para el Bebedero. Esto último porque la demanda agrícola en el Bebedero se abastece del agua de los canales de riego y solo contamos con información de caudal en los canales para ese periodo.

La demanda en la subcuenca 4 es ocho veces más que en la subcuenca 1. Considerando un 10% de aumento en la cantidad de agua superficial desviada, que representa las pérdidas en el sistema de distribución, en la subcuenca 1 se necesitan en promedio 2.26 $m^3/s$ para abastecer la demanda agrícola mientras que en la subcuenca 4 se necesitan en promedio 19.1 $m^3/s$. En la figura 23 se demuestra el efecto de la demanda doméstica, turística y agrícola en el caudal. La demanda doméstica, turística no afectan la disponibilidad, o sea hay suficiente agua para

abastecer la demanda, no es el caso de la demanda agrícola, que sí tiene el potencial de sobrepasar la disponibilidad.

Como se observa en la figura 23.a, asumiendo un consumo del 100%, en la subcuenca 1 la diferencia porcentual entre el caudal simulado y el caudal después de abastecer todas las demandas llega a un máximo de -50,3% en el mes de mayo de 1993. Como se observó anteriormente, en 1993 se presentan los valores más críticos ya que el modelo simula los caudales más bajos de toda la serie. Al igual que en el capítulo tres, la disminución de caudal más notoria es en la época seca y durante la sequía de 1997-1998. Entre febrero de 1997 y julio del 1998 la disminución en el caudal estuvo en un rango entre -44% (max. en enero 1998) y -27% (min. julio 1998).

Se concluye que según los datos utilizados en esta investigación y asumiendo un consumo del 100%, la demanda agrícola tiene el potencial de secar el río durante la época seca, en particular en los meses de mayo y junio (ver figura 23.b). Según nuestros datos el río se seca entre: enero a junio de 1993; febrero a julio de 1998, marzo a julio del 2001; abril a junio de los años 1994, 1995, 1997, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009, 2013, 2014 y 2015; mayo a junio de 1996, 2007, 2010, 2011, 2012, 2016. En estos mismos meses, bajo el escenario de un consumo agrícola del 60%, la demanda no supera la disponibilidad. Bajo este escenario la reducción porcentual es de -60% en lugar de -100%. En el caso de la cuenca del Bebedero la realidad es completamente diferente ya que en la subcuenca 3 hay un ingreso de agua trasvasada, proveniente de la vertiente Caribe debido al proyecto ARCOSA.

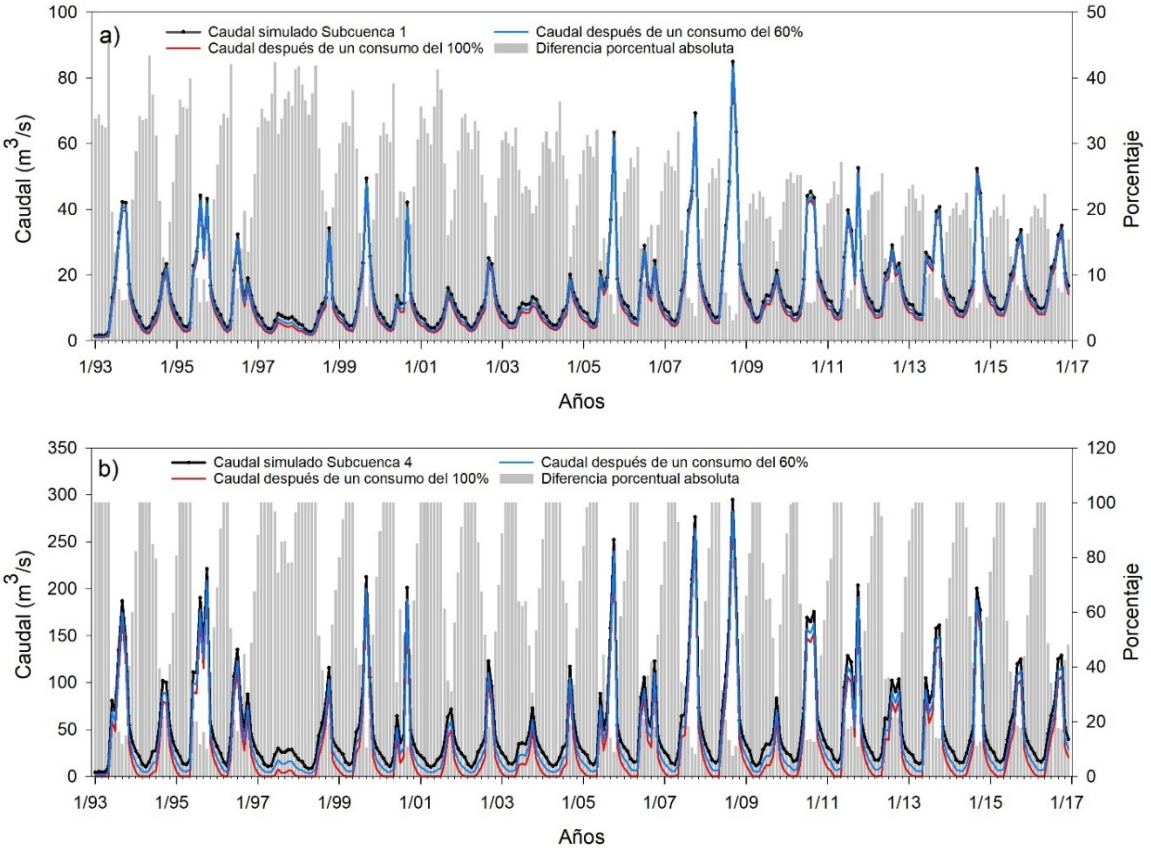


Figura 23: Caudal simulado y después de las demandas, río Tempisque

En la figura 24 se visualiza el caudal simulado y se desagregan los caudales promedio mensuales entregados al SENARA entre 2013 y octubre del 2016. Los caudales se desagregan de la siguiente forma: los aprovechados, que son los que se distribuyeron en los canales de riego; los no distribuidos, que son los caudales que SENARA nunca ingresó a los canales, o sea que se incorporaron directamente al río Corobicí; y el caudal que no se usa en el DRAT, que corresponde al caudal que sobra después de abastecer la demanda de agua agrícola que se calculó en esta investigación. Esto último más el caudal no distribuido en el DRAT, se agrega al caudal simulado de la subcuenca 3, y se considera como un nuevo caudal (línea roja, Figura 25).

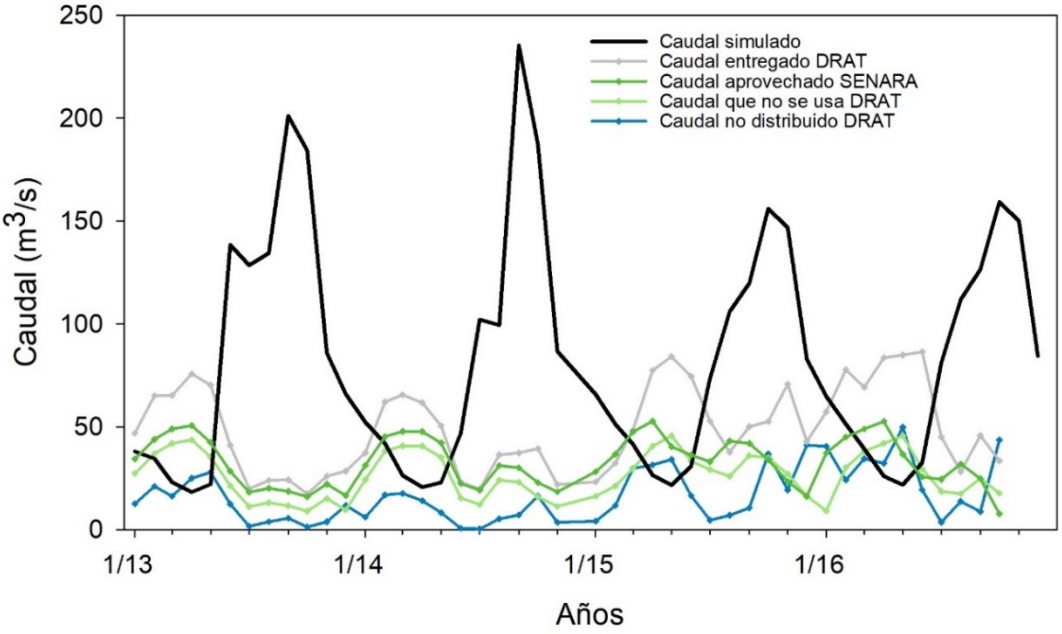


Figura 24: Caudales promedio mensuales entregados al SENARA para abastecer al DRAT entre 2013 y octubre del 2016

Sobre el caudal entregado al SENARA (línea gris) se observa claramente que durante los meses secos se entrega más agua al SENARA. Esto quiere decir que cuando en la vertiente Pacífica es época seca (diciembre a mayo) la demanda de electricidad aumenta, aportando más agua a los canales y aumentando el flujo natural de la subcuenca 3. Consecuentemente en ese periodo, y a pesar de la demanda agrícola, la media y baja de la cuenca del Bebedero, tiene un excedente de agua (ver figura 25)

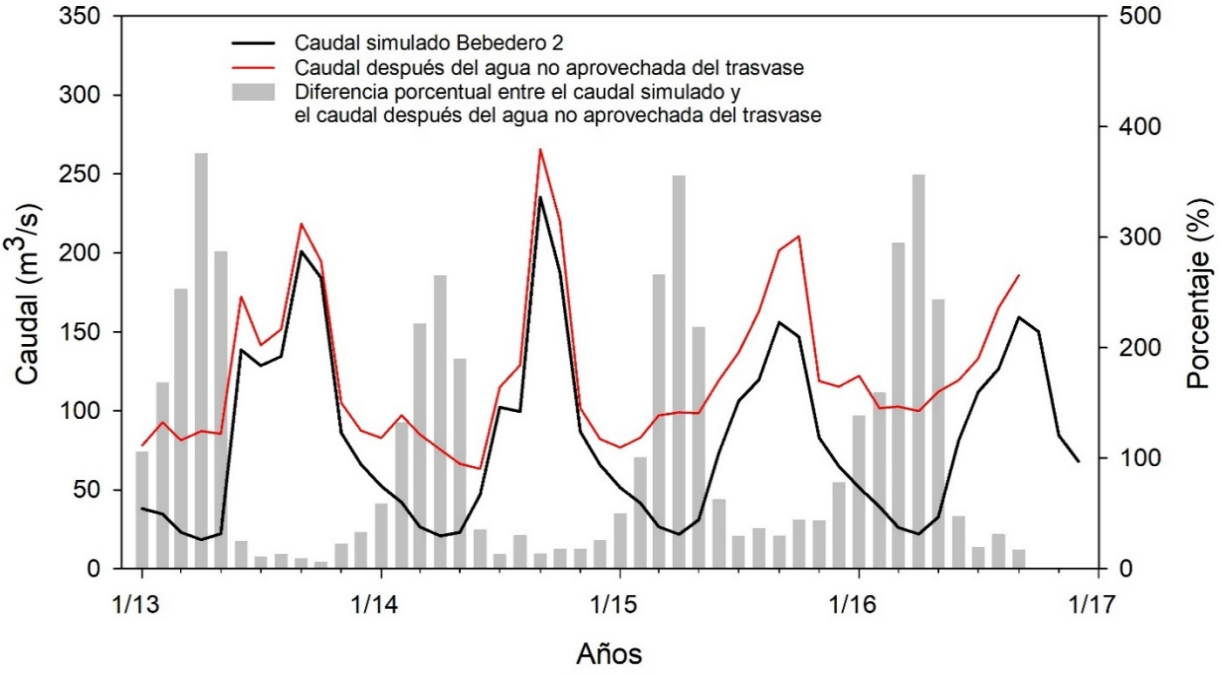


Figura 25: Caudal del Bebedero después de aporte del trasvase

En la figura 25, la línea negra es el caudal simulado, la roja el nuevo caudal después del aporte del agua trasvasada que no fue consumida en fines agrícolas y también se muestra el porcentaje de diferencia entre estos dos caudales. El aumento máximo porcentual es de 375% en abril del 2013, luego en el 2014 el mayor aumento fue de 265% también en abril. En ese mismo mes sucedió el mayor aumento de caudal en el año 2015, que fue de un 355% y el 2016 fue de un 365%. Considerando que entre el 2014 y 2015 hubo una sequía, el aumento del caudal se mantuvo al menos al doble de lo considerado como caudal natural (caudal simulado). Lo anterior indica que, en el tanto en la vertiente Caribe se mantengan los regímenes de precipitación conocidos, el DRAT tiene la capacidad de mitigar el efecto de la reducción en la precipitación durante la época seca o durante eventos El Niño. Eso beneficia tanto a los productores que tienen acceso DRAT, como a los ecosistemas río abajo como el Parque Nacional Palo Verde, ya que reciben un aporte mayor de agua.

### 6.3. El estado de la sostenibilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero

A pesar de los datos que alertan sobre la vulnerabilidad ante la escasez en las cuencas Tempisque y Bebedero, las acciones del Estado para procurar la sustentabilidad hídrica parecieran débiles. Justamente la Contraloría General de la República (2014) realizó una auditoría para evaluar la suficiencia de los mecanismos implementados por el Estado para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en el país. De los resultados obtenidos las recomendaciones se resumen en el cuadro 17.

Cuadro 17: Recomendaciones para asegurar la sustenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica

| | |
|---|---|
| Recomendaciones para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica<br><br>(Contraloría General de la República, 2014) | • Establecer mecanismos de seguimiento a la implementación de los instrumentos de política hídrica<br>• Desarrollar el sistema nacional de información para la gestión integrada de los recursos hídricos<br>• establecer un mecanismo para guiar la participación ciudadana<br>• medir los avances en la sostenibilidad del recurso hídrico<br>• elaborar e implementar planes de acción para contar con un balance hídrico preciso<br>• programar el monitoreo en campo del uso racional del agua<br>• inventariar y priorizar los acuíferos del país<br>• establecer las metas de reducción de la carga contaminante<br>• emitir las directrices para la ejecución del Canon Ambiental por Vertidos<br>• establecer el mecanismo de control en el SINAC para conocer el aporte de la inversión de fondos a la sostenibilidad del recurso hídrico<br>• definir las zonas que protejan captaciones de agua para consumo humano para el pago por servicios ambientales |

En este sentido las recomendaciones se emitieron como disposiciones de acatamiento obligatorio a cumplir dentro de plazos distintos establecidos para cada ministerio. La evaluación del

cumplimiento de todas estas disposiciones, así como el aporte que hayan tenido hacia la mejora de la gobernanza del agua es una oportunidad de investigación que no se aborda en este caso. Sin embargo, a partir de la experiencia en la realización de esta investigación y los resultados obtenidos se pueden realizar algunos comentarios.

Durante la administración Solís Rivera (2014-2018) en efecto se iniciaron proyectos para desarrollar un Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (SNIGIRH), un Sistema Nacional de Monitoreo del Agua Subterráneas en tiempo Real (SIMASTIR), un Sistema de Permiso y Concesiones (SIPECO) en línea y una Propuesta de Metodología de Caudal Ambiental de Costa Rica (MINAE, 2017).

El SIPECO facilita los trámites en línea y expedientes digitales que facilita el manejo de solicitudes de concesiones ante la Dirección de Aguas. En Guanacaste los medidores de aguas subterráneas en tiempo real ya generan datos, aunque solo con el tiempo se podrá ver si estos son efectivos y cómo se manejarán los datos generados. Con respecto a la propuesta de metodología para un caudal ambiental, en el caso de la cuenca del río Tempisque ya hay un precedente y cálculo realizado (Jiménez-Ramón et al., 2005), lo que faltan son lo mecanismo legales, administrativos y políticos para su implementación.

Con respecto al SNIGIRH, el visor cartográfico web está en funcionamiento y la consulta de datos en línea por medio de protocolos WFS y WMS; pero el sistema tiene mucho que mejorar. Entre las fallas detectadas del SNIGIRH están: uno, es común que el visor cartográfico no permite visualizar las capas solo se puede hacer desde un SIG; dos, la consulta de las capas en formato WFS y WMS es compleja inclusive para un usuario experto lo que equivale a inaccesibilidad; tres, suponiendo la consulta efectiva, los datos atribuidos a las capas son mínimos lo que limita que los datos realmente se conviertan en información. En el caso de esta investigación se necesario realizar una solicitud formal a la Dirección de Aguas para obtener los datos requeridos.

Con respecto al abastecimiento de agua para sus diferentes usos en el presente y futuro, el Gobierno de Costa Rica ha puesto en marcha la ejecución del proyecto PAACUME que figura como un mecanismo de adaptación al cambio climático y la creciente demanda a futuro del agua. El proyecto contempla la construcción de una presa en el río Piedras, un canal de riego a llamarse "Canal Oeste" y una red de distribución. Con este proyecto se abastecerá "un millón de personas en los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya; 18,800 hectáreas de riego; 700 productores agropecuarios; 10 mil viviendas con electricidad y resalta al impulsar la sustitución de usos de agua subterránea por agua superficial" (Presidencia de la República de Costa Rica, 2018). Habrá que evaluar el impacto de este proyecto una vez terminado y funcionando, no obstante, cabe resaltar que hay agua del DRAT que no se usa y se podría almacenar para abastecer varias demandas.

Según los resultados de esta investigación, en la parte media y baja de la cuenca del río Tempisque existe la posibilidad de que las demandas excedan la disponibilidad. La investigación de Guzmán-Arias determinó que esto sucede, pero en la cuenca alta del Tempisque, de ser así la situación sería aún peor aguas abajo, sobre todo en los meses de marzo y abril. En la investigación realizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008, a petición del gobierno también se concluye que ante reducciones de precipitación y un aumento de la demanda, la disponibilidad hídrica se vería en riesgo durante la época seca tanto en la cuenca del Tempisque como la del Bebedero. A pesar de los preocupantes resultados de estudios previos (Guzmán-Arias, 2013; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008) o de la presente, en el área de estudio las situaciones de escasez que llegan a ser generalizadas suceden durante épocas El Niño.

Es cierto que en la época seca algunas fuentes de agua superficial se secan o se reducen mucho, pero suelen estar asociado a la variabilidad natural. Las disminuciones estacionales se suelen mitigar con la toma de aguas subterráneas, consumo que se compensa con las lluvias de la siguiente temporada, pero cuando las disminuciones de precipitación se prolongan, por ejemplo,

en eventos En Niño, todo el sistema hidrológico se estresa. De hecho, la propuesta de la Hung at al., 2018 fue desarrollar para un pequeño acuífero de Guanacaste un indicador de recarga. El indicador permitiría evaluar si en un año la recarga disminuiría antes de que termine la época lluviosa. Los autores proponen que con esa información se podrían desencadenar medidas de adaptación a corto plazo como: el control de la demanda procurando la conservación del agua, así como considerar alternativas de suministro durante la época seca como el agua superficial o agua llovida para permitir que el acuífero se recargue.

Al comparar las investigaciones anteriores con la presente el problema recurrente es la dificultad para conseguir datos. Debido a que el acceso a datos es limitado y en cada investigación se hace lo mejor posible con lo que se obtiene, comparar los resultados entre investigaciones es difícil. Para modelar no solo son importantes los datos climáticos sino también los de caudal, ya que son necesarios para calibrar los modelos. Considerando que la estación Guardia dejó de funcionar desde el 2010, es preocupante que en la actualidad no ha uno monitoreo continuo de caudales, ya que esto limitará las investigaciones futuras. Precisamente porque el ICE fue históricamente el mayor generador de información básica, resulta incierto el futuro del monitoreo de datos básicos ante el desmantelamiento de la mayoría de la red de observaciones que tiene el ICE en el país.

En ese sentido, el monitoreo de variables climáticas, así como de aguas superficiales (por ejemplo, caudales y niveles) es fundamental para cumplir con tres de las obligaciones emitidas por la Contraloría, que son: medir los avances en la sostenibilidad del recurso hídrico; elaborar e implementar planes de acción para contar con un balance hídrico preciso; programar el monitoreo en campo del uso racional del agua. Con los datos actuales realizar un balance hídrico preciso que considere las demandas es imposible ya que desde que se realizó la investigación del IMTA en el 2008 resalta la necesidad de monitorear con medidores las concesiones otorgadas.

La sustentabilidad hídrica en las cuencas Tempisque y Bebedero efectivamente está en riesgo por una serie de factores. Lo primero es que el área de estudio está expuesta una variabilidad

climática que causa periodos de sequía producto del fenómeno El Niño, así como a eventos extremos que se esperan aumenten con el cambio climático, por lo que es imperante tomar medidas de adaptación. Lo segundo, es que existe un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua. En el caso particular del Tempisque, según los registros de concesiones, la cuenca está sobre concesionada, sin embargo, esto no es verificable ya que no existen datos para corroborar el consumo real. Lo tercero, es que a falta de implementar un caudal ambiental no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua.

### 6.4. Conclusiones

Según los caudales concesionados para consumo humano, la subcuenca 4 es a la que más personas abastece (260.131 por año) seguido de la subcuenca 3 con unas 65.362 personas, para un total de 392.531 personas en el área de estudio. De demanda doméstica en conjunto con la turística no tienen el potencial de reducir la disponibilidad de agua superficial. No obstante, como la demanda agrícola es la más importante, esta sí puede reducir los niveles de agua superficial en particular en la parte media y baja de la cuenca del Tempisque. La demanda promedio mensual de todos los sectores en la cuenca del Tempisque es de 5,9 millones de $m^3$ que se traduce a un caudal de 23,74 $m^3/s$.

En esta misma cuenca el área agrícola total es de 62.733,09 ha, de esas 29.032,49 ha son para el cultivo de caña, 13.342,47 ha para el cultivo de arroz, 1933,01 ha para el cultivo de Melón y 18.425,12 ha no se lograron determinar. Mientras que en la cuenca del Bebedero se cultivan 8.765,1 ha de caña, 4.984,99 ha de arroz, 2.454,08 de pastos, 9.402,58 ha de varios cultivos y para 7.798,72 ha no hay información; todo suma a 33.405,47 ha que es la mitad que en el Tempisque.

Dado que en el Bebedero llega agua adicional para uso agrícola y no toda se usa, se estimó que puede haber un máximo aumento porcentual de 375% entre el caudal simulado y el caudal considerando el trasvase. Resulta sorprendente que en la cuenca del Tempisque el área agrícola

duplique la del Bebedero, en particular porque el DRAT es un mecanismo de mitigación ante la variabilidad climática.

Considerando las recomendaciones de la Contraloría para procurar la sustentabilidad hídrica en el país, se identificaron tres aspectos críticos en el área de estudio que ponen en peligro este objetivo. Lo primero, que además se convirtió en el obstáculo número uno para desarrollar esta investigación, es que existe un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua. En el caso particular del Tempisque, según los registros de concesiones, la cuenca está sobre concesionada, sin embargo, esto no es verificable ya que no existen datos para corroborar el consumo real. Lo segundo, es que a falta de implementar un caudal ambiental no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua. Lo tercero sería que, ante la variabilidad climática propia del área de estudio y la posibilidad de que el cambio climático empeore las cosas, si no se toman medidas de adaptación hacia un escenario de menor disponibilidad hídrica no habrá agua para satisfacer todas las demandas a lo largo del año.

## VII. Capítulo: Conclusiones y Recomendaciones

En esta investigación se estimó la disponibilidad del agua superficial en las cuencas Tempisque Y Bebedero y contabilizó el agua concesionada con el propósito de determinar si el área de estudio está sobre concesionada. Para realizar un manejo integrado del recurso hídrico hacen falta balances hídricos que permitan conocer cuánta agua producen las cuencas y adicionalmente cuál es la mejor forma de repartirla entre los sectores. En este sentido WEAP es una herramienta para realizar una especie de contabilidad hídrica, ya que considera tanto la oferta como la demanda de agua.

El programa WEAP se utilizó para simular el caudal seminatural en las cuencas Tempisque y Bebedero entre 1993 y 2016. Las cabeceras de cada cuenca fueron calibradas para el periodo entre 1993-2003, con énfasis en la calibración de los caudales mínimos, logrando una notoria

eficiencia de simulación en la cabecera del río Tempisque (logNSE 0,79). Los resultados muestran una adecuada variabilidad intra y una clara disminución del caudal entre 1997 y 1998 a causa de la sequía provocada por el fenómeno El Niño. Debido a falta de datos las partes medias y bajas de ambas cuencas no se calibraron. Así mismo, se recomienda explorar la calibración utilizando el complemento de WEAP, con las siglas PEST, o buscar cómo realizar un enlace para programar una calibración aleatoria utilizando R o Python.

Considerando toda el agua superficial concesionada solo un 0,48% se utiliza para uso doméstico, un 0,56% para uso turístico y un 99% para uso agrícola. Debido a que el agua que se destina al sector doméstico y turístico es muy poco en comparación al agrícola, estos dos sectores no representan una amenaza para la disponibilidad presente y futuro del agua superficial. Caso contrario para el sector agrícola, donde identificamos que, bajo un escenario de consumo máximo, la demanda puede superar la disponibilidad en particular durante la época seca, situación que comprometería los ecosistemas fluviales.

En el caso del río Bebedero se estimó que existe un excedente que proviene del trasvase de agua a través de los proyectos ARCOSA y DRAT. Se registró un aumento máximo porcentual de 375% entre el caudal simulado y el caudal después del aporte adicional. Resulta sorprendente que el área agrícola en esta cuenca sea la mitad que en la del Tempisque, sobre todo, porque el DRAT representa un mecanismo de mitigación ante la variabilidad climática en particular para el sector agrícola.

Al comparar nuestras estimaciones de caudal concesionado con las de Guzmán-Arias (2013) se identificó un subregistro. Ella concluye que la cuenca alta del Tempisque está sobre concesionada mientras que nosotros concluimos una sobre concesión en la parte media y baja. Esta incongruencia es señala que el caudal concesionado puede variar significativamente según las instituciones que se consulten y el manejo que se haga de la información. Considerando lo anterior y que las concesiones no tienen un medidor en la toma, el consumo real de las concesiones en este momento se desconoce.

La sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero está en peligro por los siguientes aspectos: 1) un manejo confuso y disperso de información hidrológica base, así como la falta de monitoreo, lo que dificulta aproximar la disponibilidad y consumo de agua 2) Al no contar con un caudal ambiental establecido no existe un mecanismo para asegurar un flujo mínimo en los cuerpos de agua 3) ante la variabilidad climática propia del área de estudio y los efectos en el clima producto del cambio climático, si no se toman medidas de adaptación hacia un escenario de menor disponibilidad hídrica, no habrá agua suficiente durante todo un año para abastecer a todas las demandas.

Para contrarrestar lo anterior, se deben tomar acciones de mejora en todos los aspectos. Para realizar ejercicios de modelación, más certeros y actuales, se recomienda instalar medidores de caudal en la parte alta y baja de las cuencas del Tempisque y Bebedero; así como volver a tomar datos en las estaciones Guardia y Rancho Rey. Los datos deben ser de acceso fácil, idealmente de descarga en la web, para promover la investigación y consulta ciudadana. También se deben instalar medidores en las tomas de las concesiones, lo que permitiría conocer la demanda real y aplicar una mejor vigilancia del uso del agua. Con respecto al uso de un caudal ambiental, es necesario promover una ley que lo obligue, complementado de una red de monitoreo que lo asegure. Por último se debe promover la recolección y reserva de agua durante la época lluviosa, para luego ser utilizada en época seca, en particular para los sectores agrícolas y pecuarias, quienes consumen la mayor cantidad de agua y requieren menor calidad. Así mismo se debe maximizar la eficiencia en los métodos de riego y cultivar productos mejor adaptados a las condiciones naturales del área de estudio.

## VIII. Bibliografía citada


Bermúdez Morales, P., Rodríguez Alvarado, R., & Vargas Pineda, C. (2002). *Identificación y Caracterización de los Impactos Socioeconómicos y Ambientales de la Construcción del Puente sobre el río Tempisque, Nicoya-Costa Rica*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Sociales. Escuela de Geografía, San José, Costa Rica.

Beven, K. J. (2012). Rainfall-runoff modelling: the premier (2nd ed). John Wiley & Sons, Ltd.

Birkel, C., Brenes, A., & Sánchez-Murillo, R. (2017, mayo). The Tempisque-Bebedero catchment system: energy water-food consensus in the seasonally dry tropics of northwestern Costa Rica. (M. Al-Saidi & L. Ribbe, Eds.). Nexus Research Focus, TH-Köln, University of Applied Sciences. Recuperado de https://www.water-energy-food.org/fileadmin/user_upload/files/documents/others/Outlook-Nexus_Assessing-Resource-Use-Challenges_ReducedSize.pdf

Bocanegra, J. (2017). *Hydrological drought assesment in the Tempidque-Bebedero catchment system in Costa Rica*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí y TH-Koeln Univsersity of applied science, Colonia, Alemania.

Bonelli, S., Vicuña, S., Meza, F. J., Gironás, J., & Barton, J. (2014). Incorporating climate change adaptation strategies in urban water supply planning: the case of central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, *5*(3), 357–376. https://doi.org/10.2166/wcc.2014.037

Condezo-Montes, B., Mejía-Marcacuzco, A., & Ingol-Blanco, E. (2016). Análisis de los sistemas de recursos hídricos en los proyectos especiales Chavimochic y Chinecas. Presentado en XXVII Congreso Latinoamericano de Hidraulica, Lima, Peru. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/articulo_completo_ladhi2016_Boris_28_04_2016_Final.pdf

Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., ... Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, *2011*, 869–916. https://doi.org/10.5194/hessd-8-869-2011

Condom, Thomas, Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., ... Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, *37*(4), 442–459. https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706773

Contraloría General de la República. (2014). *Informe de la auditoría de caracter especial acerca de los mecanismos implementados por el Estado para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico* (No. DFOE-AE-IF-03-2014). San Jose, Costa Rica.

Corella-Rivers, H. (1979). *Algunas consideraciones geográficas en torno al uso del suelo en la I etapa del proyecto de riego, río Tempisque, Costa Rica.* Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Sociales, Escuela de Geografía, San José, C.R.

Coto, M. (2001). El proyecto de Riego Arenal Tempisque. En J. A. Jiménez-Ramón & E. González-Jiménez (Eds.), *La cuenca del río Tempisque: Perspectivas para un Manejo Integrado* (1a ed., pp. 106–119). San José, C.R.: Organización para Estudios Tropicales.

Durham, R., Rivera-Araya, M. J., Davis, M., Quesada, L., Venegas, N., & Cui, D. (2016). Costa Rica Water Resources Monitoring Drought and Water Balance in the Guanacaste Province to Enhance Decision Making and Response Planning in Costa Rica. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Diyang_Cui/publication/310141860_Monitoring_Drought_and_Water_Balance_in_the_Guanacaste_Province_to_Enhance_Decision_Making_and_Response_Planning_in_Costa_Rica/links/5829a0a908ae509544734536.pdf

FAO. (2006). *Serie Riego y drenaje: Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf

FitzHugh, T. (2006). Water Budget Analyses for the Yuna River Watershed and Samana Bay. The Nature Conservancy. Recuperado de http://www.crc.uri.edu/download/27_Yuna_Water_Budget_Writeup_FitzHugh_en.pdf

FONAFIFO. (2012). Estudio de cobertura forestal de Costa Rica 2009-2010. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones MINAE. Recuperado de http://www.minae.go.cr/recursos/documentos/cobertura-forestal/estudio-cobertura-forestal-fonafifo-marzo2012.pdf

Guzmán-Arias, I. (2013). *Base para la Planificación del Recurso hídrico Superficial en la Cuenca Alta y Media del Río Tempisque, Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia.

Harris, S. (2007). *Beyond Building Models: Using WEAP to inform climate change adaptation policy in Guatemala*. University of California, Berkeley. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/Beyond_Building_Models_Using_WEAP_to_inform_climate_change_adaptation.pdf

Henriquez Dole, L., Gironas, J., & Vicuna, S. (2015). Analysis of Future Streamflow Regimes under Global Change Scenarios in Central Chile for Ecosystem Sustainability. Presentado en American

Geophysical Union, Fall Meeting 2015. Recuperado de http://adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFMGC51E1134H

Hund, S., Allen D., Morillas L., Johnson M. (2018) "Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase sociohydrological resilience to seasonal drought". Journal of Hydrology, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.06

Indicadores cantonales - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2000 y 2011. (2013). Estado de la Nación e Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de http://www.estadonacion.or.cr/images/stories/biblioteca_virtual/otras_publicaciones/Indicadores-Cantonales-FINAL-GUANACASTE.pdf

Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2013). Development of a Hydrological Model for the Rio Conchos Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, *18*(3), 340–351. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000607

Instituto Meteorológico Nacional. MANUAL TÉCNICO DEL DEPARTAMENTO DE AGUAS, Pub. L. No. La Gaceta Nº 98 (2004).

Instituto Meteorológico Nacional. (2008). Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Recuperado de http://www.cambioclimaticocr.com/multimedio/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2008). Elaboración de Balances hídricos por cuencas hidrográficas y propuesta de modernización de las redes de medición en Costa Rica: Balances hídricos mensuales, oferta y demanda.

Instituto Nacional de Estadística y Censos, INEC (2012) Panorama Demográfico. Vol.1, Año.7

Jiménez, J. A., & González, E. (2003). Hacia el Manejo Integral de la cuenca baja del río Tempisque. Organización para Estudios Tropicales.

Jiménez-Ramón, J. A., Calvo-Alvarado, J. C., González-Jiménez, E., Pizarro, F., & Jiménez, A. (2005). Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el río Tempisque. UICN.

Leitón-Montero, J. J. (2011). *Cambio en el patrón de escorrentía superficial de la cuenca alta del río Tempisque ante diferentes escenarios de cambio climático*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.

Linsen, M. (2009). *Barriers for water: About the decision-making process regarding locations for new small dams in the Preto River Basin in the Federal District, Brazil*. Delf University of Technology. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/Barriers-for-water-Preto.pdf

Linsen, M., & Rodríguez, L. (2010). The role of water balance accounting in the decision-making process leading to new small dams in the Preto River Basin in the Federal District, Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, *12*. Recuperado de http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-2691-1.pdf

Marín Thiele, F. (2014) Almacenamiento de Agua ante el Cambio Climático. Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos (ProNAP) Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. APB-073

Meza, F. J., Vicuña, S., Jelinek, M., Bustos, E., & Bonelli, S. (2014). Assessing water demands and coverage sensitivity to climate change in the urban and rural sectors in central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, *5*(2), 192–203. https://doi.org/10.2166/wcc.2014.019

MINAE. (2017). *Informe General de Labores Dirección de Agua 2016* (Labores No. DA-0142-2017). San Jose, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Aguas.

Ministerio de Comunicación. (2015, septiembre 5). Acciones del gobierno junto a la comunidad de Guanacaste de mayo del 2014 a julio del 2015. Recuperado de http://presidencia.go.cr/wp-content/uploads/2015/07/Acciones-por-Guanacaste_WEB1.pdf

Mora Rojas, J. (2016, marzo 8). Más allá de la sequía: El Tempisque, un gigante que muere en silencio. *Semanario Universidad*. Recuperado de http://semanariouniversidad.ucr.cr/pais/tempisque-gigante-muere-silencio/

Muñoz-Jiménez, R., Giraldo-Osorio, J.D., Brenes-Torres. A, Avendaño-Flores. I, & Nauditt. A, & Hidalgo. H, & Birkel. C, (2018). Spatial and temporal patterns, trends and teleconnection of cumulative rainfall deficits across Central America. International Journal of Climatology. 10.1002/joc.5925.

Murillo Solano, J. Barros Henríquez, J. Roncallo Fandiño, B. Arrieta Pico, G. (2014) Requerimientos hídricos de cuatro gramíneas de corte para uso eficiente del agua en el Caribe seco colombiano. Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu. 15(1) 83-99

NASA. (2017). Langley Research Center (LaRC) POWER Project. Recuperado de https://power.larc.nasa.gov/

NOAA/ESRL/PSD. (2017). PSD Climate Data Repository. Recuperado de https://www.esrl.noaa.gov/psd/repository/entry/show?entryid=synth%3Ae570c8f9-ec09-4e89-93b4-babd5651e7a9%3AL3VkZWwuYWlydC5wcmVjaXAvcHJlY2lwLm1vbi50b3RhbC52NDAxLm5j

Organización para Estudios Tropicales (2006) El manejo del riego en el cultivo de arroz. San Pedro, Costa Rica.

Ospina Noreña, J. ., Gay Garcia, C., Conde, A. ., Magaña, V., & Sánchez Torres Esqueda, G. (2009). Vulnerability of water resources in the face of potential climate change: Generation of hydroelectric power in Colombia. *Atmósfera*, *22*(3), 229–252.

Pizarro-Méndez, Y. (2009). Retomando el río, retomando el tiempo: Documentos para una Historia Medioambiental de la cuenca del Tempisque en la primera mitad del Siglo XX. *Revista de Historia*, (59–90).

Presidencia de la República de Costa Rica. (2018, julio 24). SENARA presenta diseños de obras de proyecto Paacume. Recuperado de https://presidencia.go.cr/comunicados/2018/07/senara-presenta-disenos-de-obras-de-proyecto-paacume/

Programa en Investigación en Desarrollo Economía y Ambiente, División de Investigación y Desarrollo. (2014). Evaluación del impacto del Distrito de Riego Arenal-Tempisque, Región Chorotega, Costa Rica 1981-2011. (J. Robalino, Ed.). CATIE.

Purkey, D. R., & Escobar, M. (2009). Climate Change, Glaciers, and Water Management in the Rio Santa Watershed, Peru. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *23*. Recuperado de http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFM.H23I..06P

Reploge, J., & García, E. (2017, febrero 8). Tempisque River: History of neglect threatens Guanacaste people and environment. *The Tico Times*. Recuperado de http://www.ticotimes.net/2016/08/02/tempisque-river-history-of-neglect-threatens-guanacaste-people-and-environment

Rodríguez Vega, E. (Ed.). (2004). *Costa Rica en el siglo XX* (Vol. 3). San José, Costa Rica: EUNED.

Santana Segura, R. (2018) Modernización de los sistemas de riego mediante introducción de tecnologías de conducción de aguas por tubería en lugar de canales abiertos en la finca Experimental Taboga UTN-Sede Guanacaste (tesis de licenciatura). Universidad Técnica Nacional, Guanacaste, Costa Rica.

Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., Teasley, R. L., & Patino-Gomez, C. (2011). Groundwater Banking in the Rio Grande Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *137*(1), 62–71. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000091

Somarriba, E. (2003). *Evaluación de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Tempisque*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil.

Umaña Salas, A. (2007). *Programación de un modelo de balance hídrico basado en cambios de uso del suelo, en la cuenca del río Abangares*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil, San José, C.R.

UNESCO. (2006). Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4.

Vergara, W., Deeb, A., & Leino, I. (2011). *Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology: Development of a Methodology Through a Case Study in the Andes of Peru*. World Bank Publications.

Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, *105*(3–4), 469–488. https://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4

Vicuña, S., McPhee, J., & Garreaud, R. D. (2012). Agriculture Vulnerability to Climate Change in a Snowmelt-Driven Basin in Semiarid Chile. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *138*(5), 431–441. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000202

Vicuña, S., Meza, F. J., Jelinek, M., Bustos, E., & Bonelli, S. (2010). Vulnerability of a municipal water supply system in Central Chile to climate change impacts. *AGU Fall Meeting Abstracts*, *24*. Recuperado de http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.H24F..05V

Wagnitz, P., Núñez, J., & Ribbe, L. (2014). Cost of environmental flow during water scarcity in the arid Huasco River basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal*, *59*(3–4), 700–712. https://doi.org/10.1080/02626667.2014.892599

Wong, L. A. (1993). *Impacto socioeconómico de la primera etapa del proyecto de riego Arenal-Tempisque, Guanacaste*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Sociales. Escuela de Historia y Geografía. Departamento de Geografía, San José, C.R.

Yi, S., & Sandoval Solis, S. (2015). Hydrological WEAP Modeling of the Upper Basin of the Apurimac River Basin, in Peru. An Assessment of Available Water Resources and Supply. Presentado en 2015 AGU Fall Meeting, Agu. Recuperado de https://agu.confex.com/agu/fm15/webprogram/Paper85484.html

Yi, S., Sandoval Solis, S., & Bombardelli, F. (2014). Evaluating the Current and Future Water Supply and Demands in the Apurimac River Basin, in Peru. Sensitivity Analysis of a Hydrologic and Water Planning Model. Recuperado el 6 de junio de 2017, de https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi/Paper/8184