



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

(PROYECTO)

**Evolución de la agricultura y cambio de uso de suelo en la cuenca del río La
Laja, Guanajuato, México (1995-2020)**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**Evolution of agriculture and land-use change in the Laja river basin,
Guanajuato, México (1995-2020)**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

LUNA BARREDA JETRO ADRIÁN

TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARÍA DEL CONSUELO BONFIL SANDERS

FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. BONIFAZ ALFONZO ROBERTO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DR. LINDIG CISNEROS ROBERTO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. Febrero 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Biblioteca Central

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS

(PROYECTO)

**Evolución de la agricultura y cambio de uso de suelo en la cuenca del río La
Laja, Guanajuato, México (1995-2020)**

TESIS

(POR ARTÍCULO CIENTÍFICO)

**Evolution of agriculture and land-use change in the Laja river basin,
Guanajuato, México (1995-2020)**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

LUNA BARREDA JETRO ADRIÁN

TUTOR(A) PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARÍA DEL CONSUELO BONFIL SANDERS

FACULTAD DE CIENCIAS, UNAM

COMITÉ TUTOR: DR. BONIFAZ ALFONZO ROBERTO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DR. LINDIG CISNEROS ROBERTO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. Febrero 2024

COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO
COORDINACIÓN DEL POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
OFICIO: CGEP/CPCB/FC/0937/2023

ASUNTO: Oficio de Jurado

M. en C. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar, UNAM
Presente.

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **07 de agosto de 2023** se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** en el campo de conocimiento de **Manejo Integral de Ecosistemas** del (la) alumno(a) **LUNA BARREDA JETRO ADRIÁN** con número de cuenta **312055576** por la modalidad de graduación de **tesis por artículo científico** titulado: **"Evolution of agriculture and land-use change in the Laja river basin, Guanajuato, Mexico (1995-2020)"**, que es producto del proyecto realizado en la maestría que lleva por título **"Evolución de la agricultura y cambio de uso de suelo en la cuenca del río La Laja, Guanajuato, México (1995-2020)"** ambos realizados bajo la dirección de la **DRA. MARÍA DEL CONSUELO BONFIL SANDERS**, quedando integrado de la siguiente manera:

Presidente: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ
Vocal: DR. MARCOS ADRIÁN ORTEGA GUERRERO
Vocal: DRA. MARÍA FERNANDA FIGUEROA DÍAZ ESCOBAR
Vocal: DRA. MARIANA BENÍTEZ KEINRAD
Secretario: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 29 de noviembre de 2023

COORDINADOR DEL PROGRAMA



DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA

c. c. p. Expediente del alumno

AGNS/AAC/GEMF/EARR/mnm



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, por brindarme educación de calidad.

Al programa de becas de la CGEP de la UNAM por brindarme la beca extraordinaria para poder realizar mis estudios de maestría durante dos años, y al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP) de la UNAM que me permitió asistir a presentar este trabajo al VIII Congreso Mexicano de Ecología.

A mi tutora principal, la Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders, por haberme aceptado en su equipo de trabajo y brindarme el apoyo necesario para culminar mis estudios de maestría. Finalmente agradezco a los miembros de mi Comité Tutor, el Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo y el Dr. Roberto Lindig Cisneros, por sus observaciones y aportaciones durante todo el periodo de estudio.

DEDICATORIA

A mis padres

Mis papás Pedro Luna Rojas y Leticia Guadalupe Barreda Amigón. Ellos son las mejores personas que he conocido, me han impulsado a ser mejor persona y a nunca desistir. A ellos les dedico todo mi esfuerzo académico y personal. No me podría imaginar un mundo sin ellos, sin embargo, cuando ellos partan de este mundo terrenal, ya me habrán dado todo lo necesario para que sea un buen hijo, hermano, tío y más. Esto es fruto de un esfuerzo constante de todos y para todos. Los amo de una manera pura.

A mis hermanos

Pedro, Omar, Lucero y Jerson. Personas con grandes destrezas y talentos. Estoy seguro de que logran grandes cosas. Gracias por ser parte de este proceso, son una inspiración.

A mi cuñada, sobrinos y sobrinas

Lesly, Omar, Azul, Daniela y Denver, que han sido parte de momentos de absoluta felicidad. Les deseo lo mejor hoy y siempre. Que este logro sea de ejemplo para ustedes y que cada día busquen ser mejores seres humanos.

A mi gran compañera

Jadu, que aún sin su presencia terrenal, siempre está conmigo. Me brindaste momentos magníficos y contribuiste en mi formación como ser humano de una manera extraordinaria. Se que en algún momento nos volveremos a ver y seremos felices.

A mi especial confidente

Paola, que desde que la conocí me inspiró a superarme. A través del tiempo que te he conocido he aprendido muchas cosas, he vivido momentos tan felices y experiencias que se quedan en el corazón. Gracias por haber sido parte de este proceso.

A mis tíos y primos.

Julián, Fernando, Aldo, Karol, Mónica, Alejandro, Karen, Dulce, Carlos, Mariana, May y Carina.

“Ama a la naturaleza de la que formas parte”

ÍNDICE

FIGURAS Y TABLAS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
PRESENTACIÓN DEL MANUSCRITO.....	8
DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN GENERAL.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Región del Bajío y de la cuenca Lerma- Chapala.....	5
Article; Figure 1. Location of the Laja river basin in the state of Guanajuato, central Mexico.....	11
Table 1. Grouping of natural vegetation types found in the basin according to INEGI classification system (2017).....	12
Figure 2. Land cover and land use maps of the La Laja river basin, in vector format at a scale of 1:50000 (figures A-F).....	15
Figure 3. Area (ha) of different land cover/land use classes in the La Laja river basin (1995-2020).....	16
Figure 4. Magnitude of change (ha) of each land use in 2020 as compared to 1995. Values outside the red circle correspond to increases, and those inside to decreases.....	16
Figure 5. Land cover and land use transitions in the Laja river basin (scale 1:50000).	17
Table 2. Transitions (ha) between irrigated agriculture, seasonal agriculture and natural vegetation during the study period.....	18
Figure 6. Transitions of natural cover and agriculture in the Laja river basin for each five-year period (scale 1:50000).....	29
Figure 7. Pathways of change agriculture / natural cover by period of analysis in the La Laja river basin (scale 1:50000).....	20
Table 3. Conversion rate (%) of land use and natural cover classes in the Laja River basin 1995-2020.....	21
Figure 8. A. Area of the main crops of seasonal agriculture in the Laja river basin. B. Area of the main crops of irrigated agriculture.....	23

RESUMEN

La conversión de la cobertura natural a distintas actividades de gestión de la tierra con fines sociales y económicos es una de las causas principales de la pérdida de hábitat y de biodiversidad, de la fragmentación de los ecosistemas y del cambio climático. Además de tierras, la agricultura de agroexportación requiere grandes cantidades de agua, lo que propicia la sobreexplotación de los acuíferos. Esto a su vez causa el agotamiento progresivo y la contaminación del agua subterránea regional, lo que afecta la salud de las personas y el ambiente. El presente estudio analizó la evolución de agricultura y los cambios en el uso del suelo en los 7000 km² de la Cuenca del Río La Laja (o Cuenca de la Independencia) en el periodo de 1995 a 2020. Se usó el software QGIS para la interpretación visual de imágenes satelitales Landsat a través de cuatro combinaciones de bandas espectrales. Se elaboraron seis mapas de tipo vectorial de uso de suelo y cobertura vegetal a escala 1:50,000, y seis mapas de transición. Además, se calculó la tasa de cambio para cada uso de suelo. La agricultura de riego, que cubría 77603 ha en 1995, se incrementó a 105959 ha en 2020 (+36.5%); mientras que la agricultura de temporal se redujo de 224008 a 208971 ha (-6.7%) en el mismo periodo; sus tasas de cambio anual fueron de 1.24% y -0.28% respectivamente. Los asentamientos humanos aumentaron 11983 ha (+405.8%), las zonas sin vegetación aparente 905 ha (+910.7%) y la vegetación secundaria de bosque de coníferas 1344 ha (+41.2%); sus respectivas tasas de cambio anual fueron de 6.48%, 9.25% y 1.37%. Las áreas con vegetación natural disminuyeron: el pastizal natural (9,877 ha, -15.6%), el pastizal inducido (6165 ha, -14%), el pastizal secundario (6063 ha, -6%), y el matorral xerófilo (5497 ha, -11.9%). El aumento en la superficie de riego estuvo asociado con el aumento en el número de pozos (de ~2000 en 1995 a más de 3000 en 2020), y de la extracción de agua subterránea, de 600 hm³/año a más de 1,000 hm³/año en 2020; la recarga fue de 290-300 hm³/año. El nivel freático regional descendió hasta 100 m en este periodo, y las concentraciones de arsénico y fluoruro aumentaron por encima de los límites para consumo humano. Esto apunta hacia una crisis progresiva en la cantidad y calidad del agua subterránea asociada a la agricultura industrial de exportación en la cuenca. Comprender las vías de transición impulsadas por la interacción de variables económicas, políticas, sociales y ambientales puede contribuir a impulsar cambios en las políticas públicas, promover el desarrollo económico a través de la agricultura sostenible, y lograr apoyo para el desarrollo

rural y la conservación de los ecosistemas y sus servicios. Además, puede contribuir al debate y al análisis del estado actual de otras cuencas hidrográficas del país. Existe una necesidad urgente de estrategias que ayuden a frenar la pérdida de cobertura natural vinculada a la agricultura industrial de exportación, que ha sido el principal factor que afecta el derecho al agua y a un medio ambiente sano en la cuenca.

ABSTRACT

The conversion of natural cover to various land uses for social and economic purposes is one of the main causes of habitat and biodiversity losses, ecosystem fragmentation and climate change. Besides land, industrial exports agriculture requires large amounts of water, promoting aquifer overexploitation. This, in turn, causes the gradual depletion and contamination of regional groundwater, affecting people's and environmental health. This study analyzed the evolution of agriculture and land use change in the 7000 km² of the La Laja river basin (or Independence Basin) between 1995 and 2020. QGIS software was used for the visual interpretation of Landsat satellite images through four combinations of spectral bands. Six vector-type maps of land use and vegetation cover were produced at 1:50,000 scale, along with six transition maps. In addition, change rate was calculated for each land use. Irrigated agriculture, which covered 77603 ha in 1995, increased to 105959 ha in 2020 (+36.5%); while seasonal agriculture fell from 224008 to 208971 ha (-6.7%) in the same period. Human settlements increased by 11983 ha (+405.8%), areas without apparent vegetation by 905 ha (+910.7%) and secondary coniferous forest vegetation by 1344 ha. Naturally vegetated area decreased: natural grassland (-9877 ha, -15.6%), induced grassland (-6165 ha, -14%) secondary grassland (-6063 ha, -6%), and xerophytic scrub (-5497 ha, -11.9%). The growth in irrigated area was associated to increases in the number of wells (from ~2000 in 1995 to more than 3000 in 2020), and groundwater withdrawal, from 600 hm³/year to more than 1000 hm³/year in 2020; recharge was 290-300 hm³/year. The regional water table dropped 100 m during this period, and arsenic and fluoride concentrations raised, exceeding the limits of safe human consumption. This points to a growing crisis in the quantity and quality of groundwater associated to industrial agriculture growth in the basin. Understanding transition pathways driven by the interaction of economic, political, social, and environmental variables can help to foster changes in public policies, to promote economic development through sustainable agriculture, and to gain support for rural development and ecosystem's services conservation. Besides, it may contribute to discuss and analyze the current state of other hydrological watersheds in the country. Strategies that help to prevent and curb the loss of natural cover linked to industrial agriculture, which is the main factor affecting people's right to water and a healthy environment in the basin, are strongly needed.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio de uso de suelo (CUSV) modifica el paisaje, al eliminar y transformar la configuración espacial de la vegetación natural, y es resultado de procesos político-económicos nacionales y globales. Las decisiones político - económicas, como la promoción de sectores específicos (i. e., la agricultura y la industria), fomentan la expansión territorial a expensas de áreas naturales. Asimismo, la globalización, asociada al proceso de liberación del comercio y las inversiones, ha abierto flujos de capital que fortalecen al sector agroindustrial, incrementando la demanda de tierra para la producción de cultivos exportables, lo que lleva a la conversión de la tierra a la agricultura industrial (Mendenhall *et al.*, 2012; Farmer y Cook, 2013; Galindo *et al.*, 2019).

Los impulsores del CUSV dependen de la escala de análisis espaciotemporal y varían en diferentes contextos socioeconómicos, políticos y ambientales. La fragmentación del paisaje tiene impactos negativos en la estructura, función y dinámica de los ecosistemas, y supone la pérdida de hábitat, que conlleva la disminución o pérdida de poblaciones silvestres y su aislamiento, al dificultar la migración y la dispersión genética; asimismo, incide en cambios en la composición de especies, pues las generalistas prosperan sobre las especialistas. Además, se ha asociado con la disminución de la provisión de servicios ecosistémicos esenciales y con el aumento de los bordes, que están más expuestos a las condiciones ambientales cambiantes (García *et al.*, 2002; SEMARNAT, 2015; Calzada *et al.*, 2018). Finalmente, al eliminar la vegetación por el cambio en el uso del suelo se emiten gases de efecto invernadero, causantes del aumento de la temperatura promedio del planeta (Bajocco *et al.*, 2012).

La agricultura es el principal promotor de CUSV que ha modificado el paisaje en dos regiones clave de México: el Bajío mexicano y la cuenca Lerma-Chapala (que pertenece a la región hidrológica Lerma - Santiago). El Bajío mexicano se caracteriza por su desarrollo económico (agrícola e industrial), y la cuenca Lerma - Chapala por su importancia en la gestión de los recursos hídricos, así como por su influencia en el desarrollo de la agricultura, el turismo y la pesca (Kurt *et al.* 2013; Figura 1). La cuenca hidrográfica del Río La Laja, en Guanajuato (también conocida como Cuenca de la Independencia), objeto del presente estudio, es tributaria de la cuenca Lerma - Chapala y forma parte de la región del Bajío.

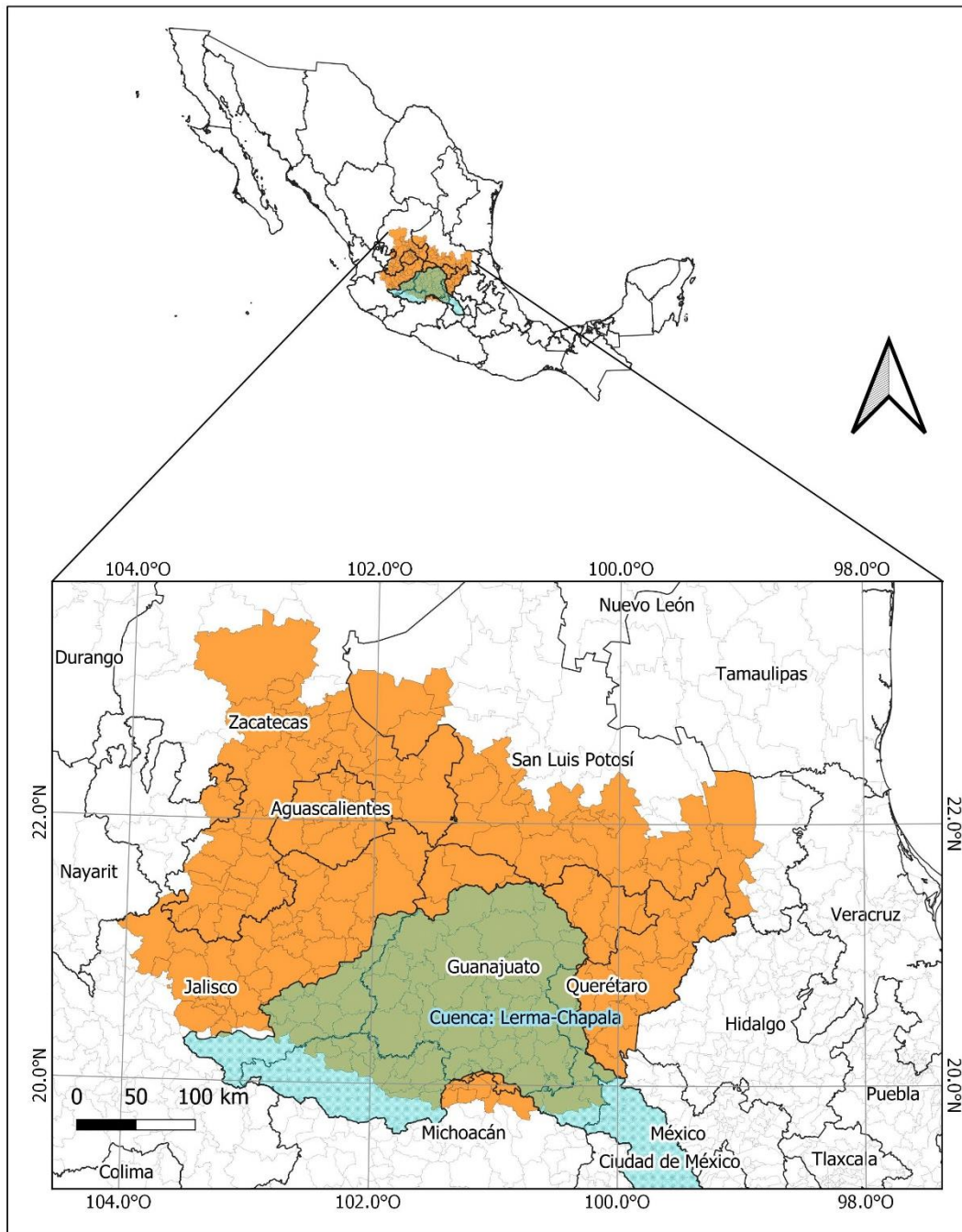


Figura 1. Región del Bajío (en color naranja) y Cuenca Lerma-Chapala (azul), de acuerdo con INEGI (2007) y Kurt et al. (2013) (elaboración propia).

Los factores que influyen en el cambio de uso de suelo son principalmente económicos, políticos y ecológicos. Sin embargo, todavía es necesario desarrollar el conocimiento científico que permita comprender las causas y efectos de estos procesos (Galvan *et al.*, 2015; Tagle *et al.*, 2017). Una forma de abordar esta investigación es a través del análisis de la cobertura vegetal y su dinámica de cambio hacia otras formas de uso del suelo, utilizando herramientas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG), junto con el análisis de la dinámica en la disponibilidad de agua subterránea (Geist y Lambin, 2001; Mejía *et al.*, 2003; Pineda *et al.*, 2009).

La cuenca hidrográfica del Río La Laja (o cuenca de la Independencia), es una zona con alta demanda histórica de recursos naturales (principalmente suelo y agua), que se han usado de forma intensiva, lo que ha afectado la salud de los ecosistemas y de las personas. La cuenca provee diversos servicios ecosistémicos, incluido el abastecimiento de alimentos, la regulación del clima, el control de la erosión, la formación de suelos, los ciclos biogeoquímicos, así como valores estéticos y culturales (Pineda, 2011). Sin embargo, el modelo agrícola impulsado en las últimas décadas, que profundiza prácticas derivadas de la globalización y el fortalecimiento del sector agroindustrial, ha tenido consecuencias socioambientales negativas. El agua, que se extrae de manera intensiva, se destina al riego del creciente sector agroindustrial, lo que ha llevado a que se supere la capacidad de recarga de los acuíferos. Esto se ha favorecido con el aumento de permisos para la construcción de nuevos pozos y la perforación cada vez más profunda del subsuelo (Ortega, 2009).

El objetivo de este estudio fue analizar la evolución agrícola y los cambios en el uso de suelo, así como sus implicaciones sociales y ambientales, a lo largo de un periodo de 25 años (1995 - 2020). Para cuantificar los cambios en la superficie cultivada y en la vegetación natural se utilizaron imágenes satelitales y técnicas de percepción remota.

Con este estudio se pretende brindar información útil para impulsar cambios en las políticas públicas destinados a promover la agricultura sostenible y garantizar la seguridad alimentaria, además de favorecer el desarrollo rural y la conservación de los ecosistemas y sus servicios. Además, busca aportar al debate y a los análisis sobre la situación actual y la dinámica de cambio de otras cuencas hidrológicas del país.

El artículo elaborado para el proceso de titulación, que se presenta a continuación, tiene los mismos objetivos antes planteados, y consta de un resumen, introducción, descripción de la zona de estudio y su problemática, métodos, resultados, discusión y conclusiones. Se sometió a una revista internacional, pero se considera su posible envío a otra en caso de que no sea aceptada.

Evolution of agriculture and land-use change in the Laja river basin, Guanajuato, Mexico (1995-2020)

Authors: Jetro Luna Barreda^{1,2}, Roberto Bonifaz Alfonso³, Roberto Lindig Cisneros⁴, Consuelo Bonfil^{1*}

Affiliation

¹ Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

² Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México

³ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

⁴ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México.

* Corresponding author: Consuelo Bonfil (cbonfil@ciencias.unam.mx)

Declarations of interest: none.

Introduction

In land-use and land cover changes (LU/LCC), the original land cover is eliminated or modified to allow for other land uses, such as agriculture, grazing, and forestry areas, industrial and human settlements (Ramos *et al.*, 2004; Farmer and Cook, 2013; Calzada *et al.*, 2018). Complex socioeconomic and environmental processes are interrelated in this process, which acts at different scales (Romm, 2011; Bajocco *et al.*, 2012). LU/LCC is a main cause of natural vegetation, habitat and biodiversity loss; besides, greenhouse gasses emissions, which cause global climate change, result from this process (Bajocco *et al.*, 2012).

Agricultural expansion has been recognized as the main cause of LU/LCC. Agriculture generates an unstable surface that is susceptible to soil erosion, nutrient losses, and salinization, among other processes. Loss of naturally vegetated areas increases with industrial agriculture, since it requires large land areas to operate. Besides, infrastructure development, demographic pressure, lack of regulation and compliance with law, contribute to this phenomenon, which has strong implications for biodiversity, climate, and long-term sustainability (FAO 2002; Pineda *et al.*, 2009; Calzada *et al.*, 2018).

The expansion of industrial agriculture is related to global and national political-economic processes; trade liberalization and foreign investment have favored capital flows that support this expansion, causing high demand of productive land. This large-scale production model depends on technology developed by the green revolution, such heavy machinery, intensive irrigation, and extensive use of toxic agrochemicals such as pesticides and fertilizers. It imposes extractive practices that favor a small sector of society (FAO, 2002; Pineda *et al.*, 2009; Galindo *et al.*, 2019), often causing ecological degradation.

LU/LCC studies contribute to understand the processes involved in land degradation, which results from altering the structure and functionality of ecosystems, which affects the functioning of hydrological basins (i.e., the area in which rainwater flows to a common waterway, which joins a larger tributary, a lagoon or ocean, including water in aquifers; Sánchez *et al.*, 2003). The use of geographic information systems (GIS) allows to understand trends in habitat and biodiversity losses, land desertification and degradation; this in turn may

help to develop policies, as well as management strategies, that avoid or reduce such damage (Ramos *et al.*, 2004).

Factors that influence land-use change are mainly economic, political, and ecological (Geist & Lambin, 2001; Pineda *et al.*, 2009). Nevertheless, scientific analyses that allow to fully understand the causes and effects of these processes are still needed, since they occur in many different contexts (Galvan *et al.*, 2015; Tagle *et al.*, 2017). Thus, this study is aimed at evaluating the magnitude of agricultural expansion and LUC, as well as its environmental and social implications, in the Laja (or Independence) basin, in the state of Guanajuato, Mexico, for 25 years (1995 – 2020).

Understanding transition pathways driven by the interaction of economic, political, social, and environmental variables can help foster changes in public policies, promote economic development through sustainable agriculture, and gain support for rural development and ecosystem's services conservation. Besides, it may contribute to the analysis and discussion of the state of other hydrological watersheds in the country.

Study area

The Laja river basin spans 7,000 km² and is located in northwest Guanajuato state; it is part of the Mexican Bajío (lowlands) region (Figure 1). Its highest mountains are 2,900 m a.s.l. while lowlands are around 1850-1900 m a.s.l. (Mahlknecht *et al.*, 2004; Mora *et al.*, 2016). Climate is semi-dry temperate and seasonal, with summer rains, BS₁kw(w)(e)g, according to Köppen classification system modified by García (2004). Annual precipitation is 600 mm in the south and 800 mm on the western mountains; the extreme north is drier (400 mm); average annual temperature is 17.1° C (Mora *et al.*, 2016; CONAGUA, 2020). Main soil types are Feozem (87.85%), Vertisol (10.12%) and Leptosol (2%) (INEGI, 2007). The first are dark soils rich in organic matter, suitable for agriculture. Vertisols have expandable clays with high moisture retention capacity, making them highly productive if irrigation is provided; otherwise, the clays contract forming a hard surface (INEGI, 2011). Leptosols are thin, stony calcareous soils. They are found in mountainous areas and have limited use for agriculture (FAO, 2008).

The main economic activities in the state are manufacturing industries (30.6%), trade (15.2), real estate services (10.6%), construction (9%), transport (6.7%), education (3.9%), agriculture and livestock (3.5%), and government (3.08%; INEGI, 2016). However, agribusiness are one of the main industries of the state.

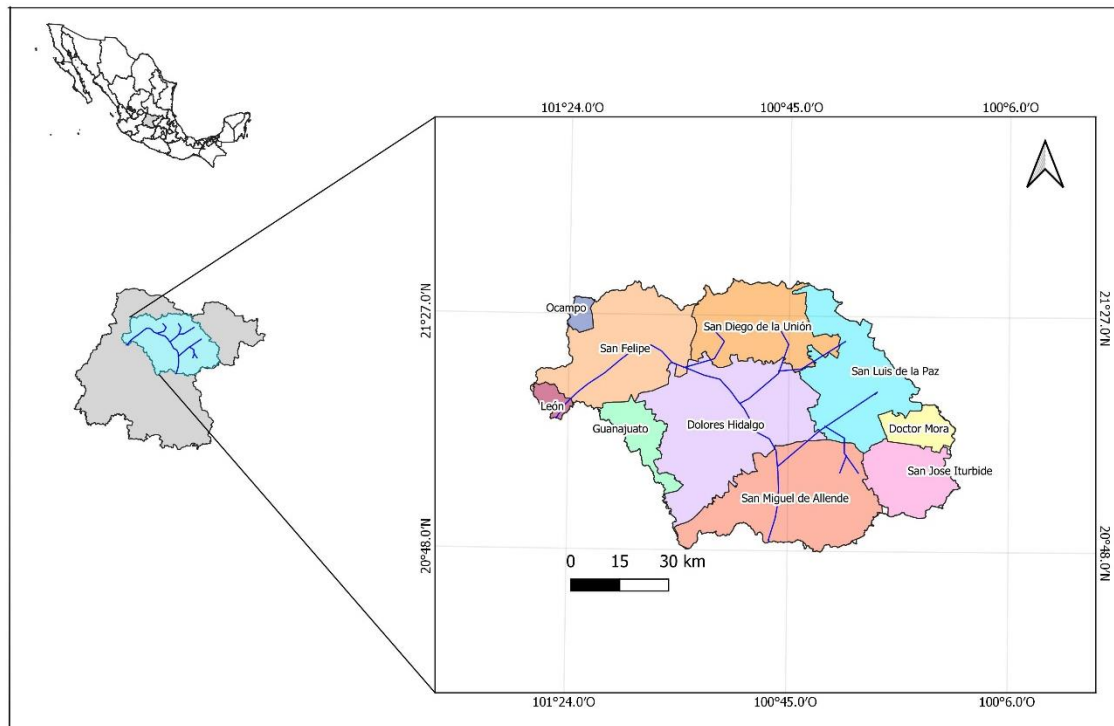


Figure 1. Location of the Laja river basin in the state of Guanajuato, central Mexico. Counties (municipios) names are shown in colors. Lines show main water courses.

Pine, pine-oak and oak forests, as well as secondary forests, are found in the western mountains, while grasslands, and xeric scrub –which includes different kinds of scrubs, including xeric mezquital– are found in the lowlands, as well as secondary vegetation derived from them (INEGI, 2017).

The Laja river is the main watercourse of the basin; it relies on a network of tributaries, such as the Arrastres, San Marcos, Plan, Carrizal and Bocas rivers; they converge in the Ignacio Allende Dam (Palacios and López, 2004). This basin includes large parts of the San Felipe, Dolores Hidalgo, San Diego de la Unión, San Luis de la Paz, San Miguel de Allende, San

José Iturbide, and Doctor Mora municipalities, although there are also small areas of Guanajuato, León, and Ocampo municipalities. These depend on underground water for agricultural, industrial, and domestic water supply (Palacios and López, 2004); the largest share is for agriculture (85%; Ortega *et al.*, 2002).

Methods

Land use and vegetation analysis – A visual reinterpretation of the land-use and vegetation map of INEGI series VI (1:250,000) –which depicts land use and vegetation in 2014 (INEGI, 2017)–, was performed. The various types of natural vegetation found in the basin were grouped according to INEGI classification system (2017), in which classes are organized in large vegetation groups; each one includes various vegetation types with ecological and physiognomic affinities (Table 1).

Table 1. Grouping of natural vegetation types found in the basin according to INEGI classification system (2017).

Large vegetation groups	Vegetation types
Coniferous forest	Pine Forest Pine-oak Forest
Oak forest	Oak Forest Oak-pine Forest
Xerophilous scrub	Crasicaule Scrub Microphyll Desert Scrub Xerophyll Mezquital
Secondary vegetation of oak	Secondary vegetation of Oak Forest Secondary vegetation of Oak- pine Forest
Secondary vegetation of pine forest	Secondary vegetation of Pine Forest Secondary vegetation of Tascate
Secondary vegetation of xerophytic scrub	Secondary vegetation of Crasicaule Scrub Secondary vegetation of Xerophyll Mezquital
Secondary dry deciduous forest	Secondary dry deciduous forest

The polygons of INEGI vectorial map were placed on satellite images for reinterpretation; land use and vegetation classes were identified with different combinations of spectral bands (infrared, false color, natural color, vigorous vegetation, and agricultural uses). Then, polygons of 2015 were adjusted to 2010 and 2020, those of 2010 to 2005, those of 2005 to 2000 and those of 2000 to 1995, resulting in one vectorial map every 5 years for 1995-2020 at a 1:50,000 scale (INEGI, 2017).

Satellite images of medium resolution were obtained from the United States Geological Survey (USGS, 2021) and originated from Landsat 5 satellites that have thematic mapper (TM) sensor, Landsat 7 with Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) sensor and Landsat 8 with Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS), with a spatial resolution of 30 m per pixel. The Pansharpening technique was used to improve spatial resolution of Landsat 7 and 8 images; in this way, those having a resolution of 15 m per pixel were obtained with the Semi-Automatic Classification Plugin (SC) complement from QGIS (Belfiore *et al.*, 2016). The images were obtained in March, June, September, and December 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020.

For LU/LCC analysis, transition matrices were made for all land cover/ land use classes, and percent change rate was calculated, following Puyravaud (2003):

$$r = \frac{1}{(t_2 - t_1)} * \ln \frac{A_2}{A_1}$$

where r is the annual conversion rate, t_1 and t_2 are the initial and final dates, and A_1 and A_2 the initial and final areas. A negative value indicates a reduction of the area and a positive one an increase.

Six intersection maps were created with QGIS software. The algorithm extracts the coincidental parts of the spatial objects from the initial (time 1) and the final (time 2) layers, assigning coincidental objects to the output map. The intersections were 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2015, 2015-2020 and 1995-2020. Transition maps showing area losses and gains, as well as permanence, were made. To clarify main routes of change, six transition maps between seasonal (rainfed) agriculture, irrigated agriculture and natural vegetation were created.

Hydrological analysis – To evaluate the dynamics of irrigated agriculture and water management, information on number of wells, piezometric levels and groundwater extracted from the aquifer, was obtained from Ortega (2022), who uses the natural limits of the basin, and CONAGUA (2020), whose limits are administrative (i.e., not natural).

Economic analysis – Crop evolution was analyzed using data on production volumes, yields, prices, and economic value of production per municipality obtained from Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021). Data from 2005 to 2020 were available for San Felipe, Dolores Hidalgo, San Diego de la Unión, San Luis de la Paz, San Miguel de Allende, San José Iturbide and Doctor Mora municipalities. Since data in SIAP start in 2003, and agricultural censuses were not conducted from 1992 to 2007 (Palacios *et al.*, 2011), there was no information from 1995 to 2004.

Results

Land use analysis – Fifteen land use and vegetation classes were identified: four for natural vegetation (oak forest, coniferous forest, xerophilous scrub and natural grassland), four for different land uses (seasonal agriculture, irrigated agriculture, induced grassland and human settlements), five for secondary vegetation (natural grassland, coniferous forest, oak forest, xerophilous scrub and dry deciduous forest) and two for water bodies and areas without apparent vegetation.

Agricultural areas (seasonal and irrigated), human settlements, areas without apparent vegetation, xerophilous scrub, and natural grassland, are found in the valley (below 2000 m a.s.l.); conversely, pine and oak forests are located on mountain slopes (2000 - 2900 m a.s.l.; Figure 2). Seasonal agriculture and all vegetation covers declined throughout the period: the first had the largest fell (-15,037.2 ha; 6.7%), followed by natural grassland (-9,877 ha; 15.6%), secondary vegetation of natural (-6,062.8 ha, 6%) and induced grasslands (-6,165.2 ha, 14%), xerophilous scrub (-5,496.5 ha; 11.9%), coniferous forest (-2,124.9 ha; 15 %) and oak forest (-1,898.9 ha; 3.42%) (Figures 2 and 3).

Conversely, irrigated agriculture showed the largest increase: 28,355.4 ha (36.5 %), followed by human settlements (+11,982.8 ha; 405.8%), secondary vegetation of oak forest (+3,683.9 ha; 8.1%), secondary vegetation of coniferous forest (+1,343.4 ha; 41.2%), areas without apparent vegetation (+905.3 ha; 910.7%), secondary vegetation of xerophilous scrub (+609 ha; 2.7%) and secondary vegetation of dry deciduous forest (+536 ha; 14%) (Figures 3 and 4).

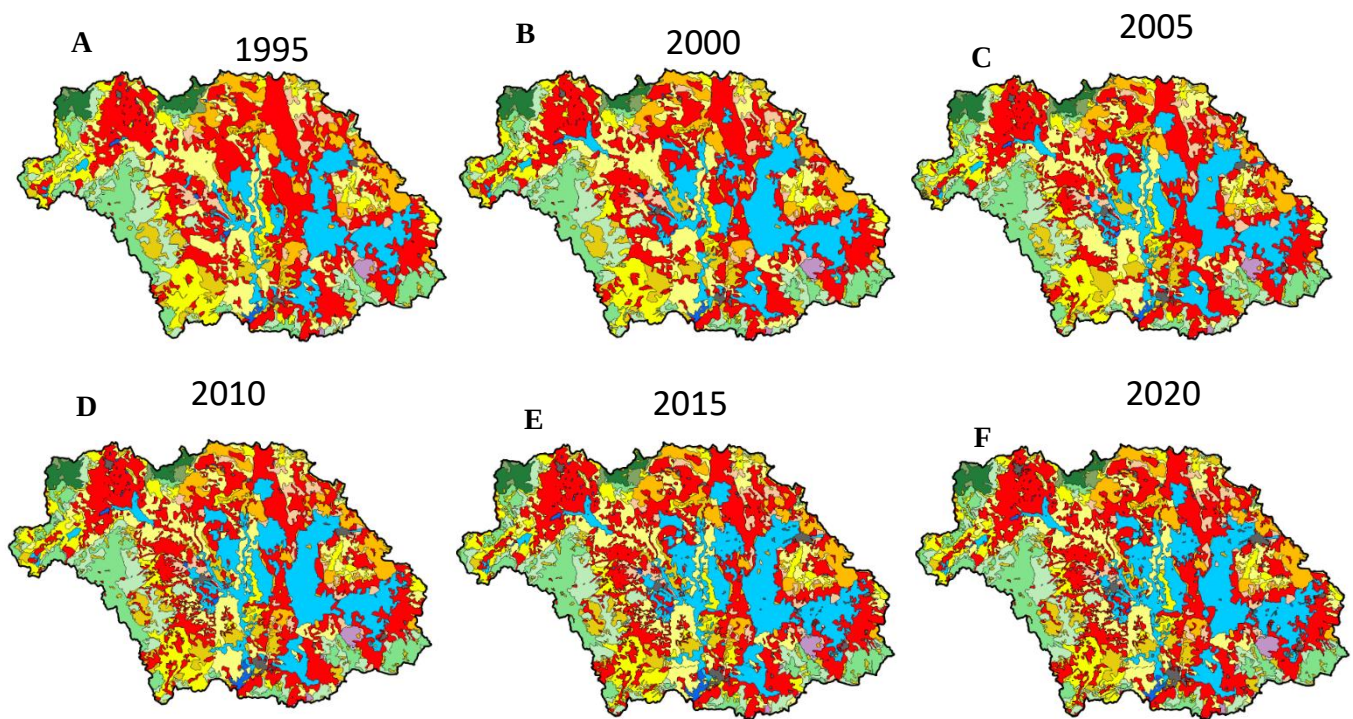


Figure 2. Land cover and land use maps of the La Laja river basin, in vector format at a scale of 1:50000 (figures A-F). Irrigated agriculture ■, Seasonal agriculture ■, Oak forest ■, Coniferous forest ■, Water bodies ■, Xeric scrub ■, Induced grassland ■, Natural grassland ■, Urban areas ■, Secondary oak forest ■, Secondary conifer forest ■, Secondary xeric scrub ■, Secondary natural grassland ■ and Secondary dry deciduous forest ■.

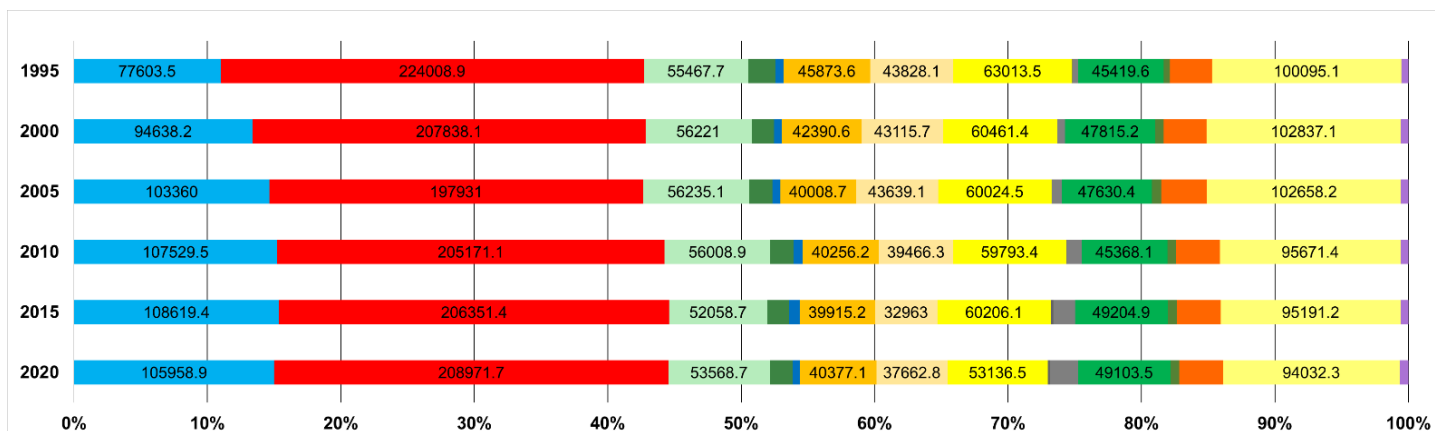


Figure 3. Area (ha) of different land cover/land use classes in the La Laja river basin (1995-2020). Irrigated agriculture ■, Seasonal agriculture ■, Oak forest ■, Coniferous forest ■, Water bodies ■, Xeric scrub ■, Induced grassland ■, Natural grassland ■, Urban areas ■, Secondary oak forest ■, Secondary conifer forest ■, Secondary xeric scrub ■, Secondary natural grassland ■ and Secondary dry deciduous forest ■. Bars corresponding to secondary vegetation of coniferous forest are very thin and can only be appreciated as shadows next to secondary vegetation of oak forest.

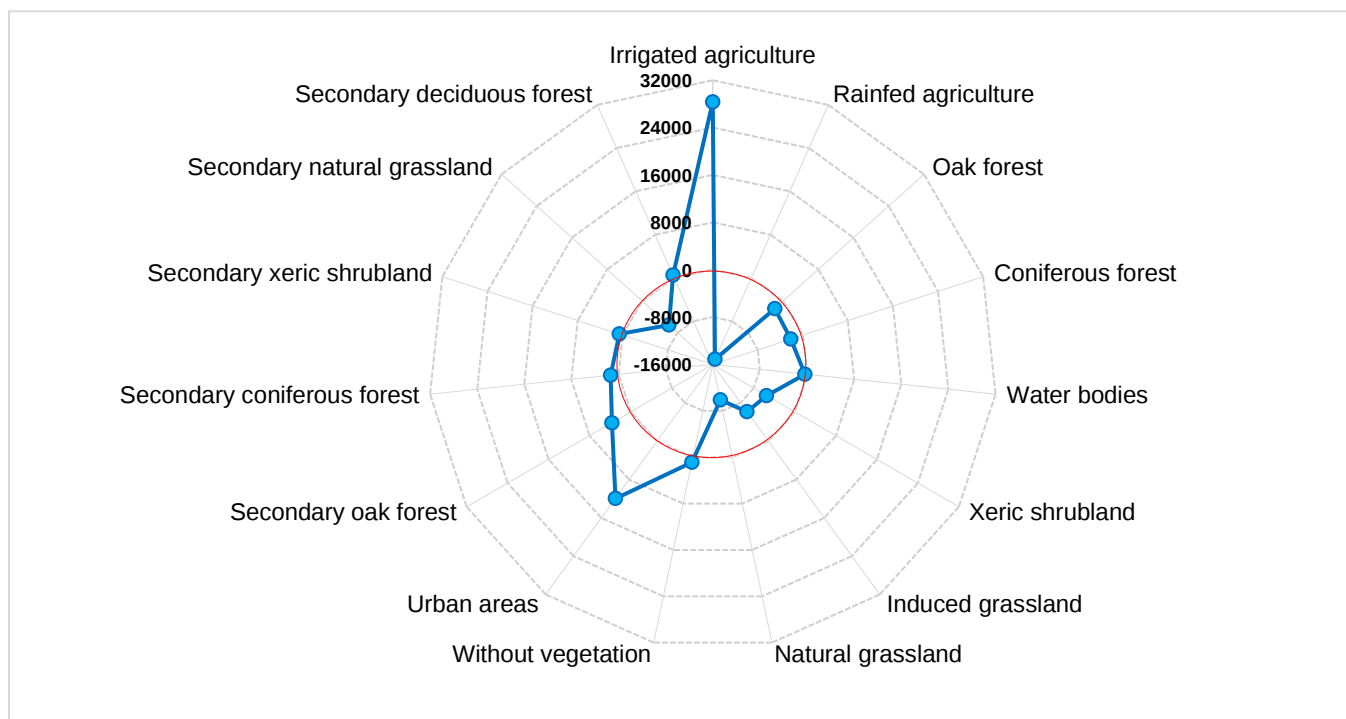


Figure 4. Magnitude of change (ha) of each land use in 2020 as compared to 1995. Values out of the red circle are increases, and those inside, decreases.

Vegetation analysis – The six transition maps of the periods 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010, 2010-2015, 2015-2020 and 1995-2020 allowed us to identify that the greatest losses in natural vegetation occurred between 2000 and 2005. Green areas, in which vegetation increased, are smaller than those in red, which designate loss of natural cover to other land uses or secondary vegetation (Figure 5).

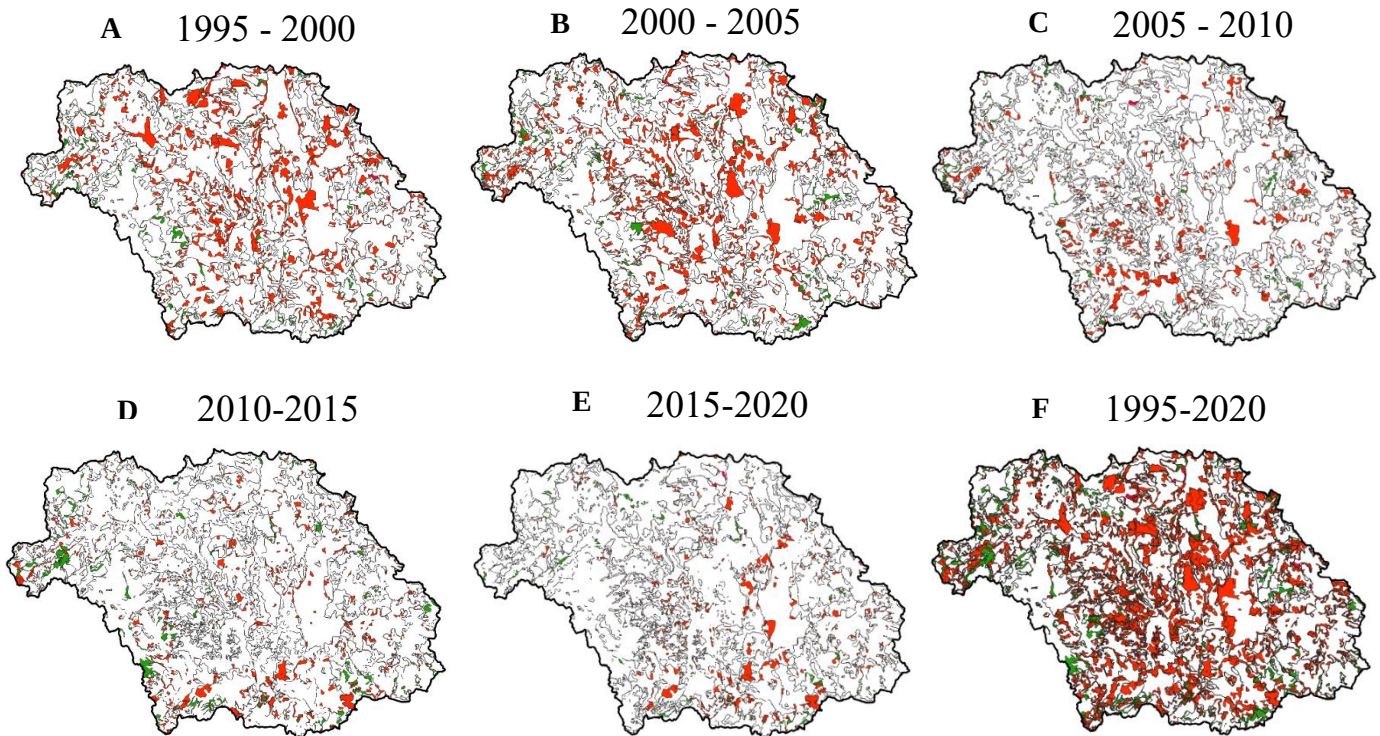


Figure 5. Land cover and land use transitions in the Laja river basin (scale 1:50000). Vegetation loss ■, permanence□ and vegetation gain ■.

During the study period (1995 – 2020), most of the area that changed in coniferous forest (88.9%), became secondary forests and grasslands; the same happened with oak forest (58.9%), and to a lesser extent with xerophilous scrub (33.8%) and grassland (21.4%). The largest losses in pine forest occurred between 1995 and 2000 (-3.46%) and in oak forest in 2010 - 2015 (-1.45%). The increase in seasonal agriculture from 1995 to 2020 relates to 48%

of the accumulated reduction of natural grassland, 37% of xerophilous scrub and 63.3% of secondary vegetation of natural grassland.

Transitions between agricultural lands and naturally vegetated areas show that irrigated agriculture grew at the expense of seasonal agriculture, while seasonal agriculture increased at the expense of natural vegetation (Table 2). Also, natural vegetation recovered from former seasonal agricultural lands (Figure 6).

Table 2. Transitions (ha) between irrigated agriculture, seasonal agriculture and natural vegetation during the study period. Diagonal in gray - area remaining in the same class. Transitions from rows to columns.

Class	Irrigated agriculture	Seasonal agriculture	Natural vegetation
Irrigated agriculture	67,304.6	5,677	4,554.5
Seasonal agriculture	32,696.5	163,515.2	21,698.1
Natural vegetation	5,885.2	38,910.8	307,201.7

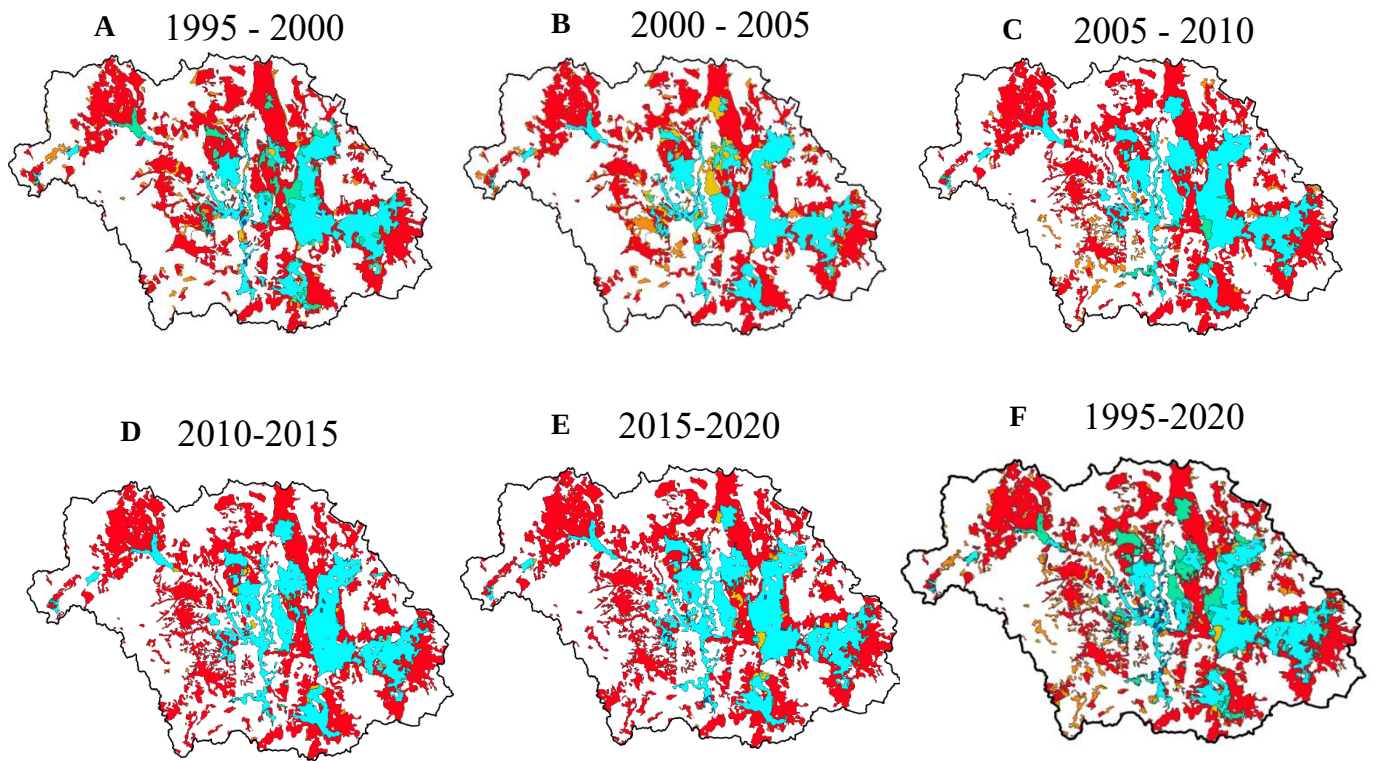


Figure 6. Transitions of natural cover and agriculture in the Laja river basin for each five-year period (scale 1:500000). Seasonal agriculture (permanence) ■, irrigated agriculture (permanence) ■, vegetation → seasonal agriculture ■, seasonal agriculture → irrigated agriculture ■, irrigated agriculture → seasonal agriculture ■ and vegetation → irrigated agriculture ■.

Thus, the main trends in land cover change were: natural vegetation → seasonal agriculture → irrigated agriculture, and natural vegetation → seasonal agriculture → natural vegetation (Table 2; Figure 7). The transition from seasonal to irrigated agriculture occurred during all the study period; the largest change (9%) was in 1995-2000. The transition from seasonal agriculture to secondary vegetation had two important consecutive periods: 1995-2000 (9.1%), and 2000-2005 (13%), but at the same time, important areas of natural vegetation were changed to seasonal agriculture (1995-2000, 5% and 2000-2005, 6.7%; Figure 7).

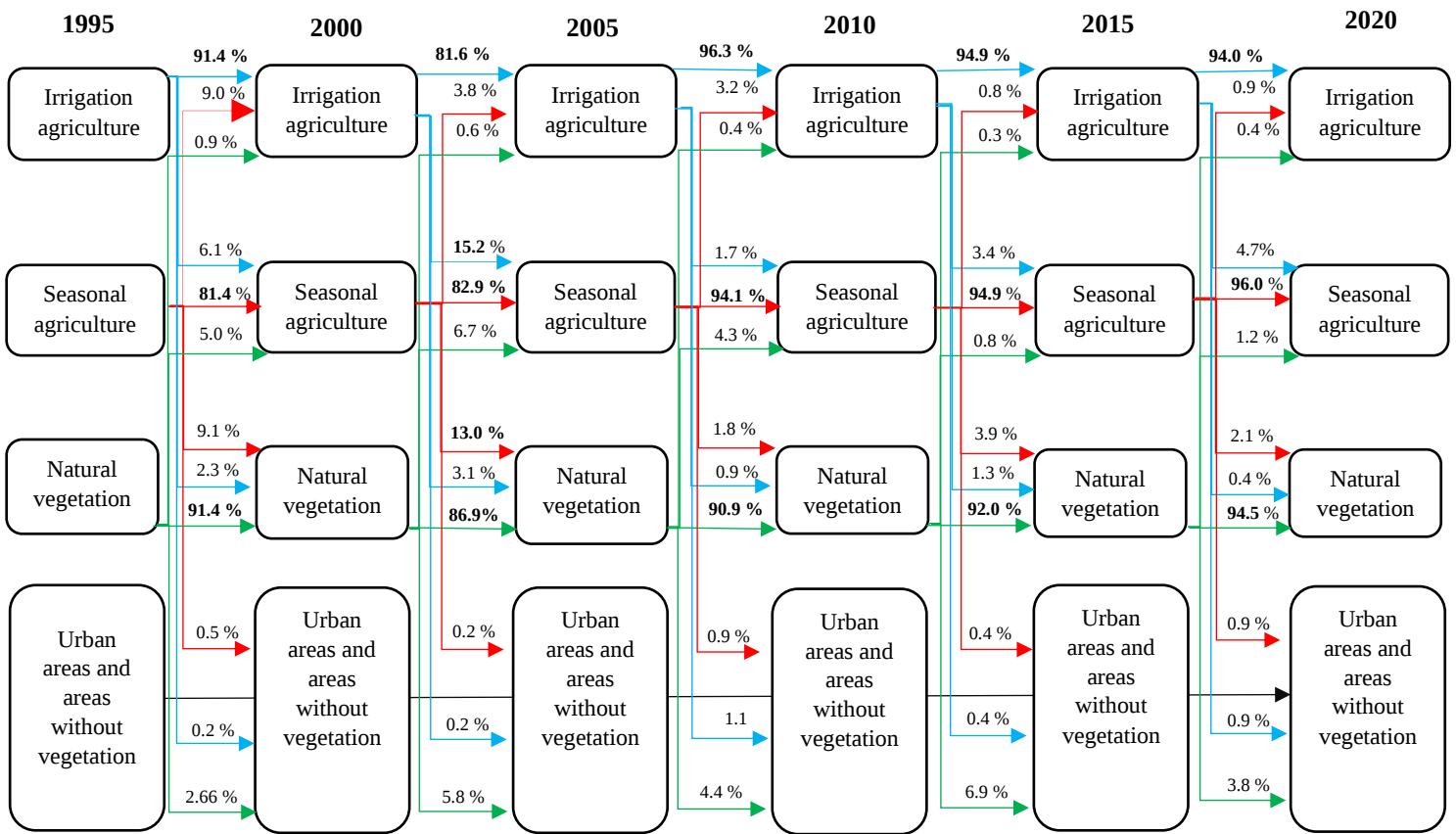


Figure 7. Pathways of change agriculture / natural cover by period of analysis in the La Laja river basin (scale 1:50000).

During the study period 53.8% of the seasonal agriculture area shifted to irrigated agriculture and 16.9% to secondary grassland; the latter was particularly important in 1995-2000 and 2000-2005, when it contributed with 25.6 % and 40.4% of all changes to secondary grassland. Conversely, naturally vegetated areas transitioned to urban settlements and areas without vegetation during all the study period, with the largest increase (6.9%) registered in 2010-2015 (Figure 7).

Conversion rates – The highest annual growth rates (r values) were registered in transitions to areas without vegetation, followed by urban areas, secondary coniferous forest, and irrigated agriculture. Conversely, natural grassland, coniferous forest, induced grassland and xerophilous scrub were the classes with higher negative values (Table 3).

The conversion rates to irrigated agriculture were positive during most of the study period (except for 2015-2020); it was particularly high in 1995-2000. Seasonal agriculture showed reductions between 1995 and 2005, with slight increases later (Table 3). The area of water bodies diminished, especially between 2015 and 2020. The largest r values were linked to urban areas and those without vegetation. The latter had the highest r during 2010–2015, while urban areas had high annual values throughout the study period (Table 3).

Table 3. Conversion rate (%) of land use and natural cover classes in the Laja River basin 1995-2020. The first column shows average annual change during the whole study period; the remaining columns annual changes during the six (five-year) periods analyzed.

Class	Transition					
	1995-2020	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
Without apparent vegetation	9.25	6.91	2.31	0.78	39.34	-3.1
Urban areas	6.48	5.84	5.59	8.38	7.27	5.31
Secondary coniferous forest	1.37	5.7	2.88	-2.16	0.99	-0.53
Irrigated agriculture	1.24	3.96	1.76	0.78	0.2	-0.5
Secondary tropical dry forest	0.53	0.82	0.53	-0.14	0.25	1.2
Secondary oak forest	0.3	-0.002	-0.07	-0.97	1.62	-0.05
Secondary xerophilous scrub	0.1	0.4	1.1	-0.53	-0.09	-0.34
Oak forest	-0.14	-0.58	0.005	-0.08	-1.45	0.55
Secondary natural grassland	-0.25	0.54	-0.03	-1.41	-0.09	-0.25
Seasonal agriculture	-0.28	-1.49	-0.97	0.71	0.11	0.24
Water body	-0.32	-2.33	1.06	3.4	1.97	-5.72
Xeric scrub	-0.51	-1.57	-1.15	0.11	-0.16	0.21
Induced grassland	-0.6	-0.32	0.24	-2.01	-3.59	2.65
Coniferous forest	-0.65	-3.46	0.39	0.01	-0.93	0.71
Natural grassland	-0.68	-0.82	-0.14	-0.08	0.14	-2.51

Hydrological analysis – According to CONAGUA (2020) –who uses administrative limits for aquifers–, to maintain optimal conditions for the aquifers of the Laja River basin, water extraction should be $128.5 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ in the Laguna Seca and $139.7 \text{ hm}^3 \text{ ha}^{-1}$ in the Cuenca Alta aquifers. However, current volumes are estimated at $398 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ and $412 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ respectively, although volumes are $160 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ and $202 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$, respectively (CONAGUA, 2020). Thus, the deficit is around $269 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ in Laguna Seca and $272 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$ in the Cuenca Alta aquifers.

Ortega (2009), using a hydrogeological perspective, reported the presence of two aquifers having hydraulic continuity: a granular one, which he called Aquifer of Independence, formed by lacustrine and vulcanoclastic deposits, and an aquifer fractured in volcanic rocks, that delimits the perimeter of the basin. There were nearly 2,000 wells in the basin 1995, and over 3,000 in 2020, of which about 80% were in the granular aquifer and 20% in the fractured volcanic aquifer. Groundwater extraction increased from $600 \text{ hm}^3/\text{year}$ to over $1,000 \text{ hm}^3/\text{year}$ in 2020 (Ortega, 2022). The balance between recharge and extraction, which determines the optimal availability of the aquifer, was $290 - 300 \text{ hm}^3/\text{year}$, and thus there has been increasing water overexploitation. As a result, drilling depths have increased continuously.

Economic analysis – Although the area of seasonal agriculture was larger than that of irrigated agriculture during the whole study period (Figure 8), the economic value of irrigated crops was higher, and increased until 2018, when it reached \$264.4 M USD (5289.6 MDP); with a slight decrease in 2019 (-\$19.4 M USD). The value of crops from seasonal agriculture, on the other hand, increased between 2012 and 2017 (from \$16.6 to \$41.9 M USD), with a reduction in 2018, increasing again to \$49.9 and \$69.8 M USD in 2019 and 2020, respectively.

The most common cultivars in seasonal agriculture were corn, beans, barley, green oats (fodder), wheat and Agave. The corn area grew from 2005 to 2015, decreasing slightly in 2020 (Figure 8A). The area cultivated with beans, the second main crop, remained stable and only decreased slightly in 2020. Throughout the period, the main crop (per area) was corn, yet it did not always have the highest market value. Agave's value increased remarkably

between 2015 and 2020, from \$7.5 to \$31.2 M USD (150 to 625 MDP). Furthermore, in 2020 its value was much higher than that of beans and corn (\$4.7 - \$4.58 M USD, respectively).

Green alfalfa, broccoli, corn (grain), oats (fodder), beans, green corn (fodder), lettuce, green chili and asparagus had the largest irrigated areas (Figure 8b). The area of alfalfa remained stable (2005-2010); broccoli and fodder oats areas increased, and there were small decreases in chili and more recently in corn. Broccoli had a high production value in 2020 (\$66.3 M USD, 1327 MDP), followed by alfalfa (\$46.3 M USD, 926 MDP); but the values of all crops increased between 2005 and 2020.

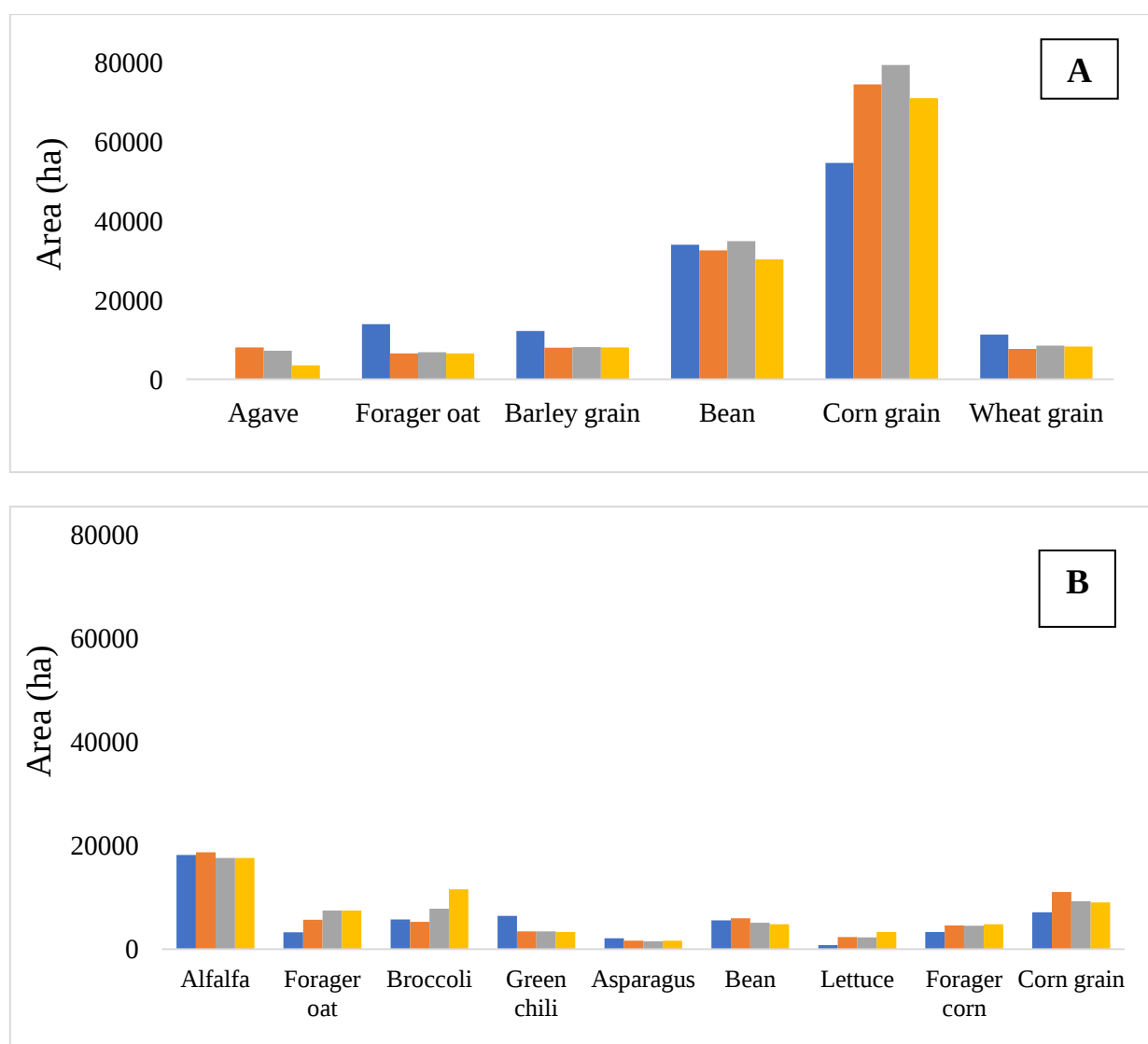


Figure 8. A. Area of the main crops of seasonal agriculture in the Laja river basin. B. Area of the main crops of irrigated agriculture. Years: 2005 ■, 2010 ■, 2015 ■ and 2020 ■.

Discussion

Land-use analysis - The analysis of the progression of agriculture in the basin showed that irrigated agriculture increased dramatically (~28,000 ha), at the expense of seasonal agriculture, which in turn established largely in areas of natural grassland and xerophilous scrub, the main vegetation in the lowlands. The trend towards continuous increases in irrigated area in this basin had been reported before; Palacios and López (2014) showed that it increased fourfold between 1976 and 2002. However, their data are probably an underestimation, since they report an irrigated area of 30590 ha in 2000, while we recorded 94638 ha. Nonetheless, this trend had already started during the 70s. The leading cause of regional dynamics in land use is the adoption of an agro-industrial model, driven by large-scale (national and international) economic and political processes.

Transition dynamics between seasonal agriculture and natural vegetation occurred during the entire study period. This is the result of natural vegetation recovery during the fallow periods of traditional agriculture; however, it may also be the result of abandonment of this type of agriculture, which is caused by low prices of agricultural goods, increases in prices of agricultural inputs, loss of soil fertility, migration, lack of interest of young people in agriculture and diversification of activities in rural areas (López *et al.*, 2014). The transition of irrigated to naturally vegetated areas is highly improbable, which has strong ecological implications.

National and state policies that promote an agri-business model –and thus change from seasonal to irrigated agriculture– ignore the environment consequences of this process (Navarro *et al.*, 2015; Camargo, 2020). These policies support green revolution technology, in spite of its high impact on agroecosystems. This intensification has eliminated fallow periods and requires many external inputs, such as fertilizers and pesticides. The widespread use of these products and practices decreases soil fertility and increases soil and water pollution and biodiversity losses. There has also been loss of cultivated varieties, since the complex harvesting patterns of traditional agriculture have been replaced by monocultures, which are less resilient to pests, diseases, and global environmental changes. Thus, crop yields become increasingly dependent on an "ideal" environment (Harvey and Sáenz, 2007).

Since aquifer overexploitation has caused a large imbalance between water discharge and recharge, it can be expected that in the near future the main restriction for the expansion and permanence of the agro-industrial model will be water availability. This, in turn, may trigger a large socioeconomic regional crisis. Our data show that the conversion rate to irrigated agriculture decreased in 2005-2015 (with respect to 1995-2005) and even became negative in 2015-2020, which may be a first warn that this model is reaching its limits.

This intensive-industrialized production has left small-scale peasants behind (Navarro *et al.*, 2015). The North American Free Trade Agreement (NAFTA), which established disadvantageous conditions for small and medium producers in the 1990s, has been a main promotor of these changes. The state budget for agriculture was reduced and replaced by foreign investment in agri-business, which led to water and land concessions to big consortia, along with the elimination of subsidies (Echánove, 2000). As a result, small and medium scale producers entered a process of financial bankruptcy; their survival strategies included leasing, selling, or transferring rights of common lands (or ejidos; Camargo, 2020). All these changes led to the disintegration of the traditional social fabric, loss of cultural identity and increases in social differentiation between private owners and traditional common land tenants (ejidatarios; Marañón, 2002).

Vegetation analysis – Grasslands and xeric scrub were the main vegetation types that experienced area losses, due to their location in the valley, where geographic and climatic factors favor agriculture. Oak and coniferous forests also experienced changes during the period, but to a lesser extent. Sierra de Santa Rosa, in the western part of the basin, where most of these forest are, is a protected area (PA), where agricultural activities are limited; likewise, in the northwest, there are two PA (Sierra de Lobos and Peña Alta) with agricultural restrictions (SMAOT, 2022). In addition, the steep slopes and shallow soils of forested areas do not favor their transition to agriculture. This explains the dynamics of land use and vegetation cover change in this basin, which differs from that of other regions in the country where forested areas have undergone large transformations (Bocco *et al.*, 2001; García *et al.*, 2012; González *et al.*, 2022).

Reductions in vegetation cover during the study period threatened biodiversity and essential ecosystem services, including water and regulation of biogeochemical cycles. Besides,

natural resources previously available to local communities, such as fruits, seeds, and firewood, as well as ornamental or medicinal plants, have been lost (Navarro *et al.*, 2015; Bejarano, 2017). Underground water overexploitation by intensive agriculture has diverted it from other human uses and ecosystem functions (FAO, 2002).

Except for natural grassland, secondary vegetation increased at the expense of more preserved areas, as is the case in other parts of the country (FAO, 2002; Calzada *et al.*, 2018). Increases in secondary vegetation (from losses in primary vegetation) generally decrease ecosystem services; however, these areas provide important resources to local people, and they are a viable option for promoting natural regeneration and ecological restoration (Gann *et al.*, 2019). This would allow to recover some elements of the original vegetation as well as ecosystem services, including aquifer recharge (Jiménez *et al.*, 2010; Alayon and Álvarez, 2016): It would also increase the capacity to cope with the risks of climate change (Melo *et al.*, 2020). Growth of urban areas (2nd highest increase rate) and of areas devoid of vegetation decreased mainly naturally vegetated areas, creating a cycle of anthropic degradation. As far as urban and irrigated agriculture areas keep growing, ecosystem services recovery will be less feasible.

Standard economic development theory holds that as production efficiency increases, human and capital migration also do. Abandonment of peasant agriculture and agribusiness growth have caused increased migration to urban areas since the second half of the 20th century in Mexico (Ramírez and Tapia, 2000; López *et al.*, 2014). The expansion of this model will probably cause the loss of the remaining natural areas in the basin, except perhaps in steep slopes, even though this intensive-industrialized production model has not favored local or national economies (Angelsen and Kaimowitz, 2001).

To reverse natural resources degradation and increase the provision of environmental services it would be necessary to change national policies to halt industrial agriculture and favor more environmental-friendly and diversified agricultural systems. These should be managed by local peasants (and not by profit-oriented foreign investors), while simultaneously respecting the local culture. These systems may maintain long-term production and favor more diverse landscapes that increase environmental services, including soil fertility and biodiversity. The current neoliberal agro-industrial model must be

transformed in one that promotes convergence of development, social justice and conservation goals (Harvey and Sáenz, 2007; Alexander *et al.*, 2016).

Natural areas provide ecosystem services that contribute to the stability, productivity, and sustainability of arable land. Food sovereignty should be promoted. Agroecology could be an alternative production model, since it combines scientific and traditional knowledge to produce food in a more sustainable way, including social, economic, and environmental aspects (Lewontin and Levins 2007). Decision makers should consider the benefits of agroecological and agroforestry systems (environmental sustainability, resilience, health benefits, food sovereignty, community participation, natural resources conservation, law enforcement and respect for local culture) and incorporate them as public policy instruments in agriculture. The implementation of these measures could promote food production and enhance aquifer recharge.

Hydrological analysis – Currently there is uncertainty in the characterization of the aquifers in the basin. As explained, Ortega (2011) uses hydrogeological criteria to define them, while federal and state authorities use administrative boundaries. This lack of a clear definition and characterization of aquifers, along with lack of ability or political will of authorities to act, have led to irrational groundwater extraction. At present, CONAGUA continues granting permits for new wells, instead of regulating and enforcing sustainable water use.

Aquifer overexploitation, along with vegetated areas loss, reduces percolation and recharge, causing serious environmental damage, such as subsidence, ground cracking, lowering of the water table and pollution by point, diffuse and induced sources (Aguilar and Ortega, 2017). As a result of deep-water extraction, contaminants from the fractured aquifer have mixed with water of the granular aquifer (Ortega, 2009). With current trends, piezometric levels will continue to decline, and only deep groundwater with contaminants (such as arsenic and fluoride) migrating upstream, will be available.

Non-governmental agencies have detected about 3,000 cases of dental fluorosis in the north and northeast of the state of Guanajuato and about 5,000 cases in the southwest. Fluorosis is an anomaly in enamel formation due to excessive exposure to fluoride during teeth development, causing also bone weakening in humans and animals. The impact of arsenic has not been evaluated yet in the study area; however, its carcinogenic effects are known in

the Laguna Region (part of Durango, Coahuila, and Chihuahua states). Sodium concentration and groundwater pH also affect soil fertility, photosynthesis, and nutrient movement in plants (Ortega *et al.*, 2002; Ortega, 2009; Ortega, 2011). Increasing concentrations of these and other elements, along with groundwater becoming increasingly scarce, will impact people and environmental health. This, in turn, might cause a strong economic and social crisis in the region, as in the Lerma-Chapala hydrological system, where reservoirs like Lake Chapala have been continually decreasing because of water use for agriculture in Guanajuato (Bravo and Castro, 2006; Navarro *et al.*, 2015). From a human's perspective groundwater is not a renewable resource; it originated 10,000 - 35,000 years ago (Ortega, 2009). The lack of law enforcement, the scant representation of water users, as well as the absence of an adequate system for pricing water for agriculture are additional deficiencies that complicate the efficient and equitable allocation of hydric resources (Foster *et al.*, 2004).

There have been some efforts to minimize health and environmental damages arising from inappropriate water management, that were aimed to change the prevailing paradigm of groundwater management (Ortega, 2011). An academic group promoted working meetings with water management agencies, civil organizations, agricultural organizations, and society, and gave training courses on groundwater to government officials, academics, decision makers and society, to increase social engagement (Ortega *et al.*, 2022). They also made a Groundwater Law Proposal that recommended an alternative method for water management, aimed at understanding underwater flow in connection with superficial water, climate, topography, soil characteristics, and vegetation (Ortega, 2022). Although it did not have the political support needed to implement it, several studies have continued, including those on environmental and health impacts of water overexploitation, and on evolution of agriculture and land cover, including this study.

Economic analysis – The modernization process that changed traditional agrarian structures in the countryside has influenced land use dynamics in the basin. Land-use laws depend on the state's economic policy, which has promoted extractive practices that accumulate capital unequally in favor of a small sector of society (Ramírez and Tapia, 2000; Álvarez, 2012; Rodríguez and Quintanilla, 2019). Changes in crop patterns in irrigated agriculture –from

grains to vegetables— in the basin were associated to a large growth in exportation (Marañón, 2002).

Increases in yields, volumes and production values of irrigated agriculture are associated to increases in area, water overexploitation and incorporation of new technologies, as well as to low salaries and overexploitation of rural workers (Marañón, 2002). The increasing area devoted to vegetables is boosted by high demand of frozen and fresh vegetables in the United States. Palacios and López (2004) estimated that irrigated agricultural area increased on average 885 ha/year from 1976 to 2002; this figure increased to 1134 ha/year during the period analyzed in this study.

In an irrigation district adjacent to the basin (La Begoña), agriculture productivity fell 45 % between 1970 and 2000, because of reductions in runoff in the Laja river basin, which feeds the dam providing water to La Begoña (Palacios and López, 2004). Thus, it is very likely that production will also fall in the Laja river basin in the medium term due to water scarcity, although state and federal agencies do not seem to be worried (Echánove, 2000; Marañón, 2002; Hernández, 2013, Hernández and Muñoz, 2015; SADER, 2021).

Although most ejidos and communities in Guanajuato state have agricultural lands, the economic importance of agriculture has dropped, since it was 21 % of the GDP in 1970, while in 2000 it was 7 % and 5,3 % in 2021 (INEGI, 1985; INEGI, 2022). There is a significant gap between small and medium producers who cannot access expensive technological packages, and agribusiness, backed by the export market, which have benefited from concessions from communities and ejidos (Marañón, 2002; Meyer; 2004; Navarro *et al.*, 2015). Only in 38.3% of the ejidos and communities young people work in agricultural activities.

Productivity increases in agriculture have not brought better salaries for rural workers nor better life conditions for rural people in Guanajuato (Tagle *et al.*, 2017). Rural population faces unfavorable economic conditions, which encourages migration to the US (in 58% of ejidos and communities; Morett and Cosío, 2017). There has been no improvement in social marginalization in Guanajuato, which has the 14th place since 2010 (INEGI, 2023).

An alternative to counteract the low economic income of seasonal agriculture could start by fixing better payments for different crops, reduce intermediaries and force large companies that buy and store grains and other crops, to pay fair prices to producers. In addition, prioritizing crops that have greater water resilience and a higher rural price (Rulfo *et al.*, 2007; Roldan and Chavarría, 2022; SIAP, 2021).

In the last decades, agriculture in the basin has been very dynamic regarding area and crop patterns, in the context of land use changes, urban growth, demand for products for exportation and water availability (García *et al.*, 2002). It is feasible that seasonal agriculture will increase in the next decades when there will be not enough water to sustain irrigated crops. However, previously irrigated lands can leave contaminated and degraded soils. Future research, and adequate policies, will be needed to boost social participation and promote development of legal frameworks to overcome this and achieve Sustainable Development Goals.

Conclusions

The leading role played by industrial agriculture in land cover/land use change documented in this basin is the result of trade liberalization, foreign investment in agribusiness, and globalization, which were prompted by trade agreements (TLC -NAFTA), and the public policies supporting them. The dynamics of change in the basin has affected not only naturally vegetated areas but also productive systems and landowners (ejidos). However, current trends in LU/LCC and water extraction allow us to envision a halt in further industrial agriculture growth in a few decades, as water availability continues dropping. Other factors not analyzed in this research, such as soil degradation by increased salt concentration and erosion may also play a role.

It is expected that the results of this study (update of land use and vegetation maps, and a careful literature review), can be used as basic inputs to support adequate decision-making for rural development and conservation ecosystem services. It is urgent to develop and implement programs that include alternative productive models and suitable socioeconomic organization that improve both the natural environment (aquifers, soils and ecosystems) and the livelihoods of rural communities.

This study can serve as a reference to understand LU/LCC dynamics in other basins; new research questions emerging from it refer to the driving forces causing economic, social, political, and environmental changes in the larger Bajío region, as well as future scenarios for its transformation. The holistic understanding of the dynamics of the Laja river basin is the basis for improving water use and agricultural management in this important region of Mexico.

Funding

Jetro A. Luna Barreda received a postgraduate CGEP scholarship (for a master's degree) from UNAM. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Acknowledgements

This article is part of the requirements for obtaining the master's degree in Biological Sciences UNAM of Jetro A. Luna. C. Bonfil thanks Adrián Ortega for introducing us to the complex environmental arena of the Laja River basin.

References

Aguilar, G. R., & Ortega, G. A. (2017). Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(2): 91-104. <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.430>

Alayon, G. & Álvarez, F. (2016). Diversidad e importancia de la vegetación secundaria en un sistema silvopastoril en Yucatán, México. *Agroproductividad*, 10 (2): 60-64. Retrieved from <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/954>. Accessed May 15, 2023.

- Alexander, S., Aronson, J., Whaley, O., & Lamb, D. (2016). The relationship between ecological restoration and the ecosystem services concept. *Ecology and Society*, 21(1). <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08288-210134>.
- Álvarez, F. R. (2012). Neoliberalism and Parks: the urban political ecology of green public space in Mexico City. *Sociedad Hoy*, 23: 83-115. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/902/90229346007.pdf>. Accessed May 24, 2022.
- Angelsen, A. & Kaimowitz, D. (2001). Agricultural technologies and tropical deforestation. CABI Publishing, Wallingford, UK; New York. Retrieved from https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/Bangelsen0101E0.pdf. Accessed May 4, 2023.
- Bajocco, S., De Angelis, A., Perini, L., Ferrara, A., & Salvati, L. (2012). The impact of land use/land cover changes on land degradation dynamics: A Mediterranean case study. *Environmental Management*, 49: 980-989. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9831-8>.
- Bejarano, G. F. (2017). Los plaguicidas altamente peligrosos en México (1st ed.). Los plaguicidas altamente peligrosos: nuevo tema normativo internacional y su perfil nacional en México (Chapter 1). Retrieved from <https://www.rapam.org/wp-content/uploads/2017/09/Libro-Plaguicidas-Final-14-agst-2017sin-portada.pdf>. Accessed November 20, 2022.
- Belfiore, R., D'Allestro, P., Meneghini, C., & Parente, C. (2016). QGIS use for HIS PAN-sharpening application to Landsat 8 OLI images. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 22(10): 2773-2776. <https://doi.org/10.1166/asl.2016.7095>.

Bravo, P. H., & Castro, R. J. (2006). Construcción de una matriz de contabilidad social con agua para el estado de Guanajuato. Centro de Investigación y Docencia Económicas, 176: 1-20. Retrieved from

https://cide.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1011/177/1/000066804_documento.pdf. Accessed May 15, 2022.

Calzada, L., Meave, J. A., Bonfil, C., & Figueroa, F. (2018). Lands at risk: Land use/land cover change in two contrasting tropical dry regions of Mexico. *Applied Geography*, 99: 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.021>.

Camargo, B. F. (2020). La tecnificación exitosa del modelo agrícola empresarial en el Bajío mexicano: maquinaria e infraestructura, 1940-1975. Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México. *Historia Agraria de América Latina.*, 1: 74-99.

<https://doi.org/10.53077/haal.v1i02.73>.

CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna Seca (1104). Estado de Guanajuato. Retrieved from

https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1104.pdf.

Accessed August 24, 2022.

CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108). Subdirección general técnica. Gerencia de aguas

subterráneas. Guanajuato. Retrieved from https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1108.pdf. Accessed August 4, 2022.

Echánove, H. F. (2000). La industria mexicana de hortalizas congeladas y su integración a la economía estadounidense. Instituto de Geografía. UNAM. México. Boletín.

- Investigaciones Geográficas*, 43: 105-121. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n43/n43a8.pdf>. Accessed June 10, 2022.
- FAO. (2002). *Agriculture mundial: hacia los años 2015/2030*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>. Accessed September 23, 2021.
- FAO. (2008). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional*. Retrieved from <https://www.fao.org/3/a0510s/a0510s.pdf> Accessed May 2, 2023.
- Farmer, G. T., & Cook, J. (2013). Understanding Climate Change Denial. *Climate Change Science: A Modern Synthesis*, 455-466. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5757-8_23.
- Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2004). México – Los ‘Cotas’: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea Lecciones de la Práctica*. Banco Mundial, programa asociado de la GWP, pp. 1-16. Retrieved from https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2010/09/10b_COTAS.pdf. Accessed August 23, 2021.
- Galvan, M., Walker, R., & Warf, B. (2015). Land Change Regimes and the Evolution of the Maize-Cattle Complex in Neoliberal Mexico. *Land*, 4(3): 754-777. <https://doi:10.3390/land4030754>. Accessed March 10, 2023.
- García, N. H., García, D. R., Moreno, S. R., & González, R. A. (2002). Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970-1997 en Guanajuato. Instituto de Geografía. *Investigaciones Geográficas*, 47: 92-112. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n47/n47a7.pdf> Accessed August 14, 2022.

García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (5th ed.). Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from https://www.academia.edu/12911044/Modificaciones_al_sistema_de_clasificaci%C3%B3n_clim%C3%A1tica_de_K%C3%B6ppen_para_adaptarlo_a_las_condiciones_de_la_Rep%C3%BAblica_Mexicana_2004_Enriqueta_Garc%C3%Ada Accessed May 14, 2022.

Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence. LUCC International Project Office. 116. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/248420451_What_Drives_Tropical_Deforestation . Accessed August 24, 2022.

Harvey, C. A. & Sáenz, M. J. (2007). Evaluación y conservación de biodiversidad en paisajes fragmentados de Mesoamérica. Instituto Nacional de Biodiversidad. Costa Rica. Retrieved from <https://isbn.cloud/9789968927291/evaluacion-y-conservacion-de-biodiversidad-en-paisajes-fragmentados-de-mesoamerica/>. Accessed June 22, 2023.

Hernández, H. E. (2013). Tesis de Licenciatura. El Cultivo de Brócoli (*Brassica oleraceae* *itálica*) para Exportación en el Norte del Estado de Guanajuato. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. División de agronomía. Departamento de fitomejoramiento, pp. 129. Retrieved from <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/798/62551%20HERN%C3%81NDEZ%20HERN%C3%81NDEZ%20,%20EPIGMENIO.pdf?sequence=1>. Accessed May 12, 2022.

Hernández, A., & Muñoz, O. (2015). Uso de plantas mexicanas. El chile como alimento.

Revista Ciencia, 16 -23. Retrieved from

https://amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/66_3/PDF/Chile.pdf. Accessed

November 12, 2022.

INEGI. (1985). Anuario estadístico de Guanajuato, 1984. Tomo III. Secretaría de

Programación y Presupuesto Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

Retrieved from

https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1290/702825151355/702825151355_1.pdf. Accessed November 10, 2023.

INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250 000

(Continuo Nacional). México. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia>.

Accessed April 23, 2023.

INEGI. (2011). Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación,

escala: 1:250,000, Serie IV. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México D.F.,

México, pp. 133. Retrieved from [https://docplayer.es/96434137-Guia-para-la-](https://docplayer.es/96434137-Guia-para-la-interpretacion-de-cartografia-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-serie-iv.html)

[interpretacion-de-cartografia-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-serie-iv.html](https://docplayer.es/96434137-Guia-para-la-interpretacion-de-cartografia-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-serie-iv.html). Accessed

March 12, 2021.

INEGI. (2016). Estructura económica de Guanajuato, en síntesis. Instituto Nacional de

Estadística y Geografía. México, pp. 19. Retrieved from

https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825083984.pdf. Accessed March, 2023.

INEGI. (2017). Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación, escala: 1:250,000, Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México D.F., México, pp. 204. Retrieved from https://books.google.com.mx/books?id=LCHZDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbp_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Accessed July 21, 2021.

INEGI. (2022). Producto interno bruto por entidad federativa, Guanajuato, 2021 preliminar. Comunicado de prensa número 744/22, 7 de diciembre de 2022. Retrieved from https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/PIBEF/PIBEF_Gto.pdf. Accessed August 23, 2023.

INEGI. (2023). Índices de marginación 2020. CONANPO. México, pp. 153. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/848423/Indices_Coleccion_280623_entymun-p_ginas-1-153.pdf. Accessed January 2, 2023.

Jiménez, O., Durán, G., Dupuy, R. & González, I. (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Uso del suelo y vegetación secundaria. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, 460 – 464. Retrieved from <https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap9/04%20Vegetacion%20secundaria.pdf>. Accessed April 25, 2023.

Lewontin, R. & Levins R. (2007). The maturing of capitalist agriculture: Farmer as proletarian. In *Biology under the influence: Dialectical essays on ecology, agriculture, and health*. New York: Monthly Review Press, pp 400. Retrieved from https://www.si.edu/object/siris_sil_903784. Accessed January 4, 2023.

- López, V. H., Balderas, P. A., Chávez, M. C., Juan, P. I., & Gutiérrez, C. G. (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 22 (2):136-144. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/104/10439327004.pdf>. Accessed January 23, 2021.
- Mahlknecht, J., Steinchm, B., & Navarro de León, I. (2004). Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environmental Geology*, 45:781–795. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0938-3>.
- Marañón, P. B. (2002). Impactos socioeconómicos y ambientales de la modernización agroexportadora no tradicional en El Bajío, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. AREAS. Revista de ciencias sociales. *Trabajo y sociedad en los campos de la globalización agroalimentaria*, 22: 183-203. Retrieved from <https://revistas.um.es/areas/article/view/144461>. Accessed August 23, 2021.
- Melo, F., Parry L., Brancalion P., Pinto S., Freitas J, Manhaes A., Meli P., Ganade G., and Chazdon R. 20220. Adding forests to the water-energy-food nexus. *Nature sustainability* 4(2): 85-92. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00608-z>
- Meyer, J. (2004). La Revolución mexicana. Tusquets. pp 303. ISBN 978-607-421-141-2.
- Mora, D., Carmona, J., & Cantorral, U. E. (2016). Diatomeas epilíticas de la cuenca alta del río Laja, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84 (4): 1024-1040. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.09.004>.

Navarro, G. H., Flores, S. D., Pérez, O., & Pérez, H. L. (2015). Intensificación agrícola, prácticas sociotécnicas e impactos ecológicos y sociales en El Bajío. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 15 (30): 135-159. Retrieved from <https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/293>. Accessed March 5, 2021.

Ortega, G. M., Castellanos, J. Z., Aguilar, G. R., Vázquez, A. A., Alanis, R. E., Vargas, C. C., & Urrutia, E. F. (2002). A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity, and pH at the Independence aquifer in Guanajuato. *Terra Latinoamericana*, 20(2): 199-207. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320213>. Accessed April 22, 2022.

Ortega, G. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma Chapala, México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 26 (1): 143-161. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742009000100012. Accessed October 21, 2021.

Ortega, G. (2011). Situación del agua subterránea en México: una experiencia Científico-Legislativa y sus implicaciones. Punto de Acuerdo, Fundación Humanismo Político, pp 1-17. Retrieved from https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2012/07/situacion_del_agua_subterranea_en_mexico-una_experiencia_cientifico-legislativa.pdf. Accessed September 24, 2023.

Ortega, G. (2022). Numerical Analysis of the Groundwater Flow System and Heat Transport for Sustainable Water Management in a Regional Semi-Arid Basin in Central Mexico. *Water*, 14; 1-19. <https://doi.org/10.3390/w14091377> .

Palacios, V. E., & López, L. C. (2004). La sobreexplotación de las cuencas hidrológicas: el caso de la cuenca del río de la Laja, Guanajuato. En: El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Instituto Nacional de Ecología. 131-145. Retrieved from <https://agua.org.mx/biblioteca/la-sobreexplotacion-de-las-cuencas-hidrologicas-el-caso-de-la-cuenca-del-rio-laja-guanajuato/>. Accessed March 14, 2022.

Palacios, M. V., Almaguer, V. G., & Muñoz, R. M. (2011). El campo mexicano: 1970-2007 un análisis a partir de los censos agrícolas, ganaderos y ejidales (1st ed.). (Chapter 1). Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), pp. 303. Retrieved from <https://ciestaam.edu.mx/libro/campo-mexicano-1970-2007-una-analisis-a-partir-los-censos-agricolas-ganaderos-ejidales/>. Accessed December 13, 2021

Pineda, J. N., Bosque, S. J., Gómez, D. M., & Plata, R. W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69: 33-52. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci_abstract. Accessed January 14, 2021.

Puyravaud, J. P. (2003) Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation.

Forest Ecology and Management: 117: 593-596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3).

QGIS. Development Team. (2021). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. Version 3.22.9-białowieża. Retrieved from <https://qgis.org>. Accessed January 14, 2021.

Ramírez, V., & Tapia, B. (2000). Tendencia regional de crecimiento urbano: el caso del Bajío. *Sociológica*, 15(42): 91-113. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/3050/305026734001.pdf>. Accessed November 20, 2022.

Ramos, R. R., Palma, L. D., Ortiz, S. C., Ortiz, G. A., & Díaz, P. G. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistema de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22 (3): 267-278. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57322303.pdf>. Accessed September 23, 2022.

Rodríguez, E., & Quintanilla, A. L. (2019). Relación ser humano-naturaleza: Desarrollo, adaptabilidad y posicionamiento hacia la búsqueda de bienestar subjetivo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 23 (3): 7-22. Retrieved from <https://www.redalyc.org/journal/837/83762317002/>. Accessed November 12, 2022.

Roldan, C., & Chavarria, M. (2022). Nopal/tuna, mercado y territorio en México: un enfoque de capacidades. *Eutopía*, 21: 100-123. <https://doi.org/10.17141/eutopia.21.2022.5435>.

Room, J. (2011). Desertification: The next dust bowl. *Nature*. 478, 450-451. <https://doi.org/10.1038/478450a>.

Rulfo, V., Pérez, D., Real, L., & Byerly, M. (2007). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber, en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, pp. 195. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/311368794_Conocimiento_y_practicas_agronomicas_para_la_produccion_de_Agave_tequilana_Weber_en_la_zona_de_denominacion_de_origen_del_tequila. Accessed July 2, 2022.

SADER. (2021). Logró México primer lugar en exportación de espárragos con más de 173 mil toneladas en 2020. Retrieved from: <https://www.gob.mx/agriculture/prensa/logro-mexico-primer-lugar-en-exportacion-de-esparragos-con-mas-de-173-mil-toneladas-en-2020>. Accessed December 14, 2022.

Sánchez, V., García, N., & Palma, T. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales (1st ed.). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. pp. 48. Retrieved from http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf. Accessed June 12, 2022.

SIAP. (2021). Consulta de datos abiertos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadística de la producción agrícola. Retrieved from <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>. Accessed June 15, 2022.

SMAOT. (2022). Áreas naturales protegidas. Decretos de las Áreas naturales protegidas. Retrieved from <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/areas-naturales-protegidas>. Accessed September 14, 2022.

Tagle, Z., Caldera, O., & Rodríguez, G. (2017). Complejidad ambiental den el Bajío mexicano: implicaciones del proyecto civilizatorio vinculado al crecimiento económico.

Región y Sociedad, 68: 193- 221. Retrieved from

<https://regionysociedad.colson.edu.mx:8086/index.php/rys/article/view/873/1016>.

Accessed September 23, 2023.

USGS. (2021). EarthEplorer. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Accessed March 14, 2021.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

La agricultura fue la actividad dominante en la zona de estudio durante gran parte de su historia y hasta mediados del siglo pasado (INEGI, 1985; Rionda, 2002). Sin embargo, su importancia disminuyó entre la década de los años 70 y el presente siglo (de 21% en 1970 a 5.3% en 2021) debido por diversos factores, entre ellos el crecimiento de la industria manufacturera, del comercio y los servicios inmobiliarios (INEGI, 2016). También influye en ello el deterioro de los recursos naturales, debido a la disminución de la superficie cubierta con vegetación natural y a la sobreexplotación continua de los acuíferos (Ortega, 2009; Conagua, 2020).

La agricultura industrial ha sido impulsada por políticas económicas nacionales e internacionales que han buscado la modernización a través del libre mercado y la inversión extranjera, sin incluir al medio ambiente ni a los diversos sectores sociales (Mendenhall *et al.*, 2012; Farmer y Cook, 2013; Galindo *et al.*, 2019). La implementación de políticas neoliberales durante los años ochenta llevó a que los pequeños productores de granos no pudieron abastecer el mercado ni competir con los precios internacionales, ya que es más rentable importar granos que exportarlos. Esto dejó sin sustento a los pequeños productores, que no tuvieron más alternativa que rentar sus tierras a las agroindustrias (Pineda, 2011).

Además de recibir facilidades de los gobiernos federal y estatal, las agroindustrias, utilizan mano de obra barata, lo que ha llevado a que sean negocios florecientes cuyo número ha aumentado en los últimos años, sin que esto haya mejorado la calidad de vida de la población (Navarro *et al.*, 2015; Camargo, 2020).

Para mejorar los ingresos de los campesinos que se dedican a la agricultura temporal sería necesario reducir las cadenas de intermediarios y obligar a las cadenas de acaparamiento de productos a pagar precios justos, además dar prioridad a cultivos que tienen una mayor resiliencia hídrica y un precio rural más alto. También se debería sensibilizar a los diversos sectores sociales sobre las tendencias actuales de la agricultura regional y sus consecuencias para las personas y el medio ambiente (Rulfo *et al.*, 2007; SIAP, 2021; Roldan y Chavarría, 2022).

El creciente valor de la producción de la agricultura de riego asociada a la agroexportación se debe al aumento de la superficie, al cambio en el patrón de cultivos, a la incorporación de nuevas tecnologías y a la sobreexplotación hídrica (Echánove, 2000; Marañón, 2002; Hernández, 2013, Hernández y Muñoz, 2015; SADER, 2021). Es muy probable que esta tendencia se detenga a mediano plazo debido a la falta de agua, pero esto no parece preocupar a las autoridades de la Conagua ni a las dependencias estatales o federales relacionadas con la agricultura.

En este estudio comprobamos la hipótesis de que la superficie dedicada a la agricultura de riego ha aumentado a costa de las zonas dedicadas a agricultura de temporal, y que éstas últimas han aumentado a costa de las zonas de vegetación natural, principalmente pastizales naturales y matorrales xerófilos. Aunque los bosques de encino y de coníferas también sufrieron transformaciones durante el periodo analizado, éstas fueron menores, lo que se relaciona con el hecho de que parte de su superficie contiene áreas naturales protegidas (ANP) que tienen restricciones agrícolas (SMAOT, 2022). Por esta razón, y debido a las pendientes elevadas y suelos poco profundos en las áreas boscosas, las pérdidas más notables se dieron en los pastizales y matorrales situados en los valles, mientras que en algunas regiones del país se registra una mayor transformación de las áreas forestales (Bocco *et al.*, 2001; García *et al.*, 2012; González *et al.*, 2022)

Además, observamos que, con excepción del pastizal natural, las coberturas vegetales secundarias aumentaron a costa de la vegetación más conservada, como ha ocurrido en otras partes del país (FAO, 2002; Hernández *et al.*, 2015; Calzada *et al.*, 2018). Esto se relaciona con el aumento de la superficie agrícola, de pastizales inducidos y de asentamientos humanos. Aunque el aumento de la superficie de la vegetación secundaria a costa de la primaria se considera negativo en términos ecológicos, estas áreas resultan una opción viable para llevar a cabo programas de reconversión agropecuaria que favorezcan la regeneración natural para la restauración ecológica (Gann *et al.*, 2019). Esto permitiría recuperar algunas características de la vegetación primaria y sus servicios ecosistémicos, incluida la recarga de los acuíferos (Jiménez *et al.*, 2010; Alayón y Álvarez, 2016).

El abandono de áreas agrícolas de temporal ha provocado un aumento en las zonas sin vegetación aparente y de vegetación secundaria de pastizales. Los procesos ambientales,

sociales y económicos involucrados se relacionan con la pérdida de la fertilidad del suelo por un mal manejo, el alza de los precios de los insumos agrícolas, la migración, la falta de interés de los jóvenes por la agricultura y la diversificación de las actividades en el medio rural (López *et al.*, 2014; Morett y Cosío, 2017). Las zonas urbanas han experimentado un gran crecimiento, que se ha producido tanto en zonas con vegetación natural como en los terrenos agropecuarios que rodeaban a las ciudades. Según PAOT (1998) el primer paso para la urbanización es la eliminación de coberturas naturales para su transición a un sistema agrícola que, una vez que no es productivo, da paso a la urbanización. En la cuenca estudiada, las tierras productivas también se transformaron debido al crecimiento de poblados y ciudades, y a la especulación inmobiliaria asociada a este proceso.

La pérdida y fragmentación de los ecosistemas de la región han tenido efectos negativos en su estructura y funcionalidad. La configuración espacial de los ecosistemas ha modificado la distribución espacial de los recursos, haciéndolos más inaccesibles y frágiles. El incremento de la población, la conversión de zonas naturales a uso agrícola y la degradación de los sistemas hídricos seguirán provocando un cambio acelerado en el uso de suelo, convirtiendo grandes paisajes en mosaicos heterogéneos (López *et al.*, 2014), e incluso homogenizando grandes áreas dominadas por el uso agrícola industrial.

De acuerdo con la CONAGUA (2020), el agua ha desempeñado un papel importante en el desarrollo del Bajío guanajuatense; sin embargo, no se ha respetado el volumen de extracción adecuado para mantener la disponibilidad de agua subterránea. La asignación equitativa y eficiente de los recursos hídricos se ha visto obstaculizada por diversos factores, que incluyen la falta de aplicación de la Ley de Aguas Nacionales, el incumplimiento de las vedas establecidas por el ejecutivo federal, una escasa representación de los usuarios del agua en la cuenca y la falta de un sistema adecuado de precios del agua destinado a la agricultura (Foster *et al.*, 2004). A esto se suma la incertidumbre en la determinación y caracterización de los acuíferos de la cuenca. A pesar de las restricciones y regulaciones destinadas a mantener la disponibilidad agua, las autoridades siguen autorizando la construcción de nuevos pozos, por la corrupción que impera en el sector (Ortega, 2022).

Con las tendencias actuales, los niveles piezométricos continuarán disminuyendo, y solo se dispondrá de aguas subterráneas profundas con contaminantes como arsénico y fluoruro, que

afectan la salud humana y el medio ambiente. Esto supone una creciente crisis en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas. Sin políticas adecuadas en el manejo de los acuíferos, el agua subterránea será cada vez más escasa, y las concentraciones de As, F, y otros elementos continuarán aumentando. No se observa voluntad política de las autoridades para implementar las medidas correctivas necesarias para restablecer el equilibrio hídrico (Ortega, 2009). En general, podemos concluir que, si las tendencias actuales continúan, la agricultura de riego no será rentable en el futuro en grandes áreas de la cuenca, lo que permite vislumbrar una crisis económica.

Para adaptar los programas de desarrollo e impulsar proyectos productivos alternos y formas de organización socioeconómica adecuados para las condiciones actuales, es necesario modificar la visión estratégica y las acciones de los gobiernos federal, estatal y municipales, impulsando cambios en la política pública (hídrica y agrícola). Esto incluye implementar programas enfocados en la conservación del suelo, además de incluir un manejo más eficiente del agua y la reconversión del modelo agroindustrial, apoyando a los pequeños y medianos productores. Esto cobra especial relevancia frente al cambio climático, ya que se esperan mayores temperaturas y menores precipitaciones en amplias zonas del país (PNUD- INECC, 2016)

La planificación y gestión de los recursos naturales del Bajío guanajuatense requiere de la colaboración de diversos actores y sectores sociales para poder encontrar, desde un enfoque transdisciplinario, estrategias de solución a los problemas socioambientales que se han generado. Debemos reflexionar sobre cómo las decisiones que se han tomado afectan la configuración de los paisajes naturales. El entendimiento holístico de la cuenca hidrográfica del río La Laja puede ser la base para mejorar la gestión de los recursos hídricos y agrícolas de esta importante región del campo mexicano.

REFERENCIAS

Bocco, G., Mendoza, M. & Masera, R. O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 44:

18-38. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n44/n44a3.pdf>. Consultado el 12 de abril del 2022.

Candelas, R. R. (2019). La relevancia de los ejidos y las comunidades rurales en la estructura social de México. Documento de trabajo núm. 319. Recuperado de: <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/camara/Centros-de-Estudio/CESOP/Novedades/Documento-de-trabajo.-La-relevancia-de-los-ejidos-y-las-comunidades-rurales-en-la-estructura-social-de-Mexico#:~:text=El%20ejido%20en%20M%C3%A9xico%20es,abordarse%20bajo%20una%20visi%C3%B3n%20tridimensional>. Consultado el 12 de abril del 2022.

CentroGeo. (2015). Metadatos de: Núcleos Agrarios Guanajuato, RAN – INEGI. Recuperado de: https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aran_nucleosagrarios_guanajuato_polygons/layer_info_metadata. Consultado el 14 de marzo del 2022

Clichevsky, N. (2003). Pobreza y acceso al suelo urbano: algunas interrogantes sobre las políticas de regularización en América Latina. SERIE Medio ambiente y desarrollo. Chile. CEPAL. 82 pp. Recuperado de: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5780/1/S0311860_es.pdf. Consultado el 12 de marzo del 2023.

Galindo, A. R., Pérez, H. M., Reynoso, S. R., Rosas, R. O. & González, G. C. (2019). Cambio de uso de suelo, fragmentación del paisaje y la conservación de *Leopardus pardalis* Linnaeus, 1758. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 10 (52): 1-21.

Gann, D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, R., Jonson, J., Hallett, G., Eisenberg, C., Guariguata, R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K. & Dixon, W. Internacional principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(1): 1-46.

García, O. J., Gutiérrez, C. J., Pérez, J. J. & Balderas, P. M. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el Altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, (55-56): 63-73.

González, F., Segarra, J., Soleado, A. & Stéphane, M. (2022). Forest cover loss in the Nevado de Toluca volcano protected area (Mexico) after the change to a less restrictive category in 2013. *Biodiversity and Conservation*, 31: 871-894.

<https://doi.org/10.1007/s10531-022-02368-y>

Hernández, P. E., García, F. J, Vázquez, G. & Cantellano, R. E. (2015). Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989-2015). *Madera y Bosques*. 28 (1): 1-22. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>

Kurt, U., Garduño, R. & Ibarra, J. (2013). Especializaciones reveladas y ventajas competitivas en el Bajío mexicano. *EcoQuantum*, 11(2): 41-74.

Mejía, S. E., Exebio, G. A., Palacios, V. E., Santos, H. A. & Delgadillo, P. M (2003). Mejoramiento del manejo de distritos y módulos de riego utilizando sistemas de información geográfica. *Revista Terra Latinoamericana*, 21(4): 513-522.

Mendenhall, C. D., Daily, G. C. & Ehrlich, P. R. (2012). Improving estimates of biodiversity loss. *Biological Conservation*.151 (1): 32-34.

Morett, S. C. & Cosío, R. C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. Universidad Autónoma de Chapingo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 14(1): 125-152. Recuperado de:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722017000100125#B3. Consultado el 20 de febrero del 2022.

PAOT. (1998). El Suelo de Conservación del Distrito Federal. Recuperado de: <https://paot.org.mx/centro/programas/suelo-corena.pdf>. Consultado el 14 de junio del 2021.

Pineda, P. O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. Centro de Investigación en Geografía y Geomática ING. Jorge Tamayo, A.C. Centro Geo. Centro Público de Investigación CONACYT. Tesis de Maestría en Geomática.

PNUD-INECC. 2016. Actualización y análisis del impacto del cambio climático en zonas bioclimáticas de México con nuevos escenarios de cambio climático. Informe Final (Reporte). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las

Naciones Unidas para el Desarrollo. Ciudad de México. 25pp. Recuperado de:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/444330/CGACC_2016_Actualizacion_y_analisis_del_impacto_del_cambio_climatico_en_zonas_bioclimaticas_de_Mexico.pdf.

Consultado el 6 de noviembre del 2023.

Rionda, R. (2002). Historia demográfica de Guanajuato: Periodo Precolombino y siglos XVI al XX, Centro de investigaciones humanísticas, 312 pp. Recuperado de:
<https://www.eumed.net/cursecon/libreria/2004/ped-jirr-hdg.htm>. Consultado el 12 de abril del 2022.

SEMARNAT. (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde 498 pp. Recuperado de:
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf.

Consultado el 2 de septiembre del 2023

SEP. (1993). Guanajuato, cerros y bajíos, testigos de la historia. Monografía Estatal. 243 pp. Recuperado de:
<https://historico.conaliteg.gob.mx/H1993P6HI226.htm?fbclid=IwAR3YyL7Sc32Li2azR-RPScZhLViPDQ1uwN5C63XfhLKoD31yr3R4hwbEXMM#page/7>. Consultado el 12 de enero del 2022.