

Agricultural water productivity in the central zone of the Calera aquifer, Zacatecas

Productividad agrícola del agua en la zona centro del acuífero Calera, Zacatecas

Aracely Flores-Rodarte¹; David Cristóbal-Acevedo¹; Fermín Pascual-Ramírez²; Benjamín de León-Mojarro³; Jorge Víctor Prado-Hernández^{1*}

¹Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Morelia, IIES-Cátedra CONACyT. Antigua carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán de Ocampo, C. P. 58190, MÉXICO.

³Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas. Calzada C.N.C. núm. 102, col. Buenos Aires, Zacatecas, Zacatecas, C. P. 98050, MÉXICO.

*Corresponding author: vpradohdez@gmail.com, tel. 595 952 1500, ext. 6245.

Abstract

Introduction: The Calera aquifer is depleted, and irrigated agriculture uses 90.2 % of the extracted water with a use efficiency of 43.5 %.

Objective: To determine the productivity of irrigation water in the main crops of the central-southern zone of the Calera aquifer to know the efficiency of its use and identify savings opportunities.

Methodology: The physical and economic productivity of water for garlic, onion, alfalfa, green pepper, dry bean and corn crops was calculated using the volume of irrigated water, yield, and production costs and value. The valuation was performed using June 2012 as the base period and was expressed in constant Mexican pesos (MXN).

Results: The physical and economic productivity of water was higher in onion (5.48 kg·m⁻³ and 13.42 MXN·m⁻³) and lower in dry bean (0.30 kg·m⁻³ and 2.44 MXN·m⁻³), corn (1.37 kg·m⁻³ and 1.54 MXN·m⁻³) and alfalfa (1.53 kg·m⁻³ and 1.77 MXN·m⁻³). Without subsidizing electricity for pumping, alfalfa had the lowest economic productivity (-4.23 MXN·m⁻³).

Study limitations: Lack of official information about water productivity in the Calera aquifer prevented studying a longer period of time and carrying out a more in-depth analysis of the results.

Originality: This study updates and improves the results obtained in 2011 within the *Plan de Manejo Integral del Acuífero Calera* (Calera Aquifer Integrated Management Plan).

Conclusions: Crop production with low efficiency in the use of water jeopardizes its availability in the Calera aquifer.

Resumen

Introducción: El acuífero Calera se encuentra sobreexplotado, y la agricultura de riego utiliza 90.2 % del agua extraída con una eficiencia de uso de 43.5 %.

Objetivo: Determinar la productividad del agua de riego en los principales cultivos de la zona centro-sur del acuífero Calera para conocer la eficiencia de su uso e identificar oportunidades de ahorro.

Metodología: Se calcularon la productividad física y económica del agua para los cultivos de ajo, cebolla, alfalfa, chile verde, frijol y maíz, empleando el volumen de agua irrigada, rendimiento, costos y valor de la producción. La valoración se realizó utilizando como periodo base junio de 2012 y se expresó en pesos mexicanos (MXN) constantes.

Resultados: La productividad física y económica del agua fueron mayor en la cebolla (5.48 kg·m⁻³ y 13.42 MXN·m⁻³), y menor en el frijol (0.30 kg·m⁻³ y 2.44 MXN·m⁻³), el maíz (1.37 kg·m⁻³ y 1.54 MXN·m⁻³) y la alfalfa (1.53 kg·m⁻³ y 1.77 MXN·m⁻³). Sin subsidio a la energía eléctrica para bombeo, la alfalfa tuvo la productividad económica más baja (-4.23 MXN·m⁻³).

Limitaciones del estudio: La falta de información oficial acerca de la productividad del agua en el acuífero Calera impidió estudiar un mayor período de tiempo y realizar un análisis más profundo de los resultados.

Originalidad: Este estudio actualiza y mejora los resultados obtenidos en 2011 dentro del *Plan de Manejo Integral del Acuífero Calera*.

Conclusiones: La producción de cultivos con baja eficiencia en el uso del agua pone en riesgo la disponibilidad de la misma en el acuífero Calera.

Keywords: water crisis, sustainable crops, pumping wells, water footprint, efficient water use.

Palabras clave: crisis hídrica, cultivos sustentables, pozos de bombeo, huella hídrica, uso eficiente del agua.



Introduction

Water is a crucial element for life and productive processes, especially agriculture, which is the sector that makes the greatest use of water resources, with approximately 70 % of the total used worldwide (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011). In Mexico, agriculture demands 76 % of water reserves (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2017), with an average efficiency of 40 % (Oswald-Spring, 2011). This sector is concentrated mainly in the central and northern part of the country where, due to the arid and semi-arid conditions prevailing in the region, groundwater is its main source of supply.

The Calera aquifer is located in the state of Zacatecas, Mexico, in an area of low surface water availability, making it the main groundwater reservoir in the region and one of the most important in the state. This aquifer supplies the largest population centers in Zacatecas, namely Fresnillo, Calera, and Zacatecas, and is home to the largest industrial and agricultural activity. However, CONAGUA (2015) reported that the aquifer has a deficit of 73 577 147 m³ per year due to the extraction volume of 163 477 147 m³, an established natural discharge value of 1 200 000 m³ and a recharge of 91 100 000 m³, so it is considered a depleted aquifer.

In the 1997-2015 period, depletion values varying from 2 to 30 m were recorded in most of the aquifer, as well as cones of depression in the central-northern and southern zones, where extractions are concentrated for agricultural use, in which the average annual depletion is in the range of 1.2 to 1.8 m, while in the remaining area there is an average depletion of 0.6 m (CONAGUA, 2015). This behavior of the static level represents the impact that irrigated agriculture has on the Calera aquifer, since 92 % of the total volume of water extracted is destined for agricultural use (CONAGUA, 2015) to irrigate 18 074 ha with an overall efficiency of 43.5 % and an average depth of 99 cm (Ingeniería y gestión hídrica, S.C. [IGH], 2011a), by means of drip (29.9 %) and gravity (70.1 %) irrigation systems, of which 35.05 % is by piping with floodgates (Vélez, Padilla, & Mojarro, 2013).

The agricultural sector, the main user of the water resource, remains, inexplicably, without the obligation to pay water use fees (CONAGUA, 2016) and with various subsidies that are not well designed or applied and that hinder the management and preservation of aquifers (Moreno-Vázquez, Marañón-Pimentel, & López-Córdova, 2010), namely: 1) the Special Field Energy Program and 2) support for the modernization of irrigation systems.

Introducción

El agua es un elemento crucial para la vida y los procesos productivos, entre los cuales destaca la agricultura, que es el sector que hace mayor uso del recurso hídrico con, aproximadamente, 70 % del total utilizado a nivel mundial (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011). En México, la agricultura demanda el 76 % de las reservas de agua (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2017), con una eficiencia promedio de 40 % (Oswald-Spring, 2011). Este sector se concentra principalmente en el centro y norte del país donde, debido a las condiciones áridas y semiáridas que prevalecen en la región, el agua subterránea es su principal fuente de abastecimiento.

El acuífero Calera se ubica en el estado de Zacatecas, México, en una zona de baja disponibilidad de agua superficial, por lo que representa la principal reserva de agua subterránea en la región y una de las más importantes en el estado. Este acuífero abastece a los núcleos poblacionales zacatecanos más grandes: Fresnillo, Calera y Zacatecas, y en él se localiza la mayor actividad industrial y agropecuaria. No obstante, la CONAGUA (2015) reportó que el acuífero tiene un déficit de 73 577 147 m³ anuales debido al volumen de extracción de 163 477 147 m³, un valor de descarga natural comprometida de 1 200 000 m³ y una recarga de 91 100 000 m³, por lo que se considera en estado de sobreexplotación.

En el periodo 1997-2015, se registran valores de abatimiento en la mayor parte del acuífero que varían de 2 a 30 m, así como conos de abatimiento en las zonas centro-norte y sur, donde se concentran extracciones para uso agrícola, en las que el abatimiento medio anual se encuentra en el rango de 1.2 a 1.8 m, mientras que en la superficie restante se presenta un abatimiento promedio de 0.6 m (CONAGUA, 2015). Dicho comportamiento del nivel estático representa el impacto que tiene la agricultura de riego en el acuífero Calera, pues del total del volumen de agua extraído 90.2 % se destina al uso agrícola (CONAGUA, 2015) para irrigar 18 074 ha con una eficiencia global de 43.5 % y una lámina promedio de 99 cm (Ingeniería y gestión hídrica, S.C. [IGH], 2011a), esto mediante los sistemas de riego por goteo (29.9 %) y gravedad (70.1 %), del cual 35.05 % es por tubo con compuertas (Vélez, Padilla, & Mojarro, 2013).

El sector agrícola, principal demandante del recurso hídrico, se mantiene, inexplicablemente, sin pagar los derechos por uso de agua (CONAGUA, 2016) y con diversos subsidios que no están bien diseñados ni aplicados y dificultan la gestión y preservación de los acuíferos (Moreno-Vázquez, Marañón-Pimentel, & López-Córdova, 2010), como lo son: 1) el Programa

In the first case, the program includes the 9-CU and 9-N stimulus rates that apply to the electricity used in the daytime and nighttime operation, respectively, of the water pumping and re-pumping equipment for irrigation (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2018). Both increase annually on a linear basis by \$0.02 and \$0.01, respectively (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2007), while the 9 and 9M rates, for low and medium voltage, and without stimulus for the same use, increase their cost exponentially. With the stimulus rates, electricity costs decrease by up to 90 % (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2018a), which is negative for the aquifer. This is because, according to Ávila, Muñoz, Jaramillo, and Martínez (2005), when the price of electricity increases 100 %, water withdrawal decreases 15 %, although in this case water extraction increases because the cost of electricity decreases. In the second case, support for the modernization of irrigation systems has not permeated enough to reduce aquifer depletion since the release of water volumes is transformed into increases in irrigated area, so there is no real action in favor of the aquifer (IGH, 2011b).

Despite the impact on the aquifer, agriculture in the region is important since a large percentage of the state's main crops (green pepper, dry bean, corn for grain, onion, garlic and green alfalfa) are produced in an irrigation mode, which accounts for 80 % of the total value of agricultural production, even though it occupies four times less area than rainfed production (IGH, 2011a). In addition, the agricultural sector is an essential part of the Zacatecas economy, since 16.24 % of the total employed population is in the primary sector (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015), and this activity contributed 9.3 % of the state's gross domestic product in 2016 (INEGI, 2016).

Faced with the current water crisis and the recognition of agriculture as the activity with the greatest pressure on the aquifer, it is necessary to use water in this sector in a more productive way. It is therefore valid to measure such productivity in terms of crop production or net profits per m³ of water used.

Water productivity is the ratio of net benefits to the amount of water used to produce them (Molden et al., 2010). According to Ríos-Flores, Torres-Moreno, Castro-Franco, Torres-Moreno, and Ruiz-Torres (2015), agricultural water productivity is used as a tool to know the water use efficiency in agricultural systems, identify water savings opportunities, increase productivity, and justify the decision for the allocation and redistribution of water in the basin or aquifer. In agriculture, this productivity can be improved by water management practices such as deficit irrigation, precision irrigation techniques, canal lining and

Especial de Energía para el Campo y 2) los apoyos para la modernización de los sistemas de riego.

En el primer caso, el programa incluye las tarifas de estímulo 9-CU y 9-N que se aplican para la energía eléctrica utilizada en la operación diurna y nocturna, respectivamente, de los equipos de bombeo y rebombeo de agua para riego (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2018). Ambas incrementan anualmente de manera lineal \$0.02 y \$0.01, respectivamente (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2007), mientras que las tarifas 9 y 9M, para baja y media tensión, y sin estímulo para el mismo uso, aumentan su costo de manera exponencial. Con las tarifas de estímulo, los costos por concepto de energía eléctrica disminuyen hasta 90 % (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2018a), lo que resulta negativo para el acuífero. Lo anterior debido a que, de acuerdo con Ávila, Muñoz, Jaramillo, y Martínez (2005), cuando el precio de la energía eléctrica aumenta 100 %, la extracción de agua disminuye 15 %, aunque en este caso la extracción de agua aumenta debido a que el costo de energía eléctrica disminuye. En el segundo caso, los apoyos para la modernización de los sistemas de riego no han permeado lo suficiente como para disminuir la sobreexplotación dado que la liberación de volúmenes de agua se transforma en incrementos de área regada, por lo que no existe acción real a favor del acuífero (IGH, 2011b).

A pesar del impacto en el acuífero, la agricultura en la región es relevante, ya que se produce un gran porcentaje de los cultivos principales del estado (chile verde, frijol, maíz para grano, cebolla, ajo y alfalfa verde) en modalidad de riego, misma que representa 80 % del valor total de la producción agrícola, aunque ocupa cuatro veces menos superficie que la de temporal (IGH, 2011a). Además, el sector agrícola es fundamental en Zacatecas, pues 16.24 % del total de la población ocupada se encuentra en el sector primario (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015), y esta actividad aportó en 2016 el 9.3 % del producto interno bruto de la entidad (INEGI, 2016).

Ante la crisis hídrica actual y el reconociendo a la agricultura como la actividad que tiene mayor presión sobre el acuífero, es preciso utilizar el agua en este sector de forma más productiva. Por lo que es válido medir tal productividad en términos de producción de cultivos o utilidades netas por m³ de agua utilizada.

La productividad del agua es la relación de los beneficios netos y la cantidad de agua utilizada para producir esos beneficios (Molden et al., 2010). De acuerdo con Ríos-Flores, Torres-Moreno, Castro-Franco, Torres-Moreno, y Ruiz-Torres (2015), en la agricultura la productividad del agua se utiliza como una herramienta

reduced water allocation. On the other hand, there are indirect practices that impact on water productivity due to the interactive effects with the crop. In addition, its economic productivity can be increased in order to save water by switching from low-value to high-value crops, and reassigning water from lower-value to higher-value uses (Molden et al., 2010).

Therefore, this research was carried out with the objective of determining the productivity of irrigation water in the main crops of the central-southern zone of the Calera aquifer and identifying practices to improve the use of water from the aquifer, in addition to knowing the impact of the electricity rate subsidy on the aquifer.

This study updates and improves the results obtained in 2011 within the *Plan de Manejo Integral del Acuífero Calera* (Calera Aquifer Integrated Management Plan), as it considered more recent information on the characteristics of extraction wells, irrigation, planted crops, production costs and income, based on information from the Zacatecas Rural Development District (RDD), belonging to the Calera aquifer, and not with information from the Jerez RDD as was done in a previous study (IGH, 2011b).

Materials and methods

Geographic location

The Calera aquifer is located in the central zone of the state of Zacatecas, Mexico. Its central-southern zone is made up of the municipalities of Enrique Estrada, Calera and Morelos, with an area of 766,447 km², representing 33.97 % of the total area of the aquifer. It is bordered to the north by the municipality of Fresnillo, to the east by Pánuco and Vetagrande, to the south by Zacatecas and to the west by Jerez (Figure 1). The zone has a predominantly semi-dry temperate climate with average annual temperatures of 14.6 to 16.6 °C (IGH, 2010), average annual precipitation of 425 mm and evapotranspiration of 2 263 mm per year (CONAGUA, 2015).

Study crops in the central-southern zone of the Calera aquifer

The study was carried out on irrigated crops for the 2007-2017 period. The crops were determined considering their relative importance in terms of their percentage contribution to the planted area and gross production value of the agricultural census of the municipalities of Enrique Estrada, Calera and Morelos (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018) (Table 1); for this, the drip and gravity irrigation systems reported by Vélez et al. (2013) were considered.

para conocer la eficiencia del uso del agua en los sistemas agrícolas, identificar oportunidades de ahorro de agua, aumentar la productividad y justificar la decisión para la asignación y redistribución de agua en la cuenca o el acuífero. En la agricultura, dicha productividad se puede mejorar con prácticas que tienen que ver con el manejo del agua como el riego deficitario, técnicas de riego de precisión, revestimiento de canales y reducción de asignación de agua. Por su parte, existen prácticas indirectas que impactan en la productividad del agua debido a los efectos interactivos con el cultivo. Además, se puede aumentar su productividad económica con el propósito de ahorrar agua al cambiar de cultivos de bajo valor a cultivos de alto valor, y reasignar agua de usos de menor a mayor valor (Molden et al., 2010).

Por lo tanto, esta investigación se realizó con el objetivo de determinar la productividad del agua de riego en los principales cultivos de la zona centro-sur del acuífero Calera e identificar prácticas para mejorar el uso del agua del acuífero, además de conocer el impacto del subsidio a la tarifa de energía eléctrica en el acuífero.

Este estudio actualiza y mejora los resultados obtenidos en 2011 dentro del *Plan de Manejo Integral del Acuífero Calera*, pues se consideró información más reciente de las características de los pozos de extracción, el riego, los cultivos sembrados, y los costos de producción y de ingresos, con base en información del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Zacatecas, perteneciente al acuífero Calera, y no con información del DDR Jerez como se hizo en un estudio previo (IGH, 2011b).

Materiales y métodos

Ubicación geográfica

El acuífero Calera se localiza en la zona centro del estado de Zacatecas, México. Su zona centro-sur está conformada por los municipios Enrique Estrada, Calera y Morelos, con una superficie de 766.447 km², que representa el 33.97 % del área total del acuífero. Colinda al norte con el municipio de Fresnillo, al este con Pánuco y Vetagrande, al sur con Zacatecas y al oeste con Jerez (Figura 1). En esta zona predomina el clima semiseco templado con temperaturas medias anuales de 14.6 a 16.6 °C (IGH, 2010), precipitación promedio de 425 mm anuales y evapotranspiración de 2 263 mm anuales (CONAGUA, 2015).

Cultivos de estudio de la zona centro-sur del acuífero Calera

El estudio se realizó en cultivos de riego para el periodo 2007-2017. Los cultivos se determinaron considerando su importancia relativa en cuanto a su aporte porcentual en la superficie sembrada y el

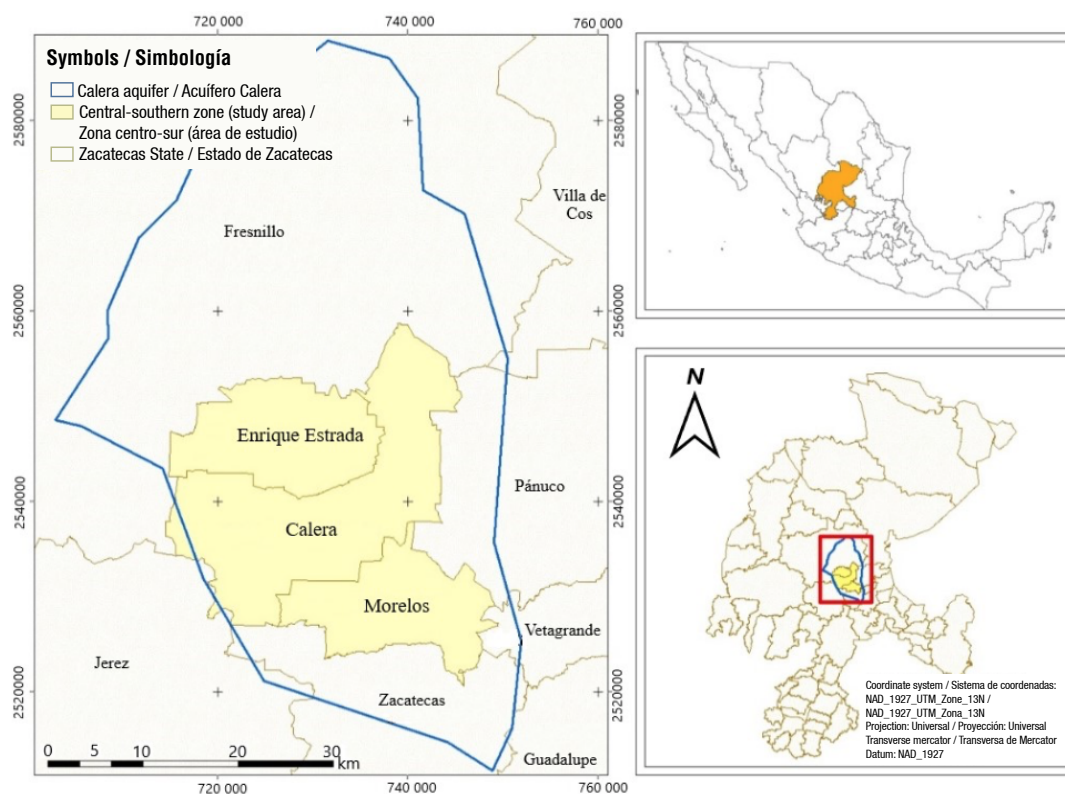


Figure 1. Location of the central-southern zone of the Calera aquifer. Source: Author-made.
Figura 1. Ubicación de la zona centro-sur del acuífero Calera. Fuente: Elaboración propia.

Table 1. Planted area and production of selected crops.
Cuadro 1. Superficie sembrada y producción de los cultivos seleccionados.

Crop/Cultivo	Scientific name/ Nombre científico	Planted area (%)/ Superficie sembrada (%)	Gross production value (%)/ Valor bruto de producción (%)
Garlic/Ajo	<i>Allium sativum</i> L.	0.813	7.39
Green alfalfa/Alfalfa verde	<i>Medicago sativa</i> L.	0.794	1.97
Onion/Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.	1.183	8.63
Green pepper/Chile verde	<i>Capsicum annum</i> L.	9.470	48.47
Dry bean/Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	4.263	4.77
Corn for grain/Maíz para grano	<i>Zea mays</i> L.	3.674	6.56

The values were obtained with respect to the total of the agricultural census of the study area.

Source: Author-made based on data from the *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2018).

Los valores se obtuvieron con respecto al total del padrón agrícola de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en datos del *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2018).

Agricultural water productivity

Agricultural water productivity was calculated using Equation 1 (Molden, Murray-Rust, Sakthivadivel, & Makin, 2003) and expressed in physical and economic terms (Bessembinder, Leffelaar, Dhindwal, & Ponsioen, 2005).

$$WP = \frac{R}{V} \quad (1)$$

Where *WP* is the agricultural water productivity ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ or $\text{\$}\cdot\text{m}^{-3}$), *R* is the production volume (kg) or

valor bruto de producción del padrón agrícola de los municipios Enrique Estrada, Calera y Morelos (*Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* [SIAP], 2018) (Cuadro 1), para ello se consideraron los sistemas de riego por goteo y gravedad reportados por Vélez et al. (2013).

Productividad agrícola del agua

La productividad agrícola del agua se calculó con la Ecuación 1 (Molden, Murray-Rust, Sakthivadivel, & Makin,

production value (\$), and V is the volume of water used for irrigation (m^3).

Physical water productivity

The variables analyzed were planted area (ha) and production volume (t), for the period, crops and municipalities mentioned above. The values were obtained from the SIAP database (2018). The reported values for each variable were added to obtain the totals for the study area and each crop per year.

Irrigation volume was calculated with Equation 2, for which the information presented in Table 2 was used.

$$V_{ji} = ST_{ji} \left(\frac{Lr_j}{10000} \right) \quad (2)$$

Where V_{ji} is the total irrigation volume (hm^3) of crop j (garlic, alfalfa, onion, green pepper, dry bean or corn for grain) and of year i of the period 2007 to 2017, ST is the total planted area (ha), Lr is the irrigation depth (cm) and 10000 is a conversion factor to hm^3 . The production volume R of the alfalfa crop was considered to be dry product at 20 % moisture.

Economic water productivity

Gross and net economic water productivity levels were calculated. The first was determined because no information on production costs was found for the years 2007 to 2016 and it was desired to know their behavior in the period studied. On the other hand, net economic productivity was calculated only for 2017 for all crops, for which production costs with a 9-CU rate subsidy and those without a 9 rate subsidy were considered. This was done in order to have a result closer to reality and to know the impact that this stimulus has on the aquifer.

The variable average rural price (ARP) (in pesos per ton) was analyzed for the period and the municipalities

2003) y se expresó en términos físicos y económicos (Bessembinder, Leffelaar, Dhindwal, & Ponsioen, 2005).

$$WP = \frac{R}{V} \quad (1)$$

Donde WP es la productividad agrícola del agua ($kg \cdot m^{-3}$ o $\$ \cdot m^{-3}$), R es el volumen de producción (kg) o valor de la producción (\$), y V es el volumen de agua usada para el riego (m^3).

Productividad física del agua

Las variables analizadas fueron superficie sembrada (ha) y volumen de producción (t), para el periodo, los cultivos y los municipios mencionado anteriormente. Los valores se obtuvieron de la base de datos del SIAP (2018). De cada variable se sumaron los valores reportados para obtener los totales de la zona de estudio y de cada cultivo por año.

El volumen de riego se calculó con la Ecuación 2, para lo cual se utilizó la información presentada en el Cuadro 2.

$$V_{ji} = ST_{ji} \left(\frac{Lr_j}{10000} \right) \quad (2)$$

Donde V_{ji} es el volumen de riego total (hm^3) del cultivo j (ajo, alfalfa, cebolla, chile verde, frijol o maíz para grano) y del año i del periodo 2007 a 2017, ST es la superficie total sembrada (ha), Lr es la lámina de riego (cm) y 10000 es un factor de conversión a hm^3 . El volumen de producción R del cultivo de alfalfa se consideró en producto seco al 20 % de humedad.

Productividad económica del agua

Se calculó la productividad económica bruta y neta del agua. La primera se determinó debido a que no se encontró información de los costos de producción de los años 2007 a 2016 y se deseaba conocer su comportamiento en el periodo estudiado. Por su parte, la productividad económica neta se calculó únicamente para 2017 en todos los cultivos, para lo cual se consideraron los costos

Table 2. Irrigation depth per crop.

Cuadro 2. Lámina de riego por cultivo.

Crop/Cultivo	Irrigation depth ¹ (cm)/ Lámina de riego ¹ (cm)
Garlic/Ajo	80
Green alfalfa/Alfalfa verde	110
Onion/Cebolla	70
Green pepper/Chile verde	60
Dry bean/Frijol	50
Corn for grain/Maíz para grano	50

¹Gross irrigation depth. Source: Author-made based on data from the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018).

¹Lámina de riego bruta. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018).

studied. The values were obtained from SIAP (2018) and averaged for each municipality by crop and year.

The gross production value was obtained by multiplying the ARP by annual physical production. The valuation of gross and net economic productivity, subsidized and unsubsidized, was performed with the June 2012 base period = 100 using the National Producer Price Index reported by INEGI (2019). Results were expressed in constant Mexican pesos (MXN).

Production costs with and without subsidy

Before describing production costs, it is important to note that the cost of “irrigation” was considered as the cost of electricity consumed by pumping water for irrigation and labor for its application; this is because no water fees are paid for agricultural use. Emphasis is placed on this concept because it involves the object of study and the subsidy that impacts the aquifer.

For production costs with a 9-CU rate subsidy, those provided by SAGARPA (2018b) (Table 3) were taken into account.

Production costs without subsidy were estimated based on the costs reported by SAGARPA (2018b), for which the cost of irrigation was replaced by the one calculated with the costs of the 9 rate (CFE, 2018) and the following characteristics of an average well located in the study area were considered: flow rate of $37 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, pumping depth of 150 m, average equipment efficiency of 60 % (indicated in NOM-006-ENER-2015 as the minimum for 126 to 350 HP submersible pump motors [DOF, 2015]) and a 25-m water column to contemplate total losses in suction and discharge, as well as delivery pressure at discharge.

de producción con subsidio tarifa 9-CU y los costos de producción sin subsidio tarifa 9. Lo anterior se realizó de esa manera para tener un resultado más cercano a la realidad y conocer el impacto que tiene dicho estímulo en el acuífero.

Se analizó la variable precio medio rural (PMR) (en pesos por tonelada) para el periodo y los municipios de estudio. Los valores se obtuvieron del SIAP (2018) y se promediaron para cada municipio por cultivo y año.

El valor bruto de producción se obtuvo al multiplicar el PMR por la producción física anual. La valoración de la productividad económica bruta y neta, con y sin subsidio, se realizó con el periodo base junio 2012 = 100 utilizando el Índice Nacional de Precios Productor reportado por el INEGI (2019). Los resultados se expresaron en pesos mexicanos (MXN) constantes.

Costos de producción con y sin subsidio

Antes de describir los costos de producción, es importante señalar que el costo por concepto de “riego” se consideró como el costo de la energía eléctrica consumida por el bombeo de agua para riego y la mano de obra para su aplicación; esto debido a que no se pagan derechos de agua para uso agrícola. Se hace énfasis en tal concepto porque involucra al objeto de estudio y el subsidio que impacta al acuífero.

Para los costos de producción con subsidio tarifa 9-CU, se tomaron en cuenta los proporcionados por SAGARPA (2018b) (Cuadro 3).

Los costos de producción sin subsidio se estimaron con base en los costos reportados por la SAGARPA (2018b), para ello se sustituyó el costo por concepto de riego por

Table 3. Production costs with subsidy per crop in Calera, Zacatecas, Mexico (2017-2018).

Cuadro 3. Costos de producción con subsidio por cultivo en Calera, Zacatecas, México (2017-2018).

Crop/Cultivo	Production costs ¹ (MXN·ha ⁻¹)/Costos de producción ¹ (MXN·ha ⁻¹)	
	Irrigation/Riego	Total
Garlic/Ajo	7528	90615
Green alfalfa/Alfalfa verde	3170 ²	11649
Onion/Cebolla	2377	47689
Green pepper/Chile verde	4279	26230
Dry bean/Frijol	1585	11158
Corn for grain/Maíz para grano	2774	13876

¹Considers inputs, wages, depreciation of capital goods and land rent. Mexican pesos (MXN) are constant for the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ²Value calculated based on reported monthly expenses. Source: Author-made based on data from the Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2018b).

³Considera los rubros insumos, jornales, amortización de bienes de capital y renta de suelo. Los pesos mexicanos (MXN) son constantes para el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ³Valor calculado con base en gastos mensuales reportados. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2018b).

Electricity consumption was calculated using the following equation:

$$Csmo EE_j = \frac{VU_j}{3.6 Q} (HP \times 0.746) \quad (3)$$

where:

$$HP = \frac{\gamma Q (CDT)}{76(\eta_{mB})} \quad (4)$$

$$CDT = h_s + Hf + h_d + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$Csmo EE_j$ is the electricity consumption per unit area of crop j ($\text{kWh}\cdot\text{ha}^{-1}$), VU_j is the irrigation volume per unit area of crop j ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), HP is the horsepower, Q is the pumped flow rate ($37 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), γ is the specific weight of water ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), CDT is the total dynamic load (m), η_{mB} is the efficiency of the engine and pump (dimensionless), 76 is the conversion factor of kW units to HP that contemplates water temperature correction, 0.746 is the conversion factor of HP units to kW, h_s is the suction height (m), Hf are the total load losses that the liquid undergoes in the suction and discharge piping (m), h_d is the discharge load height (static load) (m) and $\frac{v^2}{2g}$ is the discharge velocity load (m), where v is the discharge velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and g is the gravitational acceleration ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Once the electricity consumption was calculated, its cost (CEE) in pesos per hectare was determined with Equation 6, for which an average rate 9 price of $\$9.377\cdot\text{kWh}^{-1}$ for the months May-September 2017 (CFE, 2018) was considered.

$$CEE = Csmo EE(\text{Rate } 9 \text{ price}) \quad (6)$$

Results and discussion

Physical water productivity

Onion was the most efficient and productive crop in terms of water use. On average, this crop had a productivity 3.6 times higher than that of garlic, which was the second most efficient crop, and 18 times higher than that of dry bean, which was the least efficient crop (Table 4 and Figure 2).

Onion

The range of physical water productivity in onion was 4.71 to $6.67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, values higher than the minimum obtained by González-Robaina, Herrera-Puebla, López-Seijas, and Cid-Lazo (2014) in onion cultivated in Cuba (from 3.76 to $16.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), while in India, Wakchaure et al. (2018) reported values between 7.8 and $9.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ in onion cultivation with plant bioregulators and deficit irrigation, and a value of $7.36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ in control crops. In

el calculado con los costos de la tarifa 9 (CFE, 2018) y se consideraron las siguientes características de un pozo medio ubicado en el área de estudio: caudal de $37 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, profundidad de bombeo de 150 m, eficiencia media del equipo de 60 % (indicada en la NOM-006-ENER-2015 como mínima para motores de 126 a 350 HP de bombas sumergibles [DOF, 2015]) y columna de agua de 25 m para contemplar las pérdidas totales en la succión y en la descarga, así como la presión de entrega a la descarga.

El consumo de energía eléctrica se calculó con la siguiente ecuación:

$$Csmo EE_j = \frac{VU_j}{3.6 Q} (HP \times 0.746) \quad (3)$$

donde:

$$HP = \frac{\gamma Q (CDT)}{76(\eta_{mB})} \quad (4)$$

$$CDT = h_s + Hf + h_d + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$Csmo EE_j$ es el consumo de energía eléctrica por unidad de superficie del cultivo j ($\text{kWh}\cdot\text{ha}^{-1}$), VU_j es el volumen de riego por unidad de superficie del cultivo j ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), HP es la potencia en caballos de fuerza, Q es el caudal bombeado ($37 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), γ es el peso específico del agua ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), CDT es la carga dinámica total (m), η_{mB} es la eficiencia del motor y bomba (adimensional), 76 es el factor de conversión de unidades de kW a HP que contempla corrección por temperatura del agua, 0.746 es el factor de conversión de unidades de HP a kW, h_s es la altura de succión (m), Hf son las pérdidas totales de carga que el líquido experimenta en la tubería de succión y descarga (m), h_d es la altura de carga en la descarga (carga estática) (m) y $\frac{v^2}{2g}$ es la carga de velocidad en la descarga (m), donde v es la velocidad en la descarga ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y g es la aceleración gravitacional ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Una vez calculado el consumo de energía eléctrica, se determinó su costo (CEE) en pesos por hectárea con la Ecuación 6, para lo cual se consideró un precio promedio de la tarifa 9 de $\$9.377\cdot\text{kWh}^{-1}$ para los meses mayo-septiembre de 2017 (CFE, 2018).

$$CEE = Csmo EE(\text{Precio tarifa } 9) \quad (6)$$

Resultados y discusión

Productividad física del agua

La cebolla fue el cultivo más eficiente y productivo en el uso del agua. En promedio, este cultivo presentó una productividad 3.6 veces mayor que la del ajo, que fue el segundo cultivo más eficiente, y 18 veces mayor que la del frijol, que fue el cultivo menos eficiente (Cuadro 4 y Figura 2).

Table 4. Physical water productivity and average planted area during the 2007-2017 period in the central-southern zone of the Calera aquifer, Zacatecas, Mexico.

Cuadro 4. Productividad física del agua y superficie sembrada promedio durante el periodo 2007-2017 en la zona centro-sur del acuífero Calera, Zacatecas, México.

Crop/Cultivo	Average planted area (ha)/ Superficie sembrada promedio (ha)	Physical water productivity (kg·m ⁻³)/ Productividad física del agua (kg·m ⁻³)		
		Minimum/Mínima	Maximum/Máxima	Average/Promedio
Garlic/Ajo	444.81	1.08	1.98	1.54
Alfalfa ¹	450.06	0.86	1.84	1.53
Onion/Cebolla	599.63	4.71	6.67	5.48
Green pepper/Chile verde	4764.86	0.30	2.14	1.19
Dry bean/Frijol	2114.18	0.12	0.41	0.30
Corn for grain/Maíz para grano	1770.27	1.12	1.70	1.37

¹The production volume of this crop was considered in dry product at 20 % moisture. Source: Author-made based on information from the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) and the *Agrifood and Fisheries Information System* (SIAP, 2018).

¹El volumen de producción de este cultivo se consideró en producto seco al 20 % de humedad. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) y el *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2018).

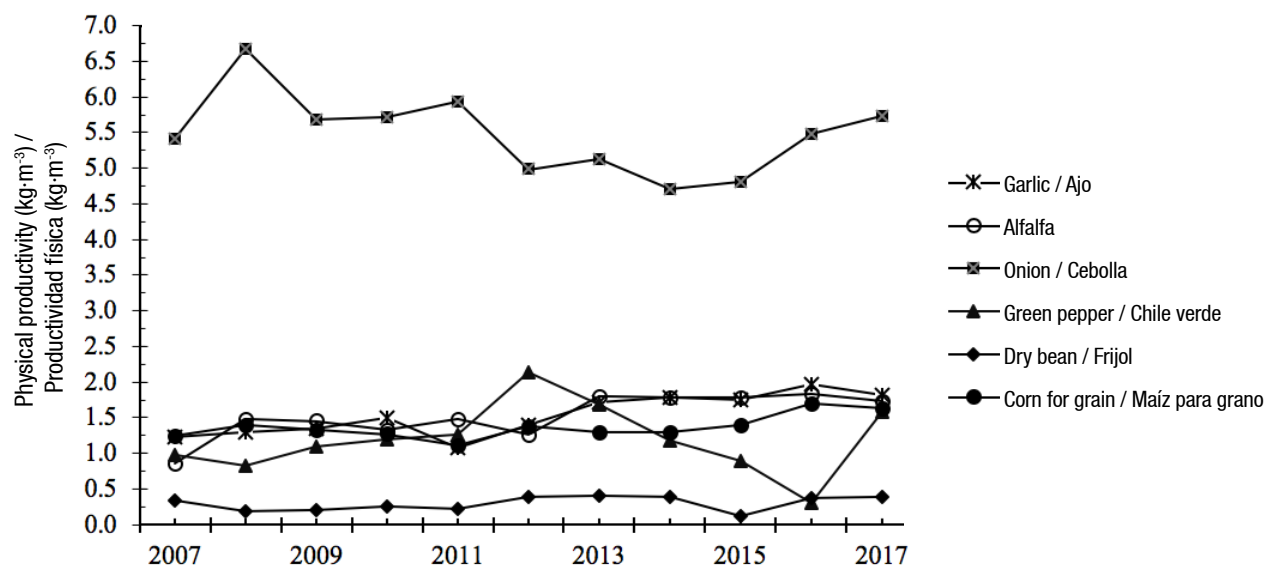


Figure 2. Physical water productivity during the 2007-2017 period in the central-southern zone of the Calera aquifer, Zacatecas, Mexico. Source: Author-made based on data from the National Water Commission (CONAGUA, 2018) and the Agrifood and Fisheries Information System (SIAP, 2018).

Figura 2. Productividad física del agua durante el periodo 2007-2017 en la zona centro-sur del acuífero Calera, Zacatecas, México. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018) y el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

Mexico, Ríos-Flores, Jacinto-Soto, Torres-Moreno, and Torres-Moreno (2017a) obtained a productivity level of 4.77 kg·m⁻³ in a study conducted in the 005 irrigation district in Delicias, Chihuahua. This last study was the best to compare the productivity obtained in onion, since the climatic and edaphic conditions are more similar. With a physical productivity of 4.77 kg·m⁻³ in Delicias and from 4.71 to 6.67 kg·m⁻³ in the Calera aquifer, it can be concluded that in both regions the

Cebolla

El rango de productividad física del agua en la cebolla fue de 4.71 a 6.67 kg·m⁻³; valores superiores al mínimo obtenido por González-Robaina, Herrera-Puebla, López-Seijas, y Cid-Lazo (2014) en cebolla cultivada en Cuba (de 3.76 a 16.6 kg·m⁻³), mientras que en India, Wakchaure et al. (2018) reportaron valores entre 7.8 y 9.6 kg·m⁻³ en el cultivo de cebolla con biorreguladores

use of water for this crop was similar. However, it could be maximized if some technologies such as plant bioregulators and deficit irrigation used by Wakchaure et al. (2018) were implemented.

Garlic

Garlic was the crop with the second highest physical water productivity, with values from 1.08 to 1.98 kg·m⁻³, and an average of 1.54 kg·m⁻³ in the 11 years studied. In spite of being one of the crops that best uses water, its productivity was considered low in comparison with that obtained by Bravo (2008) in the municipality of Calera, Zacatecas, which was 2.8 kg·m⁻³ with drip irrigation technology and fertigation; however, it was higher than that obtained with wheel move irrigation (0.45 kg·m⁻³) (Bravo, 2008).

Alfalfa

Alfalfa is planted over a large part of the study area, and continues to increase year after year; however, it is the crop that demanded the most water per unit area, an aspect that makes it a possible risk to the aquifer's permanence. The physical water productivity for alfalfa was 0.86 to 1.84 kg·m⁻³. The lowest value was lower than that reported by the National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research (INIFAP, 2000) for the Lagunera Region under wheel move irrigation (1.07 kg·m⁻³), but the highest value was greater than that obtained in a sprinkler irrigation system (1.64 kg·m⁻³).

In a study conducted by Quiroga-Garza, and Faz-Contreras (2008) in La Laguna, Coahuila, Mexico, where gravity irrigation was used, physical productivity increased from 1.18 to 1.33 kg·m⁻³ after suspending two irrigations in August and September from the second year of cultivation.

Green pepper

Green pepper was the most important crop in terms of cultivated area; in 2017 it occupied 42 % of the total irrigation area in the study area (SIAP, 2018). In addition, after the municipalities of Fresnillo and Villa de Cos, the Calera aquifer zone is the one that allocates the largest area for green pepper cultivation in the state of Zacatecas, which in turn ranks third nationally in the production of this crop.

The physical water productivity for green pepper in the evaluated period varied from 0.30 to 2.14 kg·m⁻³. This range contemplates the productivity reported for 2006 in the Aguanaval aquifer (2.09 kg·m⁻³), which is located northwest of the Calera aquifer (IGH, 2010).

de plantas y riego deficitario, y un valor de 7.36 kg·m⁻³ en cultivos control. En México, Ríos-Flores, Jacinto-Soto, Torres-Moreno, y Torres-Moreno (2017a) obtuvieron una productividad de 4.77 kg·m⁻³ en un estudio realizado en el distrito de riego 005 en Delicias, Chihuahua. Esta última investigación fue la mejor para comparar la productividad obtenida en cebolla, ya que las condiciones climáticas y edáficas son más parecidas. Con una productividad física de 4.77 kg·m⁻³ en Delicias y de 4.71 a 6.67 kg·m⁻³ en el acuífero Calera, se puede concluir que en ambas regiones el uso del agua para este cultivo fue similar. Sin embargo, podría maximizarse si se implementaran algunas tecnologías como los biorreguladores de plantas y el riego deficitario utilizados por Wakchaure et al. (2018).

Ajo

El ajo fue el segundo cultivo con mayor productividad física del agua, con valores de 1.08 a 1.98 kg·m⁻³, y promedio de 1.54 kg·m⁻³ en los 11 años evaluados. A pesar de ser uno de los cultivos que mejor aprovechan el agua, su productividad se consideró baja en comparación con la obtenida por Bravo (2008) en el municipio de Calera, Zacatecas, la cual fue de 2.8 kg·m⁻³ con tecnología de riego por goteo y fertirrigación; sin embargo, fue más alta que la obtenida con el riego rodado (0.45 kg·m⁻³) (Bravo, 2008).

Alfalfa

La alfalfa se siembra en gran superficie del área de estudio, y sigue aumentando año tras año; sin embargo, es el cultivo que demandó más agua por unidad de superficie, aspecto que lo convierte en un posible riesgo para la permanencia del acuífero. La productividad física del agua para la alfalfa fue de 0.86 a 1.84 kg·m⁻³. El valor más bajo fue menor que el reportado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2000) para la Región Lagunera bajo riego rodado (1.07 kg·m⁻³), pero el valor más alto fue superior al obtenido en un sistema de riego por aspersión (1.64 kg·m⁻³).

En un estudio realizado por Quiroga-Garza, y Faz-Contreras (2008) en La Laguna, Coahuila, México, donde se utilizó riego por gravedad, se incrementó la productividad física de 1.18 a 1.33 kg·m⁻³ después de suspender dos riegos en los meses de agosto y septiembre a partir del segundo año de cultivo.

Chile verde

El chile verde fue el más importante en cuanto a superficie cultivada; en 2017 ocupó 42 % del total del

Corn for grain

This was the only crop that tends to decrease its planted area over time; however, it was the fourth crop in terms of area occupied, with 8.13 % of the total irrigated area. Water use efficiency in the cultivation of corn for grain resulted in a value of 1.12 to 1.7 kg·m⁻³; this productivity is within the range reported in 27 publications from 10 countries on 4 continents (from 1.1 to 2.7 kg·m⁻³) (Zwart & Bastiaanssen, 2004). In this crop, physical water productivity improved, since it went from 0.48 kg·m⁻³ in 2006 (IGH, 2011b) to a range of 1.12 to 1.7 kg·m⁻³ in the period from 2007 to 2017.

Several studies conducted in China show that regulated deficit irrigation decreases water consumption by the crop without an apparent drop in yield, which improves water use efficiency. In corn, the application of this irrigation technology increased water productivity by an average of 17 % and decreased yield per hectare by 4 % (Shaozhong et al., 2017).

Dry bean

Physical bean productivity was from 0.12 to 0.41 kg·m⁻³, a value that coincided with that reported by Ríos-Flores, Torres-Moreno, Torres-Moreno, and Cantú-Brito (2017b) of 0.13 kg·m⁻³ in the municipality of Calera, Zacatecas, and that of 0.32 kg·m⁻³ calculated based on information from the *Plan de Manejo del Acuífero Calera* (Calera Aquifer Management Plan) (IGH, 2011b).

Research has also been carried out on the impact on water productivity when deficit irrigation is applied to this crop. According to Boydston, Porter, Chaves-Córdoba, Khot, and Miklas (2018), this irrigation modality applied one month after emergence, and with conventional agricultural practices, reduced dry bean yield by 46 to 48 % in their research conducted in Washington State, USA, so they suggested combining deficit irrigation with tillage (conservation agricultural practice) to improve results. Satriani, Catalano, and Scalcione (2018), in a study conducted in southern Italy, demonstrated that the combination of deficit irrigation with the application of biodegradable superabsorbent polymers maximizes the crop's water productivity index.

Subsidized and unsubsidized production costs

The garlic crop had the highest production cost (Table 5) due to the cultural work carried out, as well as the amount of fertilizers, insecticides and fungicides it demands. On the contrary, dry bean turned out to be the crop with the lowest cost per hectare, which may be partly why it is the crop with the largest area in the study zone, in addition to custom, as indicated by Vélez et al. (2013).

área de riego en la zona de estudio (SIAP, 2018). Además, después de los municipios de Fresnillo y Villa de Cos, la zona del acuífero Calera es la que asigna mayor superficie para el cultivo de chile verde en el estado de Zacatecas, quien a su vez ocupa el tercer lugar a nivel nacional en la producción de este cultivo.

La productividad física del agua para el chile verde en el periodo evaluado varió de 0.30 a 2.14 kg·m⁻³. Este rango contempla la productividad reportada para el 2006 en el acuífero Aguanaval (2.09 kg·m⁻³), el cual se encuentra al noroeste del acuífero Calera (IGH, 2010).

Maíz para grano

Este fue el único cultivo que tiende a disminuir su superficie sembrada a través del tiempo; sin embargo, fue el cuarto cultivo en cuanto a superficie ocupada, con el 8.13 % del total de la superficie de riego. La eficiencia del uso del agua en el cultivo de maíz para grano dio como resultado un valor de 1.12 a 1.7 kg·m⁻³; esta productividad se encuentra dentro del rango reportado en 27 publicaciones de 10 países de 4 continentes (de 1.1 a 2.7 kg·m⁻³) (Zwart & Bastiaanssen, 2004). En este cultivo, la productividad física del agua mejoró, pues pasó de 0.48 kg·m⁻³ en 2006 (IGH, 2011b) a un rango de 1.12 a 1.7 kg·m⁻³ en el periodo de 2007 a 2017.

Varios estudios realizados en China muestran que el riego deficitario regulado disminuye el consumo de agua por el cultivo sin una caída aparente del rendimiento, lo que mejora la eficiencia de uso del agua. En el maíz, la aplicación de esta tecnología de riego aumentó, en promedio, 17 % la productividad del agua y disminuyó el rendimiento por hectárea en un 4 % (Shaozhong et al., 2017).

Frijol

La productividad física del frijol resultó de 0.12 a 0.41 kg·m⁻³, valor que coincidió con el reportado por Ríos-Flores, Torres-Moreno, Torres-Moreno, y Cantú-Brito (2017b) de 0.13 kg·m⁻³ en el municipio de Calera, Zacatecas, y el de 0.32 kg·m⁻³ calculado con base en información del *Plan de Manejo del Acuífero Calera* (IGH, 2011b).

En este cultivo también se han realizado investigaciones sobre el impacto en la productividad del agua al aplicar riego deficitario. De acuerdo con Boydston, Porter, Chaves-Córdoba, Khot, y Miklas (2018), esta modalidad de riego aplicada un mes después de la emergencia, y con prácticas agrícolas convencionales, redujo el rendimiento del frijol en un 46 a 48 % en su investigación realizada en el estado de Washington, EUA, por lo que sugirieron combinar el riego deficitario con laboreo en bandas (práctica agrícola de conservación) para mejorar

Table 5. Total production and electricity costs (MXN-ha⁻¹) per crop in 2017.**Cuadro 5. Costos de producción total y de energía eléctrica (MXN-ha⁻¹) por cultivo en 2017.**

Crop/Cultivo	With subsidy/Con subsidio				Without subsidy/Sin subsidio	
	SAGARPA (2018b)		9-CU rate/Tarifa 9-CU		9 rate/Tarifa 9	
	Electricity/ Energía eléctrica	Total	Electricity/ Energía eléctrica	Total	Electricity/ Energía eléctrica	Total
Garlic/Ajo	7528	90615	2986	86073	48277	131364
Green alfalfa/Alfalfa verde	3170 ^z	11649	4106	12585	66381	77713
Onion/Cebolla	2457	47689	2613	47845	42242	87471
Green pepper/Chile verde	4279	26230	2239	24190	36208	58158
Dry bean/Frijol	1585	11158	1866	11439	30173	39746
Corn for grain/Maíz para grano	2774	13876	1866	12968	30173	41275

Costs are in constant Mexican pesos in the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zValue calculated based on reported monthly expenses. Source: Author-made with data from the *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018) and the *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Los costos son en pesos mexicanos constantes en el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zValor calculado con base en gastos mensuales reportados. Fuente: Elaboración propia con datos de la *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018) y la *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Based on data provided by SAGARPA (2018b), it was observed that, on average, 15 % of production costs were allocated to the electricity used in pumping water for irrigation; however, if the 9-CU rate subsidy did not exist, an average of 63.5 % of total costs would be allocated to the payment of electricity. In this way, alfalfa, garlic and onion would allocate up to 85, 37 and 48 % of the total costs for this item, respectively.

Institutions such as the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), the World Bank, the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and SAGARPA agree that subsidizing electricity for pumping water for agricultural irrigation is a program that has negative effects, since it promotes incentives for inefficient production and damages the environment (Moreno-Vázquez et al., 2010), making it a determining factor in the depletion of aquifers (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2012).

This study estimated a total subsidy, approximate to the cost of electricity of 338.6 million pesos in 2017 (Table 6), which grows exponentially compared to the linear growth of the 9-CU and 9-N rates (Figure 3).

Green pepper and alfalfa were the crops that received the greatest benefit, the first due to the area it occupied, and the second due to the amount of irrigation required. According to SEMARNAT (2012), the subsidy for agricultural pumping is inequitable at the national level, since while 10 % of the largest users receive 409 thousand pesos per year, 20 % of the smallest irrigation units receive 113 pesos per

los resultados. Satriani, Catalano, y Scalcione (2018), en un estudio realizado al sur de Italia, demostraron que la combinación del riego deficitario con la aplicación de polímeros súper absorbentes biodegradables maximiza el índice de productividad de agua del cultivo.

Costos de producción con y sin subsidio

El cultivo de ajo tuvo el mayor costo de producción (Cuadro 5) debido a las labores culturales que se le realizan, así como a la cantidad de fertilizantes, insecticidas y fungicidas que demanda. Por el contrario, el frijol resultó ser el cultivo de menor costo por hectárea, lo que puede incidir en que sea el cultivo con mayor superficie en el área de estudio, además de la costumbre como lo señala Vélez et al. (2013).

Con base en los datos proporcionados por la SAGARPA (2018b), se observó que, en promedio, el 15 % de los costos de producción fueron destinados a la energía eléctrica usada en el bombeo de agua para riego; sin embargo, si no existiera el subsidio tarifa 9-CU se destinaría, en promedio, un 63.5 % de los costos totales al pago de energía eléctrica. De esta forma, la alfalfa el ajo y la cebolla, asignarían hasta 85, 37 y 48 % de los costos totales para tal concepto, respectivamente.

Instituciones como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), el Banco Mundial, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) y la SAGARPA coinciden en que el subsidio a la energía eléctrica para el bombeo de agua para riego agrícola es un programa que tiene efectos negativos, ya que promueve

Table 6. Electricity costs and subsidy per crop in 2017.**Cuadro 6. Costos de la energía eléctrica y subsidio por cultivo en 2017.**

Crop/Cultivo	Planted area (ha)/ Superficie sembrada (ha)	Electricity cost (MXN) ¹ / Costo de energía eléctrica (MXN) ¹		Subsidy (MXN)/ Subsidio (MXN)
		9 rate/Tarifa 9	9-CU rate/Tarifa 9-CU	
Garlic/Ajo	773.00	37318131.71	2308157.53	35009974.18
Green alfalfa/Alfalfa verde	925.00	61402326.99	3797785.06	57604541.92
Onion/Cebolla	600.00	25345432.27	1567636.09	23777796.18
Green pepper/Chile verde	4442.00	160834871.64	9947770.77	150887100.87
Dry bean/Frijol	1660.00	50087401.87	3097947.52	46989454.34
Corn for grain/Maíz para grano	860.00	25948894.95	1604960.77	24343934.18
Total	9260.00			338612801.67

¹Costs are in constant Mexican pesos in the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). Source: Author-made based on data from the *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018).

¹Los costos son en pesos mexicanos constantes en el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018).

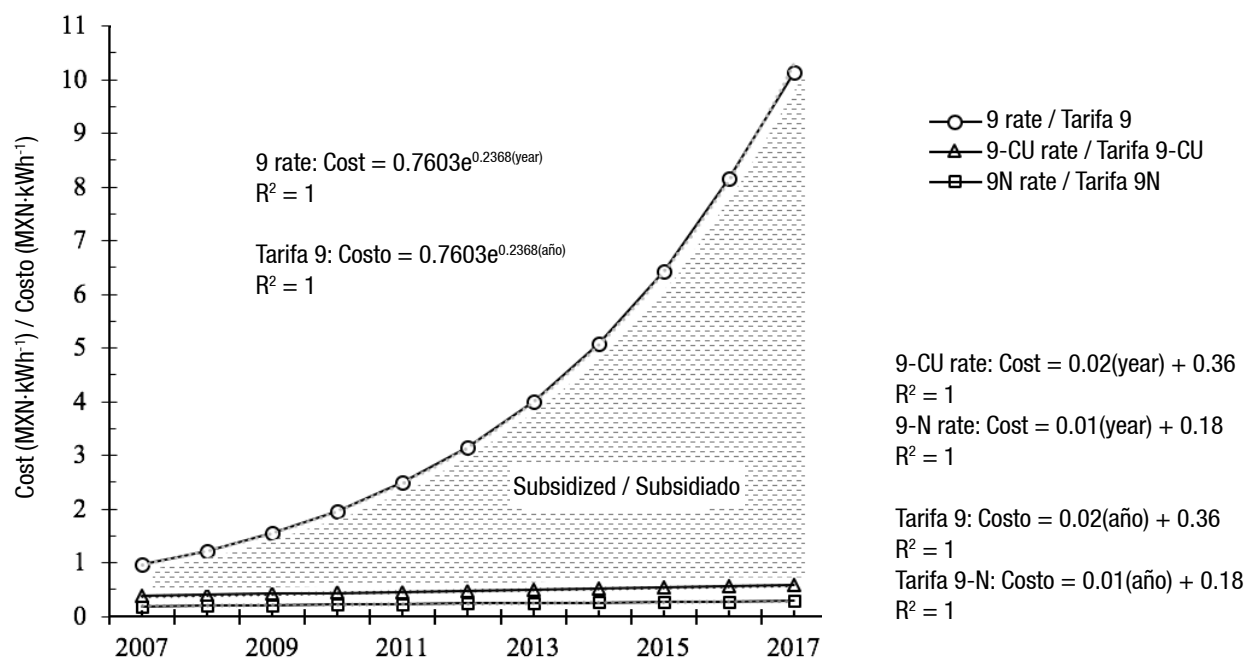


Figure 3. Behavior of electricity rates. Source: Author-made based on data from the *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018).

Figura 3. Comportamiento de las tarifas de energía eléctrica. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018).

year. In other words, this subsidy benefits the richest farmers, and it is to be assumed that something similar happens in the study area, since green pepper was the most benefited crop, and at the same time the one with the greatest investment per total occupied area, which indicates that the producers of this crop have greater economic resources and are favored more with the subsidy.

incentivos a la producción ineficiente y daña al medio ambiente (Moreno-Vázquez et al., 2010), convirtiéndolo en un factor determinante en la sobreexplotación de acuíferos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2012).

En este estudio se estimó un subsidio total, aproximado al costo de la energía eléctrica de 338.6 millones de

Economic water productivity

Gross economic productivity showed growth across all crops (Figure 4).

Without considering production costs, economic productivity was high in 2017 (Table 7), compared to the values obtained with energy subsidies (Table 8). The vegetable group had higher gross and net economic productivity, with and without electricity subsidies.

pesos en 2017 (Cuadro 6), mismo que crece de manera exponencial frente al crecimiento lineal de la tarifa 9-CU y tarifa 9-N (Figura 3).

El chile verde y la alfalfa fueron los cultivos que recibieron mayor beneficio; el primero debido a la superficie que ocupó, y el segundo por la lámina de riego que demandó. Según la SEMARNAT (2012), el subsidio por el bombeo agrícola es inequitativo a nivel nacional, ya que mientras el 10 % de los usuarios

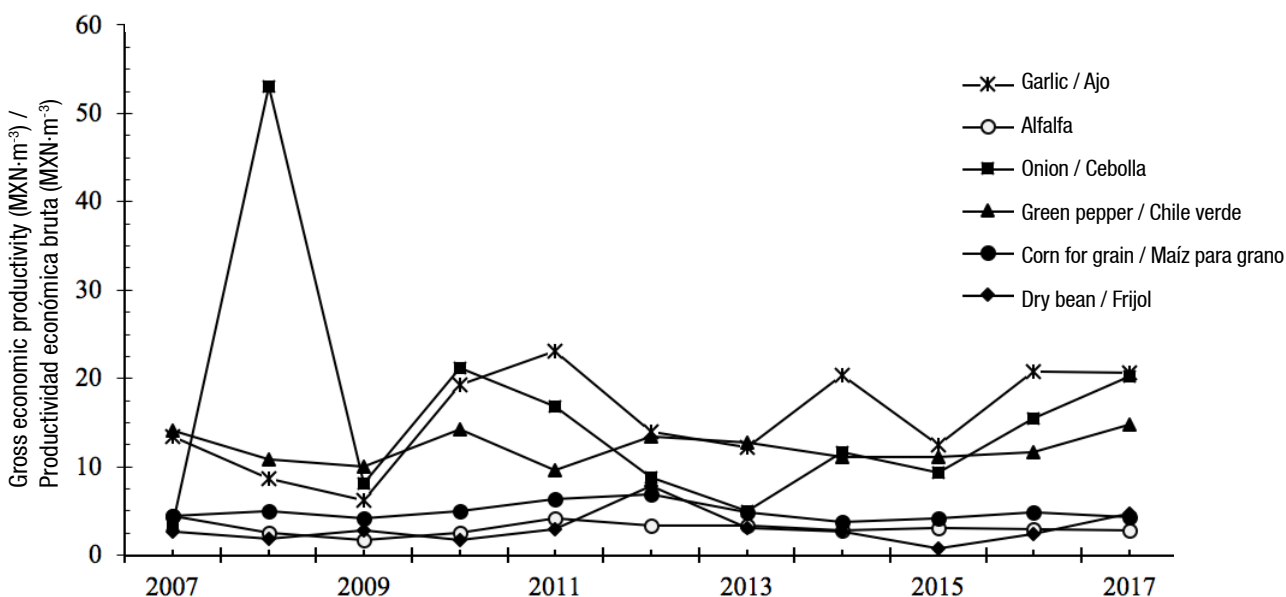


Figure 4. Gross economic productivity of the 2007-2017 period. Source: Author-made based on data from the Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

Figura 4. Productividad económica bruta del periodo 2007-2017. Fuente: Elaboración propia con base en datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

Table 7. Gross economic water productivity in 2017.

Cuadro 7. Productividad económica bruta del agua en 2017.

Crop/Cultivo	Volume used (hm ³)/ Volumen utilizado (hm ³)	Production volume (t)/ Volumen de producción (t)	Production value (MXN)/ Valor de la producción (MXN)	Gross economic productivity (MXN·m ⁻³)/ Productividad económica bruta (MXN·m ⁻³)
Garlic/Ajo	6.18	11 260.60	127 376 711.80	20.60
Alfalfa ²	10.18	17 682.07	28 797 819.57	2.83
Onion/Cebolla	4.20	24 050.00	84 976 040.46	20.23
Green pepper/Chile verde	26.65	42 237.20	392 975 700.90	14.74
Dry bean/Frijol	8.30	3 187.90	38 825 914.55	4.68
Corn for grain/Maíz para grano	4.30	7 016.55	18 559 367.82	4.32

Mexican pesos (MXN) are constant in the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ²The production volume was considered in dry product at 20 % moisture. Source: Author-made based on data from the National Water Commission (CONAGUA, 2018) and the Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

Los pesos mexicanos (MXN) son constantes en el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ²El volumen de producción se consideró en producto seco al 20 % de humedad. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018) y el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

This group had positive unsubsidized productivity, while alfalfa, corn and dry bean had negative productivity (Table 9).

IGH (2011b), when evaluating the Calera aquifer with production cost values of the 2005-2006 cycle, found that the economic productivity of the garlic, green pepper and corn crops was 3.35, 3.28 and 0.35 MXN·m⁻³, respectively, while Pedroza-Sandoval et al. (2014), in the Lagunera region, obtained for alfalfa an economic

más grandes reciben 409 mil pesos anuales, el 20 % de las unidades de riego más pequeñas reciben 113 pesos al año. Es decir, este subsidio beneficia a los agricultores más ricos, y es de suponer que en el área de estudio pase algo similar, pues el chile verde fue el cultivo más beneficiado, y al mismo tiempo el de mayor inversión por superficie total ocupada, lo que indica que los productores de este cultivo tienen mayores recursos económicos y se favorecen más con el subsidio.

Table 8. Net economic productivity of water with subsidy per crop in 2017.

Cuadro 8. Productividad económica neta del agua con subsidio por cultivo en 2017.

Crop/Cultivo	Volume used (m ³ ·ha ⁻¹)/ Volumen utilizado (m ³ ·ha ⁻¹)	Production cost (MXN·ha ⁻¹)/ Costo de producción (MXN·ha ⁻¹)	Production value (MXN·ha ⁻¹)/ Valor de la producción (MXN·ha ⁻¹)	Profit (MXN·ha ⁻¹)/ Utilidad (MXN·ha ⁻¹)	Net economic productivity (MXN·m ⁻³)/ Productividad económica neta (MXN·m ⁻³)
Garlic/Ajo	8000	90615.30	164782.29	74166.99	9.27
Alfalfa ^z	11000	11648.84	31132.78	19483.94	1.77
Onion/Cebolla	7000	47688.93	141626.73	93937.81	13.42
Green pepper/Chile verde	6000	26229.70	88468.19	62238.49	10.37
Dry bean/Frijol	5000	11157.53	23389.11	12231.58	2.45
Corn for grain/Maíz para grano	5000	13875.59	21580.66	7705.07	1.54

Mexican pesos (MXN) are constant in the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zThe production volume was considered in dry product at 20 % moisture. Source: Author-made based on data from the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) and the *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Los pesos mexicanos (MXN) son constantes en el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zEl volumen de producción se consideró en producto seco al 20 % de humedad. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) y la *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Table 9. Net economic productivity of water without subsidy per crop in 2017.

Cuadro 9. Productividad económica neta del agua sin subsidio por cultivo en 2017.

Crop/Cultivo	Volume used (m ³ ·ha ⁻¹)/ Volumen utilizado (m ³ ·ha ⁻¹)	Production cost (MXN·ha ⁻¹)/ Costo de producción (MXN·ha ⁻¹)	Production value (MXN·ha ⁻¹)/ Valor de la producción (MXN·ha ⁻¹)	Net profit (MXN·ha ⁻¹)/ Utilidad neta (MXN·ha ⁻¹)	Net economic productivity (MXN·m ⁻³)/ Productividad económica neta (MXN·m ⁻³)
Garlic/Ajo	8000	131364.15	164782.29	33418.14	4.18
Alfalfa ^z	11000	77712.76	31132.78	-46579.98	-4.238
Onion/Cebolla	7000	87470.79	141626.73	54155.94	7.74
Green pepper/Chile verde	6000	58158.30	88468.19	30309.89	5.05
Dry bean/Frijol	5000	39745.79	23389.10	-16356.68	-3.27
Corn for grain/Maíz para grano	5000	41275.19	21580.66	-19694.53	-3.94

Mexican pesos (MXN) are constant in the June 2012 base period = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zProduction volume was considered in dry product at 20 % moisture. Source: Author-made based on data from the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) and the *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Los pesos mexicanos (MXN) son constantes en el periodo base junio 2012 = 100 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). ^zEl volumen de producción se consideró en producto seco al 20 % de humedad. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018) y la *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

productivity level of $0.90 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$. On the other hand, Ríos-Flores et al. (2017b) reported productivity of $3.27 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$ in dry bean in the municipality of Calera, Zacatecas, and of $10.84 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$ in onion in Delicias, Chihuahua (Ríos-Flores et al., 2017a), both 2015 crops. These values differ, for the most part, from the results obtained in this work (Table 8), which was to be expected because there are external factors that can directly influence the economic productivity of water, such as market access, market prices, change in the cost of inputs (fertilizers, insecticides and seed, among others), product demand and supply, and positioning in the international market (such as the vegetable group), among others. For this reason, the values most similar to those determined for 2017 belong to more recent studies, such as the case of dry bean and onion.

Production values were analyzed per hectare because many small producers do not seek to maximize profits, as is the case with business-type producers, but rather consider the total value entered at the end of the cycle. Alfalfa and dry bean are a good example of such a situation, since per hectare alfalfa had a higher yield than dry bean; however, in the latter, more profits were obtained per unit of water used (Table 9). If water were paid for, the real cost would mean that alfalfa would have a lower value in the cost-benefit ratio indicator (which would be -0.6) compared to other crops, and a lower profit per unit of water used.

Productividad económica del agua

La productividad económica bruta presentó crecimiento en todos los cultivos (Figura 4).

Sin considerar los costos de producción, la productividad económica fue elevada en 2017 (Cuadro 7), en comparación con los valores obtenidos con subsidio a la energía (Cuadro 8). El grupo de hortalizas tuvo mayor productividad económica bruta y neta, con y sin subsidio a la energía eléctrica. Dicho grupo presentó una productividad sin subsidio positiva, mientras que la alfalfa, el maíz y el frijol tuvieron una productividad negativa (Cuadro 9).

IGH (2011b), al evaluar el acuífero Calera con valores de costos de producción del ciclo 2005-2006, encontraron que la productividad económica de los cultivos ajo, chile verde y maíz fue de 3.35 , 3.28 y $0.35 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente; mientras que Pedroza-Sandoval et al. (2014), en la región Lagunera, obtuvieron una productividad económica de $0.90 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$ para la alfalfa. Por su parte, Ríos-Flores et al. (2017b) reportaron una productividad de $3.27 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$ en frijol en el municipio de Calera, Zacatecas, y de $10.84 \text{ MXN}\cdot\text{m}^{-3}$ en cebolla en Delicias, Chihuahua (Ríos-Flores et al., 2017a), ambos cultivos en 2015. Dichos valores difieren, en su mayoría, de los resultados obtenidos en este trabajo (Cuadro 8), lo que era de esperarse debido a que existen

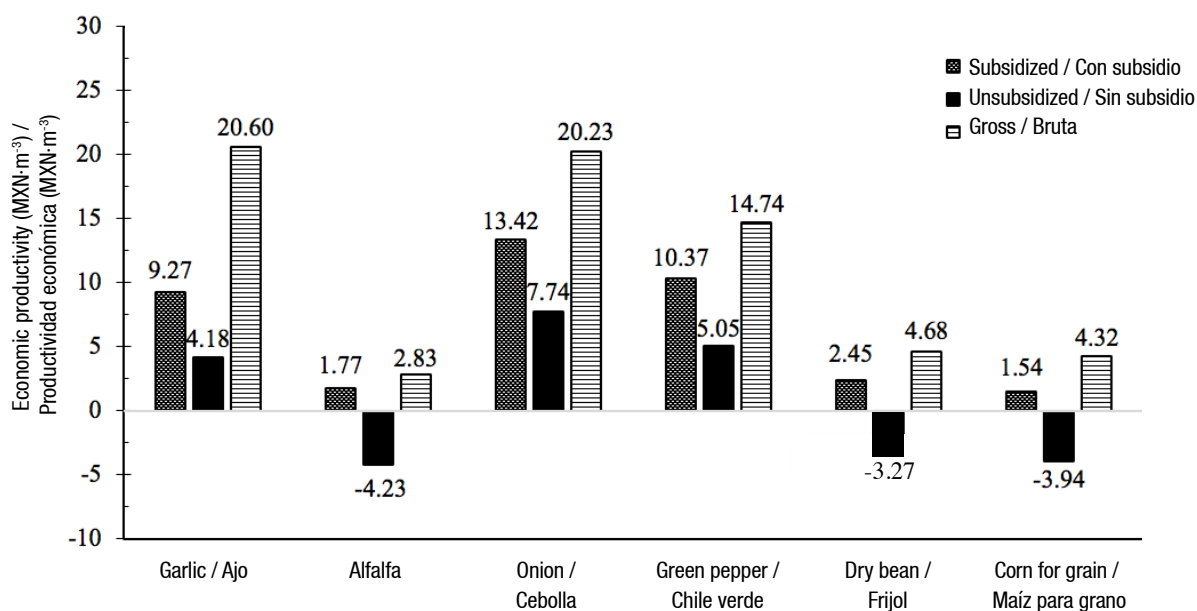


Figure 5. Gross and net economic water productivity, with and without electricity subsidies, in 2017. Source: Author-made based on data from the *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018), the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018), the *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2018) and the *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Figura 5. Productividad económica del agua bruta y neta, con y sin subsidio a la energía eléctrica, en 2017. Fuente: Elaboración propia con base en datos de la *Comisión Federal de Electricidad* (CFE, 2018), la *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA, 2018), el *Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera* (SIAP, 2018) y la *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA, 2018b).

Without the electricity subsidy, economic productivity was reduced in all crops, even becoming negative for alfalfa, dry bean and corn (Figure 5). The first was the least sustainable, since it was neither economically viable nor environmentally supportable, while corn and dry bean were less economically favored compared to the vegetable group.

Conclusions

In the central-southern zone of the Calera aquifer, crops are produced that have low water use efficiency, which negatively and significantly impacts the aquifer.

Dry bean, corn and alfalfa had lower physical and economic productivity. Alfalfa was less sustainable because of the amount of water it demands and the amount subsidized, without which it would be the least profitable crop.

The application of deficit irrigation, drip irrigation and agricultural conservation practices has resulted in increased water productivity in other studies.

Acknowledgments

The authors are grateful for the information provided by the Local Zacatecas Management Office of the *Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA), in particular Engineer Rafael Guardado Pérez, for the information provided, and the Zacatecas State Branch Office of the *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* (SAGARPA), especially Engineer Guillermo Librero González.

End of English version

References / Referencias

- Ávila, S., Muñoz, C., Jaramillo, L., & Martínez, A. (2005). Un análisis del subsidio a la tarifa 09. *Gaceta ecológica*, 75, 65-76. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2879650>
- Bessembinder, J. J. E., Leffelaar, P. A., Dhindwal, A. S., & Ponsioen, T. C. (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management*, 73(2), 113-130. doi: 10.1016/j.agwat.2004.10.004
- Boydston, R. A., Porter, L. D., Chaves-Córdoba, B., Khot, L. R., & Miklas, P. N. (2018). The impact of tillage on pinto bean cultivar response to drought induced by deficit irrigation. *Soil and Tillage Research*, 180, 63-72. doi: 10.1016/j.still.2018.02.011
- Bravo, A. (2008). *Ajo. Eficiencia y productividad. Metodología de riego por goteo y fertirrigación*. México: Instituto

factores externos que pueden influir directamente en la productividad económica del agua, como acceso al mercado, precios en el mercado, cambio en el costo de insumos (fertilizantes, insecticidas y semilla, entre otros), demanda y oferta del producto, posicionamiento en el mercado internacional (como el grupo de las hortalizas), entre otros. Por ello, los valores más parecidos a los determinados para 2017 pertenecen a estudios más recientes, como el caso del frijol y la cebolla.

Los valores de la producción se analizaron por hectárea debido a que muchos pequeños productores no buscan maximizar los beneficios, como ocurre con el productor de tipo empresarial, sino que consideran el valor total ingresado al final del ciclo. La alfalfa y el frijol son un buen ejemplo de tal situación, ya que por hectárea la alfalfa tuvo mayor producción que el frijol; sin embargo, en este último se obtuvieron más beneficios por unidad de agua utilizada (Cuadro 9). Si se pagara el agua, el costo real haría que la alfalfa tuviera un valor menor en el indicador relación beneficio costo (el cual sería de -0.6) frente a los otros cultivos, y menor beneficio por unidad de agua utilizada.

Sin el subsidio a la energía eléctrica, la productividad económica se redujo en todos los cultivos, incluso resultó negativa para la alfalfa, el frijol y el maíz (Figura 5). El primero de ellos fue el menos sustentable, ya que no resultó económicamente viable ni ambientalmente soportable, mientras que el maíz y el frijol resultaron menos favorecidos económicamente en comparación con el grupo de las hortalizas.

Conclusiones

En la zona centro-sur del acuífero Calera se producen cultivos que tienen baja eficiencia en el uso de agua, lo que impacta de manera negativa y significativa al acuífero.

El frijol, el maíz y la alfalfa tuvieron menor productividad física y económica. La alfalfa resultó menos sustentable por la cantidad de agua que demanda y el monto subsidiado, que sin él sería el cultivo menos rentable.

La aplicación de riego deficitario, riego por goteo y prácticas agrícolas de conservación han demostrado el aumento de la productividad del agua en otros estudios.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Dirección Local de Zacatecas, en particular al Ing. Rafael Guardado Pérez, por la información proporcionada, y a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) De-

- Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Retrieved from http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/2292/Ajo_metodologia_de_riego_por_goteo_y_fertirrigacion_en_ajo.pdf?sequence=1
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2018). *Tarifa 9-CU y tarifa 9-N*. México: Author. Retrieved from https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=9&Anio=2018&mes=11
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Calera (3225), estado de Zacatecas*. México: Author. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104533/DR_3225.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). *Ley Federal de Derechos (disposiciones aplicables en Materia de Aguas nacionales 2016)*. México: Author. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105138/Ley_Federal_de_Derechos.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y CONAGUA. Retrieved from http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Láminas de riego para los cultivos: ajo, alfalfa, cebolla, chile verde, maíz para grano y frijol para la zona de Calera, Zacatecas*. México: Author.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2007). *Acuerdo que autoriza el ajuste a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica 9-CU y 9-N*. México: Author. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5011095&fecha=21/12/2007
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-2015, Eficiencia energética electromecánica en sistemas de bombeo para pozo profundo en operación. Límites y método de prueba*. México: Author. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5393140&fecha=21/05/2015
- González-Robaina, F., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., & Cid-Lazo, G. (2014). Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4), 21-27. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000400004
- Ingeniería y gestión hídrica, S.C. (IGH). (2010). *Plan de manejo integral de los acuíferos Calera, Chupaderos y Aguanaval, estado de Zacatecas*. México: Comisión Nacional del Agua. Retrieved from <http://www.igh.com.mx/acc/Info/CapituloI-2.pdf>
- Ingeniería y gestión hídrica, S.C. (IGH). (2011a). *Plan de manejo integral del acuífero Calera, Zacatecas*. México: Comisión Nacional del Agua, Dirección Local de Zacatecas.
- Ingeniería y gestión hídrica, S.C. (IGH). (2011b). *Plan de manejo integral de los acuíferos Calera, Chupaderos y Aguanaval, estado de Zacatecas*. México: Comisión Nacional del Agua, Dirección Local de Zacatecas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Encuesta intercensal 2015*. México: Author. Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Producto Interno Bruto, entidad federativa, anual*. México: Author. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/pibe/default.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Índice Nacional de Precios Productor (INPP)*. México: Author. Retrieved from https://www.inegi.org.mx/programas/inpp/2018/default.html#Datos_abiertos
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2000). *Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México*. México: Author.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., & Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. (Eds.), *Water productivity in agriculture, limits and opportunities for improvement* (pp. 1-18). Colombo, Sri Lanka: CABI Publishing - International Water Management Institute. doi: 10.1079/9780851996691.0000
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P. A., Hanjra, M., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535. doi: 10.1016/j.agwat.2009.03.023
- Moreno-Vázquez, J. L., Marañón-Pimentel, B., & López-Córdova, D. (2010). Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social. In: Jiménez-Cisneros, B., Torregrosa-Armenta, M. L., & Aboites-Aguilar, L. (Eds.), *El agua en México: Cauces y encauces* (pp. 79-115). México: Academia Mexicana de Ciencias. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Managing systems at risk*. New York, USA: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>
- Oswald-Spring, U. (2011). *Retos de la investigación del agua en México*. México: Universidad Autónoma de México. Retrieved from <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/06/retos-de-la-investigacion-C3%B3n-del-agua-en-mexico.pdf>
- Pedroza-Sandoval, A., Ríos-Flores, J. L., Torres-Moreno, M., Cantú-Brito, J. E., Piceno-Sagarnaga, C., & Yáñez-Chávez, L. G. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*): impacto social y económico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 231-239. Retrieved from <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/issue/view/5>

Fin de la versión en español

- Quiroga-Garza, H. M., & Faz-Contreras, R. (2008). Incremento de la eficiencia en el uso del agua por la alfalfa mediante la suspensión de riegos en el verano. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 111-117. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313046003>
- Ríos-Flores, J. L., Torres-Moreno, M., Castro-Franco, R., Torres-Moreno, M. A., & Ruiz-Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 93-107. Retrieved from <http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/2015-01/R%C3%ADos%20Flores.pdf>
- Ríos-Flores, J. L., Jacinto-Soto, R., Torres-Moreno, M. A., & Torres-Moreno, M. (2017a). *Huella hídrica del cultivo de cebolla producida en el DR005, Delicias, Chihuahua*. México: Universidad Autónoma Chapingo. Retrieved from https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Economía%20y%20Agronomía%20T-I/HCEA_TI_2.pdf
- Ríos-Flores, J. L., Torres-Moreno, M., Torres-Moreno, M. A., & Cantú-Brito, J. (2017b). Eficiencia y productividad del cultivo de frijol en un sistema de riego por bombeo en Zacatecas, México. *CIENCIA ergo-sum*, 24(2), 152-163. doi: 10.30878/ces.v24n2a7
- Satriani, A., Catalano, M., & Scalcione, E. (2018). The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 195, 114-119. doi: 10.1016/j.agwat.2017.10.008
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2018a). *Programa especial de energía para el campo en materia de energía eléctrica de uso agrícola*. México: Author.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Delegación Estatal Zacatecas. (2018b). *Costos de producción de los cultivos ajo, alfalfa, cebolla, chile verde, maíz para grano y frijol en modalidad de riego para la zona de Calera, Zac., para el ciclo agrícola 2017-2018*. México: Author.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). *El análisis del subsidio a la tarifa eléctrica para la agricultura*. México: Author. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168166/El_analisis_del_subsidio_a_la_tarifa_electrica_t09.pdf
- Shaozhong, K., Xinmei, H., Taisheng, D., Ling, T., Xiaoling, S., Hongna, L., Xiaolin, L., Zailin, H., Sien, L., & Risheng, D. (2017). Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. *Agricultural Water Management*, 179, 5-17. doi: 10.1016/j.agwat.2016.05.007
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). *Estadística de la producción agrícola para el periodo 2007-2017*. México: Author. Retrieved from <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Vélez, A., Padilla, L. E., & Mojarro, F. (2013). *Estudio socio económico de los productores agrícolas y la sobreexplotación*. México: Universidad Autónoma de Zacatecas y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Dirección Local de Zacatecas.
- Wakchaure, G., Minhas, P., Kamlesh, K., Narendra, P., Priti, M., & Ajay, M. (2018). Growth, bulb yield, water productivity and quality of onion (*Allium cepa* L.) as affected by deficit irrigation regimes and exogenous application of plant bio-regulators. *Agricultural Water Management*, 199, 1-10. doi: 10.1016/j.agwat.2017.11.026
- Zwart, S., & Bastiaanssen, W. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133. doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.007