

# La huella hídrica agrícola en los Valles de Etna, Zimatlán y Tlacolula, Oaxaca.

Marta Magdalena Chávez Cortés<sup>1</sup> y Gilberto Sven Binnqüist Cervantes<sup>1</sup>

**Resumen.** *La producción de alimento y la suficiencia alimentaria plantean un gran reto que está ligado a la disponibilidad de agua: sólo se puede proveer más comida si hay agua disponible en el momento adecuado, en el lugar adecuado, y en la cantidad y calidad suficientes. Esta presión se agrava cuando se conjugan condiciones hidrológicas adversas y cuando los cultivos que poseen altos requerimientos de agua deben regarse para solventar la demanda no satisfecha con la lluvia. Esta situación es propia de los Valles Centrales que rodean la ciudad de Oaxaca y, por ello, enfrentan el reto de reducir el consumo de agua, al mismo tiempo que se preserva el paisaje agrícola y se produce alimento. Este reto puede superarse aplicando distintas medidas pero, para apoyar su instrumentación, se requiere contar primero con indicadores que cuantifiquen el grado de presión que ejerce la actividad agrícola sobre el uso del agua. Con este fin, en este trabajo se presenta una evaluación de la presión que ejerce la agricultura sobre este recurso en los Valles Centrales de Etna, Zimatlán y Tlacolula, a partir de la noción de huella hídrica agrícola.*

**Palabras clave:** *Huella hídrica, agricultura, Valles Centrales de Oaxaca.*

<sup>1</sup> Laboratorio de Planeación Ambiental, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, e-mail: cmmm1320@correo.xoc.uam.mx

**Abstract.** *Food production and guaranteeing food supply pose a great challenge linked to water availability: more food can only be provided if there is enough water at the right time and place, with enough quality and in enough quantity. This pressure is aggravated in the presence of adverse hydrological conditions and when crops with high water requirements must be watered to supply the demand not satisfied by rain. Such scenario is common in the Central Valleys surrounding the city of Oaxaca. Here, the challenge is that of reducing water consumption, at the same time preserving agricultural landscape while producing more food. It can be overcome through the application of several measures but, in order to support their implementation, indicators are needed first to quantify how much pressure does agricultural activity exert on water supply. To this end, the present paper shows the evaluation of pressure by agriculture on this resource in the Central Valleys of Etna, Zimatlán and Tlacolula, employing the concept of agricultural water footprint.*

**Keywords:** *Water footprint, agriculture, Oaxaca's Central Valleys*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la humanidad enfrenta una serie de retos globales que es necesario atender para construir la sustentabilidad. Uno de los más preocupantes es tener que alimentar a una población cada vez más creciente, lo que significa proveer de alimento a 9 mil millones de personas a nivel mundial, para el año 2050 (Grau y Tabora, 2011). Este hecho está íntimamente ligado con la actividad agrícola, pues, desde la perspectiva de la multifuncionalidad de la agricultura (MFA),<sup>2</sup> una de sus funciones es precisamente la suficiencia alimentaria (Ayala-Ortiz y García-Barrios, 2009).

<sup>2</sup> Entendida como los productos, servicios y externalidades generadas por esta actividad productiva, los cuales impactan directa o indirectamente a la economía y a la sociedad en su conjunto (Bonnal *et al.*, 2003).

Esta situación se perfila particularmente preocupante en el contexto nacional, pues varios autores han documentado la pérdida de autosuficiencia alimentaria debido, entre otras muchas cosas, al cambio de la producción agrícola por la pecuaria y a la falta de incentivos (Arroyo, 1989). Así, al decir de Calva (2007) y Ramírez (2010), México ha generado una dependencia alimentaria que se ha convertido ya en un fenómeno estructural, generando condiciones de vulnerabilidad en diferentes formas y escalas, misma que se vincula a un deterioro, desgaste y agotamiento de los soportes materiales de la agricultura, principalmente el suelo y *el agua*, así como a la disminución de la producción.

Siguiendo este argumento, es claro que la producción de alimentos, así como la suficiencia alimentaria plantean un fuerte reto en lo que respecta al agua: sólo se puede proveer suficiente comida si hay agua disponible en el momento adecuado, en el lugar adecuado, y en la cantidad y calidad suficientes (Lundqvist y Steen, 1999). Es por ello que, para producir al menos lo que se consume internamente de manera sostenida, se requerirá, entre otras cosas, mejorar la productividad del agua en la actividad agrícola; esto es, reducir el uso del agua a través de la innovación, conservación, redistribución y cambio de patrones de uso y reuso del recurso (Brandes *et al.*, 2005); Sobre todo considerando que a esta actividad productiva se le han reconocido otras funciones fundamentales: la conservación del medio ambiente y del pasaje rural; contribuir a la viabilidad de las áreas rurales y favorecer el desarrollo territorial equilibrado (Crecente, 2002).

En el caso de la conservación del medio ambiente, el uso del agua es clave, pues al igual que todo recurso natural, puede agotarse si se rebasan los límites de renovación de los ecosistemas a consecuencia de una demanda excesiva con respecto a su disponibilidad natural (Falkenmark *et al.*, 2007). Tal como sucede en los Valles Centrales de Oaxaca, donde el agua subterránea es la fuente que suministra alrededor de 40% de la demanda agrícola, además de abastecer el uso urbano y el industrial (Binnqüist, 2011).

En otras palabras, la agricultura de riego en los Valles Centrales de Oaxaca, así como en otros lugares, enfrenta límites ecológicos y, por sí sola, no podrá enfrentar exitosamente las necesidades crecientes de producción de alimento porque las disponibilidades de agua se han convertido en un factor limitante de sus alternativas tecnológicas, especialmente en áreas pobres afectadas por la falta de agua (Toledo, 2002). Esta condición ha sido reconocida en la región de estudio (Noticias Móvil, 2012), y se explica porque la precipitación promedio anual es de sólo 650 mm, la infiltración natural es limitada, y las fallas geológicas presentes en la Sierra de San Felipe actúan como una barrera hidrológica que limita la escorrentía subterránea proveniente de la Sierra de Juárez hacia los Valles Centrales (Binnqüist, 2011). Asimismo, la expansión creciente del área conurbada de la ciudad de Oaxaca ha favorecido la urbanización de importantes áreas naturales para la infiltración, y los acuíferos de ETLA, Zimatlán y Tlacolula son muy vulnerables a la contaminación. Los pozos profundos (31, es decir 65%) presentan una vida útil limitada, pues tienen galerías filtrantes por las que penetra el agua contaminada del río Atoyac hacia el acuífero -que en ocasiones llega a rebasar los límites permisibles considerados en la norma ambiental-, volviendo poco útil este recurso (Binnqüist, 2011).

Todos estos factores han contribuido a que la Conagua declare una veda a la entrega de concesiones para la extracción adicional del agua de los acuíferos (Conagua, 2009). Aunado a esto, la producción de alimento en la región, que es uno de los temas clave aquí, presenta bajos rendimientos en relación con su consumo de agua. En resumen, se está dejando atrás la ocupación agrícola sustentable (Consejo, 2009).

Ante la importancia del tema de la autosuficiencia alimentaria y su fuerte dependencia del recurso agua, cualquier evaluación del carácter multifuncional de la agricultura debe basarse en el reconocimiento de la necesidad urgente de producir mejor con menos agua, menos suelo y menos agroquímicos. Producir más alimentos con menos *agua* sólo puede alcanzarse si el agua que está disponible para la agricultura se usa

de manera más productiva. De acuerdo con Lundqvist y Steen (1999), esto merece poner atención en tres aspectos: 1) negociaciones del uso del agua dentro del sector agrícola; 2) negociaciones sobre el uso del agua entre sectores, en primera instancia entre el sector urbano y el rural y 3) la necesidad de balancear las funciones y beneficios derivados del uso directo del agua con la preocupación por lograr un desarrollo territorial más acorde con los principios de la sustentabilidad ambiental; para lo cual es indispensable realizar inversiones a nivel institucional, de conocimiento y capacidad humana (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007).

En cualquiera de los aspectos mencionados, determinar las cantidades de agua requeridas para producir diferentes cultivos en contextos biofísicos diferentes, así como el rendimiento económico de los cultivos por unidad de agua, es un requerimiento importante en términos de transitar hacia una agricultura más sustentable. En el primero porque, con la demanda creciente de agua por parte de otros sectores, la presión sobre el sector agrícola para usar el agua de manera más eficiente, y usándola en aquellos cultivos que son más demandados por los consumidores o que ofrecen mejores rendimientos económicos por unidad de agua irá aumentando. Por lo que habrá que vislumbrar nuevas estrategias para proteger la producción de cultivos con valor biocultural, partiendo del conocimiento de consumo de agua que su producción demanda y analizando la magnitud que esta situación representa en el contexto de la gestión del agua para diversos sectores sociales y económicos.

En el segundo, porque la política actual de la Conagua para enfrentar el déficit en cuencas cerradas, es redistribuir el agua, pasando volúmenes o derechos de agua de quienes poseen o utilizan mayor cantidad con menor valor económico agregado, hacia aquellos usos más eficientes, productivos o imprescindibles del agua. Por supuesto, esto agudiza el dilema entre si es prioritario destinar el agua proveniente de los ríos, lagos o acuíferos al consumo directo humano, a la producción de alimentos, o al desarrollo de actividades de servicios con alto valor

agregado por metro cúbico. De aquí la necesidad de encontrar, urgentemente, alternativas para satisfacer las distintas necesidades en función de los niveles de la demanda. En el tercero, porque en los programas de ordenamiento territorial no se considera como criterio en las evaluaciones de aptitud, la cantidad de agua requerida para mantener, en el espacio y tiempo, los usos y destinos del suelo propuestos, hecho que pone en riesgo la resiliencia social y ambiental de los territorios.

Dada la vulnerabilidad de los Valles Centrales de Oaxaca al crecimiento urbano y su orientación agrícola bajo condiciones de una amplia brecha entre oferta y demanda de agua (Conagua, 2011), es importante realizar estudios que sirvan de base para intentar establecer políticas que den viabilidad a las zonas rurales a través del sostenimiento de la agricultura, y que de manera sinérgica, promuevan la protección y el uso sustentable de los recursos hídricos.

Una forma de analizar estos aspectos, es a través de indicadores de sustentabilidad capaces de medir las presiones ejercidas por actividades antrópogénicas -como es el caso de la agricultura- sobre los recursos que generan los ecosistemas (Roth *et al.*, 2001). Uno de estos indicadores es la Huella Hídrica (HH), desarrollado por Hoekstra y Hung en el año 2002 con el objeto de desarrollar un indicador que relacionara el uso del agua con el consumo humano (Hoekstra y Hung, 2002). Este concepto se deriva de la noción de “agua virtual”, la cual se entiende como el volumen de agua requerido para producir una unidad de bien o servicio (p.e. m<sup>3</sup>/Ton de maíz) (Allan, 1998). Virtual significa que la mayoría de agua usada para producir un bien no está contenida en el mismo; así, la HH de un individuo, de un grupo de personas o de un país, se entiende como el total de agua utilizada para producir los bienes o servicios consumidos por el individuo, por ese grupo de personas o por el país (Chapagain y Hoekstra, 2004).

En el caso de la agricultura, el consumo de agua que este sector hace con respecto a otro, ya sea en un país o en una región, siempre se ha presentado como un porcentaje del agua disponible, el cual da cuenta

de la proporción que constituye el agua concesionada con respecto a la disponibilidad natural. Pero, si bien, estos datos son útiles para cuantificar de manera general el nivel de explotación de los recursos hídricos locales, no proporcionan información sobre qué cultivos son los que ejercen mayor presión hídrica en función de sus requerimientos de agua y nivel de producción, y sobre el tipo de fuente (cuerpos de agua o precipitación) sobre la cual se ejerce esa presión.

En este sentido, uno de los aspectos más relevantes de la huella hídrica es que permite diferenciar el agua consumida según su procedencia, distinguiendo entre huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris. En el caso de la agricultura, se denomina huella hídrica azul a la cantidad de agua utilizada en la producción de cultivos, cuando la fuente de agua son ríos, lagos, y acuíferos. Asimismo, la huella hídrica verde se refiere a la cantidad de agua utilizada en la producción de cultivos cuando se utiliza el agua que proviene de las precipitaciones, la cual queda retenida en el suelo. Por su parte, la huella hídrica gris está ligada a la contaminación del recurso, posterior a su utilización en la actividad agrícola (Falkenmark, 2003). Es así que, la estimación de la huella hídrica de la agricultura ha surgido como un indicador complementario al de la huella ecológica; por ejemplo, en el cálculo de la sustentabilidad del uso de los recursos naturales por parte del hombre (Rodríguez *et al.*, 2008; Hoekstra, 2007).

Distinguir entre estas tres clases de huella hídrica es importante, ya que cada una implica diferentes impactos sobre el ambiente y requieren diferentes políticas de administración y gestión del agua y del territorio (Pérez, 2008). Sin embargo, es necesario resaltar aquí que, debido a la dificultad para medirla, la huella hídrica gris es la que menos ha sido abordada en la literatura. Ejemplos de trabajos recientes que han abordado el cálculo de la huella hídrica agrícola son el de Mekkonen y Hoekstra (2010), quienes cuantificaron la huella hídrica azul, verde y gris de la producción global de 126 cultivos; el de Ridoutt *et al.* (2010), en donde se hace la misma cuantificación para la producción de mango

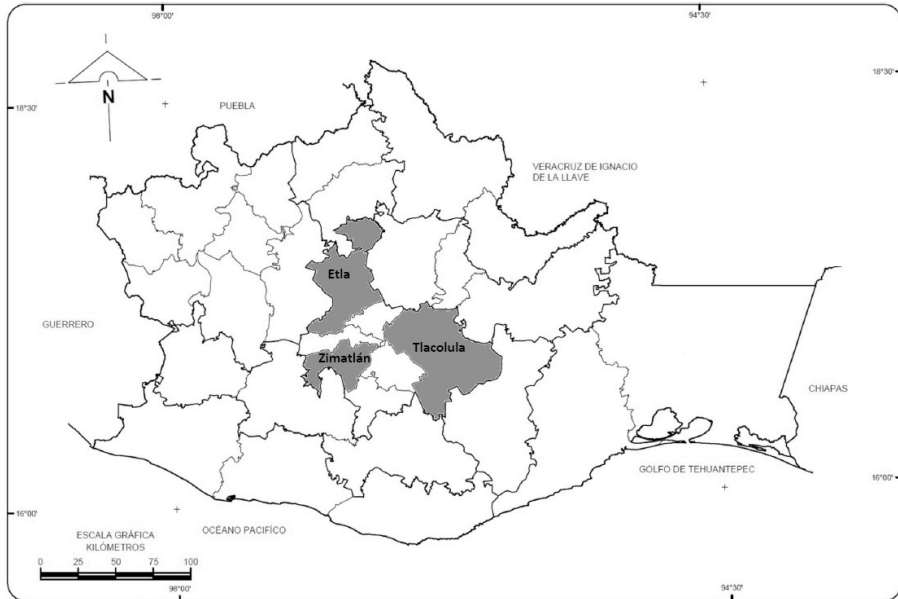
Australiano; el de Deuret *et al.* (2011), que se enfoca en la evaluación de la huella hídrica como instrumento para medir el impacto hidrológico de la producción primaria en el caso del kiwi, y el de Arévalo y colaboradores (2011), quienes hacen un estudio de la huella hídrica del sector agrícola de Colombia, resaltando los productos agrícolas con mayor huella y su representación espacial a nivel municipal y departamental. En el caso de México, se registra una escasa publicación de trabajos sobre HH a nivel de región, o incluso a nivel de productos o actividades productivas en particular, de aquí el aporte de este trabajo.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es estimar la presión que ejerce la agricultura sobre el recurso agua en los Valles de Etna, Zimatlán y Tlacolula, a través del cálculo de la huella hídrica agrícola verde y azul. Estas categorías resultan de interés, ya que darán cuenta de la presión hídrica que ejercen la agricultura de temporal y la de riego, respectivamente.

## DESCRIPCIÓN DEL ÁREA, MÉTODOS Y TÉCNICAS

Los distritos o también denominados valles de Etna, Zimatlán y Tlacolula se ubican en la región de los Valles Centrales, localizada entre el Nudo Mixteco, la Sierra de Juárez y la Sierra Madre del Sur en la porción central del estado de Oaxaca (figura 1) (Gobierno del estado de Oaxaca, 2011). Cada distrito agrupa diversos municipios: Etna (23), Zimatlán (13) y Tlacolula (25), que en conjunto conforman una superficie de 653,358 hectáreas.



**Figura 1. Los Valles Centrales de Oaxaca**

Fuente: INEGI, 2000.

En estos territorios se presenta variaciones climáticas que van desde los subgrupos de climas semicálidos, hasta los secos y templados. La temperatura promedio es de 20°C y la precipitación media anual varía de 515 al 615 mm. Hidrológicamente, los tres valles pertenecen a la Subregión Hidrológica “Rio Verde”, siendo los ríos Verde y Atoyac los escurrimientos superficiales de mayor importancia. Con respecto a la disponibilidad de agua subterránea; el acuífero de Valles Centrales está integrado por un sistema de cuatro microcuencas ubicadas en Coyotepec, Tlacolula, Oaxaca y Ocotlán, parte de la cuenca del río Atoyac. De acuerdo con los datos del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Valles Centrales de Oaxaca (Cotas), de este acuífero se extraen 193.1

Hm<sup>3</sup>/año para atender las demandas de agua de los servicios públicos urbanos, agrícola, industrial y de servicios. De la disponibilidad total de agua de la cuenca, 63% (121.8 Hm<sup>3</sup>) se extraen del acuífero y el resto (763 Hm<sup>3</sup>) corresponde a aprovechamientos de aguas superficiales. Se tiene registro de 7500 aprovechamientos de aguas subterráneas, destacando, por tipo de obra, el pozo noria.

El acuífero de los Valles Centrales está sobreexplotado debido a la excesiva extracción ocasionada por la construcción de pozos profundos con infraestructura inadecuada; esto justificó que la Conagua estableciera un decreto de veda, el cual fue publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha del 25 de septiembre de 1967. En dicho decreto se delimita su extensión y límites geopolíticos bajo la justificación del interés público y para procurar la conservación de los acuíferos en condiciones de explotación racional y para controlar las extracciones de los alumbramientos existentes y los que en el futuro se realicen, por tanto, se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo. La veda queda comprendida en la tercera clasificación del artículo 11 del Reglamento de la Ley Reglamentaria del párrafo quinto del artículo 27 constitucional en materia de aguas del subsuelo y establece que excepto cuando se trate de alumbramientos para usos domésticos, nadie podrá extraer aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, ni modificar los aprovechamientos existentes, cambiar el uso del agua o incrementar los gastos de extracción sin el permiso correspondiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, los cuales deben estar fundados en estudios geohidrológicos individuales.

Por otro lado, la agricultura de los Valles Centrales prospera fundamentalmente sobre suelos de tipo cambisol y vertisol, ambos aptos para la agricultura, aunque el primero requiere de sistemas de riego y el segundo puede utilizarse tanto en riego como en temporal. Cabe destacar que la producción agrícola de la región de los Valles Centrales de Oaxaca se sitúa en el cuarto lugar a nivel estatal al tener una participación de 12 por ciento. La región que más aporta al valor de la producción estatal es

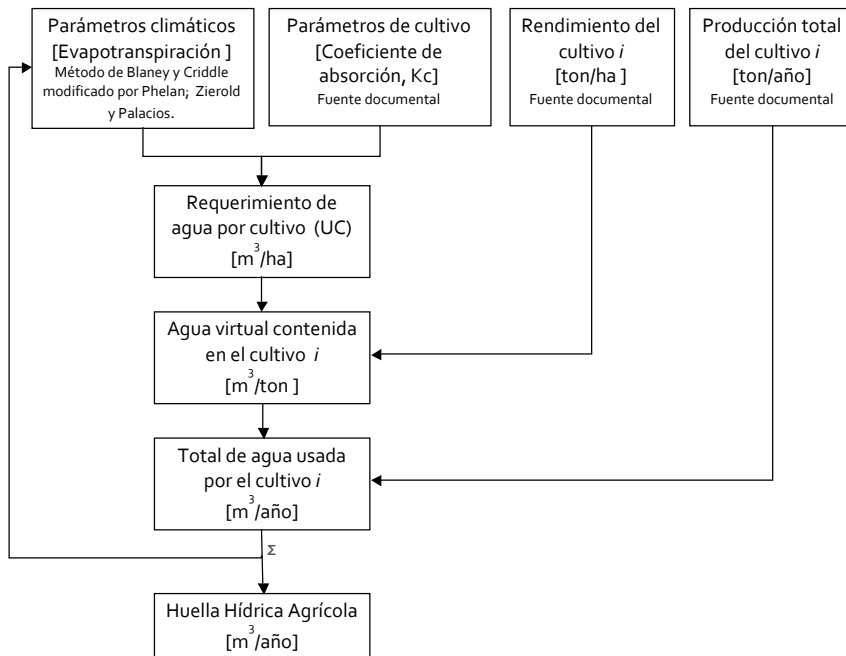
la del Papaloapan (38%), mientras que la región de menor aportación es la Cañada (3%). En términos de la aportación de cada producto al valor de la producción en la región Valles Centrales, el maíz es el producto que registra la contribución más importante con 45% del valor de la producción de la región y 84% de la superficie total sembrada, seguido por el jitomate, cuya aportación es de 24% del valor de la producción total y sólo ocupa 0.29% de la superficie sembrada en la región, lo cual puede explicarse por la producción de invernaderos. En conjunto, estos dos productos representan casi 70% del valor de la producción de la región (Gobierno del estado de Oaxaca, 2011).

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Sagarpa (SIAP, 2010), de la superficie total de los distritos de ETLA, Zimatlán y Tlacolula 19.91% (130,057 ha) corresponde a zonas destinadas a la agricultura, de las cuales la agricultura de temporal ocupa la mayor superficie (71,533 ha), distribuida en dos cultivos esencialmente: el maíz de grano y el frijol. Con respecto a la agricultura de regadío existen 9,890.82 ha destinadas principalmente al maíz para grano, maíz forrajero, frijol, sorgo y tomate rojo (jitomate), este último en invernaderos bien establecidos y al parecer con una buena producción ( $\approx 25$  Ton/ha) por unidad de superficie.

## **Cálculo de la huella hídrica agrícola**

Para evaluar la presión que ejerce la agricultura sobre el recurso agua, este estudio tomó como base metodológica la desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004) para el cálculo de la Huella Hídrica, pero referida solamente al cálculo de la Huella Hídrica de la Agricultura en un año determinado: 2010 (figura 2). Dicha huella se estimó considerando dos de sus componentes: la azul y la verde.

**Figura 2. Proceso para el cálculo de la huella hídrica agrícola**



De acuerdo con esta metodología, el volumen de agua utilizada para la producción agrícola en un país, región o lugar en particular, se calcula como:

n

$$HH \text{ (Agricultura)} = \sum_{i=1}^n UAC[i] \quad (1)$$

i=1

Donde UAC ( $m^3/año$ ), uso de agua por cultivo, es el volumen total de agua usada para producir una cantidad determinada de toneladas de un cultivo [i]. Así se tiene que:

$$UAC[i] = UC[i] \times Producción[i] / Rendimiento[i] \quad (2)$$

Donde,  $UC[i]$  corresponde al uso consuntivo de cada cultivo ( $m^3/ha$ ); la producción es la cantidad del cultivo  $[i]$  producido en un año ( $ton/año$ ), y el rendimiento corresponde a volumen de producción del cultivo  $[i]$  por unidad de área de producción ( $ton/ha$ ).

El uso consuntivo es definido como el total de agua necesaria para que una planta crezca, se desarrolle y produzca económicamente (Sánchez-Tienda, 1999). En otras palabras, es la evapotranspiración de un cultivo, desde la siembra hasta la cosecha dado un régimen climático específico, cuando la humedad del suelo es mantenida adecuadamente por la precipitación o irrigación, de tal manera que no limite el crecimiento de la planta ni el rendimiento del cultivo (Allen *et al.*, 1998).

La evapotranspiración real de los cultivos se estimó utilizando el método de Blanney y Criddle, modificado por Phelan (Aguilera y Martínez, 1980), el cual toma en cuenta la temperatura media mensual, el fotoperiodo diario y el factor de absorción de cada cultivo ( $K_c$ ). Los principales determinantes de  $K_c$  son la variedad del cultivo, el clima y las etapas de crecimiento del cultivo. Los valores del  $K_c$  son estimados a nivel internacional por la FAO, y a nivel local por instituciones de gobierno como la Sagarpa, o bien, por instituciones académicas. Aunque  $K_c$  es un coeficiente que depende en esencia de la variedad del cultivo, en la práctica se usa casi siempre el mismo valor para todas las variedades (Pérez, 2008). La evapotranspiración, por su parte, depende de datos climatológicos que aunque son variables, pueden considerarse estables durante un lapso de tiempo para un lugar específico (Pérez, 2008).

## **Cálculo del uso de agua azul y agua verde en la agricultura**

El uso del agua en la agricultura se corresponde con la suma de las demandas evaporativas de los cultivos producidos e incluye tanto el agua azul como la verde. Las pérdidas de agua que puedan producirse por

riego no se contabilizan en este trabajo, asumiendo que eventualmente puedan ser reutilizadas.

Los cultivos utilizados en este trabajo son todos aquellos contemplados en la base de datos del portal electrónico OEIDRUS-Oaxaca para los distritos de Etlá, Tlacolula y Zimatlán (30 cultivos). Los coeficientes de cultivo  $K_c$  se obtuvieron de diferentes fuentes bibliográficas.

Se calcularon por separado la evapotranspiración anual de agua verde ( $UCV[i]$ ,  $m^3/ha$ , año) y la evapotranspiración anual de agua azul ( $UCA[i]$ ,  $m^3/ha$ , año).

De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2008), la evapotranspiración anual de agua verde, correspondiente al régimen de temporal, coincide con la precipitación efectiva ( $Pe$ ,  $m^3/ha$ , año) en el caso de que esta cantidad no supera las necesidades hídricas del cultivo, es decir:

$$UCV[i] = \min(UC[i]; Pe) \quad (3)$$

Para obtener la precipitación efectiva, que es el agua de la lluvia que realmente puede ser aprovechada por la planta, se aplicó el modelo de Zierold y Palacios desarrollado en 1971 para diferentes zonas de México, el cual está en función de la precipitación mensual ( $p$ ,  $cm/mes$ ):

$$Pe (cm/mes) = p - 0.05 \times p^2, \text{ si } p < 2.5 \text{ cm} \quad (4)$$

$$Pe(cm/mes) = 1.27 \times p^{0.75} - 0.0806 \times p^{1.5}, \text{ si } p > 2.5 \text{ cm} \quad (5)$$

$$Pe(m^3/ha, \text{ mes}) = 100 \times Pe \quad (6)$$

En el caso de la evapotranspiración anual de agua azul, vinculada al régimen de riego, se supuso que todos los cultivos ven cubiertas sus necesidades hídricas. Así, la evapotranspiración de agua azul se corresponde con el riego realizado y compensa la diferencia, si existiera, entre sus

necesidades hídricas y la precipitación efectiva (Rodríguez *et al.*, 2008). De aquí que:

$$UCA[i] = \max(0; UC[i] - Pe) \quad (7)$$

Una vez obtenidos los usos consuntivos para estimar las huellas hídricas azul y verde de la agricultura en cada distrito, se aplicó la ecuación 8 para los cultivos bajo el régimen de riego y la ecuación 9 para los cultivos bajo régimen de temporal.

$$HHA (\text{distrito}) = \sum_{i=1}^n UCA[i] \times \text{Producción}[i] / \text{Rendimiento}[i] \quad (8)$$

$$HHV (\text{distrito}) = \sum_{i=1}^n UCV[i] \times \text{Producción}[i] / \text{Rendimiento}[i] \quad (9)$$

## RESULTADOS

### El consumo de agua en la agricultura a nivel global

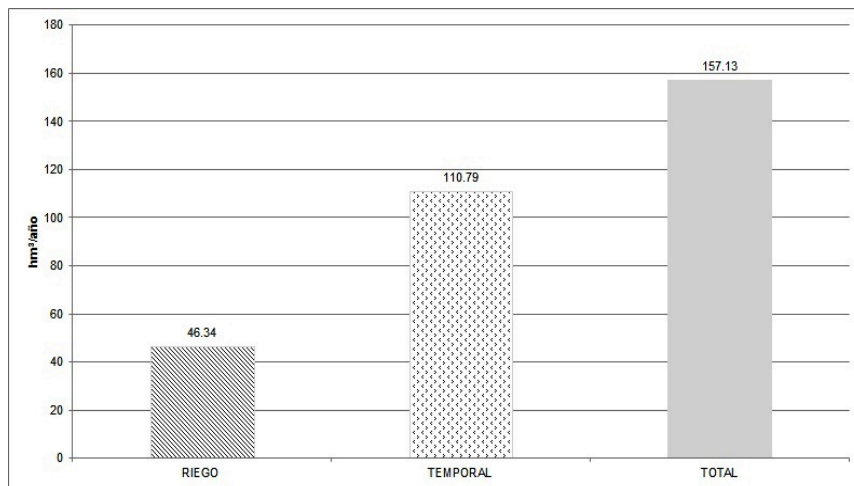
La huella hídrica agrícola global de la zona de estudio asciende 157.13 hm<sup>3</sup>/año y, en esta región, se cultivan 30 productos repartidos fundamentalmente en seis grupos: cereales, forrajes, legumbres, hortalizas, frutales y cultivos industriales.

Al desagregar la huella hídrica por tipo de cultivos, se encontró evidencia de un efecto claro de la dinámica económica sobre la agricultura de la región: la especialización, la cual conduce a la concentración de una fracción importante del consumo de agua en un solo grupo de cultivos: los cereales. Estos son los principales consumidores de agua de la

región, empleando, en el 2010, 83.41% ( $131.07 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) de toda el agua utilizada para la agricultura. Después de los cereales, las legumbres y los frutales son los grupos de cultivos con mayor huella hídrica en la región de estudio con un requerimiento de  $7.76 \text{ hm}^3/\text{año}$  y  $7.17 \text{ hm}^3/\text{año}$  cada uno. Le siguen los forrajes ( $5.79 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) y los cultivos industriales –en este caso caña de azúcar y agave– ( $3.25 \text{ hm}^3/\text{año}$ ). En último lugar compiten las hortalizas con un requerimiento de  $2.10 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Ampliando la perspectiva de la huella hídrica a sus componentes verde y azul, encontramos que prácticamente todos los grupos de cultivos se siembran bajo los dos esquemas agrícolas: el de riego y el de temporal, pero en diferente proporción. De acuerdo con datos de la Sagarpa (2010), en la región se dedican 9890.82 ha a la agricultura de riego y 71533 ha a la agricultura de temporal, De aquí que se consuma más agua verde que azul en la actividad agrícola (figura 3) pues, en principio, la superficie de temporal supera casi siete veces a la de riego.

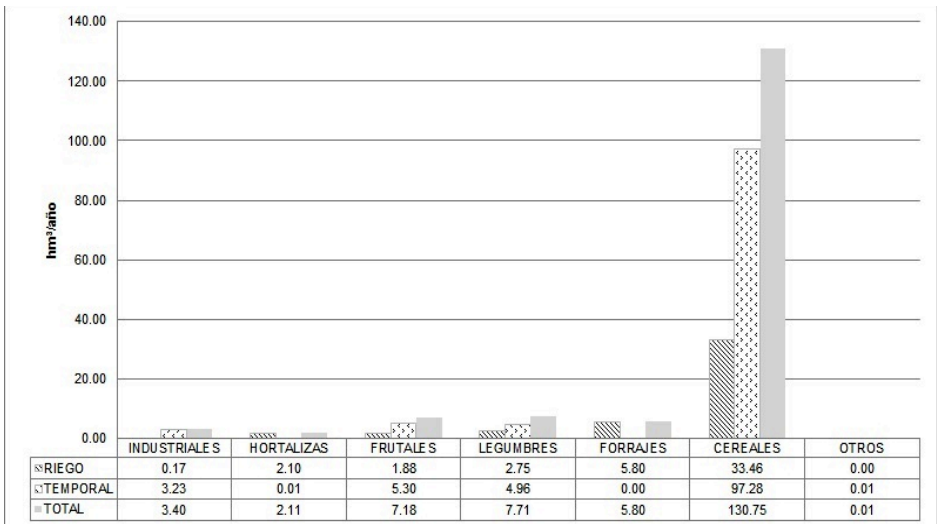
**Figura 3. Distribución de la Huella Hídrica Agrícola de acuerdo al régimen de cultivo**





Viendo más de cerca la huella hídrica azul, los resultados que se muestran en la figura 4 demuestran que el grupo de los cereales es también el mayor consumidor de agua ( $33.46 \text{ hm}^3/\text{año}$ ). Le siguen los forrajes, las legumbres y las hortalizas con un requerimiento de  $5.80 \text{ hm}^3/\text{año}$ ,  $2.75 \text{ hm}^3/\text{año}$  y  $2.10 \text{ hm}^3/\text{año}$ , respectivamente. Los tipos de cultivo que menos agua azul consumen son los frutales ( $1.88 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) y los cultivos industriales ( $0.23 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) representados, en este caso, por la caña de azúcar. Si bien, este último dato pudiera parecer poco significativo con respecto a la presión hídrica global en la región, al enmarcarlo dentro del contexto de la disponibilidad de agua azul se hace evidente que el cultivo de la caña de azúcar ejerce presión exclusivamente sobre las fuentes de agua naturales (acuífero subterráneo). Tomando en consideración que este cultivo es muy demandante de agua, habrá que vigilar su expansión.

**Figura 4. Magnitud de la Huella Hídrica Agrícola ordenada por grupos de cultivos**



Ahora bien, el reflejo del esquema de especialización agrícola a nivel de los cultivos indica que el maíz de grano es el cultivo dominante. De aquí que sea el cultivo que mayor presión ejerce, tanto sobre el agua verde como sobre el agua azul.

En cuanto a la huella hídrica verde, el maíz de grano da cuenta de 88% del agua de lluvia utilizada para la agricultura. Cabe destacar que el maíz de grano es el cultivo más importante para el estado de Oaxaca en términos de superficie cultivada, así como el primero en cuanto al consumo de agua verde.

En el caso del esquema de regadío, asociado a la huella hídrica azul, el cultivo del maíz de grano consume 66.44% del agua subterránea utilizada en los tres valles (30.79 hm<sup>3</sup>/año). El resto de la huella hídrica azul de la zona de estudio se explica por el consumo de otros tres cultivos: el maíz forrajero (4.2 hm<sup>3</sup>/año), el frijol (3.3 hm<sup>3</sup>/año) y la alfalfa (1.6 hm<sup>3</sup>/año).

## **El consumo de agua en la agricultura al interior de cada valle**

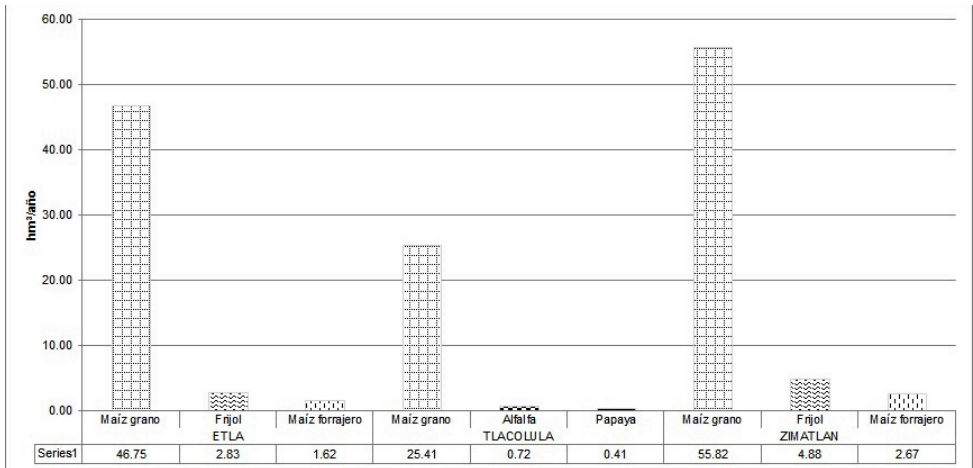
De los tres valles estudiados, Zimatlán es el que más agua consume en la producción agrícola (70.28 hm<sup>3</sup>/año) en términos de agua azul y verde en conjunto, seguido por el valle de Etna (55.03 hm<sup>3</sup>/año) y el de Tlacolula (31.82 hm<sup>3</sup>/año).

En términos de la distribución de la huella hídrica agrícola por grupo de cultivos a nivel local, los valles de Zimatlán y Etna observan el mismo patrón de requerimientos de agua. Es decir, el riego de cereales, forrajes y legumbres, en ese orden de importancia, dan cuenta de la mayor demanda de agua. A diferencia de Tlacolula, donde el patrón es: cereales, frutales y hortalizas como los grupos de cultivos que mayor demanda de agua tienen.

En términos de cultivos individuales, los tres cultivos que ejercen una mayor presión hídrica, tanto en Etna como en Zimatlán son: el maíz

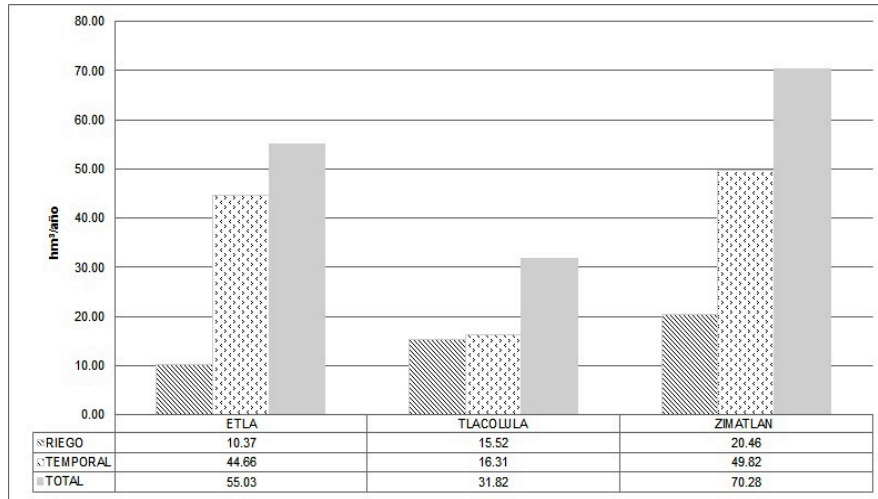
de grano, el maíz forrajero y el frijol, mientras que en Tlacolula estos puestos los ocupan el maíz de grano, la alfalfa y la papaya (figura 5).

**Figura 5. Relación de los cultivos que registran una mayor Huella Hídrica Agrícola en los tres distritos**



Como puede observarse en la figura 6, los tres valles comparten la característica de que su huella hídrica verde es mayor que la azul y, dentro de este contexto, el que más agua consume es Zimatlán y el que menos Tlacolula. Independientemente del distrito que se trate, dicha huella se ve fuertemente influida por la siembra del maíz de grano; sin embargo, la diferencia de la huella hídrica verde entre estos distritos se ve fuertemente determinada por la disponibilidad de agua a partir de la precipitación, pues tanto Zimatlán como ETLA registran más del doble de precipitación anual que Tlacolula.

**Figura 6. Magnitud de la Huella Hídrica Agrícola de acuerdo a la fuente de agua**



Asimismo, el distrito que utiliza más agua azul es Zimatlán, seguido por Tlacolula, y el que menos lo hace es Etlá. De acuerdo con los resultados, Zimatlán supera a Etlá en términos de su huella hídrica azul por un factor de 2, lo cual podría explicarse porque en Zimatlán se dedica casi el doble de tierra (4504.62 ha) a la agricultura de riego que en Etlá (2650.13  $\text{hm}^3/\text{año}$ ), y porque ahí se cultiva más del doble de superficie con maíz de grano (2939 ha).

Aquí es importante resaltar que, desde la perspectiva de la especialización agrícola, el valle de Zimatlán es el que más acusa este efecto, puesto que Tlacolula presenta mucha más riqueza de cultivos (21) que Zimatlán (7), producidos bajo un esquema de riego. Lo mismo sucede si se compara Zimatlán con Etlá, pues este último registra una riqueza de 16 cultivos. Lo anterior cobra más relevancia, ya que Etlá posee una huella hídrica azul menor que la de Zimatlán y, al mismo tiempo, favorece un mosaico agrícola más complejo.

Otro punto a destacar es que, en el caso de ETLA, si bien se asemeja a Tlacolula en términos de superficie agrícola bajo régimen de riego (alrededor de 2700 ha), este valle presenta una huella hídrica azul todavía menor, y su riqueza de cultivos no es mucho menor que la de Tlacolula. De entrada, esto llevaría a pensar que el recurso agua se usa de manera más eficiente en ETLA, ante una situación de menor disponibilidad, o incluso déficit de agua subterránea en comparación con Tlacolula y Zimatlán, como se muestra en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Disponibilidad de agua subterránea en los distritos**

<b>Distrito/Valle</b>	<b>Disponibilidad (hm<sup>3</sup>/año)</b>
<b>ETLA</b>	-9.3
<b>Tlacolula</b>	3.8
<b>Zimatlán</b>	18.8

Fuente: Conagua.

## La presión hídrica en los tres valles

Frente a la realidad descrita hasta aquí, se puede observar la magnitud del consumo de agua azul en los tres valles (46.34 hm<sup>3</sup>/año) al compararla con la disponibilidad de aguas subterráneas (153.6 hm<sup>3</sup>/año). La actividad agrícola está consumiendo alrededor de 30% de los aportes hídricos subterráneos de estos valles, y este consumo representa 38% del volumen concesionado. Viéndolo por separado, este consumo se distribuye en los tres valles de la siguiente manera (cuadro 2):

**Cuadro 2. Distribución porcentual del consumo de agua subterránea y del volumen concesionado por parte de la actividad agrícola**

<b>Distrito/Valle</b>	<b>% de consumo de los aportes hídricos subterráneos</b>	<b>% de consumo del volumen concesionado</b>
<b>Etla</b>	6.75	8.51
<b>Tlacolula</b>	10.10	12.74
<b>Zimatlán</b>	13.32	16.79
<b>Total</b>	<b>30.17</b>	<b>38.08</b>

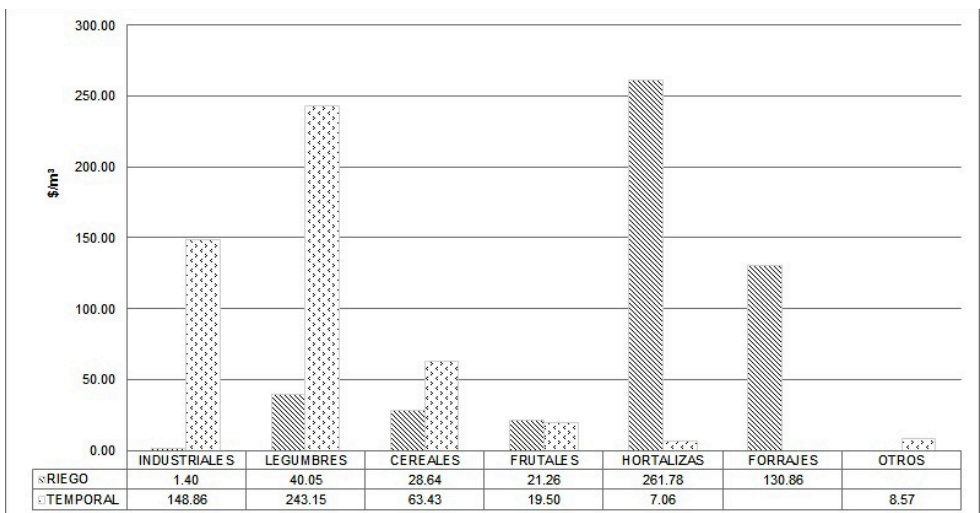
Fuente: elaboración propia.

Estos resultados colocan a Zimatlán como el distrito que ejerce mayor presión sobre el recurso agua en el territorio analizado, y al conjunto de los tres valles como un territorio que ejerce, por el momento, una presión hídrica clasificada como media-fuerte de acuerdo a la escala del Consejo Mundial del Agua ( $20\% < \text{explotación} < 40\%$  del agua naturalmente disponible) (Conagua, 2008). Esto, aunado a la relativa baja pluviosidad de la zona (alrededor de los 650 mm/año), a los requerimientos actuales de agua para el cultivo del maíz de grano, y a la fragilidad del acuífero de los Valles Centrales por sus características hidrogeológicas (infiltración natural y recarga limitada), ponen en riesgo la sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo de la región.

## La productividad del agua en la zona de estudio

Finalmente, si se analiza la situación desde la óptica de la productividad media del agua, se puede apreciar que, bajo el esquema de riego, las hortalizas son las que aportan un mayor valor añadido por unidad de agua utilizada (figura 7). Le siguen los forrajes con una productividad intermedia y, a gran distancia, figuran las legumbres, los cereales y los frutales. En el caso de la agricultura de temporal, los más productivos, en función de los requerimientos de agua, son las legumbres y los cultivos industriales, dejando considerablemente por debajo a los cereales.

**Figura 7. Productividad del agua para los distintos grupos de cultivos**



Tomando en cuenta que el maíz es el cereal más extendido en los tres valles, esto hace que la productividad del agua en este territorio alcance, en promedio, los 4743  $\$/m^3$  en el caso del esquema de riego y los 96.68  $\$/m^3$

para temporal. Lo anterior se torna serio considerando el tema de la producción de más alimento, ya que el rendimiento promedio del maíz en los Valles Centrales es de 1.09 Ton/ha, que está muy por debajo del rendimiento promedio de este cultivo en el estado de Oaxaca (7.11 Ton/ha), y debajo también de su rendimiento promedio a nivel nacional (1.3 Ton/ha). En este sentido, cabría explorar la posibilidad de combinar, bajo el esquema de riego, el maíz con otros cultivos como son el frijol o el jitomate, los cuales llegan a tener mayores rendimientos, mayor Precio Medio Rural y menores requerimientos de agua.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con el Decenio Internacional para la Acción “El agua como fuente de vida” 2005-2015, la suficiencia alimentaria y la nutricional global sólo se logrará si las naciones destinan compromisos e inversiones para producir alimentos más nutritivos con menos agua (Naciones Unidas, 2005). Para ello se apuesta al uso de tecnologías innovadoras que garanticen una producción de alimentos más sustentable, como el incrementar el rendimiento de los cultivos, la protección de las cosechas y el aumento en la eficiencia tecnológica de la infraestructura de los sistemas de regadío, especialmente por goteo o micro-aspersión (Mestries y Bonilla, 2010).

En un contexto de condiciones de escasez de agua y de alta competencia por su consumo, como ocurre en la región de los Valles Centrales de Oaxaca, el reto para la producción de alimentos y la conservación del recurso agua, dependerá no sólo de la reducción de la huella hídrica agrícola por sí misma, sino de los impactos que esta reducción tiene sobre los distintos usuarios, incluyendo los ecosistemas. Así, si bien son importantes las negociaciones institucionales que se realicen con los agricultores para optimar la capacidad de organización social para administrar las zonas de regadío y la producción de cultivos, bajo una



perspectiva de lograr mayor bienestar por unidad de agua, también lo serán los acuerdos con otros sectores económicos que demandan este líquido, y que están implantando novedosas medidas de ecoeficiencia en el reuso de las aguas servidas con tratamiento preliminar, primario y secundario, así como de otras fuentes de agua de calidad marginal.

De manera realista, se requiere una actividad agrícola que combine elementos, tanto del conocimiento tradicional como del moderno científico. Es decir, complementando el uso de distintas variedades de cultivos con tecnologías ecológicamente correctas y eficientes en el uso del agua se puede asegurar una producción agrícola más sustentable. Tomando en cuenta el indicador de la huella hídrica, para los tres distritos analizados de los Valles Centrales de Oaxaca, avanzar en esta dirección rendiría mayores beneficios si primero se enfocan esfuerzos al distrito de Zimatlán, dada la presión hídrica que ejerce en la región. Sin embargo, la variabilidad que puede existir en la eficiencia del uso del agua entre agricultores, también necesitaría ser tomada en cuenta (Ridout *et al.*, 2010), así como las condiciones de negociación para actuar en consecuencia.

En un contexto territorial, se puede afirmar que la huella hídrica agrícola es un indicador con potencial para orientar políticas públicas que promuevan la protección y el uso sustentable de los recursos hídricos desde la perspectiva del ordenamiento y el desarrollo territorial, siempre y cuando se contextualicen sus impactos y los beneficios del uso del agua. En el caso del uso de suelo agrícola, se pensaría que lo ideal sería encontrar un balance entre cultivos que sean rentables, tanto desde la perspectiva del productor como la de su valor en el mercado, en función del consumo de agua que se requiere para su producción. Y en este sentido, los resultados de este estudio proporcionan evidencia de que, en los tres valles estudiados, el maíz de grano es, por el momento, un cultivo poco rentable económicamente y con una alta huella hídrica azul y verde. También de que, bajo esta perspectiva, el frijol, el jitomate e incluso la alfalfa resultan una mejor opción, sobre todo bajo el esquema de riego.

De entrada, esto podría sugerir que la alternativa sería un programa de reconversión productiva del maíz de grano por otros cultivos de mayor relevancia económica bajo el esquema de riego. Sin embargo, los maíces nativos de Oaxaca presentan valores agregados muy importantes: su germoplasma es una prioridad en términos de su conservación biológica; son muy tolerantes y se adaptan a múltiples ambientes; son de alto valor culinario de los productos; en la comercialización tiene sobreprecio; es más rápida su venta, además de que tienen una gran importancia social, pues son el sustento de un complejo sistema biocultural y étnico (Casas-Cázares *et al.*, 2009). De aquí que la sustitución del maíz por otros cultivos constituya una solución subóptima, tanto desde la perspectiva ecológica como social.

Es necesario entender que el bajo rendimiento del maíz obedece a diversos factores que lo ponen en desventaja como cultivo, tales como: la baja fertilidad de los suelos, que buena parte de las parcelas de temporal se ubican en piedemontes y laderas, no se realiza control de plagas, hay ineficiente control de malezas, baja o nula fertilización, bajas densidades de población, malos arreglos, uso de variedades criollas, pero con defectos, mala selección y bajo potencial de rendimiento, entre otros factores (Ruiz y Loaeza, 2004). Luego entonces, para darle mayor oportunidad a este cultivo de importancia biocultural y regional, se requerirá de cambios estructurales dirigidos mayormente a corregir desigualdades en la distribución y acceso a recursos: incentivos a los valores tradicionales del maíz, subsidios a la agricultura de temporal, capacitación y transferencia tecnológica -p. e. para mejorar la productividad del agua, mejorar las variedades, mejorar la fertilización, generar cadenas de valor de los productos, etc. (Wise, 2008). Aunque también se necesitará el reconocimiento, por parte de los gobiernos, de que el conocimiento tradicional es un recurso de vital importancia en la búsqueda de la sustentabilidad, sobre todo en un contexto cultural como el de Oaxaca (Toledo, 2002).

Sin perder de vista este contexto, es importante dejar claro que las mejoras en la eficiencia en el uso del agua, tanto por tonelada producida

como por hectárea sembrada, son estrategias importantes y pertinentes para disminuir la presión sobre el recurso hídrico y, por lo tanto, sobre los ecosistemas (Hoekstra, 2007). Esto en virtud de que en México la agricultura de riego, ha sido privilegiada y su importancia ha sido sobrevalorada por las políticas agrícolas desde hace casi un siglo, acarreado grandes subsidios a la minoría de los productores de riego quienes no pagan el agua a su costo económico real y menos a su costo de oportunidad. Esto, a su vez, ha propiciado un uso desmedido del agua que, en conjunto con la ineficiencia de los métodos de riego, pozos cada vez más hondos, costos de bombeo e irresponsabilidad de los productores, han contribuido al cierre de algunas cuencas y a un agotamiento progresivo de los mantos freáticos. También a azolvamiento y salinización de presas, e inundaciones por desfogue de represas en las cuencas bajas (Mestries y Bonilla, 2010).

En este sentido, resulta importante explorar la viabilidad de una política de cobro por el uso de agua que sea justa y eficaz para incentivar el ahorro de agua, y desfavorecer los cultivos altamente intensivos en el uso de este recurso y energéticamente dispendiosos (Lundqvist y Steen, 1999; Brandes *et al.*, 2002; Toledo, 2002). También sería necesario mejorar la supervisión oficial de la extracción y venta de concesiones, así como capacitación a los usuarios en la administración de los módulos de riego respecto a los controles del tiempo y volumen de extracción, sobre todo en un contexto regional donde las concesiones de agua son gratuitas -independientemente de la situación del agricultor-, no son monitoreadas, y se usan en la práctica como un artículo con valor de mercado intercambiable entre los agricultores (Consejo, 2009).

También será cada vez más importante mejorar las técnicas de colecta y almacenamiento de agua en el esquema de agricultura de temporal con el propósito de hacer un mejor uso del agua de lluvia (Falkenmark *et al.*, 2007), principalmente para la siembra del maíz. Asimismo, en un contexto de sustentabilidad, las autoridades ambientales y de planificación territorial deberían estructurar una política de desarrollo regional

donde se puedan identificar la capacidad de carga hídrica del territorio y, en función de ésta, diseñar nuevos esquemas para la siembra de este cultivo que potencien sus rendimientos y promuevan su conservación como capital natural y cultural (Pérez, 2008).

Aunado a esto, sería importante la promoción de la heterogeneidad de los mosaicos agrícolas en donde se combinaran cultivos altamente productivos con cultivos nativos menos consumidores de agua y más rentables económicamente desde la perspectiva del valor agregado de otros mercados, como el gastronómico en el sector turístico (Binnqüist, 2011). Aquí valdría la pena visitar las posibilidades de promover la milpa mejorada en el contexto rural y evaluar el potencial de la agricultura urbana en el contexto de las ciudades (Turrent *et al.*, 2012).

Por otra parte, la agricultura de riego en los Valles Centrales enfrenta la presión que tienen las propias fuentes de agua azul: en esta zona casi no existen depósitos naturales de aguas superficiales -la mayoría del agua escurre superficialmente a través de la red hidrológica, principalmente por los ríos Atoyac, Salado, Seco, Jalatlaco-; la infiltración natural y la recarga es limitada; la extracción de agua de los acuíferos de los Valles Centrales se ha realizado desde tiempos prehispánicos para sistemas de riego. A pesar de esto, se ha llevado a cabo la desmedida extracción del líquido para cubrir la demanda agrícola y urbana, sobre todo del distrito Centro.

Ante este contexto, el reto de mantener la producción agrícola en los Valles Centrales de Oaxaca radica también en proteger y preservar el agua azul proveniente de los acuíferos que en este momento están en veda. Aquí, la incorporación del enfoque de huella hídrica agrícola resulta de utilidad para resguardar y revalorizar el recurso agua (Pengue, 2006), actuando en consecuencia, por ejemplo, a través de la optimización del regadío. Otro elemento fundamental para disminuir la presión hídrica agrícola es incrementar el uso efectivo del agua de lluvia, del agua almacenada y del agua marginal de menor calidad para el regadío, pues, dadas las condiciones de infiltración y recarga de los acuíferos de los

Valles Centrales, no es sustentable seguir manejando los mismos volúmenes concesionados de agua azul, así como importar agua de otras subcuencas (Binnqüist, 2011).

En este sentido, una alternativa a futuro sería una nueva racionalidad en la gestión de las aguas residuales en zonas urbano-rurales, en donde se asuman como un capital los gastos sanitarios derivados de los drenajes urbanos a los cuales se les puede otorgar un nuevo valor, pues al ser conducidos eficientemente por colectores marginales hasta sistemas locales de tratamiento, el efluente no deberá de verterse directamente a la red hidrológica; por el contrario, deberá de mantenerse en el sistema a través de destinarse al regadío de acuerdo a los límites máximos permisibles de contaminantes considerados en la NOM-001-ECOL-1996.

Otra alternativa sería mantener el buen funcionamiento de los actuales sistemas de riego antes que aumentarlos, con el objeto de reducir pérdidas. En este punto es importante hacer notar que, si bien las pérdidas por drenaje, filtrado o percolación, se pueden reincorporar al ciclo hidrológico, hay que tomar en cuenta que la calidad de agua que se infiltra no tiene la misma calidad del agua que se extrae. De ahí la importancia de la sincronización del riego en los periodos más sensibles al crecimiento, basadas en las necesidades hídricas de los cultivos.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue estimar la presión que ejerce la agricultura sobre el recurso agua en Valles de ETLA, Zimatlán y Tlacolula a través del cálculo de la huella hídrica agrícola.

El balance entre la oferta y la demanda de agua de los tres valles evidencia que la agricultura ejerce una fuerte presión hídrica en esta región de Oaxaca, y que, en principio, un factor que explica esta situación es la especialización productiva basada en el cultivo del maíz de manera tecnificada. Los resultados obtenidos permiten afirmar que el cultivo de

maíz de grano, bajo las actuales condiciones biogeofísicas y de manejo, es poco rentable y con externalidades crecientes: por ejemplo, intensificación del estrés hídrico, homogeneización del paisaje y disminución de la diversidad de cultivos. Entonces, cabe preguntarse: ¿cómo hacer para que el cultivo más importante del país –en varios sentidos–, pero que es un consumidor intensivo de agua se mantenga? ¿qué hacer en un contexto donde la brecha entre demanda y disponibilidad natural de agua es cada vez más amplia?

Desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental, se requeriría una mayor producción de biomasa, disminuyendo los insumos de agua. Aquí sería importante acudir a estrategias de bajo costo como son: un mejor uso de semillas (tratamiento, un incremento en la densidad de población y arreglo topológico), uso de biofertilizantes, análisis foliar y fertilización balanceada; en contraposición al uso de variedades transgénicas (Turrent *et al.*, 2012). Esto, a su vez, sugiere que la inversión pública debería apoyar a los pequeños y medianos productores de temporal, que son los que presentan menores rendimientos, pero que sin embargo contribuyen sustancialmente a la suficiencia alimentaria de los estratos más pobres.

Por otro lado, reconociendo la importancia biocultural del maíz, pero también la necesidad de obtener un mayor valor agregado de la agricultura, sería importante promover la colocación de las diversas variedades del maíz nativo en mercados especializados, como el gastronómico orientado a la actividad turística. Otra posibilidad sería complementar el cultivo del maíz con otros que pueden significar una alternativa desde el punto de vista de la productividad del agua y que además pueden coadyuvar en la creación de paisajes agrícolas más heterogéneos, menos consumidores de agua y con mayor valor en el mercado.

Desde el punto de vista técnico, es necesario mejorar la eficiencia de la infraestructura de los sistemas de riego y disminuir la extracción de agua de las fuentes naturales, básicamente por tratarse de una cuenca cerrada, donde el agua es escasa, y lo será más por los efectos

del cambio climático. Ante esto, se impone que el enfoque de la “vía suave”, esto es: utilizar agua de menor calidad en procesos que no requieran agua potable; trabajar en forma más cercana con los usuarios en los ámbitos organizacionales y sociales para cambiar las percepciones y actitudes en torno al agua donde sea necesario, y emplear herramientas económicas para fomentar el uso eficiente y la adecuada distribución del agua, en donde juegue un papel protagónico el manejo de este recurso.

Por otro lado, si bien el recurso hídrico puede ser discutido en términos de cifras nacionales y globales, concordamos Molle *et al.* (2010), en que las consecuencias de la falta de disponibilidad de agua: ya sea el agotamiento de otros recursos, el daño a la salud humana o a la integridad de los ecosistemas, éstas se experimentan a nivel de subcuencas locales. En este sentido, la huella hídrica agrícola aporta una perspectiva a tener en cuenta en el desarrollo de políticas, programas y acciones destinadas al ordenamiento y el desarrollo territorial, así como para la sensibilización y capacitación de los productores en relación al uso del agua. Un aspecto importante a considerar en el uso de la huella hídrica agrícola en el diseño de políticas, es la necesidad de contextualizar los impactos ambientales y sociales de este indicador.

Lo que este caso de estudio ha mostrado, es que la huella hídrica agrícola puede usarse para hacer transparente y significativa la presión hídrica en el contexto de la disponibilidad local del recurso agua. Esta transparencia es crítica si se considera al consumo/desperdicio de agua no solamente en términos de su costo económico, sino en términos de sus impactos sociales y ambientales. Por lo tanto, lo expuesto en este documento crea un caso, tanto para la intervención del gobierno como para la acción personal de los agricultores sobre la base de la responsabilidad compartida.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a sus alumnos del módulo de Análisis de Sistemas Ecológicos (Trimestre 11/O) de la licenciatura de Biología de la UAM-X por la recopilación de datos, y a la Biól. Nayeli Flores Guadarrama por el apoyo en el procesamiento de los datos y la elaboración de las gráficas. También agradecemos los valiosos comentarios de los revisores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arévalo, D. *et al.*, 2011, "Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola", en *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, núm. 7, Cátedra UNESCO de Sostenibilidad de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Aguilera, M. y R. Martínez, 1980, *Relaciones agua suelo planta atmósfera*, Departamento de enseñanza investigación y servicio en irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Allan, A., 1998, "Virtual water: A strategic resource, global solutions to regional deficits", en *Groundwater* 36: 545-546.
- Allen, G. *et al.*, 1998, *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*, FAO, Drainage and Irrigation, Paper 56, Food and Agriculture Organization, Roma.
- Ayala, A. y R. García, 2009, "Contribuciones metodológicas para evaluar la multifuncionalidad de la agricultura campesina en la Meseta Purépecha", en *Economía, Sociedad y Territorio* 9(31): 759-801.
- Binnqüist, G., 2011, Actualización del Plan de ordenamiento de la zona conurbada de la ciudad de Oaxaca, Fase I, Secretaría de las Infraestructuras y Ordenamiento Territorial Sustentable del estado de Oaxaca, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Fondo Metropolitano.



- Bonnal, P. *et al.*, 2003, Multifuncionalidad de la agricultura y Nueva Ruralidad. ¿Reestructuración de las políticas públicas a la hora de la globalización?, Seminario Internacional El Mundo Rural: Transformaciones y Perspectivas a la luz de la Nueva Ruralidad, 15-17 de octubre, Bogotá, Colombia.
- Brandes, M. *et al.*, 2005, *At a Watershed: ecological governance and sustainable water management in Canada*, the POLIS Project on Ecological Governance, Canadá, Universidad Victoria.
- Calva, L., 2007, "Políticas de desarrollo agropecuario", en Calva, L. (co-ord.), *Agenda para el desarrollo*, vol. 9, Desarrollo agropecuario forestal y pesquero, UNAM, Porrúa, Cámara de Diputados-LXLegislatura, México, pp. 17-33.
- Casas, R., 2009, "Sostenibilidad y estrategia en agroecosistemas campesinos de los Valles Centrales de Oaxaca", en *Agrociencia* 43(3):319-331.
- Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007, *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthsan, Londres.
- Conagua, 2008, Estadísticas del agua en México, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.
- Conagua, 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2025) Valles Centrales, estado de Oaxaca, Comisión Nacional de Agua, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, México, D.F.
- Conagua, 2011, Agenda del agua 2030, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México, D.F.
- Consejo, J., 2009, Protecting Water: Sustainable Production and Efficient Irrigation in Oaxaca's Central Valleys, en *Water and Agriculture. Implications for Development and Growth*, Essays from de CSIS and SAIS Year of Water Conference.

- Crecente, D., 2002, Ordenación del espacio rural como instrumento de la multifuncionalidad, Ponencia presentada en la *Jornada Autonómica de Galicia* celebrada en Santiago de Compostela, España.
- Chapagain, A. *et al.*, 2006, "The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries", en *Ecological Economics* 60:186:203
- Chapagain, A. y A. Hoekstra, 2004, *Water Footprints of Nations*, Volume 1: Main Report. Value for Water, Research Report Series No. 16, noviembre, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands, en <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report16.pdf>.
- Deuret, M. *et al.*, 2011, "Can product water footprints indicate the hydrological impact of primary production? - A case study of New Zealand kiwifruit", en *Journal of Hydrology* 408: 246-256.
- Gobierno del estado de Oaxaca, 2011, *Planes Regionales de Desarrollo de Oaxaca 2011-2016*, Región Valles Centrales, Secretaría de Finanzas.
- Grau, G. y F. Tabora, 2011, "El agua: tema central para la seguridad alimentaria", en *Global Water Partnership Entre~aguas* 2(11): 1
- Falkenmark, M. *et al.*, 2007, "Agriculture, water, and ecosystems: avoiding the costs of going too far", en Molden, D. (ed.), *Water for food water for life*, Earthscan, Reino Unido.
- Falkenmark, M., 2003, "Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society of London", en *Series B, Biological Science* 358: 2037-2049
- Hoekstra, Y., 2007, *Human appropriation of natural capital: Comparing Ecological Footprint and Water Footprint analysis*, Value of Water research Report Series No. 23, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- Hoekstra, Y. y Q. Hung, 2002, *Virtual water trade: A quantification of virtual waterflows between nations in a relation to international crop trade*, Value of Water Research Report Series Núm.11, UNESCO-IHE, Delft,

- The Netherlands, en [www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf](http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf), consultado el 15/02/2010.
- Lundqvist, J. y Steen, E., 1999, "The contribution of blue water and green water to the multifunctional character of agriculture and land", en Documento de trabajo, FAO/Netherlands Conference on the Multifunctional Character of Agriculture and Land Background Paper 6, Water, FAO, Holanda.
- Mestries, F. y T. Bonilla, 2010, "Crisis de la sustentabilidad de la agricultura de riego en el valle central de Puebla", en *Revista Estudios Agrarios* 43: 1-14.
- Mekkonen, M. y Y. Hoekstra, 2010, "A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat", en *Hydrology and Earth Systems Sciences* 14(7): 1259-1276.
- Molle, F. *et al.*, 2010, River basin closure: Processes, implications and responses, *Agricultural Water Management*, 97: 4 69-577
- Naciones Unidas, 2005, Medidas adoptadas para organizar las actividades del Decenio Internacional para la acción, "El agua, fuente de vida", 2005-2015. Informe del Secretario General, en <http://www.un.org/spanish/events/waterday/2005/>
- Noticias Móvil, 2012, Carece Valles Centrales de disponibilidad de agua, s/f, en [movil.noticiasnet.mx/principal/87993-carece-valles-centrales-disponibilidad-agua](http://movil.noticiasnet.mx/principal/87993-carece-valles-centrales-disponibilidad-agua).
- Pengue, A., 2006, "Agua virtual, agronegocio sojero y cuestiones económico ambientales futuras", *Fronteras* 5(5): 14-25
- Pérez, A., 2008, *Comercio internacional y medio ambiente en Colombia. Mirada desde la Economía Ecológica*, La colección libros de investigación, Programa Editorial Universidad del Valle, Colombia.
- Ramírez, R., 2010, "La vulnerabilidad territorial del liberalismo mexicano", en Calva, L. (coord.), *Desarrollo regional y urbano*, vol. 13, Análisis Estratégico para el Desarrollo, Juan Pablos Editor, Consejo Nacional de Universitarios pp. 251-272

- Ridoutt, G. *et al.*, 2010, "The waterfootprint of food waste: case study of fresh mango in Australia", en *Journal of Cleaner Production*, 18: 1714-1721
- Rodríguez, R. *et al.*, 2008, *La huella hidrológica de la agricultura española*, Papeles de Agua Virtual, núm. 2, Fundación Marcelino Botquín, Santander, España.
- Roth, E. *et al.*, 2001, "A discussion of the use of the sustainability index: 'ecological footprint' for aquaculture production", en *Aquatic Living resources* 13:461-469.
- Ruiz, J. y R. Loaeza, 2004, "Validación del método de siembra en surcos alternos para la Asociación Maíz-Frijol en Valles Centrales de Oaxaca", en *Naturaleza y Desarrollo* 2(1): 13-17.
- Sagarpa, 2010, *Estadísticas Agrícolas 2010*, OEIDRUS-Oaxaca, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en [http://www.oeidrus-portal.gob.mx/oeidrus\\_oax/](http://www.oeidrus-portal.gob.mx/oeidrus_oax/)
- Sánchez, J., 1999, "Uso consuntivo del cultivo de aguacate: metodología Blaney y Criddle modificada relacionando fenología y precipitación", en *Revista Chapingo serie horticultura* 5: 201-207.
- Selman, P., 2009, "Planning for landscape multifunctionality", en *Sustainability. Science, Practice & Policy* 5(2): 45-52.
- Toledo, A., 2002, "El agua en México y en el mundo", en *Gaceta Ecológica* 64: 9-18.
- Turrent, A. *et al.*, 2012, *Factibilidad de alcanzar el potencial productivo del maíz de México*, Mexican Rural development Research Reports, Report 24, Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Wise, T., 2008, "Estado de emergencia para el maíz mexicano: proteger la agrobiodiversidad apuntalando la economía campesina", en Seefó, L. L. (ed.), *Desde los colores del Maíz: una agenda para el campo mexicano*, El Colegio de Michoacán, México.