

# Energy consumption in the management of avocado orchards in Michoacán, Mexico

## Consumo de energía en el manejo de huertas de aguacate en Michoacán, México

Carlos A. Anaya\*; Ana Laura Burgos

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, C.P. 58190, MÉXICO. Correo-e: carlosanaya.m@gmail.com, tel.: (443) 322 27 77 ext. 42557 (\*Autor para correspondencia).

### Abstract

Efficient fossil energy consumption in agricultural systems is a prerequisite for sustainable agricultural production. Fossil energy consumption (EC) in avocado orchard production in Michoacán, Mexico was analyzed. Process analysis was used to estimate both direct and indirect energy required for the various agricultural operations. Data on fuel and inputs used in production were obtained from structured questionnaires completed by 455 growers. Average annual EC was 28,880 MJ·ha<sup>-1</sup>, but the data ranged between 5,330 and 76,531 MJ·ha<sup>-1</sup>, indicating the co-existence of a great diversity of farming systems. EC in agricultural operations decreased in the following order: fertilization (54.4 %), pest control (39.9 %), weed control (5.6 %) and irrigation (0.2 %). EC in fertilization was positively associated with the economic resources of the growers; and according to recognized fertilization standards, nitrogen fertilizer was applied excessively in 64 % of the orchards. EC in pest control was in the high range reported for fruit-tree crops and, on average, it was 41 % higher in exporting orchards than in those that produce only for the domestic market. EC in avocado production can be significantly reduced by improving fertilization and pest control practices, especially among large- and medium-sized growers.

**Keywords:** *Persea americana* Mill., crop management, energy use, environmental indicators, fertilization, pest control.

### Resumen

El consumo eficiente de energía fósil, en los sistemas agrícolas, es prerequisite de sostenibilidad de la producción. Se analizó el consumo de energía fósil (CE) en la producción de aguacate en huertas de Michoacán, México. La energía directa e indirecta consumida en varias operaciones agronómicas fue estimada mediante análisis de procesos. Se obtuvieron datos de combustibles e insumos usados en la producción a través de cuestionarios realizados a 455 productores. El promedio anual del CE fue 28,880 MJ·ha<sup>-1</sup>, pero los valores variaron entre 5,330 y 76,531 MJ·ha<sup>-1</sup>, indicando la coexistencia de gran diversidad de modos de producción. El CE en las operaciones agronómicas decreció en el siguiente orden: fertilización (54.4 %), control de plagas (39.9 %), control de hierbas (5.6 %) y riego (0.2 %). El CE en la fertilización fue positivamente asociado con los recursos económicos de los productores; y de acuerdo con estándares de fertilización reconocidos, pudo haber un exceso en la fertilización con nitrógeno en 64 % de las huertas. El CE en el control de plagas estuvo entre los valores más altos reportados en cultivos de árboles frutales y, en promedio, fue 41 % mayor en huertas de exportación que en aquellas que producen sólo para mercado nacional. El CE en la producción de aguacate puede reducirse significativamente mejorando las prácticas de fertilización y control de plagas, especialmente entre los productores grandes y medianos.

**Palabras clave:** *Persea americana* Mill., indicadores ambientales, manejo agrícola, fertilización, control de plagas, uso de energía.



## Introduction

The cultivation of avocado (*Persea americana* Mill.) has shown marked growth in Mexico over the past two decades, as a result of the North American Free Trade Agreement and its growing acceptance in Japan and Europe (Echánove Huacuja, 2008). This expansion has been evident in the state of Michoacán, ranked as the world leader in avocado production with a cultivated area of 153,000 ha and total production of 1.1 million Mg·year<sup>-1</sup> (Morales-Manilla & Cuevas-García, 2011; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2013). Similarly, the number of avocado growers in the state has increased dramatically, from 16,150 registered producers in 2007 (Comisión Michoacana del Aguacate [COMA], 2007) to 22,000 estimated for 2012. The market entry of new producers with different degrees of knowledge about growing avocado, occupying new lands with climate and soil not optimal for this purpose, has created a patchwork of orchards with different biophysical conditions and modes of agricultural management. While the expansion of the avocado industry has undoubtedly boosted the regional economy and created jobs, its effects on the environment have created concern in government agencies, producer associations, academic circles, the media and the general public (Barsimantov & Navia Antezana, 2012; Chávez-León et al., 2012).

In the field of sustainable agriculture, an indicative component of a production system's environmental and economic performance is its fossil fuel energy consumption (EC) (Dalgaard, Halberg, & Porter, 2001; Pimentel, Berardi, & Fast, 1983). EC is directly associated with the use of agricultural inputs, production costs and greenhouse gas (GHG) emissions (Lal, 2004; Pimentel, Hepperly, Hanson, Douds, & Seidel, 2005; West & Marland, 2002). Determining EC involves standardizing and synthesizing information, which requires knowing the set of practices used in the production of an agricultural product, and the energy associated with them, including both direct energy sources (diesel fuel, gasoline and electricity), and indirect sources (i.e. use of agricultural inputs whose production and marketing required the consumption of fossil energy) (Dalgaard et al., 2001). EC analysis identifies practices with significant energy use, makes comparisons between different management modes to choose those strategies with greater efficiency, and establishes trends and variations in EC over time on different levels of agricultural organization (Jones, 1989). Because of the potential for assessing farming practices in terms of energy efficiency and reduced GHG emissions, EC quantifications have been made for different crops worldwide, including fruit-tree crops such as citrus production (Ozkan, Akcaoz, & Karadeniz, 2004), apples (Reganold, Glover, Andrews, & Hinman, 2001), and

## Introducción

El cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) ha mostrado franca expansión en México en las últimas dos décadas, como resultado de los acuerdos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte y de su creciente aceptación en Japón y Europa (Echánove Huacuja, 2008). Esta expansión ha sido evidente en el estado de Michoacán, posicionado como el líder mundial en la producción de aguacate con una superficie cultivada de 153,000 ha y producción total de 1.1 millón de Mg·año<sup>-1</sup> (Morales-Manilla & Cuevas-García, 2011; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2013). De igual modo, la cantidad de productores de aguacate en este estado ha incrementado notablemente, desde 16,150 productores empadronados en el año 2007 (Comisión Michoacana del Aguacate [COMA], 2007) hasta 22,000 estimados para el año 2012. La incorporación de nuevos productores con diferentes grados de conocimiento sobre el cultivo de aguacate, ocupando nuevos terrenos con clima y suelo no óptimos para el mismo, ha creado un mosaico de huertas con condiciones biofísicas y modos de manejo agrícola diferenciados. Si bien, la expansión de la industria aguacatera ha dinamizado de manera indudable la economía regional y la generación de empleos, sus efectos sobre el ambiente han creado preocupación en agencias gubernamentales, asociaciones de productores, sector académico, medios de comunicación y público en general (Barsimantov & Navia Antezana, 2012; Chávez-León et al., 2012).

En el ámbito de la agricultura sustentable, un componente indicativo del desempeño ambiental y económico de un sistema de producción es su consumo de energía (CE) proveniente de combustibles fósiles (Dalgaard, Halberg, & Porter, 2001; Pimentel, Berardi, & Fast, 1983). El CE está directamente asociado con el uso de insumos agrícolas, los costos de producción y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Lal, 2004; Pimentel, Hepperly, Hanson, Douds, & Seidel, 2005; West & Marland, 2002). La determinación del CE es el procedimiento de estandarización y síntesis de información, que parte de conocer el conjunto de prácticas empleadas en la producción de un producto agrícola, así como la energía asociada a éstas, incluyendo tanto fuentes de energía directas (diesel, gasolina y electricidad), como fuentes indirectas (i.e. uso de insumos agrícolas cuya producción y comercialización requirió el consumo de energía fósil) (Dalgaard et al., 2001). El análisis del CE permite identificar las prácticas con uso significativo de energía, hacer comparaciones entre diferentes modos de manejo para elegir aquellas estrategias con mayor eficiencia, establecer tendencias y variaciones del CE en el tiempo sobre diferentes niveles de organización de la agricultura (Jones, 1989). Debido al potencial para evaluar prácticas agrícolas en términos de eficiencia energética y

pear (Liu, Langer, Høgh-Jensen, & Egelyng, 2010). In these crops it has been observed, for example, that the activity requiring the most fossil energy is fertilization, followed by pest and disease control, and that EC may vary among management systems (e.g. conventional, organic and integrated).

As in other cases, knowledge of EC in avocado growing provides elements to assess its sustainability and provide notice of the need to incorporate energy conservation practices. The aim of this study was to analyze the patterns of fossil EC in the management of avocado orchards in Michoacán. Therefore, we sought to identify the most energy-demanding agricultural operations and the main factors explaining EC variability among orchards at the regional level. The analysis was guided by two working hypotheses: (1) given the great heterogeneity of avocado producers and biophysical production conditions in Michoacán, it is to be expected that EC will vary widely and that this is influenced by the socio-economic characteristics of the producers and the biophysical aspects of the orchards, and (2) the agricultural activity with the highest EC in avocado orchard management will be fertilization as has been observed in other fruit-tree crops; however, given the increasing incidence of pests, diseases, and export demands, phytosanitary control is also expected to have high EC.

## Materials and methods

### Study area

The study was conducted in the avocado-producing region of Michoacán, Mexico, encompassing a transverse strip between the counties of Cotija to the west and Tuxpan to the east, between 1,400 and 2,200 m above sea level, along the 19° N parallel and between

reducción de emisión de GEI, cuantificaciones de CE se han realizado para diferentes cultivos del mundo, incluyendo cultivos frutícolas como la producción de cítricos (Ozkan, Akcaoz, & Karadeniz, 2004), manzanas (Reganold, Glover, Andrews, & Hinman, 2001), y pera (Liu, Langer, Høgh-Jensen, & Egelyng, 2010). En estos cultivos se ha observado, por ejemplo, que la actividad más demandante de energía fósil es la fertilización, seguida del control de plagas y enfermedades, además que el CE puede variar entre sistemas de manejo (e.g. convencional, orgánico e integrado).

Como en otros casos, el conocimiento del CE en el cultivo de aguacate brinda elementos para evaluar su sostenibilidad y alertar sobre la necesidad de incorporar prácticas conservativas. El objetivo de este trabajo fue analizar los patrones del CE fósil en el manejo de huertas de aguacate en Michoacán. Se procedió a identificar las operaciones agronómicas más demandantes de energía y los principales factores que explican la variabilidad del CE entre huertas a nivel regional. El análisis fue guiado por dos hipótesis de trabajo: (1) dada la gran heterogeneidad de productores de aguacate y de condiciones biofísicas de producción en Michoacán, se espera que el CE tenga variación amplia y que ésta sea influenciada por características socioeconómicas de los productores y por aspectos biofísicos de las huertas, y (2) la actividad agronómica con mayor CE en el manejo del huerto de aguacate será la fertilización como ha sido observado en otros cultivos de frutales; no obstante, dada la creciente incidencia de plagas, enfermedades, y las presiones para la exportación, también se espera que haya alto CE en el control fitosanitario.

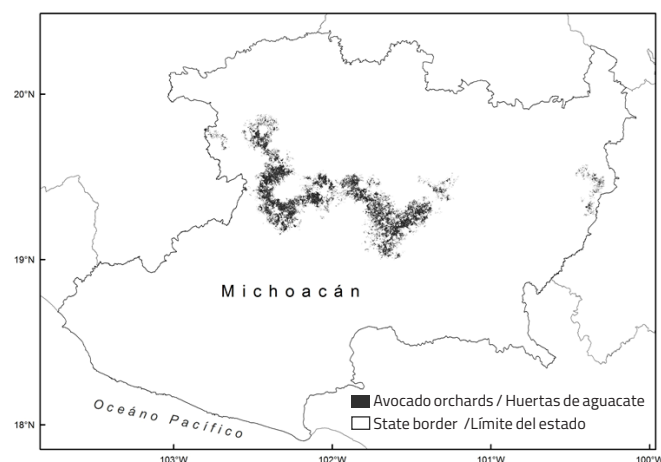
## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en la región productora de aguacate del estado de Michoacán, México, la cual abarca una franja transversal entre los municipios de Cotija al oeste y Tuxpan al este, entre los 1,400 y 2,200 m de altitud, a lo largo del paralelo 19° N y entre los meridianos 100° a 103° O (Figura 1). Esta área presenta climas templado sub-húmedo del tipo C(w2), y tropical sub-húmedo ((A) C(w1) y (A)C(w2)), con precipitaciones anuales de entre 800 a 1,700 mm concentradas entre mayo y octubre, temperaturas máxima y mínima mensuales de 27 y 12 °C, respectivamente (Gutiérrez-Contreras, Lara-Chávez, Guillén-Andrade, & Chávez-Bárceñas, 2010).

### Levantamiento de datos sobre el manejo de huertas

La obtención de datos se realizó mediante encuestas directas. Éstas consistieron en la aplicación de un cuestionario estructurado para una muestra aleatoria de productores que realizan operaciones agronómicas en huertas mayores a ocho años de edad, excluyendo



**Figure 1. Location of the avocado-growing region in Michoacán, Mexico.**

**Figura 1. Ubicación de la región productora de aguacate en Michoacán, México.**

the 100° to 103° W meridians (Figure 1). This area has a temperate sub-humid C(w2) climate, and tropical sub-humid ((A)C(w1) and (A)C(w2)) climates, with annual rainfall ranging between 800 to 1,700 mm concentrated between May and October, and monthly high and low temperatures of 27 and 12 °C, respectively (Gutiérrez-Contreras, Lara-Chávez, Guillén-Andrade, & Chávez-Bárceñas, 2010).

### Data collection on orchard management

Data collection was done through direct surveys. These involved applying a structured questionnaire to a random sample of growers who perform agricultural operations in orchards older than eight years of age, excluding those related to harvesting and packing which are carried out by the packing industry or local merchants (Salazar-García, Zamora-Cuevas, & Vega-López, 2005). Sampling was performed in the jurisdictions of nine of the 15 Local Plant Health Boards (known by the Spanish acronym JLSV) in Michoacán. The JLSV are auxiliary bodies of the Secretariat of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries and Food (known by the Spanish acronym SAGARPA) in Mexico. Their function is to regulate the output of fruit production and oversee the application of health standards in all orchards. The JLSV participants in this study were: the Gral. Francisco J. Mújica JLSV, which serves the counties of Cotija, Tangamandapio, Tzucumbe and Tingüindin; the Oriente JLSV, which operates in six counties adjacent to the State of Mexico and the JLSV of the counties of Tacámbaro, Ario de Rosales, Uruapan, San Juan Nuevo, Tancítaro, Peribán and Los Reyes. These JLSV were selected because of their location along the avocado-growing strip (Figure 1), which allowed capturing the production methods that exist in different climatic, geographic and social contexts. It should be noted that the JLSV were instrumental in this work since they facilitated the formal approach to the growers for the application of the surveys. The questionnaire included 78 questions designed to elicit detailed information about the agricultural practices of fertilization, pest control, weed control and irrigation, including the scheduling of these practices (i.e. frequency and dates on which they are performed) and the type and quantity of inputs used in them. Questions on the characteristics of the orchard and its production, such as locality-level location, dominant relief, infrastructure, equipment, cultivated varieties, density, plantation age, average yield and sales market, were also included. No questions were asked concerning the climatic characteristics of precipitation and temperature at the orchard location, because they were obtained through the generation of isohyets and isotherms in GIS (ESRI, Inc., 2008), using for this purpose the database of the national network of meteorological stations contained in the Software ERIC III (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2013). In

aquellas relacionadas con cosecha y empaque que son realizadas por la industria empaquera o por comerciantes locales (Salazar-García, Zamora-Cuevas, & Vega-López, 2005). El muestreo se realizó en las jurisdicciones de nueve Juntas Locales de Sanidad Vegetal (JLSV), de las 15 existentes en Michoacán. Las JLSV son órganos auxiliares de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en México cuya función es regular la salida de la producción de frutos y supervisar la aplicación de normas sanitarias en todos los huertos. Las JLSV participantes en este estudio fueron: la JLSV Gral. Francisco J. Mújica que atiende a los municipios de Cotija, Tangamandapio, Tzucumbe y Tingüindin, la JLSV Oriente que actúa en seis municipios colindantes con el Estado de México y las JLSV de los municipios de Tacámbaro, Ario de Rosales, Uruapan, San Juan Nuevo, Tancítaro, Peribán y Los Reyes. Estas JLSV fueron seleccionadas por su ubicación a lo largo de la franja aguacatera (Figura 1), lo cual permitió capturar los métodos de producción que existen en diferentes contextos climáticos, geográficos y sociales. Cabe destacar que las JLSV fueron fundamentales en este trabajo, dado que facilitaron el acercamiento formal con los productores para la aplicación de las encuestas. El cuestionario incluyó 78 preguntas encaminadas a tener conocimiento detallado acerca de las prácticas agrícolas de fertilización, control de plagas, de hierbas y de riego, incluyendo el programa de estas prácticas (i. e. frecuencia y fechas en las que se realizan), el tipo y cantidad de insumos usados en ellas. También se incluyeron preguntas sobre las características de la huerta y la producción, tales como ubicación a nivel de localidad, relieve dominante, infraestructura, equipamiento, variedades cultivadas, densidad, edad de la plantación, rendimiento promedio y mercado de venta. No se hicieron preguntas referentes a las características climáticas de precipitación y temperatura en la ubicación de la huerta, debido a que éstas se obtuvieron a través de la generación de isohietas e isotermas en sistema de información geográfica (ESRI, Inc., 2008), usando para ello la base de datos de la red nacional de estaciones meteorológicas contenida en el Software ERIC III (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2013). En productores con más de una huerta, el cuestionario refirió el manejo en aquella de mayor superficie. Previo a su aplicación el cuestionario fue validado y piloteado con productores de la Asociación Agrícola Local de Productores de Aguacate de Uruapan, Michoacán (AALPAUM). La aplicación de las encuestas se efectuó entre junio del 2010 y noviembre del 2011, realizando 520. Después de su revisión, 65 encuestas fueron removidas de la muestra debido a inconsistencias o respuestas inconclusas, por lo que sólo 455 fueron incluidas en el análisis, lo que representa 4 % del total aproximado de 11,000 productores registrados (COMA, 2007). La muestra abarcó amplio intervalo de condiciones de producción (Cuadro 1).



**Table 1. Profile of the sample of Michoacán avocado growers interviewed.****Cuadro 1. Perfil de la muestra de productores de aguacate de Michoacán entrevistados.**

Attribute / Atributo	Classes / Clases	Proportion of respondents (%) / Proporción de encuestados (%)
Cultivated area <sup>z</sup> / Superficie cultivada <sup>z</sup>	Small producers (< 5 ha) / Pequeños productores (< 5 ha)	60
	Medium-sized producers (5 a 10 ha) / Medianos productores (5 a 10 ha)	25
	Large producers (> 10 ha) / Grandes productores (> 10 ha)	15
Orchard age <sup>y</sup> / Edad de la huerta <sup>y</sup>	Young orchards (< 20 years) / Huertas jóvenes (< 20 años)	34
	Mature orchards (20 to 30 years) / Huertas maduras (20 a 30 años)	43
	Old orchards (> 30 years) / Huertas avanzadas (> 30 años)	24
Planting density <sup>x</sup> / Densidad de la plantación <sup>x</sup>	Low (< 100 trees·ha <sup>-1</sup> ) / Baja (< 100 árboles·ha <sup>-1</sup> )	14
	Medium (100 - 150 trees·ha <sup>-1</sup> ) / Media (100 - 150 árboles·ha <sup>-1</sup> )	76
	High (> 150 trees·ha <sup>-1</sup> ) / Alta (> 150 árboles·ha <sup>-1</sup> )	10
Type of management / Tipo de manejo	Conventional / Convencional	87
	Organic / Orgánico	6
	Mixed / Mixto	7
Irrigation availability / Disponibilidad de riego	None / Ninguna	63
	With low-efficiency irrigation / Con riego de baja eficiencia	24
	With modern irrigation / Con riego tecnificado	10
Equipment / Equipamiento	Little / Escaso	39
	Moderated / Moderado	25
	Full / Completo	36

<sup>z</sup>Sample range (1 to 230 ha); <sup>y</sup>Sample range (9 to 50 years); <sup>x</sup>Sample range (40 to 400 trees·ha<sup>-1</sup>).

<sup>z</sup>Intervalo de la muestra (1 a 230 ha); <sup>y</sup>Intervalo de la muestra (9 a 50 años); <sup>x</sup>Intervalo de la muestra (40 a 400 árboles·ha<sup>-1</sup>).

the case of growers with more than one orchard, the questionnaire asked them to provide management information only about their largest orchard. Before applying the questionnaire, it was piloted and validated with growers belonging to the Local Avocado Growers Association of Uruapan, Michoacán (known by the Spanish acronym AALPAUM). A total of 520 surveys were applied between June 2010 and November 2011. After review, 65 surveys were removed from the sample due to inconsistencies or incomplete answers, so only 455 were included in the analysis, representing 4 % of the approximately 11,000 registered producers (COMA, 2007). The sample covered a wide range of production conditions (Table 1).

### Calculation of energy consumption

Energy costs were expressed in Joules per unit area, assuming an annual production cycle (J·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>). No units relating to the energy prices involved in orchard management were used, because the interest of the study was in energy consumption, not the costs thereof. This allowed the comparative analysis of EC with other horticultural crops reported by studies in different countries. The study was restricted to fossil EC of direct and indirect sources, excluding solar energy and human labor. The calculation was performed using the process analysis method based on the determination of

### Cálculo del consumo de energía

Los gastos energéticos fueron expresados en Joules por unidad de área, asumiendo un ciclo anual de producción (J·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>). No se utilizaron unidades referidas a los precios de la energía involucrada en el manejo del huerto, debido a que el interés del estudio fue en los consumos y no en los costos. Ello permitió el análisis comparativo de CE con otros cultivos hortícolas reportados por estudios en diferentes países. El estudio se restringió al CE fósil de fuentes directas e indirectas, excluyendo la energía solar y labor humana. El cálculo se realizó mediante el método de análisis de procesos que se basa en la determinación de los flujos físicos de materiales, de acuerdo con la siguiente ecuación (Hülsbergen et al., 2001):

$$CE = \sum C_i E_i$$

donde: CE es consumo de energía fósil,  $C_i$  es la cantidad usada del insumo  $i$ , y  $E_i$  es el equivalente energético del insumo agronómico  $i$ .  $E_i$  no es constante para el mismo insumo, pues depende del lugar de origen del producto, tecnología usada en su fabricación y la forma de cálculo (Hülsbergen et al., 2001). Algunos equivalentes energéticos debieron ser adaptados a las condiciones locales (Pimentel et al., 1983), utilizando finalmente los coeficientes de conversión indicados

the physical flows of materials, in accordance with the following equation (Hülsbergen et al., 2001):

$$EC = \sum C_i E_i$$

where:  $EC$  is fossil energy consumption,  $C_i$  is the amount used of input  $i$ , and  $E_i$  is the energy equivalent of the agricultural input  $i$ .  $E_i$  is not constant for the same input, because it depends on the place of origin of the product, the technology used in its manufacture and the calculation method (Hülsbergen et al., 2001). Some energy equivalents had to be adapted to local conditions (Pimentel et al., 1983), using the conversion coefficients listed in Table 2. For example, for the energy equivalents of Mexican diesel fuel and gasoline, with combustion values of 37.7 and 31.2 MJ·liter<sup>-1</sup>, 5 MJ·liter<sup>-1</sup> were added for extraction (Dalgaard et al., 2001). For pesticides, a generic equivalent derived from the average of the equivalents for insecticides and fungicides reported by West and Marland (2002) was selected. This was because the data obtained from the questionnaires referred to mixtures of pesticides sprayed per unit area. A dose of 3 kg of pesticide per m<sup>3</sup> of mixture was assumed, as this is the average dose used for the control of 11 of the most common species of pests and diseases in the avocado-growing region (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA], 2009). In the case of mineral mixtures used for pest control (Bordeaux

en el Cuadro 2. Por ejemplo, para los equivalentes energéticos del diesel y gasolina mexicanos, con valores de 37.7 y 31.2 MJ·litro<sup>-1</sup> provenientes de su combustión, se adicionaron 5 MJ·litro<sup>-1</sup> por la extracción (Dalgaard et al., 2001). Para los pesticidas se seleccionó un equivalente genérico derivado del promedio de los equivalentes para insecticidas y fungicidas reportados por West y Marland (2002). Esto se debió a que los datos obtenidos de los cuestionarios se refirieron a mezclas de pesticidas asperjados por unidad de área. Se asumió una dosis de 3 kg de pesticida por m<sup>3</sup> de mezcla, ya que ésta es la dosis promedio usada para el control de 11 de las especies más comunes de plagas y enfermedades en la región aguacatera (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA], 2009). En el caso de las mezclas de minerales usadas para el control de plagas (caldo Bordelés y caldo sulfo-cálcico), el equivalente energético tomó en cuenta las fórmulas utilizadas por los productores (Marroquín-Pimentel, 1999) y el equivalente energético de los minerales que los componen (Cuadro 2). Para el caso del estiércol, el equivalente energético fue de 0.35 MJ·kg<sup>-1</sup>, el cual sólo consideró el uso de energía fósil en su transporte desde el origen al destino (Pimentel et al., 1983), a distancia media de 250 km, transportado por un camión de 15 Mg de capacidad, y consumo de energía por transporte de 1.4 MJ·Mg<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> (Börjesson, 1996). Para el Supermagro, composta líquida comúnmente

**Table 2. Energy equivalents used in this study to estimate energy consumption in avocado production.**

**Cuadro 2. Equivalentes energéticos usados en este estudio para estimar el consumo de energía en la producción de aguacate.**

Input / Insumo	Unit / Unidad	Energy equivalent (MJ·unit <sup>-1</sup> ) / Equivalente energético (MJ·unidad <sup>-1</sup> )
Gasoline <sup>z</sup> /Gasolina <sup>z</sup>	liter / litro	31.18
Diesel fuel <sup>z</sup> /Diesel <sup>z</sup>	liter / litro	37.65
Fuel extraction <sup>y</sup> /Extracción de combustible <sup>y</sup>	liter / litro	5.00
N <sup>x</sup>	kg	57.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>x</sup>	kg	7.03
K <sub>2</sub> O <sup>x</sup>	kg	6.85
CaCO <sub>3</sub> <sup>x</sup>	kg	1.71
Manure <sup>w</sup> /Estiércol <sup>w</sup>	kg	0.35
Supermagro <sup>w</sup> /Supermagro <sup>w</sup>	liter / litro	0.30
Phosphate rock <sup>v</sup> /Roca fosfórica <sup>v</sup>	kg	2.10
Herbicide <sup>x</sup> /Herbicida <sup>x</sup>	kg	266.56
Pesticide <sup>x</sup> /Pesticida <sup>x</sup>	kg	286.85
Copper <sup>u</sup> /Cobre <sup>u</sup>	kg	111.47
Sulfur <sup>v</sup> /Azufre <sup>v</sup>	kg	5.00
Magnesium <sup>v</sup> /Magnesio <sup>v</sup>	kg	5.00
Zinc <sup>v</sup>	kg	5.00
Irrigation <sup>t</sup> /Riego <sup>t</sup>	m <sup>3</sup>	4.20

<sup>z</sup>Castillo-Hernández, Mendoza-Domínguez, and Caballero-Mata, 2012; <sup>y</sup>Dalgaard et al., 2001; <sup>x</sup>West and Marland, 2002; <sup>w</sup>Authors' own estimation / <sup>w</sup>Estimación propia; <sup>v</sup>Wells, 2001; <sup>u</sup>Pimentel, 1980; <sup>t</sup>Mrini, Senhaji, and Pimentel, 2001.

mixture and lime sulfur), the energy equivalent took into account formulas used by producers (Marroquín-Pimentel, 1999) and the energy equivalent of the minerals that compose them (Table 2). In the case of manure, the energy equivalent was  $0.35 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which only considered the use of fossil energy in its transport from source to destination (Pimentel et al., 1983), which was an average distance of 250 km, transported by a 15-Mg truck, and energy consumption for transportation of  $1.4 \text{ MJ} \cdot \text{Mg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (Börjesson, 1996). For Supermagro, a liquid compost commonly used by organic producers, the equivalent used ( $0.3 \text{ MJ} \cdot \text{liter}^{-1}$ ) included the inputs for its preparation (Larios-Guzmán, Villaseñor-Ramírez, Vidales-Fernández, & Sáenz-Reyes, 2005). The phosphate rock equivalent was  $2.1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which corresponds to the energy used in the mining and grinding of the rock (Wells, 2001). Finally, the  $4.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  equivalent used for irrigation was estimated for the energy expenditure incurred operating micro-sprinklers driven by an electric pumping system.

### Statistical analyzes

The total energy consumption ( $EC_t$ ) of each production unit was calculated from the sum of the EC in the farming activities of fertilization ( $EC_{fert}$ ), pest and disease control ( $EC_{pd}$ ), weed control ( $EC_{weed}$ ) and irrigation ( $EC_{irrig}$ ). To analyze the variation in  $EC_t$  in the sample of producers ( $n = 455$ ), its coefficient of variation was determined and its frequency distribution was described by a histogram and testing of fit to normal and gamma distributions. To assess whether  $EC_t$  has an influence on avocado yields (i.e. productivity;  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ ), a regression analysis between the two variables was performed. To find the explanatory factors of EC in the production units, we carried out Pearson's correlation analysis and stepwise regression analysis between  $EC_t$  and the EC of particular agricultural activities with a set of seven variables, including climatic characteristics at the orchard's location (i.e. mean annual precipitation and temperature), structural characteristics (i.e. orchard age and planting density), characteristics of the producer's economic capability (i.e. total cultivated area and own equipment), and destination sales point (i.e. domestic and export markets). In the regression analyzes only explanatory variables that previously correlated significantly with EC were included (Zar, 1999). According to Spearman's rank correlation coefficient, total cultivated area and equipment availability had a positively significant correlation ( $r = 0.66$ ,  $t_{(453)} = 18.8$ ,  $P < 0.0001$ ); therefore, only total cultivated area as an explanatory variable associated with the producer's economic capability was used. The effect of the binary marketing variable was only assessed on  $EC_t$ , for which the Student's  $t$ -test was used. Statistical analyzes were performed with STATISTICA 7 software (StatSoft Inc., 2004).

usada entre los productores orgánicos, el equivalente utilizado ( $0.3 \text{ MJ} \cdot \text{litro}^{-1}$ ) incluyó los insumos para su preparación (Larios-Guzmán, Villaseñor-Ramírez, Vidales-Fernández, & Sáenz-Reyes, 2005). El equivalente de la roca fosfórica fue  $2.1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  que corresponde a la energía usada en la extracción y el molido de la roca (Wells, 2001). Finalmente, el equivalente de  $4.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  usado para el riego, fue estimado para el gasto ocasionado con microaspersores con sistema de bombeo eléctrico.

### Análisis estadísticos

El consumo total de energía ( $CE_t$ ) de cada unidad de producción se calculó a partir de la sumatoria del CE en las actividades agronómicas de fertilización ( $CE_{fert}$ ), control de plagas y enfermedades ( $CE_{pe}$ ), control de hierbas ( $CE_{hierb}$ ) y riego ( $CE_{irrig}$ ). Para analizar la variación del  $CE_t$  en la muestra de productores ( $n = 455$ ), se determinó su coeficiente de variación y se describió su distribución de frecuencias mediante un histograma y exploración de ajuste a las distribuciones normal y gamma. Para evaluar si el  $CE_t$  influye sobre los rendimientos de aguacate (i.e. productividad;  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) se realizó un análisis de regresión entre ambas variables. Para encontrar los factores explicativos del CE en las unidades de producción, se hicieron análisis de correlación de Pearson y análisis de regresión por pasos entre el  $CE_t$  y los CE de las actividades agronómicas particulares con conjunto de siete variables, que incluyen características climáticas en la ubicación de la huerta (i.e. precipitación y temperatura medias anuales), características estructurales (i.e. edad y densidad de la plantación), características de la capacidad económica del productor (i.e. superficie total cultivada y equipamiento propio), y el destino de venta de la producción (i.e. mercado interno y exportación). En los análisis de regresión únicamente se incluyeron variables explicativas que previamente correlacionaron significativamente con el CE (Zar, 1999). De acuerdo con el análisis de correlación de Spearman, la superficie total cultivada y la disponibilidad de equipamiento fue positivamente significativa ( $r = 0.66$ ,  $t_{(453)} = 18.8$ ,  $P < 0.0001$ ); por lo tanto, solo se usó la superficie total cultivada como variable explicativa asociada a la capacidad económica del productor. El efecto de la variable binaria de comercialización solo se evaluó sobre el  $CE_t$ , para lo cual se usó la prueba de  $t$  de Student. Los análisis estadísticos fueron realizados con el software STATISTICA 7 (StatSoft, Inc., 2004).

### Resultados

El  $CE_t$  en el manejo de las huertas de aguacate tuvo un coeficiente de variación alto, 41 %. Sus valores fluctuaron entre 5,330 y 76,531  $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , con promedio ( $\pm 1 \text{ e.e.}$ ) de  $28,880 \pm 560 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  (Cuadro 3). La distribución de frecuencias de los

## Results

The  $EC_t$  in the management of avocado orchards had a high coefficient of variation, 41 %. Its values ranged from 5,330 to 76,531  $MJ \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ , averaging ( $\pm 1$  e.e.)  $28,880 \pm 560 MJ \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$  (Table 3). The frequency distribution of the  $EC_t$  values constructed with 13 classes did not fit normal distribution ( $X^2 = 22.7$ ,  $P = 0.0009$ ), but it did with gamma distribution ( $X^2 = 5.04$ ;  $P = 0.54$ ). This distribution showed a positive bias ( $0.6 \pm 0.11$ ), with a relatively higher number of below-average values (Figure 2). Of the total data, 56 % showed  $EC_t$  of between 20,000 and 40,000  $MJ \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ , and 28 and 16 % had values higher and lower than this range, respectively.

valores de  $CE_t$  construida con 13 clases, no se ajustó a la distribución normal ( $X^2 = 22.7$ ,  $P = 0.0009$ ), pero sí a la distribución gamma ( $X^2 = 5.04$ ;  $P = 0.54$ ). Esta distribución mostró un sesgo positivo ( $0.6 \pm 0.11$ ), con número relativamente mayor de valores por debajo del promedio (Figura 2). Del total de datos, 56 % mostró  $CE_t$  de entre 20,000 y 40,000  $MJ \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ , además 28 y 16 % tuvieron valores mayores y menores a este intervalo, respectivamente.

El rendimiento de aguacate por huerta fluctuó entre 4 y 30  $Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ , con promedio de  $12 \pm 0.26 Mg \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ . El análisis de regresión mostró que el  $CE_t$  explicó 7 % de dicha variación ( $r^2 = 0.07$ ,  $P < 0.001$ ).

**Table 3. Energy consumption (EC) in the management of avocado orchards in Michoacán, Mexico. Mean values  $\pm$  one e.e. (n = 455) and coefficients of variation (CV) disaggregated by input and agricultural operation.**  
**Cuadro 3. Consumo de energía (CE) en el manejo de huertas de aguacate en Michoacán, México. Se presentan valores promedio  $\pm$  un e.e. (n = 455) y coeficientes de variación (CV) desagregados por insumo y operación agrícola.**

Agricultural operation / Operación agrícola	EC ( $MJ \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ ) / CE ( $MJ \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ )	CV (%)	Proportion of total EC (%) / Proporción del CE total (%)
Chemical fertilizer / Fertilizante químico	$11,438 \pm 334$	62	39.6
Manure / Estiércol	$3,407 \pm 124$	78	11.8
$CaCO_3$	$820 \pm 37$	97	2.8
Total fertilization / Total fertilización	$15,665 \pm 378$	51	54.4
Pesticides / Pesticidas	$9,078 \pm 279$	65	31.4
Fuels / Combustibles	$2,457 \pm 71$	62	8.5
Total pest control / Total control de plagas	$11,535 \pm 343$	63	39.9
Herbicide / Herbicida	$401 \pm 27$	144	1.4
Fuels / Combustibles	$1,219 \pm 45$	79	4.2
Total weed control / Total control de hierbas	$1,619 \pm 50$	66	5.6
Total irrigation / Total riego	$60 \pm 9$	305	0.2
Total consumption / Consumo Total	$28,880 \pm 560$	41	100

**Table 4. Pearson correlation coefficients between total and partial energy consumption in different farming activities in the production of avocado with variables associated with climatic factors (i.e. annual precipitation (PP) and mean annual temperature [ $T^\circ$ ]), orchard structure (i.e. orchard age [age] and planting density [density]) and the farmers' economic resources (i.e. total cultivated area [area]).**

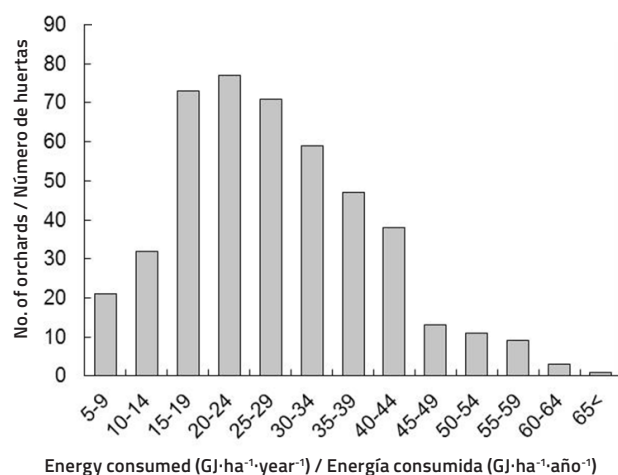
**Cuadro 4. Coeficientes de Pearson de las correlaciones entre los consumo de energía total y parciales en diferentes actividades agrícolas en la producción de aguacate con las variables asociadas a factores climáticos (i.e. precipitación anual (PP) y temperatura media anual [ $T^\circ$ ]), estructura de los huertos (i.e. edad del arbolado [edad] y densidad de plantación [densidad]) y los recursos económicos de los productores (i.e. superficie total cultivada [superficie]).**

Activity / Actividad	Climatic / Climático		Orchard structure / Estructura de la huerta		Economic resources / Recursos económicos
	PP	$T^\circ$	Age / Edad	Density / Densidad	Area / Superficie
Total	0.24***	0.08 <sup>NS</sup>	0.22***	0.19***	0.29***
Fertilization / Fertilización	0.04 <sup>NS</sup>	0.12**	0.12**	0.37***	0.24***
Pest control / Control de plagas	0.32***	-0.02 <sup>NS</sup>	0.20***	0.07 <sup>NS</sup>	0.16***
Weed control / Control de hierbas	0.19***	0.02 <sup>NS</sup>	0.20***	-0.02 <sup>NS</sup>	0.33***

<sup>NS</sup>, \*, \*\*, \*\*\*; not significant and significant at  $P \leq 0.05$ , 0.01 and 0.001, respectively.

<sup>NS</sup>, \*, \*\*, \*\*\*; no significativo y significativo a una  $P \leq 0.05$ , 0.01 y 0.001, respectivamente.





**Figure 2. Frequency distribution of total energy consumption in management of avocado orchards in Michoacán ( $n = 455$ ).**

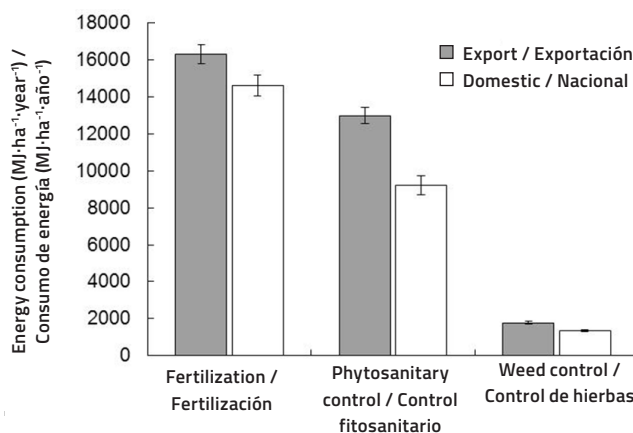
**Figura 2. Distribución de frecuencias del consumo total de energía en el manejo de huertas de aguacate en Michoacán ( $n = 455$ ).**

Avocado yield per orchard ranged from 4 to 30  $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ , averaging  $12 \pm 0.26 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ . Regression analysis showed that  $\text{EC}_t$  explained 7 % of this variation ( $r^2 = 0.07$ ,  $P < 0.001$ ).

Regarding the explanatory variables of  $\text{EC}_t$  variability, it was found that it correlated positively with four of the five analyzed variables (Table 4), with the following order of importance: total cultivated area, annual precipitation, orchard age and planting density. However, multiple regression analysis showed that together these four variables explained only 15.5 % of the variation in  $\text{EC}_t$  ( $r^2_{\text{multiple}} = 0.15$ ;  $f_{(3,442)} = 26$ ;  $P < 0.001$ ). On the other hand,  $\text{EC}_t$  was significantly higher in orchards producing avocado for export sales rather than for the domestic market ( $t = 5.3$ ;  $df = 453$ ;  $P < 0.0001$ ). This difference was primarily attributable to  $\text{EC}_{pe}$ , which was 41.8 % higher in orchards with export production (Figure 3).

The analysis of  $\text{EC}_t$  by agricultural operation showed that  $\text{EC}_{\text{fert}}$  was the most energy-demanding activity, representing on average 54.4 % of  $\text{EC}_t$  with absolute consumption of  $15,665 \pm 378 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$  (Table 3). For its part,  $\text{EC}_{pe}$  was the second highest with  $11,535 \pm 343 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ , corresponding to 39.9 % of  $\text{EC}_t$ , whereas  $\text{EC}_{\text{weed}}$  and  $\text{EC}_{\text{irrig}}$  accounted for 5.6 and 0.2 % of  $\text{EC}_t$ , respectively. When  $\text{EC}_{\text{irrig}}$  was calculated, only for the group of orchards with irrigation, it had an average value of  $399 \pm 36 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ , with high variation ( $\text{CV} = 74 \%$ ).

According to the correlation and regression analyses, the EC of the individual agricultural operations was



**Figure 3. Average annual energy consumption ( $\pm$  standard error) in different agricultural operations in Michoacán avocado orchards with product sales aimed at international ( $n = 190$ ) and domestic ( $n = 170$ ) markets.**

**Figura 3. Consumo de energía promedio anual ( $\pm$  error estándar) en diferentes operaciones agronómicas en huertas de aguacate de Michoacán con destino de venta de la producción en los mercados internacional ( $n = 190$ ) y nacional ( $n = 170$ ).**

Con relación a las variables explicativas de la variabilidad  $\text{CE}_t$ , se encontró que éste correlacionó positivamente con cuatro de las cinco variables analizadas (Cuadro 4), con el siguiente orden de importancia: superficie total cultivada, precipitación anual, edad de la huerta y densidad de la plantación. Sin embargo, el análisis de regresión múltiple mostró que, conjuntamente, estas cuatro variables explicaron sólo 15.5 % de la variación en  $\text{CE}_t$  ( $r^2_{\text{multiple}} = 0.15$ ;  $f_{(3,442)} = 26$ ;  $P < 0.001$ ). Por otra parte, el  $\text{CE}_t$  fue significativamente mayor en las huertas que producen aguacate para venta de exportación que en aquellas que venden al mercado interno ( $t = 5.3$ ;  $df = 453$ ;  $P < 0.0001$ ). Esta diferencia se atribuyó principalmente al  $\text{CE}_{pe}$ , el cual fue 41.8 % mayor en huertas con producción de exportación (Figura 3).

La partición del  $\text{CE}_t$  por operación agronómica mostró que el  $\text{CE}_{\text{fert}}$  fue la actividad más demandante de energía, representando en promedio 54.4 % del  $\text{CE}_t$ , con consumo absoluto de  $15,665 \pm 378 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  (Cuadro 3). Por su parte, el  $\text{CE}_{pe}$  fue la segunda inversión más alta con  $11,535 \pm 343 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , correspondiente al 39.9 % del  $\text{CE}_t$ . El  $\text{CE}_{\text{hierb}}$  y el  $\text{CE}_{\text{irrig}}$  representaron 5.6 y 0.2 % del  $\text{CE}_t$ , respectivamente. Cuando el  $\text{CE}_{\text{irrig}}$  fue calculado, solamente para el grupo de huertas con riego, tuvo valor promedio de  $399 \pm 36 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , con alta variación ( $\text{CV} = 74 \%$ ).

De acuerdo con los análisis de correlación y regresión, el CE de las operaciones agronómicas particulares

influenced differentially by the independent variables studied.  $EC_{fert}$  positively correlated with total cultivated area, planting density and to a lesser degree with orchard age and temperature (Table 4). These four variables together explained 20.5 % of the variation in  $EC_{fert}$  ( $r^2_{multiple} = 0.205$ ;  $f_{(3,442)} = 38$ ;  $P < 0.001$ ).  $EC_{pd}$  positively correlated with precipitation, orchard age and to a lesser degree with total cultivated area (Table 4). However, these variables only explained 12.7 % of data variation ( $r^2_{multiple} = 0.127$ ;  $f_{(3,442)} = 32$ ;  $P < 0.001$ ).  $EC_{weed}$  positively correlated with total cultivated area, planting density and precipitation, which explained 13.5 % of its variation ( $r^2_{multiple} = 0.135$ ;  $f_{(3,435)} = 23$ ;  $P < 0.001$ ).

## Discussion

As expected,  $EC_t$  in avocado production showed high variation among orchards. This variation indicates that there is a wide variety of avocado farming systems in Michoacán. The  $EC_t$  fit to gamma distribution and the positive bias of this distribution show that  $EC_t$  is distributed asymmetrically with a concentration of cases at lower values. This distribution may be related to the dominance of small producers in the sample (Table 1), since they showed a tendency to lower  $EC_t$ , according to regression analysis. As in our sample, in the universe of Michoacán avocado growers, small producers numerically dominate (72 %) over medium-sized (18 %) and large ones (10 %) (COMA, 2007), so the observed pattern may be representative of the crop's production statewide.

The average productivity of the orchards (12 Mg·ha<sup>-1</sup>) was slightly higher than the average reported for the avocado-growing region of Michoacán (10 Mg·ha<sup>-1</sup>) (Echánove Huacuja, 2008). The positive relationship between  $EC_t$  and yields indicates that energy use promotes productivity. However, this positive effect of energy use was at the low end of the spatial scale of this study, as indicated by the coefficient of determination of this relationship. Other factors influencing productivity at the scale of the present study include climate, soil type and topography (Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Salazar-García et al., 2005).

This study generated the first  $EC$  data for avocado production available in the literature. Comparison of  $EC_t$  in avocado with those reported in 11 fruit-tree crops in various parts of the world (Table 5) shows that the average  $EC_t$  for avocado production is among the lowest values reported, slightly above  $EC_t$  reported in the production of apricots and cherries in Turkey (Demircan, Ekinici, Keener, Akbolat, & Ekinici, 2006; Gezer, Acaroğlu, & Haciseferoğullari, 2003) and similar to that determined for the production of kiwi in Iran (Mohammadi, Rafiee, Mohtasebi, & Rafiee, 2010). This suggests that avocado production in Michoacán involves moderate energy consumption. However, this

fue influenciado diferencialmente por las variables independientes estudiadas. El  $CE_{fert}$  correlacionó positivamente con la superficie total cultivada, densidad de la plantación, y en menor grado con la edad de la huerta y la temperatura (Cuadro 4). Estas cuatro variables juntas explicaron 20.5 % de la variación en el  $CE_{fert}$  ( $r^2_{multiple} = 0.205$ ;  $f_{(3,442)} = 38$ ;  $P < 0.001$ ). El  $CE_{pe}$  correlacionó positivamente con la precipitación, la edad de la huerta y en menor grado con la superficie total cultivada (Cuadro 4). Sin embargo, estas variables explicaron sólo 12.7 % de la variación de los datos ( $r^2_{multiple} = 0.127$ ;  $f_{(3,442)} = 32$ ;  $P < 0.001$ ). El  $CE_{hierb}$  correlacionó positivamente con la superficie total cultivada, la densidad de la plantación y la precipitación, las cuales explicaron 13.5 % de su variación ( $r^2_{multiple} = 0.135$ ;  $f_{(3,435)} = 23$ ;  $P < 0.001$ ).

## Discusión

De acuerdo con lo esperado, el  $CE_t$  en la producción de aguacate mostró alta variación entre huertas. Esta variación indica que hay amplia diversidad de formas de producción de aguacate en Michoacán. El ajuste del  $CE_t$  a distribución gamma y el sesgo positivo de esta distribución, muestran que el  $CE_t$  se distribuyó de manera asimétrica con concentración de casos en valores bajos. Esta distribución puede estar relacionada con la dominancia de pequeños productores en la muestra (Cuadro 1), ya que éstos mostraron tendencia a menores  $CE_t$ , de acuerdo con los análisis de regresión. Al igual que en nuestra muestra, en el universo de productores de aguacate de Michoacán, hay dominancia de productores pequeños (72 %), sobre los medianos (18 %) y grandes (10 %) (COMA, 2007), por lo que el patrón observado puede ser representativo para el cultivo a nivel estatal.

El promedio de productividad de las huertas (12 Mg·ha<sup>-1</sup>) fue ligeramente mayor al promedio reportado para la región aguacatera de Michoacán (10 Mg·ha<sup>-1</sup>) (Echánove Huacuja, 2008). La relación positiva entre el  $CE_t$  y los rendimientos indica que el uso de energía promueve la productividad. No obstante, este efecto positivo del uso de energía fue bajo a la escala espacial de este estudio, como lo indicó el coeficiente de determinación de dicha relación. Otros factores que influyen en la productividad a la escala del presente estudio incluyen el clima, el tipo de suelo y la topografía (Gutiérrez-Contreras et al., 2010; Salazar-García et al., 2005).

Este estudio generó los primeros datos de  $CE$  para la producción de aguacate disponibles en la literatura. La comparación del  $CE_t$  en aguacate con los reportados en 11 cultivos frutícolas, en diversas partes del mundo (Cuadro 5), muestra que el  $CE_t$  promedio para la producción de aguacate se ubica entre los valores más bajos reportados, ligeramente por encima de los  $CE_t$  reportados en la producción de chabacano y cerezas en Turquía (Demircan, Ekinici, Keener, Akbolat, & Ekinici,

**Table 5. Total and partial energy consumption by fertilizer and manure (F + M) use, insecticide and fungicide (I + F) use, fuel and herbicide use in weed control (Weed), electricity use for irrigation (Irrigation) and other uses or activities reported in the production of various fruit-tree crops. All data are in units of MJ·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>.**

**Cuadro 5. Consumos de energía total y parciales por uso de fertilizantes y estiércol (F + E), uso de insecticidas y fungicidas (I + F), uso de combustibles y herbicidas en el control de hierbas (Hierba), uso de electricidad para el riego (Riego) y otros usos o actividades reportados en la producción de varios cultivos de árboles frutales. Todos los datos están en unidades de MJ·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.**

Fruit / Fruto	Country / País	Total	F + M / F + E	I + F	Weed / Hierba	Irrigation / Riego	Others <sup>2</sup> / Otros <sup>2</sup>
Apricot / Chabacano	Turkey <sup>U</sup> / Turquía <sup>U</sup>	22,340	7,109	4,050	ND	329	10,851
Cherry / Cereza	Turkey <sup>T</sup> / Turquía <sup>T</sup>	23,795	11,597	344	ND	2,523	9,329
Avocado / Aguacate	Mexico <sup>S</sup> / México <sup>S</sup>	28,880	15,665	9,078	1,619	60	2,457
Kiwi / Kiwi	Iran <sup>R</sup> / Irán <sup>R</sup>	30,285	14,302	465	ND	3,887	11,628
Pear <sup>Y</sup> / Pera <sup>Y</sup>	China <sup>Q</sup> / China <sup>Q</sup>	37,700	18,000	1,100	ND	2,000	16,620
Pear <sup>X</sup> / Pera <sup>X</sup>	China <sup>Q</sup> / China <sup>Q</sup>	44,700	15,000	6,100	ND	4,000	19,550
Tangerine / Mandarina	Turkey <sup>P</sup> / Turquía <sup>P</sup>	48,838	23,003	2,003	ND	189	23,641
Apple / Manzana	Greece <sup>N</sup> / Grecia <sup>N</sup>	50,700	7,600	7,300	3100	400	32,100
Pear <sup>W</sup> / Pera <sup>W</sup>	China <sup>Q</sup> / China <sup>Q</sup>	52,300	23,000	4,700	ND	2,400	22,200
Orange / Naranja	Turkey <sup>P</sup> / Turquía <sup>P</sup>	60,949	27,833	1,273	47	215	31,578
Tangerine / Mandarina	Iran <sup>M</sup> / Irán <sup>M</sup>	62,261	38,382	13,273	ND	2,016	8,588
Lemon / Limón	Turkey <sup>P</sup> / Turquía <sup>P</sup>	62,977	32,284	1,671	47	207	28,765
Apple <sup>W</sup> / Manzana <sup>W</sup>	USA <sup>L</sup> / EUA <sup>L</sup>	74,221	51	6,697	23	Nd	67,449
Pear <sup>W</sup> / Pera <sup>W</sup>	China <sup>Q</sup> / China <sup>Q</sup>	76,000	32,200	1,900	ND	4,970	36,900
Apple <sup>V</sup> / Manzana <sup>V</sup>	USA <sup>L</sup> / EUA <sup>L</sup>	81,443	1,484	8,872	2225	Nd	68,863
Apple <sup>X</sup> / Manzana <sup>X</sup>	USA <sup>L</sup> / EUA <sup>L</sup>	86,081	2,709	9,206	5321	Nd	68,844

ND = Not determined; <sup>2</sup>Includes fuel use, human labor, machinery and/or electricity. <sup>Y</sup>"Green" management; <sup>X</sup>Conventional management; <sup>W</sup>Organic management; <sup>V</sup>Integrated management; <sup>U</sup>Gezer et al., 2003; <sup>T</sup>Demircan et al., 2006; <sup>S</sup>This study; <sup>R</sup>Mohammadi et al., 2010; <sup>Q</sup>Liu et al., 2010; <sup>O</sup>Ozkan et al., 2004; <sup>N</sup>Strapatsa, Nanos, and Tsatsarelis, 2006; <sup>M</sup>Mohammadshirazi et al., 2012; <sup>L</sup>Reganold et al., 2001.

ND = No determinado; <sup>2</sup>Incluye uso de combustibles, labor humana, maquinaria y/o electricidad. <sup>Y</sup>Manejo "green"; <sup>X</sup>Manejo convencional; <sup>W</sup>Manejo orgánico; <sup>V</sup>Manejo integrado; <sup>U</sup>Gezer et al., 2003; <sup>T</sup>Demircan et al., 2006; <sup>S</sup>Este estudio; <sup>R</sup>Mohammadi et al., 2010; <sup>Q</sup>Liu et al., 2010; <sup>O</sup>Ozkan et al., 2004; <sup>N</sup>Strapatsa, Nanos, y Tsatsarelis, 2006; <sup>M</sup>Mohammadshirazi et al., 2012; <sup>L</sup>Reganold et al., 2001.

comparison at EC<sub>f</sub> level should be taken with caution due mainly to the disparity of energy consumption sources considered in each study. For example, human labor and energy consumption for producing machinery are not taken into account in this study, unlike other studies.

As expected, the analysis of EC by farming operation showed that fertilization and pest management are the most energy-demanding activities in avocado production. These activities have also been considered as the most important in the context of fossil EC in other fruit-tree crops worldwide (Table 5).

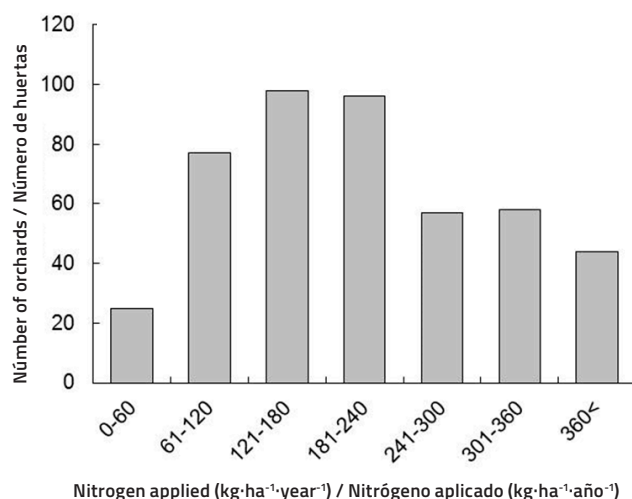
Regarding EC<sub>fert</sub>, its average in avocado falls in the middle range for fruit-tree crops, with a value similar to that of pear fertilization in China (Liu et al., 2010) (Table 5). However, in relative terms, EC<sub>fert</sub> in avocado accounted for the highest value (54.4 % of EC<sub>f</sub>), along with that used in tangerine production in Iran (61 %; Mohammadshirazi, Akram, Rafiee, Mousavi Avval, & Bagheri Kalhor, 2012). To explore whether this high relative value of EC<sub>fert</sub> reflects disproportionate energy consumption due to improper fertilization, nitrogen (N) application was reviewed using the data

2006; Gezer, Acaroğlu, & Haciseferoğullari, 2003) y similar al determinado para la producción de kiwi en Irán (Mohammadi, Rafiee, Mohtasebi, & Rafiee, 2010). Esto sugiere que la producción de aguacate en Michoacán involucra consumo de energía moderado. No obstante, esta comparación a nivel de EC<sub>f</sub> debe ser tomada con cautela debido, principalmente, a la disparidad de fuentes de consumo de energía consideradas en cada estudio. Por ejemplo, la labor humana y el consumo de energía por producción de maquinaria no son tomadas en cuenta en el presente estudio, a diferencia de otros estudios.

Conforme lo esperado, la partición de CE por operación agronómica mostró que la fertilización y el manejo de plagas son las actividades más demandantes de energía para la producción de aguacate. Estas actividades también han sido consideradas como las más importantes en el contexto del CE fósil en otros cultivos frutícolas del mundo (Cuadro 5).

Con respecto al CE<sub>fert</sub>, su promedio en el aguacate se ubicó en medio del intervalo recopilado para cultivos frutícolas, con valor similar al de la fertilización de Pera en China (Liu et al., 2010) (Cuadro 5). Sin embargo,

collected. This element is a good indicator of the fertilization practice because it is applied annually, owing to its great influence on crop growth (Lahav & Kadman, 1980). While the N fertilization dose in avocado depends on several factors, including the availability of this nutrient in the soil and the age of the trees, experimental studies have determined that N rates between 55 and 180 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> are suitable for productions of 10 to 12 Mg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> in a wide variety of soils and conditions (Embleton & Jones, 1965; Lahav, 1995; Lahav & Kadman, 1980; Loupassaki, 1995; Lovatt, 2001). In this study, the average application of N in chemical form was 158 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>; however, manure is also applied annually. By including the N contained in this source, which has an N content of 5.6 kg per wet ton of manure (Pimentel et al., 1983), the average N application was 211 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, putting 64 % of the orchards at doses above the recommended maximum of 180 kg·ha<sup>-1</sup> (Figure 4). Excess N addition in avocado orchards is a problem also reported in the USA (Embleton & Jones, 1965; Kiggundu, Migliaccio, Schaffer, Li, & Crane, 2012; Yates, Meyer, & Arpaia, 1992) and Michoacán (Tapia-Vargas, Larios-Guzmán, Contreras, Vidales-Fernández, & Barradas, 2012). In the present study, the positive correlation between EC<sub>fert</sub> and total cultivated area indicates that fertilizer application tends to be higher among large producers. This pattern may be associated with their greater economic capability, which can incline them towards over-fertilization, either due to lack of knowledge or



**Figure 4. Frequency distribution of the amount of nitrogen applied annually in avocado orchards in Michoacán, Mexico (n = 455). Values include the application of N in mineral form and manure.**

**Figura 4. Distribución de frecuencias de la cantidad de nitrógeno aplicado anualmente en huertas de aguacate en Michoacán, México (n = 455). Los valores incluyen la aplicación de N en forma mineral y estiércol.**

en términos relativos, el CE<sub>fert</sub> en el aguacate representó el valor más alto (54.4 % del CE<sub>t</sub>), junto con el invertido en la producción de mandarina en Irán (61 %; Mohammadshirazi, Akram, Rafiee, Mousavi Avval, & Bagheri Kalhor, 2012). Para explorar si este alto valor relativo del CE<sub>fert</sub> refleja el consumo desproporcionado de energía por inadecuada fertilización, se revisó su manejo con nitrógeno (N) mediante los datos colectados. Este elemento es buen indicador de la práctica de fertilización porque es aplicado anualmente, dada su gran influencia en crecimiento de los cultivos (Lahav & Kadman, 1980). Si bien la dosis de fertilización con N en el aguacate depende de varios factores, como la disponibilidad de este nutriente en el suelo y la edad de los árboles, estudios experimentales han determinado que dosis de N entre 55 y 180 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> son adecuadas para producciones de 10 a 12 Mg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> en amplia variedad de suelos y condiciones (Embleton & Jones, 1965; Lahav, 1995; Lahav & Kadman, 1980; Loupassaki, 1995; Lovatt, 2001). En este estudio, el promedio de aplicación de N en forma química fue 158 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>; sin embargo, complementariamente se realiza la aplicación anual de estiércol. Incluyendo el N incorporado por esta fuente, con un contenido de 5.6 kg de N por tonelada húmeda de estiércol (Pimentel et al., 1983), el promedio de aplicación de N fue de 211 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, 64 % de los huertos con dosis por encima del valor máximo recomendado de 180 kg·ha<sup>-1</sup> (Figura 4). El exceso en la adición de N en las huertas de aguacate es un problema reportado en EUA (Embleton & Jones, 1965; Kiggundu, Migliaccio, Schaffer, Li, & Crane, 2012; Yates, Meyer, & Arpaia, 1992) y Michoacán (Tapia-Vargas, Larios-Guzmán, Contreras, Vidales-Fernández, & Barradas, 2012). En el presente estudio, la correlación positiva entre el CE<sub>fert</sub> y la superficie total cultivada indica que la aplicación de fertilizantes tiende a ser mayor entre los grandes productores. Este patrón puede estar asociado con la mayor capacidad económica de estos, la cual los puede inclinar hacia la sobre fertilización, ya sea por falta de conocimientos o por descuido en la búsqueda de alcanzar mejores rendimientos. En este contexto, los grandes productores pueden reducir significativamente el consumo de energía sin afectar su producción mejorando la eficiencia de la fertilización. Mayor eficiencia en la adición de fertilizantes no sólo es deseable en el tenor del uso eficiente de energía, sino que el uso excesivo de fertilizantes está asociado a problemas ambientales derivados de la entrada de lixiviados a cuerpos de agua.

Con respecto al CE en el uso de pesticidas, el cultivo de aguacate destacó por sus altos valores absolutos y relativos (39 % del CE<sub>t</sub>) en comparación con los cultivos frutícolas presentados en el Cuadro 5, excepto del cultivo de manzana con manejo tradicional de EUA y del cultivo de mandarina en Irán, lo cual enfatiza la relevancia del control fitosanitario en la producción de aguacate. Esta observación puede asociarse con la



carelessness in their pursuit of higher yields. In this context, large producers can significantly reduce energy consumption without affecting production by improving fertilization efficiency. Greater efficiency in adding fertilizer is not only desirable in the context of efficient use of energy, but also in the sense that excessive fertilizer use is associated with environmental problems arising from leachates entering water bodies.

With regard to EC in the use of pesticides, avocado growing stands out for its high absolute and relative values (39 % of EC<sub>e</sub>) compared to other fruit-tree crops presented in Table 5, except apple growing with traditional management in the USA and tangerine growing in Iran, which emphasizes the importance of phytosanitary control in avocado production. This observation may be associated with the difficulty in carrying out phytosanitary control in avocado since it is affected by more than 15 diseases and pests, including some of great economic importance such as thrips (*Thysanoptera*), avocado scab (*Sphaceloma perseae* Jenk), seed borers (*Conotrachelus aguacatae* Barber, *Stenoma catenifer* Walsingham and *Heilipus lauri* Boheman) and stem borers (*Copturus aguacatae* Kissinger) which are catalogued as quarantine pests (Hoddle, 2004; Hoddle, Jetter, & Morse, 2003; Pegg et al., 2002). Among the factors that explain the variation in EC<sub>pd</sub> in Michoacán avocado orchards, the sales market stands out, as EC<sub>pd</sub> is 41 % higher in production for the export market. This may be because the general pest management protocol in export orchards is stricter than in those aimed at the domestic market, since they have to regularly undergo health certification processes in order to export their production (Peterson & Orden, 2008). These effects of the international market on farming costs and management systems are the focus of current debate given the large-scale opening up of global markets and the different business management capacities of countries (Pretty et al., 2010). Regardless of the type of orchard, phytosanitary control in Michoacán does not include widespread pest monitoring and biological control; by contrast, it is commonly done through the spraying of chemical pesticides and mineral fungicides, scheduling four to 12 preventative applications per year (data not shown). This practice results in higher energy consumption and economic costs, along with negative environmental impacts through the release of large amounts of toxic substances into the environment (Mangiafico et al., 2009; Chávez-León et al., 2012). The dissemination of better pest management practices, with a consequent reduction in energy consumption, should include various courses of action, such as improved knowledge of pest dynamics under different climatic conditions, increased farmer training in alternative integrated pest management practices and implementation of these practices in a coordinated manner at different levels, from the plot to the region, as well as international issues of trade and regulatory agreements.

La dificultad que presenta realizar el control fitosanitario en el aguacate, debido a que éste es afectado por más de 15 enfermedades y plagas, incluyendo algunas de gran importancia económica como: trips (*Thysanoptera*), la roña (*Sphaceloma perseae* Jenk), barrenadores de semilla (*Conotrachelus aguacatae* Barber, *Stenoma catenifer* Walsingham y *Heilipus lauri* Boheman) y de tallo (*Copturus aguacatae* Kissinger) que están catalogadas como plagas cuarentenarias (Hoddle, 2004; Hoddle, Jetter, & Morse, 2003; Pegg et al., 2002). Entre los factores que explican la variación en el EC<sub>pe</sub> en huertas de Michoacán destacó el mercado de comercialización, siendo éste 41 % mayor en producción destinada al mercado exterior. Esto puede deberse a que el protocolo general de manejo de plagas en las huertas de exportación es más estricto, que aquellas que tienen producción para el mercado nacional, dado que tienen que someterse regularmente a procesos de certificación de inocuidad para poder exportar su producción (Peterson & Orden, 2008). Estos efectos del mercado internacional sobre los costos y formas de manejo de la producción agrícola, son foco de debate actual dada la gran apertura de los mercados globales y las diferentes capacidades de gestión comercial de los países (Pretty et al., 2010). Independientemente del tipo de huerta, el control fitosanitario en Michoacán no incluye de manera generalizada el monitoreo de plagas ni el control biológico; en contraste éste comúnmente se realiza a través de la aspersión de pesticidas químicos y fungicidas minerales, programando de cuatro a 12 aplicaciones preventivas al año (datos no presentados). Esta práctica resulta en mayor consumo de energía y costos económicos, así como en impactos ambientales negativos a través de la liberación de grandes cantidades de tóxicos al ambiente (Mangiafico et al., 2009; Chávez-León et al., 2012). La disseminación de mejores prácticas de manejo de plagas, con la consecuente reducción en el consumo de energía, deberán considerar diversas líneas de acción, como mejor conocimiento de la dinámica de las plagas bajo diferentes condiciones climáticas, mayor capacitación de los productores sobre prácticas alternativas del manejo integrado de plagas y la aplicación de estas prácticas de manera coordinada a diferentes niveles, desde la parcela a la región; así como cuestiones internacionales de comercio y acuerdos de regulación.

## Conclusiones

El CE fósil en la productividad del aguacate en Michoacán exhibe amplia variación entre huertas, lo cual es reflejo de la gran diversidad de formas de producción. En comparación con otros cultivos frutícolas del mundo, el CE en el aguacate es moderado. Sin embargo, a nivel de actividad agrícola se advierten problemas en el CE en las actividades de fertilización y control fitosanitario. El CE en la fertilización es alto en los medianos y grandes productores, quienes en proporción significativa pueden

## Conclusions

Fossil EC in avocado production in Michoacán exhibits wide variation among orchards, which reflects the great diversity in forms of production. Compared with other fruit-tree crops in the world, EC in avocado is moderate. However, at the level of farming activity, concerns are raised in relation to EC in fertilization and phytosanitary control. EC in fertilization is high among medium- and large-scale farmers, who in a significant proportion may be using fertilizers excessively. EC in phytosanitary control of avocado is high compared to other fruit-tree crops, and it was higher in orchards with export production than in those that sell to the domestic market, which shows the direct influence of the market on management and EC in avocado production in Michoacán. EC in Michoacán avocado production can be significantly reduced by adopting better fertilization and pest control practices, especially among medium- and large-scale producers.

## Acknowledgments

This manuscript is a product of the “Ecological impact of avocado cultivation in the State of Michoacán” project, funded by COFUPRO - Michoacán Unit between 2010 and 2012. The authors thank the AALPAUM and the JLSV of Uruapan, Michoacán and the Local Avocado Plant Health Boards of Ario de Rosales, F. J. Múgica, Los Reyes, Nuevo San Juan, Oriente, Peribán, Tacámbaro and Tancítaro for their collaboration in this work. Iván Solorio and Dorian Anguiano conducted field interviews, and Gabriela Cuevas prepared the spatial analysis of climatic variables and Figure 1. Marta Astier and Yair Merlín provided support in the selection and estimation of energy equivalents. The manuscript benefited substantially from suggestions made by Ann Grant, Adrián Ghilardi, editor Juan Enrique Rodríguez Pérez and an anonymous reviewer.

## End of English version

## References / Referencias

- Barsimantov, J. & Navia Antezana, J. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography*, 32(2), 844-853. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.09.001
- Börjesson, P. I. I. (1996). Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy*, 11(4), 305-318. doi: 10.1016/0961-9534(96)00024-4
- Castillo-Hernández, P., Mendoza-Domínguez, A., & Caballero-Mata, P. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3), 293-306. Recuperado de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/32227/29645>
- Chávez-León, G., Tapia Vargas, L. M., Bravo Espinoza, M., Sáenz Reyes, J. T., Muñoz Flores, H. J., Vidales Fernández, I., Larios Guzmán, A., Rentería Ánima, J. B., Villaseñor Ramírez, F. J., Sánchez Pérez, J. L., Alcantar Rocillo, J. J., & Mendoza Cantú, M. (2012). *Impacto del Cambio de Uso del Suelo Forestal a Huertas de Aguacate*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias. INIFAP, Uruapan, México. 102 p.
- Comisión Michoacana del Aguacate (COMA). (2007). Censo aguacatero del 2005, con actualización al 2007. Comisión Michoacana del Aguacate. Morelia, México.
- Dalgaard, T., Halberg, N., & Porter, J. R. (2001). A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 87(1), 51-65. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00297-8
- estar incurriendo en uso excesivo de fertilizantes. El CE en el control fitosanitario del aguacate es elevado en comparación con otros cultivos frutícolas; y fue mayor en huertas con producción de exportación que en aquellas que venden al mercado nacional, lo que evidencia la influencia directa del mercado sobre el manejo y el CE en la producción del aguacate de Michoacán. El CE en la producción de aguacate de Michoacán puede ser reducido significativamente mediante la adopción de mejores prácticas de fertilización y control de plagas, especialmente entre los productores medianos y grandes.

## Agradecimientos

Este manuscrito es una contribución del proyecto “Impacto ecológico del cultivo de aguacate en el Estado de Michoacán”, financiado por COFUPRO - Unidad Michoacán entre 2010 y 2012. Los autores agradecemos a la Asociación Agrícola Local de Productores de Aguacate de Uruapan, Michoacán y a las Juntas Locales de Sanidad Vegetal del Aguacate de Ario de Rosales, F. J. Múgica, Los Reyes, Nuevo San Juan, Oriente, Peribán, Tacámbaro y Tancítaro por su colaboración en este trabajo. Iván Solorio y Dorian Anguiano realizaron entrevistas en campo, Gabriela Cuevas preparó el análisis espacial de las variables climáticas y la Figura 1. Marta Astier y Yair Merlín apoyaron en la selección y estimación de los equivalentes energéticos. El manuscrito se benefició de manera substancial por las sugerencias hechas por Ann Grant, Adrián Ghilardi, el editor Juan Enrique Rodríguez Pérez y un revisor anónimo.

## Fin de la versión en español

- Demircan, V., Ekinici, K., Keener, H. M., Akbolat, D., & Ekinici, C. (2006). Energy and economic analysis of sweet cherry production in Turkey: a case study from Isparta province. *Energy Conversion and Management*, 47(13), 1761-1769. doi: 10.1016/j.enconman.2005.10.003
- Echánove Huacuja, F. (2008). *Abriendo fronteras: el auge exportador del aguacate mexicano a Estados Unidos*. Paper presented at the Anales de Geografía de la Universidad Complutense. Recuperado de <http://www.ambientalex.info/revistas/281aug928.pdf>
- Embleton, T. W. & Jones, W. W. (1965). *Avocado nutrition in California*. Paper presented at the Proceedings of the Florida State Horticultural Society. Recuperado de <http://fshs.org/proceedings-o/1964-vol-77/401-405%20%28EMBLETON%29.pdf>
- ESRI, Inc. (2008). ArcGIS. V.9.3.: Autor
- Gezer, I., Acaroğlu, M., & Haciseferoğullari, H. (2003). Use of energy and labour in apricot agriculture in Turkey. *Biomass and Bioenergy*, 24(3), 215-219. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00116-2
- Gutiérrez-Contreras, M., Lara-Chávez, M. B. N., Guillén-Andrade, H., & Chávez-Bárcenas, A. T. (2010). Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Interciencia*, 35(9), 647-653. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/339/33914212003.pdf>
- Hoddle, M. S. (2004). Invasions of leaf feeding arthropods: why are so many new pests attacking California-grown avocados. *California Avocado Society Yearbook*, 87, 65-81. [http://www.avocadosource.com/CAS\\_Yearbooks/CAS\\_87\\_2004-2005/CAS\\_2004-05\\_V87\\_PG\\_065-081.pdf](http://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_87_2004-2005/CAS_2004-05_V87_PG_065-081.pdf)
- Hoddle, M. S., Jetter, K. M., & Morse, J. G. (2003). The economic impact of *Scirtothrips perseae* Nakahara (Thysanoptera: Thripidae) on California avocado production. *Crop Protection*, 22(3), 485-493. doi: 10.1016/S0261-2194(02)00199-0
- Hülsbergen, K. J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G. W., Kalk, W. D., & Diepenbrock, W. (2001). A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 86(3), 303-321. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00286-3
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2013). Software ERIC III. Versión 3.2. México: Autor.
- Jones, M. R. (1989). Analysis of the use of energy in agriculture—approaches and problems. *Agricultural Systems*, 29(4), 339-355. doi: 10.1016/0308-521X(89)90096-6
- Kiggundu, N., Migliaccio, K. W., Schaffer, B., Li, Y., & Crane, J. H. (2012). Water savings, nutrient leaching, and fruit yield in a young avocado orchard as affected by irrigation and nutrient management. *Irrigation Science*, 30(4), 275-286. doi: 10.1007/s00271-011-0280-6
- Lahav, E. (1995). *Avocado nutrition-A review*. Paper presented at the Proceedings of The World Avocado Congress III. Recuperado de [http://www.avocadosource.com/WAC3/wac3\\_p143.pdf](http://www.avocadosource.com/WAC3/wac3_p143.pdf)
- Lahav, E., & Kadman, A. (1980). *Avocado fertilisation*: International Potash Institute. Recuperado de <http://www.avocadosource.com/journals/specialindustryreports/lahavemmanuel1980.pdf>
- Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment international*, 30(7), 981-990. doi: 10.1016/j.envint.2004.03.005
- Larios-Guzmán, A., Villaseñor-Ramírez, F. J., Vidales-Fernández, I., & Sáenz-Reyes, J. T. (2005). Producción orgánica. *Boletín El Aguacatero* (42), 14-19. Recuperado de <http://www.aproam.com/boletines/a42.html>
- Liu, Y., Langer, V., Høgh-Jensen, H., & Egelyng, H. (2010). Energy use in organic, green and conventional pear producing systems—cases from China. *Journal of Sustainable Agriculture*, 34(6), 630-646. doi:10.1080/104440046.2010.493386
- Loupassaki, M. H. (1995). *The effect of nitrogen fertiliser on the growth, yield and mineral contents of leaves of the avocado cv. Fuerte*. Paper presented at the Program and Book of Abstracts. World Avocado Congress III. Tel-Aviv, Israel. Recuperado de [http://www.avocadosource.com/WAC3/wac3\\_p168.pdf](http://www.avocadosource.com/WAC3/wac3_p168.pdf)
- Lovatt, C. J. (2001). Properly Timed Soil-applied Nitrogen Fertilizer Increases Yield and Fruit Size of 'Hass' Avocado. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(5), 555-559. Recuperado de <http://journal.ashspublications.org/content/126/5/555.full.pdf+html>
- Mangiafico, S. S., Newman, J., Merhaut, D. J., Gan, J., Faber, B., & Wu, L. (2009). Nutrients and pesticides in stormwater runoff and soil water in production nurseries and citrus and avocado groves in California. *HortTechnology*, 19(2), 360-367. Recuperado de <http://horttech.ashspublications.org/content/19/2/360.full.pdf+html>
- Marroquín-Pimentel, F. J. (1999). Factores que favorecen la incidencia de roña (*Sphaceloma perseae* Jenk.) en el cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) 'Hass', en tres regiones agroclimáticas de Michoacán, México. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 5, 309-312. Recuperado de [http://209.143.153.251/WAC4/WAC4\\_p309.pdf](http://209.143.153.251/WAC4/WAC4_p309.pdf)
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., & Rafiee, H. (2010). Energy inputs—yield relationship and cost analysis of kiwifruit production in Iran. *Renewable energy*, 35(5), 1071-1075. doi: 10.1016/j.renene.2009.09.004
- Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., Mousavi Avval, S. H., & Bagheri Kalhor, E. (2012). An analysis of energy use and relation between energy inputs and yield in tangerine production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4515-4521. doi: 10.1016/j.rser.2012.04.047
- Morales-Manilla, L. M. y Cuevas-García, G. (2011). Inventarios 1974 – 2007, y evaluación del impacto ambiental regional del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. *Informe Final. Centro de Investigaciones*

- en *Geografía Ambiental*, UNAM. Morelia, Mich. 138 pp. Recuperado de <http://lae.ciga.unam.mx/aguacate/sub1/index.php>
- Mrini, M., Senhaji, F., & Pimentel, D. (2001). Energy analysis of sugarcane production in Morocco. *Environment, Development and Sustainability*, 3(2), 109-126. doi: 10.1023/A:1011695731580
- Ozkan, B., Akcaoz, H., & Karadeniz, F. (2004). Energy requirement and economic analysis of citrus production in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 45(11), 1821-1830. doi: 10.1016/j.enconman.2003.10.002
- Pegg, K. G., Coates, L. M., Korsten, L., Harding, R. M., Whitley, A. W., Schaffer, B., & Wolstenholme, B. N. (2002). Foliar, fruit and soilborne diseases. *The avocado: botany, production and uses*, 299-338.
- Peterson, E. B. & Orden, D. (2008). Avocado pests and avocado trade. *American Journal of Agricultural Economics*, 90(2), 321-335. Recuperado de <http://www.gii.ncr.vt.edu/docs/AJAE%20Final%20Avocado%20Pests%20and%20Avocado%20Trade.pdf>
- Pimentel, D. (1980). Energy inputs for the production, formulation, packaging, and transport of various pesticides. *Handbook of energy utilization in agriculture*. Boca Raton: CRC, 45-48.
- Pimentel, D., Berardi, G., & Fast, S. (1983). Energy efficiency of farming systems: organic and conventional agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 9(4), 359-372. doi: 10.1016/0167-8809(83)90021-X
- Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D., & Seidel, R. (2005). Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*, 55(7), 573-582. doi: 10.1641/0006-3568(2005)055[0573:E
- Pretty, J., Sutherland, W. J., Ashby, J., Auburn, J., Baulcombe, D., Bell, M., . . . Burke, J. (2010). The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. *International journal of agricultural sustainability*, 8(4), 219-236. doi: 10.3763/ijas.2010.0534
- Reganold, J. P., Glover, J. D., Andrews, P. K., & Hinman, H. R. (2001). Sustainability of three apple production systems. *Nature*, 410(6831), 926-930. doi: 10.1038/35073574
- Salazar-García, S., Zamora-Cuevas, L., & Vega-López, R. J. (2005). Actualización sobre la industria del aguacate en Michoacán, México. *California Avocado Society, Yearbook*, 87, 31-44. Recuperado de [http://avocadosource.com/CAS\\_Yearbooks/CAS\\_87\\_2004-2005/CAS\\_2004-05\\_V87\\_PG\\_045-054.pdf](http://avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_87_2004-2005/CAS_2004-05_V87_PG_045-054.pdf)
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2013). Atlas Agroalimentario 2013. D.F. México. 200 p. Consultado en <http://www.siap.gob.mx/atlas2013/index.html>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). (2009). Listado de Plaguicidas Autorizados para Uso en Aguacate. D. F., México. 20 p. Consultado en <http://www.senasica.gob.mx/?id=4099>
- StatSoft, Inc. (2004). software STATISTICA 7: Autor
- Strapatsa, A. V., Nanos, G. D., & Tsatsarelis, C. A. (2006). Energy flow for integrated apple production in Greece. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(3), 176-180. doi: 10.1016/j.agee.2006.02.003
- Tapia-Vargas, L. M., Larios-Guzmán, A., Contreras, J. A., Vidales-Fernández, I., & Barradas, V. L. (2012). Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 251-258. Recuperado de <http://www.journals.unam.mx/index.php/rica/article/view/32537>
- Wells, C. M. (2001). Total energy indicators of agricultural sustainability: dairy farming case study: Ministry of Agriculture and Forestry. Recuperado de <http://maxa.maf.govt.nz/mafnet/publications/techpapers/techpaper0103-dairy-farming-case-study.pdf>
- West, T. O. & Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1), 217-232. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00233-X
- Yates, M. V., Meyer, J. L., & Arpaia, M. L. (1992). Using less fertilizer more often can reduce nitrate leaching. *California Agriculture*, 3, 19-21. Recuperado de <https://ucanr.edu/repositoryfiles/ca4603p19-69613.pdf>
- Zar, J. H. (1999). *Biostatistical analysis*. New Jersey, USA: Pearson Education India.