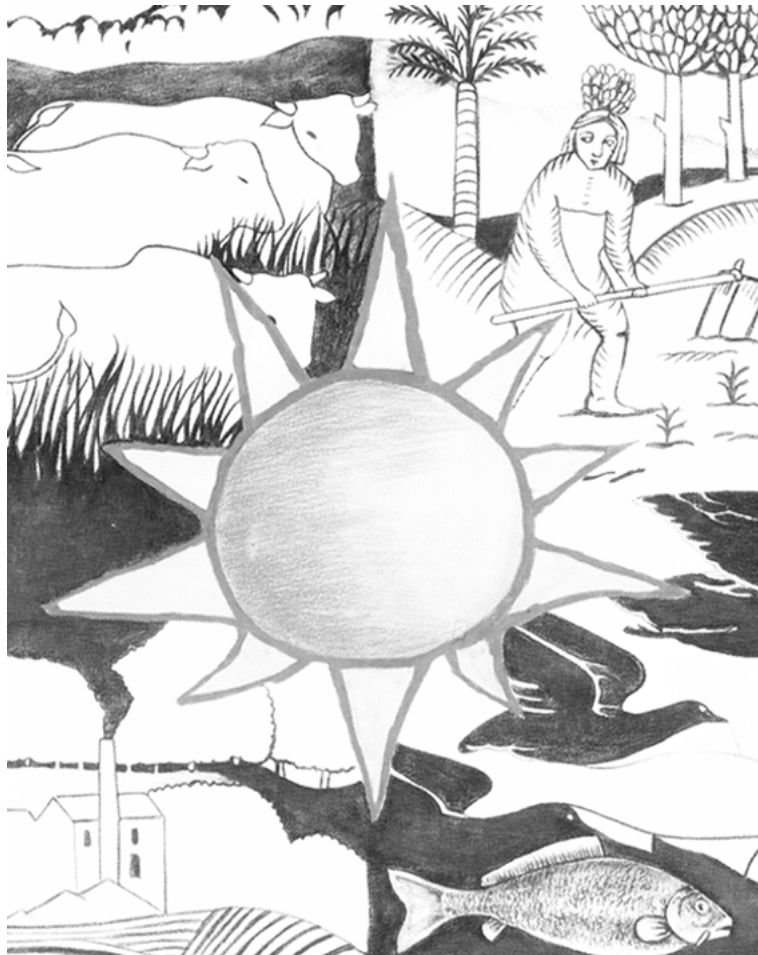


DISPONIBILIDAD DE AGUA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO

Water availability and the global warming at the Zahuapan River sub-basin,
Tlaxcala, México

J. Suárez^{1,5}, H. Muñoz^{2,5}, S. Orozco^{2,5}, G. Sánchez³, W. Ritter^{1,4,5}, M. F. Carreón⁵, M^a. L. Muñoz¹ & J. M. Treviño³



¹Laboratorio de Medio Ambiente. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala. ²Laboratorio de Ciencias Ambientales. Centro de Investigación en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Tlaxcala. ³Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Campus Tampico. ⁴Área de Bioclimatología. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. ⁵Maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Agrobiología. Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Correspondencia a Correo electrónico: jsuarezs71@hotmail.com.

RESUMEN

Se analizó el impacto del crecimiento poblacional y el Cambio Climático Global (CCG), en el balance de agua de la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México; y se evaluaron algunas acciones de mitigación ante estos efectos. Para ello se generaron escenarios usando un modelo de simulación en WEAP (Water Evaluation and Planning System), tomando el año 2005 como base para el ajuste del modelo. Los resultados muestran que en la subcuenca se captan 779.6 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, de los cuales 65% se evapotranspiran, 30% se escurren y 5% se infiltran; el consumo anual de agua es de 40.2 millones de m^3 , de los cuales 80% es para uso doméstico y 20% para agricultura de riego. Si se mantiene el mismo comportamiento de consumo de agua y crecimiento poblacional, se espera que para el año 2015, la demanda de agua aumente un 27% con respecto al año base; de acuerdo a las proyecciones del Modelo Regional HadRCM para el mismo periodo, se espera una disminución del 6% en la precipitación pluvial por efecto del CCG; el aumento en la demanda de agua y la merma en la precipitación pluvial, afectarán disminuyendo un 14% el almacenamiento del acuífero, para el año 2015. La reforestación de las zonas erosionadas de la subcuenca, representaría un incremento del 11% en el almacenamiento del acuífero para el año 2015; el tratamiento y uso de aguas residuales para la agricultura de riego, disminuiría en un 16% la demanda de agua para el mismo periodo. La disponibilidad del agua per cápita pasará de 1 165.34 (año base) a 873.77 $\text{m}^3 \text{hab}^{-1} \text{año}^{-1}$ (2015). Se observa que para mitigar a largo plazo los efectos del CCG y el crecimiento poblacional, en la disponibilidad de agua de la subcuenca, será necesario realizar acciones como reforestación, uso de agua residual tratada, optimización del uso del agua, promoción de una cultura de uso racional del agua, entre otras.

Palabras clave: Río Zahuapan, WEAP, HadRCM, disponibilidad de agua, cambio climático global.

ABSTRACT

The impact of human increase and Global Climatic Change (GCC) on water balance of Zahuapan River sub-basin in Tlaxcala, México was analyzed, and some mitigation actions were evaluated, too. Scenarios of those impacts were created using a Water Evaluation And Planning (WEAP) simulation model. To adjust the model, the year 2005 was set as the referenced year. The results showed that 779.6 Mm^3 of rainfall water is captured in the sub-basin, from which, 65% evapotranspirates, 30% drains, and 5% infiltrates. The annual demand of human water is 40.2 Mm^3 from which 80% is for a domestic use and 20% is for agriculture irrigation. If the tendency of human increase and water consumption is maintained, it is expected that by the year of 2015 (projected year), the water demand will be increased 27% with respect to referenced year. The HardRCM regional model projections suggest that the rainfall quantity will be diminished for this same time interval because of GCC effects. The water volume aquifer will be reduced on 14% to 2015 due to the water demand will be more and the rainfall will be less. Per capita water availability will be from 1165.34 $\text{m}^3 \text{hab}^{-1} \text{year}^{-1}$ (reference year) to 873.77 $\text{m}^3 \text{hab}^{-1} \text{year}^{-1}$ (projected year). The mitigation action evaluation showed that the reforestation of 100% eroded areas of the sub-basin will have repercussions on 11% increase of water volume aquifer. Furthermore, if the wastewaters were treated and after used in agriculture irrigation the water demand will be reduced 16% for the referenced year. Long-term mitigation of the effects of GCC and population increase, on the water availability in the sub-basin, it will be necessary to lead reforestation, to use wastewater treated, to optimize the water use, and to promote the culture of the rational water use among others.

Key words: Río Zahuapan, WEAP, HadRCM, water availability, Global Warming.

INTRODUCCIÓN

Entre la disponibilidad y la accesibilidad de los recursos hídricos existe una gran distancia, pues gran parte de ellos se localizan lejos de los asentamientos humanos. En México la disponibilidad de agua en el sureste es 7 veces mayor que en el resto del país. No obstante que en el centro-norte-noreste se asienta el 77% de la población y se genera el 85% del Producto Interno Bruto (PIB), sólo cuenta con el 32% de la disponibilidad del agua (SEMARNAT 2008).

La disponibilidad promedio anual de agua en México es de $4\,547\text{ m}^3\text{ hab}^{-1}\text{ año}^{-1}$, la disponibilidad en la zona sureste alcanza los $13\,566\text{ m}^3\text{ hab}^{-1}\text{ año}^{-1}$, mientras que en el centro-norte-noroeste llega apenas a $1\,897\text{ m}^3\text{ hab}^{-1}\text{ año}^{-1}$ (Jacobo & Saborio 2004).

El clima global está siendo alterado significativamente y en el presente siglo se estima que los patrones de precipitación global se alterarán a escalas regionales. Este cambio afectará la renovación del agua subterránea, pues en la medida en que disminuya la disponibilidad de agua superficial aumentará la presión sobre la subterránea, todo impacto sobre los acuíferos afectará a las fuentes superficiales de agua y a los ecosistemas.

Se conocen los efectos del cambio climático en la tierra a escala global y en los ecosistemas más grandes e importantes del mundo, por ejemplo la retracción de glaciares ecuatoriales en Perú, Ecuador y Bolivia (Ramírez 2008), la merma en la disponibilidad de agua de los ríos del sureste asiático (Immerzel et al. 2010), entre otros. Sin embargo, a escala local estos cambios no son tan perceptibles y mucho menos serán aquellas variables ambientales que no son tan visibles y medibles, como lo es la disponibilidad de agua, la cual es un indicador de la cantidad de agua potencial per cápita con la que dispone un país, una región o una cuenca. Para calcular la

disponibilidad de agua generalmente se utiliza el método del balance de agua, de esta manera, a groso modo se tienen cifras de este indicador para un región en particular.

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto del cambio climático global y el crecimiento poblacional, en el balance de agua de la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México; y evaluar algunas acciones de mitigación ante estos efectos. Para ello se generan escenarios ante tales modificaciones usando un modelo de simulación en WEAP (Water Evaluation and Planning System).

El análisis combinado de las variables del cambio climático y el crecimiento de la población, para determinar la disponibilidad de agua, seguramente proporcionarán información básica para la toma de decisiones, más aún, con esto se pueden generar escenarios que ayuden a mejorar el manejo del agua hacia la sostenibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Estado de Tlaxcala se localiza geográficamente en la región centro-oriental de la República Mexicana, entre los $97^{\circ}37'07''$ y los $98^{\circ}42'51''$ de longitud oeste y los $19^{\circ}05'43''$ y los $19^{\circ}44'07''$ de latitud norte, situado en las tierras altas del eje neovolcánico, sobre la meseta de Anáhuac, a una altitud promedio de 2.230 msn.

Su clima es templado-subhúmedo, semifrío-subhúmedo y frío. Las precipitaciones medias anuales son mayores en el centro y sur, donde van de 600 a 1 200 mm, en tanto que en el noroeste y este las lluvias son menores de 500 milímetros al año (Gobierno del Estado de Tlaxcala 2010).

En el estado de Tlaxcala existen cuatro subcuencas: Soltepec (RH-26 PANUCO, Cuenca Valle de México), E. Zapata (RH-27 TUXPAN-NAUTLA, Cuenca Río Tecolutla), Huamantla (RH-18 BALSAS, Cuenca endorreica Libres-Oriental) y Alto Balsas (RH-18 BALSAS, Cuenca ríos Atoyac-Zahuapan). La subcuenca del Río Zahuapan

es la más grande de éstas, con una extensión de 1,725.524 km², ubicada en la parte central del Estado. Ésta se divide en 110 microcuencas, de diferentes tamaños y presenta un patrón de drenaje complejo. El Río Zahuapan, que le da el nombre, cruza por la parte central de la misma de norte a sur (Fig. 1).



FIGURA 1. DELIMITACIÓN Y UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA, SUS MICROCUENCAS Y EL RÍO ZAHUAPAN, EN EL ESTADO DE TLAXCALA, MÉXICO.

Delimiting and locating of the sub-basin and micro-basin of the Zahuapan River, Tlaxcala. México.

En esta subcuenca habitan 637,577 personas en 160 comunidades con más de 100 habitantes. Hay 15 centros urbanos con más de 10,000 habitantes, en los que residen 360,372 habitantes (56.5% del total de la subcuenca). La densidad poblacional oscila entre los 53.9 (en la parte norte) y 1606.8 hab Km⁻² (en la parte centro-sur) (INEGI 2005).

Los recursos edafológicos son de vital importancia para la economía local (agricultura, ganadería y aprovechamiento forestal), en la subcuenca los suelos son de tipo cambisol,

litosol, andosol, regosol, gleysol, fluvisol, vertisol, ranker, rendzinas e histosoles; los tipos de suelo predominantes son el feozems y regosol, con un 28 y 18% del territorio, respectivamente (Suárez 2006).

Destacan el maíz y la cebada como principales productos agrícolas; le siguen en orden de importancia el trigo, frijón, maíz forraje, avena forraje, haba, papa, alfalfa y otros cultivos (Gobierno del Estado de Tlaxcala 2010).

Metodología

Se ha observado un descenso en la disponibilidad del agua en los últimos 40 años en la subcuenca del río Zahuapan (Muñoz 2007), ésta situación se torna complicada, ya que es una de las cabeceras de la cuenca (parte más alta) del alto Balsas y como consecuencia un agotamiento de este recurso sería fatal para su desarrollo; esto significaría importar agua de las cuencas vecinas, lo que resulta incosteable. Si a este potencial problema le agregamos los posibles efectos negativos del Cambio Climático Global en la precipitación pluvial, el problema se complica aún más.

El estudio de este tipo de problemas se debe realizar con un enfoque holístico, tal es el caso de la metodología de análisis de sistemas y simulación, la cual se propone para estudiar el estado actual y escenarios futuros de la disponibilidad de agua en la subcuenca del Zahuapan. Esta metodología ha funcionado principalmente en el estudio de sistemas donde se tiene poca información y donde las metodologías tradicionales de optimización no han tenido éxito (Ritter et al. 2010). La metodología consiste en realizar modelos de simulación del sistema, identificar los puntos palanca en el modelo y manejar estos puntos en el sistema real para poder influir en su comportamiento (Carreón 2008); una herramienta útil para lograrlo es la experimentación en los modelos para generar escenarios, ante la persistencia de las condiciones iniciales, variación en las condiciones ambientales, así como diferentes posibles acciones de solución.

Se utilizó el software WEAP (Water Evaluation and Planning System) para elaborar un modelo de simulación del balance de agua de la subcuenca del río Zahuapan, y con éste generar escenarios del comportamiento de la disponibilidad de éste recurso. WEAP es una

herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, que proporciona un marco para la planificación y análisis de políticas de manejo del recurso; considera por un lado las condiciones de demanda de agua y por otro las de oferta; presenta un enfoque integral al simular tanto los componentes naturales como los antrópicos de los sistemas del agua (Carreón 2008).

Como ya se describió, la subcuenca del río Zahuapan está integrada por 110 microcuencas, para fines prácticos de reducción de complejidad espacial, se procedió a agruparlas en unidades de trabajo; para ello se analizaron los tributarios del Río Zahuapan y se seleccionaron los 10 más importantes, tomando en cuenta su caudal y área de influencia, con base en esto se definieron diez unidades espaciales de trabajo (Fig. 2 y Tabla 1).

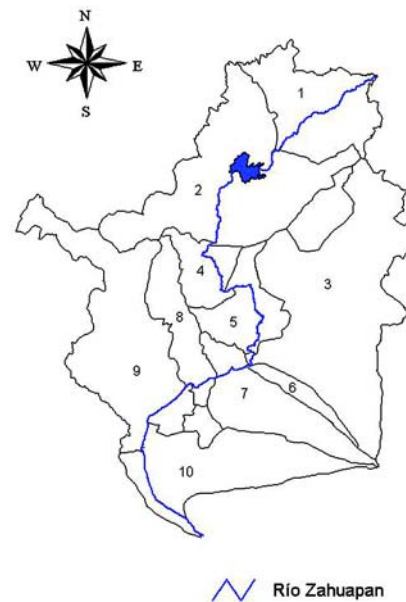


FIGURA 2. DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES DE TRABAJO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO.

Delimiting of work units at Zahuapan River sub-basin, Tlaxcala, México.

Unidad de trabajo	Área (km ²)	Población (habitantes)	Densidad (hab/km ²)
1	142.335	17873	125.6
2	281.903	7115	25.2
3	358.614	88915	247.9
4	53.593	8833	164.8
5	74.886	82621	1103.3
6	23.158	3420	147.7
7	117.159	108400	925.2
8	73.540	72441	985.1
9	250.123	73125	292.3
10	173.310	108241	624.5

TABLA 1. ÁREA, POBLACIÓN Y DENSIDAD, DE LAS UNIDADES DE TRABAJO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO.

Area, density and population of work units at Zahuapan River sub-basin, Tlaxcala, Mexico.

La estructura espacial del modelo para cada unidad de trabajo, se realizó representando un tramo de río; dos nodos, la población y la agricultura, que representan los *sitios de demanda* de agua. Generalmente en la subcuenca la población utiliza agua subterránea para satisfacer sus demandas y emplean agua del río para la agricultura de riego. El agua utilizada por los sitios de demanda y que finalmente va a parar al río, se representó mediante un tramo de *flujo de retorno*. Los procesos de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración, se representaron mediante un nodo de *área de captación*, y los cálculos se realizaron con el método de escurrimiento de la FAO (Stockholm Environment Institute-Boston Tellus Institute, 2005). Finalmente el agua subterránea se representó con otro nodo, *acuífero*. Los tramos de río de cada unidad de trabajo, asociados a su estructura, se unieron para representar en su totalidad a la subcuenca del río Zahuapan (Fig. 3).

En cada unidad de trabajo la actividad anual de la población se representó por el número de habitantes (Tabla 1), la tasa de uso de agua para la región en estudio fue de 109 m³ hab⁻¹ año⁻¹, considerando una variación mensual tipo normal con su máximo en época de primavera-verano y una pérdida del sistema de 70% (Castillo, 2006). La actividad anual agrícola de riego para el área en estudio se representó por la superficie cultivada (Tabla 2) y una tasa de uso de agua igual a 193.25 m³ Ha⁻¹, considerando una variación mensual tipo normal con su máximo en las épocas de otoño-invierno, con una pérdida del sistema igual a de la población (Halfacre & Barden 1992).

Los usos de suelo en las unidades de trabajo se representaron por su área (Tabla 2). El coeficiente de cultivo (Kc) se obtuvo de las tablas publicadas por la FAO (Tabla 3). Los datos mensuales promedio de la precipitación pluvial se obtuvieron de los registros de cuatro estaciones climatológicas de la red de la

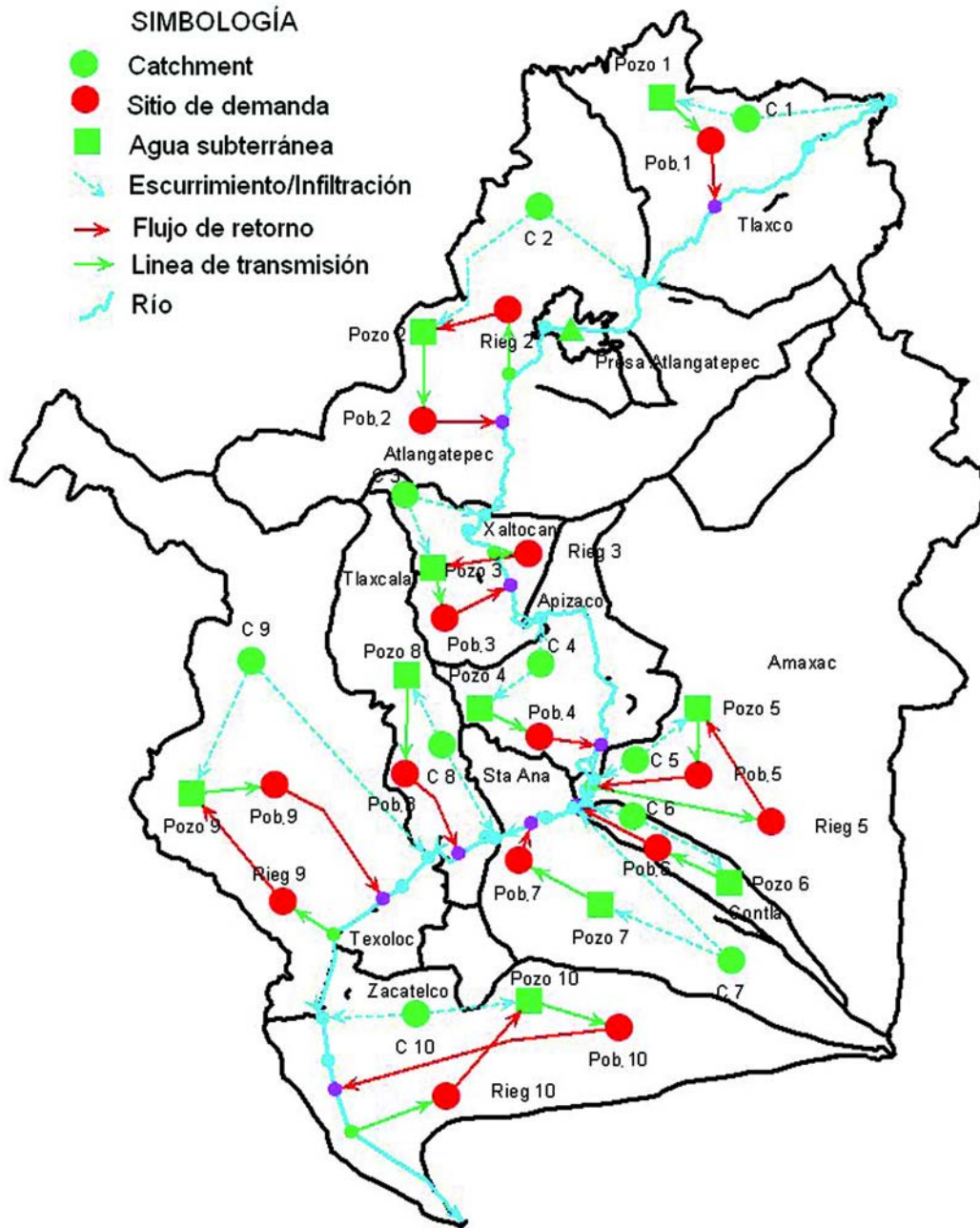


FIGURA 3. ESQUEMA DEL MODELO DE SIMULACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO.

Simulation model of temporal space on water availability in the Zahuapan River sub-basin, Tlaxcala, México

Unidad de trabajo	Agricultura Temporal (Km ²)	Agricultura Riego (Km ²)	Erosión (Km ²)	Bosque (Km ²)	Pastizal (Km ²)	Pradera (Km ²)	Chaparral (Km ²)
1	65.142	0	14.7	53.874	0	0	0
2	190.828	34.364	25.519	8.799	21.766	0	0
3	254.647	14.081	24.439	33.745	18.239	0.0770	13.365
4	36.456	0	17.137	0	0	0	0
5	51.933	0.000016	20.501	0	0	0	2.452
6	19.576	0	1.847	1.735	0	0	0
7	75.871	0	9.805	21.874	1.647	0.7094	7.252
8	38.188	0	4.586	24.774	0	0	5.991
9	167.571	13.5	28.189	21.817	11.514	0	7.503
10	116.398	31.302	11.142	7.384	6.412	0.4920	0
Total	1016.610	93.247	157.865	174.002	59.578	1.2784	36.563

TABLA 2. USO DE SUELO EN CADA UNIDAD DE TRABAJO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO.

Use of the land in each work unit at Zahuapan River sub-basin, Tlaxcala, México.

Uso del suelo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Pastizal, chaparral y pradera	0	0	0	0	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0	0
Bosque	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Agrícola	0	0	0	0	0	1.2	1.2	0.6	0	0	0	0
Erosionado	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0

TABLA 3. COEFICIENTE DEL CULTIVO (Kc) PARA LOS DIFERENTES USOS DE SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN (FAO, 1990).

Crop coefficient (Kc) for the different uses of Zahuapan River sub-basin soil (FAO, 1990).

CONAGUA-TLAXCALA, distribuidas dentro de la subcuenca (Fig. 4).

La evapotranspiración potencial se calculó por el método de Thornwithe (Torres 1995), utilizando la temperatura promedio mensual (Tabla 4).

El valor de la precipitación efectiva para suelos erosionados fue de 5%, para área agrícola 15%, para pastizal, chaparral y pradera de 25%, y para bosque de 30% (Díaz 2005). La producción potencial para los diferentes tipos de cubierta vegetal fue de 100 kg Ha⁻¹ para suelo erosionado, 4300 Kg Ha⁻¹ para áreas agrícolas, 5555.55 Kg Ha⁻¹ para pradera, pastizal y chaparral, y 11 960 Kg Ha⁻¹ para bosque (Odum & Sarmiento 1998).

Se consideró la existencia de un solo acuífero en toda la subcuenca (Castillo 2006) con almacenamiento inicial desconocido, capacidad de almacenamiento y máxima extracción ilimitadas.

La información recopilada para el ajuste del modelo, cubrió en su mayor parte el año 2005, por esta razón se determinó como año base para la generación de escenarios.

Con el modelo de simulación elaborado se generaron escenarios futuros a 10 años del comportamiento del balance del agua en la subcuenca, evaluando el efecto en la disponibilidad de agua para esta región, del crecimiento poblacional, el Cambio Climático Global (CCG) y dos propuestas de mitigación: reforestación de las áreas erosionadas y uso de aguas residuales tratadas para riego.

Se generaron proyecciones de la precipitación pluvial, ante el CCG, utilizando el Modelo Climático Regional HadRCM (PRECIS 2007), y se consideró que las tasas de crecimiento poblacional de las unidades de trabajo (Tabla 5) se mantendrán constantes.

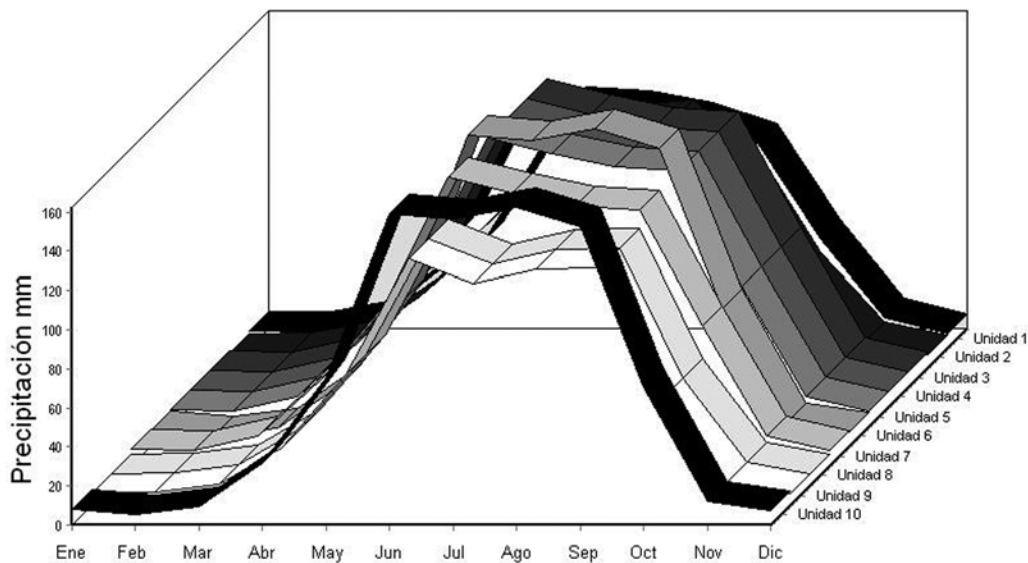


FIGURA 4. PRECIPITACIÓN PLUVIAL MENSUAL (MM) DE LAS UNIDADES DE TRABAJO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO.

Monthly rainfall (mm) of the work units of the Zahuapan River sub-basin, located in Tlaxcala, Mexico.

Unidad de trabajo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	4.24	4.81	5.89	6.7	6.87	6.56	5.99	5.88	5.87	5.38	4.75	4.47
2	3.83	4.22	5.42	6.35	6.73	6.51	5.99	5.97	5.91	5.24	4.43	3.89
3, 4 Y 5	3.76	4.39	5.55	6.31	6.78	6.53	6.15	6.15	6.15	5.51	4.71	4.1
6, 7, 8 Y 9	3.94	4.56	5.81	6.82	7.55	7.37	6.81	6.87	6.68	6.19	5.05	4.27
10	3.94	4.56	5.81	6.82	7.55	7.37	6.81	6.87	6.68	6.19	5.05	4.27

TABLA 4. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (MM) PARA LAS UNIDADES DE TRABAJO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN. CALCULADA POR EL MÉTODO DE THORNWITHE.

Potential Evapotranspiration (mm) for the work units of the Zahuapan River sub-basin. Calculated by the Thornwithe method.

UNIDAD DE TRABAJO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TASA DE CRECIMIENTO	1.3	0.1	4.6	1.4	2.3	2.0	1.7	2.4	2.9	1.6

TABLA 5. TASA DE CRECIMIENTO DE LAS POBLACIONES DE CADA UNIDAD DE TRABAJO DE LA CUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, PARA EL AÑO 2005 (INEGI 2005).

Growth rate of the population of each work unit of the Zahuapan River sub-basin, Tlaxcala, for the year 2005 (INEGI 2005)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el año base se captaron en la subcuenca del río Zahuapan 779.6 millones de m³ de agua por lluvia, de los cuales el 65% se evapotranspiró, 30% escurrió y el 5% se infiltró. Valores que difieren de los porcentajes nacionales de evapotranspiración y escurrimiento, que son de 73 y 22%,

respectivamente; pero coinciden con los valores promedios mundiales (SEMARNAT 2008).

El consumo de agua en la subcuenca para el año base fue de 40.2 millones de m³, de los cuales el 80% fue para uso doméstico y 20% para agricultura de riego. Porcentajes que difieren totalmente de los promedios nacionales, 77 y 14% para riego y uso

doméstico, respectivamente (Ídem). Las unidades de trabajo 5, 7, 8, 9 y 10 (centro-sur de la subcuenca) demandaron el 88% del total, mientras que las unidades restantes sólo el 12%. Esto debido a que en la parte centro-sur de la subcuenca se encuentra la mayor densidad poblacional y se practica la agricultura de riego, en contraste con la parte norte donde se tiene la menor densidad poblacional y se practica la agricultura de temporal.

El escenario de la demanda de agua para el consumo humano y la agricultura, en la subcuenca para el año 2015, considerando que continúan las mismas tasas de crecimiento poblacional del año base y no hay cambios en el área y métodos de riego en la agricultura intensiva, muestra un incremento del 27%, valor ligeramente superior al reportado por la WWC, 25 % para el mismo periodo a escala global (World Water Council 2000).

Con relación al CCG, las proyecciones de la precipitación pluvial para la subcuenca, utilizando el Modelo Climático Regional HadRCM (PRECIS 2007), indican una disminución del 6 % en la precipitación pluvial total para el año 2015. Este comportamiento afectará con una disminución del 6.2% el escurrimiento y 14% en el almacenamiento total del acuífero. Es importante señalar que la disminución en el almacenamiento del acuífero es el resultado del efecto combinado del incremento en la demanda de agua por el crecimiento poblacional y la disminución de la precipitación pluvial por el efecto del CCG.

El valor de la disponibilidad de agua per cápita pasará de 1 165.34 m³ hab⁻¹ año⁻¹ para el año 2005 a 873.77 m³ hab⁻¹ año⁻¹ para el 2015, lo que representa una disminución del 25%, valor similar al reportado para el mismo periodo por la CONAGUA (CONAGUA 2006). Ésta disponibilidad de agua per cápita para el año 2015, colocará a la subcuenca en *estrés hídrico* (SEMARNAT 2008).

Analizando la información de entrada del modelo de balance de agua, se observa que las pérdidas de agua del sistema son un porcentaje muy elevado (70%), por lo que acciones orientadas a disminuir ese porcentaje, impactarían directamente en la disminución de la demanda de agua para la subcuenca. Acciones como disminución de fugas de la red de distribución de agua potable, uso de métodos alternos al tradicional de riego por gravedad, promoción de una cultura de uso óptimo del agua, entre otras.

Bajo el supuesto de que se reforestaran todas las áreas erosionadas de la subcuenca (10% del área total), ésta acción significaría para el año 2015 un incremento del 11% en el almacenamiento del acuífero, lo cual mitigaría casi en su totalidad la disminución causada por el efecto CCG en ésta variable.

El agua utilizada por las poblaciones de la subcuenca se vierte directamente o con previo tratamiento al río. Si se tratara adecuadamente el agua residual de tal manera que se garantice su uso para riego agrícola, la simulación de esta acción en el balance de agua de la subcuenca, indica una disminución del 16 % en la demanda de agua para el año 2015.

Estos escenarios muestran que no es suficiente reforestar las áreas erosionadas de la subcuenca y sustituir por agua tratada la demanda por la agricultura de riego, para mitigar el impacto del crecimiento poblacional y el cambio climático global en la disponibilidad de agua a largo plazo. Es necesario también incidir en las pérdidas del sistema (70 %) causadas por un mal manejo del recurso, minimizando las fugas de agua de la red de distribución doméstica, incrementando la eficiencia del riego, promoviendo una cultura de uso racional del agua, entre otras. Ya que cualquier acción orientada a disminuir las pérdidas de agua en el sistema, se reflejará en una disminución casi directa de la demanda de agua para la subcuenca.

CONCLUSIONES

De las simulaciones del balance de agua, utilizando el modelo elaborado en WEAP, en la subcuenca del río Zahuapan, se desprenden las siguientes conclusiones:

En el año base se capturaron 779.6 millones de m³ de agua por lluvia; de los cuales 65% se evapotranspiraron, 30% se escurrieron y 5% se infiltraron. Estos porcentajes son muy similares a los promedios observados a escala mundial (SEMARNAT 2008).

El consumo de agua para el año base fue de 40.2 millones de m³, de los cuales el 80% fue para uso doméstico y 20% para agricultura de riego. Comportamiento inverso al observado en el promedio nacional, 14 y 77% respectivamente. Del agua total consumida, la zona centro sur demanda el 88% y la norte el 12%.

Si continúan los mismos comportamientos observados en el año base, sobre consumo de agua y crecimiento poblacional, se espera un incremento del 27% en la demanda de agua para el 2015, porcentaje ligeramente superior al reportado para el mismo periodo a escala mundial por el WWC (World Water Council 2000).

De acuerdo a las simulaciones del Modelo Regional HadRCM (PRECIS 2007) sobre la precipitación pluvial para el año 2015, ante el CCG, se espera una disminución del 6% con respecto al año base, lo cual afectará el almacenamiento total del acuífero con una disminución del 14%, para el mismo periodo.

La reforestación de las áreas erosionadas (10% del área de la subcuenca), impactaría positivamente el almacenamiento de agua en el acuífero en un 11%, para el año 2015.

El tratamiento y uso de agua residual para la agricultura de riego, disminuiría en un 16% la demanda de agua para el año 2015.

De acuerdo a la disponibilidad per cápita de agua, la subcuenca estará en estrés hídrico,

ya que disminuirá de 1 165.34 (año base) a 873.77 m³ hab⁻¹ año⁻¹ (2015).

De acuerdo a los escenarios generados se observa que para mitigar los efectos del cambio climático y el crecimiento poblacional, en la disponibilidad de agua en la subcuenca del río Zahuapan a largo plazo, es necesario realizar acciones como reforestar las zonas erosionadas, tratar y utilizar las aguas residuales en la agricultura de riego, eliminar las fugas de agua en el servicio doméstico, eficientar el riego agrícola, promover una cultura de uso racional del agua, entre otras.

LITERATURA CITADA

- CARREÓN F (2008) Evaluación y planeación del recurso agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. México. 65 pp.
- CASTILLO M (2006) El Agua en Tlaxcala. I Congreso Nacional de Medio Ambiente. Tlaxcala, México. Conferencia.
- CONAGUA (2007) Agua. En: <http://www.agua.org.mx> Consultado en Mayo de 2007.
- DÍAZ FE (2005) Interceptación pluvial por plantaciones de *Pinus michoacana*, encinar y pastizal en la zona baja de la cuenca. Tesis Maestría en Ciencias en Limnología y Acuicultura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 100 pp.
- FAO (1990) Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En [<http://www.fao.org/>]. Consultado en septiembre de 2007.
- GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA (2010) Geografía del Estado de Tlaxcala. En [<http://www.tlaxcala.gob.mx/geografia.html>]. Consultado en Agosto de 2010.
- HALFACRE R & J BARDEN (1992) Horticultura. AGT Editor S. A. 727 pp.
- IMMERZEEL WW, H VAN BEEK & MFP BIERKENS (2010) Climate Change Will Affect the Asian Water Towers. Science 328: 1382-1385.

- INEGI (2005) Censo población. En: [<http://www.inegi.gob.mx/>]. Consultado en septiembre de 2007. Recibido 10/11/2007; aceptado 28/04/2008
- JACOBO V & E SABORIO (2004) La gestión del agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable. Miguel Ángel Porrúa. México. 375 pp.
- MUÑOZ CL (2007) Simulación de la disponibilidad de agua y su contaminación por materia orgánica en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Tesis de Licenciatura en Biología. México. 51 pp.
- ODUM EP & FO SARMIENTO (1998) Ecología. El puente entre ciencia y sociedad. McGraw-Hill Interamericana. México. 343 pp.
- PRECIS (2007) Modelo climático regional HadRCM. En [<http://precis.insmet.cu/Precis-Caribe.htm>]. Consultado en septiembre de 2007.
- RAMÍREZ E (2008) Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. Revista Virtual REDESMA 2(3): 49-61.
- RITTER OW, DE LA LANZA EG & TE PÉREZ (2010) La soberbia antropogénica y la transdisciplina en el medio ambiente. AGT editor S.A. México. 287 pp.
- SEMARNAT (2008) Estadísticas del agua en México. CONAGUA. México. 66 pp.
- STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE-BOSTON TELLUS INSTITUTE (2005) WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM. En <http://www.weap21.org/>. Consultado en Septiembre de 2005.
- SUARÉZ SJ (2006) Informe II del proyecto Análisis y simulación espacio-temporal de los contaminantes del río Zahuapan, Tlaxcala. FOMIX TLAX-2004-C01-27. 37 pp.
- TORRES RE (1995) Agrometeorología. Editorial Trillas. México. 154 pp.
- WORLD WATER COUNCIL (2000) World Water Vision Commission Report: A Water Secure World. Vision for Water. Life and the Environment. World Water Council. [En [www.worldwatercouncil.org/Vision/Document s/CommissionReport.pdf](http://www.worldwatercouncil.org/Vision/Document%20s/CommissionReport.pdf)]. Consultado en Septiembre de 2007.