

De lo que ahora sabemos, **¿qué deberíamos haber sembrado entonces?** Un modelo de optimización con restricciones hídricas

From what We Now Know,
what Should We Have Sown Then?
A Water-Constrained Optimization Model

Dora Elena Ledesma Carrión*

En cuestión de siembras y uso consuntivo del agua para riego, al hacer el análisis de las decisiones tomadas del 2003 al 2021, se ajustaron los volúmenes y valores de producción tomando en cuenta la disposición y consumo del vital líquido durante el desarrollo del cultivo. ¿Es conveniente continuar con los cultivos tradicionales o probar con otros dada la sobreexplotación de acuíferos y efectos del cambio climático? ¿Qué otros podrían ser? Existen metodologías para resolver estas dudas con técnicas de optimización, como programación lineal, estableciendo escenarios con énfasis en restricciones sobre rendimientos, consumo de agua y elasticidades cruzadas. Se analizaron cultivos de temporada y perennes, siendo estos últimos factibles de sustitución, como alfalfa, pastos y praderas por palmas datileras y de aceite. El procedimiento se puede replicar en otras regiones.

Palabras clave: cultivos de riego; optimización; disponibilidad de agua.

Recibido: 5 de agosto de 2022.
Aceptado: 6 de diciembre de 2022.

* Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), dora.ledesma@inegi.org.mx.

In terms of planting and consumptive use of water for irrigation, when analyzing the decisions made from 2003 to 2021, volumes and production values were adjusted considering the availability and consumption of the vital liquid during the development of the crop. Is it convenient to continue with traditional crops or try others given the overexploitation of aquifers and the effects of climate change? What others could they be? There are methodologies to solve these doubts with optimization techniques, such as linear programming, establishing scenarios with emphasis on restrictions on yields, water consumption and cross elasticities. Seasonal and perennial crops were analyzed, the latter being feasible to substitute, such as alfalfa, pastures and grasslands by date and oil palms. The procedure can be replicated in other regions.

Key words: irrigated crops; optimization; water availability.



Tractor en el campo de primavera relaciones sean/vallo8451/iStock

Introducción

En el último reporte de los indicadores de desarrollo sostenible sobre degradación y cambio climático, alrededor de un tercio de las tierras cultivables se han degradado de tal manera que ya no son aptas para la agricultura. El uso frecuente de fertilizantes y su lenta difusión a las capas inferiores han contaminado acuíferos y afluentes, diversificando el problema. Además, la alteración de los ciclos de precipitación ha mostrado que la recarga de los

acuíferos es el factor determinante para la autosostenibilidad alimentaria.

El objetivo del presente trabajo fue determinar cuáles cultivos de riego (cuadro 1) podrían ser factibles, de tal manera que maximicen su valor de producción, tomando en cuenta los requerimientos mínimo y máximo de agua que aseguren su desarrollo, suponiendo el uso de tecnologías de ahorro eficiente del vital líquido. Dada la variedad de estas se establecieron cotas de consumo por

cultivo para clima semicálido y suelo semiárido fertilizado¹ (cuadro 2). Para resolver el problema, se formuló un modelo de optimización lineal general y para ejemplificarlo, se escogió como región de estudio el municipio de Calvillo, Aguascalientes, México, donde se encuentra el acuífero Valle de Calvillo, el río Calvillo y afluentes para extracción de agua de uso agrícola (CONAGUA, 2019 y 2020; INEGI, 2017).

Clima

Semicálido, seco estepario, invierno fresco con lluvias en verano, principalmente de junio a septiembre, con promedio anual de 615 mm, máximas en julio, 110-120 mm, mínimas en febrero, 5 mm; temperaturas promedio anuales entre 18-22 °C, máximas en junio, 25-26 °C, mínimas en enero, 15-16 °C, con algunas heladas entre noviembre y febrero; evaporación potencial media anual 2 200 milímetros.

Debido a obras de almacenamiento y sobreexplotación del acuífero, en el río Calvillo se ha invertido el gradiente hidráulico y solo en periodo de lluvias hay corrientes superficiales; esto ha causado que la recarga del acuífero no sea óptima, cuyas principales fuentes de alimentación están en las sierras periféricas del Valle de Calvillo (CONAGUA, 2019). En las dos últimas décadas, los cambios en la frecuencia e intensidad de las lluvias han incrementado la extracción de agua subterránea y decrementado la superficial, dificultando el balance extracción-recarga.

Litología, fertilizantes y concesiones de agua

Existen tres principales tipos de rocas en los primeros 400 m de profundidad: a) zonas volcánicas de andesita (presa Codorniz, oriente de la ciudad de Calvillo), b) tobas blancas arenosas y brechas volcá-

nicas (espesor mínimo de 100 m en algunas zonas) y c) complejo ígneo extrusivo riolítico que rodea a los anteriores (espesor de 80 a 200 m). Superficialmente, hay sedimentos con espesor de 300 m de arena con grava y limo-arcilloso, sobre todo cerca del municipio de Aguascalientes; depósitos de pie de monte alrededor de las sierras periféricas al valle con composición arcillosa ácida y permeabilidad media; el resto es de formación reciente de tipo aluvión y sedimentos residuales (CONAGUA, 2019). Al contener óxidos de silicio, titanio, aluminio, hierro, manganeso, magnesio, calcio, sodio, potasio y fósforo, posee calidad para cultivar, con lo que las deficiencias pueden cubrirse con abono convencional dada la variedad de cultivos registrados (SIAP, 2022).

Por litología y clima, los fertilizantes subsanan carencias en nitratos, sulfatos y metales, que son específicos según el cultivo deseado y proporcionados en programas gubernamentales. Por lo anterior, el factor determinante es la disponibilidad de agua y las heladas. Como las tierras son de riego, cuando hay escasez de lluvias se recurre a afluentes y pozos. En la región del acuífero del Valle de Calvillo no existe distrito de riego alguno y las concesiones de agua por uso están capturadas en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Según la *Carta de uso de suelo y vegetación escala 1: 250 000 serie VI*, año base 2014 (INEGI, 2017), se localizaron aquellas para uso agrícola y los volúmenes extraídos (CONAGUA, 2022; UAM, 2019).

Los cultivos tienen coeficientes específicos asociados al balance calor-humedad o evapotranspiraciones necesarios para su desarrollo (FAO, 1990; SIAP, 2012, 2020a, b, c y 2022; Steduto *et al.*, 2012; Ledesma *et al.*, 2021; cuadro 2). De acuerdo con el REPGA, las extracciones de agua en el 2021 para uso agrícola eran de tipo subterránea (60 %), superficial (39 %) y federal (1 %), como se muestra en el cuadro 3. La profundidad de bombeo en algunos pozos agrícolas ha llegado a los 140 m siendo la máxima promedio estimada del acuífero de 130 m en el centro y 50 m en la periferia. En muestras de agua se ha encontrado iones de bicarbonato sódico que sobrepasan las concentraciones permitidas.

¹ En este caso, los fertilizantes son generalmente básicos —los nutrientes esenciales se pueden dividir en macronutrientes primarios: nitrógeno, fósforo y potasio; secundarios: magnesio, calcio y azufre; y micronutrientes: manganeso, cobre, cloro, molibdeno, zinc, hierro y boro— (SIAP, 2022).

Cuadro 1

Abreviaturas, nombres comunes y científicos. Notación: f forrajero

Cultivo	Abreviatura	Especie	Cultivo	Abreviatura	Especie
Agave/Maguey	Agv	<i>Agave tequilana</i> F. A. C. Weber	Manzana	Mnz	<i>Malus domestica</i> (Suckow) Borkh.
Aguacate	Agt	<i>Persea americana</i> Mill.	Naranja	Nrn	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck
Alfalfa verde	Alfv	<i>Medicago sativa</i> L.	Nopalitos	Npl	<i>Ficus indica</i> Mill.
Avena f	Afv	<i>Avena sativa</i> L.	Nuez	Nuz	<i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch
Cacahuete	Cch	<i>Arachis hypogaea</i> L.	Palma aceite	PA	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.
Calabacita	Clb	<i>Curcubita pepo</i> L.	Palma camedor	PC	<i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm.
Calabaza	Cbz	<i>Curcubita máxima</i> L.	Palma datilera	PD	<i>Phoenix dactylifera</i> L.
Camote	Cmt	<i>Ipomoea batata</i> L. Lam.	Palma de ornato	PO	<i>Chamaedorea elegans</i> Mart.
Cebolla	Cbl	<i>Allium cepa</i> L.	Palma de taca	PT	<i>Brahea brandegeei</i> (Purpus) H. E. Moore
Chile verde	Chv	<i>Capsicum annuum</i> L.	Papa	Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.
Durazno	Drz	<i>Prunus persica</i> L.	Pastos y praderas	PyP	<i>Desmanthus virgatus</i> (L.) Willd., <i>Desmodium canescens</i> (L.) DC., <i>Trifolium repens</i> L.
Elote	Elt	<i>Zae mays</i> L.	Pepino	Ppn	<i>Cucumis sativus</i> L.
Frijol	Frj	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	Prestimonio	Prs	<i>Diospyros kaki</i> L. f.
Granada	Grn	<i>Punica granatum</i> L.	Pitahaya	Pty	<i>Selenicereus undatus</i> (Haw.) D. R. Hunt
Guayaba	Gyb	<i>Platymiscium calyptratum</i> M.Sousa & Klitg	Sandía	Snd	<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. & Nakai
Higo	Higo	<i>Ficus carica</i> L.	Sorgo f	Sfv	<i>Sorghum bicolor</i> L.
Lima	Lma	<i>Citrus × limon</i> (L.) Osbeck	Tomate rojo	Tmtr	<i>Solanum lycopersicum</i> L.
Limón	Lmn	<i>Citrus × aurantiifolia</i> (Christm.) Swingle L.	Tomate verde	Tmtv	<i>Physalis philadelphica</i> Lam.
Maíz de grano	Mg	<i>Zea mays</i> L.	Uva	Uva	<i>Vitis vinifera</i> L.

Fuentes: SIAP y *Plants of the World Online*: <https://powo.science.kew.org/results?>

Cuadro 2

Continúa

Requerimiento anual de agua por cultivo (m³/t)

Cultivo	Mín	Máx	Cultivo	Mín	Máx	Cultivo	Mín	Máx
Afv	215.57	413.0	Ppn	512.8	769.2	Lma	486.2	2 276.8
Cch	285.2	385.0	Snd	200.0	650.0	Lmn	642.0	700.0
Clb	314.9	414.9	Sfv	181.0	400.0	Mnz	822.0	1 000.0
Cbz	314.9	414.9	Tmtr	45.3	86.7	Nrn	560.0	937.0
Cmt	550.0	47.1	Tmtv	107.3	357.3	Npl	19.4	29.2
Cbl	36.8	450.0	Agv	450.0	550.0	Nuz	2 811.0	8 265.0
Chv	51.6	137.0	Agt	2 000.0	2 100.0	Prs	506.0	560.0
Elt	500.0	800.0	Alfv	333.0	1 874.1	Pty	560.0	772.0

Requerimiento anual de agua por cultivo (m³/t)

Cultivo	Mín	Máx	Cultivo	Mín	Máx	Cultivo	Mín	Máx
Frj	72.06	390.0	Drz	1 851.0	2 066.0	Uva	476.2	500.0
Mfv	189.4	389.4	Grn	1 250.0	3 750.0	PyP	290.0	451.6
Mg	205.4	410.0	Gyb	934.0	1 377.0	Palmas	33.2	97.4
Papa	268.6	434.8	Higo	860.0	3 350.0			

Mín = mínimo; Máx = máximo.

Extracción de agua por origen para uso agrícola (m³). Federal (superficie, m³)

Año	Superficial	Subterránea	Federal	Año	Superficial	Subterránea	Federal
2003	43 240 588.2	26 272 421.0	570 153.0	2012	45 506 448.0	27 119 621.0	645 193.0
2004	43 624 288.0	26 879 621.0	570 153.0	2013	45 518 448.0	27 119 621.0	647 218.0
2005	43 624 288.0	26 999 621.0	570 153.0	2014	45 542 448.0	27 287 621.0	647 218.0
2006	43 804 288.0	26 999 621.0	570 153.0	2015	45 542 448.0	27 474 437.0	647 218.0
2007	45 034 288.0	26 999 621.0	570 153.0	2016	45 542 448.0	27 642 437.0	647 218.0
2008	45 062 805.0	27 119 621.0	570 153.0	2017	45 602 064.0	27 946 237.0	647 218.0
2009	45 278 159.0	27 119 621.0	645 193.0	2018	45 741 451.0	28 843 557.0	647 218.0
2010-2011	45 469 448.0	27 119 621.0	645 193.0	2019-2021	45 815 362.0	29 806 957.0	647 218.0

Breve estado del arte

Para mejorar los rendimientos de los cultivos, es costumbre adoptar las siguientes acciones: semillas mejoradas, fertilizantes específicos e innovadoras técnicas de riego y saneamiento según el cultivo. Aun así, esto no ha sido suficiente para enfrentar el cambio climático a mediano plazo para asegurar la alimentación sostenible (Adams *et al.*, 1990).

Desde 1990 se publicaron trabajos que expusieron el efecto devastador de las modificaciones en los patrones de precipitación: concentración intensa en un mes, así como cambio en frecuencia e intensidad y desfase del inicio de la temporada de lluvias (Ledema *et al.*, 2021; Abrol e Ingram, 1996; Boko y Niang, 2007; Adams *et al.*, 1990; Kumar *et al.*, 2019). Existe un acuerdo general de que el calentamiento global será mayor en

latitudes entre los trópicos y polos. Diferentes modelos basados en diversas metodologías (series de tiempo, estocásticos y multirregresivos) predijeron que sus efectos ocasionarían incrementos en los rangos diarios de temperatura y alteraciones en la duración de las estaciones del año, según la latitud y altitud (Prakash, 2011; Maharjan y Joshi, 2013).

Prakash formuló un modelo para los cultivos tradicionales de Nepal con base en la respuesta de estos al estrés hídrico; este relaciona de forma lineal los cambios en los rendimientos del cultivo y en temperaturas y precipitaciones; sus resultados señalan que el aumento de temperatura en 0.7 °C favoreció al del arroz sobre los de papa, trigo y maíz debido al incremento de la disponibilidad de agua en las zonas históricamente congeladas.

En el estado de Aguascalientes, el aumento de temperatura se calculó en 0.77 °C (Ledema *et al.*,

2021), lo que incrementará la evaporación del agua superficial. Siqueiros *et al.* (2016) reportaron que 80 % de la cubierta vegetal original de la entidad ha sido modificada debido a los asentamientos humanos con actividades agrícolas y ganaderas causando, en gran medida, alrededor de 90 % de la erosión del suelo y escasez de agua subterránea; la superficial se evapora, en promedio, 70 por ciento.

Desde principios del siglo XXI, Olson y Saltiel (2007) analizaron el estado de la agricultura y recursos hídricos para riego en México. Especificaron que existían muy pocas alternativas para la de regadío porque el nivel de lluvia solo posibilitaba la producción de cultivos de secano de bajo valor o no permitía la agricultura de secano por completo. Por esto se prefirieron los plantíos forrajeros para dar impulso a la ganadería en zonas semiáridas.

Con el Tratado de Libre Comercio para América del Norte, las políticas para apoyar la competitividad de la producción agrícola fomentaron la degradación de los recursos hídricos. En consecuencia, fue fundamental mejorar los rendimientos de la agricultura de regadío y la gestión de los recursos hídricos incrementando las concesiones de uso de agua (CONAGUA, 2022, cuadro 3) llegando actualmente a la sobreexplotación de los acuíferos.

De la experiencia africana, algunas propuestas de organismos internacionales para enfrentar las necesidades alimentarias del futuro establecen como requisito la capacidad para responder: construir un sistema de respuesta a la propagación de riesgos, modificar prácticas tradicionales y actuales, crear especies resistentes al estrés ambiental, fomentar la cooperación entre gobiernos a todos los niveles y financiar proyectos a nivel local que resuelvan problemas específicos (Kumar *et al.*, 2019; Olowa *et al.*, 2011).

La máxima desagregación posible de datos en nuestro país es municipal. Al aplicar el modelo aquí propuesto, serviría como insumo al adoptar las recomendaciones hechas a los países africanos y salvar las fallas de ejecución que experimentaron.

Aquí se utilizaron metodologías complementarias para encontrar los cultivos tradicionales y alternativos más adecuados en la región de estudio dado el panorama futuro del calentamiento global.

Metodología

Se cuenta con datos anuales de cultivos sembrados, siniestrados y cosechados, así como sus volúmenes y precios del 2003 al 2021. Se estudiaron 41 de riego, siete de temporada otoño-invierno (O-I) del 1 de septiembre al 28-29 de febrero, 17 de primavera-verano (P-V) del 1 de marzo al 31 de agosto y 17 perennes (Prnn). Se hicieron simulaciones tomando una extensión de las temporadas de dos semanas al principio y final del periodo. Los cultivos de Agv, higo y uva fueron sembrados y hasta la fecha no han sido cosechados. Algunos se sembraron una o dos veces en el lapso de la investigación, por lo que no hay datos suficientes para su estudio; en los resultados aparecerán como ND o en blanco. La simulación consistió en agregar cultivos perennes que pudieran ser sustitutos, como PD, PA, PO, PC y PT. Se utilizaron solo datos oficiales.

Escenarios

Se consideraron dos: *E1*, requerimientos mínimos de agua con tecnología de ahorro óptima, con adecuados fertilizantes, mano de obra y capital necesarios para el desarrollo completo del cultivo *i* en el año *t*; y *E2*, requerimientos máximos de agua con tecnología de riego y el resto de los supuestos sin cambios.

Función objetivo (FO)

Como los volúmenes de producción están relacionados con los valores de esta, rendimientos y, de manera indirecta, fertilizantes, se propuso la FO de maximizar los primeros encontrando los volúmenes correspondientes. Se reportaron los precios promedio anuales del producto y con ellos se calcularon los valores de cada cultivo por año. Al produc-

tor le interesa maximizar su valor de producción (ecuaciones 1, 4 y 5). En el caso de las variables de capital y trabajo, en el preanálisis resultaron estadísticamente no significativas a diferencia de la disponibilidad de agua.

Restricciones

Rendimientos²

Estos deben ser positivos. Como se compararon los datos históricos con los resultados de la simulación bajo escenario —esto es, de haber tenido tecnologías de riego avanzadas de tal manera que aseguren por lo menos los rendimientos máximos históricos de cada cultivo—, se calcularon los volúmenes de producción en unidades de toneladas. Si se maximizan los rendimientos se maximizan los valores de producción, por lo que se adaptó de la mejor manera al escoger la función objetivo desde el punto de vista del productor (ecuación 2).

Disponibilidad de agua para uso agrícola

Esta depende de la recarga del acuífero. Según el cuadro 3, la extracción se fue incrementando a través de los años. Para calibrar los requerimientos de agua para el desarrollo del cultivo sin siniestro, se buscó en varias fuentes abiertas la información en regiones similares a las de estudio. En algunos casos, se recurrió a la información global de la FAO. El cuadro 2 muestra dichas necesidades del vital líquido en unidades m³/t (ecuación 3).

Fertilizantes

Dado que en casi todo el mundo se debe fertilizar la tierra, los abonos son bastante homogéneos, como se comentó en la *Introducción*. Como son cultivos de riego, las áreas sembradas son las mismas que las cosechadas —salvo ligeras diferencias en un par de casos en algún año—, las cuales están

2 Se definen como el cociente entre el volumen de producción y la superficie cosechada en hectáreas.

directamente relacionadas con los rendimientos (ecuación 3) divididos entre el factor 1 (sembradas = cosechadas). Esto último hace el determinante del sistema nulo. En el trabajo se reportan como las superficies fertilizadas en hectáreas.

Modelo

Parámetros y variables

Sean t tiempo (año), i cultivo (ejemplo Afv, Tmtv, Agt, etc.), x_{it} el volumen de producción del cultivo i en el año t , a_{it} el coeficiente del cultivo en relación con su rendimiento en el año t , b_{it} el coeficiente del cultivo en relación con su requerimiento de agua en el año t y p_{it} el precio por unidad de volumen producido del cultivo i en el año t :

$$FO: \text{Max}_x \left\{ \sum_{i=1}^{41} p_{it} x_{it} | E_{j_{x_{it}}} \right\}, i = \text{cultivo riego}, \\ t = 2003, \dots, 2020; j = 1, 2 \quad (1)$$

sujeta a:

$$\sum_{i=1}^{41} a_{it} x_{it} | E_{j_{x_{it}}} \leq \text{rendimientos máximos históricos} \\ \text{en la región sin siniestro} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{41} b_{it} x_{it} | E_{j_{x_{it}}} \leq \text{agua disponible en el año } t \quad (3)$$

$$x_{it} | E_{j_{x_{it}}} \leq \text{cota máxima histórica sin siniestro}_i \quad (4)$$

$$x_{it} | E_{j_{x_{it}}} \geq 0 \quad (5)$$

En la mayoría de los modelos se trabaja desde el punto de vista del consumidor, por lo que se calculan las elasticidades de precios de demanda. En este trabajo nos interesaron las cruzadas de precios de oferta (desde la óptica del productor). Sea $\Delta(\cdot)$ el cambio de la variable (x o p) entre t y $t + 1$ en los escenarios E_j para los cultivos i o k :

$$\frac{\Delta(x_{i;t,t+1} | E_{j_{x_{i;t,t+1}}}) / (x_{i;t,t+1} | E_{j_{x_{i;t,t+1}}})}{\Delta(p_{k;t,t+1} | E_{j_{x_{k;t,t+1}}}) / (p_{k;t,t+1} | E_{j_{x_{k;t,t+1}}})} > 0, < 0, = 0 \quad (6)$$

Cuando las elasticidades son positivas se dice que son bienes sustitutos; negativas, complementarios; y nulas, que no tienen relación.

Tres cultivos presentaron hectáreas siniestradas en años de sequía (SIAP, 2017, 2020a, b, c y 2022; Ledesma *et al.*, 2021). Las probabilidades de fracaso se calcularon como:

$$\frac{\text{Hectáreas siniestradas del cultivo } i \text{ en el año } t}{\text{Hectáreas sembradas del cultivo } i \text{ en el año } t} \quad (7)$$

Resultados y análisis

Con los datos del SIAP se calcularon las elasticidades cruzadas (ver cuadros 4 a 6) y del modelo se generaron los cuadros 8 a 11 para cultivos históricos tradicionales, donde aparecen los valores y volúmenes de la producción original y bajo los escenarios *E1* y *E2*. Comparando los resultados se observó que, en ocho de los 19 años estudiados, los valores históricos fueron los mejores en producción. Resaltó la de Afv en O-I; Cch, Mg y Tmtr; Tmtv en P-V; y Agt, Alfv, Drz, Gyb, Lma, Nrn, Npl, Nuz, Prs y PyP en Prnn. Esto antes del 2015, año en el que se declaró la sobreexplotación de los acuíferos. Principalmente, en los últimos años, los cultivos bajo *E1* y *E2* no incluyeron a la Afv y sí a la Clb, Cbl y Tmtr de O-I. Para P-V, se consideraron Clb, Chv, Mg, Tmtr y Tmtv. No se pensó en los Prnn: Alfv, Grn, Prs, Pty y PyP. Tomando solo el *E1* se favorecieron Lma, Grn, Nrn, Ppn, Mnz y Nuz; de manera análoga, para *E2*, Mfv, Agt, Drz y Mnz.

De los datos históricos, los siguientes cultivos presentaron probabilidades máximas de fracaso (ecuación 7): Clb en O-I (7.1 %), Cbz en P-V (25 %) y Mnz en Prnn (11.1 %). La ecuación 7 complementa los resultados del modelo, ecuaciones 1-5 y las elasticidades, ecuación 6 y cuadros 4 a 7, ya que presenta congruencia con los resultados de factibilidad (ver cuadros 8 a 11).

Para escenarios con un fuerte control de la disponibilidad de agua para riego, con tecnologías que aseguren cubrir los requerimientos mínimos de cada cultivo, aquellos de O-I con menos riesgo son: Clb y Tmtr; P-V: Clb, Mg, Tmtr y Tmtv; y

Prnn: Gyb, Npl y Nuz. Los de mayor, de O-I: Afv, Chv, Ppn, y PyP; P-V: Afv, Mfv y Snd; y Prnn: Pty.

Un caso importante en la región es la avena; esta ocupa el quinto lugar mundial en la producción de cereales, siendo el de mayor importancia en climas fríos, por lo cual es adecuado para Calvillo salvo por la situación del vital líquido: es una planta de raíces abundantes y profundas, tallos entre 1 y 1.5 m, hojas planas y alargadas, de buen valor forrajero; no tiene tanta resistencia al frío como el centeno y el trigo. Para un buen desarrollo, la avena y el centeno necesitan agua entre 216 a 1 874.1 m³/t, mientras que el trigo requiere de 356 a 1 180.67; entonces, los tres cultivos no son factibles (ver cuadros 2, 9 y 10).

Por otro lado, los cítricos se dan en temporada cálida y húmeda en la región de estudio, mientras que la Afv se desarrolla durante todo el año siempre y cuando disponga de agua. De haber escasez y no asegurar la dotación mínima de esta con uso de tecnología para riego óptimo, se preferiría el cultivo de centeno sobre el de avena en O-I y de cítricos con palmas en el caso de los Prnn (cuadro 7; ecuación 6; SIAP, 2022).

Elasticidades

Se calcularon las de precios de oferta para cada cultivo histórico y alternativos propuestos. Se presentan las del 2011 y 2021. El primero mostró una disminución de precipitaciones drástica y el 2021, la situación en el final del periodo de estudio (cuadros 4-7).

Cuadro 4

Elasticidad cruzada de precios de la oferta. Cultivos O-I

Cultivo	2011	2021	Máx	Mín	P
Afv	1.4	23.7	23.7	-42.6	-1.0
Clb	3.4	1.0	13.0	-14.6	1.6
Cbl	1.9	2.9	14.8	-60.6	-4.8
Chv	ND	ND	ND	ND	ND
Ppn	ND	ND	4.3	4.3	4.3
Tmtr	1.7	-4.5	65.1	-38.7	3.4
PyP	ND	ND	ND	ND	ND

Máx = máximo; Mín = mínimo; P = promedio.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 5

Elasticidad cruzada de precios de la oferta. Cultivos P-V

Cultivo	2011	2021	Máx	Mín	P	Cultivo	2011	2021	Máx	Mín	P
Afv	ND	ND	-7.0	-7.0	-7.0	Mfv	ND	-1.8	204.3	-20.0	17.6
Cch	-11.0	ND	10.7	-10.0	1.3	Mg	-0.5	0.2	5.1	-16.0	-1.1
Clb	-2.5	27.8	90.9	-33.0	4.0	Papa	ND	ND	-1.9	-1.9	-1.9
Cbz	ND	ND	-450.0	-450.0	-450.0	Ppn	3.4	4.1	40.4	-58.0	-1.1
Cmt	ND	ND	-2.8	-2.8	-2.8	Snd	ND	ND	1.9	1.9	1.9
Cbl	ND	ND	ND	ND	ND	Snd	ND	ND	57.0	57.0	57.0
Chv	ND	-11.2	20.5	-11.0	1.6	Tmtr	0.6	1.0	35.3	-8.2	0.8
Elt	-0.9	-26.1	58.1	-26.0	0.6	Tmtv	5.4	-150.0	41.0	-150.0	-112.0
Frj	6.1	ND	16.0	-8.6	2.1	Mfv	ND	-1.8	204.3	-20.0	17.6

Máx = máximo; Mín = mínimo; P = promedio.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6

Elasticidad cruzada de precios de la oferta. Cultivos Prnn

Cultivo	2011	2021	Máx	Mín	P	Cultivo	2011	2021	Máx	Mín	P
Agv	ND	ND	ND	ND	ND	Npl	-0.7	-0.4	1.3	-0.7	-0.1
Agt	-0.6	14.6	32.9	-8.1	1.7	Nuz	ND	-10.0	3.1	-7.7	-0.3
Alfv	1.5	21.1	3.7	-46.0	-5.3	Prs	0+	ND	7.4	-12.0	-1.0
Drz	-0.2	5.9	3.5	-2.2	0.1	Pty	ND	ND	88.8	88.8	88.8
Grn	ND	ND	20.5	-2.1	3.4	Uva	ND	ND	ND	ND	ND
Gyb	0.3	-14.0	4.9	-1.4	1.1	PyP	-1.9	ND	572.0	-9.7	34.9
Higo	ND	ND	ND	ND	ND	PD	-2.5	ND	115.0	-36.0	5.3
Lma	1.5	ND	114.0	-5.0	6.2	PA	-11.0	ND	37.7	-11.0	2.5
Lmn	0.1	13.5	49.1	-24.0	2.9	PC	9.2	ND	29.3	-0.9	2.9
Mnz	-1.1	5.7	3.9	-3.0	0.5	PO	ND	ND	2.6	-34.0	-3.2
Nrn	ND	-0.1	48.1	-11.0	2.0	PT	4.8	ND	45.3	0-	11.8

Máx = máximo; Mín = mínimo; P = promedio.

Fuente: elaboración propia.

Del cuadro 4, los cultivos de Cbl y Afv presentaron, en promedio, elasticidades normales-elásticas. En el año del inicio de la pandemia del COVID-19 en México, el Tmtr fue el único cultivo de O-I que mostró una reacción normal-elástica, mientras la Afv y la Cbl presentaron comportamiento Giffen con precios elásticos intensos permaneciendo inelástica la Clb. De manera análoga, para los cultivos de P-V, fue notable la del Tmtv seguido del Elt. El Mg mostró precios Giffen-inelásticos, situación similar para los Prnn: Alfv, Agt, Lmn, Drz y Mnz. Los únicos que dieron elasticidades normales-inelásticas son

la Nrn y los Npl (ver cuadros 5 y 6). Para el año catastrófico 2011, cuando se registraron las menores precipitaciones, aquellos que tuvieron precios de oferta normales son los de P-V y Prnn: Cch, Npl, Clb, Elt, Mg, Agt, Drz, Mnz y PyP. Los bienes Giffen-elásticos en O-I son todos; en P-V, Frj, Ppn y Tmtv; y en Prnn, Alfv y Lma. Comparando las dos primeras columnas de los cuadros 4, 5 y 6, el impacto de la contingencia sanitaria fue más notorio que el de las más bajas precipitaciones (2011), porque son cultivos de riego. Aun así, el acuífero fue catalogado como sobreexplotado desde el 2015.

Ejemplos de cultivos alternativos

Palma datilera

En México se cosecharon 2 514 toneladas, 828, 1 323.25 y 2 811.19 en 2001, 2003, 2011 y 2019, respectivamente. Cuatro estados son productores de esta: Baja California (BC), Baja California Sur (BCS), Coahuila de Zaragoza y Sonora. El cuadro 7 muestra las elasticidades de precio de oferta. En promedio, todos las presentan normales siendo la de BC elástica-intensa y las demás, inelásticas.

Su cultivo prefiere suelos de textura limo-arenosa con buen drenaje, no resiste bien las heladas, por lo que su desarrollo y producción deben ser cuidados en invierno; requiere aporte regular de agua dulce o salada y convienen fertilizantes ricos en nitrógeno. Estas condiciones hicieron que enfrentara mejor el escenario catastrófico del 2011, presentando comportamiento Giffen-inelástico en los de BC y elástico en los de Sonora. Al agregar los cultivos de palmas en el modelo de optimización, resultó que principalmente la PD puede ser considerada como alternativa. Para los interesados en profundizar en las características genómicas de este cultivo y sus variedades, se puede consultar Salomón *et al.* (2017b), quienes recomiendan utilizarlas junto con árboles de cítricos (FAO, 1990), como la Gyb (producto distintivo de la zona). La PD es muy versátil, de alta calidad (México, Irak, Irán) y forrajera (India, Irán), por lo que su uso puede diversificar la economía de la región.

Palma de aceite

Torres y Peña (2015) afirman que todas las variedades de palmas son adecuadas para suelo y clima semiáridos dada su adaptabilidad a los diferentes grados de salinidad. Los requerimientos de agua mínimos y máximos para todo el desarrollo de la planta fueron medidos entre 97.41 y 33.15 m³/t al año (Palacios y Pinzón, 2015; Báez, 2018). En términos generales, del cuadro 3, en el 2011, las PD y PA tuvieron elasticidades normales-elásticas. Todas las especies de palma mostraron comportamientos tanto normales como Giffen durante el periodo de observación, pero solo las PC y PT presentaron en algunos años del tipo inelástico y únicamente la de ornato presentó, en promedio, la normal-elástica. Las elasticidades en el 2011-2012 de la Lma (1.4842) y la PD en BC (0.0296), BCS (0.4727) y Sonora (2.1834) mostraron su sensibilidad al cambio de precios, por lo que la PD enfrentó mejor la sequía que el cítrico en las californias. Al simular cultivos alternativos del 2003-2021 se encontró que los de palma resultaron factibles bajo los escenarios de requerimientos de agua E1 y E2. Por simplicidad, solo aparecen en el cuadro 8 los resultados del E2, que es el menos estricto (volúmenes de producción), y el comparativo entre los valores de producción de los datos originales y óptimos. Los cuadros 9, 10 y 11 resumen la factibilidad de los cultivos. Agv, higo y uva no se han cosechado. Estos resultados muestran la gran mejora en los valores de producción bajo el control estricto del riego (E1) manteniendo las mismas superficies de cultivo.

Cuadro 7

Elasticidades de precios de oferta de la PD

PD	BC	BCS	Coahuila de Z.	Sonora
Máxima	235.9771	0.4727	0.2976	2.1834
Mínima	-968.4062	-1.3449	-1.6598	-2.7802
Promedio	-39.1614	-0.0574	-0.4905	-0.5314
2011	0.0296	0.4727	ND	2.1834
2021	ND	ND	ND	ND

Fuente: SIAP y elaboración propia.

Resultado de las simulaciones: función objetivo o valor de la producción (10⁵\$)

Año	Original	FO(E1)*	FO(E2)*	Año	Original	FO(E1)*	FO(E2)*
2003	3 599.72	6 080.13	5 109.14	2013	4 008.27	9 014.60	7 856.08
2004	2 864.31	5 413.78	4 620.28	2014	4 059.83	9 404.93	8 227.39
2005	2 827.39	5 473.22	4 696.10	2015	3 662.32	10 273.63	9 127.67
2006	4 505.30	6 965.33	5 724.54	2016	4 846.29	11 347.99	9 864.53
2007	2 700.82	7 320.88	6 221.70	2017	5 319.07	12 934.14	11 516.01
2008	4 266.62	8 039.75	6 823.48	2018	4 415.68	12 334.51	10 983.41
2009	3 839.83	8 649.40	7 624.81	2019	6 547.76	14 246.40	11 985.33
2010	4 064.76	8 883.23	7 794.52	2020	6 202.78	13 942.25	12 000.80
2011	4 560.48	10 358.89	9 005.85	2021	7 914.79	13 864.74	11 993.50
2012	4 694.72	10 722.23					

* Valor óptimo encontrado.

Resultado de las simulaciones (E2): volúmenes óptimos de producción (t)

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
P-V	Volúmenes de producción (t)								
Afv	0								
Clb	0		324	0	324	0	324	0	324
Cbl	0						157	0	157
Chv	0								
Ppn	0								100
Ttr	0		1 231	0	1 231				
PyP	0								
P-V	Volúmenes de producción (t)								
Afv	0								
Cch	35								
Clb	765		0	765					
Cbz	135		0	135				0	
Cmt	36		0	36			0	36	
Cbl	17		0	17			0		
Chv	147		0	147			0		
Elt	930								0

Resultado de las simulaciones (E2): volúmenes óptimos de producción (t), continuación

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
P-V	Volúmenes de producción (t)									
Frj	14		0			14				
Mfv	0	6 235	0	6 235	0	6 235	0	0	0	
Mg	564									
Papa	147	0								
Ppn	0	280	0	280	0	280				
Snd	90	0	90	0					0	
Sfv	0									
Ttr	7 518	7 519	7 518							
Ttv	7 944									
Prnn	Volúmenes de producción (t)									
Agv	0									
Agt	325	326	325							
Alfv	0									
Drz	0	903								
Grn	0									
Gyb	32 002	29 841	30 217	31 306	30 008	31 215	29 936	29 783	30 680	
Higo	0									
Lma	0								212	
Lmn	0							640.5		
Mnz	0	34.5								
Nrn	0					48		0		
Npl	20 480									
Nuz	5	0	5	0	5					
Prs	12									
Pty	0									
Uva	0									
PyP	0									
PD	8 656									
PA	207 835									
PC	0									
PO	6 630	0								
PT	197									

Resultado de las simulaciones (E2): volúmenes óptimos de producción (t)

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2021
O-I	Volúmenes de producción (t)								
Afv					0				
Clb					324				
Cbl					157				
Chv	0		36				0		
Ppn	0		100				0		
Ttr					1 231				
PyP					0				
P-V	Volúmenes de producción (t)								
Afv					0				
Cch	35			324			35	0	
Clb	765			157			765		
Cbz	0		36				0		
Cmt	0		100				0		
Cbl	17			1 231			0		
Chv			0				147		
Elt	930					0			
Frj	14			324			0		
Mfv	0			157			6 235	0	
Mg	564	0	36				0		
Papa	0		100		0		35	0	
Ppn	280			1 231			765		
Snd					0				
Sfv					0				
Tmtr	7 518			324			0		
Tmtv	7 944			157			147		
Prnn	Volúmenes de producción (t)								
Agv					0				
Agt					325				
Alfv					0				
Drz				903			0	903	
Grn					0				
Gyb	30 192	31 088	29 276	30 357	31 206	30 192	29 799	31 693	31 278
Higo					0				
Lma	0		212		0		212	0	
Lmn					640				

Resultado de las simulaciones (E2): volúmenes óptimos de producción (t), continuación

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020-2021
Prnn	Volúmenes de producción (t)								
Mnz	34		0				34		
Nrn	48	0	48	0		48			0
Npl					20 480				
Nuz				5					0
Prs	0	12					0		
Pty			0				76		0
Uva					0				
PyP					0				
PD					8 656				
PA					207 835				
PC					0				
PO					0				
PT					197				

Al comparar lo cultivado y lo simulado del 2003 al 2021 (SIAP, 2022; cuadros 7 y 8) se observó que los cultivos factibles de O-I dada la disponibilidad restringida de agua del acuífero son Clb, Cbl, Ppn, Tmtr y Chv; de manera análoga, para los de P-V, Cch, Clb, Cbz, Cmt, Cbl, Chv, Frj, Mg, Tmtr y Tmtv. No fueron factibles Sfv y Snd, y en los últimos años, Mfv, Elt y Ppn. La Pty solo se sembró en dos años teniendo buenos rendimientos.

Finalmente, los cultivos Prnn factibles que destacaron son Agt, Drz, Gyb, Mnz, Npl, Prs (hasta el 2015), Nuz (hasta el 2019) y Lmn (en los últimos años); los no factibles, PyP, Alfv, Grn y Prs (desde el 2016); y de los alternativos, las palmas datilera, africana y taca. Los rendimientos máximos de la PA se reportaron después de los 20 años, con costos de producción entre 330 y 600 USD/t (Mosqueda *et al.*, 2021). La ventaja, además del consumo de agua y fertilizantes básicos, radicó en la no degradación del terreno, como ocurre en otros cultivos, como Agv (azul), Alfv, Snd, trigo, Mfv y Afv (SIAP, 2022).

Para reforzar los resultados, se calcularon las elasticidades cruzadas (ecuación 7). Las palmas son cultivos sustitutos, en mayor medida, de la Pty, PyP, Prs, Alfv y Grn. Por factibilidad, las PO y PC se excluyeron, por lo que el mejor sustituto es la taca, seguida de la africana y la datilera. Para una variación de la unidad del precio de producción de Nuz, se tendría 1.0062 en volumen de la PT y 0.6132 de PD, aunque el de esta (máximo 8 656 t) sobrepasa al de Nuz (máximo 5 t), y el precio máximo por tonelada de PD 54 221 pesos vs. 58 560 de Nuz. Aquí lo relevante se enfoca en los requerimientos de agua, el nogal consume grandes cantidades comparado con la PD y PT (cuadro 2). Además, como se recomienda sembrar palmeras junto con cítricos, es conveniente la combinación Drz-PA con una elasticidad cruzada de 1.3262, Lmn-PA 5.6458, Mnz-PA 3.9933, Nrn-PA 1.7035 y Pty-PA 1.4803, así como Npl-PA 1.4647 y Agt-PA 2.2992, aunque no sean cítricos. Otras combinaciones son Lmn-PD 2.4391, Mnz-PD 1.7252, Mnz-PT 2.1087 y Agt-PT 1.2141 (ecuación 6; SIAP, 2017, 2020a, b, c y 2022).

Al comparar con el trabajo de Ledesma *et al.* (2021) sobre cultivos de temporal en la misma región donde aplicaron metodología de la FAO (1990) y Steduto (2012) se encontró que el estrés hídrico era alto (superior a la unidad) en Avf, Alf, Tmtr, Tmtv, Sf y Mf, principalmente, esto es, fue determinante el comportamiento de las precipitaciones. Esto nos lleva a que ambas meto-

dologías resuelven el mismo problema, ya que están relacionadas a través de las restricciones (rendimientos-requerimientos hídricos) y el cálculo directo del estrés hídrico considerando los rendimientos vs. balance temperatura-precipitación (evapotranspiración). La diferencia se encontró en que, para estudios de impacto del cambio climático, los cultivos de temporal son

Cuadro 9

Resultados del modelo 0-I

Escenarios (Ej; j = 1,2)																				
Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cultivos	Otoño-Invierno																			
Afv	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Clb							f	f	f	f			f	f			f	f	f	f
Cbl													f	f			f	f	f	f
Chv																				
Pep																	f	f		
Tmtr									f	f			f	f	f	f	f	f	f	f
PyP									x	x										
Escenarios (Ej; j = 1,2)																				
Año	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021			
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Cultivos	Otoño-Invierno																			
Afv	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Clb	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Cbl	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Chv			f	f																
Pep			f	f																
Tmtr	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
PyP																				

x: no factible; f: factible; blanco: no se sembró.

Cuadro 10

Continúa

Resultados del modelo P-V

Escenarios (Ej; j = 1,2)																				
Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cultivos	Primavera-Verano																			
Afv	x	x					x	x	x	x					x	x				

Resultados del modelo P-V

Escenarios (Ej: j = 1,2)																				
Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cultivos	Primavera-Verano																			
Cch	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Clb	f	f	f	f	f	f			f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Cbz	f	f									f	f	f	f						
Cmt	f	f	f	f	f	f							f	f				f	f	
Cbl	f	f							f	f	f	f							f	f
Chv	f	f					f	f	f	f	f	f	f	f						
Elt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	x	x	f	f
Frj	f	f	f	f	f	f	f	f					f	f	f	f	f	f	f	f
Mfv	x	x	x	f	x	f	x	x	x	f	x	x	x	f	x	f			x	x
Mg	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Papa	f	f	f	f																
Ppn					f	f	x	x	f	f	x	x	f	f	f	f	f	f	f	f
Snd	f	f	f	f			f	f	f	f										
Sfv	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x				
Tmtr	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Tmtv	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Escenarios (Ej: j = 1,2)																				
Año	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021			
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Cultivos	Primavera-Verano																			
Afv																				
Cch	f	f	f	f					f	f	f	f	f	f	f	f				
Clb	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Cbz																				
Cmt																				
Cbl																				
Chv					f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Elt			f	f	f	f	f	f					f	x			x	x		

Resultados del modelo P-V

Escenarios (Ej; j = 1,2)																			
Año	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Cultivos	Primavera-Verano																		
Frj	f	f																	
Mfv	x	x	x	f	x	x	x	x	x	x	x	f	x	f	x	f	x	x	
Mg	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	
Papa																			
Ppn	f	f	f	f	x	x	x	x	f	x	f	f	f	f	x	x	x	x	
Snd																			
Sfv																			
Tmtr	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	
Tmtv	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	

x: no factible; f: factible; blanco: no se sembró.

Resultados del modelo Prnn

Escenarios (Ej; j = 1,2)																				
Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cultivos	Perennes																			
Agt	x	f	f	f	f	f	x	f	x	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Alfv	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Drz	x	x	f	f	f	f	f	f	x	f	x	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Gm	f	x	f	x	f	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Gyb	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Lma	f	x	f	x	f	x	x	x	f	f	f	x	f	x	f	x	f	f	f	f
Lmn															f	f	f	f	f	f
Mnz					f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Nrn	x	x	x	x	x	x	x	x	f	x	x	x	f	f	f	f	x	x	x	x
Npl			f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Nuz			f	f	f	f	f	x	f	f	f	x	f	f	f	f	f	f	f	f

Resultados del modelo Prnn

Escenarios (Ej: j = 1,2)																				
Año	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Cultivos	Perennes																			
Prs			f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Pty																				
PyP	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PD	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
PA	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
PC	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PO	f	f	f	f	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PT	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
Escenarios (Ej: j = 1,2)																				
Año	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021			
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Cultivos	Perennes																			
Agt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	x	f	f	f		
Alfv	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Drz	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	x	x	f	f		
Grn																	x	x		
Gyb	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Lma	f	x	f	f	f	f	f	f	f	x	f	x	f	f	f	x				
Lmn	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Mnz	f	f	x	x	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Nrn	x	x	f	f	f	x	f	x	f	f	f	f	f	f	x	x	x	x		
Npl	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
Nuz	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	x		
Prs	f	f	f	f																
Pty													f	f	f	f				
PyP	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
PD	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		

Resultados del modelo Prnn

		Escenarios (Ej; j = 1,2)																		
Año	2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2010		2021			
j	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
Cultivos	Perennes																			
PA	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		
PC	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
PO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
PT	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f		

x: no factible; f: factible; blanco: no se sembró.

más sensibles al comportamiento de los ciclos de lluvia a corto plazo. Así, el presente trabajo aporta a la solución del problema planteado desde otro punto de vista y con menores series de datos y recursos de cómputo.

Conclusiones

El modelo mostró su utilidad en la toma de decisiones a través de su aplicación en la zona de estudio, señalando los cultivos factibles frente a la disponibilidad de agua.

De los alternativos probados, las palmas datileras y de aceite son las que mostraron mayor aporte al valor de producción para el productor. En el futuro, podrían considerarse debido al cambio climático y la sobreexplotación de acuíferos y afluentes.

Por las fuentes de datos, se puede afirmar que la metodología puede aplicarse a nivel municipal, así como probar con otros cultivos potencialmente adaptables a la zona.

Fuentes

Abrol Y. P. y K. T. Ingram. "Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants", en: Bazzaz, F. y W. Sombroek, Book (eds.). *Global climate change and agricultural production: direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. Wiley, West Sussex, 1996, pp.123-140.

Adams, R., C., Rosenzweig y R. Peart. "Global climate change and US agriculture", en: *Nature*. 345, USA, 1990, pp. 219-224 (DE) <https://doi.org/10.1038/345219a0>.

Báez, G. y M. Luz. "Guía técnica para la implementación de buenas prácticas agrícolas en el cultivo de dátil", en: *Centro Agroempresarial y Turístico de los Andes, Barrancabermeja, Colombia, Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)*. Colombia, 2018, pp. 5-43, ISBN: 978-958-15-0412-1.

Boko M. e I. Niang. "Africa. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability", en: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Linden y C. E. Hanson (eds.). *Contribution of working Group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2007, pp 433-467.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). "Estadísticas del agua en México", en: *Distritos y unidades de riego (nacional)*, 2010-2017. México, CONAGUA, 2019, pp. 10-292 (DE) <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1> consultado el 3 de junio de 2022.

_____. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Calvillo, estado de Aguascalientes*. México, CONAGUA/ Subdirección General Técnica/Gerencia de Aguas Subterráneas, 2020, pp. 10-18 (DE) https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/Aguascalientes/DR_0105.pdf consultado el 29 de junio de 2022.

_____. *Datos. Registro Público de Derechos de Agua (REPDRA)*. México, 2022 (DE) Información Estadística | Comisión Nacional del Agua | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx) consultado el 1 de julio de 2022.

FAO. "Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos", en: *Estudio FAO riego y drenaje*. 56, ONU-EUA, 1990, pp. 1-277, ISSN 0254-5293.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Conjuntos de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI*. México, INEGI, 2017 (DE) <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459> consultado el 1 de julio de 2022.

Kumar Singh, Anwasha Borthakur, Arif Ahamad, Gaurav Kumar, Pardeep Singh. "Climate Change and Agricultural Ecosystems", en: Krishna Kumar

- Choudhary and Ajay Kumar and Amit Kishore Singh (eds). *Charper 1 - Agriculture in the Era of Climate Change: Consequences and Effects*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 1-23, ISBN 978-0-12-816483-9 (DE) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00001-3>.
- Kunah O. M., O. Y. Pakhomov, A. A. Zymaroleva, N. I. Demchuk, R. M. Skupskiy, L. S. Bezuhla & Y. P. Vladyka. "Agroeconomic and agroecological aspects of spatial variation of rye (*secale cereale*) yields with Polesia and the Forest-steppe zone of Ukraine: The usage of geographically weighted principal components analysis", en: *Biosystems Diversity*. 26(4), Ucrania, 2018, pp. 276-285, p-ISSN 2519-8513, e-ISSN 2520-2529.
- Ledesma-Carrión, D. E., Pérez-Hernández A. A. & Hernández-Hernández . "Efecto de las variables geo-climáticas sobre el rendimiento de los principales cultivos de temporal primavera-verano del estado de Aguascalientes", en: *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*. Vol. 12, Núm. 3. México, 2021, pp. 62-65, ISSN 2007-2961.
- Maharjan, K. L. and N. P. Joshi. "Climate Change, Agriculture and Rural Livelihoods in Developing Countries", en: *Advances in Asian Human-Environmental Research*. Japan, Springer, 2013.2013, pp. 1-10, doi: 10.1007/978-4-431-54343-5_1.
- Mosqueda, M., E. Ruíz Álvarez y D. E. Munévar Martínez. "Costos de producción de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia en 2020", en: *Boletín Técnico No. 42: Costos de producción para empresas que adoptan mejores prácticas en el año 2020*. Bogotá, Colombia, Centro de Investigación en Palma de Aceite-Cenipalma, 2021, pp. 11-59, ISBN: 978-958-8360-89-8.
- Olowa, O. W., O. A. Olowa & W. Leal-Filho. "Links Between Capacity and Action in Response to Global Climate Change: A Climate Response Shift at the Local Level", en: *Experiences of Climate Change Adaptation in Africa. Book Series Climate Change Management*. Springer, 2011, pp. 3636-3645, ISSN 1610-2010 e-ISSN 1610-2002 ISBN 978-3-642-22314-3 e-ISBN 978-3-642-22315-0. DOI: 10.1007/978-3-642-22315-0.
- Olson, D. and G. Saltiel. "Water resources – averting a water crisis in Mexico", en: *Mexico 2006-2012: Creating the Foundations for Equitable Growth*. Cap. 9. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Report No. 39993-MX. México, 2007, pp. 287-315.
- Palacios-López, D. J. & W. A. Pinzón-Villalobos. *Determinación de la huella hídrica en el cultivo de palma de aceite en la empresa Guaicaramo S.A. localizada en Barranca de Upia, Meta*. Tesis. Bogotá, Colombia, Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería., 2015, pp. 24-82 (DE) https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/525/ consultado el 1 de julio de 2022.
- Prakash, Niraj. "Effect of Climate Variables on Yield of Major Food-Crops in Nepal: A Time-Series Analysis", en: *Journal of Contemporary India Studies: Space and Society*. Vol. 1, 2011, pp. 19-26, DOI:10.1007/978-4-431-54343-5_9.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Atlas Agropecuario y Pesquero Información del Sector Agroalimentario 2012*. México, SIAP-SAGARPA, 2012, pp. 1-158 (DE) www.siap.gob.mx consultado el 3 de abril de 2020.
- _____. México, SIAP-SAGARPA, 2017 (DE) <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571> consultado el 7 de febrero de 2020.
- _____. México, SIAP-SAGARPA, 2020a (DE) <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/informacion-geoespacial-32571> consultado el 7 de febrero de 2020.
- _____. México, SIAP-SAGARPA, 2020b (DE) <https://www.gob.mx/siap/documentos/tecnificacion> y https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92738/Cuadros_tabulares_2014.compressed.pdf consultados el 8 de febrero de 2020.
- _____. *Aptitud agroclimática de México*. Varios meses y años. México, SIAP-SAGARPA, 2020c (DE) <https://www.gob.mx/siap/prensa/aptitud-agroclimatica-de-mexico?idiom=es> consultado el 10 de febrero de 2020.
- _____. *Datos cultivos y factores*. México, SAGARPA-SIAP, 2022 (DE) <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> consultado el 10 de enero de 2022.
- Salomón-Torres, R., N. Ortiz-Uribe y R. Villa-Angulo. "La producción de la palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.) en México", en: *Nueva Época*. Núm. 91(16), enero-junio, Ciencias Sociales y Exactas. México, 2017a, pp. 16-20.
- Salomón-Torres, R., N. Ortiz-Uribe, C. Villa-Angulo, R. Villa-Angulo & V. H. Yaurima-Basaldúa. "Assessment SSR markers used in analysis of genetic diversity of date palm (*Phoenix dactylifera* L.)", en: *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*. 18(5&6), México, 2017b, pp. 269-280, ISSN: 0972-2025.
- Siqueiros-Delgado, M. E., J. A. Rodríguez-Ávalos, J. Martínez-Ramírez & J. C. Sierra-Muñoz. "Situación actual de la vegetación del estado de Aguascalientes, México", en: *Botanical Sciences*. 94 (3), México, 2016, pp. 455-470, DOI: 10.17129/botsici.466.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, E. Fereres & D. Raes. "Crop yield response to water", en: *Irrigation and drainage paper 66*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012, pp. 1-498, ISSN 0254-5284, ISBN 978-92-5-107274-5.
- Torres Cuéllar, A. J. P. A. & Peña Carrillo. *Evaluación de la huella hídrica para el cultivo de palma de aceite en la finca Villa Beatriz del municipio de Zona Bananera, departamento del Magdalena*. Tesis. Colombia, Universidad de La Salle, 2015, pp. 5-66 (DE) https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/553 consultado el 2 de junio de 2022.
- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). *Agua para todos, ¿quién controla el agua en tu Estado?* Propuesta de proyecto de dictamen y articulado Ley General de Aguas. México, 2019 (DE) aguaparatodos.org.mx consultado el 28 de junio de 2022.