

La crisis hídrica en la región de la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático

The water crisis of the Cuautla's River Sub-basin region before the climate change

Josemanuel Luna-Nemecio¹, Andrea Bolongaro Crevana-Recaséns², Vicente Torres Rodríguez³

Resumen

El objeto de estudio de la presente investigación es la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos de la Subcuenca del Río Cuautla, en el estado de Morelos, México. El objetivo que se desarrolla presenta la situación actual y futura de la disponibilidad hídrica subterránea de la Subcuenca del Río Cuautla bajo el contexto del cambio climático. Se toma como hipótesis de investigación que la disponibilidad hídrica subterránea de la Subcuenca del Río Cuautla se verá impactada negativamente al generarse un abatimiento generalizado de la misma. La estrategia metodológica parte del horizonte de la geografía crítica y la crítica de la economía política como sustento teórico que permite abordar un balance hídrico geoespacialmente referenciado a partir de las variables de precipitación y temperatura medias mensuales obtenidas de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional de México para la serie de tiempo 1980-2012; los cuales fueron proyectados al futuro lejano (2100) ante los cambios de precipitación y temperatura que se estiman para el bajo el escenario de trayectoria de la concentración representativa RCP 8.5 propuesto por el Panel Intergubernamental ante el Cambio Climático (IPCC),

Palabras clave: balance hídrico geoespacial, territorio, región, variabilidad climática, recarga de acuíferos.

¹ Doctor en Geografía por Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor Investigador del Centro Universitario CIFE, Cuernavaca, México. Email: josemanueluna@cife.edu.mx

² Doctora en Recursos Bióticos por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Directora General de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C, Cuernavaca, Morelos. Email: andrea.bolongaro@anide.edu.mx

³ Maestro en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor titular de Geoquímica en la Facultad de Ingeniería, UNAM. Director Técnico de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. Email: vicente.torres@anide.edu.mx

Abstract

The object of study of this research is the availability of underground water resources of the Cuautla River Sub-basin, in the state of Morelos, Mexico. The objective that is developed presents the current and future situation of the underground water availability of the Cuautla River Sub-basin under the context of climate change. It is taken as a research hypothesis that the underground water availability of the Cuautla River Sub-basin will be negatively impacted by generating a general dejection of the same. The methodological strategy starts from the horizon of critical geography and criticism of political economy as a theoretical basis that allows addressing a geospatial water balance referenced from the monthly average precipitation and temperature variables obtained from the National Meteorological Service's weather stations for the time series 1980-2012; which were projected to the distant future (2100) in view of the changes in precipitation and temperature that are estimated for the low scenario of the representative concentration CPR 8.5 proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),

Keywords: geospatial water balance, territory, region, climate variability, aquifer recharge.

Introducción

El objeto de esta investigación son los recursos hídricos subterráneos de la Subcuenca del Río Cuautla (ScRC), mismos que serán abordados desde la perspectiva metabólica (Luna-Nemecio, 2016) de la disponibilidad hídrica actual y la proyectada al futuro lejano (2100) bajo el escenario de cambio climático tendencial, según el escenario de trayectoria de la concentración representativa RCP 8.5 propuesto por el Panel Intergubernamental ante el Cambio Climático (IPCC, 2015).

Es así que el objetivo del presente artículo es el dar cuenta de la situación actual y futura de los recursos hídricos subterráneos de la ScRC, cuya disponibilidad se ve comprometida por el cambio climático. Esta tarea pasa por evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos de la ScRC de acuerdo a los niveles de precipitación, temperatura media e infiltración para los años de 1982 a 2012 y ante el escenario de trayectoria de la concentración representativa RCP 8.5, es decir, ante un aumento en la temperatura media de la tierra que se incrementa entre 2 y 4°C, modificando con ello el ciclo natural del agua al generar una variación en los niveles de precipitación y evapotranspiración.

Para cumplir este objetivo, el presente trabajo parte de cuestionar sobre la disponibilidad natural de los recursos hídricos (Lozano-Parra, 2018) de la ScRC para poder estimar el grado de influencia que tiene el cambio climático sobre la disponibilidad actual y futura de los recursos hídricos subterráneos (Jodar-Abellan et al, 2018) de la región de estudio. De ahí que a manera de hipótesis se plantee que en términos históricos y bajo el contexto que perfilan los escenarios de cambio climático, los recursos hídricos subterráneos de la ScRC se ven puestos en crisis (Luna-Nemecio 2019a).

La presente investigación tiene como contexto la incuestionable existencia de la actual crisis hídrica (Luna-Nemecio 2019b) que corre a la par de una crisis ecológica hoy mundializada (Barranco, 2015) que se constituye como producto histórico de la modernidad al superar ésta las fronteras de la Naturaleza (Zorzoli, 2018) como correlato de una diferenciación temporal entre los ciclos de reproducción ecosistémica y los ciclos de reproducción de capital (Costantino, 2014), a la luz del predominio de una tecnología capitalista cuya especificidad se centra en la depredación y contaminación de los recursos naturales de todo el planeta (Foladori, 2018), lo cual termina por producir un cambio climático derivado de la producción de gases de efecto invernadero se ve intensificada por la quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) ya que estos son núcleo del patrón tecnoenergético hegemónico.

El cambio climático se manifiesta tanto en la atmósfera (Solomon et al, 2019) como en el agua del planeta (Kirby et al, 2016), ambos determinantes de la climatología de la Tierra, lo que induce un desplazamiento en el ciclo natural del agua en tanto que los cambios en la precipitación y el aumento de la temperatura inciden el balance hídrico al aumentar la evapotranspiración (Nam et al, 2015). Lo anterior sin dejar fuera a la serie de cambios territoriales que se llevan a cabo como correlato del desarrollo histórico de la humanidad: urbanización (Garschagen, 2013), descampesinización (Rosset & Martínez, 2016), industrialización (Equihua et al, 2016), entre otros igualmente marcados por una insustentabilidad socioambiental (Flores, 2019).

Por lo anterior, el presente estudio se propone como metas: 1) abordar teóricamente la relación que existe entre la crisis ecológica, los recursos hídricos y cambio climático; 2) presentar los determinantes biofísicos y socioeconómicos que permiten caracterizar a la Subcuenca del Río Cuautla como unidad de estudio desde una perspectiva regional; 3) presentar la disponibilidad actual de los recursos hídricos subterráneos de la región de la Subcuenca del Río Cuautla obtenida a partir del balance hídrico geoespacial realizado para el presente estudio; y 4) presentar los efectos que el cambio climático genera sobre la capacidad de recarga de los recursos hídricos subterráneos ante los escenarios de variabilidad climática proyectados por el IPCC para 2100.

Métodos

El nivel de análisis y argumentación desarrollado en el presente artículo es dialéctico en tanto que propone un acercamiento al objeto de estudio que va de lo general a lo particular y de lo teórico a lo empírico tratado, así de ir de lo concreto a lo abstracto y, desde ahí, retornar a lo concreto pensado; llevándose a cabo un estudio de tipo macrosocial.

De forma tal que para calcular la disponibilidad de agua subterránea de la ScRC se partió del nivel de infiltración de agua resultante del balance hídrico de la región considerando la climatología del periodo 1980-2012; mismo que se realizó mediante el análisis espacial distribuido cuya metodología base fue tomada de Bolongaro (2012).

El balance hídrico de una cuenca o microcuenca es una estimación de los volúmenes de agua que ingresan, que salen y que se almacenan dentro de la misma. Aplicando el principio de conservación de masas y de la energía, la ecuación de balance es sencilla y de aceptación general de los estudiosos del tema, siendo una de sus formas la siguiente:

$$\Sigma Entradas = \Sigma Salidas \pm \Sigma Almacenamiento$$

Los términos de entradas de agua a una cuenca comprenden la precipitación (P) y las entradas de aguas superficiales (Q_{sl}) y subterráneas (Q_{ul}) de cuencas adyacentes. Los términos de salida de agua comprenden las pérdidas por evapotranspiración (E), el escurrimiento superficial (Q_{so}), la infiltración (I), y el cambio de almacenamiento (S) pudiéndose plantear la ecuación general de balance hídrico basado en Sookolov & Chapman (1981):

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{uo} - I - \Delta S - \nu = 0$$

La ecuación anterior incluye al término ν que corresponde a un residual o una diferencia, debido a que todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o de estimación.

Balance hídrico por estación

La precipitación se calculó directamente de los datos normalizados de precipitación mensuales de la serie de tiempo de 1980 a 2012 registrados en 65 estaciones climatológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) (Figura 1). Se seleccionaron 21 estaciones con más de 25 años de registro y calidad que cubrieran el rango de elevaciones y la cobertura geográfica de toda la zona de estudio, incluyendo algunas estaciones localizadas fuera del Estado de Morelos. La evapotranspiración se calculó por el método de Thornthwaite & Mather (1957) en el que intervienen como datos de entrada la precipitación y la temperatura media mensuales, que para este modelo son las variables forzantes, obtenidas de las estaciones climatológicas normalizadas, así como de parámetros de radiación solar (que dependen de la latitud), índice de calor mensual y otros factores de corrección propuestos por dicho autor. Como función de transferencia se usó la ecuación de Thornthwaite & Mather (1957):

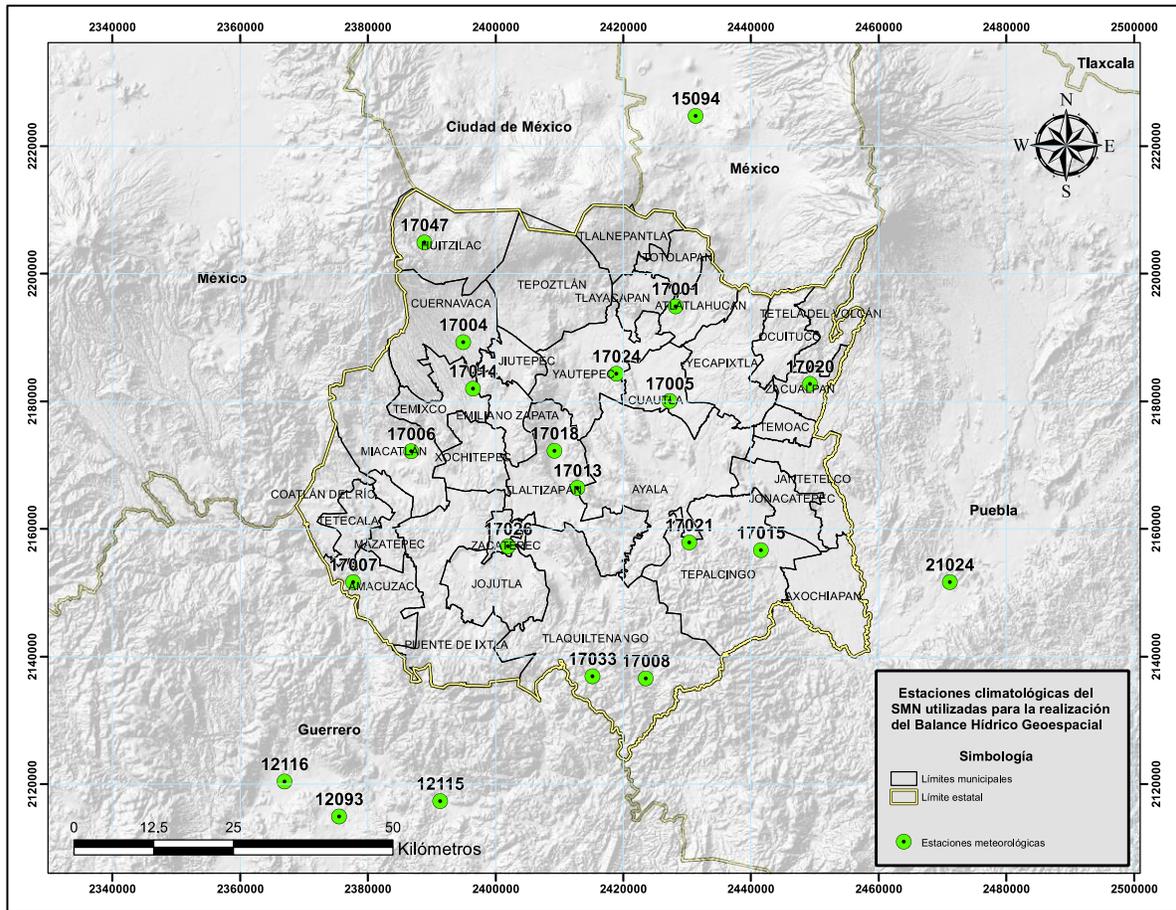
$$E = 16 \times (10 \times T_m / I)^a$$

Donde E es la evapotranspiración mensual sin ajustar (mm/mes), T_m la temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$), I es el índice de calor anual y a es un parámetro que se calcula a partir de I según la expresión:

$$a = 0,000000675 \times I^3 - 0,0000771 \times I^2 + 0,01792 \times I + 0,49239$$

A continuación, se calculó el volumen de agua excedente (Ex) el cuál es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración real, correspondiente a $Ex = P - E$.

Figura 1. Estaciones climatológicas del SMN utilizadas para la realización del Balance Hídrico Geoespacial



Fuente: Elaboración propia.

Balance hídrico por píxel

En el inciso anterior se describieron los cálculos realizados para cada una de las estaciones climatológicas disponibles, en las que se obtuvieron los parámetros P, Tm, E y Ex, todos ellos de naturaleza climatológica.

A partir de los datos de precipitación y evapotranspiración real se realizó un balance hídrico por cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas, para luego ser interpolados por el método de variables regionalizadas co-kriging y obtener finalmente una imagen ráster de la distribución de cada una de estas variables del balance hídrico en la ScRC. La malla obtenida fue de píxeles de 100 metros (1 ha). Para ello se siguió el siguiente procedimiento:

1. Interpolación de las variables forzantes: T_m , P y E por Co-Kriging, usando la elevación como co-variable.
2. Cálculo del volumen de agua excedente de agua $Ex=P-E$, mediante algebra de mapas, asegurando la consistencia interna de la base de datos.
3. Cálculo de las variables infiltración (I) y escurrimiento superficial (Q_{uo}) a partir de operaciones de algebra de mapas considerando diferentes permeabilidades dependiendo de los tipos de uso de suelo, vegetación, litología y pendiente topográfica. Los criterios para fijar factores de permeabilidad e infiltración se obtuvieron de la NOM-011-CONAGUA-2015 y recomendaciones del *US Soil Conservation Service* (1964).
4. A partir del álgebra de mapas se obtuvo el balance hídrico actual por píxel de 100 metros de la ScRC. Para estimar el balance hídrico en escenario de cambio climático se realizó el cálculo considerando los cambios en las variables de temperatura y precipitación proyectados en el escenario RCP 8.5 para el futuro lejano de acuerdo a los cálculos de Arreguín (2015).

Para el cálculo de la disponibilidad de agua en la ScRC de acuerdo con la CONAGUA (2015), se sustituyó el dato reportado de infiltración vertical por el de infiltración calculado por el análisis espacial. Los demás datos de entradas (recarga inducida y las entradas horizontales) y salidas (descarga natural de manantiales, extracción por bombeo y salidas horizontales) se consideraron los reportados por la CONAGUA para el acuífero Cuautla-Yautepec (CONAGUA, 2015). Debido a la falta de acceso a información precisa y a escala de los límites naturales de la ScRC, se tomaron en cuenta los volúmenes totales de estas variables que CONAGUA estima para el acuífero Cuautla-Yautepec (CONAGUA, 2015), dando cuenta de la proporción que le corresponde a la superficie territorial de la ScRC. Llevando a cabo el cálculo proporcional de las variables de entrada horizontal y recarga inducida tomando como base lo publicado en los informes de disponibilidad de agua subterránea para el acuífero Cuautla-Yautepec publicados por CONAGUA (2015) y en función de los 1295,35 km² de la superficie de la ScRC se estimó el nivel de las entradas que recargan el espejo de agua de la ScRC.

En síntesis, en el presente trabajo, se realiza un estudio territorial sobre la situación actual y futura de los recursos hídricos subterráneos de la ScRC a partir de llevar a cabo un balance hídrico geoespacialmente referenciado para los datos de 65 estaciones del Sistema Meteorológico Nacional la serie de tiempo 1980-2012; el cual será modificado acorde al aumento de temperatura y variación en la precipitación estimados para los escenarios de variabilidad climática en el estado de Morelos ante el calentamiento global.

La crisis hídrica en la región de la Subcuenca del Río Cuautla

Como expresión de la crisis hídrica de los recursos hídricos de la ScRC se encuentra el abatimiento del agua subterránea, el cual se presenta a partir de conocer el grado de disponibilidad de agua subterránea de la ScRC estimado a partir de la infiltración de agua resultante del balance hídrico geoespacial realizado para la presente investigación (Figura 2). A este volumen se le sumó la entrada horizontal y la recarga inducida proporcional

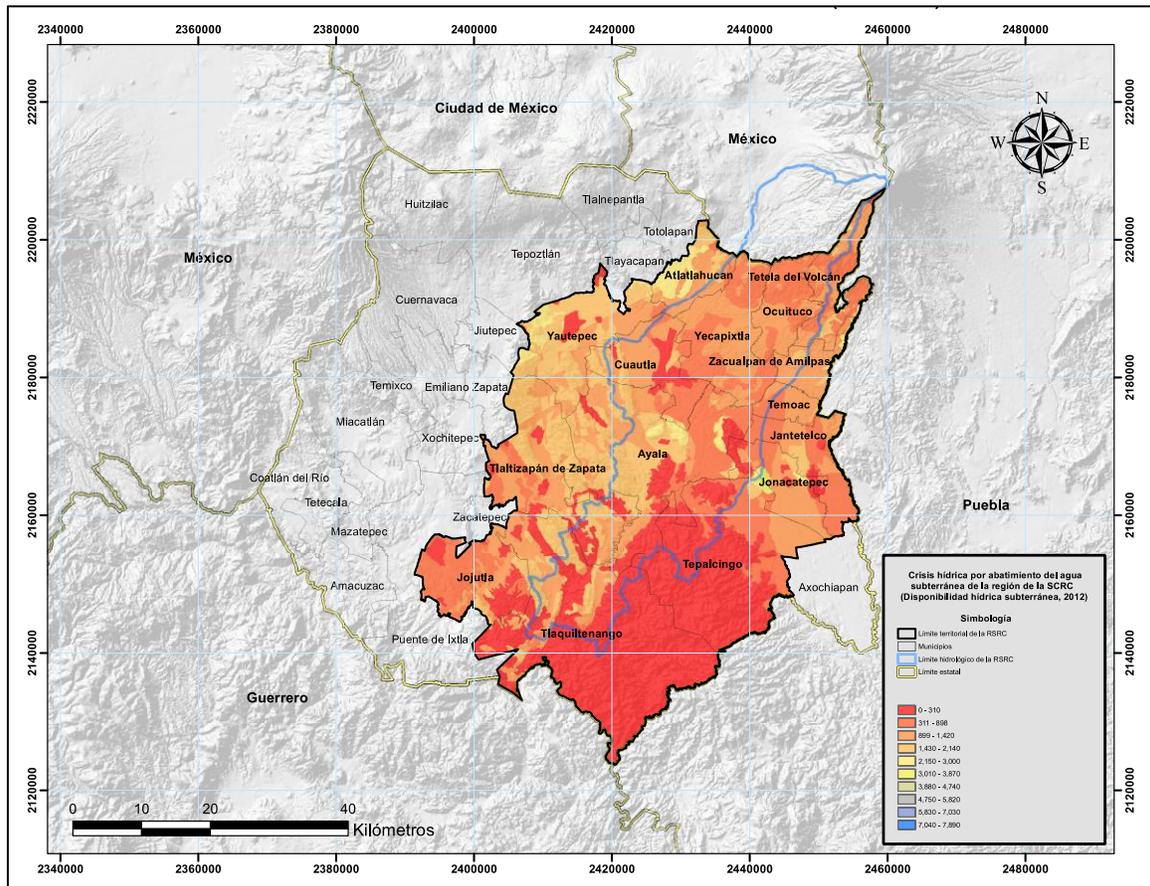
respecto a la superficie territorial de la Subcuenca. A dicho total de entradas de agua subterránea de la Subcuenca, se le restó la descarga natural de manantiales, la extracción por bombeo, las salidas horizontales y la evaporación de vasos de agua correspondientes a la Subcuenca del Río Cuautla (Tabla 1 y Figura 2).

Tabla 1. La crisis hídrica de la Subcuenca del Río Cuautla (2012)

Nombre	Superficie	Entrada	Salida	Disponibilidad
	(km ²)	(hm ³)	(hm ³)	(hm ³)
Acuífero Cuautla-Yautepec	2,700.66	287.30	353.90	-66.60
Subcuenca del Río Cuautla	1,295.35	105.23	169.75	-64.51

Fuente: elaboración propia a partir del BHG realizado para la presente investigación.

Figura 2. Crisis hídrica por abatimiento del agua subterránea de la Subcuenca del Río Cuautla-Disponibilidad hídrica subterránea (2012)

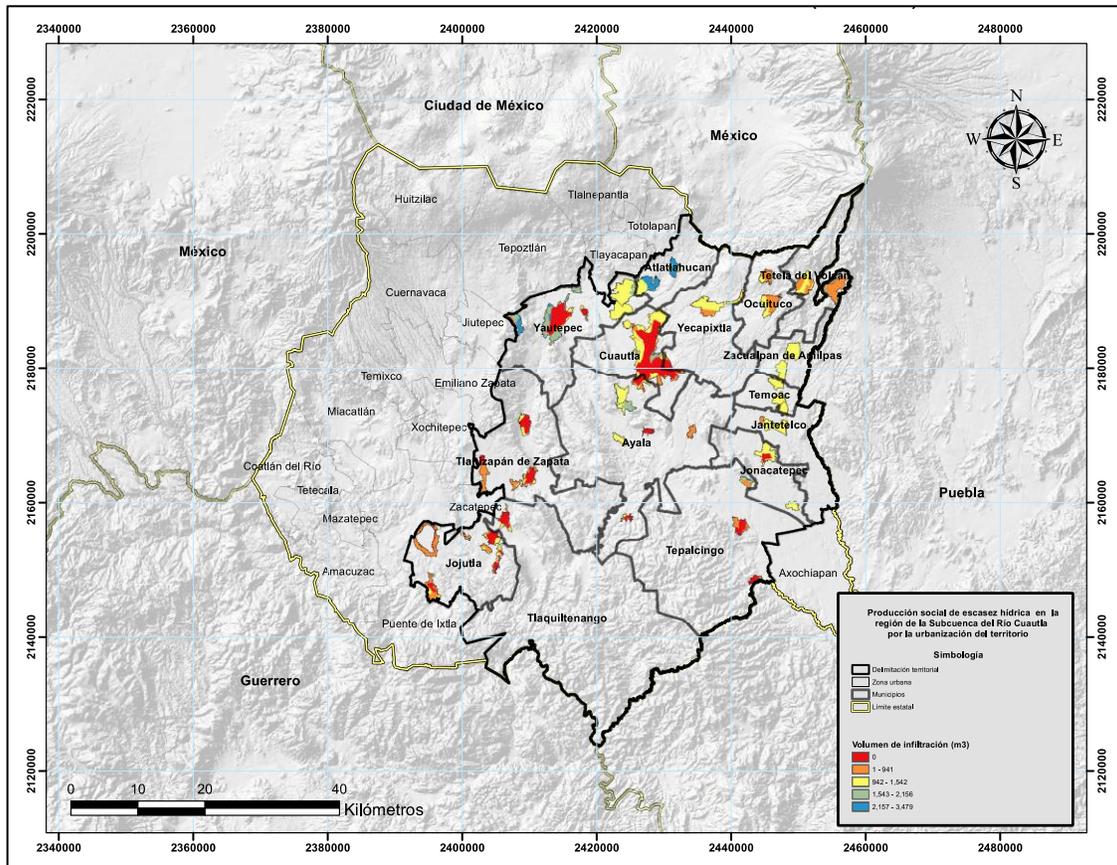


Fuente: elaboración propia a partir del BHG realizado para la presente investigación.

En la región de la ScRC se ha producido una crisis de los recursos hídricos subterráneos en tanto que se ha visto impactada la capacidad de infiltración de agua subterránea hacia el

acuífero. Sin embargo, presentando aquellas zonas en las cuales la construcción de zonas urbanas y el correlativo asfaltado y deforestación del territorio, produce un nulo factor de infiltración, se reconoce que la crisis hídrica se encuentra localizada, principalmente en los municipios de Cautla, Yautepec, Tepalcingo, Tetela del Volcán, Emiliano Zapata y Jojutla (Figura 3).

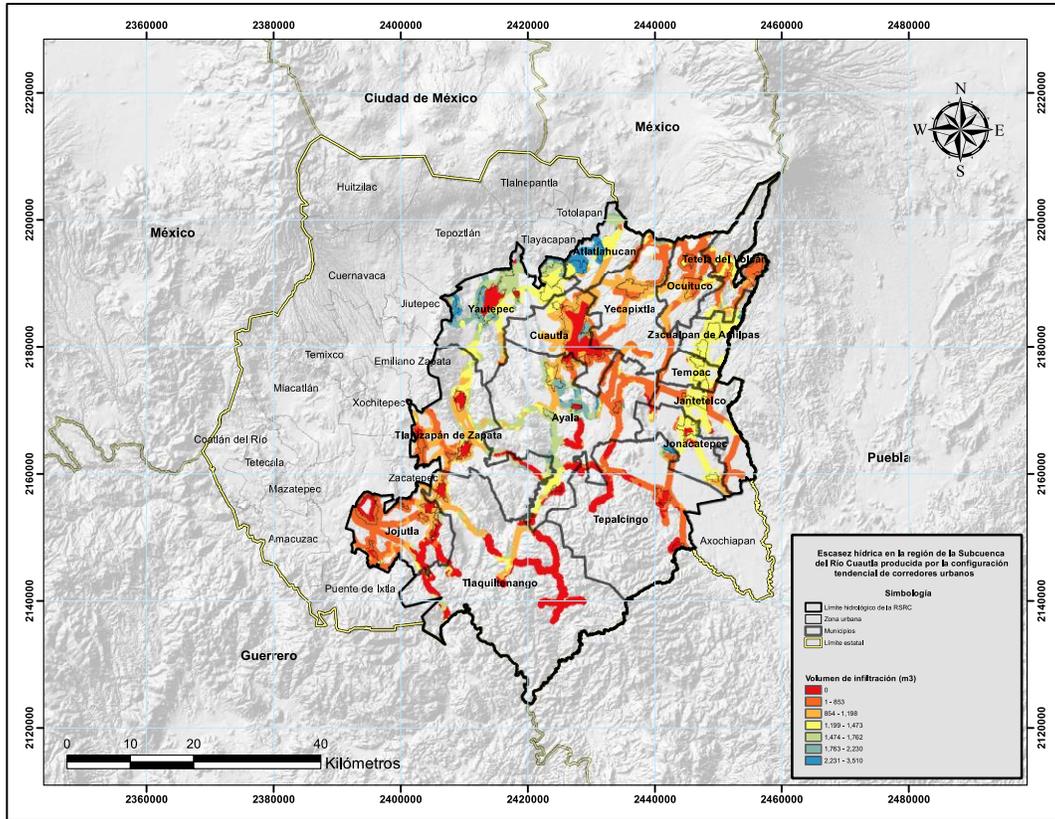
Figura 3. Producción social de escasez hídrica en la Subcuenca del Río Cautla por la urbanización del territorio



Fuente: elaboración propia a partir del BHG realizado para la presente investigación.

Ahora bien, si observamos que la crisis hídrica se configura en la totalidad de la región de la ScRC (Figura 4), es precisamente, en los municipios recién mencionados donde el avance de las zonas urbanas han producido el abatimiento de los recursos hídricos tanto por el impacto problemático en el factor de permeabilidad, como también por los diversos consumos productivos y sociales del agua. En estos territorios debe prestarse especial atención en procedimientos de diagnóstico, diseño y toma de decisiones respecto a la serie de vulnerabilidades, riesgos y conflictos de carácter socioambiental que se generan en la zona.

Figura 4. Producción social de escasez hídrica en la Subcuenca del Río Cautla por la configuración tendencial de corredores urbanos



Fuente: elaboración propia a partir del BHG realizado para la presente investigación.

La situación de emergencia hídrica que se presenta en las zonas urbanas debe ser vista desde la configuración de un escenario de totalidad respecto a la ScRC. La tendencia a quedar entretrejida en un territorio hídrico, es también resultado de la crisis como correlato de la tendencia en la configuración de corredores urbanos en la región. A tal efecto, podemos observar que si se consideran tanto las zonas urbanas, la serie de vías de comunicación y transporte que entre estas se tienden como parte nodal y estructurante de la red de ciudades rurales que apunta a configurarse en el estado de Morelos, podemos observar que los puntos donde la crisis hídrica presenta sus efectos más graves no sólo se restringe a las zonas urbanas de los municipios, sino también a la totalidad de la ScRC (Figura 4), en tanto que ésta ha quedado inmersa en un proceso de reconfiguración urbana e industrial del territorio.

Los recursos hídricos que actualmente se están explotando están por encima de la capacidad de recarga del espejo de agua. De ahí que si bien se extraen mediante bombeo un estimado de 42,5 millones de metros cúbicos, esta cantidad no implica que la población que radica en la región esté recibiendo la cantidad diaria de litros de agua necesaria para

satisfacer sus humanas necesidades. Por lo tanto, la disponibilidad hídrica per cápita tenderá producirse conforme aumenta la población y, sobre todo, al existir una sobreexplotación de los recursos hídricos por los distintos usos y abusos que represente el consumo productivo y social de los mismos.

Para calcular la gravedad de la crisis hídrica producida por la reconfiguración urbana e industrial del Estado de Morelos, y entender cómo es que se ha provocado que se superen las fronteras ecológicas de los recursos hídricos de la ScRC, es menester dar cuenta de los distintos usos del agua subterránea que tienen lugar en la región.

Usos y abusos de los recursos hídricos en la Subcuenca del Río Cuautla

Para comenzar a definir los distintos usos que tienen los recursos hídricos subterráneos de la ScRC, es necesario dar cuenta de los volúmenes de extracción de agua que se encuentran registrados en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA). Tomando en cuenta la información del REPGA de 2010, se puede establecer que, de los recursos hídricos de la Subcuenca del Río Cuautla, se extraen anualmente 104,12 hm³ de agua subterránea. Según la información obtenida, el principal uso que se hace del volumen extraído es el que lleva a cabo el sector agroindustrial con los métodos y tecnología de riego actuales. Esto ocurre a pesar de que, como se ha visto párrafos más arriba, las comunidades rurales y la población económicamente activa dedicada a actividades agrícolas disminuyen; el agua subterránea de la región utilizada en esta matriz productiva representa el 46,62% del total del volumen extraído.

79

El segundo uso de los recursos hídricos subterráneos extraídos del territorio hídrico de la ScRC lo lleva a cabo el sector público urbano; el cual representa el 44,79% respecto al total del volumen hídrico extraído. Mientras que el sector industrial aparece en tercer lugar, al representar el 5,82% del total de los recursos hídricos. En este mismo sentido, el consumo hídrico del agua subterránea que lleva a cabo el sector servicios corresponde al 2,23% y el de actividades múltiples representan el 0,54% (Tabla 2).

Tabla 2. Volumen de extracción de los recursos hídricos subterráneos

Actividad	Volumen	
	(hm ³ /año)	%
Agrícola	48,55	46,62
Industrial	6,06	5,82
Público Urbano	46,66	44,79
Servicios	2,32	2,23
Múltiples	0,56	0,54
TOTAL	104,12	100

Fuente: Elaborada por Luna-Nemecio con datos del CONAGUA (2015).

Los recursos hídricos del Estado de Morelos bajo los escenarios de cambio climático

Tomando en consideración lo establecido en la Quinta Comunicación Nacional, publicada en 2012 por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), se puede establecer que México, como el resto de países de América Latina, no queda exento de las consecuencias ambientales del cambio climático (Martínez & Fernández, 2004), pues desde hace cien años se registran variaciones tanto en los niveles de precipitación como de temperatura media; esta última alcanzando un incremento de poco menos de 2°C (SEMARNAT-INECC, 2012). En paralelo, la temperatura media de México se ha incrementado un 6% respecto a la registrada durante el siglo XX. Dichos cambios en el clima del territorio nacional evidencian la alta vulnerabilidad que tiene más del 15% del territorio nacional ante los impactos de los escenarios cambio climático. Se estima que más de 68% de la población y un 71% de la acumulación de capital que ocurre al interior del país quedan expuestos a los efectos que genere el cambio climático (DOF, 2009).

En los diversos niveles de gobierno de México se han realizado intentos por abordar la compleja problemática que representa el cambio climático. Es bajo este contexto que el Estado de Morelos ha intentado asumir las tareas que, a nivel federal, corresponden a la escala federal mexicana, orientándose hacia los escenarios que trae consigo el cambio climático. Sin embargo, en la práctica podemos encontrar una escueta participación en el diseño de una política pública ambiental que, en términos reales, haga frente al complejo escenario que se articula bajo el contexto del cambio climático.

80

En el Estado de Morelos no existe una actualización del Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire desde hace más de siete años. Además, el Programa Estatal de Acciones ante el Cambio Climático de Morelos (PEACCMor), presentó un diagnóstico sobre los efectos del calentamiento global, así como el diseño de una serie de medidas de acción que intentan formular mecanismos de integración y fomento de los diversos sectores de la sociedad civil que permitan diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, a partir de los escenarios de cambio climático modelados por el IPCC, que quedaron ya rebasados por la realidad en tanto que la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos en la atmósfera y las variabilidad climática han superado las respectivas proyecciones. Todos los esfuerzos y recursos que se llevaron a cabo en el diseño del PEACCMor hoy resultan insuficientes en tanto que el punto de origen a partir del cual se llevase a cabo el diagnóstico y el diseño de las diversas estrategias que en dicho documento se plantean, han quedado rebasadas por la misma realidad producida por el cambio Climático (Períodico Oficial "Tierra y Libertad", 2015).

De ahí que surja la necesidad de formular un diagnóstico que permita dar cuenta, de forma más precisa y actual, del posible horizonte al que se enfrenta la población del Estado de Morelos bajo el contexto del cambio climático global. Ha quedado evidenciado que las acciones del gobierno estatal no bastan e, incluso, son ya obsoletas para plantear una guía estratégica de acción que permita tomar cartas en el asunto y atenuar las consecuencias

económicas, políticas y sociales que trae consigo toda la serie de impactos por el cambio climático que en términos inmediatos, mediatos y absolutos son producidos por la elevación progresiva de la temperatura media de la Tierra y la correlativa fractura metabólica de los diversos ciclos ecológicos naturales de nuestro planeta.

Escenarios de cambio climático en el estado de Morelos

Si bien la falta de información respecto a la emisión actual de gases de efecto invernadero complica el diseñar estrategias para enfrentar las consecuencias que traerá consigo la elevación de la temperatura media de la, es necesario perfilar los horizontes posibles a los que podría llegar probablemente el Estado de Morelos.

De ahí que partiendo de los nuevos escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés) que en 2015 publicara el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación para proyectar modelarmente la concentración de gases de efecto invernadero y viendo su dinámica desde la actualidad hasta el año 2100, podemos contar con la información necesaria para llevar a cabo una evaluación actual de las consecuencias que traerá consigo el cambio climático. Para realizar el referido diagnóstico, es necesario partir de las variaciones en la temperatura media y de los cambios en la precipitación que se proyectan al futuro cercano y al futuro lejano modelados en los escenarios planteados por el IPCC en su Quinto Informe (Arreguín, 2015). Cabe recordarse que, debido a los niveles de emisiones a nivel mundial, el escenario RCP 8.5 es el horizonte más probable al que nos dirigimos como sociedad.

Por último, y con resultados aún más preocupantes, el escenario RCP 8.5 proyecta que en el periodo 2075-2099 la precipitación media en el Estado de Morelos sufrirá una disminución del 13,2% para los meses de marzo a agosto; mientras que para los meses de septiembre-agosto la precipitación media descenderá en -1.5%. Es decir, que si la precipitación media del estado de Morelos que se ha calculado para la presente investigación en el periodo 1980-2012 es de 4829,56 hm³, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5, se tendría un nivel de precipitación de 4367,47 hm³ de lluvia.

Por otro lado, el aumento de temperatura media en el escenario RCP 8.5 muestra que para el futuro lejano (2075-2100) se tendrá un incremento de 4,75°C para los meses del periodo marzo-agosto. Por su parte, entre septiembre y febrero, el aumento en la temperatura promedio será de 4,1°C. Si bien en el periodo que va de 1980 a 2012 se estimó una temperatura promedio anual de 22,7°C, para la vuelta del siglo XXI al XXII tendremos una temperatura media por año de $\pm 26,03^\circ\text{C}$. Los ciclos naturales en el Estado de Morelos se verán colapsados, produciendo altos índices de vulnerabilidad socioambiental ante sequías, inundaciones, pérdida de biodiversidad, enfermedades, afectaciones a los recursos hídricos, entre otras situaciones.

Cambios en el ciclo natural del agua en la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático

A la hora de observar los cambios que el cambio climático ha producido en el ciclo hidológico natural de la ScRC, podemos ver cómo se origina una disminución en los volúmenes de precipitación de -9,40% respecto a los valores que se obtuvieron para el año 2012; estimándose que bajo el RCP 8.5, se proyecta un volumen de precipitación de 1079,9 hm³ de agua; mientras que para 2012 se estiman 1191,89 millones de metros cúbicos. Siguiendo una tendencia contraria, tenemos que los niveles de evapotranspiración futura para el territorio de la ScRC se incrementarán en un 18,98% respecto a valores calculados para 2012; pasando de 800,12 hm³ a 951,99 hm³ de agua bajo el escenario RCP 8.5.

Por la variabilidad climática de los factores que intervienen en el balance hídrico de la subcuenca, el nivel de agua excedente también representa una disminución respecto al volumen obtenido para 2012. De forma tal que, de los 391,25 hm³ que se estimaron para dicho año, se calcula que para el año 2100 se tendrá un excedente de 127,39 hm³ reduciéndose en un -67,44% de agua menos que en el presente.

La cantidad de agua infiltrada también se ve modificada por las variaciones en la temperatura media y los niveles de precipitación media que traerá consigo la crisis climática, presentando una variación de -69,66% estimada para el futuro lejano. Al infiltrarse 70,37 hm³ menos de agua al subsuelo, para 2100 se tendrá un valor de infiltración de 30,65 hm³. La variabilidad climática genera que los niveles de escurrimiento de agua se vean también modificados, estimándose que hacia el siglo XXII se obtendría una escurrimiento de 96,48 hm³ de agua. Dicho volumen contrasta con los 290,71 hm³ catastrados para 2012 (variación de -66,81%) respecto a los niveles actuales (Tabla 3). En la ScRC tenemos la configuración de un escenario en el que el ciclo hidrológico natural de los recursos hídricos subterráneos presenta una caída tendencial en cada uno de los factores hidrológicos, a excepción del nivel de evapotranspiración, el cual muestra un apuntalamiento debido al aumento en la temperatura del Estado de Morelos.

Tabla 3. Cambios en el ciclo natural del agua en la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático

Balance hídrico	2012 (BHG*)	RCP 8.5	Diferencia	
			hm3	%
Precipitación	1,191.89	1,079.90	-111.99	-9.40
Evapotranspiración	800.12	951.99	151.87	18.98
Excedente	391.73	127.39	-264.34	-67.48
Infiltración	101.01	30.65	-70.37	-69.66
Escurrimiento	290.71	96.48	-194.23	-66.81

Fuente: elaborada propia a partir del BHG.

Agudización de la crisis hídrica en la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático sobre el agua subterránea

Ante las modificaciones en el agua excedente derivada de la variabilidad climática en la ScRC, es necesario volver a calcular la disponibilidad hídrica con la que se contará una vez que los efectos del cambio climático se agudicen hacia fines del siglo XXI. Es preciso mencionar que dicha estimación fue necesaria a partir del volúmen de infiltración determinado por el Balance Hídrico Geospacial que se realizó para 2012, ajustando los niveles de precipitación y temperatura anual media a los cambios proyectados por Arreguín (2015), correspondientes al escenario RCP 8.5. A esta variable, se le sumaron las estimaciones de entrada horizontal y recarga inducida que calculamos a partir de los datos existentes para el total del acuífero Cuautla-Yautepec, al que se le restó la parte proporcional al territorio hídrico de la ScRC correspondiente a la descarga natural comprometida, la extracción por bombeo y las salidas horizontales.

Si bien tales cálculos no sean absolutos, debido a la falta de información pública disponible sobre los recursos hídricos de la subcuenca, los datos que a continuación se desarrollan servirán de punto de partida para establecer la urgencia y necesidad por mayores investigaciones sobre los efectos de la crisis climática sobre el agua subterránea de la región. La urgencia de proyectar los peligros e incertidumbre que representa el mantener la tendencia que siguen los actuales niveles de extracción del recurso hídrico, se hacen también pertinentes.

Los niveles de disponibilidad hídrica calculados bajo el contexto del escenario RCP 8.5 descienden para 2100, agudizándose la crisis hídrica en la región hasta por -134,88 millones metros cúbicos de agua. Este abatimiento marca una diferencia de -70,36 hm³ respecto a los -64,51 hm³ que se estimaron para 2012. El 54,90% del total del abatimiento del acuífero Cuautla-Yautepea está expresado en la crisis hídrica de la ScRC (Tabla 4). Para el futuro, cada vez menos lejano de 2100, se estima que en la zona oriental de Morelos, podría configurarse un colapso hídrico producido por la alteración en el ciclo natural de agua que genera la amenaza climática actual.

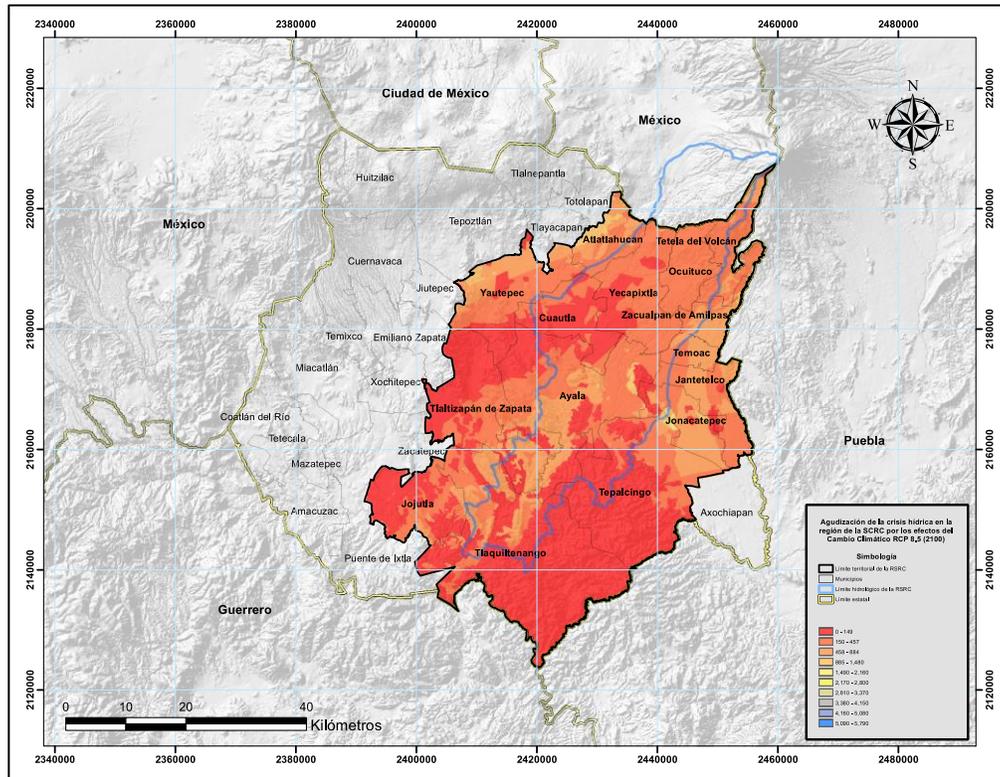
Tabla 4. Configuración de un colapso hídrico en Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático

Nombre	Disponibilidad de agua subterránea		Diferencia
	2012 (BHG*)	RCP 8.5	
	(hm ³)	(hm ³)	(hm ³)
Acuífero Cuautla-Yautepec	-66,60	-216,62	-150,02
Subcuenca del Río Cuautla	-64,51	-134,88	-70,36

Fuente: elaborada propia a partir del BHG.

Los municipios de Cuautla, Ayala, Yautepec, Yecapixtla, Jonacatepec, Tepalcinco y Tlaltiltenango y en general toda la zona sur de la ScRC (Figura 5), son los territorios donde se presentarán los efectos más fuertes de la agudización de la crisis de los recursos hídricos subterráneos. La situación es altamente preocupante en tanto que los municipios que conforman la región urbana Cuautla, son los impulsores de diversos procesos urbanos e industriales que apuntalan el proceso de reconfiguración capitalista del territorio, generándose una gran incertidumbre, riesgo y vulnerabilidad para la sociedad y para la naturaleza.

Figura 5. Agudización de la crisis hídrica en la región de la Subcuenca del Río Cuautla por los efectos del cambio climático



Fuente: Fuente: elaborada propia a partir del BHG.

Conclusiones

En la región de la ScRC están desplegándose una serie de fenómenos sociales que no se pueden adjudicar sola y exclusivamente a la especificidad de su territorio. También son resultado de dinámicas económicas y políticas propias del Estado de Morelos que, a su vez, representan las obturaciones del país ante el desarrollo y crisis del capitalismo contemporáneo. Por ejemplo, la desestructuración del campo mexicano y el apuntalamiento de procesos de urbanización salvaje del territorio y el vigor del patrón de acumulación de capital de corte neoliberal.

Por lo anterior, bajo el contexto de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos de la región de estudio, se tendrán que tomar una serie de medidas que permitan revertir o adaptarse a las tendencias de abatimiento de la ScRC en particular y de todos los acuíferos de Morelos, en general. Estas transformaciones no solo pasan por hacer una administración, gestión, manejo y consumos productivos más eficientes y sustentables del recurso hídrico; pasan también por rediseñar las políticas de asignación de uso de suelo y ordenamiento territorial.

El presente trabajo manifiesta algunas de estas tensiones. La disponibilidad hídrica de la región de los acuíferos de Morelos se encuentra en una delicada situación debido a la

extracción intensiva de agua subterránea; la cual sobrepasa las condiciones naturales de recarga del acuífero; generando con ello un escenario de crisis hídrica ante el abatimiento del espejo de agua de la totalidad del territorio hídrico. Bajo el contexto del cambio climático específicamente capitalista, el escenario tendencial de emisiones RCP 8.5 es el más grave tanto por las proyecciones en el aumento de la temperatura como de la disminución en los niveles de precipitación. Desafortunadamente, bajo esta proyección, los impactos que se presentarán aumentan la vulnerabilidad ambiental y social; por lo que tanto los diferentes niveles de gobierno, así como la sociedad civil en su conjunto, tendrán que trabajar conjuntamente en el diseño de un diagnóstico multi y transdisciplinario que permita armar una política ambiental que esté a la altura de lo que verdaderamente se necesita para poder pensar estrategias de mitigación y adaptabilidad al cambio climático.

La crisis de los recursos hídricos subterráneos de la región terminará por impactar en la reproducción de la sociedad en tanto que, por ejemplo, se ven disminuidos los índices de dotación diaria de agua a la población. Conforme la población va creciendo, por debajo de las recomendaciones y estimaciones que ponen un límite mínimo de agua que las personas deberían recibir de agua diariamente para satisfacer sus necesidades.

Si bien se ha mencionado que en los municipios de Cuautla, Ayala, Yautepc, Yecapixtla, Jonacatepec, Tepalcingo y Tlaltitlenango sería donde se producirían de manera tendencial, los escenarios de mayor impacto hídrico producido por la crisis climática, es preciso mencionar que al confluir estos con la serie de problemas derivados de la urbanización y posible industrialización del territorio, en la región de la subcuenca entraría en un colapso hidrosocial particular, como correlato del que se configuraría a nivel estatal.

Ante la construcción de zonas urbanas y vías de comunicación y de transporte como ejes estructurales de la reconfiguración urbana del territorio morelense, y de la tendencial conformación de corredores urbanos, vemos como la totalidad de la región de la subcuenca quedaría entretegida por una red de zonas en las cuales los recursos hídricos de la entidad se encontrarían devastados al verse disminuida la capacidad de recarga del acuífero Cuautla-Yautepc, municipios donde se concentraría la mayor destrucción de la capacidad de recarga de los recursos hídricos subterráneos, tanto por los procesos de urbanización y planes de industrialización de la región.

Lo anterior no debe ser interpretado en un sentido neomalthusiano en el que el crecimiento de la población es el problema que explica la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos. Sino que, como hemos podido ver, la sobreexplotación y el correspondiente abatimiento de los acuíferos de Morelos o de la ScRC se debe a la especulación que se lleva a cabo al contar con una contabilidad oficial de los recursos hídricos subterráneos sobreestimada, en tanto que la CONAGUA, reporta, irresponsablemente que en todos los acuíferos existe desde hace más diez años una disponibilidad de agua en cada uno de los cuatro acuíferos de Morelos.

Agradecimientos

La presente investigación fue posible gracias al financiamiento del Programa de Becas Nacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para estudios de Posgrado. Se agradece y reconoce la colaboración del Geógrafo Miguel Ángel Blancas Reza por el apoyo brindado en la realización del balance hídrico geoespacial y de la cartografía presentada en el artículo.

Bibliografía

- ARREGUÍN, F. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- BARRANCO, S. (2015). Progreso, catástrofe ecológica y ecosocialismo. Apuntes para una crítica del concepto de desarrollo sustentable. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2, p. 195-203.
- BOLONGARO, R.A. (2012). Variabilidad climática en el Estado de Morelos y su impacto en la disponibilidad de agua. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca.
- CONAGUA (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cautla-Yautepec*. Documento de trabajo. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- COSTANTINO, A. (2015). Estado, reproducción del capital y lucha de clases: La unidad económico/política del capital. *Perfiles latinoamericanos*, 23(46), p. 237-241.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN –DOF, MÉXICO- (2009). Disponible en internet: www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5107404&fecha=28/08/2009 (consultada en diciembre de 2019).
- EQUIHUA, M., HERNÁNDEZ, A., PÉREZ, O., BENITEZ, G. & IBAÑEZ, S. (2016). Cambio global: el Antropoceno. *Ciencia Ergo-Sum*, 23(1), p. 67-75.
- FLORES, R. (2019). Cambio climático, ciudad y gestión ambiental. Los ámbitos nacional e internacional. *Economía y Sociedad*, 22(39), p. 123-127.
- FOLADORI, G. (2018). Educación ambiental en el capitalismo. *Revista Pesquisa em Educação Ambiental*, 13(1), 48-57. DOI: 10.18675/2177-580X.vol13.n1.p48-57
- GARSCHAGEN, M. (2015). Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability. *Climate Change*, 133(1), p. 37-52. DOI: 10.1007/s10584-013-0812-6

- IPCC (2015). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implicaciones tiene para Latinoamérica? Resumen Ejecutivo*. IPCC, Alianza, Clima y Desarrollo. Nueva York: CDKN.
- JODAR-ABELLAN, A., RUIZ, M. & MELGAREJO, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), p. 240-253. DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564
- KIRBY, J., MAINUDDIN, M., MPELASOKA, F, AHMAND, M, PALASH, W., QUADIRL, M., SHAH-NEWAZ, & HOSSAIN, M. (2016). The impact of climate change on regional water balances in Bangladesh. *Climate Change*, 135(3-4), p. 481-491. DOI: 10.1007/s10584-016-1597-1
- LOZANO-PARRA, J. (2018). Recursos hídricos. Disponibilidad, variabilidad y gestión. *Revista de Geografía Norte Grande*, 71: p. 5-8. DOI: 10.4067/S0718-34022018000300005
- LUNA-NEMECIO, J. (2016). El Metabolismo Urbano-Rural del Agua, actores sociales y gestión de los recursos hídricos público urbano de la ciudad de Cuautla, Morelos (2006-2013). *Revista de Geografía Espacios*, 5(10): p. 118-151. DOI: 10.25074/07197209.11.609
- LUNA-NEMECIO, J. (2019a). Calentamiento global y conflictividad sociohídrica ante el colapso ambiental del estado de Morelos, México. *Revista Latinoamericana de Estudiantes de Geografía*, 6: p. 74-84.
- LUNA-NEMECIO, J. (2019b). Agua, poder y acumulación de capital en el neoliberalismo: Los avatares del estado mexicano al ocultar la crisis hídrica en Morelos. *Albores. Revista de Ciencias Políticas y Sociales*, 2: p. 124-151.
- MARTÍNEZ, J. & FERNÁNDEZ, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. Ciudad de México: INECC-SEMARNAT.
- NAM, W., HONG, E. & CHOI, J. (2015). Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? *Agricultural Water Management*, 150: p. 129-138. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.11.019
- TIERRA Y LIBERTAD. (2015). *Decreto por el que se publica el Programa de Desarrollo Urbano Sustentable de Centro de Población de Axochiapan*. Cuernavaca: Estado de Morelos.
- ROSSET, P. & MARTÍNEZ, M. (2016). Agroecología, territorio, recampesinización y movimientos sociales. *Estudios Sociales*, 25(47): p. 275-299.

- SOKOLOV A.A. & CHAPMAN T.G. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. Madrid: Instituto de Hidrología de España y UNESCO.
- SOLOMON, S, LIU, H, MARSH, D., MCLNERNEY, J., QIAN, L. & VITT, F. (2019). Whole Atmosphere Climate Change: Dependence on Solar Activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(5), p. 3799-3809. DOI: 10.1029/2019JA026678
- THORNTON, C.W. & MATHER, J.R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance* (No. 551.57 T515i). Nueva Jersey: Drexel Institute of Technology, Centerton.
- US SOIL CONSERVATION SERVICE (1964) *Engineers in the Soil Conservation Service*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.
- ZORZOLI, F. (2018). ¿Límites ecológicos y fronteras tecnológicas en el negocio agrícola? Agricultura y ambiente en los sectores agrarios medios del noroeste argentino. *Población & Sociedad. Revista de Estudios Sociales*, 25(1): p. 163-195.

Recibido: 19 de julio de 2019
Aceptado: 20 de noviembre de 2019