

Proyección de escenarios futuros utilizando el modelo hidrológico WEAP en la microcuenca Santa Inés, Honduras

Yomer Cisneros Aguirre

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Proyección de escenarios futuros utilizando el modelo hidrológico WEAP en la microcuenca Santa Inés, Honduras

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Yomer Cisneros Aguirre

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2016

Proyección de escenarios futuros utilizando el modelo hidrológico WEAP en la microcuenca Santa Inés, Honduras

Yomer Cisneros Aguirre

Resumen: La microcuenca Santa Inés está amenazada por alteraciones en el uso del suelo y el incremento de extracciones de agua. El objetivo de este estudio fue conocer la dinámica de suministros y demandas futuras de agua en la microcuenca, mediante el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP). Se midieron los caudales en los vertederos de El Guayabo, Los Anteojos y Santa Inés durante mayo-agosto de 2016. Se cuantificaron las extracciones para riego y uso doméstico. Para calibrar el modelo se usaron datos históricos de 2002-2009 del afluente Santa Inés. Se simularon dos escenarios hasta 2025: un escenario A considerando las comunidades abastecidas actualmente y Zamorano, el cual asume caudales constantes; y un escenario B añadiendo al primero incrementos en extracción por la comunidad de San Francisco, suponiendo pérdidas de caudal de 0.11% por cambio de usos y reducción de precipitación de 5% en 2020 debido al cambio climático. Bajo el escenario A, Los Anteojos aporta 0.53 hm³/año, El Guayabo 1.89 hm³/año y Santa Inés 2.56 hm³/año. En el escenario B El Guayabo aporta 1.85 hm³, Los Anteojos 0.52 hm³ y Santa Inés 2.51 hm³. En las demandas, bajo el escenario A en Santa Inés se extrae 0.88 hm³/año, en Los Anteojos 0.37 hm³/año, y El Guayabo 0.15 hm³/año. Bajo el escenario B, en Santa Inés se extrae 1.15 hm³/año, en Los Anteojos 0.39 hm³/año y El Guayabo 0.16 hm³/año. En el escenario A, Los Anteojos, percibe déficit de 29 m³ en 2025. En el escenario B, se estima déficit en Los Anteojos desde 2018 hasta 2025, partiendo desde 298 hm³ e incrementándose hasta 3165 hm³ en el último año, asimismo en 2020 se prevé un déficit de 15,607 m³. Además, la quebrada Santa Inés presenta déficit de 1,942 m³ para ese mismo año. La modelación reportó sobreestimación moderada de caudal en la quebrada Santa Inés.

Palabras clave: Agua, déficit, demanda de agua, modelación.

Abstract: The Santa Inés watershed is threatened by changes in land use and increased water withdrawals for different users. The objective of this study was to understand the dynamics of future water demand and supplies in Santa Inés watershed through the hydrological model Water Evaluation And Planning (WEAP). The streamflow was measured with weirs at El Guayabo, Los Anteojos and Santa Inés streams, during May-August 2016. Demands for irrigation and domestic use were quantified. The model was calibrated with the historical data of Santa Inés stream from the period 2002-2009. Two scenarios were simulated until 2025: scenario A, considering currently supplied communities and Zamorano, which assumes constant flow; and scenario B which considers increases in the demand by the San Francisco community, assuming flow losses of 0.11% due to land use change and reduction of precipitation of 5% in 2020 due to climate change. In scenario A, Los Anteojos provides 0.53 hm³/year, El Guayabo 1.89 hm³/year and Santa Inés 2.56 hm³/year. In scenario B, El Guayabo provides 1.85 hm³/year, Los Anteojos 0.52 hm³/year and Santa Inés 2.51 hm³/year. In terms of water demands, in the scenario A, in Santa Inés stream 0.88 hm³/year are extracted, in Los Anteojos 0.37 hm³/year, and El Guayabo 0.15 hm³/year. In scenario B, in Santa Inés, 1.15 hm³/year are extracted, in Los Anteojos 0.39 hm³/year and El Guayabo 0.16 hm³/year. In scenario A, Los Anteojos, has a deficit of 29 m³ in 2025. In scenario B, Los Anteojos perceives a deficit from 2018 to 2025,

starting from 282 m³ and increasing to 3,165 m³ in the last year, similarly by 2020 a deficit of 15,607 m³ is expected. Also, in Santa Inés a deficit of 1,942 m³ is estimated by 2020. The modeling reported moderate overestimation of the flow for the Santa Ines stream.

Keywords: Deficit, modeling, water, water demand.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	v
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES.....	24
5. RECOMENDACIONES.....	25
6. LITERATURA CITADA.....	26
7. ANEXOS	30

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

		Página
Cuadros		
1.	Población en las comunidades de la microcuenca Santa Inés, Francisco Morazán, Honduras, 2013.....	5
2.	Demanda de agua en las comunidades de la microcuenca Santa Inés y Zamorano, Francisco Morazán, Honduras, 2016.....	12
3.	Escenario A de aportación promedio anual en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.	13
4.	Escenario A de demanda promedio anual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	14
5.	Resumen de aportación anual de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	20
6.	Resumen de demanda anual para uso doméstico de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	21
7.	Resumen de demanda anual para riego de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	21
Figuras		
1.	Mapa de ubicación de la microcuenca Santa Inés, Honduras.....	3
2.	Esquema de balance hídrico modelado en WEAP.....	4
3.	Mapa de ubicación de los vertederos en la microcuenca Santa Inés, Honduras.....	6
4.	Diferencia entre la estación limnimétrica y la estructura sólida del vertedero... ..	7
5.	Mapa de ajuste del caudal de cabecera en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, Honduras.....	8
6.	Mapa de distribución de usuarios de agua en las comunidades de la microcuenca Santa Inés.....	11
7.	Escenario A de aportación promedio mensual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	13
8.	Escenario A de demanda promedio anual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.	14
9.	Escenario A de demanda promedio mensual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	15
10.	Escenario A de demanda promedio mensual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	16

11.	Escenario B de aportación promedio anual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025	17
12.	Escenario B de aportación promedio mensual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	17
13.	Escenario B de demanda promedio anual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.	18
14.	Escenario B de demanda promedio anual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	19
15.	Escenario B de demanda promedio mensual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	19
16.	Escenario B de demanda promedio mensual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	20
17.	Escenario B de demanda anual no cubierta en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.	22
18.	Escenario B de demanda mensual no cubierta en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.....	22
19.	Caudales observados y simulados de la quebrada Santa Inés.	23

Anexos		Página
1.	Esquema del modelo hidrológico WEAP.	30
2.	Explorador de escenarios del modelo hidrológico WEAP.....	30

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas brindan innumerables servicios ecosistémicos a la sociedad. El abastecimiento de agua para la agricultura, industria y consumo humano es dependiente de los caudales existentes en las cuencas (Alcamo, Flörke y Märker, 2007). Sin embargo, en la última década, el desarrollo insostenible ha puesto en peligro la adecuada funcionalidad de estas cuencas, debido a que, para mantener una población en crecimiento se talan bosques y se destinan los terrenos para la agricultura o pastoreo (Food and Agricultural Organization [FAO], 2009), alterando los procesos hidrológicos en las mismas.

El territorio de Honduras está dividido en dos vertientes, el Océano Atlántico y Océano Pacífico. Las 19 cuencas hidrográficas existentes en el país desembocan en estas vertientes, 14 de ellas en el Océano Atlántico y cinco en el Océano Pacífico. Cada año se descargan aproximadamente $92,813 \text{ km}^3$, con un caudal promedio de $1,524 \text{ m}^3/\text{s}$ (Global Water Paternship [GWP], 2015). Con relación a la oferta hídrica, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento de España, calculó aproximadamente $81,571 \text{ km}^3$ para el año 2003. Por otro lado, en las demandas de agua, para el 2003 se estimó cerca de $1,607 \text{ km}^3$, de los cuales se destinaron $1,178 \text{ km}^3$ para el sector agrícola, equivalente al 73% de las demandas. Por otro lado, el uso doméstico demandó aproximadamente 0.315 km^3 (FAO, 2015).

Dentro de las 19 cuencas existentes en Honduras hay 575 microcuencas importantes (Instituto de Conservación Forestal [ICF], 2010). Una de ellas es la microcuenca Santa Inés, ubicada a 7 km de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, entre los municipios de Güinope, Yuscarán y San Antonio de Oriente, Honduras (Ardón, Longwell y Vélez, 2005). Esta microcuenca posee varios manantiales en la zona de recarga hídrica que conforman la quebrada Santa Inés y que finalmente desembocan en el río Yeguaré (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional [USAID], 2001). En ella se encuentran las comunidades de El Guayabo, Los Lirios, Matahambre, Santa Inés, Santa Rosa y El Hondable. Por otra parte, la Escuela Agrícola Panamericana (Zamorano) utiliza el agua de la microcuenca para producción agrícola y tienen planes para incorporar esta extracción al sistema de agua potable en el corto plazo.

Durante el año 2011, en la microcuenca Santa Inés se extraía en promedio $1053 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua, de los cuales Zamorano utilizaba $864 \text{ m}^3/\text{día}$ y los $189 \text{ m}^3/\text{día}$ restantes eran utilizados por comunidades aledañas a la microcuenca. En cuanto a la cobertura vegetal, hasta el año 2012, la microcuenca conservaba el 86% de su superficie con vegetación natural, principalmente con bosques de pino (Acosta y Kucharsky, 2012). No obstante, la zona de recarga ha sido ocupada por 24 productores dedicados a actividades de ganadería, café y granos básicos (Montenegro, 2013).

Igualmente, los recientes proyectos que se están desarrollando en la microcuenca Santa Inés generan una mayor presión en la disponibilidad del agua. Uno de ellos es la posible extracción de agua para la comunidad de San Francisco, municipio de San Antonio de Oriente. Para el diseño del proyecto se consideraron 532 viviendas de seis habitantes cada una. Lo anterior se obtuvo a partir del censo realizado por la Junta de Agua en el año 2015; así el resultado fue de 3,192 habitantes en total. De acuerdo con los cálculos hidráulicos efectuados, el caudal de diseño del proyecto resultó en 7.2 L/s (Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillado [SANAA], 2015). Como se mencionó anteriormente, la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, utiliza el agua de la microcuenca Santa Inés para fines agrícolas, extrayendo el máximo permitido por la Dirección de Recursos Hídricos de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (MiAmbiente) de 20 L/s.

En ese contexto, se desconocen las repercusiones de la presión que generan estos proyectos en la demanda de agua dentro de la microcuenca. Para conocer y entender la fluctuación de dichos comportamientos se utilizan modelos hidrológicos (Langbein y Kathleen, 1995). Éstos son herramientas que muestran la disponibilidad hídrica de una cuenca en el futuro, con base en las variables consideradas en el análisis (Yates, Sieber, Purkey y Huber-Lee, 2005). Los modelos hidrológicos permiten explorar diferentes escenarios de oferta y demanda de agua al manipular las variables (Droogers y Immerzeel, 2006). Uno de los modelos hidrológicos es WEAP (Water Evaluation and Planning), desarrollado por un grupo de investigadores del SEI (Stockholm Environment Institute). WEAP es un modelo hidrológico práctico para entender y planificar la dinámica de comportamiento de una microcuenca (Water Evaluation And Planning [WEAP 21], 2015), debido a que es flexible, práctico y fácil de usar (Kiparsky, Joyce, Purkey y Young, 2014). Para desarrollar la proyección de escenarios futuros con WEAP es necesario cuantificar la extracción actual del agua, incluyendo la extracción para actividades como la agricultura, ganadería o uso doméstico (WEAP 21, 2015).

Con base en la problemática anterior, el propósito de este estudio es conocer la dinámica del suministro y demandas futuras de agua en la microcuenca Santa Inés. Para ello se establecieron como objetivos: i) cuantificar la extracción actual de agua en la microcuenca Santa Inés; ii) predecir el comportamiento de abastecimiento y demanda de agua en la microcuenca Santa Inés hasta el año 2025 bajo dos escenarios de proyección; y iii) validar la aplicación del modelo hidrológico WEAP para proyectar escenarios futuros de demanda de agua en la quebrada Santa Inés.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio. La microcuenca Santa Inés se encuentra localizada entre los departamentos de Francisco Morazán y El Paraíso, Honduras. La altitud máxima y mínima promedio es de 1765 y 755 msnm respectivamente. Comprende las coordenadas geográficas UTM: X = 501095, Y = 1547051 y X = 510160, Y = 1540601 (Figura 1). Posee 20 km² de superficie, de forma oblonga y con pendientes de 10%, lo que sugiere que el caudal producido por una tormenta es prolongado y atenuante. Finalmente, posee una densidad de drenaje de 1 km/km² (Huezo, 2011).

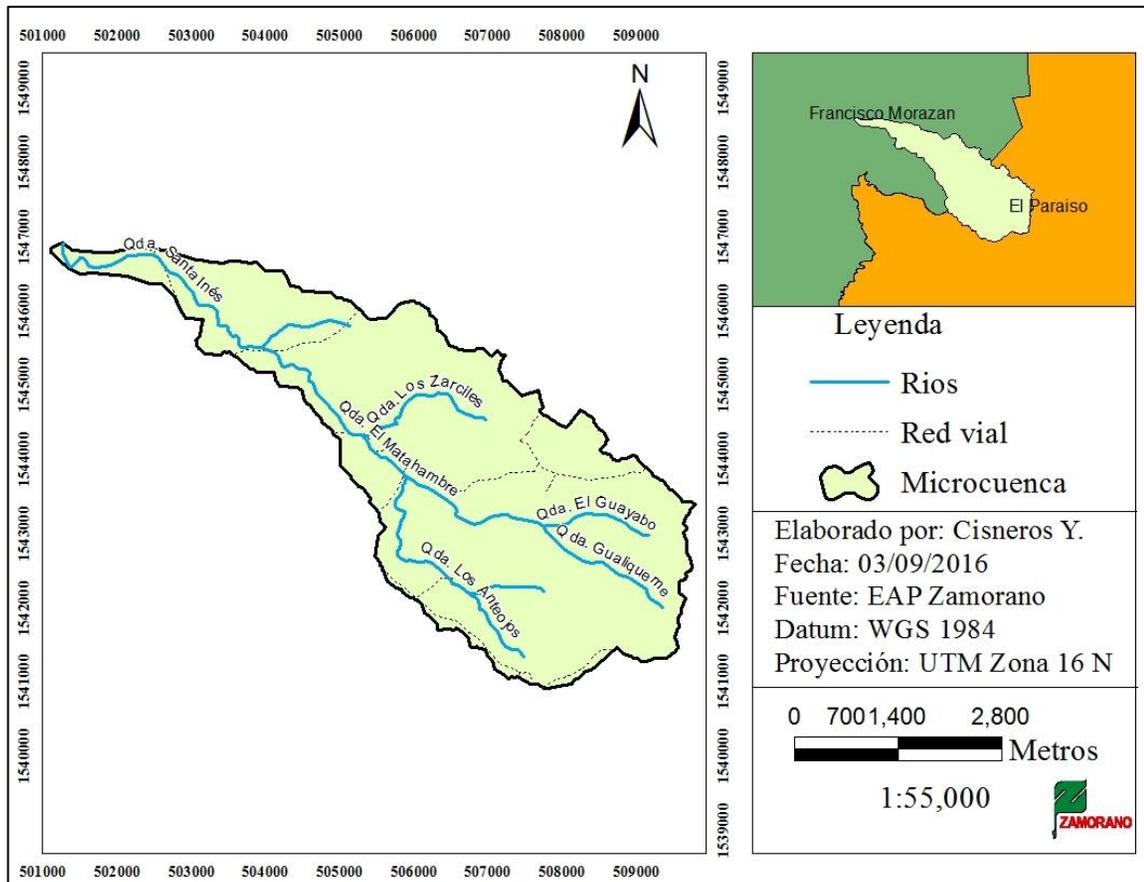


Figura 1. Mapa de ubicación de la microcuenca Santa Inés, Honduras.

Para predecir los cambios de abastecimiento y demanda de agua en la microcuenca Santa Inés se utilizó el modelo WEAP. Para efectuar las predicciones, el modelo requiere información de elementos hidrológicos como la evapotranspiración, escorrentía superficial,

infiltración, escorrentía sub-superficial y flujo base. Además, es necesario contar con datos climatológicos como la precipitación, temperatura, humedad, viento y latitud (Centro de Cambio Global [CCG], Universidad Católica de Chile [UCC] y Stockholm Environment Institute [SEI], 2009) (Figura 2). Lo anterior depende del tiempo y nivel de complejidad del estudio. En este caso se trabajó con el caudal y demandas para riego y uso doméstico. Es permitido hacer las predicciones empleando solo estas variables, como lo indica el estudio realizado por Arranz y McCartney (2007), quienes aplicaron el modelo WEAP para evaluar las demandas futuras de agua en la cuenca Olifants, Sudáfrica. En el estudio de Arranz y McCartney (2007), se consideraron los caudales y las demandas de agua para el sector rural, urbano, minería, riego, silvicultura e industria.

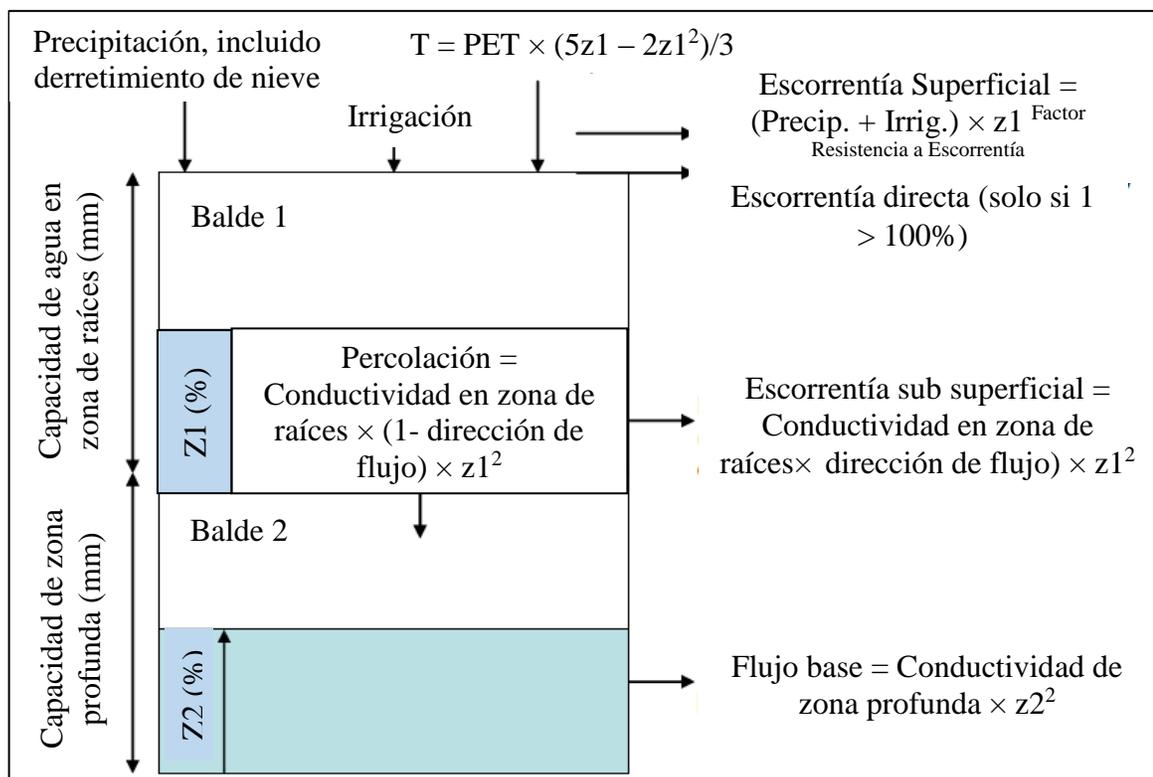


Figura 2. Esquema de balance hídrico modelado en WEAP.

Fuente: Adaptado de WEAP 21 (2015).

Cuantificación de extracciones. Para conocer el número de habitantes por comunidad se usaron los datos del censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2013. La base de datos es de libre acceso y se encuentra en el portal de estadísticas y censos REDATAM en la página web de la institución (Cuadro 1).

Cuadro 1. Población en las comunidades de la microcuenca Santa Inés, Francisco Morazán, Honduras, 2013.

Comunidades	Número de habitantes	Frecuencia (%)
El Guayabo	58	7.9
Los Lirios	34	4.6
Matahambre	28	3.8
Santa Rosa	353	48.0
Santa Inés	217	29.5
El Hondable	46	6.3
Total	736	100.0

Fuente: Censo de población y vivienda del INE (2013).

Para cuantificar las demandas de agua para uso doméstico se consideró una dotación de 160 lppd, volumen válido para zonas rurales según el Consejo Nacional de Agua Potable y Saneamiento (CONASA), Honduras. En el modelo WEAP se utilizó la función de Growthfrom para estimar la cantidad de la población para cada año desde 2016 hasta 2025. Se utilizó una tasa de crecimiento anual de 2.04%, equivalente para el departamento de Francisco Morazán, según el Censo Nacional de Población y Vivienda del INE (2013). Cabe señalar que ésta es similar a la tasa de crecimiento de 1.99% a nivel nacional. Growthfrom calcula el valor de la población en un año determinado utilizando el método de progresión geométrica, cuya ecuación es la siguiente:

$$Pf = Pa \times \left(1 + \left(\frac{r}{100}\right)\right)^n \quad [1]$$

Donde:

Pf = es la población futura

r = es la tasa de crecimiento anual

Pa = es la población actual

n = es el periodo de la proyección

Para cuantificar los usuarios, se hicieron recorridos a lo largo de toda la microcuenca Santa Inés durante los meses de mayo y junio. Cuantificar en esa temporada fue importante, ya que anomalías negativas en precipitación durante la estación lluviosa 2015-2016 influyeron en una mayor demanda de agua. Por las condiciones topográficas y accesibilidad del sitio, se efectuaron aforos directos, donde se midió el tiempo de llenado en un recipiente de 20 L. Se hicieron cinco repeticiones de aforo por cada punto de extracción y luego se promediaron los resultados. Además, se tomaron las coordenadas geográficas UTM y el destino de las extracciones. Los caudales obtenidos se expresaron en m³/mes. Luego, se mapearon las extracciones con el programa ArcGIS, para conocer su distribución a lo largo de la microcuenca.

Medición continua del caudal. La microcuenca Santa Inés cuenta con tres vertederos para la medición del caudal. Dos vertederos se encuentran localizados en dos tributarios y un

último en un punto aguas debajo de la confluencia de los anteriores y en el sitio de captación de agua de Zamorano. El primero está ubicado en la quebrada El Guayabo a 1067 msnm, con coordenadas UTM: X = 506381, Y = 1543513, el segundo se encuentra en la quebrada Los Anteojos a 1038 msnm, con coordenadas UTM: X = 505897, Y = 1543671. Finalmente, el tercer vertedero está situado en la quebrada Santa Inés a 861 msnm, con coordenadas UTM: X = 504070, Y = 1545457 (Figura 3).

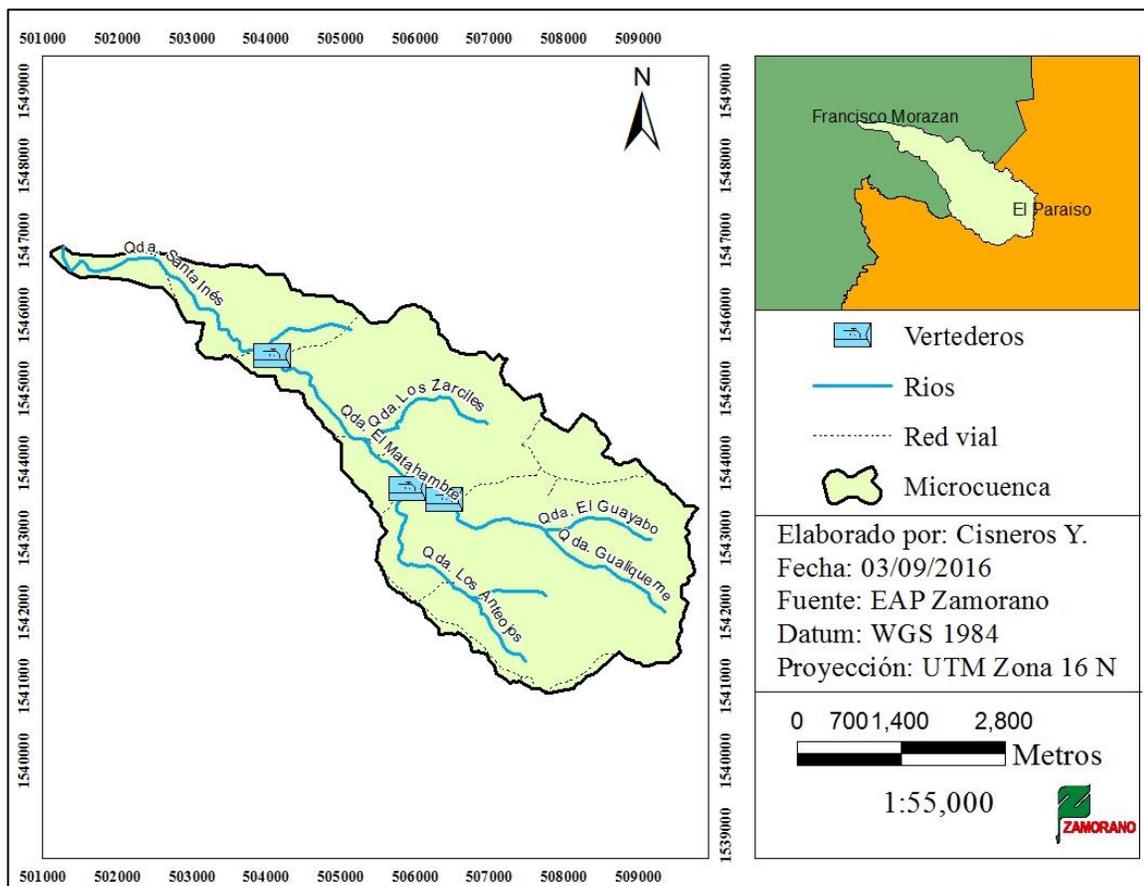


Figura 3. Mapa de ubicación de los vertederos en la microcuenca Santa Inés, Honduras.

Estimación del caudal. La altura del agua se midió con tres estaciones limnimétricas y traductores de presión Global Water (WL16) ® que registraron los datos cada cinco minutos. La información fue descargada de la memoria del sensor para calcular el promedio diario de la lámina de agua expresada en centímetros. No se obtuvo el registro completo de la lámina de agua en Los Anteojos y Santa Inés durante el mes de agosto. Para llenar estos datos se aplicó una regresión con base en los datos obtenidos del sensor de El Guayabo. Seguidamente, se procedió a calcular la diferencia entre la lámina de agua de la estación limnimétrica (A) y la estructura sólida del vertedero (B). Lo anterior, se realizó con el fin de conocer la porción de agua de la estación limnimétrica equivalente al flujo de agua a través del vertedero (Figura 4). Se repitió el mismo procedimiento para los tres vertederos.



Figura 4. Diferencia entre la estación limnométrica y la estructura sólida del vertedero.

Se procedió a calcular el caudal a partir de la porción de lámina de agua de la estación limnométrica, equivalente al agua que fluye a través del vertedero. Los vertederos ubicados en El Guayabo y Santa Inés son de tipo rectangular, mientras que el afluente Los Anteojos es de tipo V-notch con 90° de inclinación. Para estimar el caudal se utilizaron las ecuaciones dependiendo del tipo de vertedero y altura del agua. Para las láminas de agua menores que 20 cm, que corresponde a la primera abertura del vertedero, se aplicaron las ecuaciones [2] y [4]. Para las láminas de agua mayores que 20 cm, correspondientes a la segunda abertura, se utilizaron las ecuaciones [3] y [5], las cuales consideran la sumatoria de la primera y la segunda abertura.

Vertedero rectangular con contracciones:

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [2]$$

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} + C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [3]$$

Vertedero tipo V- notch 90°:

$$Q = C_d \times h^{\frac{5}{2}} \quad [4]$$

$$Q = C_d \times h^{\frac{5}{2}} + C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [5]$$

Donde:

Q = Es el caudal en m³/s que fluye por el vertedero

C_d = Coeficiente de descarga (1.84 = vertedero rectangular y 1.4 = vertedero V- notch 90°)

L = Longitud de cresta del vertedero expresada en metros

h = Altura de agua a través de la abertura del vertedero expresada en metros
 n = Cantidad de contracciones

Los vertederos no se encuentran en la cabecera de cada afluente, así que una vez obtenido los caudales en dichos vertederos se sumaron las extracciones situadas arriba de cada vertedero, con el fin de obtener el caudal que realmente fluiría a través de los vertederos si no existieran dichas extracciones. Por consiguiente, no hubo necesidad de sumar los caudales abajo de los vertederos (Figura 5). Este ajuste fue realizado para proyectar los escenarios y conocer la influencia de las extracciones arriba del vertedero en el caudal del agua.

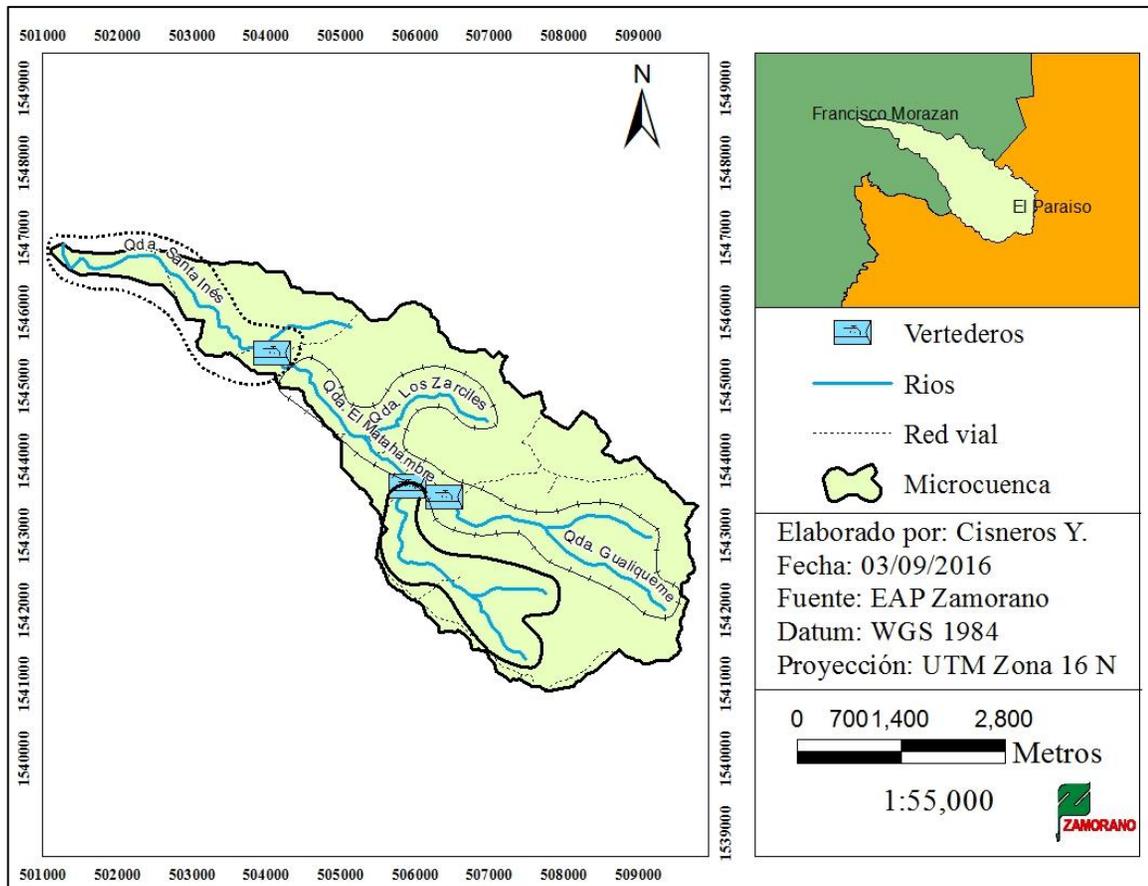


Figura 5. Mapa de ajuste del caudal de cabecera en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, Honduras.

En el modelo WEAP se usó la opción de asistente de series mensuales para registrar los caudales promedios desde abril hasta agosto. Para los demás meses, se completaron los datos en WEAP con base en los comportamientos de caudal históricos de 2002-2009. Cabe señalar que estos caudales históricos se obtuvieron mediante aforos por vadeo en el mismo sitio del vertedero Santa Inés.

Calibración. Una vez obtenidos los datos requeridos para la proyección de las demandas, se procedió a calibrar y verificar la validez del modelo comparando los valores simulados con los observados. La calibración es importante para determinar la representatividad de los caudales con los datos históricos. No importa lo complejo y avanzado que sea un modelo, la incertidumbre siempre se da en las diferentes fases de la modelación (Mantovan y Todini, 2006). La calibración puede resultar incoherente y compleja, ya sea por falta de información de las entradas y salidas del balance hídrico, como también por el poco conocimiento que se tengan de las características físicas de la cuenca (Duan, Sorooshian y Gupta, 1993). Por ello, es importante ser imparcial con la información disponible, esto permite al evaluador actuar con ética y mantener sus posiciones e intereses personales al margen (Reitsma, Zigurs, Lewis, Wilson y Sloane, 1996).

Para calibrar los tres sitios de estudio, se utilizaron los datos históricos de caudal de la quebrada Santa Inés durante el periodo 2002-2009. Como se mencionó anteriormente, estos registros son aforos por molinete, de modo que existe la incertidumbre de que se hayan subestimado los caudales máximos por eventos de altas precipitaciones, debido a que se aforaban solo cuando se disponía de tiempo. Por tanto, el sesgo de la modelación se evaluó con los índices de Nash Sutcliffe y Bias o desviación relativa de los caudales, formulada por Weglarczyk en 1988. El índice de Nash Sutcliffe es una ecuación que muestra los valores de la varianza residual y lo compara con la variación de valores observados o de medición. Entre más próximo a uno el resultado, la correspondencia entre los datos observados y simulados es mucho mayor (Moriassi et al., 2007). La ecuación se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{obs} - Q_{pobs})^2} \quad [6]$$

Donde:

m = es el número total de observaciones disponibles en el periodo considerado,

Q_{obs} = es el caudal observado en el mes i ,

Q_{sim} = es el caudal simulado en el mes i ,

Q_{pobs} = es el caudal promedio de la serie observada.

El índice Bias o desviación relativa de los caudales se calcula de la siguiente manera:

$$Bias = 100 \times \left[\frac{Q_s - Q_o}{Q_o} \right] \quad [7]$$

Donde Q_s y Q_o son los caudales simulados y observados respectivamente. La equivalencia entre estos datos es mayor entre más bajo el porcentaje resultante. Si los índices resultan negativos, expresan una subestimación de los caudales simulados (CCG et al., 2009).

Evaluación de escenarios. Una vez que el modelo se ha calibrado, se puede hacer una serie de simulaciones dependiendo de la disponibilidad de datos. En el modelo WEAP se pueden crear supuestos claves o variables para conocer la dependencia en los escenarios a evaluar.

Se consideraron como variables la tasa de crecimiento anual de la población al 2.04%, la demanda actual de agua para uso doméstico y agrícola, el porcentaje de pérdida de caudal según el cambio de bosques de transición por usos agrícolas y finalmente los futuros escenarios de precipitación. Para éste último se proyecta una disminución de precipitación en el futuro a nivel de la región centroamericana (Bates, Kundzewicz, Wu y Palutikof, 2008). Así, para el año 2020, se espera una reducción de precipitación anual del 5% debajo del promedio anual (Argeñal, 2010).

En el modelo WEAP es posible definir el comportamiento hidrológico en el futuro. Esto se hace con base en las precipitaciones, clasificando los años desde muy secos, secos, normales, húmedos y muy húmedos. De esta manera, se simularon dos escenarios tendenciales hasta el año 2025. Los detalles de la proyección se presentan a continuación:

Escenario A. Se consideraron las demandas de agua para riego y uso doméstico en las seis comunidades de la microcuenca Santa Inés y Zamorano. Para el sector de riego se consideró que no hay expansión en las áreas productivas que demandan riego, asumiendo así que las extracciones no cambian durante el periodo de evaluación de la proyección. Para el uso doméstico se consideró la demanda según la tasa de crecimiento de 2.04% anual. Finalmente, para la oferta de agua, se asumieron que los caudales no cambian a través del tiempo, considerando los caudales del año base 2016.

Escenario B. Se consideraron las demandas de agua para las seis comunidades de la microcuenca Santa Inés y Zamorano, más las demandas de agua para la comunidad de San Francisco, considerando los 3,192 habitantes y los 7.2 L/s de agua que dicha comunidad planifica extraer. Para el sector agrícola se consideró que hay expansión en las áreas productivas que demandan riego. Para ello se asumió el cambio de bosques de transición por usos agrícolas en la microcuenca, el cual ocasiona una pérdida de producción del caudal de 0.11% respecto al año anterior (Acosta y Kucharzky, 2012). Cabe resaltar que no se consideró el porcentaje de pérdida del caudal para la demanda de agua a Zamorano, debido a que la Dirección de Recursos Hídricos de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (MiAmbiente) autoriza como máximo los 20 L/s que ya extrae actualmente Zamorano. Con base en los porcentajes de reducción de precipitación definido por Argeñal (2010), el 2017 se consideró como año base para la proyección. El año 2020 se consideró como año seco; es importante aclarar que se tomó en cuenta dicho supuesto con el fin de conocer cuál sería el comportamiento de las aportaciones si ocurre tal evento, con esto no se descartan que dichos eventos afecten los demás años, más aun si se presentan eventos atípicos de variabilidad climática como el fenómeno de El Niño. Los caudales de los tres afluentes, las demandas cubiertas y no cubiertas se reportaron en promedios mensuales y anuales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de las extracciones. Durante el período mayo-junio de 2016, se identificaron 39 usuarios de agua para riego en la microcuenca Santa Inés. Las comunidades de El Hondable y Los Lirios fueron los sitios con mayor y menor cantidad de usuarios, respectivamente (Figura 6).

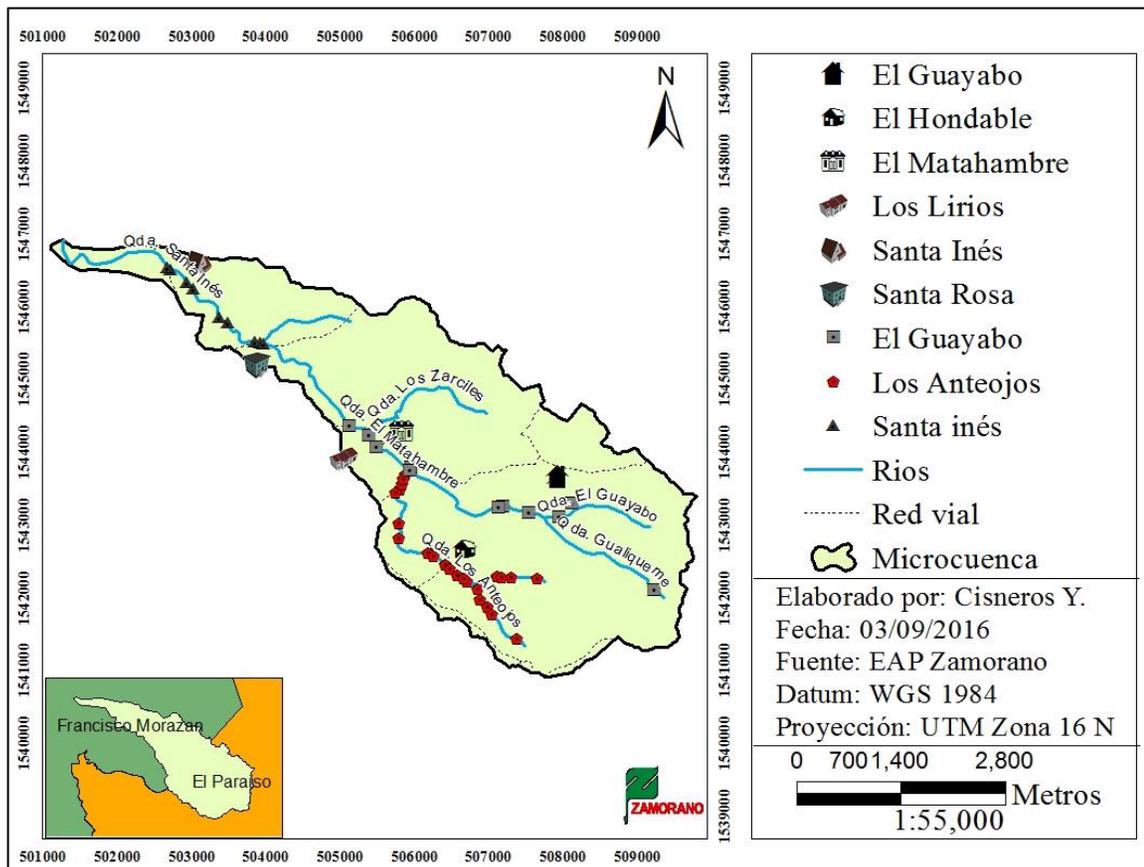


Figura 6. Mapa de distribución de usuarios de agua en las comunidades de la microcuenca Santa Inés.

El mayor demandante de agua, durante la época seca de la microcuenca Santa Inés, es la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano con 51,840 m³/mes. Actualmente, Zamorano solo extrae el agua para fines agrícolas; sin embargo, se prevé el uso de agua en el corto plazo para consumo doméstico sin que se incremente el caudal de 20 L/s que ha sido concedido por la Dirección de Recursos Hídricos de la Secretaría de Recursos Naturales y

Ambiente (MiAmbiente). En cuanto a las comunidades, El Hondable es el principal usuario, con una extracción en promedio de 16,731 m³/mes, distribuidos tanto para fines agrícolas (16,509 m³/mes) como para uso doméstico (222 m³/mes). De lo anterior se infiere que existe una relación estrecha entre el número de usuarios y la demanda. Por otro lado, la comunidad de Los Lirios es el sector que menos demanda agua, ocupando solamente 5,154 m³/mes. En comparación con el año 2011 la demanda para uso doméstico en este sitio aumentó en 66 m³/mes (Huezo, 2011). Finalmente, en cuanto al uso doméstico, el patrón de consumo fue proporcional a la cantidad de habitantes por comunidad, siendo Santa Rosa el principal usuario con 1,695 m³/mes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Demanda de agua en las comunidades de la microcuenca Santa Inés y Zamorano, Francisco Morazán, Honduras, 2016.

Comunidades	Riego (m³/mes)	Uso doméstico (m³/mes)	Total (m³/mes)
El Guayabo	6,939	279	7,218
Los Lirios	4,992	162	5,154
Matahambre	8,478	135	8,613
Santa Rosa	13,791	1,695	15,486
Santa Inés	5,682	1,041	6,723
El Hondable	16,509	222	16,731
Zamorano	51,840	-	51,840
Total	108,231	3,534	111,765

Evaluación de escenarios. A continuación se presentan los comportamientos de abastecimiento y demandas de agua en los tres afluentes de la microcuenca Santa Inés durante los nueve años de evaluación. Los valores están expresados en promedios mensuales y anuales.

Escenario A. Como se explicó anteriormente, en este escenario se asumió que los caudales se mantienen constantes durante los nueve años de evaluación. La quebrada Santa Inés es la principal aportante, por ser la confluencia de las quebradas El Guayabo y Los Anteojos, así el promedio anual es de 2.56 hm³ para los nueve años de evaluación. La quebrada Los Anteojos es la que menos aporta a la microcuenca, con un promedio anual de 0.53 hm³ para los nueve años de evaluación. Finalmente, la quebrada El Guayabo aporta en promedio 1.89 hm³/año (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escenario A de aportación promedio anual en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Afluentes	Escenario A (hm ³ /año)
Los Anteojos	0.53
El Guayabo	1.89
Santa Inés	2.56

El comportamiento del caudal promedio mensual para los tres afluentes es muy variable durante el año. Se presentan niveles máximos durante los meses de mayo a agosto. Comparado con la precipitación promedio mensual de Honduras para el año 2014, existe una relación directa con el patrón de distribución del caudal mensual en la microcuenca (INE, 2015). Sin embargo, con el año 2015 no existe relación, debido a que el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur provocó eventos atípicos en la precipitación (Florida International University [FIU], 2015). Al analizar el balance hídrico del 2011, el cambio en almacenamiento en época lluviosa fue positivo. Lo anterior está directamente relacionado con los mayores niveles de caudal que se presentan en la microcuenca, indicando además que existen menos extracciones que entradas (Huezo, 2011).

El afluente Santa Inés aporta en promedio 0.08 m³/s mensuales, con caudales picos en el mes de junio (0.13 m³/s) y mínimos en el mes de abril (0.04 m³/s). De las dos confluencias, Los Anteojos es la que menos aporta (0.04 m³/s) a la quebrada Santa Inés, ya que la cantidad de usuarios y el nivel de extracción dentro de la microcuenca influyen en la reducción del caudal. Cabe indicar que durante el mes de abril, cuando el caudal es mínimo, aportando solamente un promedio de 0.01 m³/s (Figura 7).

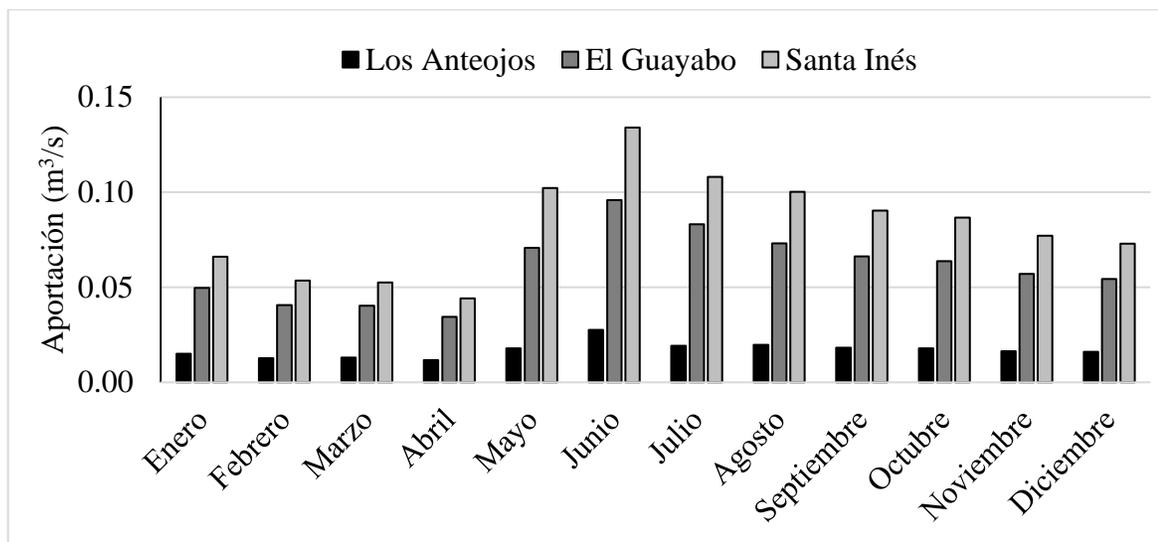


Figura 7. Escenario A de aportación promedio mensual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Existe una presión creciente en la demanda de agua para uso doméstico en los tres afluentes, debido a la tasa de crecimiento anual de 2.04%. De esta manera, en Los Anteosos se demandan aproximadamente 0.03 hm³ anuales, y en El Guayabo se demandan 0.01 hm³ anuales. Finalmente, en la quebrada Santa Inés la demanda para uso doméstico es de 0.05 hm³ en promedio (Figura 8).

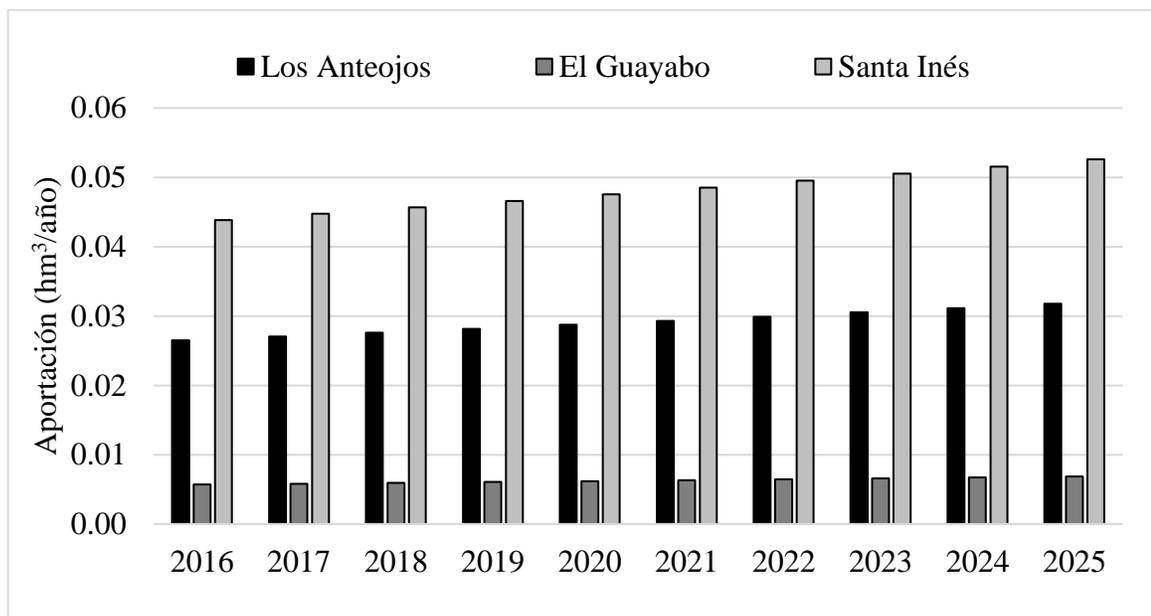


Figura 8. Escenario A de demanda promedio anual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

En cuanto al uso de agua para riego, este escenario asume que no hay expansión en las áreas productivas que demandan riego, por lo que las demandas se mantienen constantes durante los nueve años de proyección. Para este fin, se ejerce mayor presión en la quebrada Santa Inés, donde se extrae aproximadamente 0.83 hm³/año, siendo Zamorano el principal usuario; no obstante, una de sus confluencias, El Guayabo está sujeta a menor presión, ya que se extrae solamente 0.15 hm³/año (Cuadro 4). Lo anterior se explica con los hallazgos encontrados por Vásquez (2015) donde menciona que la agricultura en El Guayabo ejerce una presión de sólo 6% comparado con el 46% en Los Anteosos.

Cuadro 4. Escenario A de demanda promedio anual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Afluentes	Escenario A (hm ³ /año)
Los Anteosos	0.34
El Guayabo	0.15
Santa Inés	0.83
Total	1.32

Bajo el escenario A, el comportamiento de la demanda promedio mensual para riego es muy similar en las tres quebradas. En el afluente Santa Inés, durante los meses de mayor demanda se extrae hasta $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo Zamorano el principal usuario con $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a la quebrada El Guayabo se demanda menos agua con una extracción máxima de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ y mínima de $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio (Figura 9).

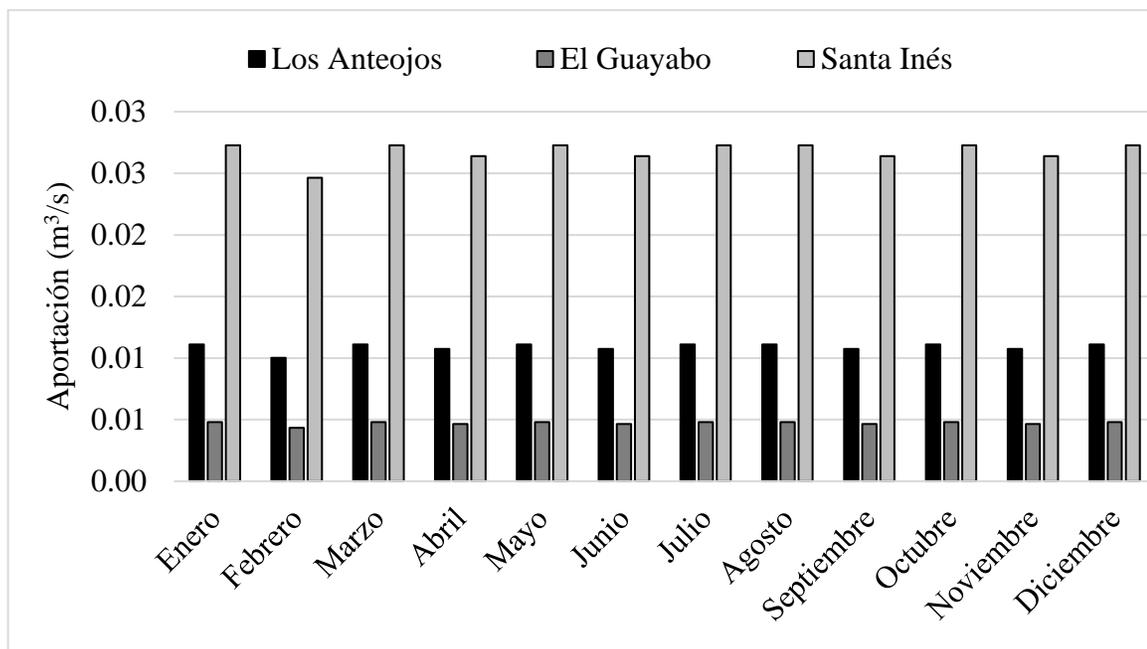


Figura 9. Escenario A de demanda promedio mensual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

En las demandas de agua mensual para uso doméstico, el comportamiento es similar a lo observado para riego. Sin embargo, la mayor demanda se produce en la quebrada Los Anteojos, la cual aporta como máximo $2,468 \text{ m}^3/\text{mes}$ y como mínimo $2,230 \text{ m}^3/\text{mes}$. En contraste, se observan menores demandas en la quebrada El Guayabo, debido a la mínima cantidad de habitantes que viven en ese sitio. Finalmente, en la quebrada Santa Inés, se demanda más agua para riego que para uso doméstico, lo máximo y mínimo que se demanda para este último es de $4,086 \text{ m}^3/\text{mes}$ y $3,691 \text{ m}^3/\text{mes}$, respectivamente (Figura 10).

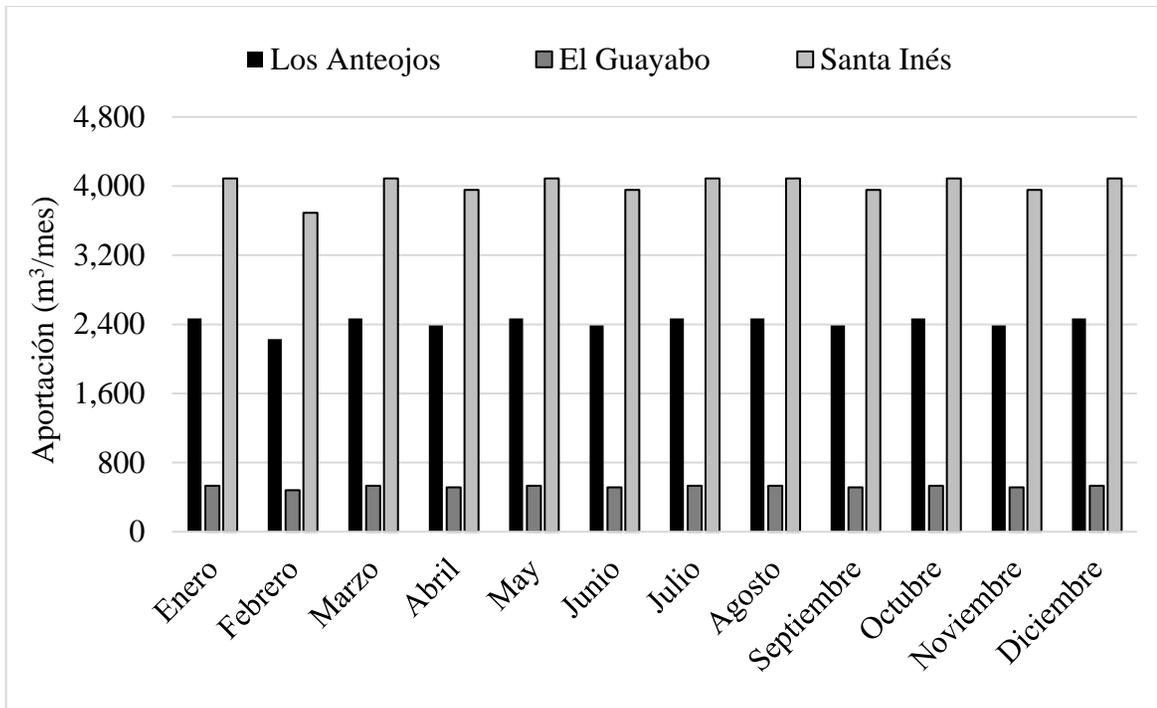


Figura 10. Escenario A de demanda promedio mensual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Respecto a las demandas no cubiertas, bajo el escenario A, el afluente Los Anteojos es el único que percibe el déficit en la demanda, pues se espera una falta de suministro de 29 m³ para el 2025. El déficit se observa específicamente para el sector agrícola y esto ocurre en abril, uno de los meses más secos del año.

Escenario B. Como se explicó anteriormente, en este escenario se asumió que los caudales están influenciados por los porcentajes de reducción de precipitación en un 5% en el año 2020 (Argeñal, 2010), considerando el 2017 como año base para la proyección. Efectivamente se percibe una disminución del caudal en los tres afluentes para el año 2020. Así, El Guayabo percibe una disminución de hasta 1.51 hm³, Los Anteojos se reduce a 0.426 hm³ y en Santa Inés llega hasta 2.049 hm³ (Figura 11).

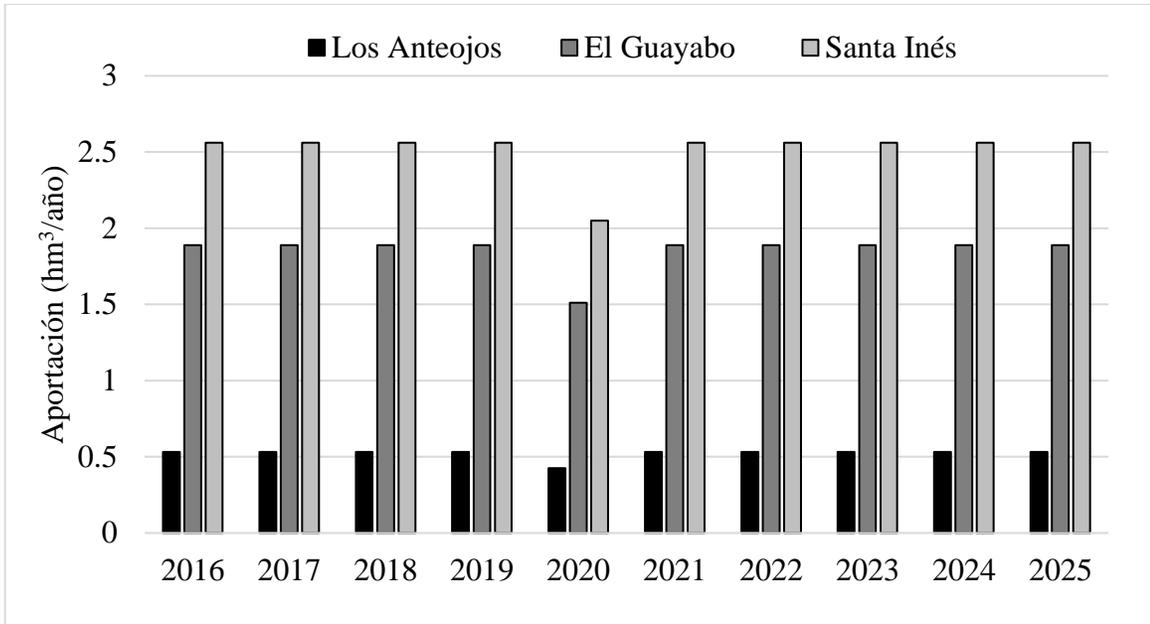


Figura 11. Escenario B de aportación promedio anual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

La disminución del caudal mensual promedio en el año 2020 es el siguiente: en Los Antejos, el caudal se reduce a $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, en El Guayabo a $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ y en Santa Inés a $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 12).

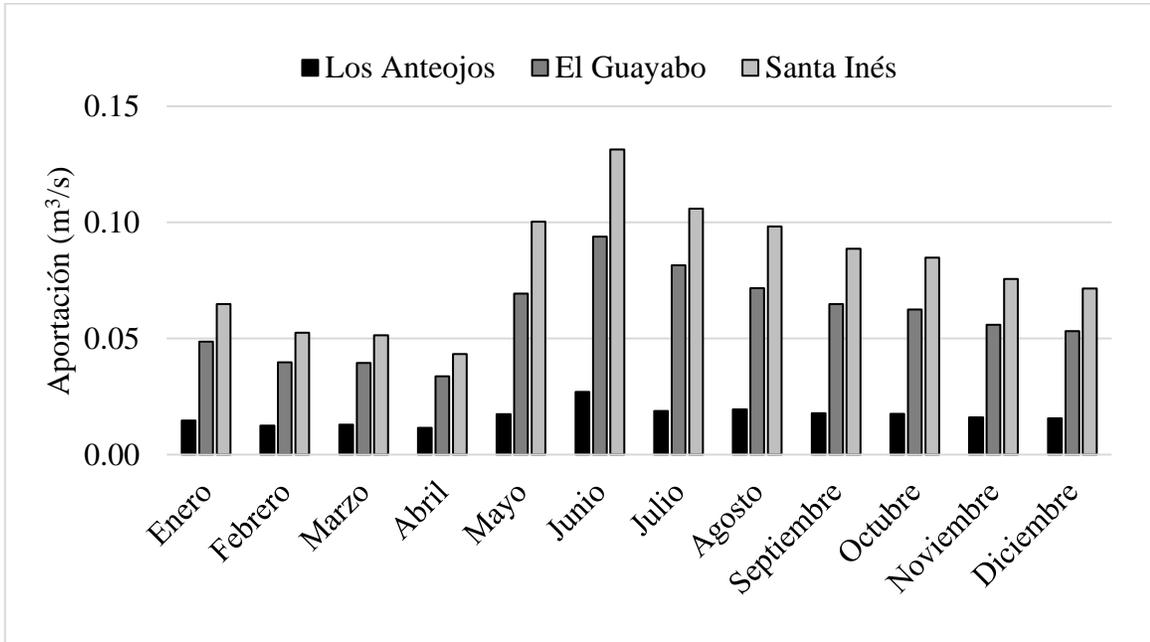


Figura 12. Escenario B de aportación promedio mensual de los afluentes en la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Se percibe un incremento en la demanda promedio anual del agua para uso doméstico. En la quebrada Santa Inés, aumentó desde 0.048 hm³ hasta 0.26 hm³, debido a los 3,192 habitantes de la comunidad de Santa Rosa. Sin embargo, en los afluentes El Guayabo y Los Anteojos las demandas para este uso son iguales al escenario A. Cabe indicar que para el año 2025, la demanda para uso doméstico en la quebrada Santa Inés se incrementará hasta 0.28 hm³ (Figura 13).

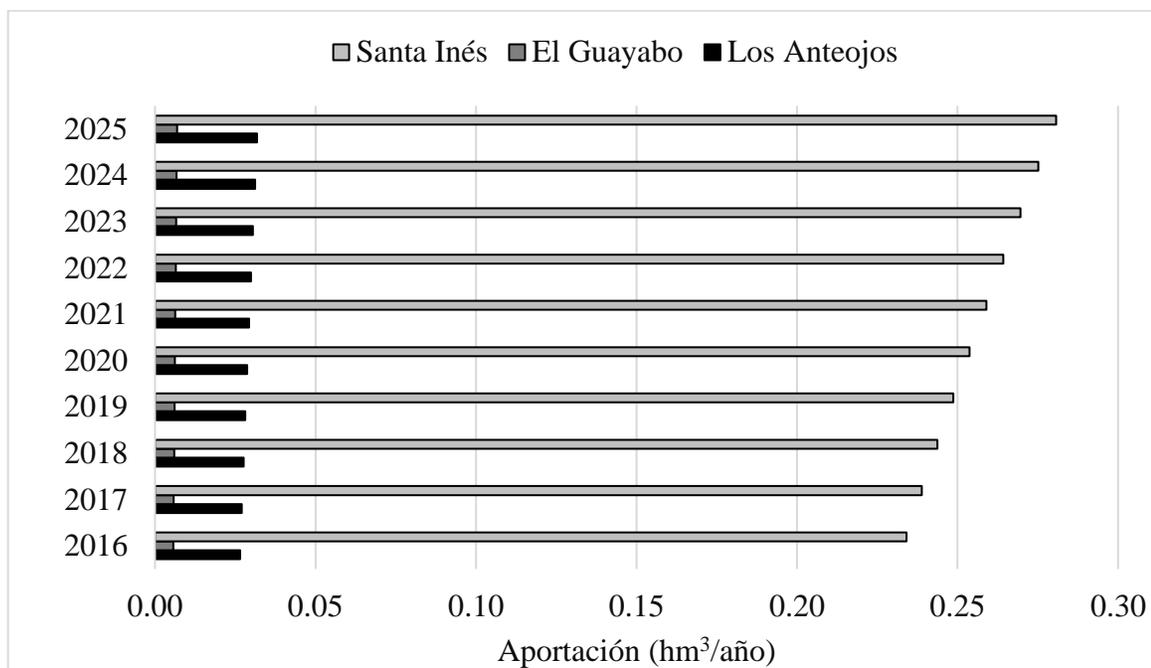


Figura 13. Escenario B de demanda promedio anual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

En el sector riego, asumiendo la pérdida del caudal de 0.11% debido al cambio de bosques de transición por usos agrícolas (Acosta y Kucharsky, 2012), se incrementa la demanda en los tres afluentes. En Los Anteojos, la demanda se incrementa de 0.339 hm³ hasta 0.356 hm³ en promedio; además, para el año 2025, la extracción se incrementa a 0.374 hm³ aproximadamente. En El Guayabo, la extracción aumenta desde 0.146 hm³ hasta 0.154 hm³ que comparado con Los Anteojos es muy bajo debido a los pocos demandantes de agua en el sitio. Por otro lado, la quebrada Santa Inés percibe un incremento promedio de 0.832 hm³ hasta 0.891 hm³ en promedio. Cabe señalar que este incremento está influenciado solamente por los usuarios de las seis comunidades de la microcuenca y la comunidad de San Francisco. En el último año de la proyección la demanda en esta quebrada aumenta hasta 0.935 hm³ aproximadamente (Figura 14).

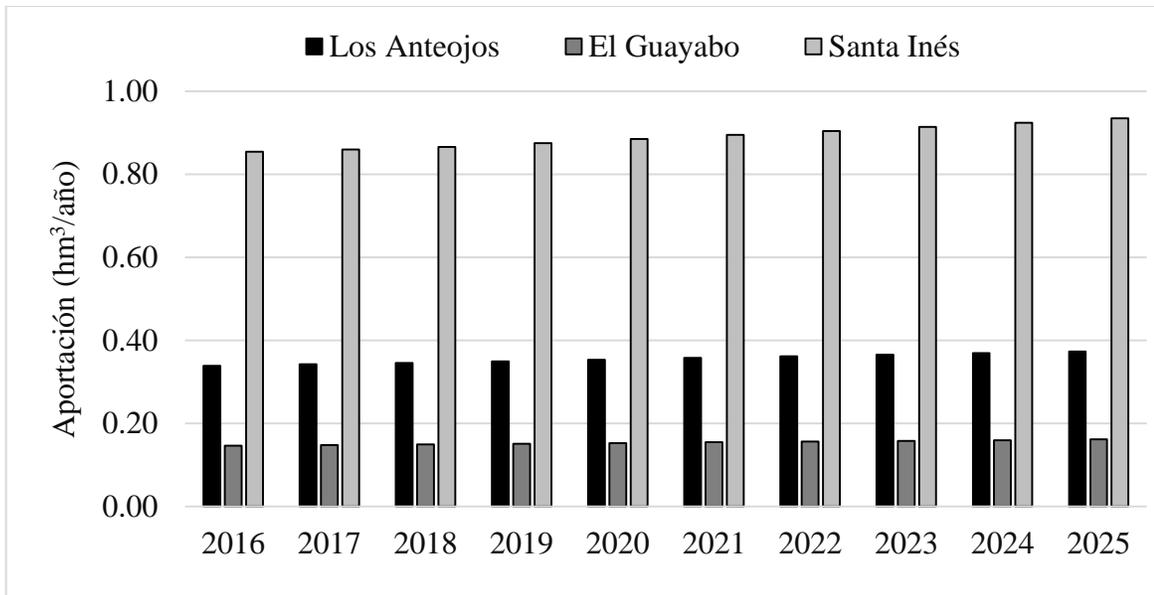


Figura 14. Escenario B de demanda promedio anual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Al comparar la demanda promedio mensual para riego con el escenario A, los resultados sugieren que el afluente Santa Inés aumenta a $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente. Durante los meses de mayor demanda, se percibe un incremento promedio de $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente y en los meses de menor demanda $0.026 \text{ m}^3/\text{s}$. En Los Anteojos, la demanda aumenta en promedio a $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en El Guayabo se incrementa solamente a $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 15).

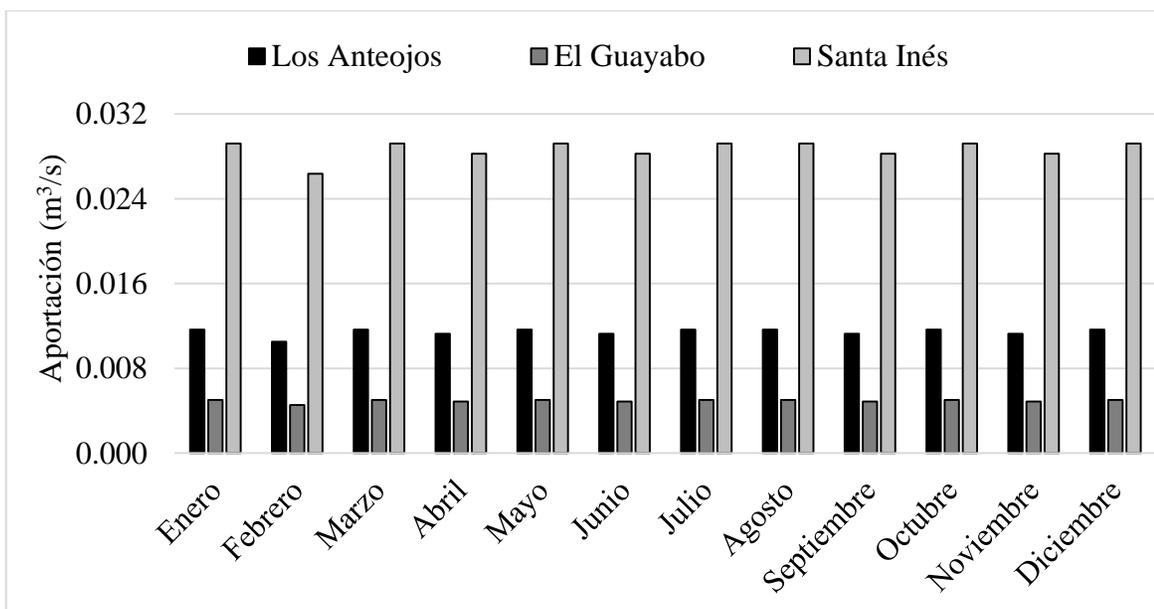


Figura 15. Escenario B de demanda promedio mensual para riego en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

En la demanda mensual para uso doméstico, las fluctuaciones son similares al del sector riego. De esta manera, en la quebrada Santa Inés durante los meses de mayor demanda el incremento se da en $0.084 \text{ m}^3/\text{s}$. En el afluente Los Anteojos, se incrementa en promedio a $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$. Finalmente, se aprecia que en El Guayabo existe una extracción de tan solamente $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ (521 m^3) (Figura 16).

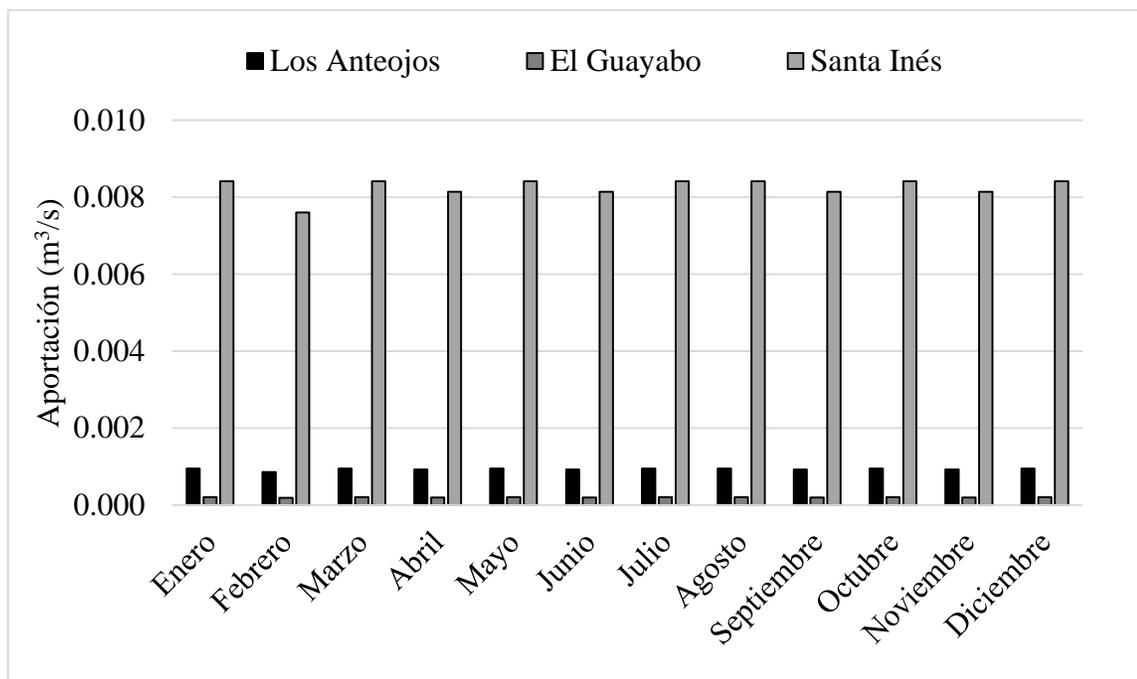


Figura 16. Escenario B de demanda promedio mensual para uso doméstico en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

De manera resumida, se visualiza el efecto de la disminución de precipitación desde 4.98 hasta $4.88 \text{ hm}^3/\text{año}$ en las aportaciones de los afluentes (Cuadro 5). Los eventos de variabilidad climática en la región centroamericana, atentan contra la seguridad alimentaria de las familias. Por ejemplo en el año 2015, se estimaron pérdidas de más del 60 y 80 % en los cultivos de maíz y frijol, respectivamente (FAO, 2015).

Cuadro 5. Resumen de aportación anual de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Afluentes	Escenario A ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Escenario B ($\text{hm}^3/\text{año}$)
Los Anteojos	0.53	0.52
El Guayabo	1.89	1.85
Santa Inés	2.56	2.51

En síntesis, suponiendo que la comunidad de San Francisco culmine sus planes de extraer agua para uso doméstico, las demandas se incrementarían hasta 0.26 hm³/año. Considerando que la extracción es para dicho uso, no existe restricción alguna (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resumen de demanda anual para uso doméstico de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Afluentes	Escenario A (hm³/año)	Escenario B (hm³/año)
Los Antejos	0.03	0.03
El Guayabo	0.01	0.01
Santa Inés	0.05	0.26

Asumiendo el incremento de la agricultura en las comunidades de la microcuenca, las demandas aumentan desde 1.32 hm³/año hasta 1.4 hm³/año. Teniendo en cuenta las aportaciones de los afluentes, Los Antejos recibe una mayor presión, lo cual pone en peligro el caudal base de la misma, sobre todo durante la época seca (Cuadro 7).

Cuadro 7. Resumen de demanda anual para riego de los escenarios A y B en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Afluentes	Escenario A (hm³/año)	Escenario B (hm³/año)
Los Antejos	0.34	0.36
El Guayabo	0.15	0.15
Santa Inés	0.83	0.89

Respecto a las demandas no cubiertas en el escenario B, se estima un déficit de suministro en la quebrada Los Antejos a partir del año 2018. Para ese año se estima un déficit de 282 m³, a partir de ese año el incremento será gradual, de modo que para el 2025 se prevé un incremento de 3,165 m³. Suponiendo que en el año 2020 ocurra la reducción de precipitación en un 5% debajo del promedio anual, el déficit durante ese período alcanza hasta 15,607 m³ aproximadamente; además, la quebrada Santa Inés percibe un déficit de 1,942 m³ durante ese año (Figura 17).

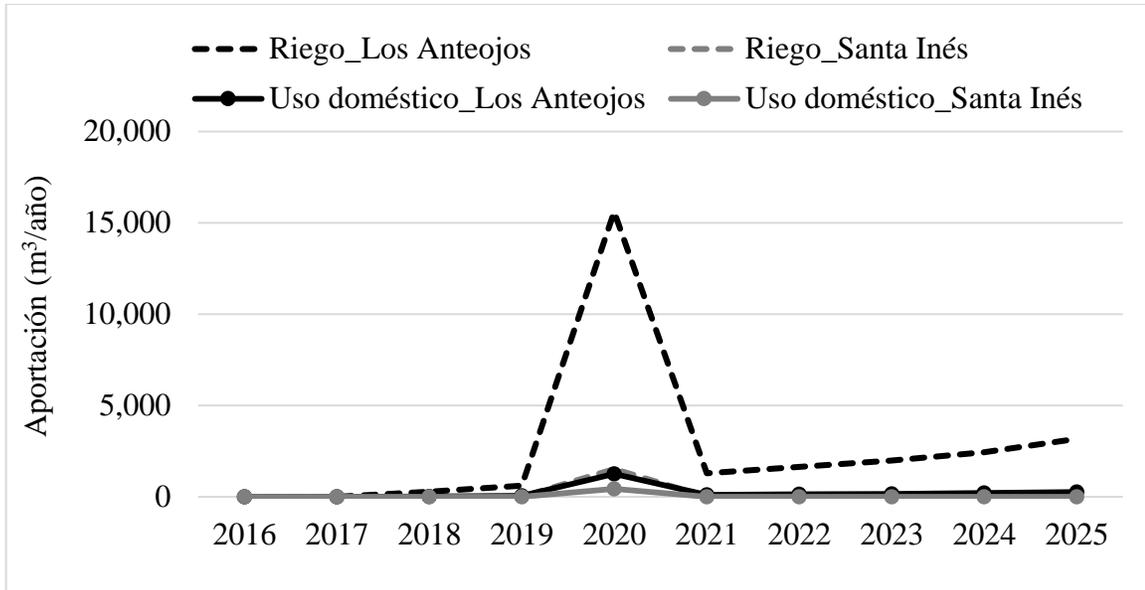


Figura 17. Escenario B de demanda anual no cubierta en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Al observar el comportamiento mensual de demanda no cubierta, el déficit en Los Antejos específicamente se manifiesta durante los meses de enero hasta abril, coincidiendo con la época seca del año. De los cuatro meses, abril presenta el mayor déficit (1,738 m³), enfatizando que el sector agrícola percibe mayor déficit llegando hasta 2,701 m³/mes, comparado con los 217 m³/mes para uso doméstico. Finalmente, la demanda no cubierta en la quebrada Santa Inés, se manifiesta solamente en el mes de abril del año 2020, por la suposición explicada anteriormente (Figura 18).

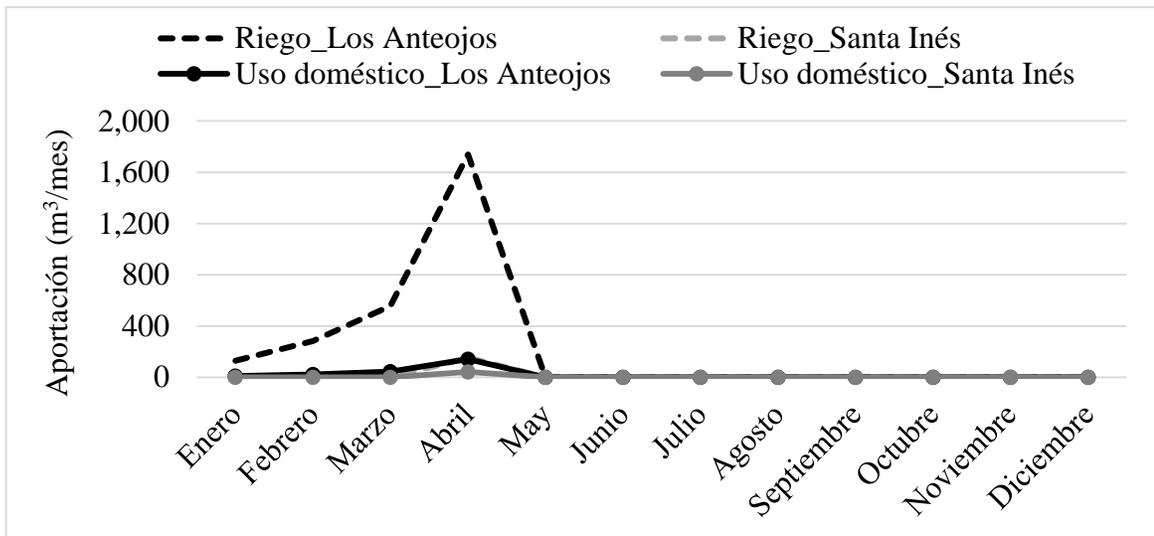


Figura 18. Escenario B de demanda mensual no cubierta en los afluentes de la microcuenca Santa Inés, durante los años 2016 al 2025.

Calibración. Para la quebrada Santa Inés, el índice de Nash Sutcliffe resultó en -3.3 y el índice de Bias en 50.8% . Éste último demuestra una sobreestimación moderada de los caudales simulados, ya que los datos históricos no presentan registros de los caudales picos ya que los datos fueron tomados solo cuando se disponía de tiempo (Figura 19).

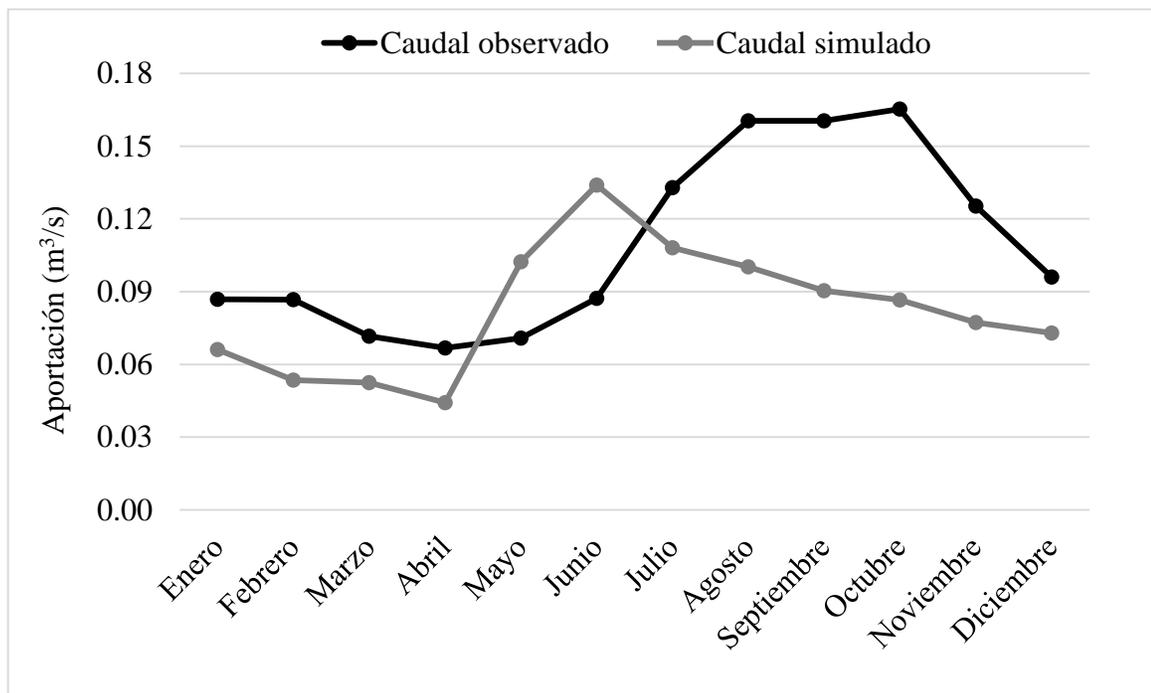


Figura 19. Caudales observados y simulados de la quebrada Santa Inés.

4. CONCLUSIONES

- En la microcuenca Santa Inés se extraen 43.2 L/s de agua, de los cuales 41.8 L/s se destinan para el sector agrícola. La comunidad El Hondable produce mayor presión en el afluente Los Antojos, poniendo en peligro al caudal aguas abajo, ya que es una de las confluencias de la quebrada Santa Inés. Es evidente la creciente demanda de agua en la microcuenca y la presión sobre el caudal base en períodos secos; sin embargo, es posible reducir la extracción a través de la aplicación de sistemas de riego eficientes.
- Los eventos atípicos de precipitación y la creciente demanda de agua para riego, uso doméstico y los cambios en el uso de suelo en la microcuenca provocarían una disminución del caudal lo que resultaría en demandas no cubiertas durante períodos secos a partir del año 2018. Hasta el momento, no se observan prácticas que conlleven al uso eficiente del agua, siendo urgente la ejecución de proyectos de manejo y gestión encaminados al uso racional de este recurso.
- La aplicación del modelo hidrológico WEAP reportó una sobreestimación de caudales en la quebrada Santa Inés, pues no se encontraron correspondencias entre los caudales simulados y observados. Lo anterior, se debe a que los datos históricos fueron obtenidos mediante aforos por vadeo.

5. RECOMENDACIONES

- Continuar registrando los caudales de las tres quebradas continuamente por varios años, con el fin de generar una base de datos para estudios posteriores. Esto se debe a que los datos históricos existentes a la fecha no presentan registros de caudales picos.
- Incluir elementos hidrológicos como la evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración, escorrentía sub-superficial y datos climatológicos como la precipitación, temperatura, humedad, viento y latitud en la modelación para obtener con mayor precisión en las proyecciones futuras.
- Validar la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la microcuenca Santa Inés una vez se tenga los datos históricos para las tres quebradas y se conozcan las demandas futuras específicas de diferentes usuarios dentro y fuera de la microcuenca.
- Capacitar y brindar asistencia técnica a los habitantes de la microcuenca Santa Inés sobre el uso eficiente del agua y prácticas de conservación y manejo de suelo para reducir las alteraciones en cantidad y calidad de agua en los tributarios de la microcuenca.
- La Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, como principal usuario de agua en la microcuenca Santa Inés, debe demostrar un uso eficiente del agua al aplicar sistemas de riego tecnificados en sus terrenos.
- Debido a la creciente presión y al incremento de extracciones se recomienda hacer estudios específicos sobre caudales ecológicos en los tributarios de la microcuenca que sirvan de modelo para regular extracciones en el corto plazo.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta, A., y Kucharsky, O. (2012). Estudio edafológico y de cobertura para la modelación hidrológica con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (2001). Plan de Manejo Microcuenca Santa Inés. Proyecto de Rehabilitación y Manejo de la Cuenca Alta del Río Choluteca. Honduras, p. 51.
- Alcamo, J., Flörke, M., y Märker M. (2007). Future long term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275.
- Aparicio J., Lafragua J., Gutiérrez A., Mejía R., y Aguilar E. (2006). Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Recuperado el 16 de septiembre de 2015, de: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/PHI_Report_Evaluacion_de_1os_Recursos_Hidricos.pdf
- Ardón, C., Longwell, T., y Vélez, L. (2005). Protección de la Cuenca Santa Inés. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras, p. 2.
- Argeñal, F. (2010). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, Honduras. Recuperado el 16 de septiembre de 2016, de: [http://riesgosydesarrollo.org/web/odm_data/rt/Variabilidad%20Climatica%20y%20Cambio%20Climatico%20en%20Honduras%20\(PDF\).pdf](http://riesgosydesarrollo.org/web/odm_data/rt/Variabilidad%20Climatica%20y%20Cambio%20Climatico%20en%20Honduras%20(PDF).pdf)
- Arranz, R., y McCartney, M. (2007). Application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) model to assess future water demands and resources in the Olifants Catchment, South Africa. Colombo, Sri Lanka: *International Water Management Institute*, (Vol. 116).
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., y Palutikof, J. (2008). Cambio Climático y Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, Suiza, 224. Recuperado el 16 de septiembre de 2016, de: <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>

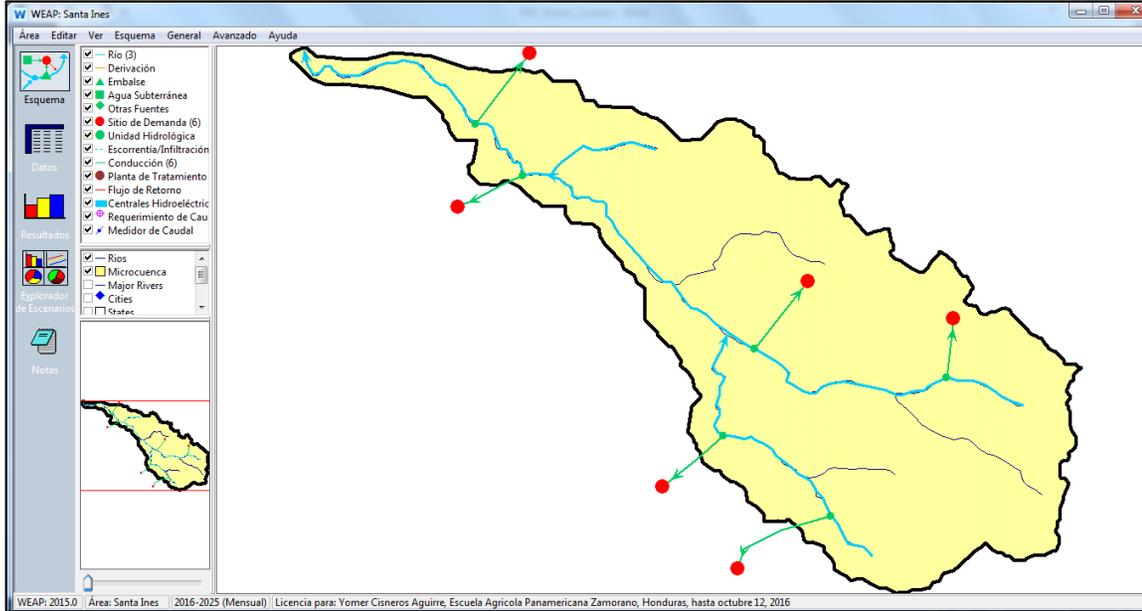
- Centro de Cambio Global, Universidad Católica de Chile y Stockholm Environment Institute. (2009). Guía Metodológica de Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Ministerio del Ambiente de Ecuador y PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) de la Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Consejo Nacional del Agua (2005). Programación sectorial con base en las metas del sector agua potable y saneamiento. Recuperado el 14 de Noviembre de 2015, de: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/Honduras/programa-sectorial-con-base-a-las-metas-de-la-erp-sector-agua-potable-y-saneamiento.pdf>
- Droogers P., y Immerzeel W. (2006). Calibration Methodologies in Hydrological Modeling: State of the Art. *The National User Support Programme 2001-2005. FutureWater-Science for Solutions*. 9
- Duan, Q., Sorooshian, S., y Gupta, V. (1993). A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Optimization. *Journal of Optimization Theory Application*, 76, 501-521.
- Ente Regulador de Servicios de Agua Potable y Saneamiento. (2011). Indicadores sector agua y Saneamiento en Honduras. Recuperado el 14 de Noviembre de 2015, de: <http://www.ersaps.hn/documentos/interes/Indicadores%202011.pdf>
- Florida International University (2015). El Niño Oscilación del Sur 2015 – 2016. Región Latinoamérica y el Caribe. Recuperado el 16 de septiembre de 2016, de: http://drr.fiu.edu/enso-201516/enso_2015_fiu-drr-report_no2_espanol.pdf
- Food and Agricultural Organization (2009). ¿Por qué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas? Roma, Italia. Recuperado el 13 de noviembre de 2015, de: <http://www.fao.org/docrep/012/a1295s/a1295s00.pdf>
- Food and Agricultural Organization (2015). Informe regional: América del Sur, Centroamérica y Caribe – Honduras. Recuperado el 20 de septiembre de 2016, de: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/hnd/indexesp.stm
- Global Water Partnership (2015). Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica – Honduras. Recuperado el: 22 de septiembre de 2016, de: http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/SRH_Honduras_2016.pdf
- González, I. (2015). Evaluación de la exportación de sólidos y nutrientes de dos tributarios en la microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Huezo, L. (2011). Caracterización hidrológica y balance hídrico de la microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.

- Instituto de Conservación Forestal. (2010). Estrategia Nacional de Manejo de Cuencas en Honduras. Recuperado el: 14 de Noviembre de 2015, de: <http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2015/08/Estrategia-Nacional-de-Cuencas.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística (2015). Boletín de precipitación pluvial nacional 2014. Tegucigalpa, Honduras. Recuperado el: 22 de septiembre de 2016, de: <http://www.ine.gob.hn/images/Productos%20ine/Boletines/servicios%20publicos/Boletin%20de%20precipitacion%20Pluvial%202010-2014.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística (2013). Estadísticas y censos REDATAM. Recuperado el 22 de septiembre de 2016, de: <http://www.redatam.org/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=MUNDEP08ylang=ESP>
- Kiparsky M., Joyce B., Purkey D., y Young C. (2014). Potential Impacts of Climate Warming on Water Supply Reliability in the Tuolumne and Merced River Basins, California. *Journal PLoS one*, 9(1), e84946.
- Langbein, W., y Kathleen, T. (1995). Science in Your Watershed: General Introduction and Hydrologic Definition: Manual of Hydrology. Recuperado el 13 de Octubre de 2015, de: <http://water.usgs.gov/wsc/glossary.html>
- Mantovan, P., y Todini, E. (2006). Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 330(1), 368-381.
- Montenegro, J. (2013). Caracterización agrícola en la zona de recarga de la microcuenca Santa Inés, Honduras (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van, M., Bingner, R., Harmel, R., y Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Vol. 50 (3)*, 885-900.
- Nash, J., y Sutcliffe, J., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Programa Regional de Reducción de Emisiones de la Degradación y Deforestación de Bosques en Centroamérica y República Dominicana (2014). Mapa Forestal y de Cobertura de la Tierra de Honduras: Análisis de Cifras Nacionales. Honduras. Recuperado el 25 de septiembre de 2016, de: http://www.reddccadgiz.org/documentos/doc_1697518440.pdf
- Reitsma, R., Zigurs, I., Lewis C., Wilson V., y Sloane, A. (1996). Experiment with Simulation Models in Water Resources Negotiations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 64-70.

- Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillado (2015). Diseño de sistema de agua potable para la comunidad de San Francisco, municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán. Honduras, p.1.
- Vásquez L. (2015). Caracterización de la relación precipitación-escorrentía en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Water Evaluation And Planning 21. (2015). Water Evaluation and Planning 21 . Recuperado el 13 de septiembre de 2015, de: <http://www.weap21.org/>
- Weglarczyk, S. (1998). The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, 206(1), 98-103.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., y Huber-Lee, A. (2005). WEAP 21. A Demand Priority and Preference-Driven Water Planning Model. *Journal of Water International*, 30(4), 487-500.

7. ANEXOS

Anexo 1. Esquema del modelo hidrológico WEAP.



Anexo 2. Explorador de escenarios del modelo hidrológico WEAP.

