Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM
eISSN: 2448-7279 • DOI: https://doi.org/10.14350/rig.60465 • ARTÍCULOS
Núm. 108 • Agosto • 2022 • e60465
www.investigacionesgeograficas.unam.mx

Factores sociales y biofísicos de la transición forestal en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta

Social and biophysical factors of the forest transition in the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark

Orozco-Ramírez, Q.* Lorenzen, M.,** Fernández de Castro Martínez, G.*** y Cruz Ramírez. M. A.+

Recibido: 23/08/2021. Aprobado: 23/04/2022. Publicado: 28/06/2022.

Resumen. El análisis de los cambios en la cobertura y el uso de suelo representan una cuestión central para la geografía aplicada. En México, aunque la deforestación predomine a nivel nacional, convive con procesos regionales de recuperación de la superficie de bosque –la llamada transición forestal–. A pesar de la existencia de una amplia literatura en México y en otros países en desarrollo, pocos estudios han abordado de forma simultánea los factores sociales y biofísicos de este fenómeno. En la Mixteca Alta, en el estado mexicano de Oaxaca, se ha documentado un aumento de la cubierta forestal desde hace varias décadas debido a la combinación de tales factores. En este estudio analizamos los cambios en la cobertura y el uso de suelo entre 1967 y 2020 en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMA) a partir de fotografías aéreas (1967) e imágenes de satélite (2020). Se encontró que, en el periodo de estudio, el bosque de encino aumentó 59%, el bosque de pino-encino se incrementó 349%, el pastizal disminuyó 39%, la superficie agrícola se redujo 17% y las áreas sin cubierta vegetal disminuyeron 68%. En total, se recuperaron 5992 ha de bosque (14.5% de la superficie total del GMA). Acto seguido, se determinaron los principales factores sociales y biofísicos asociados a esta transición forestal, usando tres categorías de cambio: sin cambio, reforestación y deforestación. El análisis se hizo con datos tipo ráster a 15 metros de resolución. Se analizó la importancia de 21 variables a través de una clasificación *random forest*. Las variables asociadas a la transición forestal más importantes fueron la distancia al bosque, el paisaje geomorfológico, la geología, la pendiente, la elevación, el número de tractores y la temperatura media. El artículo discute por qué las variables biofísicas fueron más importantes que las variables sociales.

Palabras clave: transición forestal, modelos espaciales, *random forest*, análisis ráster, desagrarización.

Abstract. The analysis of land use and land cover changes represents a key issue for applied geography. In Mexico, even though deforestation prevails at the national level, it coexists with regional processes of forest recovery—the so-called forest transition. Despite an extensive literature on the forest transition in Mexico and in other developing countries, few studies have simultaneously addressed the social and biophysical factors of this phenomenon. Precisely, in the Mixteca Alta region of the Mexican state of Oaxaca,

* Instituto de Geografía, UNAM. Unidad Académica de Estudios Territoriales de Oaxaca (UAET). Reforma s/n esq. Constitución, Jardín Etnobotánico, Oaxaca Centro, 68000, Oaxaca, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3085-7406. Email: qorozco@igg.unam.mx
** Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CdMx, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6641-1414. Email: lorenzen@igg.unam.mx
*** Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CdMx, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2021-6277. Email: gonfermar@comunidad.unam.mx
+ Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, CdMx, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3159-8511. Email: mcruz@igg.unam.mx

an increase in forest cover has been observed, taking place in the last several decades because of the combination of these factors. In this paper, we analyze land use and land cover changes occurring from 1967 to 2020 in the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark (GMA) based on aerial photographs (1967) and satellite images (2020). We found that, during the study period, the area of oak forest increased 59%, pine-oak forest expanded 349%, grasslands declined 39%, agricultural areas decreased 17%, and areas without vegetation diminished 68%. Overall, 5992 hectares of forest were recovered (14.5% of the GMA's total area). We also determined the main social and biophysical factors associated with this forest transition using three categories of change: no change, reforestation, and deforestation. This analysis was done with 15 meter-resolution raster data. We studied the importance of 21 variables based on a random forest classification. The most important variables associated with the forest transition were distance to the forest, geomorphological landscape, geology, slope, elevation, number of tractors, and mean temperature. The article discusses why the biophysical variables were more important than the social variables.

Keywords: forest transition, spatial models, random forest, raster analysis, deagrarianization.

INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de estudios de los cambios en la cobertura y el uso del suelo, la deforestación ha representado uno de los principales focos de atención debido a las amplias repercusiones ambientales de este fenómeno (en la biodiversidad, el cambio climático, el ciclo hidrológico, la erosión, etc.). No obstante, en ciertos países y regiones, la deforestación ha cedido el paso a una reciente recuperación neta de la superficie de bosque –la llamada transición forestal–, un proceso crucial para lograr enfrentar los grandes retos ambientales actuales. Este artículo analiza la transición forestal en la región de la Mixteca Alta, en el estado de Oaxaca, México, así como los principales factores asociados a ella.

La transición forestal es un concepto propuesto originalmente por Alexander Mather, quien lo definió simplemente como una transición de una superficie forestal en disminución a una en expansión (Mather, 1992). Mather documentó esta tendencia en varios países desarrollados y planteó varios factores explicativos no mutuamente excluyentes: 1) la disminución de la población en zonas rurales, ligada sobre todo a la migración rural-urbana, a su vez vinculada a procesos de crecimiento económico, industrialización y urbanización, causando un abandono de tierras agrícolas y de pastoreo y la regeneración del bosque en esos espacios; 2) la intensificación de la agricultura debido a cambios tecnológicos que incrementaron los rendimientos, redujeron la presión para expandir la superficie agrícola y concentraron la agricultura en los valles, provocando el abandono de tierras marginales (especialmente en zonas montañosas), lo que permitió, a su vez, la regeneración del bosque; 3) la disminución del uso de la leña y su sustitución por el carbón mineral (y más tarde por el gas); y 4) la revaloración de los recursos forestales debido a su escasez, que favoreció esfuerzos de conservación de los bosques y de expansión de plantaciones forestales para fines comerciales, ambientales, estéticos y recreativos (acciones llevadas a cabo por gobiernos o actores privados) (Mather, 1992; Mather *et al.*, 1999). Los primeros tres factores mencionados por Mather, que están estrechamente relacionados, han sido descritos más recientemente como el "camino del desarrollo económico a la transición forestal", mientras que el cuarto factor ha sido descrito como el "camino de la escasez de recursos forestales a la transición forestal" (Lambin y Meyfroidt, 2010; Rudel *et al.*, 2005). Aunque Mather se centró en países desarrollados, señaló el posible surgimiento de transiciones forestales en ciertos países en desarrollo.

Desde la publicación del trabajo pionero de Mather, numerosos estudios han confirmado la aparición de transiciones forestales ya sea a nivel nacional o subnacional, en países en desarrollo tan disímiles como Bután (Bruggeman, 2016); Chile (Heilmayr *et al.*, 2016); China (Gong *et al.*, 2020); Costa Rica (McLennan y Garvin, 2012); Ecuador (Rudel *et al.,* 2002); El Salvador (Hecht y Saatchi, 2007); Filipinas (Pichler *et al.*, 2021); India (Singh *et al.*, 2017); Jamaica (Timms *et al.*, 2013); Tailandia (Pichler *et al.*, 2021) y Vietnam (Pichler *et al.*, 2021; Truong *et al.*, 2017). La transición forestal en México también ha sido abordada en diversos estudios, algunos con un enfoque a nivel nacional (Bonilla-Moheno y Aide, 2020; Bonilla-Moheno *et*

al., 2012), pero la mayoría con un enfoque local o regional, centrándose fundamentalmente en Chiapas (Vaca *et al*., 2012); Michoacán (Honey-Rosés *et al*, 2018); Oaxaca (Aguilar-Støen *et al*., 2011; de los Santos Reyes, 2012; Robson y Berkes, 2011; Robson y Klooster, 2019; Robson *et al*., 2020; Vaca *et al*., 2012) y la península de Yucatán (Vaca *et al*., 2012). Además, la transición forestal en la propia Mixteca Alta de Oaxaca ha sido analizada por Hernández-Aguilar *et al*. (2021), Lorenzen *et al*. (2020, 2021) y Novotny *et al*. (2021).

Los estudios sobre transiciones forestales en países en desarrollo se han centrado simplemente en mostrar la recuperación de la cubierta forestal a partir del análisis de imágenes satelitales o en confirmar la importancia de los factores explicativos señalados por Mather. No obstante, algunos trabajos también han revelado otros factores cruciales. De esta manera, varios autores han señalado que la transición forestal en países en desarrollo puede ocurrir sin un despoblamiento rural, al presentarse una desagrarización sin pérdida de población (por ejemplo, Aguilar-Støen *et al*., 2011). Esa desagrarización se explica por la diversificación de los medios de vida rurales a través del crecimiento de los ingresos no agrícolas (provenientes de actividades en los sectores secundario y terciario, de remesas o de programas gubernamentales), a expensas de la agricultura y la ganadería (Reyna-Ramírez *et al*., 2020). Algunos estudios también han mostrado la importancia de tomar en cuenta factores de expulsión desde el sector primario, que causan el abandono de tierras de cultivo y áreas de pastoreo (sin necesariamente implicar un despoblamiento rural), lo que propicia la regeneración del bosque. Entre esos factores de expulsión se encuentran la globalización económica y los cambios en las políticas comerciales y agropecuarias que han afectado la viabilidad económica de la pequeña y mediana agricultura (Aguilar-Støen *et al*., 2011; Daniels, 2010; Hecht y Saatchi, 2007; Kull *et al.,* 2007; Lorenzen *et al*., 2020, 2021; Timms *et al*., 2013), pero también otros factores como la violencia criminal en zonas rurales (Bonilla-Moheno y Aide, 2020) y la guerra civil (Hecht y Saatchi, 2007).

A pesar de los avances que se reportan en la literatura, una laguna significativa es que los estudios sobre transiciones forestales se han enfocado sobre todo en los factores sociales, en particular los cambios demográficos y socioeconómicos y los esfuerzos de conservación y reforestación, mientras que los factores biofísicos han recibido escasa atención –no obstante, la literatura de la ecología del paisaje sí ha abordado los factores ambientales de la restauración ecológica (por ejemplo, Chazdon y Guariguata, 2016)–. Una excepción importante es el trabajo de Aide *et al*. (2013) sobre deforestación y reforestación a nivel municipal en América Latina y el Caribe entre 2001 y 2010. A través de una regresión *random forest*, estos autores analizan la importancia de 21 variables demográficas y biofísicas para explicar los cambios en la cobertura forestal. Determinan que las variables biofísicas son las más importantes, mientras que no hay una relación clara entre cambios en la superficie forestal (ya sea deforestación o reforestación) y cambios demográficos. En particular, los autores asocian la transición forestal al bajo porcentaje de bosque en 2001, a ciertos tipos de vegetación (matorral desértico y xerófilo, bosque de coníferas), a temperaturas relativamente bajas, a un incremento de la precipitación y a una mayor elevación. Utilizando las mismas fuentes de información para el caso de México, Bonilla-Moheno *et al*. (2012) asocian la recuperación del bosque principalmente a los siguientes factores: la temperatura intermedia, la mayor elevación, ciertos tipos de vegetación (desierto, bosque xerófilo, bosque de coníferas), un incremento de la precipitación y la baja densidad de población.

De manera similar, Crk *et al*. (2009) y Yackulic *et al*. (2011) analizan la importancia de variables sociales y biofísicas a diferentes escalas para explicar la transición forestal en Puerto Rico. Ambos estudios, basados en regresiones, determinan que las variables biofísicas tienen un mayor peso. A partir de un análisis de 21 variables, Crk *et al*. (2009) señalan que la transición forestal se asocia sobre todo a la cercanía al bosque y a reservas naturales, a una mayor elevación, a pendientes pronunciadas, a suelos de fertilidad intermedia y a una mayor distancia a caminos. A partir de un análisis de nueve variables yackulic *et al*. (2011) apuntan que la transición forestal se asocia principalmente a la

mayor precipitación, a pendientes pronunciadas y al mayor porcentaje de bosque, mientras que las variables sociales de densidad poblacional, cambio demográfico e ingreso medio muestran relativamente poca importancia.

Nuestro trabajo analiza la importancia de 21 variables sociales (9) y biofísicas (12) para explicar la transición forestal en la Mixteca Alta a partir de una clasificación *random forest*. Corroborando los hallazgos de los autores mencionados arriba, señalamos que la recuperación de la superficie forestal se asocia más a las variables biofísicas.

SITIO DE ESTUDIO

Este trabajo se desarrolló en el territorio de nueve municipios de la Mixteca Alta de Oaxaca que conforman el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMA). El GMA, que obtuvo el reconocimiento UNESCO en 2017, tiene en total 41 500 hectáreas y se localiza en el noroeste de la Mixteca Alta (Palacio *et al.*, 2018) (Figura 1).

El clima predominante es el templado subhúmedo con lluvias en verano y otros climas presentes son el semiseco templado y el semicálido subhúmedo (INEGI, 2009). Los tipos de vegetación existentes en el GMA son los bosques de pino y encino, los matorrales xerófilos, los pastizales, los palmares y pequeñas áreas con vegetación ribereña (Ramírez-Santiago *et al.*, 2021). El GMA es representativo de las características ambientales y sociales de la Mixteca Alta. Tiene un gradiente altitudinal entre los 2050 y los 2890 msnm y un relieve que incluye valles, lomeríos y montañas con una gran diversidad geológica (Palacio *et al.*, 2018).

La Mixteca Alta, caracterizada por zonas extensas afectadas por la erosión hídrica, tiene una

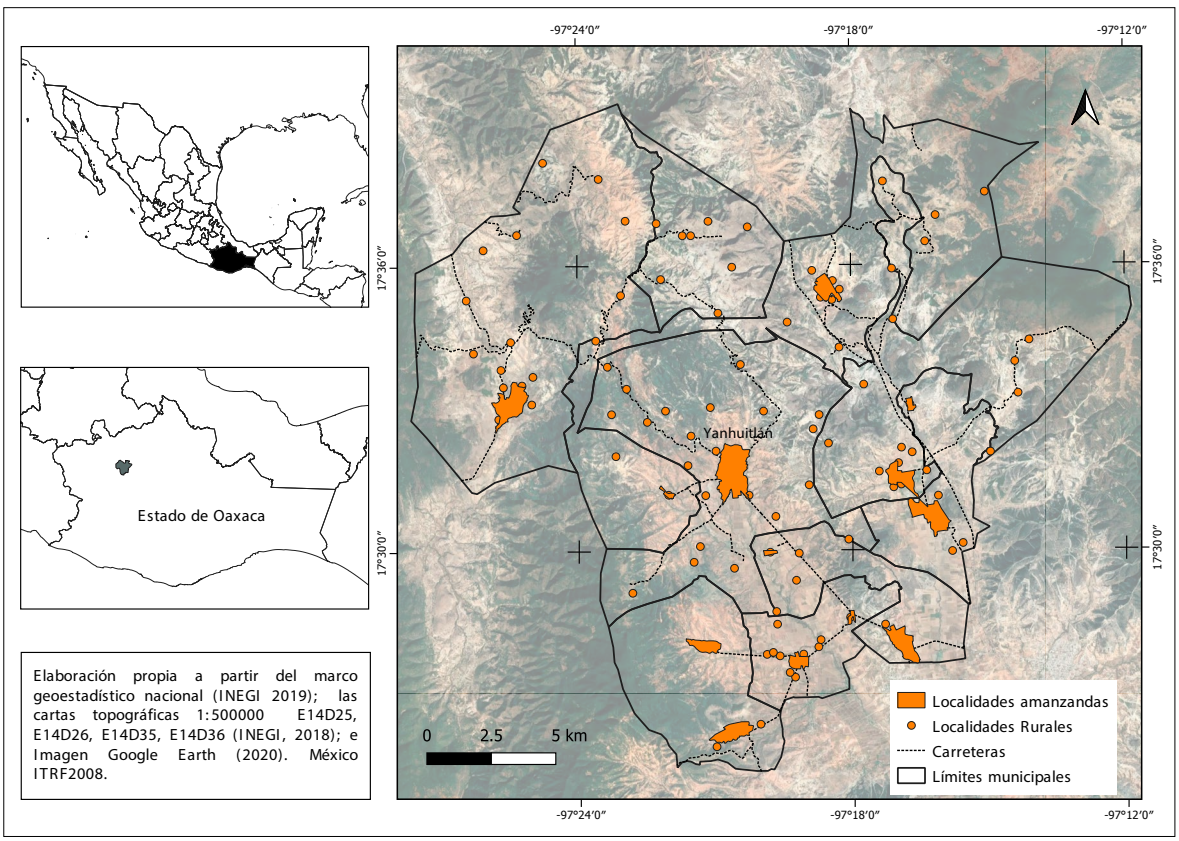

Figura 1. Localización de la zona de estudio.

historia compleja y dinámica muy antigua que conjuga las características geológicas y edáficas que son propensas a la erosión y su manejo a través de terrazas (Kirkby, 1972; Perez-Rodriguez y Anderson, 2013). El ser humano ha modificado intensamente el paisaje de la región por milenios (Solís-Castillo *et al*., 2018). La agricultura y la ganadería se practican en todos los municipios del GMA, aunque su importancia ha disminuido en las últimas décadas. La migración, el abandono de la agricultura y la ganadería, el reemplazo del uso de la leña y la madera para la construcción, han traído como consecuencia procesos de transición forestal, que son perceptibles desde los años 1990 (Lorenzen *et al*., 2020, 2021).

MÉTODOS

Para evaluar el cambio en la cobertura y el uso de suelo entre 1967 y 2020 se utilizaron dos fuentes. Para el año 1967 se usaron las fotografías aéreas del acervo histórico de la Fundación ICA, correspondientes a la Mixteca Alta, tomadas en noviembre (Fundación ICA, 1967). Estas fotografías se ortorrectificaron y georreferenciaron con el programa Agisoft, construyendo así un mosaico fotográfico del área del GMA. Para 2020 se utilizaron imágenes de Google Earth tomadas entre el 8 de enero de 2020 y el 28 de noviembre de 2020. A través de un análisis visual (Lillesand *et al*., 2015) se clasificó la cobertura vegetal y el uso del suelo para ambos años. La digitalización se hizo en QGIS 3.1416, dando como resultado dos capas vectoriales con la cobertura y el uso de suelo para 1967 y 2020. Las categorías utilizadas para clasificar la cobertura fueron: bosque de encino, bosque de pino-encino, matorral de enebro, matorral xerófilo, pastizal, reforestación, sin cubierta vegetal, uso agrícola y vegetación ribereña (Ramírez-Santiago *et al*., 2021). Las capas vectoriales de ambas fechas se intersectaron para calcular los cambios de superficie de cada una de las categorías de cobertura.

Para el análisis de los factores sociales y biofísicos asociados a la transición forestal, primero se rasterizaron las capas de cobertura de 1967 y 2020 y la capa de cambios entre 1967 y 2020 a una resolución de 15 m. La capa ráster de cambios se reclasificó en tres categorías: 1) sin cambios, cuando la cobertura entre 1967 y 2020 permaneció igual; 2) reforestación, cuando se registró un cambio de menos a más vegetación leñosa y 3) deforestación, cuando se registró un cambio de más a menos vegetación leñosa. El siguiente paso fue rasterizar a 15 m de resolución las variables sociales y biofísicas, las cuales se presentan en el Cuadro 1. Se corrió un análisis de clasificación usando el algoritmo *random forest* (Breiman, 2001) donde la variable de respuesta fue el tipo de cambio en la cobertura vegetal con tres categorías: sin cambio, reforestación y deforestación. Las 21 variables sociales y biofísicas fueron las variables independientes para predecir el cambio en el pixel correspondiente. En *random forest* nos es problemático tener variables con una fuerte asociación (Gregorutti *et al*., 2017). El análisis fue realizado en R (version 4.0.5) (R Core Team, 2021), usando el paquete randomForest (Breiman *et al*., 2018), con un máximo de 4 variables en cada ramificación del árbol y un número de árboles que varió entre 100 y 450 (Pal, 2005).

RESULTADOS

Cambios en la cobertura y el uso de suelo

Todas las coberturas presentaron cambios en superficie entre 1967 y 2020. Las que más cambiaron en superficie absoluta fueron el bosque de encino, que aumentó 4163 ha; el pastizal, que disminuyó 3155 ha; el uso agrícola, que se redujo 3081 ha; el área sin cubierta vegetal, que cayó 2697 ha; el bosque de pino-encino, que se incrementó 1829 ha y el matorral xerófilo, que subió 1629 ha. Con base a estos datos, las tasas promedio de incremento anual de bosque en el periodo estudiado fueron de 77 ha/año para el bosque de encino y de 34 ha/año para el bosque de pino-encino (Cuadro 2).

Como se observa en el Cuadro 2, las coberturas y usos de suelo que perdieron más superficie fueron el pastizal, el uso agrícola y las zonas sin cubierta vegetal. El pastizal, que en 1967 sumaba 7997 ha, cambió principalmente a matorral xerófilo (1699 ha), uso agrícola (1459 ha) y bosque de encino (1133 ha) (Cuadro 3 y Figura 2). El uso agrícola

Cuadro 1. Variables biofísicas y sociales utilizadas para clasificar los cambios en la cobertura entre INEGI y 2020. Los valores son a nivel de pixel (15 m x 15 m).

	Variable (unidades)	Descripción, categorías	Valores	Fuente
1	Distancia al bosque (m) (biofísica)	Distancia al borde bosque de encino o bosque de pino-encino en 1967	Min: 0 Max: 8387 Media: 1308	Mapa de cobertura a partir de Fundación ICA (1967)
2	Distancia a zonas urbanas (m) (biofísica)	Distancia a las localidades urbanas (amanzanadas) dentro del GMA	Min: 0 Max: 2643 Media: 10809	INEGI (2018)
3	Distancia a localidades (m) (biofísica)	Distancia a las localidades urbanas y rurales dentro del GMA	Min: 0 Max: 1109 Media: 4375	INEGI (2018)
4	Distancia a carreteras (m) (biofísica)	Distancia a las carreteras pavimentadas	Min: 0 Max: 938 Media: 3697	INEGI (2018)
5	Elevación (m) (biofísica)	Elevación sobre el nivel del mar	Min: 2036 Max: 2890 Media: 2320	INEGI (2013)
6	Pendiente (grados) (biofísica)	Pendiente promedio del pixel	Min: 0 Max: 57 Media:12	INEGI (2013)
7	Temperatura media (°C) (biofísica)	Temperatura media anual	Min: 13.8 Max: 17.2 Media:15.9	INEGI (2011a)
8	Precipitación (mm) (biofísica)	Precipitación anual	Min: 516 Max: 1054 Media:720	INEGI (2011b)
9	Clima (biofísica)	1. C(wo) (63%) 2. BS1kw (10%) 3. C(w1) (27%)		García (1998)
10	Suelos (biofísica)	1. Litosol (42%) 2. Regosol eutrico (11%) 3. Feozem calcárico (39%) 4. Cambisol vértico (3%) 5. Regosol calcárico (6%)		INEGI (2014)
11	Geología (biofísica)	1. Aluvión (15%) 2. Andesita Yucudaac (18%) 3. Formación Teposcolula (4%) 4. Toba Llano de Lobos (14%) 5. Formación San Isidro (13%) 6. Depósitos Teotongo (3%) 7. Formación Yanhuitlán (30%) 8. Formación Tamazulapam - conglomerado Tecomatlán (<1%) 9. Hipabisal (3%) 10. Formación Teposcolula (<1%)		SGM (2000)
12	Paisaje geomorfológico (biofísica)	1. Laderas de montañas y cimas denudativas en rocas ígneas (4%) 2. Piedemonte (10%) 3. Lomas aisladas denudativas (<1%) 4. Planicie aluvial denudativa (5%) 5. Valles erosivos (4%) 6. Laderas medias y bajas (25%) 7. Laderas y cimas erosivas en rocas ígneas (35%) 8. Depresiones de origen kárstico (<1%) 9. Laderas y cimas denudativas en rocas sedimentarias (15%) 10. Laderas y cimas erosivas en rocas sedimentarias (2%)		Romero-Hernández (2018)

Cuadro 1. Continuación.

	Variable (unidades)	Descripción, categorías	Valores	Fuente
13	Densidad de población (hab/km^2) (social)	Densidad de población por municipio en 1990	Min: 7.9 Max: 40 Media: 21	INEGI (1990)
14	Cambio en la población (social)	Cambio en la población total por municipio entre 1960 y 2020	Min: -976 Max: 209 Media: -138	INEGI (1960), INEGI (2020)
15	Cambio en la población dedicada a actividades primarias (social)	Cambio en la población dedicada a actividades primarias por municipio entre 1960 y 2020	Min: -610 Max: -170 Media: -399	INEGI (1960), INEGI (2020)
16	Cambio en el uso de leña (social)	Cambio en el número de hogares que utilizan leña entre 1960 y 2020 por municipio	Min: -286 Max: -111 Media: -225	INEGI (1960), INEGI (2020)
17	Cambio en el número de ovinos (social)	Cambio en el número de cabezas de ganado ovino entre 1991 y 2007 por municipio	Min: -397 Max: 1068 Media: 396	INEGI (1991), INEGI (2007)
18	Cambio en el número de caprinos (social)	Cambio en el número de cabezas de ganado caprino entre 1991 y 2007 por municipio	Min: -903 Max: 101 Media: -487	INEGI (1991), INEGI (2007)
19	Cambio en el número de bovinos (social)	Cambio en el número de cabezas de ganado bovino entre 1991 y 2007 por municipio	Min: -340 Max: 66 Media: -173	INEGI (1991), INEGI (2007)
20	Cambio en las casas de madera (social)	Cambio en el número de casas de madera entre 1960 y 2020	Min: -225 Max: 3 Media:-100.3	INEGI (1960), INEGI (2020)
21	Número de tractores en 1991 (social)	Cantidad de tractores en 1991 por municipio	Min: 0 Max: 32 Media:12.56	INEGI (1991)

Nota: para las variables categóricas se indica el porcentaje de pixeles en cada categoría.

Cuadro 2. Cambios de superficie por tipo de cobertura y uso de suelo, porcentaje y tasa de cambio anual entre 1967 y 2020.

Cobertura	Sup. en 1967 (ha)	% en 1967	Sup. en 2020 (ha)	% en 2020	Diferencia (ha)	% de cambio	Tasa anual (ha)
Bosque de encino	7081	17%	11244	27%	4163	59%	77
Bosque de pino-encino	524	1%	2353	6%	1829	349%	34
Matorral de enebro	145	0%	456	1%	311	214%	6
Matorral xerófilo	4067	10%	5696	14%	1629	40%	30
Pastizal	7997	19%	4841	12%	-3155	-39%	-58
Reforestación (plantación de pinos)	0	0%	808	2%	808		15
Sin cubierta vegetal (zona erosionada)	3950	9%	1253	3%	-2697	-68%	-50
Uso agrícola	17820	43%	14739	35%	-3081	-17%	-57
Vegetación ribereña	0	0%	193	0%	193		4
Total	41584	100%	41584	100%	0	0%	0

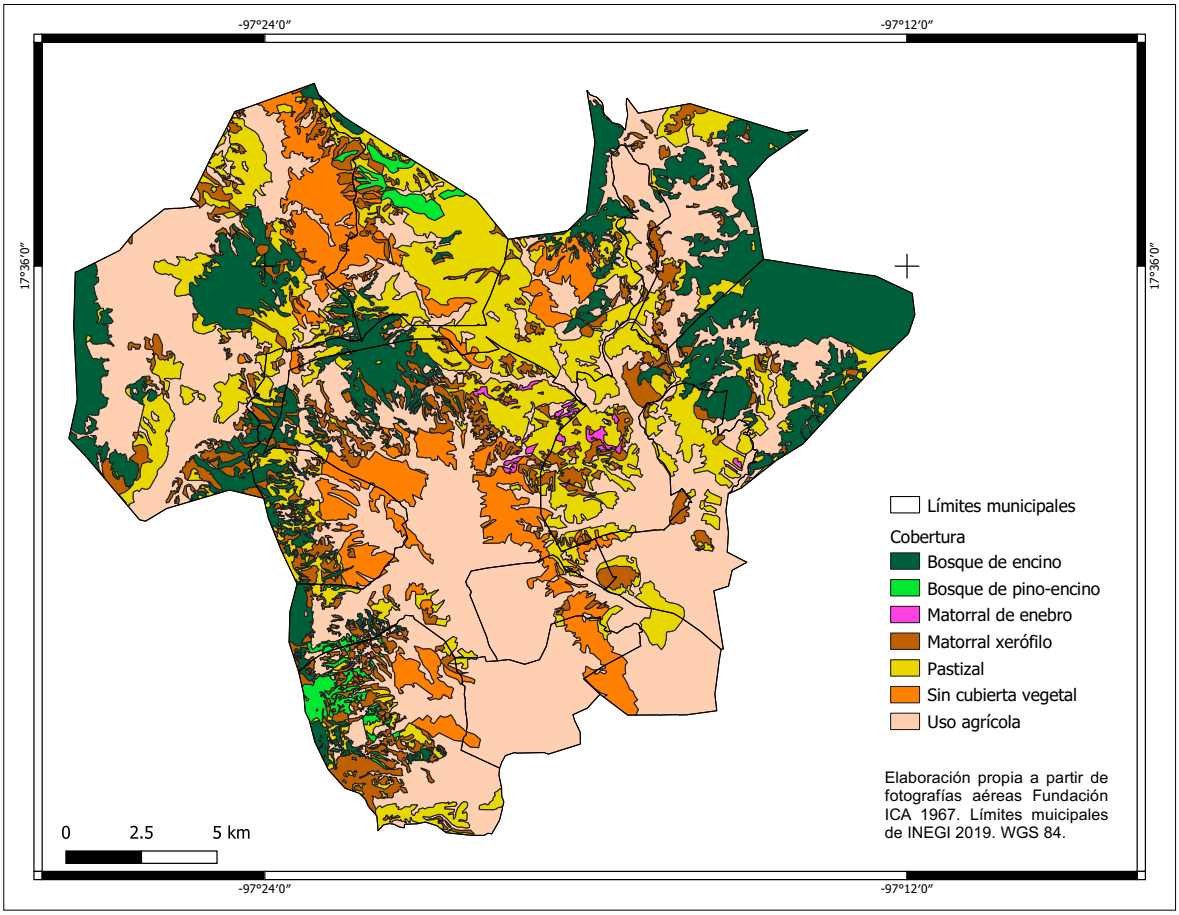

Figura 2. Cobertura y uso de suelo en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta en 1967. Fuente: Fundación ICA (1967).

Cuadro 3. Matriz de cambio de uso de suelo y cobertura entre 1967 y 2020.

	2020									
1967	Bosque de encino	Bosque de pino-encino	Matorral de enebro	Matorral xerófilo	Pastizal	Reforestación (plantación de pinos)	Sin cubierta vegetal	Uso agrícola	Vege-tación ribereña	Total en 1967
Bosque de Encino	6704.8	55.0	0.0	58.6	42.2	25.0	2.6	193.2	0.0	7081.4
Bosque de pino-encino	3.6	485.6	0.0	2.8	29.0	0.0	0.4	2.2	0.0	523.6
Matorral de enebro	11.1	0.0	97.5	33.3	0.5	2.0	0.0	0.7	0.0	145.0
Matorral xerófilo	1708.8	858.8	73.6	986.0	173.4	27.2	28.7	207.2	3.3	4067.1
Pastizal	1133.3	404.2	187.4	1699.1	2673.6	363.0	46.2	1459.0	30.9	7996.6
Reforestacion (plantación de pinos)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Cuadro 3. Continúa.

	2020									
1967	Bosque de encino	Bosque de pino-encino	Matorral de enebro	Matorral xerófilo	Pastizal	Reforestación (plantación de pinos)	Sin cubierta vegetal	Uso agrícola	Vege-tación ribereña	Total en 1967
Sin cubierta vegetal	130.4	187.2	20.8	1332.9	250.7	67.3	1061.2	897.1	2.6	3950.1
Uso agrícola	1552.4	361.8	76.9	1583.3	1672.2	323.8	114.3	11979.9	156.0	17820.5
Vegetacion ribereña	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total en 2020	11244.5	2352.6	456.1	5696.0	4841.5	808.2	1253.3	14739.3	192.9	41584.3

ocupaba 17 820 ha en 1967 y se distribuía en todo el GMA (Figura 2). Este cambió principalmente a pastizal (1672 ha), matorral xerófilo (1583 ha) y bosque de encino (1552 ha) para llegar a 11244 ha en 2020. Las zonas sin cubierta vegetal ocupaban 3950 ha en 1967. Estas zonas cambiaron principalmente a matorral xerófilo (1333 ha), a uso agrícola (897 ha) y a pastizal (251 ha) (Cuadro 3).

El bosque de encino en 1967 se encontraba en dos áreas compactas en el noreste del GMA, en el límite oriente en áreas muy fragmentadas y al noroeste en una zona compacta. Prácticamente no existía el bosque de pino-encino, salvo dos pequeñas áreas al suroeste y al norte (Figura 2). Actualmente el bosque de encino se encuentra muy extendido en el noreste, oriente y noroeste. El bosque de pino creció en las zonas en donde se encontraban pequeños fragmentos, en el norte y el suroeste (Figura 3).

La vegetación ribereña creció principalmente en las zonas agrícolas de los valles al sur del GMA por donde cruzan los ríos (Figura 3). Este tipo de cobertura ganó 156 ha al uso de suelo agrícola (Cuadro 3).

El cambio de cobertura hacia vegetación leñosa (reforestación) ocurrió en todo el geoparque, pero fue más intenso en el noroeste, en el norte, en el centro y en el sur. En donde dominan los terrenos planos fueron pocos los cambios (Figura 4). En el oriente del GMA ocurrió deforestación, sobre todo de pastizal, matorral xerófilo y bosque de encino a uso agrícola. En términos de superficie podemos ver que hay un cambio casi equilibrado entre el pastizal y el uso agrícola, sólo que en el periodo de estudio se da en diferentes zonas (Figura 4).

Factores asociados a la transición forestal

Los resultados del análisis *random forest* indican que las variables más importantes, en orden decreciente, en el modelo de clasificación para predecir los cambios en la cobertura son: la distancia al bosque, el paisaje geomorfológico, la geología, la pendiente, la elevación, el número de tractores, la temperatura media, el cambio en el número de bovinos y la precipitación media (Figura 4). El modelo de clasificación tiene un error entre 37% y 39%, según el número de árboles (entre 50 y 450) (datos no mostrados). Esta alta tasa de error se debe a la falla en la clasificación de las zonas que cambian hacia la reforestación o deforestación, debido a que el modelo no es capaz de predecir qué pixeles tienen más probabilidad de pasar a deforestación. Al correr el modelo de clasificación solo con las variables biofísicas más importantes (distancia al bosque, paisaje geomorfológico, geología, pendiente, elevación, precipitación y temperatura media), se obtiene una tasa de error del 30.32%, la tasa más baja que se encontró.

La variable más importante es la distancia al bosque, con más del doble que las variables que le siguen (Cuadro 4). Por su parte las variables de paisaje geomorfológico y geología tienen una importancia parecida. La pendiente y la elevación tienen una menor importancia que paisaje

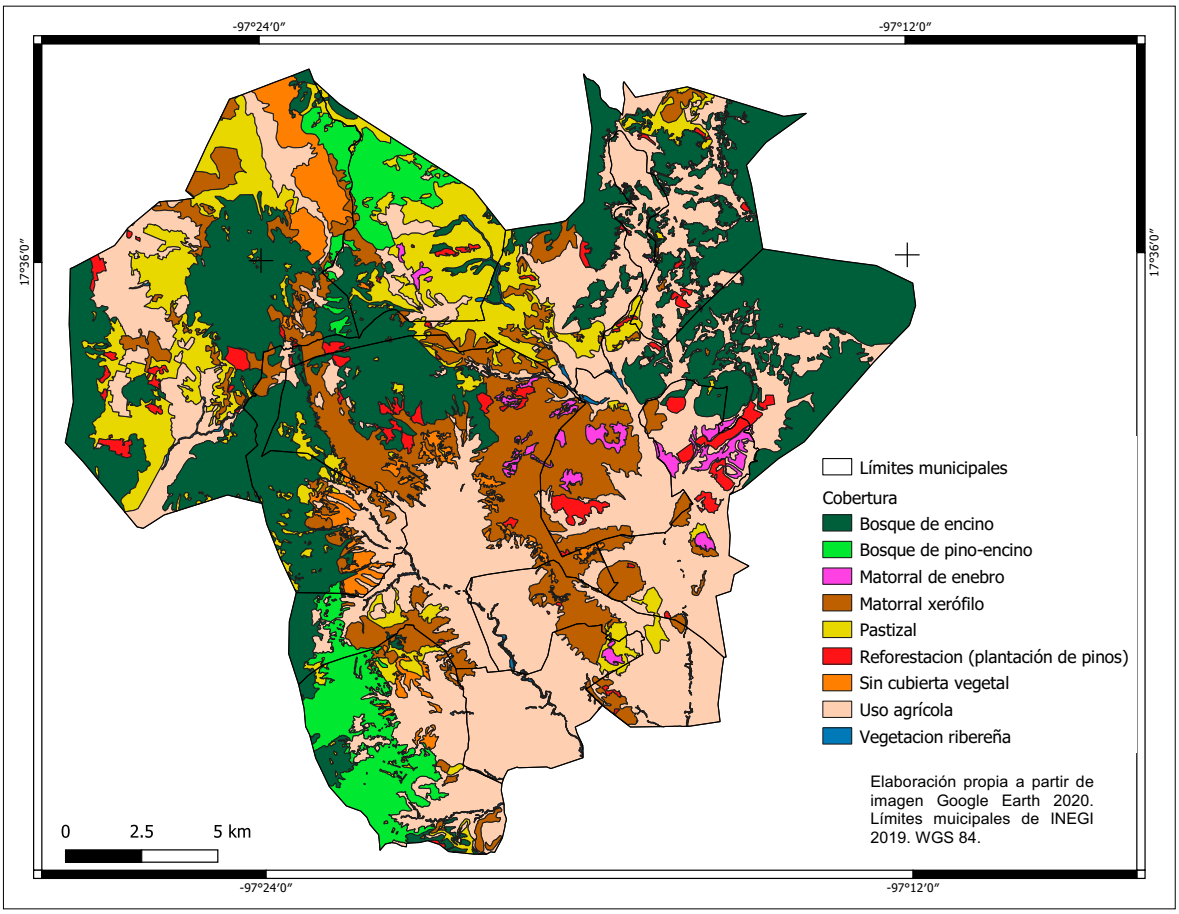

Figura 3. Cobertura y uso de suelo en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta en 2020. Fuente: Google Earth (2020).

geomorfológico y geología. La variable social más importante es el número de tractores, la cual es un poco mayor que la variable de temperatura media. (Cuadro 4).

DISCUSIÓN

Varios autores han reportado procesos de transición forestal para la región de la Mixteca Alta, los cuales son consistentes con lo reportado sobre el crecimiento de las áreas forestales en las zonas templadas y secas del país (Bonilla-Moheno *et al*., 2020). Lorenzen *et al* (2020), analizando datos de cobertura del INEGI, reporta un aumento de 71.6 ha/año de bosque entre 1985 y 2014 y de 147.7 ha/año de pastizal para el área del geoparque. Hernández-Aguilar *et al*. (2021) encuentran que en 5 comunidades del GMA el bosque se incrementó 71% entre 1990 y 2018. Sandoval-García *et al*. (2021) encuentran un aumento del 6.6 % del bosque y una reducción del 8.4% de áreas agrícolas y del 4.1% de área sin vegetación en la microcuenca de San Isidro Peñasco al sureste del GMA en la misma región de la Mixteca Alta. En la cuenca del río Sordo, al suroeste del GMA, Novotny *et al* (2021) documentan un incremento del bosque de 4.3% entre 1987 y 2017. En este estudio el periodo de análisis es el más amplio reportado hasta el momento, al abarcar 53 años. También, encontramos tasas de cambio positivo para tipos de vegetación leñosa más altas que en otras zonas de la región. Además, nuestros resultados coinciden con las conclusiones de un estudio regional para el

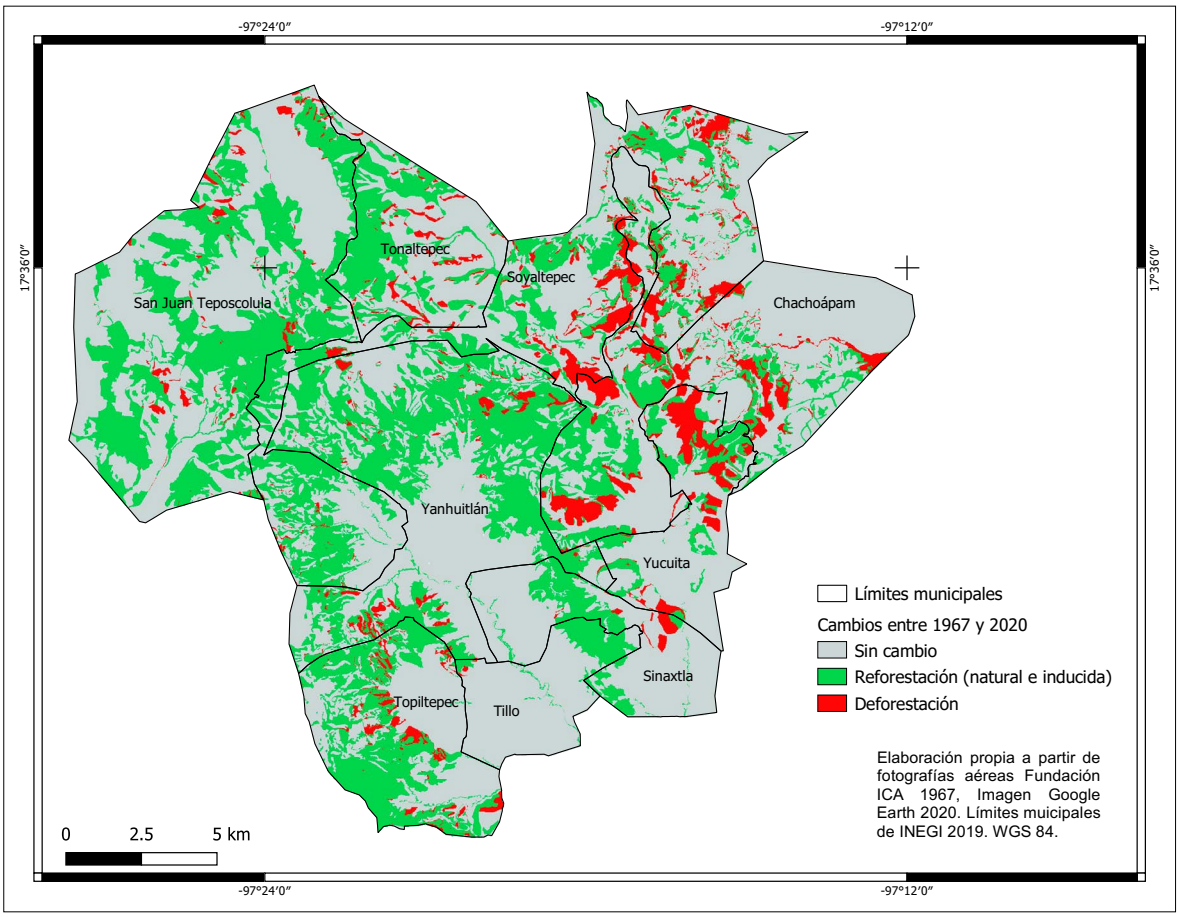

Figura 4. Cambios en la cobertura vegetal entre 1967 y 2020 en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta resumidos en tres categorías: sin cambio, reforestación y deforestación.

Cuadro 4. Importancia de las variables en la clasificación random forest con 450 árboles y ráster de 15 metros de resolución.

Variable	Decremento medio en exactitud	Decremento medio en Gini
Distancia al bosque	13.20	36577.58
Paisaje geomorfológico	6.96	25045.74
Geología	6.59	18937.38
Pendiente	5.59	8049.21
Elevación	5.37	11839.11
Número de tractors en 1991	4.40	588.71
Temperatura media	3.66	6014.20
Cambio en el número de bovinos	3.50	1345.64
Precipitación media	3.29	3577.29
Distancia a zonas urbanas	2.75	2419.90

Cuadro 4. Continúa.

Variable	Decremento medio en exactitud	Decremento medio en Gini
Suelos	2.54	512.82
Cambio en la población	2.25	410.27
Cambio en el número de ovinos	2.00	201.30
Cambio en la población dedicada a actividades primarias	1.42	381.04
Distancia a carreteras	1.41	81.77
Clima	0.00	518.56
Distancia a localidades	0.00	217.08
Densidad de población	0.00	180.56
Cambio en el uso de leña	0.00	34.54
Cambio en el número de caprinos	0.00	524.50
Cambio en las casas de madera	0.00	1676.08

periodo de 1979 y 2010 el cual señala que los procesos de deforestación ocurrieron antes de la década de 1970 (Carranza Sánchez, n.d). No obstante, es posible que el incremento de la superficie forestal haya sido más acelerado a partir de los años 1990 debido a las decisiones comunitarias para conservar el bosque y el agua (Lorenzen *et al*. 2020, 2021; Novotny *et al*., 2021; Sandoval-García *et al*., 2021).

Con relación a los factores biofísicos que están asociados a la transición forestal, es lógico que la variable distancia al bosque tenga el mayor peso, dado que los cambios se suelen dar, principalmente, en los límites del mismo, tal como se ha confirmado en varios estudios (Cubiña y Aide, 2001; Crk *et al*. 2009; Molin *et al.*, 2017). Las variables paisaje geomorfológico y geología representan el segundo grupo en importancia, siendo estas de gran relevancia en esta región ya que determinan los procesos erosivos y, con ello, los cambios en la cobertura vegetal, tanto para la reforestación como la deforestación natural. En este sentido, Fernández de Castro (2020) muestra que existen diferencias entre litologías en términos susceptibilidad a la erosión, lo que repercute en la capacidad de resiliencia de la cobertura vegetal frente a cambios inducidos por el hombre (erosión acelerada). Sin embargo, en nuestro análisis también observamos que las zonas sin cobertura vegetal, muchas de ellas correspondiendo a zonas de cárcavas, también se redujeron (Cuadro 2).

El tipo de paisaje geomorfológico incluye, además de la geología, variables como la pendiente y la elevación, que determinan el acceso para el manejo forestal, ganadero o agrícola por el hombre. Por tanto, estas variables biofísicas son claves en la transición forestal por la susceptibilidad a la erosión y las limitaciones de acceso por topografía.

En cuanto a las variables sociales, se deben comentar varios aspectos para entender por qué no tienen tanta importancia en el modelo implementado. En primer lugar, las variables sociales están a nivel municipal. Para ver un efecto más claro de las variables sociales, se tendría que hacer un estudio a una escala mayor y en un espacio más amplio (por ejemplo, a nivel estatal). Otros estudios a nivel nacional sí han mostrado una asociación entre la transición forestal y variables socioeconómicas (por ejemplo, Bonilla-Moheno *et al.*, 2012). Otra cuestión crucial es que no hay demasiada variabilidad en las variables sociales en comparación con las variables biofísicas (en todos los municipios del GMA hubo despoblamiento y desagrarización). Por otra parte, también hay diferencias en los periodos de tiempo de los datos socioeconómicos y en algunos casos los datos no coinciden con los periodos de tiempo en los que ocurrió la transición forestal

(Aide *et al.*, 2012). Sabemos que de 1950 a 1990 hay mucho despoblamiento, luego de 1990 a 2020 lo que más impacta es la desagrarización (Lorenzen *et al.*, 2020). La reducción y la prohibición del ganado caprino ocurren en las décadas de1980 y 1990, pero los censos agrícolas anteriores al de 1991 no muestran información a nivel municipal en el caso de Oaxaca. Es decir, que solo contamos con la información de los censos agrícolas de 1991 y 2007 para ver los cambios en el ganado. Por último, las variables sociales no operan de manera muy sencilla, pues los procesos a los que están asociados pueden no impactar directamente en la cobertura forestal. Por ejemplo, en algunas comunidades hubo una reducción en la población dedicada a actividades primarias en el periodo 1960-2020; sin embargo, es posible que menos personas con maquinaria puedan trabajar más superficie, lo que explicaría el incremento en la superficie agrícola. Esto se comprueba en parte con la importancia de la cantidad de tractores por municipio. Esta variable a su vez está asociada a la pendiente, pues entre menor es la pendiente hay más tractores.

Por otra parte y siguiendo a Yackulic *et al.* (2011), el mayor peso de las variables biofísicas se debe a que, si bien los cambios socioeconómicos explican el abandono de tierras necesario para la transición forestal, son los factores biofísicos los que determinan más precisamente qué tierras se abandonan y dónde es más probable que ocurra una regeneración del bosque. En otras palabras, los factores sociales explican por qué ocurre la transición forestal (el abandono de tierras agrícolas y áreas de pastoreo, los esfuerzos de conservación y reforestación), pero, una vez que las condiciones sociales están dadas, los factores biofísicos explican más puntualmente dónde ocurre esa transición forestal, por ejemplo, en áreas con mayor precipitación (por facilitar el crecimiento de la vegetación), en espacios cercanos o adyacentes a bosques (por la propagación de semillas de árboles), en zonas montañosas y con pendiente pronunciada (porque ahí tienden a localizarse los remanentes de bosque y las áreas agrícolas y de pastoreo marginales en abandono), entre otros (Yackulic *et al.*, 2011). Así mismo, las reforestaciones activas se realizan preferentemente en zonas agrícolas abandonadas. Además, como lo mencionamos arriba, la transición forestal en países en desarrollo puede ocurrir sin un despoblamiento rural (la desagrarización y el abandono de tierras no necesariamente implican pérdida de población), por lo que las variables meramente demográficas son insuficientes.

CONCLUSIONES

En el periodo comprendido entre 1967 y 2020 ocurrió una gran transformación en la cobertura forestal y el uso del suelo en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Las categorías que más cambiaron en sentido positivo fueron el bosque de pino-encino, el bosque de encino, el matorral xerófilo y la vegetación ribereña. Las categorías que más disminuyeron en superficie fueron el pastizal, el uso agrícola y las áreas sin vegetación.

Estos cambios se asociaron más fuertemente a variables biofísicas que a variables sociales. Las variables más relacionadas al cambio en la cobertura vegetal son la distancia al bosque, el paisaje geomorfológico, la geología, la pendiente, la elevación, el número de tractores y la temperatura media. Nuestros resultados apoyan la idea que una vez que las condiciones sociales están dadas para una transición forestal (abandono de tierras agrícolas y áreas de pastoreo, los esfuerzos de conservación y reforestación), son los factores biofísicos los que explican con más precisión a escala local dónde ocurre esa transición forestal.

REFERENCIAS

Aguilar-Støen, M., Angelsen, A. y Moe, S. R. (2011). Back to the Forest: Exploring Forest Transitions in Candelaria Loxicha, Mexico. *Latin American Research Review*, *46*(1), 194-216. https://doi.org/10.1353/lar.2011.0002

Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R., López-Carr, D., Levy, M. A., Redo, D., Bonilla-Moheno, M., Riner, G., Andrade-Núñez, M. J. y Muñiz, M. (2013). Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). *Biotropica*, *45*(2), 262–271. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x

Bocco, G., Castillo, B. S., Orozco-Ramírez, Q. y Ortega-Iturriaga, A. (2019). La agricultura en terrazas en la adaptación a la variabilidad climática en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Latin American Geography*, *18*(1), 141-168. https://doi.org/10.1353/lag.2019.0006

Bonilla-Moheno, M. y Aide, T. M. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems*, *178*, 1-7. https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2019.102734

Bonilla-Moheno, M., Aide, T. M. y Clark, M. L. (2012). The influence of socioeconomic, environmental, and demographic factors on municipality-scale land-cover change in Mexico. *Regional Environmental Change*, *12*(3), 543-557. https://doi.org/10.1007/s10113-011-0268-z

Breiman, L., Cutler, A., Liaw, A. y Wiener, M. (2018). Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression (Package 'randomForest' ver. 4.6-14). https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Bruggeman, D., Meyfroidt, P. y Lambin, E. F. (2016). Forest cover changes in Bhutan: Revisiting the forest transition. *Applied Geography*, *67*, 49-66. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.019

Carranza Sánchez, J., Cruz Rojas, H., Ruiz Paniagua, L. y Silva González C., (n.d.). Informe final que integra el análisis de tasa de transformación para los periodos de 1970 a 2000, 2000-2005 y 2005-2010 para el área de intervención del proyecto Mixteca. Proyecto Mixteca Sustentable. Disponible en https://bit.ly/38VheMJ

Crk, T., Uriarte, M., Corsi, F. y Flynn, D. (2009). Forest recovery in a tropical landscape: what is the relative importance of biophysical, socioeconomic, and landscape variables? *Landscape Ecology*, *24*(5), 629-642. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9338-8

Cubiña, A. y Aide, T. M. (2001). The effect of distance from forest edge on seed rain and soil seed bank in a tropical pasture. *Biotropica*, *33*(2), 260-267. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2001.tb00177.x

Chazdon, R. L. y Guariguata, M. R. (2016). Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. *Biotropica*, *48*(6), 716-730. https://doi.org/10.1111/BTP.12381

de los Santos Reyes, E. (2012). *Cambios en la cobertura de bosques mesófilos de montaña y su relación con factores sociales en regiones prioritarias de la Sierra Norte, Oaxaca, México*. Tesis de maestría. Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional.

Fernández de Castro Martínez, G. (2020). *Fotogrametría digital y modelado del terreno por erosión hídrica en la Cuenca alta del Rio Verde, Oaxaca*. Tesis de doctorado. Programa de Postgrado en Geografía, UNAM, México. Disponible en http://ru.atheneadigital.filos.unam.mx/jspui/handle/FFYL_UNAM/2083

Fundación ICA. (1967). Mixteca Alta, 1967, Fondo Aerofotográfico de Fundación ICA. FAV_01935_01. Acervo Histórico Fundación ICA.

García, E. (1998). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000.Mexico: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Gong, Z., Gu, L. Yao, S. y Deng, Y. (2020). Effects of bio-physical, economic and ecological policy on forest transition for sustainability of resource and socioeconomics development. *Journal of Cleaner Production*, *243*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118571

Google Earth. (2020). Image© 2020 Maxar Technologies. Recuperado de https://bit.ly/3NcK5uB, el 20 de octubre de 2020

Gregorutti, B., Michel, B. y Saint-Pierre, P. (2017). Correlation and variable importance in random forests. Statistics and Computing, *27*(3), 659-678. https://doi.org/10.1007/s11222-016-9646-1

Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R. y Lambin, E. F. (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, *75*, 71-82. https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2016.07.014

Hecht, S. B. y Saatchi, S. S. (2007). Globalization and forest resurgence: changes in forest cover in El Salvador. *BioScience*, *57* (8), 663-672. https://doi.org/10.1641/B570806

Hernández-Aguilar, J. A., Durán, E., de Jong, W., Velázquez, A. y Pérez-Verdín, G. (2021). Understanding drivers of local forest transition in community forests in Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico. *Forest Policy and Economics*, *131*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102542

Honey-Rosés, J., Maurer, M., Ramírez, M. I. y Corbera, E. (2018). Quantifying active and passive restoration in Central Mexico from 1986-2012: assessing the evidence of a forest transition. *Restoration Ecology*, *26*(6), 1180-1189. https://doi.org/10.1111/rec.12703

INEGI. (1950). *Séptimo Censo General de Población 1950*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1950/

INEGI. (1960). *VIII Censo General de Población 1960*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Infor-

mática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1960/

INEGI. (1990). *XI Censo General de Población y Vivienda 1990*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/

INEGI. (1991). *Censo Agrícola-Ganadero 1991*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/1991/

INEGI. (2007). *Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/

INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano, resolución 15 metros. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

INEGI. (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológicos, serie II, continuo nacional 1:250000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/

INEGI. (2018). Conjunto de datos vectoriales 1:5000, cartas E14D25, E14D26, E14D35 y E14D36. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Disponibles en https://www.inegi.org.mx/app/mapas/

INEGI. (2020). Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469

Kirkby, M. J. (1972). *The Physical Environment of the Nochixtlan Valley, Oaxaca*. Vanderbilt University Publications in Anthropology 2. Nashville: Vanderbilt University.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. y Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interperation. Wiley.

Lorenzen, M., Orozco-Ramírez, Q., Ramírez-Santiago, R. y Garza, G. G. (2020). Migration, socioeconomic transformation, and land-use change in Mexico's Mixteca Alta: Lessons for forest transition theory. *Land Use Policy*, *95*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104580

Lorenzen, M., Orozco-Ramírez, Q., Ramírez-Santiago, R. y Garza, G. G. (2021). The forest transition as a window of opportunity to change the governance of common-pool resources: The case of Mexico's Mixteca Alta. *World Development*, *145*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105516

Mather, A. S. (1992). The forest Transition. *Area*, *24*(4), 367-379. https://www.jstor.org/stable/20003181

Mather, A. S., Fairbairn, J., Needle, C. L. (1999). The course and drivers of the forest transition: The case of France. *Journal of Rural Studies*, *15*(1), 65-90. https://doi.org/10.1016/S0743-0167(98)00023-0

McLennan, B. y Garvin, T. (2012). Intra-regional variation in land use and livelihood change during a forest transition in Costa Rica's dry North West. *Land Use Policy*, *29*(1), 119-130. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.05.011

Molin, P. G., Gergel, S. E., Soares-Filho, B. S. y Ferraz, S. F. (2017). Spatial determinants of Atlantic Forest loss and recovery in Brazil. *Landscape Ecology*, *32*(4), 857-870. https://doi.org/10.1007/s10980-017-0490-2

Novotny, I. P., Fuentes-Ponce, M. H., Tittonell, P., Lopez-Ridaura, S. y Rossing, W. A. H. (2021). Back to the people: The role of community-based responses in shaping landscape trajectories in Oaxaca, Mexico. *Land Use Policy*, *100*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104912

Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, *26*(1), 217-222. https://doi.org/10.1080/01431160412331269698

Palacio Prieto, J. L, Rosado González, E. M y Martínez Miranda, G. M. (2018). *Geoparques. Guía para la formulación de proyectos*. Colección Geografía para el siglo XXI. Textos universitarios 22. México: Instituto de Geografía.

Perez-Rodriguez, V. y Anderson, K. C. (2013). Terracing in the Mixteca Alta, Mexico: cycles of resilience of an ancient land-use strategy. *Human ecology*, *41*(3), 335-349. https://doi.org/10.1007/s10745-013-9578-8

Pichler, M., Bhan, M. y Gingrich, S. (2021). The social and ecological costs of reforestation. Territorialization and industrialization of land use accompany forest transitions in Southeast Asia. *Land Use Policy*, *101*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105180

R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Viena, Austria. Disponible en https://www.R-project.org/

Ramírez-Santiago R., Orozco-Ramírez Q., Clark Tapia R. y Cruz Ramírez M. A. (2021). Tipos de vegetación leñosa y su composición florística en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta de Oaxaca. *Madera y Bosques*, *27*(2), 1-19.

Reyna-Ramírez, C. A., Fuentes-Ponce, M. H., Rossing, W. A. y López-Ridaura, S. (2020). Caracterización de unidades de producción familiar agropecuarias mesoamericanas. *Agrociencia*, *54*(2), 259-277.

Robson, J. P. y Berkes, F. (2011). Exploring some of the myths of land use change: Can rural to urban migration drive declines in biodiversity? *Global Environmental Change, 21*(3), 844-854. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.009

Robson, J. P., Klooster, D. y Hernández-Díaz, J. (Eds.) (2020). *Communities Surviving Migration: village governance, environment and cultural survival in indigenous Mexico*. Nueva York: Routledge.

Robson, J. P. y Klooster, D. J. (2019). Migration and a New Landscape of Forest Use and Conservation. Environmental Conservation, *46*(1), 1-8. https://doi.org/10.1017/S0376892918000218

Romero-Hernández, A. K. (2018). *Caracterización geomorfométrica del Geoparque Global UNESCO Mixteca Alta, Oaxaca.* Tesis para obtener el título de Licenciado en Geografía, asesor José Luis Palacio Prieto. Licenciatura en Geografia. UNAM.

Rudel, T. K., Bates, D. y Machinguiashi, R. (2002). A Tropical Forest Transition? Agricultural Change, Out-migration, and Secondary Forests in the Ecuadorian Amazon. *Annals of the Association of American Geographers*, *92*(1), 87-102. https://doi.org/10.1111/1467-8306.00281

Rudel, T. K., Coomes, O. T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J. y Lambin, E. (2005). Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, *15*(1), 23-31. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.001

Sandoval-García, R., González-Cubas, R. y Jiménez-Pérez, J. (2021). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 12*(66), 96-121. https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I66.816

SGM. (2000). Carta Geológica-Minera. E 14-9. Escala 1:250000. Servicio Geológico Mexicano, México.

Singh, M. P., Bhojvaid, P. P., de Jong, W., Ashraf, J. y Reddy, S. R. (2017). Forest transition and socio-economic development in India and their implications for forest transition theory. *Forest Policy and Economics*, *76*, 65-71. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.013

Solís-Castillo, B., Fernández, G., Vázquez-Castro, G., García-Ayala, G., Bocco, G. y Ortíz, M. A. (2018). Paisaje cultural y evidencias estratigráficas del antropoceno en la Mixteca alta, Oaxaca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *70*(1), 147-171. https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n1a9

Timms, B. F., Hayes, J. y McCracken, M. (2013). From deforestation to reforestation: applying the forest transition to the Cockpit Country of Jamaica. *Area*, *45*(1), 77-87. https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2012.01122.x

UNAM. (2011a). Temperatura media mensual (1902-2011). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en http://ri.atmosfera.unam.mx:8586/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home

UNAM. (2011b). Precipitación máxima anual de las acumuladas mensuales (1902-2011). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en http://ri.atmosfera.unam.mx:8586/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/home

Vaca, R. A., Golicher, D. J., Cayuela, L., Hewson, J. y Steininger, M. (2012). Evidence of Incipient Forest Transition in Southern Mexico. *PLoS ONE*, *7*(8), 1-15. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042309

Yackulic, C. B., Fagan, M., Jain, M., Jina, A., Lim y., Marlier, M., Muscarella, R., Adame, P., DeFries, R. y Uriarte, M. (2011). Biophysical and socioeconomic factors associated with forest transitions at multiple spatial and temporal scales. *Ecology and Society*, *16*(3), 1-22. http://dx.doi.org/10.5751/ES-04275-160315