


Explorando la eficiencia técnica de la producción agrícola en tres regiones de México

Exploring the technical efficiency of agricultural production in three regions of Mexico

Sergio Colin Castillo¹, Ismael Aguilar Benítez² y María Azahara Mesa Jurado³

Fecha de recepción: 10 de diciembre del 2023

Fecha de aceptación: 15 de mayo del 2024

1 Nacionalidad: mexicana. Adscripción: Centro de Investigaciones Socioeconómicas UADEC  ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2262-2375> Correo: sergio.colin@uadec.edu.mx

2 Nacionalidad: mexicana. Adscripción: El Colegio de la Frontera Norte  ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4044-053X> Correo: iaguilar@colef.mx

3 Nacionalidad: española. Adscripción: El Colegio de la Frontera Sur  ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4571-7251> Correo: mmesa@ecosur.mx



Clasificada como competente internacional por Conahcyt



LICENCIA:
Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Resumen

En este trabajo se evalúa la eficiencia técnica (TE) en la producción de riego de tres cultivos: maíz, alfalfa, sorgo y plátano. Se analiza esa eficiencia en tres subregiones hidrológicas de México: Río San Juan (norte), Valle de México (centro) y Valle Bajo de Grijalva (Sur). La medición se realizó por ciclo agrícola (primavera-verano, otoño-invierno y perenne), y por tamaño de parcela. Se utilizó el análisis de frontera estocástica para probar si las habilidades del agricultor favorecen la eficiencia, con una función de producción que relaciona la tierra irrigada como elemento básico y un conjunto de variables explicativas socioeconómicas. Pese a limitaciones en los datos, los resultados contribuyen al conocimiento de TE en la agricultura de México. Indirectamente se reconoce la contribución de las áreas de riego, por lo que identificar su relevancia en términos económicos podría ayudar a definir estrategias para mejorar la producción agrícola y apoyar la gestión del agua en la agricultura.

Palabras clave: Eficiencia técnica, producción agrícola, análisis estocástico de frontera, uso agrícola del agua, subregión hidrológica.

Abstract

This work assesses the technical efficiency (TE) in agricultural production under irrigation of corn, alfalfa, sorghum, and plantain; the analysis is conducted for three hydrological subregions of Mexico: Río San Juan (north), Valley of Mexico (center) and Valle Bajo de Grijalva (South). The measurement was carried out by agricultural cycle (spring-summer, autumn-winter and perennial), and by land size. We use stochastic frontier analysis to corroborate whether the farmer's skills favor efficiency, with a production function that relates irrigated land as a basic element, and a set of explanatory socioeconomic variables. Despite limitations in the data, the results contribute to the knowledge of TE in Mexican agriculture. Indirectly, the contribution of irrigation is recognized, so identifying their economic relevance could help define strategies to improve agricultural production and support water management in agriculture.

Keywords: Technical efficiency, agricultural production, stochastic frontier analysis, agricultural use of water, hydrological sub region.

Introducción^{4*}

Más de la mitad del territorio mexicano es semiárido con marcadas desigualdades. En la región norte, 30% del territorio, se da el 4% del escurrimiento superficial, mientras que el 50% del escurrimiento se da en la región sureste, que representa el 20% del territorio (Cervantes-Ramírez, 2002; World Bank [WB], 2009). A la desigualdad en la distribución y disponibilidad del agua, habría que agregar las variaciones en los ciclos hídricos a causa de fenómenos como el Niño y el cambio climático, retos que el sector agrícola debe afrontar en escenarios complejos dados los matices económicos y sociales que existen entre regiones (Soto-Mora, 2003).

Estas disparidades también se reflejan en la productividad e infraestructura. La agricultura contribuye con más del 8% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, y ocupa el 23% de la población activa (Olvera, 2014). Considerando 22 millones de hectáreas (ha) de superficie agrícola, el 29% se da bajo riego cuyo rendimiento es superior a la agricultura de temporal (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2015; WB, 2009; Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2016). En la zona norte, la agricultura se ha desarrollado a mayor escala y la producción se orienta al mercado. En la zona sur, sureste, las unidades productivas son de menor escala, funcionan con baja tecnificación y una importante proporción de esta producción se orientan al autoconsumo.

A la fecha, es escasa la información de la eficiencia técnica (TE por sus siglas en inglés) o una medida de corte económico que ilustre el nivel de eficiencia en la agricultura, asunto muy relevante en economías emergentes como México (Scheierling *et al.*, 2014). En este trabajo se adopta una definición de TE como el porcentaje de desviación al nivel máximo que podría alcanzar la producción en cada unidad de producción (UP), es una desviación con respecto a una frontera que representa las mejores prácticas de producción (Kumbhakar & Knox, 2000), asumiendo que la producción agrícola es altamente estocástica debido a factores aleatorios como el clima y otras variables naturales.

El presente estudio explora la eficiencia técnica de la producción agrícola en México. El análisis se enfoca en cuatro cultivos: maíz, alfalfa, sorgo y plátano, en tres regiones: Norte, centro y el Sureste de México. Estos cultivos son representativos de la agricultura de riego en las regiones formadas por las microcuencas de Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva. Esta es una comparación de cómo los agricultores utilizan sus insumos en cultivos clave, dada su tecnología, experiencia en la actividad y otros factores socioeconómicos del agricultor.

La pregunta central es ¿qué factores limitan la eficiencia en la agricultura? El aporte a la literatura se da si se considera que la mayoría de los análisis de productividad y eficiencia se circunscriben en torno a factores tradicionales (tierra, trabajo, capital, insumos) sin introducir otras variables que pudieran ser relevantes (Bravo-Ureta *et al.*, 2007; Bravo-Ureta *et al.* 2015). A manera de hipótesis, asumiendo homogeneidad en los sistemas y las técnicas de riego, y sin distinguir el origen y la calidad del agua, se espera que factores como la experiencia, años de escolaridad, edad, tenencia de la tierra, y la habilidad del productor tengan relación significativa con TE.

De confirmar su significación estadística, los resultados del estudio podrían contribuir a la política agrícola a través de la identificación de variables clave para lograr mejores recomendaciones y diseñar estrategias de apoyo a la producción agrícola, a una mejor utilización de los recursos como el agua de riego, y a la existencia de las instituciones que promuevan su uso sustentable (Ostrom, 1990), asumiendo que los agricultores más eficientes son más competitivos. A la fecha no existe para México un estudio similar al aquí presentado.

4 * Los autores reconocen con enorme gratitud el apoyo brindado por la M. C. Marina Celis Rodríguez durante la sistematización de los datos en el laboratorio de INEGI. Se agradecen los dictámenes anónimos.

En las siguientes secciones del escrito se presentan los antecedentes teóricos relacionados con TE, luego se describen los datos disponibles utilizados y el método de estimación de TE. Posteriormente se presentan los resultados, se discute su pertinencia, y se agregan las conclusiones respectivas.

1. Revisión de literatura

El análisis económico ha ligado la eficiencia con mejoras en las habilidades del productor, a diferencia de la productividad (producto por unidad de insumo) que ha sido asociada con innovaciones tecnológicas (Fare *et al.*, 1985). Aunque la productividad agrícola implícitamente incluye a la eficiencia como componente principal (Fuglie & Schimmelpfennig, 2010).

Sin embargo, dada la necesidad de generar recomendaciones de política precisas, es importante separar las habilidades del productor y las innovaciones tecnológicas (Fare *et al.*, 1985; Coelli *et al.*, 2005), es decir, aislar el efecto de la eficiencia. Las variables relacionadas con las habilidades del productor pueden explicar TE, aunque a la fecha haya pocos estudios que midan esta relación en la producción agrícola de riego, sobre todo en países con economías emergentes (Bravo-Ureta *et al.*, 2007). La mayoría de los estudios están basados en países desarrollados, en Asia (Radlińska, 2023; BATESSE & Coelli, 1995; Ali & Gupta, 2011; Bhattacharyya & Pal, 2011; Chen & Song, 2008; Wang & Rungsuriyawuiboorn, 2010), y África (Paw & Punt, 2007; Kibaara & Kavoi, 2012). En contrapartida, existe una gran cantidad de trabajos que estudian la eficiencia agronómica y la productividad del agua, y sugieren elementos para medirlas (Zheng *et al.* 2018; Giordano *et al.*, 2017; Scheierling & Tréguer, 2018), atendiendo a refinaciones de carácter técnico (Bouman, 2007; Liu *et al.*, 2019), y social (Harimaya & Kagitani, 2022; Molden *et al.*, 2010; van-Halsema & Vincent, 2012). Así, parece que la mayoría de los estudios respecto al uso del agua en la agricultura se enfocan a su eficiencia agronómica y productividad, no tanto a su eficiencia técnica o económica.

Uno de los estudios que más luz ha arrojado sobre la eficiencia económica del uso del agua en la agricultura es el meta análisis desarrollado por Bravo-Ureta *et al.* (2007) que describe 107 artículos publicados en revistas de lengua inglesa alrededor del mundo. Estos autores revisaron artículos que analizan cultivos como arroz, maíz, trigo, granos y actividades pecuarias, y que incluyen el agua de lluvia, si el agua usada se mide por la cantidad de horas, por el porcentaje o por la superficie del área irrigada, etc. El desglose de los artículos se da en función de su área de estudio (7 regiones en el mundo), el nivel de ingreso del país y la forma funcional del modelo.

En general, sus resultados muestran que existe una TE promedio en la agricultura de riego que va del 70% al 75%, mientras que para las actividades pecuarias este porcentaje se eleva hasta un 84% el cual corresponde a la producción de leche. Las actividades que más han sido analizadas, o que cuentan con más estudios publicados son: la producción pecuaria (carne), el arroz, el trigo y la producción lechera. La zona más estudiada es Asia (113 artículos), seguida de África (39), y Europa-Oceanía (23). América Latina solo registra dos artículos, los cuales arrojan el promedio de TE más bajo (61%) entre todas las demás regiones, siendo más elevada en la zona de Europa (83%) y Norte América (81%). En cuanto a su metodología, la mayoría de las investigaciones han sido de corte paramétrico, estocásticas, y utilizan en mayor medida la forma funcional Cobb-Douglas y los datos de corte trasversal.

Desafortunadamente los trabajos de Bravo-Ureta *et al.* (2007, 2015) no arrojan mucha luz respecto a cómo las características socioeconómicas de los agricultores influyen en la TE. No obstante, sí se tiene registro de otras investigaciones que enfatizan la relevancia de factores como el nivel educativo, la edad y la experiencia (Karagiannis *et al.*, 2002; BATESSE & Coelli, 1995). En teoría se propone que estas

variables se relacionan positivamente con una eficiencia creciente (Karagiannis *et al.*, 2002; Kumbhakar & Lovell, 2000).

Respecto a México, a la fecha se identifican pocos estudios similares al aquí presentado, tres trabajos relevantes son Becerra-Perez *et al.* (2016), Sun *et al.* (2016), y Altamirano *et al.* (2019). Los primeros estimaron el nivel de TE para la producción de maíz en Sinaloa. Los segundos estimaron la TE asociada a compartir el costo de bombeo (electricidad) por extraer el agua de riego. Ambos trabajos incluyen la variable agua y electricidad dentro de la función de producción. El tercer trabajo intentó medir la TE para evaluar la agricultura de regadío de 19 DR para lo cual utilizó un método de programación matemática. Este trabajo identifica algunas variables que podrían incidir en las eficiencias en infraestructura de riego, producción agrícola, manejo financiero de los DR y un elemento ambiental ligado a la degradación del suelo agrícola, además de los rendimientos de escala de los DR analizados.

En suma, aunque existe investigación sustancial de la TE en la producción agrícola de riego a nivel global, aún permanecen algunas áreas que requieren mayor investigación, sobre todo en países como México, más aún si se compara la producción a pequeña y gran escala, el tipo de tenencia de la tierra, y los factores socioeconómicos de los productores. En este sentido, este trabajo busca aportar a la literatura, considerando además las diferencias regionales que existen en un país mega diverso y en vías de desarrollo como México.

2. Metodología

2.1 El modelo teórico

El Análisis de Frontera Estocástica (SFA por sus siglas en inglés), propuesto por Aigner, Lovell y Schmidt (1977) y Meeusen y Van der Broeck (1977) se implementa mediante dos ecuaciones, la primera es la función de producción, y la segunda es la ecuación de eficiencia, utilizando la orientación por el lado del producto (output-oriented). Al estimar la función de producción en forma estocástica permite definir de manera gráfica la frontera que se forma con los puntos de eficiencia individuales, donde los eventos aleatorios desplazan la posición de los productores en torno a la frontera donde se ubican los productores más eficientes. Conforme aumenta su grado de ineficiencia (0 al 100%), estos se alejan de dicha línea o frontera. Así, adicional a los insumos para la producción, el modelo permite incluir variables que explican el grado de eficiencia tales como la experiencia, el nivel educativo, etc., a la vez que permite comparar las diferencias individuales de cada productor en una especificación flexible. El modelo básico se expresa en la Ecuación (1) donde $f(\cdot)$ expresa la función de producción en datos de corte transversal, y_i denota la producción del i -ésimo individuo $i=1,2,3 \dots n$; x_i es el vector de insumos, y β_i los coeficientes de la función de producción.

$$y_i = f(X_i, \beta_i) + v_i - u_i \quad \text{Ecuación (1)}$$

El término de error (llamado error compuesto $\varepsilon_i = v_i + u_i$) se divide en dos partes: v_i que captura la parte estocástica de la producción (positiva o negativa) y u_i que captura el grado de ineficiencia técnica, restringida a ser negativa en una función de producción, y positiva si se estima una relación de costos. Al añadir un supuesto de distribución es posible obtener un enfoque empíricamente tratable. El supuesto clave es sobre v_i como término aleatorio ($v_i \sim N[0, \sigma_v^2]$), simétrico, normalmente distribuido con media cero y varianza constante (homocedástica); y también sobre u_i como un error independiente de v_i , de

un solo lado, normalmente distribuido con media cero y varianza constante ($u_i \sim |N[0, \sigma_u^2]|$). Así, u_i indica la ineficiencia o desviación del producto del nivel más alto (frontera) de desempeño de la industria. La estimación está diseñada para desarrollarse en dos etapas, primero se estiman los parámetros de tecnología los cuales reflejan la máxima cantidad de producto que puede ser generado, y los estimadores de σ_u y σ_v , parámetros de distribución de los términos de error en el modelo. Después, con los coeficientes β , en la segunda etapa se estima el error compuesto. Sin embargo, este enfoque es inconsistente con los supuestos de ineficiencia pues al estimar u_i se deben separar los efectos heterogéneos de la unidad productiva (Coelli *et al.*, 2005). Una estimación conjunta genera estimaciones más eficientes. Battese y Coelli (1995) sugirieron un procedimiento donde u_i está en función de un vector de variables específicas a la unidad productiva y a un error aleatorio, asumiendo eficiencia asignativa y eliminando la condición de primer orden. La ventaja de este procedimiento es que genera estimadores más eficientes al reducir el error estándar. La expresión que se deriva de la Ecuación (1), al especificar el modelo en logaritmos naturales, es la forma funcional Cobb-Douglas (Ecuación 2),

$$y_i = f(x_i, \beta_i) e^v TE_i \tag{Ecuación 2}$$

donde el término de eficiencia técnica será $TE_i = e^u = e^{-[E(u_i | \varepsilon_i)]}$, y $E(u_i | \varepsilon_i)$ es la media de la distribución condicional del término de ineficiencia u_i . Después de asumir que x_i no se correlaciona con v_i es posible aislar TE_i , estimando así las ineficiencias de cada productor mediante una especificación no lineal (Ecuación 3),

$$TE_i = \frac{y_i}{f(x_i, \beta_i) e^v} \leq 1 \tag{Ecuación 3}$$

donde v_i es no observable y se reemplaza por $\hat{\varepsilon}_i$. Como resultado, x_i y los valores esperados forman la frontera de producción, y las desviaciones ocurrirán por eventos aleatorios y por TEi (Kumbhakar & Knox, 2000). Finalmente, dado que solo $\hat{\varepsilon}_i$ es observable, u_i se predice restringiendo las distribuciones de v_i y de u_i . Así, la Ecuación (3) se expresa como

$$u_i^{TE} = g(z_i, \alpha) + e_i \tag{Ecuación 4}$$

donde z_i es un vector de variables de eficiencia del i-ésimo productor, α es el vector de parámetros a estimar, y e_i es un término de error. Entre más grande sea u_i más grande la ineficiencia, y si un agricultor está en la frontera, esto significa que es técnicamente eficiente y $u_i = 0$, $\hat{\varepsilon}_i = v_i$. En otras palabras, si existen efectos de TE, $u_i > 0$ y la distribución de $\hat{\varepsilon}_i$ será asimétrica negativa (Kumbhakar & Knox, 2000) donde la media es menor a la moda y tiene una cola larga a la izquierda.

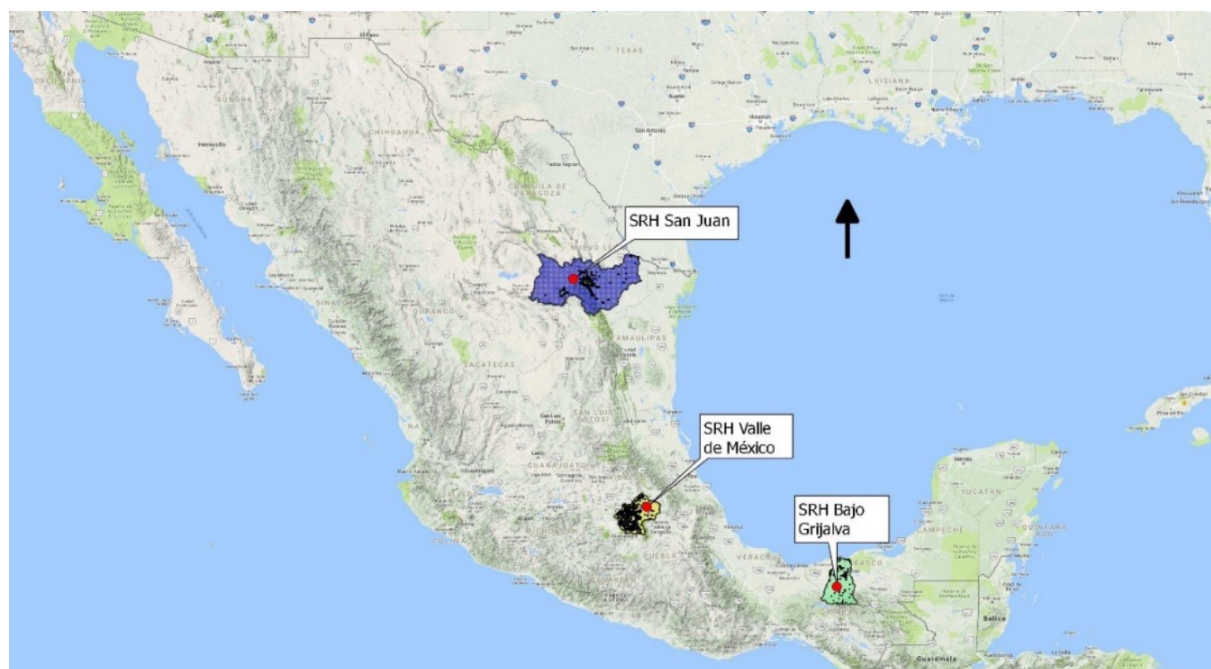
2.2 Datos

Los datos provienen del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2007), organizados por Unidad de Producción (UP) y sistematizados en el Laboratorio de Microdatos del mismo INEGI. No fue posible trabajar con los datos del censo más reciente, que fue liberado en el 2022 debido a que cuando se elaboró esta investigación (2020), dicha información no estaba disponible.

Vale la pena enfatizar que, debido a los criterios de confidencialidad aplicados a la información de los censos del INEGI, la investigación a nivel microdatos solo se puede hacer en el laboratorio del INEGI en Ciudad de México. La principal ventaja al trabajar en el laboratorio de microdatos es que se tiene acceso a la información de cada individuo censado, sin embargo por confidencialidad se restringe la manipulación de los datos más allá de los códigos que se puedan generar en el mismo laboratorio, con el costo y el tiempo que implica. Estas limitantes son importantes para poder actualizar esta investigación. Pero no obstante las restricciones, este trabajo sienta las bases metodológicas para una actualización de la investigación en este tema.

La importancia de estudiar los cultivos representativos de la producción agrícola en tres subregiones hidrológicas (Figura 1), deriva de la importancia del agua como insumo esencial para este tipo de producción. Las subregiones seleccionadas son representativas de distintas condiciones climáticas, hidrológicas y socioeconómicas del país.

Figura 1. Localización de las subregiones hidrológicas de estudio



Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Los cultivos representativos para la Sub Región Hidrológica Río San Juan fueron: Alfalfa verde, maíz grano, y sorgo grano. Para la Sub Región Hidrológica Bajo Grijalva (SRH-BG) se definió como cultivo representativo el Plátano. Y para la Sub Región Hidrológica Valle de México (SRH-VM): Alfalfa verde, maíz grano, y maíz forrajero. Esos registran la mayor cantidad de observaciones en cada SRH, y la mayor consistencia estadística.

La información del Censo 2007 se desglosó para los cultivos más importantes y representativos para tres subregiones hidrológicas por superficie sembrada, valor producido, y ciclo agrícola, en variables como: superficie sembrada, superficie cosechada, volumen de producción, tipo de tenencia (privada-ejidal), y tipo de régimen (riego-temporal). La variable precios se obtuvo del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2015), el cual pertenece a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, y Desarrollo Rural (SAGARPA), y concentra datos a nivel nacional, por estado y por municipio.

Se depuró la base de datos, al considerar solo los municipios de las cuencas analizadas, el número de observaciones se redujo de 4'847,818 a nivel nacional, al solo considerar los municipios de las cuencas aquí analizadas se redujo a 482,846 observaciones (UP), de las cuales 61,934 pertenecen al Río San Juan, 284,606 al Bajo Grijalva, y 136,306 al Valle de México (Tabla 1).⁵ Se repitió el procedimiento para cada ciclo agrícola, en cada SRH, para así obtener 409,242 UP para el ciclo primavera-verano, 55,537 UP para el ciclo otoño-invierno y 188,837 UP para cultivos perennes. De forma individual, para Río San Juan se tuvo un total de 40,405 UP en primavera-verano, 5,307 UP para otoño-invierno y 9,020 UP en perennes. Por su parte el Bajo-Grijalva tuvo 29,283 UP en primavera-verano, 4,442 UP en otoño-invierno y 70,044 UP en perennes. Finalmente, el Valle de México presentó 135,001 para el ciclo primavera-verano, 9,572 en otoño-invierno, y 16,930 para el ciclo agrícola perennes.

Se construyó la variable: Mano de Obra, resultado de sumar la mano de obra familiar y la contratada. Las variables utilizadas se describen en la Tabla 1. Tanto la variable dependiente: "Volumen producido" en toneladas por hectárea (t/ha), como las otras variables, se ponderaron por la superficie cosechada con el fin de tener un valor relativo por hectárea. Es notable como la media de la superficie cosechada tiene una variación muy grande de región a región, siendo la del Río San Juan la mayor. El tamaño de las superficies de temporal y de riego también muestran gran variabilidad, con promedios más altos en la superficie de temporal, resaltando el Valle de México. El Bajo-Grijalva tiene una situación particular dado que no reporta superficie de riego, esto se debe a que el riego en la zona se genera después de drenar el agua hasta lograr la humedad adecuada. A esto se le conoce como unidades de riego con secano, o distritos de temporal tecnificado (DTT). Respecto al tamaño del predio por tipo de propiedad, ejidal o privada, esta última es más grande en Río San Juan, situación contraria para el centro y sur del país, donde predomina el minifundio. Es notoria la baja utilización de fertilizantes químicos y mano de obra en cada región.

Respecto a las variables de tipo socioeconómico se observa algo característico en la edad del jefe de la UP, en todos los casos el promedio está por arriba de los 40 años. En el porcentaje de hablantes de lengua indígena destaca la ausencia en Río San Juan, y en el Bajo-Grijalva registra un porcentaje elevado. En el número de dependientes económicos por UP, el Bajo-Grijalva tiene el registro más alto (3.3), mayor incluso que la media nacional, mientras que en Río San Juan tiene el registro más bajo (1.5). El nivel educativo (años de escuela) es similar en todos los casos. Finalmente, la proporción de UP que utilizan crédito y fueron beneficiados con Procampo muestran porcentajes similares, aunque ligeramente inferior en la zona del Bajo-Grijalva.

Tabla 1. Resumen de las variables utilizadas en la estimación de la eficiencia técnica.

Variable	Nacional 4'847,818 Obs		Total 3 SRH: 482,846 Obs.		Río San Juan: 61,934 Obs		Bajo-Grijalva: 284,606 Obs		Valle de México: 136,306 Obs	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
Superficie cosechada (ha)	20.0	297.2	16.9	263.3	85.8	727.3	8.2	31.1	3.5	27.8
Superficie de temporal (ha)	5.1	56.9	5.5	95.5	13.0	264.4	5.2	14.1	2.8	10.8

(continúa...)

⁵ Las listas de municipios que integran cada SRH se pondrán a disposición de los lectores y revisores en ResearchGate, en el perfil del autor principal.

(...continúa)

Variable	Nacional 4 847,818 Obs		Total 3 SRH: 482,846 Obs.		Río San Juan: 61,934 Obs		Bajo-Grijalva: 284,606 Obs		Valle de México: 136,306 Obs	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
Superficie de riego (ha)	1.1	25.4	0.8	32.0	5.6	89.0	0.0	1.5	0.2	2.3
Superficie ejidal (ha)	7.1	148.2	5.3	75.8	13.9	210.8	4.8	11.5	2.4	10.1
Superficie privada (ha)	12.3	252.5	11.3	253.6	73.5	706.0	2.9	28.6	1.1	21.7
Uso de fertilizantes (ha/UP)	1.7	21.9	0.9	14.4	3.6	37.9	0.1	3.3	1.3	7.2
Mano de obra (número/UP)	1.8	4.6	1.2	2.9	0.8	4.0	1.0	2.5	1.7	3.1
Edad de jefe de familia (años)	43.5	23.7	43.0	22.5	40.1	28.5	42.3	19.3	45.8	25.2
Habla lengua indígena (%UP)	0.2	0.4	0.3	0.5	0.0	0.1	0.5	0.5	0.0	0.2
Dependientes económicos (número/UP)	2.5	2.5	2.7	2.6	1.5	2.0	3.3	2.7	1.9	2.2
Educación (años de escuela)	10.0	1.8	10.1	1.9	10.0	1.7	10.2	2.0	9.9	1.8
Crédito (% UP)	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1
Procampo (% UP)	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2	0.4	0.3	0.5

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Agropecuario 2007: México

Al final, se construyeron estratos por tamaño de UP con base en la información utilizada para la entrega del programa “ProAgro Productivo bajo el régimen de riego” donde: Estrato 1: hasta 0.2 ha; estrato 2: > 0.2 hasta 5 ha; y el estrato 3: UP con superficies sembradas mayores a 5 ha.

2.3 El Modelo Empírico

El modelo propone a la producción agrícola en función de la superficie cosechada (riego y temporal), según la forma funcional Cobb Douglas, en cada ciclo agrícola (Ecuación 5).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 SR_i + \beta_2 ST_i + \beta_3 F_i + \beta_4 MO_i + v_i - u_i^{TE} \quad \text{Ecuación (5)}$$

donde y_i es la producción en toneladas por hectárea por ciclo agrícola (primavera-verano, otoño-invierno, o perenne) para el i -ésimo productor ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Superficie bajo riego (SR_i) y la superficie bajo temporal (ST_i) es el número de hectáreas que el productor cosechó en el periodo del levantamiento de la encuesta. Todas las variables se transforman a logaritmos naturales.

Las variables F_i que es la superficie fertilizada, y MO_i la mano de obra utilizada por hectárea, fueron incluidas en las primeras versiones del modelo; sin embargo, no resultaron útiles dado que propiciaban un desajuste en el sesgo de los errores lo que impedía estimar los efectos de la ineficiencia, según las propiedades deseadas en el SFA.

$$u_i^{TE} = \alpha_0 + \alpha_1 ed_i + \alpha_2 ag_i + \alpha_3 dp_i + \alpha_4 pp_i + \alpha_5 pe_i + \alpha_6 pc_i + \alpha_7 cr_i \quad \text{Ecuación (6)}$$

La TE se propone en la Ecuación (6), donde u_i^{TE} es la ineficiencia técnica del productor; ed es su nivel de educación (años de escuela); ag es la edad del productor, dp es el número de dependientes por cada UP; pp y pe indican el número de hectáreas que tiene el productor bajo el régimen de propiedad privada o ejidal, respectivamente; pc señala si la UP cuenta con el apoyo gubernamental del Procampo; y finalmente cr indica si la UP tiene crédito con alguna institución financiera. Estas dos últimas variables son binarias (*dummies*). Las variables educación, edad y número de dependientes, son condiciones sociales que se relacionan con las habilidades que tienen los productores para desarrollar mejor su trabajo. Por ejemplo, tener una familia grande generaría una mayor necesidad de ingresos, situación que podría afectar la eficiencia.

3. Resultados

Dadas las características del modelo, es posible cierto grado de heteroscedasticidad y la presencia de valores atípicos, aunque estos problemas son poco severos si la muestra tiende a las características deseadas de normalidad y convergencia. La característica necesaria para medir la TE es que exista una leve asimetría a la izquierda (*skewness* negativo), condición teórica deseable para evaluar la TE (Kumbhakar *et al.*, 2015). Este punto se refuerza con el trabajo de Nandy *et al.* (2021) quienes a través de un meta-análisis de más de 100 estudios sostiene que en la medición de TE el tamaño de muestra no es un factor relevante, y si en cambio las diferencias en la tecnología según el tipo de cultivo (Adom & Adam, 2020).

En el análisis por cultivo, se evaluó una regresión de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para indagar la asimetría y la normalidad de los errores. Una asimetría positiva permite solo estimar TE por mínimos cuadrados corregidos (COLS por sus siglas en inglés) agregando todas las variables en una sola ecuación. Donde, no es necesario utilizar dos ecuaciones con la desventaja es que no se conoce el impacto los predictores de z_i

Se realizaron pruebas con alrededor de 20 cultivos, los más importantes en cada región por superficie cultivada y valor generado, sin embargo, en la mayoría de los casos los datos no permitieron un buen ajuste. La asimetría negativa de los errores no se lograba, o no alcanzaba la convergencia al correr las regresiones. Una vez valorada la posibilidad de medir TE, esta se evaluó siguiendo a Kumbhakar *et al.* (2015) mediante máxima verosimilitud. Adicionalmente, se estimó el coeficiente σ_v^2 el cual fue significativo al 1%, e indica la existencia de ruido en los modelos (ver Tabla 2), y que el supuesto del término de error compuesto es correcto.

Tabla 2. Test para probar el término de error en el modelo: Sigma_V_sqrt

	Ciclo	Coefficientes	Desv. Est	t	P> t	(95% Intervalo de confianza)	
Río San Juan							
Maíz grano	P-V	0.101297	0.025920	3.91	0.000	0.06134	0.167265
	O-I	0.117846	0.041524	2.84	0.005	0.05907	0.235096
Alfalfa	P-V	0.008737	0.002687	3.25	0.001	0.00478	0.01596
	Perennes	0.582961	0.255379	3.28	0.022	0.24703	1.375712
Sorgo	P-V	0.024417	0.004248	5.69	0.000	0.17306	0.02444

(continúa...)

(...continúa)

	Ciclo	Coefficientes	Desv. Est	t	P> t	(95% Intervalo de confianza)	
Valle de México							
Maíz grano	P-V	1.322882	0.24274	5.45	0.000	0.923274	1.895444
Alfalfa	Perenne	5.147535	1.43265	3.59	0.000	2.983285	8.881857
Maíz forrajero	P-V	0.092854	0.13228	0.70	0.483	0.005690	1.515188
Bajo Grijalva							
Plátano	Perenne	0.042769	0.02843	1.5	0.132	0.011622	0.157383

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Agropecuario 2007: México

Las Tablas 3, 4 y 5 muestran los valores de TE estimados por cultivo, por ciclo agrícola y por estrato o tamaño de parcela. Para facilitar su lectura solo se presentan los coeficientes de la función de producción con significancia estadística. La Tabla 3 presenta una TE global estimada por cultivo sin considerar el tamaño de parcela.

Tabla 3. Estimaciones de eficiencia técnica por cultivo y ciclo agrícola en las tres SRH

Cultivo	Estrato	Río San Juan			Valle de México		Bajo Grijalva
		P-V	O-I	Perennes	P-V	Perennes	Perennes
Maíz grano	1				0.70		
Maíz grano	2	0.75	0.78		0.58		
Maíz grano	3	0.80	0.73		0.59		
	Global	0.77	0.76		0.59		
Alfalfa verde	1	0.91					
Alfalfa verde	2	0.90		0.93		0.84	
Alfalfa verde	3	0.92		0.97		0.88	
	Global	0.91		0.93		0.84	
Sorgo grano	2	0.75					
Sorgo grano	3	0.79					
	Global	0.79					
Maíz Forrajero	1				0.95		
Maíz Forrajero	2				0.94		
Maíz Forrajero	3				0.92		
	Global				0.94		
Plátano	2						0.72
Plátano	3						0.95
	Global						0.77

Notas: Estrato 1: UP ≤ 0.2 ha; Estrato 2: > 0.2 y ≤ 5 ha; yEstrato 3: UP > 5 ha

Ciclo agrícola: P-V: primavera-verano; O-I: otoño-invierno; y PER: perennes

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Agropecuario 2007: México

La Tabla 4 presenta los coeficientes de las variables del modelo empírico. Importante subrayar que solo se incluye maíz grano y alfalfa en las regiones Río San Juan y Valle de México por ser los únicos cultivos que registraron datos con valores representativos y comparables en estas dos SHR. Es decir, el Bajo Grijalva no tiene datos suficientes para establecer esa comparación en los cultivos aquí señalados.

Tabla 4. Estimaciones de eficiencia técnica para maíz grano y alfalfa en las SRH Río San Juan y Valle de México.

	Río San Juan				Valle de México			
	P-V		O-I		P-V		Perennes	
	Coef.	Error Est	Coef.	Error Est	Coef.	Error Est	Coef.	Error Est
Maíz grano								
Riego	0.15***	0.049	0.02	0.075	0.10***	0.016		
Temporal			-0.06	0.090	0.09***	0.022		
Predictores de eficiencia (Zi)								
Educación	-0.08	0.747	-0.55	1.622	0.16	0.109		
Edad	-4.28**	2.084	-0.13	2.477	1.64***	0.268		
Dependientes económicos	0.12	0.333						
Propiedad Privada	-0.21	0.333						
Propiedad Ejidal	0.43	0.360						
Procampo	0.48	1.188	1.61	1.316				
Crédito	-61.0	3703460	-57.0	16464				
Alfalfa								
Riego	0.01	0.021				-0.07	0.091	
Temporal						-0.05	0.075	
Predictores de eficiencia (Zi)								
Educación	0.99	0.985				-2.20*	1.313	
Edad	0.90	1.748				-10.7*	5.888	
Propiedad Privada						-1.00	1.170	
Propiedad Ejidal						-0.19	0.239	

Nota: Códigos de Significancia: **** 0.01 *** 0.05 ** 0.1

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Agropecuario 2007: México

Por la misma razón de representatividad y suficiencia de datos, la Tabla 5 solo presenta los coeficientes de TE para maíz forrajero, sorgo grano y plátano en las tres subregiones hidrológicas analizadas en este estudio.

Tabla 5. Estimaciones de eficiencia técnica para maíz forrajero, plátano y sorgo en las SRH Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva

	Río San Juan		Valle de México		Bajo Grijalva	
	P-V		P-V		Perennes	
	Sorgo grano		Maíz forrajero		Plátano	
	Coef.	Error Est	Coef.	Error Est	Coef.	Error Est
Riego	0.031	0.026	0.05***	0.018	0.33***	0.000
Temporal	-0.002	0.016	-0.04**	0.017		
Predictores de eficiencia (Zi)						
Educación	1.43***	0.411	4.009	6.323	0.84	0.801
Edad	5.33***	1.091	13.88***	12.38	17.7***	4.134
Dependientes económicos	0.47***	0.146				
Procampo	1.83***	0.545				
Crédito	0.80**	0.332				

Nota: Códigos de Significancia: **** 0.01 *** 0.05 ** 0.1

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Agropecuario 2007: México

4. Discusión

Las variables más relevantes en este trabajo son las relacionadas a la TE. Dada la limitante de la base de datos que no reporta la cantidad de agua utilizada para cada cultivo, esta se incluye de manera indirecta en la función de producción como la superficie (ha) que cada UP tiene bajo riego. Esta es una restricción importante, no obstante, hay evidencia como otros trabajos han modelado el uso de agua como porcentaje de la superficie bajo riego (Battese & Coelli, 1992; Battese & Tessema, 1993; Jaime & Salazar, 2011; Karagiannis & Sarris, 2005; Larson & Leon, 2006; citados en Bravo-Ureta, 2015), o directamente como el área agrícola irrigada (Balcombe *et al.*, 2006; Adhikari & Bjorndal, 2012; citados en Bravo-Ureta, 2015; Yang, *et al.* 2020). El promedio de TE para los estudios que utilizan el porcentaje de la superficie bajo riego es de 68.7% (Bravo-Ureta, 2015) mientras que Balcombe *et al.* (2006) reporta un 77%, y Adhikari & Bjorndal (2012) un 48%. Por otro lado, Altamirano *et al.* (2019) reportan un TE de 66% para el distrito de riego Bajo Río San Juan el cual forma parte de las SRH aquí analizadas. Estos promedios van en línea con los resultados obtenidos en este trabajo.

A partir de la Tabla 3, los niveles de TE son más elevados en la región del Río San Juan. Desafortunadamente, no fue posible comparar otros cultivos por región dadas las limitantes en los datos o por la falta de ajuste en el término de error. Se rescata el hecho que la región norte registra los mayores niveles de eficiencia agronómica en extracción, conducción de agua y productividad (t/m³), además de tener el mayor porcentaje de superficie regada con tecnología de aspersión y goteo (Mesa-Jurado *et al.*, 2020). Esto es, existe una relación positiva entre una mayor tecnificación y eficiencia agronómica, y una mayor TE. La segunda generalidad relevante estriba en el hecho de que la TE tiende a crecer conforme se incrementa la superficie cultivada. Este resultado tiene sentido económico muy claro, indica que la escala contribuye a lograr una mayor eficiencia. Un mayor tamaño de la UP impulsa que el rendimiento (t/ha) hacia el nivel óptimo de escala. Un último punto que se deriva de la Tabla 3 es que al comparar TE por cultivo, la alfalfa tiene el más alto registro. Esta situación deberá juzgarse con cuidado pues podría llevar a la recomendación ingenua de impulsar ese cultivo; sin embargo, la alfalfa requiere grandes cantidades de agua y habría que observar más allá, por ejemplo, separando la medición de la eficiencia según la heterogeneidad de la tecnología empleada (Adom & Adams, 2020).

Las particularidades de los coeficientes reportados en las Tablas 4 y 5 en cuanto significancia y signo son, en términos generales, las esperadas. Llama la atención la relevancia que tiene la superficie de riego para explicar la producción del maíz grano, maíz forrajero y el plátano, y no tanto para explicar la producción de la alfalfa y el sorgo, insumos para la actividad pecuaria. Las elasticidades estimadas van del 0.15 y del 0.10 para maíz grano, 0.05 para maíz forrajero, y del 0.33 para plátano. Esto indica, por ejemplo, que al incrementar en un 10% la superficie de riego en cultivo del maíz grano conducirá a un aumento del 15% en la producción para la región del Río San Juan y del 10% para el Valle de México. Este mismo tipo de inferencia se puede hacer para el maíz forrajero en la región Valle de México. Resalta la elasticidad elevada del cultivo del plátano; por tanto, si se incrementa en 10% la superficie de riego en este cultivo, se espera que el volumen de producción se eleve en un 33%. Llama también la atención la no significancia estadística de la superficie de temporal para incrementar la producción, salvo en el caso del maíz en el valle de México, donde es incluso negativa quizás por la relación entre la cantidad de hectáreas sembradas bajo riego frente a las de temporal, ya que estas últimas son mayores en esa zona típicamente maicera, e incrementar esa superficie podría llevar a disminuir el rendimiento medio por hectárea.

Respecto a los predictores de TE, dado que estas variables explican en cierta forma el término de error, solo se discute su significancia estadística y su signo, en tanto que su magnitud no tiene un significado estadístico relevante. Así, un signo positivo en los coeficientes indica que el aumento en el

uso de esa variable propicia un aumento en la ineficiencia (o alternativamente, una disminución en la eficiencia). En caso contrario, un signo negativo indica un aumento en la eficiencia técnica.

Así, la variable edad pese a ser significativa en casi todos los casos analizados, no es consistente en cuanto a su signo. La edad refleja la experiencia del productor y es relevante para explicar TE (Coelli *et al.*, 2005), hasta cierto límite, a mayor edad la eficiencia se incrementa (después tendería a declinar). En este caso la interpretación del resultado de la variable edad se ajusta para explicar un aumento en la eficiencia técnica en maíz grano (P-V) en la región Río San Juan y alfalfa en el Valle de México. No tanto para entender TE en maíz grano en Valle de México (P-V), sorgo grano en Río San Juan, maíz forrajero en Valle de México y plátano en el Bajo Grijalva, cultivos donde la variable edad tiene signo positivo y por tanto se podría interpretar que a una mayor edad se incrementa la ineficiencia (o se disminuye la eficiencia). Esto último quizás porque el promedio de edad ya ha pasado la etapa más productiva en esas regiones, y tal vez los dueños de las tierras están envejeciendo.

Por su parte, el nivel educativo no resultó ser tan relevante salvo en alfalfa en el Valle de México y en sorgo grano en Río San Juan. Este último resultado es contraintuitivo pues se esperaba que una mayor educación generara una mayor eficiencia y no solo resultó no significativa en la mayoría de los casos, sino que además el signo es positivo para el sorgo en Río San Juan. Aquí una posible explicación es que la educación quizás haya abierto una mayor oportunidad a las personas con mayor educación formal y se están moviendo a empleos distintos a la agricultura, relegando esta actividad a las personas con la menor escolaridad, siendo este hecho estadísticamente relevante para la subregión Río San Juan que esta junto a una metrópoli importante como lo es la Zona Metropolitana de Monterrey.

Las demás variables buscaban probar el impacto de tener una familia más grande, apoyos de Procampo, crédito agrícola y tipo de propiedad de la tierra eran relevantes para explicar la eficiencia técnica. En la mayoría de los casos no resultaron estadísticamente significativos, salvo para producción de sorgo en la región del Río San Juan, aunque en este caso su signo es positivo, es decir, contribuyen a disminuir TE. Ante este resultado no se tiene una explicación razonable o totalmente fidedigna pues, como es bien sabido, el efecto podría ser positivo o negativo según se interprete el origen del recurso y el tamaño o escala del agricultor (Polo-Murcia & Teran-Chaves 2022). El hecho de que sea positivo para ese cultivo en esa región quizás se deba al tipo de productores que está apuntando este análisis, quizás agricultores con familia numerosa que cultiva productos básicos y que no maneja de forma adecuada las opciones que ofrece el crédito agrícola. Pero incluso se podría deber a la naturaleza misma de los datos utilizados en la estimación del modelo.

Todo lo anterior refleja una serie de descubrimientos importantes, pero también un conjunto de limitantes a considerar en estos resultados. No obstante, si bien esta evaluación es parcial precisamente por las limitantes antes mencionadas, los niveles de TE aquí reportados, en general están en consonancia con la evidencia empírica encontrada. Ciertamente, las diferencias se pueden deber a muchos factores, de los cuales en forma general aquí se esbozan dos, a reserva de abrir la discusión a la existencia de un mayor número de factores. Primero, la mayoría de los agricultores utilizan un recurso sobreexplotado y mal administrado. Si bien la disponibilidad natural (lluvias, agua superficial), los sistemas y las técnicas de riego, el origen y la calidad del agua condicionan la superficie sembrada y el patrón de cultivos, es importante gestionar adecuadamente el uso del agua. Segundo, la superficie sembrada está condicionada por la presión urbana, con el Valle de México como caso emblemático, restringiendo dicha superficie a lo largo del tiempo y propiciando el uso de aguas negras para el riego agrícola. Lo que resultaría interesante es abrir una agenda de investigación que cultivo por cultivo, en cada región, para cada ciclo agrícola y por tamaño de parcela, detalle con mayor precisión los factores que inciden en la TE en la agricultura.

Este trabajo ha pretendido enfocar la eficiencia en el uso del agua y en otros factores, sin embargo, es claro este es un campo que falta investigar con mayor detalle. Por ejemplo, sería interesante explorar TE según los niveles tecnológicos utilizados en los cultivos (Adom, 2020); también, con un mejor desglose de la variable mano de obra sería posible corroborar los hallazgos que muestran la relevancia de este factor en TE en áreas irrigadas (Pérez *et al.*, 2019), o bien hacer énfasis en un sector relevante como los granos básicos dada su importancia en la política alimentaria (López & Zazueta, 2020). Otro factor interesante a analizar sería el efecto generado por la disposición de capital o ingresos externos a la producción agrícola, y que en el caso de Colombia (Polo-Murcia & Teran-Chaves 2022) se muestra que tiene un efecto negativo en TE con productores a pequeña escala. México tiene una diversidad enorme de climas, suelos, tecnología, etc., y la producción agrícola es un mosaico que en cierta medida refleja las capacidades productivas de cada región. Hace sentido entonces explorar los distintos niveles de eficiencia pues entre más detallados se espera se logre una mejor orientación en el uso de los recursos (Dagar *et al.*, 2021), sobre todo cuando se trata de un recurso vital como es el agua (Yang *et al.*, 2020), lo que al final se espera redunde en mejoras en la producción agrícola.

Conclusiones

Este trabajo estima la eficiencia técnica en la actividad agrícola de México por región, ciclo agrícola, y tamaño de parcela, en algunos cultivos representativos del norte, centro y sur del país. Frente a otras estimaciones que utilizaron datos de encuestas in situ para tener la cantidad de agua consumida (m^3), específica para un solo cultivo, región o distrito de riego (Becerra-Pérez *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2016; Altamirano *et al.*, 2019); las estimaciones aquí reportadas utilizan la superficie bajo riego proveniente de datos secundarios (microdatos a nivel productor).

Pese a las limitaciones, las estimaciones son consistentes con la evidencia empírica y reflejan la importancia de TE. De acuerdo con el supuesto inicial, la experiencia o habilidades del productor son factores que favorecen TE.

La relevancia de este trabajo en términos de política pública es que permite medir algunos factores que determinan la eficiencia en la producción agrícola, y orientar la toma de decisiones para la implementación de políticas que fomenten el uso de factores que más influyen la eficiencia. Sin embargo, recordemos que este es solo un indicador que entre otras cosas señala la relevancia de la disponibilidad de agua como un elemento clave. Así, el procurar mejoras tener para una disponibilidad de agua sin restricciones podría conducir a un colapso o agotamiento del recurso. El cómo mejorar los ingresos de los agricultores y evitar la sobreexplotación del recurso es un reto. Las mejoras en la tecnología resuelven parcialmente el problema, la relevancia de este documento es que muestra algunas pistas que permiten juzgar el impacto de implementar mejoras en otras variables como el nivel educativo y la capacitación técnica, variables que mejoran la eficiencia técnica.

Al final, esta investigación no solo va en línea con los resultados de trabajos previos, sino que también contribuye al conocimiento de TE en un país con una economía emergente como México, mostrando hallazgos interesantes que permiten vislumbrar una agenda de investigación futura interesante para entender mejor los factores que explican la eficiencia agrícola.

Referencias

- Adom, P. K. & Adams, S. (2020). Decomposition of technical efficiency in agricultural production in Africa into transient and persistent technical efficiency under heterogeneous technologies. *World Development*, 129, 104907. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104907>
- Aigner, D., Lovell, C. A. K. & Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
- Ali, J. & Bardhan Gupta, K. (2011). Efficiency in agricultural commodity futures markets in India. *Agricultural Finance Review*, 71(2), 162-178. <https://doi.org/10.1108/00021461111152555>
- Altamirano, A., Valdez, J. B., Valdez, C., León, J. I., Betancourt, M. & Ozuna, T. (2019). Evaluación del desempeño de los distritos de riego en México mediante análisis de eficiencia técnica. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 85-121. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-04>
- Battese, G. E. & Coelli, T. J. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empirical Economics*, 20(2), 325-332. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01205442>
- Becerra-Pérez, L. A., López-Reyes, L. F. & Tyner, W. E. (2016). Characteristics that influence technical efficiency of corn production in Mexico. *Journal of Economics and Development Studies*, 5(3), 22-29. DOI: <https://doi.org/10.15640/jeds.v5n3a3>
- Bhattacharyya, A. & Pal, S. (2013). Financial reforms and technical efficiency in Indian commercial banking: A generalized stochastic frontier analysis. *Review of Financial Economics*, 22(3), 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.rfe.2013.04.002>
- Bouman, B. A. M. (2007). A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. *Agricultural Systems*, 93(1), 43-60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.04.004>
- Bravo-Ureta, B. E., Jara-Rojas, R., Lachaud, M. A., Moreira L., V. H. & Scheierling, S. M. (2015). *Water and Farm Efficiency: Insights from the Frontier Literature*. No 206076, 2015 AAEA & WAEA Joint Annual Meeting, July 26-28, San Francisco, California, Agricultural and Applied Economics Association, <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ags:aaea15:206076>
- Bravo-Ureta, B. E., Solís, D., Moreira López, V. H., Maripani, J. F., Thiam, A. & Rivas, T. (2007). Technical efficiency in farming: a meta-regression analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 27(1), 57-72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11123-006-0025-3>
- Cervantes-Ramírez, M. C. (2002). *Plantas de Importancia Económica En Las Zonas Áridas Y Semiáridas de México*. Instituto de Geografía. UNAM.
- Chen, Z. & Song, S. (2008). Efficiency and technology gap in China's agriculture: A regional meta-frontier analysis. *China Economic Review*, 19(2), 287-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2007.03.001>
- Coelli, T. J., Prasada Rao, D. S., O'Donnell, C. J. & Battese, G. E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. Springer <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/b136381>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Atlas del agua en México 2016*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Dagar, V., Khan, M. K., Alvarado, R., Usman, M., Zakari, A., Rehman, A., Murshed, M. & Tillaguango, B. (2021). Variations in technical efficiency of farmers with distinct land size across agro-climatic zones: Evidence from India. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128109>
- Färe, R., Grosskopf, S. & Lovell, C. A. K. (1985). *The Measurement of Efficiency of Production*. Springer Dordrecht.

- Fuglie, K. & Schimmelpfennig, D. (2010). Introduction to the special issue on agricultural productivity growth: a closer look at large, developing countries. *Journal of Productivity Analysis*, 33(3), 169-172. <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0168-0>
- Giordano, M., Turrall, H., Scheierling, S. M., Tréguer, D. O. & McCornick, P. G. (2017). *Beyond "more crop per drop": Evolving thinking on agricultural water productivity*. International Water Management Institute (IWMI), Research Report 169. The World Bank. https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub169/rr169.pdf
- Harimaya, K. & Kagitani, K. (2022). Efficiency, and economies of scale and scope in Japanese agricultural cooperatives. *Journal of Economic Structures*, 11(21). <https://doi.org/10.1186/s40008-022-00282-8>
- Horncastle, A. P., Kumbhakar, S. C. & Wang, H. J. (2015). *A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using stata*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139342070>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI). (2007). *Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007*: <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>
- Karagiannis, G., Tzouvelekas, V. & Xepapadeas, A. (2002). Measuring Irrigation Water Efficiency with a Stochastic Production Frontier: An Application to Greek Out-of-Season Vegetable Cultivation. En Pashardes, P.; Swanson, T. & Xepapadeas, A. (Eds.), *Current Issues in the Economics of Water Resource Management: Theory, Applications and Policies* (pp. 85-101). Springer Netherlands. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9984-9_5
- Kibaara, B. W. & Kaboi, M. M. (2012). Application of stochastic frontier approach model to assess technical efficiency in Kenya's maize production. *Journal of Agriculture, Science and Technology*, 14(1), 3-20. <https://www.ajol.info/index.php/jagst/article/view/113231>
- Kumbhakar, S. C. & Knox, C. A. (2000). *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174411>
- Kumbhakar, S., Wang, H.-J. & Horncastle, A. P. (2015). *A practitioner's guide to stochastic frontier analysis using stata*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139342070>
- Liu, J., Cheng, Y., Rahman, S. & Sriboonchitta, S. (2019). Technical efficiency analysis of agricultural production of BRIC countries and the United States of America: A copula-based meta-frontier approach. En: Kreinovich, V., Sriboonchitta, S. (eds) *Structural Changes and their Econometric Modeling. TES 2019. Studies in Computational Intelligence, vol 808*. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04263-9_55
- López, A. J. M. & Zazueta, I. M. S. (2020). Determinantes de la eficiencia técnica del sector de granos básicos en México: Un análisis de fronteras estocásticas. *Ciencia y Universidad*, (41), 5-30. https://revistasuas.com/index.php/Ciencia_y_Universidad/article/view/47/36
- Meeusen, W. & van Den Broeck, J. (1977). Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. *International Economic Review*, 18(2), 435-444. DOI: <https://doi.org/10.2307/2525757>
- Mesa-Jurado, A., Colin-Castillo, S. & Botero-Arias, J. (2020). De la escasez a la abundancia: Panorama actual del uso agrícola del agua en tres subregiones hidrológicas de México. En I. Aguilar-Benitez (Coord.), *La gestión de los usos del agua en tres subregiones hidrológicas: Río San Juan, Valle de México y Bajo Grijalva* (pp. 81-118). El Colegio de la Frontera Norte. [https://libreria.colef.mx/\(X\(1\)S\(hkqsoetakmj1bvlmoiOyq4rh\)\)/detalle.aspx?id=7754&AspxAutoDetectCookieSupport=1](https://libreria.colef.mx/(X(1)S(hkqsoetakmj1bvlmoiOyq4rh))/detalle.aspx?id=7754&AspxAutoDetectCookieSupport=1)
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A. & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023>
- Nandy, A., Singh, P. K. & Singh, A. K. (2021). Systematic review and meta-regression analysis of technical efficiency of agricultural production systems. *Global Business Review*, 22(2), 396-421. DOI: <https://doi.org/10.1177/0972150918811719>

- Olvera, M. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México. *Revista científica Ambiente y desarrollo*, 18, 23-36. DOI: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea>
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura, F. (2017). FAOSTAT <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The Evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>
- Pauw, K., McDonald, S. & Punt, C. (2007). Agricultural efficiency and welfare in South Africa. *Development Southern Africa*, 24(2), 309-333. <https://doi.org/10.1080/03768350701327236>
- Pérez Fernández, A., Caamal Cauich, I., Pat Fernández, V. G., Martínez Luis, D. & Reza Salgado, J. (2019). Influencia de adopción de tecnología y la mano de obra en la eficiencia productiva en el sector agrícola de México, 1979-2014. *Acta universitaria*, 29. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2019.1631>
- Polo-Murcia, S. M. & Teran-Chaves, C. A. (2022). ¿Cómo influye la diversificación de los ingresos rurales en la eficiencia técnica agrícola de los pequeños agricultores? Evidencia de Colombia. *Estudios Rurales*, 12(25), 1-19. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/181/1813123009/>
- Radlińska, K. (2023). Some theoretical and practical aspects of technical efficiency: The example of European Union agriculture. *Sustainability*, 15(18), 13509; DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813509>
- Scheierling, S. M. & Tréguer, D. O. (2018). *Beyond Crop per Drop: Assessing Agricultural Water Productivity and Efficiency in a Maturing Water Economy*. International Development in Focus. World Bank. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1298-9>
- Scheierling, S. M., Treguer, D. O., Booker, J. F. & Decker, E. (2014). *How to Assess Agricultural Water Productivity? Looking for Water in the Agricultural Productivity and Efficiency Literature*. The World Bank. DOI: <https://doi.org/doi:10.1596/1813-9450-6982>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2015). *Atlas agroalimentario 2015*.
- Soto Mora, C. (2003). La agricultura comercial de los distritos de riego en México y su impacto en el desarrollo agrícola. *Investigaciones Geográficas* (50), 173-195. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n50/n50a16.pdf>
- Sun, S.; Sesmero, J. P. & Schoengold, K. (2016). The role of common pool problems in irrigation inefficiency: a case study in groundwater pumping in Mexico. *Agricultural Economics*, 47(1), 117-127. DOI: <https://doi.org/10.1111/agec.12214>
- van Halsema, G. E. & Vincent, L. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*, 108(2012), 9-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.016>
- Wang, X. & Rungsuriyawiboon, S. (2010). Agricultural efficiency, technical change and productivity in China. *Post-Communist Economies*, 22(2), 207-227. DOI: <https://doi.org/10.1080/14631371003740704>
- World Bank. (2009). *Mexico - Country Note on Climate Change Aspects in Agriculture*. Country Note on climate change aspects in agriculture (Notas sobre los países referidas a los aspectos del cambio climático en la agricultura, Issue ND). DOI: <http://hdl.handle.net/10986/9478>
- Yang, S., Wang, H., Tong, J., Ma, J., Zhang, F. & Wu, S. (2020). Technical efficiency of China's agriculture and output elasticity of factors based on water resources utilization. *Water*, 12(10), 2691. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12102691>
- Zheng, J., Zhang, H. & Xing, Z. (2018). Re-examining regional total-factor water efficiency and its determinants in China: A parametric distance function approach. *Water*, 10(10), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101286>