

ESTIMACIÓN DEL BOSQUE REQUERIDO PARA LA SUSTENTABILIDAD HÍDRICA DEL AGUACATE EN EL SUR DEL ESTADO DE MÉXICO

Jeison Javier **Loaiza-González**¹, Humberto **Thomé-Ortiz**^{*1}, Miguel Ángel **Gómez-Albores**²

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México.

²Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua. 50070, México.

*Autor de correspondencia: hthomeo@uaemex.mx

RESUMEN

El presente estudio, analiza la relación entre la cobertura forestal y la provisión hídrica necesaria en cultivos de aguacate (*Persea americana*), para determinar un balance entre ambas, a partir del modelo de rendimiento hídrico "Water Yield", que permite identificar la producción de agua en una cuenca hidrográfica específica. Los resultados obtenidos, permiten establecer la cantidad de bosque necesario para dar sustento hídrico al aguacate, en el contexto de la creciente demanda de este producto agroalimentario a nivel mundial. En este sentido, es posible delinear la pauta para reflexionar acerca de las modificaciones en los usos del suelo en el territorio, a partir de la conversión hacia el cultivo del aguacate, con lo cual es posible, advertir una alteración en el rendimiento hídrico del mismo. Se concluye que, en la región sur del Estado de México, teniendo en cuenta las funciones de regulación del bosque, la proporción necesaria para sustentar hídricamente una hectárea de aguacate es de 1.35 ha.

Palabras clave: reestructuración productiva del espacio rural, rendimiento hídrico, servicios ecosistémicos.

INTRODUCCIÓN

El agua, es un bien común esencial para los ecosistemas y el bienestar humano de las generaciones presentes y futuras, desempeñando un papel fundamental en una amplia gama de procesos naturales y sociales (Álvarez, 2023). Sin embargo, la creciente presión sobre los recursos hídricos debido al cambio climático, la urbanización, la agricultura intensiva y otros factores socioeconómicos, genera interés sobre la disponibilidad y calidad del agua en todo el mundo (Vuille, 2013). Por tales motivos, las investigaciones sobre la gestión sostenible de los recursos hídricos, se han convertido en una prioridad para la comunidad científica y los tomadores de decisiones (Calixto *et al.*, 2022). Un aspecto fundamental de esta investigación, fue comprender y cuantificar los procesos hidrológicos que influyen en la disponibilidad de agua, así como identificar estrategias efectivas para su conservación y uso eficiente, en el marco de los sistemas productivos de aguacate, siendo este un commodity³ agroalimentario, reconocido por su alta demanda hídrica, en comparación con otros cultivos (Borrego y Allende, 2021). Esta demanda hídrica, no obedece solamente a las características propias del cultivo, se deben tener en cuenta, por lo menos, los cambios en los usos del suelo, la gestión del agua por parte de los productores y elementos edafoclimáticos, siendo esenciales para evaluar la sustentabilidad de estos.

Citation: Loaiza-González JJ, Thomé-Ortiz H. 2025. Estimación del bosque requerido para la sustentabilidad hídrica del aguacate en el sur del Estado de México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo <https://doi.org/10.22231/asyd.v22i4.1728>

Editor in Chief:
Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: August 20, 2024.
Approved: October 17, 2024.

Estimated publication date:
September 12, 2025.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



Así, el objetivo de este artículo, fue evaluar el rendimiento hídrico en la subcuenca del Río Cutzamala, entre las huertas de aguacate de una asociación de productores en pequeña escala llamada “La Libertad”, a partir de su relación con la disponibilidad de bosque. Para ello, se utilizó el modelo “Water Yield”, en su interfaz dentro del Sistema de Información Geográfico (SIG) TerrSet 2020, una herramienta que tiene el potencial de convertirse en una metodología novedosa para la planificación de la agricultura en los territorios rurales, debido a que permite identificar los cambios en la producción de agua según los diferentes usos del suelo del territorio.

Además, se analizaron los actores, factores, leyes y políticas que han intervenido en la modificación de los usos y coberturas del suelo, lo que ha traído como consecuencia, la alteración de los rendimientos hídricos a lo largo de los años. Se asegura que, al avanzar en la comprensión de estas interacciones complejas, se puede contribuir al desarrollo de políticas de gestión de los recursos hídricos, que promuevan la sostenibilidad ambiental y el bienestar humano a largo plazo en el contexto del cambio climático.

El texto se compone de cinco partes. Seguido de este apartado introductorio, se incluye una discusión teórica en la que se establecen diferentes aproximaciones a los modelos de diagnóstico y cuantificación de los recursos hídricos, planteando un debate entre la representación espacial y la gestión sostenible del agua. Posteriormente, se presenta el diseño metodológico de la investigación a partir de su expresión matemática, seguida de los resultados, analizados desde un modelo de rendimiento hídrico en dos periodos históricos. Más adelante, se presenta la discusión de los resultados donde se destaca el contexto político - económico, como una condicionante básica para comprender las implicaciones de la sustentabilidad hídrica del cultivo de aguacate, en el contexto de las economías neoliberales y de mercado. Se concluye que la aportación del manuscrito fue identificar que la proporción de bosque para sustentar una hectárea de aguacate es de 1.35 ha. Sin embargo, esto no significa que pueda convertirse en una generalización universalmente válida, sino que ilustra el significado contextual de la proporcionalidad hídrica entre bosque y agricultura, destacando la necesidad de desarrollar nuevas exploraciones a diferentes territorios productores de aguacate, realizando con ello distintos análisis comparativos.

MARCO TEÓRICO

Desde el ámbito académico, se han desarrollado diversos modelos para evaluar y cuantificar los recursos hídricos. Nkwonta *et al.* (2017), construyeron un modelo de gestión de recursos hídricos para embalses basados en otros tres: el modelo de rendimiento hídrico, el de planificación y el de calidad. Para los autores, la finalidad de este proceso, es “balancear los recursos hídricos disponibles en un sistema con los requerimientos de agua y las pérdidas a las

que está sujeto el sistema” (Nkwonta *et al.*, 2017: 110). Este propósito, es importante resaltarlo, en vista de que, en la investigación, se apoyó del modelo de servicios ecosistémicos “Water Yield”, para estimar el rendimiento hídrico entre una hectárea de aguacate y una de bosque.

Por otra parte, Song *et al.* (2015), realizaron la evaluación de servicios ecosistémicos a través del modelo InVEST, para la cuantificación de los servicios de suministro de recursos hídricos en los ecosistemas forestales de Corea del Sur. Sin embargo, debido a la falta de datos actualizados para la zona de estudio, los autores mencionan que los resultados no fueron precisos, dificultando la toma de decisiones. Además, se menciona la necesidad de combinar los enfoques cuantitativos y cualitativos para la evaluación de los servicios ecosistémicos, y así, comprender los fenómenos de una manera más holística. Para el primero, sugieren utilizar modelos como el SWAT (Herramienta de evaluación de suelos y agua) y el VIC (Capacidad de infiltración variable), mientras que, para el enfoque cualitativo, la comparación y evaluación de funciones basadas en la clasificación funcional del servicio forestal de Corea.

Siguiendo esta misma idea, Scordo *et al.* (2018), aseguran que el levantamiento de datos para modelar las cuencas hidrográficas de manera confiable, es un aspecto crítico para que los tomadores de decisiones en materia de políticas públicas, puedan mejorar el abastecimiento de agua potable, la producción de energía y los servicios recreativos, así como para predecir los posibles resultados de modificaciones en los patrones de precipitación o cambios climáticos extremos. En la investigación de Scordo *et al.* (2018), agrupó 749 cuencas hidrográficas de América del Norte en cinco grupos de acuerdo con nueve variables ambientales, las cuales fueron modeladas con InVEST SWYM (Modelo de Rendimiento Estacional de Agua) y posteriormente, se compararon para determinar cuáles variables influían más en los resultados. Se concluye que, es necesario tener presente, las condiciones criosféricas, pues aquellas mejoran los resultados del modelo hidrológico en una región ambiental bajo clima subhúmedo boreal de baja elevación. Además, la evapotranspiración, la radiación solar y la pendiente, suelen estar demasiado simplificadas en algunos modelos hidrológicos y necesitarían atención específica.

Las investigaciones de Yang *et al.* (2020) y Rahimi *et al.* (2020), utilizan el modelo de Valoración Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones, para simular el rendimiento hídrico con base en los cambios de uso de suelo. En la primera de ellas, se utilizó el modelo para analizar la cuenca del lago Bosten entre 1985 y 2015, llegando a la conclusión de que “la capacidad de rendimiento del agua, correlacionada positivamente con la precipitación, es más alta en la vegetación de pastizales y más baja en tierras cultivadas y no utilizadas” (Yang *et al.*, 2020: 1035). Por su parte, la segunda lo utilizó para comprender cómo los cambios de uso del suelo, afectan los servicios ecosistémicos hídricos de los humedales en el sureste de Irán. Se demostró que, la capacidad

de los humedales para proporcionar servicios ecosistémicos, depende de las características biofísicas relacionadas con factores naturales y antropogénicos (Rahimi *et al.* 2020: 3715).

Así mismo, empleando el “Land Change Modeler” del software Terrset 2020 y el modelo InVEST, Shi *et al.* (2022), identificaron los cambios de uso del suelo para la ciudad de Shenzhen (China) y realizaron un análisis entre 2000 y 2010, sobre la relación entre la urbanización y los impactos que genera en la producción de alimentos, el agua y los ecosistemas. Se concluyó que la calidad del hábitat, el suministro de agua y la producción de cultivos, disminuyeron evidentemente, debido a la rápida urbanización. Por el contrario, “se identificó una tendencia ascendente del rendimiento hídrico, debido al aumento de las superficies artificiales urbanas, mientras que el rendimiento de agua de otras áreas de uso de la tierra, disminuyó, como los bosques y los pastizales” (Shi *et al.*, 2022: 6).

En Latinoamérica, destacan los aportes de Minga (2018) y sus análisis para las cuencas en el sur del Ecuador. En esta investigación, se utilizó el modelo Water Yield de InVEST, que está basado en el marco hidrológico de Budyko y para su desarrollo consideró variables como: precipitación, uso/cobertura del suelo, evapotranspiración real, profundidad del suelo y contenido de agua disponible para la planta. Este modelo, se aplicó a nueve cuencas hidrográficas en un periodo comprendido entre 1970 y 2015, con proyecciones de cambio climático de las décadas 2030, 2050, 2070 y 2080. Los resultados prevén que, el rendimiento hídrico, incrementa en las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas, mientras que las zonas altas de las cuencas que nacen en la cordillera de Los Andes, se prevé una reducción de la producción hídrica. (Minga, 2018: 93).

Para el caso mexicano, Felipe (2023), utiliza el modelo Seasonal Water Yield de InVEST, con el objetivo de estimar el valor económico del agua para la cuenca del Río Cajonos en Oaxaca. Argumenta que, esta valoración permite cuantificar, en términos monetarios, el beneficio que la sociedad percibe de este servicio ecosistémico. Los resultados obtenidos, muestran una recarga local de hasta 1,625 mm en toda la cuenca, además, se pudo ubicar las zonas de menor y mayor recarga, y se identificó las características que definen la diferencia de recarga en cada zona. Con ello, “se estimó un valor económico del recurso hídrico dentro de la cuenca obteniendo un rango monetario de 1,164.92 USD/m³ a 3,485.77 USD/m³” (Felipe, 2023: 47).

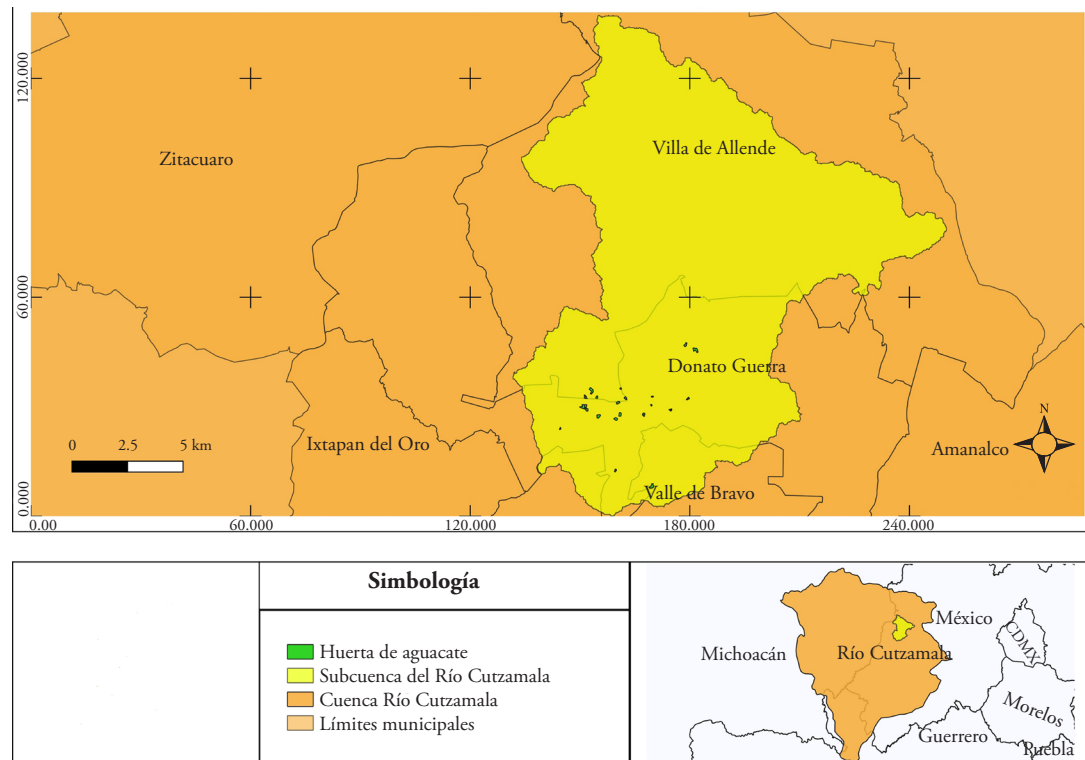
Lovera *et al.* (2018), realizaron la evaluación de servicios ecosistémicos en el municipio de Valle de Bravo, una región que es importante para el Estado de México en materia forestal e hídrica, ya que forma parte de la zona de influencia del Sistema Cutzamala, que se encarga de aportar una parte del agua potable para la Ciudad de México. La evaluación, se llevó a cabo a partir de un análisis comparativo de los usos del suelo y vegetación, en

el periodo comprendido entre 1994 y 2016, para identificar los efectos de los cambios de uso del suelo en el rendimiento hídrico de la zona. Los resultados, mostraron que los bosques templados, aún persisten en la mayor superficie del municipio, sin embargo, las zonas urbanas, se han duplicado, provocando un incremento en el rendimiento hídrico. Mencionan que los resultados, pueden ser útiles en planificación ambiental y programas de ordenamiento territorial. En las investigaciones anteriormente mencionadas, se evidencian por lo menos tres aspectos importantes. Primero, que la participación de las comunidades en los procesos de estimación hidrológica es prácticamente nula, aparentemente todo es muy técnico y queda la idea de que la planificación del agua en los territorios es una cuestión exclusivamente de técnicos y políticos. Segundo, que la falta de datos en algunas zonas de estudio, no permite un análisis y validación preciso de los modelos y, por lo tanto, los resultados deben abordarse con cautela para la toma de decisiones. Para finalizar, se observa que las investigaciones, hablan de la utilidad de sus resultados para la planificación territorial del agua, pero ninguna de ellas, elabora propuestas de planificación concreta a partir de los resultados obtenidos. En la presente investigación, la utilización del modelo Water Yield y sus resultados, serán esenciales para determinar cuánto bosque se necesita para dar sustento hídrico a las huertas de aguacate, y con ello, aportar en la construcción de los Modelos de Gestión Hídrica para la Agricultura (MOGHIPA). Este a su vez, puede ayudar, de la mano con los múltiples actores involucrados, en la planificación, ordenamiento y evaluación del uso del agua en este y otros cultivos.

METODOLOGÍA

Los modelos hidrológicos, son una herramienta indispensable para analizar y monitorear los beneficios e impactos que se producen en la naturaleza derivados de las actividades económicas. Uno de esos modelos es el “Water Yield”, que brinda la posibilidad de calcular el rendimiento hídrico de una zona específica píxel por píxel, lo que permite identificar la producción de agua en una cuenca hidrográfica. Además de identificar los diferentes rendimientos, según los usos y coberturas del suelo. Este método, permitió comparar los valores entre las zonas dedicadas al bosque y aquellas dedicadas al aguacate para establecer una proporción entre ambas en dos periodos de tiempo específicos, 1986-2003 y 2004-2021.

El área de estudio, se inscribe en la cuenca del río Cutzamala y se delimitó por medio de la herramienta “Watershed” del software Terrset 2020, teniendo en cuenta, los escurrimientos de la zona y la ubicación de los productores de aguacate de la asociación “La Libertad”, que está integrada por productores en pequeña escala de la región sur del Estado de México (Figura 1). Los límites de la subcuenca se distribuyen entre los municipios de Villa de Allende, Donato Guerra y Valle de Bravo.



Fuente: elaboración propia con datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y del Software Terrset 2020.

Figura 1. Subcuenca del Río Cutzamala.

Modelo de rendimiento hídrico

El Glosario de Hidrología Internacional, define el rendimiento hídrico, como la “cantidad de agua superficial o subterránea que se puede obtener para un uso determinado en una cuenca durante un intervalo de tiempo dado” (World Meteorological Organization, 2012: 382). Por ello, obtener los datos del rendimiento hídrico de una cuenca, puede ser considerado como un punto de referencia con respecto al escurrimiento de agua superficial, indispensable para cualquier proceso de planificación de los territorios alrededor del agua, especialmente, cuando el interés está en la agricultura.

Se optó por usar el modelo de servicios ecosistémicos “Water Yield” InVest versión 19.0.8 (Natural Capital Project, 2022), que estima el escurrimiento promedio anual de agua de la siguiente manera:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x$$

donde AET_{xj} : representa la evapotranspiración anual real en el píxel x dentro del tipo de cobertura terrestre j ; P_x : la precipitación anual promedio en el mismo píxel.

La fracción AET_{xj}/P_x , es una estimación de la curva de Budyko (Minga, 2018), la cual refleja la partición de la evapotranspiración dentro del balance hídrico (Eastman, 2020). Esta fracción, se calcula mediante un índice de sequedad R_{xj} y un parámetro adimensional, ω_x , que indica la relación entre el contenido de agua disponible para las plantas y la precipitación esperada durante el año. El índice de sequedad R_{xj} se determina mediante la relación entre el producto de la evapotranspiración de la vegetación, la evapotranspiración de referencia, y la precipitación anual (Eastman, 2020). Otros datos necesarios para calcular el rendimiento hídrico, incluyen la profundidad del suelo (mm) y el contenido de agua disponible para la planta (PAWC). La PAWC, se define como la proporción de capacidad de retención de agua (la cantidad de agua retenida, entre la capacidad de campo del suelo y el punto de marchitamiento) que puede ser absorbida por una planta, esto también se conoce como contenido de agua disponible en unidades de milímetros (Natural Capital Project, 2022).

Levantamiento de datos

Para delimitar la cuenca hidrográfica y generar el mapa de elevación digital (DEM), se utilizaron imágenes del *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 1 Arc-Second Global, obtenidos a través de Earth Explorer. Este conjunto de datos ofrece una cobertura mundial con una resolución de 1 segundo de arco (30 metros), y se descargó en formato Geotiff para su posterior procesamiento. Además, se elaboró una tabla biofísica en formato CSV, que contiene los atributos de cada categoría de uso del suelo. Los valores de coeficiente de escorrentía (Kc) y profundidad de la raíz, fueron extraídos de fuentes bibliográficas, específicamente de Allen *et al.* (1998) y Sharp *et al.* (2018), respectivamente. Para generar los mapas de uso y cobertura del suelo, se utilizaron imágenes satelitales de 2003 y 2021⁴ del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), a través del Landsat 7 ETM+C2 L2 para el año 2003 y Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 para 2021 y se procedió con una clasificación supervisada, por medio de las herramientas “segmentation” y “segtrain” del software, las cuales permitieron fragmentar las imágenes y definir los usos de suelo específicos.

Para obtener la precipitación, evapotranspiración y temperatura anual, se utilizaron datos de Terraclimate, divididos en dos periodos, cada uno de 18 años, 1986-2003 y 2004-2021, y posteriormente, se utilizó la herramienta “Earth Trends Modeler” de TerrSet para crear series de tiempo de las tres variables para los dos periodos analizados. Estos datos, proporcionan información detallada sobre la distribución espacial y temporal de las variables climáticas. En la corrección de los datos de precipitación y evapotranspiración, se aplicó un factor multiplicativo de 0.1.

Por otro lado, la imagen de profundidad de suelo, se obtuvo a partir de la base de datos Harmonized World Soil Database (HWSD) versión 2.0 y una resolución de 30 arco-segundos, que proporciona información sobre la profundidad en la que la penetración de la raíz está fuertemente inhibida, debido a las características físicas o químicas del suelo. Finalmente, la imagen de agua disponible por planta (PAWC), se generó utilizando la misma base de datos HWSD, se ubicó la zona de estudio y se tomaron los valores correspondientes, posteriormente se calculó dividiendo el AWC (capacidad de agua disponible, en cm) y el Depth (profundidad del suelo, en mm), estos valores, representan la fracción del contenido de agua disponible para la planta en milímetros y van desde 0 a 1, siendo adimensionales. Para visualizar lo dicho anteriormente, se presentan las imágenes utilizadas para correr el modelo "Water Yield" para el periodo 2004-2021 (Figura 2).

El análisis de los datos centró su atención en comparar los resultados, en porcentaje, del rendimiento hídrico entre los suelos dedicados al cultivo de aguacate y los bosques de la zona. Esto, con el objetivo de determinar sus diferencias hídricas y estimar la cantidad de bosque que se necesita, para darle sustento hídrico a una hectárea de aguacate.

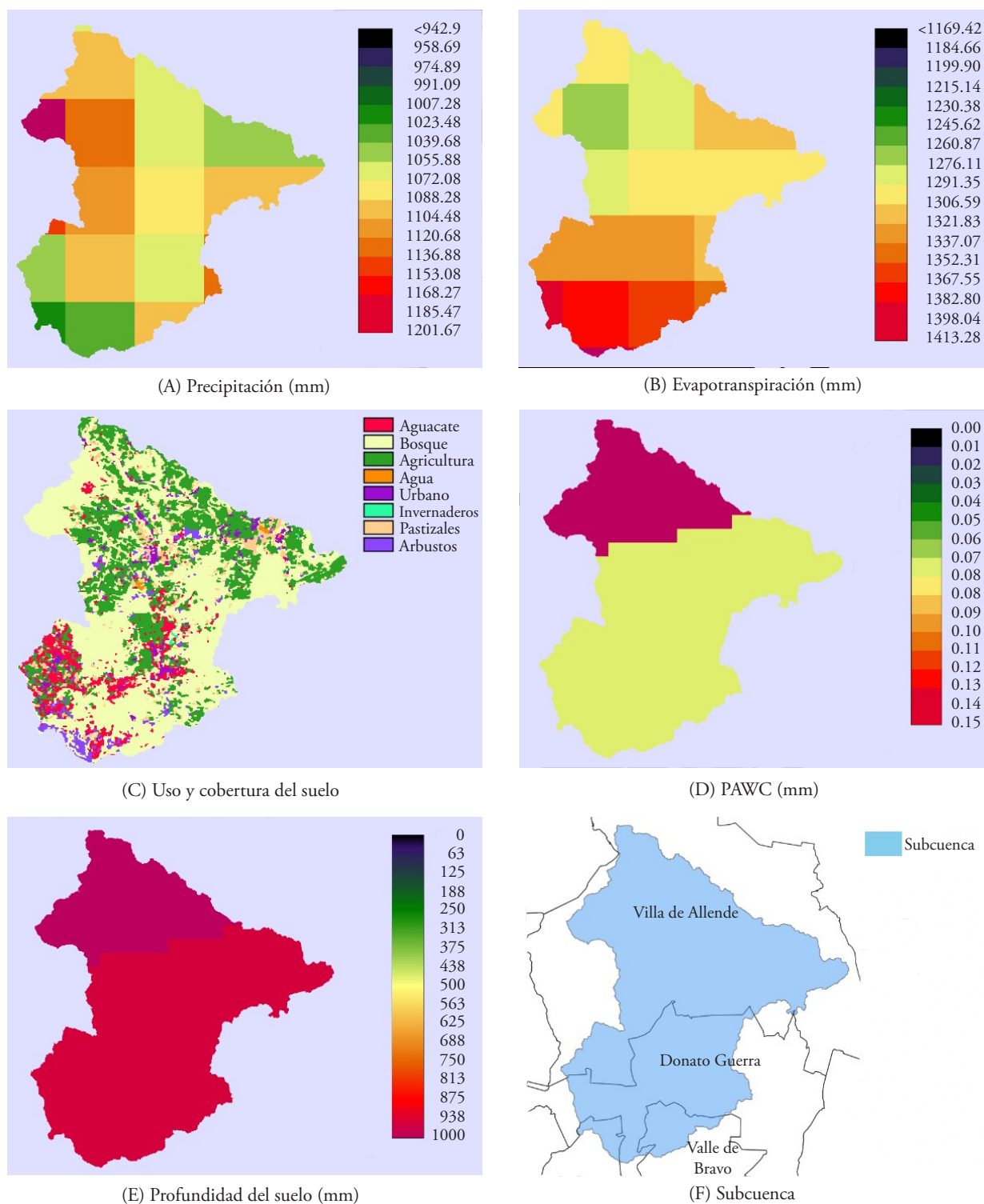
RESULTADOS

Como resultado del modelo, se obtienen dos imágenes de rendimiento hídrico en unidades de milímetros para los periodos 1986-2003 (Figura 3) y 2004-2021 (Figura 4). Aquellas, permiten comparar no solamente las diferencias en la producción de agua de la subcuenca, sino observar los cambios en el comportamiento de los usos del suelo, variable que es relevante para analizar los aspectos hidrológicos.

Los resultados del rendimiento hídrico discriminados por uso y cobertura de suelo para los dos periodos, se presentan en el Cuadro 1, donde se observa un incremento para el periodo 2004-2021, debido a las modificaciones en el uso y cobertura del suelo, así como al aumento de superficies artificiales.

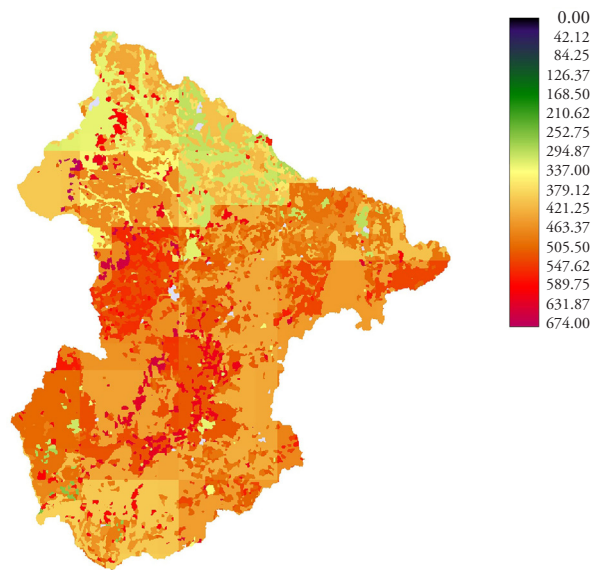
En el primer periodo, el aguacate representó 4.9% del área total de la subcuenca y el mayor rendimiento hídrico con 19.6%, posición que se mantiene para el segundo periodo, a pesar de presentarse una reducción en el porcentaje del rendimiento hídrico, pero con un aumento en el área sembrada, dando como resultado, 7.8% y 17.7% respectivamente. Por su parte, la cobertura forestal, presentó un aumento significativo, pasando de 46.2% en 2003, a 53% en 2021, sin embargo, este crecimiento no se vio reflejado en el rendimiento hídrico, dado que prácticamente, se mantuvo con 13% y 13.1% en dichos años. Esto, es un indicador de que los bosques, son excelentes reguladores hídricos y permiten mantener unos caudales estables en las fuentes de agua.

El área dedicada a la agricultura disminuyó, pasando de 32.4% a 26.6%, lo que deja en evidencia los cambios en el uso del suelo en la zona, debido a que las



Fuente: elaboración propia en Terrset 2020.

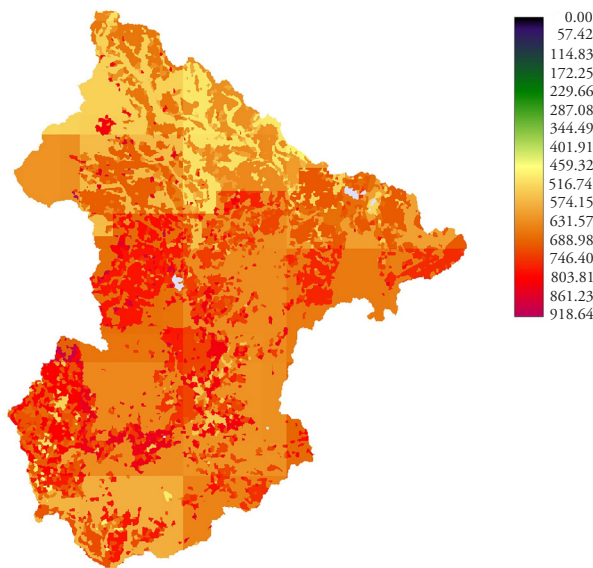
Figura 2. Datos utilizados para el modelo “Water Yield” para el periodo 2004- 2021.



Fuente: elaboración propia en Terrset 2020.

Figura 3. Modelo de rendimiento hídrico (mm) “Water Yield” del año 1986-2003.

huertas de aguacate, paulatinamente ocuparon los espacios que antes se dedicaban a la milpa, el haba o el chícharo. Su rendimiento hídrico pasó de 15.7%



Fuente: elaboración propia en Terrset 2020.

Figura 4. Modelo de rendimiento hídrico (mm) “Water Yield” del año 2004- 2021.

Cuadro 1. Resultados del modelo de rendimiento hídrico para los dos periodos de análisis.

Uso y Cobertura de Suelo	1986-2003		2004-2021	
	Área-km ² (%)	Wy-mm (%)	Área-km ² (%)	Wy-mm (%)
Aguacate	10.85 (4.9%)	611.23 (19.6%)	17.21 (7.8%)	816.99 (17.7%)
Bosque	102.37 (46.2%)	404.62 (13 %)	117.57 (53%)	605.69 (13.1%)
Agricultura	71.79 (32.4%)	489.79 (15.7%)	58.99 (26.6%)	706.22 (15.3%)
Agua	1.01 (0.5%)	N/A	0.50 (0.2%)	N/A
Urbano	3.78 (1.7%)	311.77 (10 %)	5.85 (2.6%)	542.51 (11.7%)
Invernaderos	0.12 (0.1%)	305.32 (9.8%)	0.27 (0.1%)	540.42 (11.7%)
Pastizales	30.23 (13.6%)	459.65 (14.8%)	14.81 (6.7%)	669.46 (14.5%)
Arbustos	1.66 (0.8%)	528.40 (17%)	6.63 (3%)	744.32 (16.1%)

Fuente: elaboración propia con datos de TerrSet 2020.

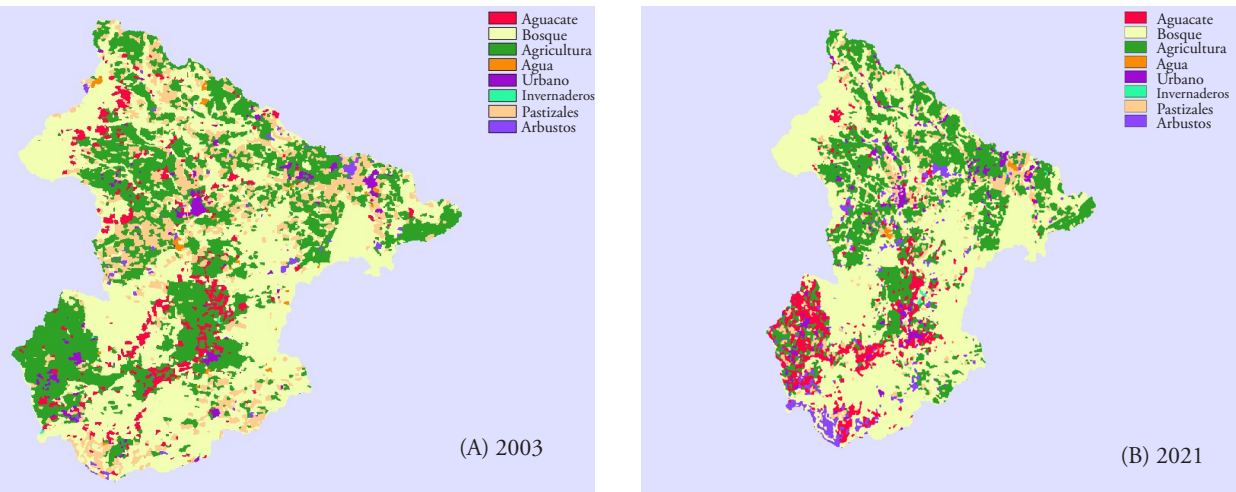
a 15.3%. Así mismo, se observa una reducción del agua en la subcuenca, pues aquella ocupaba 0.5% en el primer periodo y llegó a 0.2% en el segundo, lo cual también es una manifestación de los problemas de escasez hídrica, agudizada por las actividades económicas y el cambio climático.

Las áreas urbanas y los invernaderos, también han ganado terreno y su rendimiento hídrico para 2021, se ubicó en 11.7% en ambos periodos, esto se debe a que son superficies artificiales y muchas de ellas impermeables, que no permiten la infiltración del agua. El área dedicada a pastizales, ya sean sembrados o naturales, disminuyó, pasando de 13.6% a 6.7%; este cambio se debe principalmente, al aumento de los cultivos agrícolas en zonas donde antes había pastos. Finalmente, los arbustos ocuparon 3% del área total de la subcuenca en el año 2021 y un rendimiento de 16.1%. Estos cambios se pueden observar en la Figura 5.

Posteriormente, luego de observar los cambios en los usos del suelo y su rendimiento hídrico, se obtuvo el volumen total por cada categoría, como se observa en el Cuadro 2.

Aquí se muestra el resultado final del modelo, pero como se desea hallar una proporción comparable entre los volúmenes del bosque y los huertos de aguacate, es necesario convertir el área que se encuentra en metros cuadrados a hectáreas, y posteriormente, dividirla entre el rendimiento hídrico en milímetros cúbicos (Cuadro 3). Este proceso, se realizó únicamente para el segundo periodo de análisis, por ser el más actual.

A partir de los datos del rendimiento hídrico en mm³ por hectárea, se calculó la proporción de cada uso y cobertura respecto del bosque, obteniendo que, es necesario 1.35 ha de bosque, para darle sustento hídrico a 1 ha de aguacate; 1.17 ha para 1 ha dedicada a la agricultura; 1.11 ha para 1 ha de pastizales y 1.23 ha para 1 ha de arbustos. Así, teniendo en cuenta que la asociación de productores está realizando actividades de reforestación y que en la actualidad



Fuente: elaboración propia en Terrset 2020.
Figura 5. Uso y cobertura del suelo para los dos periodos de análisis.

cuenta con 36.5 hectáreas de aguacate en producción, se estima que es necesario reforestar 49.2 ha de bosque, para darle sustento hídrico a sus huertas.

DISCUSIÓN.

Las modificaciones en los usos del suelo de un territorio, tienen como consecuencia directa, la alteración en el rendimiento hídrico del mismo (Lovera *et al.*, 2018), considerándose dicha eficacia, un aspecto sustantivo para la sostenibilidad agrícola, tal como lo muestran los resultados de este trabajo. Las alteraciones del rendimiento hidrológico, son el resultado de múltiples factores, no sólo edafoclimáticos, sino también políticos,

Cuadro 2. Rendimiento hídrico en volumen por uso y cobertura del suelo.

Uso y cobertura de suelo	1986-2003		2004-2021		1986-2003	2004-2021
	Área (m²)	Wy (m)	Área (m²)	Wy (m)	Vol (Mm³)	Vol (Mm³)
Aguacate	10,851,031	0.611	17,206,929	0.8170	6.632	14.058
Bosque	102,369,212	0.405	117,574,352	0.6057	41.421	71.214
Agricultura	71,786,827	0.490	58,988,281	0.7062	35.161	41.659
Agua	1,013,123	N/A	495,308	N/A	N/A	N/A
Urbano	3,784,118	0.312	5,850,793	0.5425	1.180	3.174
Invernaderos	116,006	0.305	268,818	0.5404	0.035	0.145
Pastizales	30,233,727	0.460	1,4807,124	0.6695	13.897	9.913
Arbustos	1,664,084	0.528	6,626,523	0.7443	0.879	4.932

Fuente: elaboración propia con datos de TerrSet 2020.

Cuadro 3. Proporción entre el rendimiento hídrico del bosque y los demás usos del suelo.

Uso y cobertura de suelo	2004-2021		ha	mm ³	Proporción
	Área (ha)	Wy (mm ³)			
Aguacate	1,721	14.058	1	0.008	1.35
Bosque	11,757	71.214	1	0.006	1.00
Agricultura	5,899	41.659	1	0.007	1.17
Agua	50	N/A	1	N/A	N/A
Urbano	585	3.174	1	N/A	N/A
Invernaderos	27	0.145	1	N/A	N/A
Pastizales	1,481	9.913	1	0.007	1.11
Arbustos	663	4.932	1	0.007	1.23

Fuente: elaboración propia con datos de TerrSet 2020.

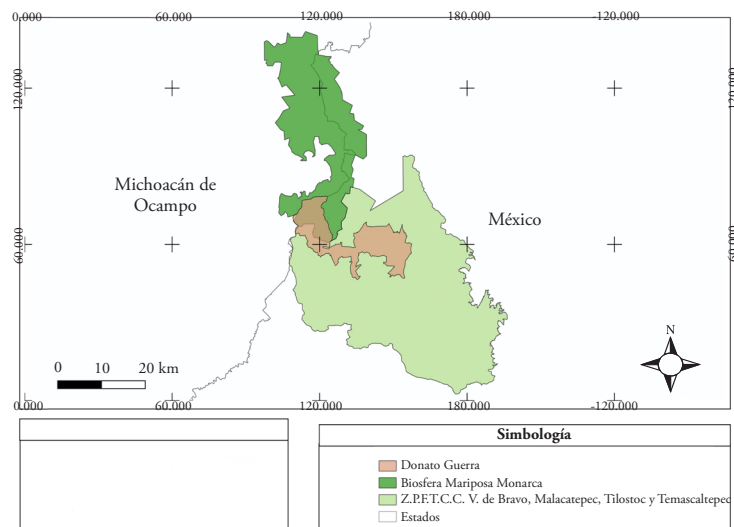
culturales y económicos, aspectos que se muestran en los cálculos obtenidos para el caso estudiado.

Uno de los factores que más han incidido en los cambios del uso del suelo en el territorio mexicano, son los tratados de libre comercio, especialmente el TLCAN, firmado en 1994 entre Canadá, EE. UU. y México, actualizado en 2018 por el T-MEC. Autores como Hernández (2021: 1122), afirman que por su “esencia neoliberal en México poco se ganó y mucho se perdió en un libre comercio agropecuario con los Estados Unidos y Canadá”, esto, debido a las asimetrías en la estructura productiva y tecnológica, la producción agrícola subsidiada en esos países y el dumping⁵. En el caso específico de la producción de aguacate y la reconversión de los territorios hacia su monocultivo, existe una importante relación con la configuración de este producto, como un commodity agroalimentario, en el contexto de las lógicas neoliberales de agroexportación.

Por otra parte, la eliminación gradual de aranceles sobre productos agrícolas importados, provocó que una parte considerable de la economía campesina mexicana, se viera afectada por el ingreso de grandes cantidades de alimentos a precios más bajos, lo que desembocó en que sus cosechas, no fueran rentables (Escalante y González, 2018). Este fenómeno también se vio reflejado en el municipio de Donato Guerra, por lo que muchos campesinos y productores pasaron de cultivar chícharo, maíz y habas, a sembrar aguacate como cultivo para la exportación que generara mayores ingresos (Martínez, 2019), pero que lamentablemente, también contribuyera a la actual crisis hídrica que se presenta en el territorio.

Además de los tratados internacionales, a nivel nacional, se observan elementos que, de manera directa o indirecta, estimulan los cambios de uso del suelo. Uno de los principales, fue la reforma de 1992 al artículo 27 de la Constitución

Política Mexicana (Gómez, 2016), que permitió la privatización de tierras ejidales y comunales en el país, transformando la estructura agraria y el régimen de tenencia de la tierra. Dicha reforma, también fue leída como el proceso de modernización neoliberal del campo mexicano, por autores como de Ita. A. (2019), que la considera como el punto de partida para la desposesión de las tierras y bienes comunales, abriendo paso, a la reconfiguración completa de territorios hacia modelos productivos de monocultivo, especializados y orientados a la exportación. Aspecto que se refuerza con la disponibilidad de recursos financieros y adquisición de nuevos conocimientos que ostentan los actores que emigran hacia Estados Unidos, que, a través de la contribución de sus remesas, inciden fuertemente en la reconfiguración del territorio. Es importante señalar que, en Donato Guerra, se declararon dos áreas naturales protegidas (ANP) que son figuras federales de conservación (LGEEPA, 2023). Aquellas son “La Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca” y la “Zona Protectora Forestal de los Terrenos Constitutivos de las Cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec”. Ambas, abarcan la totalidad del territorio municipal, cómo puede observarse en la Figura 6. Los resultados obtenidos, son útiles para comprender los cambios de uso de suelo en Donato Guerra, en el contexto de la reestructuración productiva del territorio, la emigración y las estrategias de gestión territorial ancladas en la conservación. En el caso de la declaración de Reserva la Biosfera de la Mariposa Monarca, la de menor área en el municipio, es posible leer una agenda de reconfiguración territorial, a partir de una actividad diagnóstica (SEMARNAT, 2001),



Fuente: elaboración propia con datos de la Conabio.

Figura 6. Zonas de conservación en jurisdicción del municipio de Donato Guerra-Estado de México.

que articula subzonas flexibles con una porción relativamente limitada de subzona de amortiguamiento o de uso restringido que prohíbe cualquier cambio de uso del suelo, todas ellas, bajo una visión sustentable (SEMARNAT, 2000), pero siempre enmarcadas en una visión prescriptiva alineada con la agenda internacional. Un ejemplo de dicha restricción flexible y fluida, es la persistencia de la tala ilegal de árboles, que afecta alrededor de 23,600 hectáreas de bosque al año (SEMARNAT, 2001). Lo anterior, además de causar daños graves a los caudales de los cuerpos de agua, constituye el punto de partida para la reconfiguración del uso de suelo, inicialmente hacia las actividades agrícolas y eventualmente hacia el uso urbano.

Por su parte, la Zona Protectora Forestal de los Terrenos Constitutivos de las Cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec, tiene como objetivo, la protección de los macizos forestales captadores de agua en las cuencas hidrológicas en las que se originan (CONANP, 2024), siendo este territorio, una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para una de las metrópolis más grandes del planeta, a través del Sistema Cutzamala. Ello indica que, si bien el papel de los cultivos juega un rol importante en la construcción de territorios hidrosociales, el caso que nos ocupa, devela un conflicto crucial precedente entre los ámbitos rural y urbano, el cual, debe tamizarse a través de los conceptos de la justicia social y la memoria histórica, no sobreestimando el impacto de los cultivos sobre el equilibrio hidrológico. Un claro ejemplo de la institucionalización del conflicto hídrico, es el hecho de que la Ley de Aguas Nacionales, da prioridad al uso doméstico, particularmente en contextos urbanos (Gobierno de México, 1992), soslayando las condiciones de existencia y necesidades específicas de las comunidades periféricas a los sistemas hídricos.

Aunque esta reserva es fundamental para el aprovisionamiento de agua, se definieron subzonas donde se establecen qué tipos de actividades se permiten y cuales no (Cuadro 4). Para este trabajo, de especial interés la denominada “subzona de Aprovechamiento Sustentable de los Ecosistemas en Áreas Agropecuarias”, que ocupa 46.5% del territorio, es decir, que los criterios de zonificación aplicados, han orientado claramente las actividades hacia la producción primaria. Naturalmente, al ser la agricultura especializada y de exportación, concretamente el aguacate, una actividad rentable es comprensible que se “ha ampliado la frontera agropecuaria respecto a la forestal, aumentado la contaminación de agua y suelo por el uso intensivo de agroquímicos y pesticidas, la erosión del suelo y azolves de cuerpos de agua” (CONANP, 2024). Es importante entender que, “el crecimiento agrícola y el crecimiento de la demanda de recursos naturales para abastecer las necesidades de la población, ha generado que las zonas de conservación vayan cambiando en el tiempo” (Alvear, 2018: 20). Sin embargo, es muy diferente entender dichas transformaciones en el concierto de las relaciones de poder, de la reconfiguración de los mercados y

Cuadro 4. Algunas actividades permitidas y no permitidas dentro de la Z.P.F.T.C.C.

Subzona de Aprovechamiento sustentable de los ecosistemas áreas agropecuarias	
Actividades permitidas	Actividades no permitidas
-Actividades agroforestales, silvopastoriles y agrosilvopastoriles	-Acosar o dañar de cualquier forma a las especies silvestre
-Actividades culturales tradicionales	-Ampliar la frontera agropecuaria mediante la remoción permanente de vegetación natural
-Agricultura orgánica sin ampliar la frontera agrícola	-Apertura de nuevas brechas o caminos
-Aprovechamiento forestal no maderable	-Aprovechamiento forestal maderable

Fuente: elaboración propia en base a CONANP (2024).

de una evidente crisis ecológica, que nos invita a repensar la manera en que los recursos hídricos son gestionados y en posibles soluciones.

Tal como se había venido configurando la política agrícola y de desarrollo rural del Estado de México, se puede entender que una de las principales fuerzas de transformación de uso del suelo, es la reconversión agrícola basada en la instauración de cultivos con mayor rentabilidad económica como el agave, el café, algunas hortalizas y aguacate (SADER, 2020). Los resultados permiten identificar un beneficio en el ingreso de los productores de aguacate lo cual, sin embargo, presenta múltiples contradicciones como la sobreexplotación del agua, la incidencia de grupos delictivos y la emergencia de nuevas desigualdades.

Los proyectos, han impactado positivamente en los ingresos de las familias beneficiadas y en la transferencia tecnológica para los cultivos (SADER, 2020: 57). Sin embargo, los datos recogidos, muestran la necesidad de evaluar con más detalle los logros alcanzados frente a la sustentabilidad ambiental y social de este tipo de políticas agrarias, especialmente, cuando se induce a la conversión de cultivos que tienen una mayor demanda hídrica y que insertan a los productores en nuevas dinámicas económicas.

De acuerdo a lo observado en campo, es posible visualizar la ambivalencia de las prácticas de aprovechamiento forestal por parte del comité ejidal, las cuales, han permitido la deforestación, debido a una mayor extracción de metros cúbicos de madera, que la permitida en el trámite SEMARNAT-03-003-C. Lo anterior, presenta zonas nebulosas en las que las dinámicas, son dominadas por los grupos delictivos (Sáenz, 2018) y los incendios forestales (Ruiz, 2022). Con ello, se vuelve al punto de partida de la discusión, en el cual, se afirma que la eficiencia hídrica de los territorios, es un aspecto sistémico, complejo y multifactorial, por lo cual, es pertinente contar con cálculos específicos sobre acciones concretas. En este caso, la relación entre la producción de aguacate y la sustentabilidad hídrica, pues solo a partir de

operacionalizar pequeños fragmentos de problemáticas complejas, será posible enfrentar los grandes retos del siglo XXI.

Muchas de las políticas públicas e instrumentos normativos, tienen una correcta base conceptual, sin embargo, son exclusivamente retóricas, por lo que es fundamental, el desarrollo de conocimientos básicos sobre la producción agrícola, el rendimiento hídrico y la transformación del uso del suelo. De igual manera, resulta importante que estos conocimientos, se hagan disponibles a los tomadores de decisiones y a los productores, con la finalidad de transitar hacia modelos agrícolas centrados en el bienestar humano y no en el mercado. Como es posible observar, ello únicamente es posible, en la medida en que se articule un trabajo interinstitucional y comunitario, en beneficio de la conservación de los ecosistemas a largo plazo, y con ello, la posibilidad de continuar reproduciendo la vida, la cultura y la economía del territorio.

CONCLUSIONES

Es importante subrayar que, de las investigaciones que han utilizado el modelo de rendimiento hídrico "Water Yield", no se halló ninguna que lo hiciera con el propósito de determinar el balance entre dos tipos de uso del suelo. Ello permite establecer un balance hídrico para diferentes cultivos, en un contexto donde la demanda de agua para la agricultura va en aumento. Además, facilita que las asociaciones de productores en pequeña escala, puedan dimensionar el impacto de los cultivos y tomar acciones que permitan un equilibrio a largo plazo.

Por otro lado, es necesario hacer una reflexión crítica sobre los factores, actores y políticas que intervienen en el territorio, en muchas ocasiones sin tener presentes los impactos que pueden causar al modificar los usos del suelo y, por consiguiente, los rendimientos hídricos de la cuenca. Se puede afirmar que todos los factores que inciden en los cambios de uso del suelo del territorio, tienen una matriz común, que es la búsqueda de acumulación de capital en detrimento de la naturaleza. Por tal motivo, es imprescindible realizar estudios sobre la transformación de los usos de suelo y cobertura vegetal, para poder determinar las afectaciones e identificar las medidas que se deberían ejecutar para evitar la escasez del agua y la conservación de los servicios ecosistémicos. Finalmente, la investigación permitió establecer cuál sería la proporción y el balance hídrico entre las 36.5 ha de aguacate de la asociación y el bosque, siendo necesario, la reforestación de 49.2 ha. Dicha proporción, que es de 1.35 a 1, sin embargo, no se puede utilizar mecánicamente en cualquier lugar del país o del mundo, es necesario realizar un análisis del contexto particular, para poder establecer dicha proporción.

NOTAS

³Si bien puede ser considerado un anglicismo, el uso de la palabra commodity permite diferenciar algunas mercancías de otras por las dinámicas que se

desarrollan alrededor de ellas. El aguacate cumple con algunas de las características clave de los commodities: es un producto relativamente homogéneo, su valor depende en buena parte de la oferta y demanda internacional, y es objeto de transacciones en mercados globales.

⁴Se seleccionó el último año de cada periodo porque permite observar el resultado final de los cambios de uso del suelo.

⁵Vender un producto, por un precio inferior al que se vende en el mercado, para tratar de eliminar la competencia.

REFERENCIAS

- Allen RG. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO: Rome, Italia. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. 300 P.
- Álvarez MJ. 2023. El agua como bien común: Los derechos de las generaciones futuras. *Cadernos Eletrônicos Direito Internacional Sem Fronteiras*, 5(1). 1-9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7746564>.
- Alvear NE. 2018. Estudio multitemporal de cambio de uso del suelo, en la microcuenca del río Escudillas. Tesis de Maestría. Universidad Técnica del Norte. Ecuador. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7879>.
- Borrego A, Allende TC. 2021. Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en México. *Journal of Latin American Geography*. 20(1). 154-184. <https://dx.doi.org/10.1353/lag.2021.0006>.
- Calixto NJ, Cárdenas JA, Becerra D. 2022. Gestión sostenible de los recursos hídricos en Colombia, Ecoe Ediciones S.A.S.: Bogotá, Colombia. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6723>. 84 p.
- CONANP. 2024. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con la categoría de área de protección de recursos naturales cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec, Estado de México. CONANP: Estado de México, México. <https://www.conanp.gob.mx/programademanejo/PMValleBravo.pdf>. 425 p.
- De Ita A. 2019. Las reformas agrarias neoliberales en México. *Revista El cotidiano*. 214. 95-107. https://www.ceccam.org/sites/default/files/Las%20reformas%20coti_214.pdf.
- Eastman R. 2020. Manual Terrset 2020. Geospatial monitoring and modeling system, Clark Labs.: Boston, USA. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>. 391 p.
- Escalante R, González F. 2018. El TLCAN en la agricultura de México: 23 años de malos tratos. *Ola Financiera* 11(29). 85-104. <https://doi.org/10.22201/fe.18701442e.2018.29.64143>.
- Felipe J. 2023. Valoración del rendimiento hídrico de la cuenca del río Cajonos. Tesis de Maestría. Universidad de Chapingo. México. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/356ac49b-b886-4638-82f2-b4a4db2df3c9/full>.
- Gobierno de México. 1992. Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>.
- Gómez JJ. 2016. Reformas del artículo 27 constitucional. *In: El derecho agrario mexicano y la Constitución de 1917*. J. Gómez. Biblioteca Constitucional. <https://inehrm.gob.mx/recursos/Libros/Elderechoagrario.pdf>. pp: 151-168.
- Hernández JL. 2021. La agricultura mexicana del TLCAN al T-MEC: consideraciones teóricas, balance general y perspectivas de desarrollo. *El trimestre económico*. 88(352). 1121-1152. <https://doi.org/10.20430/ete.v88i352.1274>.
- LGEEPA. 2023. Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>.
- Lovera V, Roldán I, Sánchez J, Torres P. 2018. Evaluación del servicio ecosistémico de rendimiento hídrico entre los años de 1994 y 2016 en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México. *Papeles de geografía*. (64). 93-113. <https://doi.org/10.6018/geografia/2018/322931>.
- Martínez MN. 2019. Plan de exportación para la asociación "La Libertad". Tesis de Licenciatura.

- tura. Universidad Autónoma del Estado de México. México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105498>.
- Minga SV. 2018. Análisis de cambio del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios climáticos futuros en la región sur del Ecuador. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99126>.
- Natural Capital Project. 2022. InVEST 3.14.1 User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest/invest-downloads-data>.
- Nkwonta OI, Dzwauro B, Otieno FAO, Adeyemo JA. 2017. A review on water resources yield model. South African Journal of Chemical Engineering. (23). 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.04.002>.
- Rahimi L, Malekmohammadi B, Yavari AR. 2020. Assessing and Modeling the Impacts of Wetland Land Cover Changes on Water Provision and Habitat Quality Ecosystem Services. Natural Resources Research (29). 3701-3718. <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09667-7>.
- Ruiz VH. 2022. Incendios forestales, cambios de uso de suelo y su impacto en el balance hidrológico de los bosques templados del centro de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/6d406dcb-bb61-44d4-b840-773a0a5d062b>.
- SADER. 2020. Proyectos de Desarrollo Territorial (PRODETER's). Gobierno del Estado de México: Estado de México, México. https://secampo.edomex.gob.mx/sites/secampo.edomex.gob.mx/files/files/Publicaciones/evalu%20prog%20facem/Compendio_Indicadores_PDR_2019.pdf. 91 p.
- Saenz LA. 2018. Manejo Forestal en la unidad de aprovechamiento comunal, San Juan Xocunusco, Donato Guerra, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/95212>.
- Scordo F, Lavender TM, Seitz C, Perillo VL, Rusak JA, Piccolo MC, Perillo GME. 2018. Modeling Water Yield: Assessing the Role of Site and Region-Specific Attributes in Determining Model Performance of the InVEST Seasonal Water Yield Model. Water. 10(11). 1-42. <https://doi.org/10.3390/w10111496>.
- SEMARNAT. 2000. Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Mariposa Monarca. Diario Oficial de la Federación. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_decretos/40_decreto.pdf.
- SEMARNAT. 2001. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca. Diario Oficial de la Federación. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf.
- Sharp R, Tallis H, Ricketts T, Guerrey A, Wood S, Chaplin-Kramer R, Ennaanay D W. 2018. InVEST 3.2.0. User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre.
- Shi X, Matsui T, Machimura T, Haga C, Hu A & Gan X. 2022. Impact of urbanization on the food–water–land–ecosystem nexus: A study of Shenzhen, China. Science of the Total Environment, 808. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152138>.
- Song C, Lee K, Choi A, Jeon S, Kim U, Kim J, Kim T. 2015. Application of InVEST Water Yield Model for Assessing Forest Water Provisioning Ecosystem Service. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies. 18(2). 120-134. <http://dx.doi.org/10.11108/kagis.2015.18.1.120>.
- Vuille M. 2013. El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales. Banco Interamericano de Desarrollo. BID: Washington, USA. <http://dx.doi.org/10.18235/0009994>. 29 p.
- World Meteorological Organization. 2012. International Glossary of Hidrology, WMO: Ginebra, Suiza. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>. 461 p.
- Yang X, Chen R, Meadows ME, Ji G, Xu J. 2020. Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China. Water Supply. 20(3). 1035-1045. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.026>.