

Mapa forestal del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México

Forest map of the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area, Mexico

Angel Rolando Endara Agramont*

Universidad Autónoma del Estado de México, México.

arendaraa@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-8413-6551>

Recepción: 27 de marzo de 2023

Aprobación: 28 de agosto de 2023



Santiago Vázquez Lozada

Universidad Autónoma del Estado de México, México.

svazquezl@outlook.es

 <https://orcid.org/0000-0003-2787-9089>

Sergio Franco Maass

Universidad Autónoma del Estado de México, México.

sfrancom@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-3512-130X>

Luis Antonio García Almaraz

Universidad Autónoma del Estado de México, México.

lgarciaa013@alumno.uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-3871-7010>

Alma Abigail Luna Gil

Universidad Autónoma del Estado de México, México.

alunag651@alumno.uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-0253-1991>

RESUMEN

El Nevado de Toluca posee 41 307 ha de bosques distribuidos en poblaciones y diversas asociaciones arbóreas. Al respecto, se busca obtener un mapa forestal de gran resolución espacial. Para ello, se instalaron 464 sitios de muestreo de 0.1 ha, donde se registraron coordenadas geográficas, altitud (msnm) y abundancia de árboles (≥ 7.5 cm DAP). Se identificaron 27 tipos de bosques, donde *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y sus asociaciones cubren más del 70% de la superficie forestal. Las asociaciones de *Alnus jorullensis* están en continuo crecimiento y el bosque de *Quercus laurina* está casi desaparecido. Se concluye que con el método planteado es posible obtener un mapa forestal de alta resolución espacial y temática.

PALABRAS CLAVE: asociación forestal, clasificación supervisada, subescenas, distribución espacial, cobertura forestal.

ABSTRACT

The Nevado de Toluca has 41 307 ha of forests distributed in populations and various tree associations. A forest map with high spatial resolution was obtained, for which 464 sampling sites of 0.1 ha were installed, where geographic coordinates, altitude (masl) and abundance of trees (≥ 7.5 cm DAP) were recorded. 27 types of forests were identified, *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* and their associations cover more than 70% of the forest area. The associations of *Alnus jorullensis* are increasing and the *Quercus laurina* forest has almost disappeared. It is concluded that with the proposed method it is possible to obtain a forest map with high spatial and thematic resolution.

KEYWORDS: forest association, supervised classification, sub-scenes, spatial distribution, forest cover.

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

arendaraa@uaemex.mx

INTRODUCCIÓN

Los bosques templados ocupan el 12% del territorio mexicano (SEMARNAT, 2009) y se encuentran distribuidos en las principales cordilleras del país (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur), donde predominan los bosques monoespecíficos de pino (*Pinus arizonica*, *P. durangensis*, *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. patula*, *P. montezumae*, *P. teocote* y *P. tenuifolia*). Asimismo, existen bosques conformados por asociaciones de diversa índole, que incluyen oyamel (*Abies religiosa*, *A. concolor* y *A. guatemalensis*), cedro blanco (*Cupressus lindleyi*), táscale (*Juniperus* spp.), encino (*Quercus tuberculata*, *Q. devia*, *Q. chihuahuensis*, *Q. arizonica*, *Q. crassifolia*, *Q. aristata*, *Q. resinosa* y *Q. mexicana*), aile (*Alnus* spp.) y madroño (*Arbutus* spp.) (Rzedowski, 2006; Perry y Perry, 1991; Granados-Sánchez *et al.*, 2007).

Los sistemas montañosos del Estado de México se encuentran cubiertos por bosques de pino (128 452 ha), oyamel (79 324 ha), pino-encino (209 000 ha) y encino (210 981 ha) (CONAFOR, 2012). La entidad cuenta con numerosas Áreas Naturales Protegidas (ANP), entre las cuales destaca el Nevado de Toluca. Entre 1972 y el 2000 esta área sufrió una reducción superior al 40% en la densidad del bosque de pino (número de árboles/hectárea); por otro lado, en ese mismo periodo, los bosques de oyamel y aile mantuvieron sus densidades (Franco *et al.*, 2006).

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) se caracteriza por presentar bosques monoespecíficos de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, *Alnus jorullensis* y *Quercus laurina*, pero existe, además, un complejo mosaico de asociaciones forestales (Endara *et al.*, 2013).

Al respecto, Franco *et al.* (2006) revelan un crecimiento de la superficie cubierta por bosques semidensos y fragmentados, lo cual favorece el aumento de sociaciones forestales solo como resultado de fenómenos de transición, sino como consecuencia de procesos de perturbación (tala, incendios, plagas y plantas parásitas). En este contexto, cobra especial relevancia mantener actualizada la información detallada de la distribución de los diversos tipos de bosque en la región.

El mapeo de estas coberturas forestales se puede realizar por medio del uso de sensores modernos y técnicas de fotointerpretación a través del tratamiento de imágenes de satélite multispectrales Landsat (Homer *et al.*, 2004; Carreiras *et al.*, 2006; Coulston *et al.*, 2013; Ahmed *et al.*, 2014), IKONOS (Carleer y Wolff, 2004; Johansen y Phinn, 2006; Greenberg *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2011), MODIS (Hansen *et al.*, 2003; Tottrup *et al.*, 2007), SPOT (Buendía *et al.*, 2002; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014; Torres-Vivar *et al.*, 2017) y Sentinel (Szostak *et al.*, 2018; Grabska *et al.*, 2019; Solórzano *et al.*, 2020), así como fotointerpretación de ortofotos digitales y verificación de campo.

Al respecto, Google Earth Engine (GEE) se ha desarrollado con rapidez y se ha consolidado como la herramienta más popular para el análisis digital de imágenes; se trata de una plataforma computacional en la nube con grandes capacidades de visualización y facilidad de acceso a una amplia gama de datos geoespaciales y sistema unificado de coordenadas, utilizado comúnmente para el análisis de cobertura y uso del suelo (Zhao *et al.*, 2021).

Pese a ello, el uso de imágenes de satélite impone un reto importante (Bobbe *et al.*, 2001; Leija *et al.*, 2020), pues la dificultad para diferenciar coberturas con firmas espectrales similares suele limitar el número de categorías forestales que van a identificarse (Buendía *et al.*, 2002). Este problema es más común en zonas de alta montaña, donde las condiciones físico-geográficas como exposición y pendiente inciden en los resultados de los procesos de clasificación (Montiel *et al.*, 2022). La interpretación de imágenes de satélite con base en la caracterización de campo resulta fundamental para identificar y diferenciar las coberturas forestales (Bobbe *et al.*, 2001; Jennings *et al.*, 2003).

Los mapas obtenidos a través de la clasificación digital de imágenes multispectrales presentan a menudo errores, como el cálculo de tasas de cambio (Franklin *et al.*, 2000; Zhu *et al.*, 2000). Ante esto, diversas investigaciones se han enfocado en desarrollar nuevos métodos de análisis de las imágenes de percepción remota (García y Mas, 2008).

La utilidad de representar las múltiples asociaciones forestales en un mapa radica en la caracterización detallada de los ecosistemas forestales (García y Mas, 2008). Al respecto, Everett *et al.* (1994) señalan que el conocimiento de la estructura arbórea es un elemento básico en el manejo de los ecosistemas. Conocer qué especies arbóreas están presentes ayuda a estimar la diversidad de las comunidades y su dinámica poblacional (Caballero *et al.*, 2022).

Por lo anterior, el objetivo del estudio consistió en obtener un mapa de alta resolución espacial y temática del APFFNT, que incluya no solo la distribución de los bosques monoespecíficos, sino también de las principales asociaciones forestales.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Área de estudio

El APFFNT se localiza en el centro Sur del Estado de México y ocupa una superficie de 53 590.67 ha, por encima de los 3 000 msnm, la cual abarca parte de los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec (figura 1) (CONANP, 2017). El relieve se encuentra modelado por su actividad volcánica e influencia del modelado glaciar, así como por cambios de uso de suelo (forestal a agrícola), desarrollo de actividades pecuarias y extracción de materiales pétreos; el suelo está constituido por rocas ígneas de tipo basaltos, andesitas, tobas y brechas (Chávez *et al.*, 2019).

Presenta clima frío con temperatura media mensual que fluctúa entre 2 °C y 5 °C. En esta misma línea, las temperaturas máximas extremas llegan hasta los 21 °C en el verano y las mínimas extremas bajan a -10 °C en invierno (León-Bañuelos *et al.*, 2020).

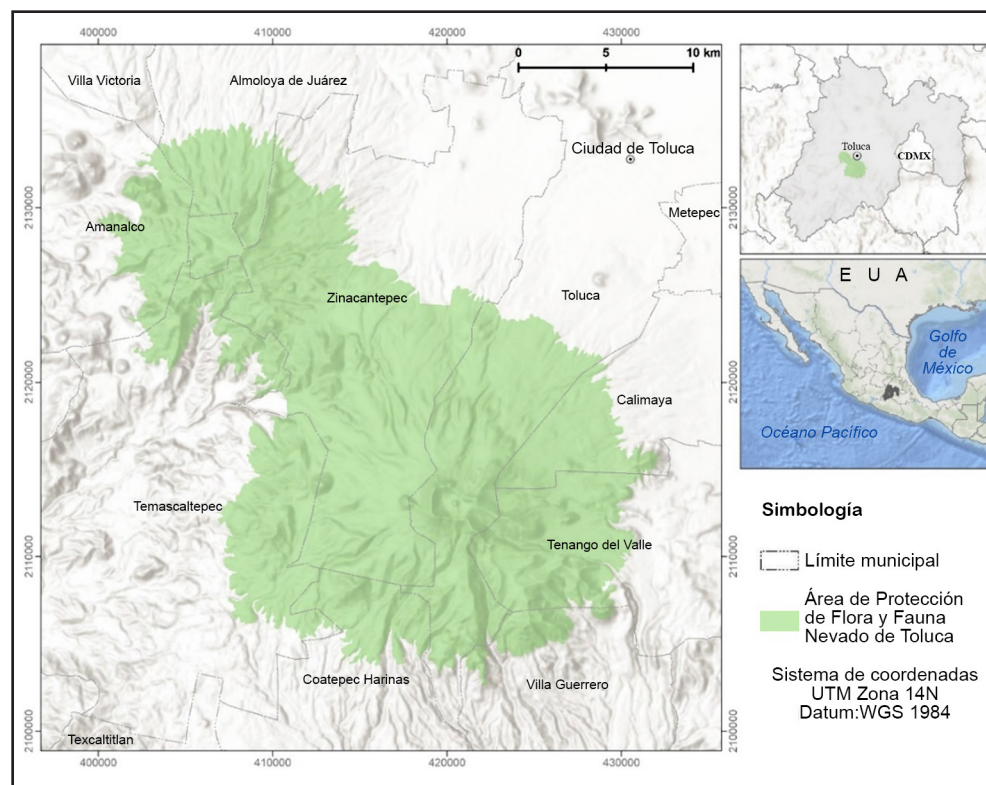


FIGURA 1
Localización geográfica del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca
Fuente: elaboración propia.

Dada la presión antropogénica regional, los bosques de esta Área Natural Protegida (ANP) han estado sujetos a fuertes procesos de perturbación, entre los que destacan la disminución de la densidad del arbolado, tala selectiva, incendios inducidos y sobrepastoreo que favorecen el incremento de plagas y plantas parásitas (Endara *et al.*, 2012; Córdoba *et al.*, 2021).

1. 1. 1. Los bosques del Nevado de Toluca

Los bosques del APFFNT están constituidos por coníferas y latifoliadas. En cuanto a las coníferas, resaltan distintas especies de pino (*Pinus* spp.), oyamel (*Abies religiosa*) y cedro blanco (*Cupressus lindleyi*), este último introducido en la década de los ochenta; por otro lado, las especies de latifoliadas predominantes son encino (*Quercus* spp.) y aile (*Alnus jorullensis*). Si bien existen bosques monoespecíficos, la montaña está cubierta por un gran número de asociaciones forestales, por ejemplo bosques de pino-oyamel y oyamel-aile (Rzedowski, 2006).

a) Bosques de coníferas: los bosques de pino están representados por el pino de las alturas (*Pinus hartwegii*), cuyas poblaciones se establecen en altitudes superiores a los 3 500 msnm, y que pueden alcanzar los 4 150 msnm (Rojas-García *et al.*, 2019), abarcan cerca de 12 900 ha (Cedillo, 2017), se caracterizan por ser abiertos, el dosel superior tiene una altura promedio de 24 m y su abundancia alcanza los 336 árboles/ha (Endara *et al.*, 2012).

Los bosques de *Pinus montezumae* se distribuyen en fragmentos aislados en las laderas norte y este del Nevado de Toluca, entre 3 000 y 3 200 msnm, con árboles que van de los 25 a 30 m de altura y densidades de 130 árboles/ha; en ocasiones se desarrolla asociado a *Pinus pseudostrobus*, cuyos árboles alcanzan alturas entre 30 y 40 m y densidades cercanas a 200 árboles/ha (Madrigal y González, 1991; Arzate *et al.*, 2016).

Los bosques de oyamel se distribuyen en las laderas norte, oeste y sur, entre 3 000 y 3 400 msnm, que abarcan una superficie aproximada de 16 100 ha (Candeau, 2005; Franco *et al.*, 2006). Se trata de bosques muy densos (637 árboles/ha), cuyo dosel superior tiene una altura promedio de 36 m (Endara *et al.*, 2012).

b) Bosque de latifoliadas: los bosques de aile (*Alnus jorullensis*) se distribuyen a lo largo de la ladera noreste, con una superficie estimada de 1 350 ha, alcanzan una altura promedio de 13 m y cuentan con una densidad de 572 árboles/ha (Endara *et al.*, 2012). Usualmente son bosques secundarios establecidos en grandes claros (producto de la extracción de pino) y zonas de cultivo abandonadas (Franco y Burrola, 2010; Regil, 2013).

Las poblaciones de encino (*Quercus laurina*) abarcan una superficie cercana a 330 ha, en específico en la ladera sureste, entre los 3 000 y 3 220 msnm, su altura promedio es de 15 m y una densidad de 758 árboles/ha, aunque existen porciones de bosque monoespecífico, además se asocia con aile (*Alnus jorullensis*), madroño (*Arbutus* spp.), tepozán (*Buddleja* spp.) y pino ayacahuite (*Pinus ayacahuite*); este último domina el dosel superior con alturas entre 25 y 30 m (Endara *et al.*, 2012; Regil, 2013).

c) Las asociaciones forestales: dadas las condiciones ambientales e incidencia antrópica, se entremezclan diferentes latifoliadas y coníferas, lo cual da lugar a asociaciones forestales de dos o más especies. La asociación con mayor cobertura forestal se registra en las zonas de transición (franja que va de los 3 400 a los 3 600 msnm) entre *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* (CONANP, 2017).

1. 2. Métodos

Para la generación de un mapa detallado de cobertura forestal del APFFNT se aplicó una metodología en tres etapas:

1. 2. 1. Etapa 1. División del ANP en subescenas

a) Levantamiento preliminar de campo

Previo a la delimitación de las subescenas, se realizó el levantamiento en 464 unidades de muestreo forestal (UMF) (figura 3) dentro de las 41 314.9 ha de cobertura forestal reportadas para el APFFNT; para ello se recurrió al mapa base de vegetación de Regil (2005). Las UMF fueron circulares de 0.1 ha (17.86 m de radio). En cada una se llevó a cabo el registro de las coordenadas UTM del punto central y la altitud (msnm) con un GPS Rino® 650 Garmin y se obtuvo la abundancia de los fustales ≥ 7.5 cm de diámetro normal (DN).

b) Definición de las categorías por tipo de cobertura

Con base en la información de las 464 UMF se logró identificar la presencia de siete tipos de bosques monoespecíficos y 18 asociaciones forestales en el Nevado de Toluca (tabla 1). Asimismo, se identificó la presencia de cinco tipos de cobertura no forestal (agricultura, pastizal, suelo desnudo, zacatonal alpino y cuerpos de agua).

TABLA 1
Poblaciones y asociaciones, categorías y claves de la leyenda

Poblaciones	Clave	Asociaciones	Clave
<i>Abies religiosa</i>	A	<i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i>	A-Ph
		<i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus pseudostrobus</i>	A-Pp
<i>Alnus jorullensis</i>	Al	<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>	Al-Cu
		<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>	Al-Ph
		<i>Alnus jorullensis</i> -Reforestación de pino	Al-Ref
		<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Pinus pseudostrobus</i>	Al-Pp
<i>Cupressus lusitanica</i>	Cu	<i>Cupressus lusitanica</i> - <i>Alnus jorullensis</i>	Cu-Al
<i>Quercus laurina</i>	Q	<i>Quercus laurina</i> - <i>Arbutus xalapensis</i> - <i>Buddleja cordata</i>	Q-Ar-Bu
<i>Pinus hartwegii</i>	Ph	<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i>	Ph-A
		<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Alnus jorullensis</i>	Ph-Al
		<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Alnus jorullensis</i> - <i>Abies religiosa</i>	Ph-Al-A
Pino inducido	Pi	Pino inducido- <i>Alnus jorullensis</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>	Pi-Al-Cu
		Pino inducido- <i>Cupressus lusitanica</i>	Pi-Cu
		Pino inducido- <i>Alnus jorullensis</i>	Pi-Al
<i>Pino montezumae</i>	Pm	<i>Pino montezumae</i> - <i>Abies religiosa</i>	Pm-A
<i>Pinus pseudostrobus</i>	Pp	<i>Pinus pseudostrobus</i> - <i>Abies religiosa</i>	Pp-A
		<i>Pinus pseudostrobus</i> - <i>Cupressus lusitanica</i> - <i>Abies religiosa</i>	Pp-Cu-A
Reforestación de pino	Ref	Reforestación de pino- <i>Abies religiosa</i>	Ref-A

Fuente: elaboración propia con base en datos de campo.

c) Subdivisión del territorio con base en sus características físico-geográficas

Las diferencias de altitud (3 000 hasta 4 600 msnm) condicionan variaciones en el clima y la profundidad de los suelos que se ven reflejados en el establecimiento escalonado de los tipos de cobertura forestal. El hecho de que la montaña sea parteaguas de las cuencas hidrográficas del río Balsas y río Lerma es también un elemento clave de las variaciones climáticas e hidrológicas, mientras que la vertiente nororiental (sotavento), perteneciente a la cuenca del Lerma, es más fría y presenta menores aportes de humedad y la vertiente suroccidental (barlovento), de la cuenca del Balsas, tiene un clima ligeramente más cálido y concentra mayores precipitaciones (CONANP, 2017).

Las condiciones orográficas relacionadas con la pendiente y la exposición inciden también en las variaciones de la cobertura forestal. Así también, un factor crucial en la diversidad y tipos de cobertura forestal es la presión antrópica regional. La vertiente nororiental que conecta con el Valle de Toluca presenta una fuerte presencia humana que determina una mayor fragmentación de los bosques y diversidad de tipos de cobertura. Por otra parte, la vertiente suroccidental se encuentra más aislada y no presenta asentamientos humanos importantes. Tomando en cuenta todos estos factores y con miras a reducir el número de clases, se llevó a cabo una subdivisión del mapa del ANP en cuatro subescenas (figura 2), y con esto se redujo la confusión entre firmas espectrales (Trejo y Hernández, 1996; Villers *et al.*, 1998).

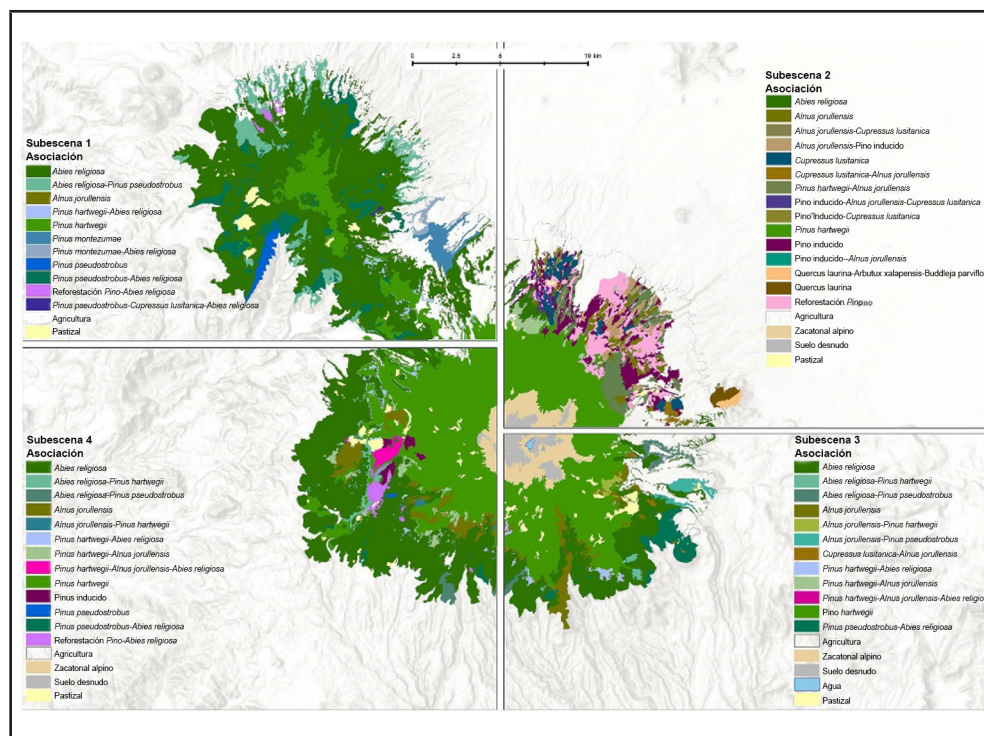


FIGURA 2
Subescenas clasificadas
Fuente: elaboración propia.

Subescena 1-Región noroccidental

Se caracteriza por la predominancia de las poblaciones densas de *Abies religiosa* y, en menor medida, pino y asociaciones de oyamel-pino y pino-oyamel. La zona se caracteriza por sus pendientes pronunciadas que varían entre 13° y 39° y en sus partes bajas presenta amplias zonas cubiertas por agricultura (Candeau y Franco, 2007).

Subescena 2-Región nororiental

Es una región muy compleja que en las laderas bajas presenta pendientes menos pronunciadas que van de los 8° a los 24° y sus suelos son ricos en materia orgánica de tipo andosol y feozem (FAO, 2020). La cercanía con la región densamente poblada del valle de Toluca da pie a importantes impactos antrópicos como la agricultura, la ganadería y la extracción de grava y arena. En las partes altas predomina *P. hartwegii*; no obstante, y dados los procesos históricos de extracción ilegal de madera, existen algunas regiones reforestadas con cedro (*Cupressus lusitanica*). En la zona baja se establecen bosques de aile (*Alnus jorullensis*) y, en menor medida, el bosque nativo de encino (*Quercus laurina*). Esta gran diversidad ha favorecido el desarrollo de asociaciones forestales como pino-aile.

Subescena 3-Región suroriental

Es la región con menor presión antrópica que se caracteriza por los extensos bosques de *P. hartwegii* en torno al cráter del volcán y en las partes altas de los domos del cerro del jabalí y el cerro de La Calera. En las partes bajas existen grandes extensiones de *A. religiosa* y algunas áreas muy fragmentadas de bosques de aile y pastizales.

Subescena 4-Región suroccidental

Presenta una orografía más accidentada como resultado de las erupciones del volcán Xinantécatl. La porción occidental se conecta con el valle de Toluca y está sujeta a fuertes presiones antrópicas por la apertura de zonas de cultivo y la extracción de material pétreo. La vertiente sur, mucho más conservada, está cubierta por bosques de oyamel (*Abies religiosa*). Las zonas elevadas en torno al cráter del volcán están cubiertas por bosques de *Pinus hartwegii*. En la subcuenca Alto Amacuzac existen áreas de preservación de la mariposa monarca (CONANP, 2017), donde predominan los bosques de *A. religiosa* y de *P. hartwegii*.

1. 2. 2. Etapa 2. Clasificación supervisada de las subescenas

a) Procesamiento digital de la información

Se utilizó una imagen multiespectral del sensor Spot 7 con una resolución espacial de 6 m, así como también cuatro bandas (rojo, verde azul y la banda del infrarrojo cercano) (Buendía, *et al.* 2002) y se aplicó un procedimiento de ortorrectificación.

b) Clasificación, limpieza y corrección de las subescenas

Se aplicó el método de clasificación supervisada de máxima verosimilitud con dos campos de entrenamiento por cada clase identificada. El método supone que las estadísticas para cada clase en cada banda se distribuyen normalmente y calcula la probabilidad de que un pixel determinado pertenezca a una clase específica (Buendía *et al.*, 2002). Para clasificar las subescenas se empleó el *software* ENVI 5.2 con base en un conjunto de campos de entrenamiento (tabla 2). Como resultado de dichas clasificaciones se obtuvieron cuatro imágenes (figura 2) que fueron convertidas a formato vectorial y recibieron una minuciosa revisión visual para identificar errores de clasificación y para eliminar grupos de pixeles con un área menor a 1 000 m², los cuales se incluyeron a los polígonos adyacentes con la categoría correcta; todo esto a través de una digitalización en pantalla.

c) Unión y corrección de ligues entre subescenas

Con la plataforma de ArcGis 10.2 se unieron las cuatro subescenas mediante la extensión Unión para después fusionarlas. Aunado a lo anterior, a partir de una interpretación visual se resolvieron y corrigieron los conflictos de ligue.

TABLA 2
Características por subescena

Subescenas	Clasificación supervisada		
	Campos de entrenamiento	Categorías de la leyenda	Superficie forestal (ha)
1	149	14	13 474
2	122	19	7 011
3	98	17	7 072
4	81	17	12 692

Fuente: elaboración propia.

1. 2. 3. Etapa 3. Validación del mapa forestal

Con el fin de validar el mapa de cobertura forestal se obtuvo la matriz de confusión (tabla 3). Para ello, se realizó un muestreo aleatorio con 511 puntos de verificación de campo con la extensión Create Random Points de ArcGis 10.2 (figura 3), además de que se obtuvo la ubicación geográfica (latitud y longitud) y el tipo de cobertura

TABLA 3
Matriz de confusión

	A	A-Pb	A-Pp	Ag	Agua	Al	Al-Cu	Al-Ph	Al-Pp	Al-Pi	Cu	Cu-Al	Pn	Ph	Pi	Pi-Cu	Pi-Al	Pm	Ph-A	Ph-Al	Ph-Al-A	Pm-A	Pp	Pp-Cu-A	Pp-A	Q	Q-Ar-Bu	Ref	Ref-A	SD	ZA	TOTAL	Comisión	EU	EU (%)	RP	RP (%)
A	75	3	7									4																			89	14	0.84	84.27	0.16	15.73	
A-Ph		8										1																			9	1	0.89	88.89	0.11	11.11	
A-Pp			14	1				3				2																			20	6	0.7	70	0.3	30	
Ag				67																											67	0	1	100	0	0	
Agua					2																										2	0	1	100	0	0	
Al	1	1				22			4																						28	6	0.79	78.57	0.21	21.43	
Al-Cu						5																									5	0	1	100	0	0	
Al-Ph								4																							5	1	0.8	80	0.2	20	
Al-Pp				1					5																						6	1	0.83	83.33	0.17	16.67	
Al-Pi										13																					13	0	1	100	0	0	
Cu											14																				14	0	1	100	0	0	
Cu-Al							1					6																			7	1	0.86	85.71	0.14	14.29	
Pn													14																		14	0	1	100	0	0	
Ph													1	68																	69	1	0.99	98.55	0.01	1.45	
Pi	1														17		1														20	3	0.85	85	0.15	15	
Pi-Al-Cu																7	1														8	1	0.875	87.5	0.125	12.5	
Pi-Cu																6	1														7	1	0.86	85.71	0.14	14.29	
Pi-Al																	10														10	0	1	100	0	0	
Pm																		10													10	0	1	100	0	0	
Ph-A		1											1						13												15	2	0.87	86.67	0.13	13.33	
Ph-Al																				7								1			8	1	0.88	87.50	0.13	12.50	
Ph-Al-A																					5										5	0	1	100	0	0	
Pm-A																						5									5	0	1	100	0	0	
Pp																							6								6	0	1	100	0	0	
Pp-Cu-A																								5							5	0	1	100	0	0	
Pp-A																									11						14	3	0.79	78.57	0.21	21.43	
Q																										4	1				5	1	0.8	80	0.2	20	
Q-Ar-Bu																											8				8	0	1	100	0	0	
Ref																													8		11	3	0.73	72.73	0.27	27.27	
Ref-A																													7		8	1	0.88	87.50	0.13	12.50	
SD																														8	8	0	1	100	0	0	
ZA																															10	10	0	1	100	0	0
TOTAL	77	13	21	69	2	22	5	4	9	17	15	6	26	68	20	7	7	12	10	13	7	5	5	6	5	11	4	9	11	7	8	10	511				
Omissiones	2	5	7	2	0	0	0	0	4	4	1	0	12	0	3	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	511				
EP	0.97	0.62	0.67	0.97	1	1	1	1	0.56	0.76	0.93	1	0.54	1	0.85	1	0.86	0.83	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.73	1	1	1				
EP (%)	97.40	61.54	66.67	97.10	100	100	100	100	55.56	76.47	93.33	100	53.85	100	85	100	85.71	83.33	100	100	100	100	100	100	100	100	100	88.89	72.73	100	100	100					
RU	0.03	0.38	0.33	0.03	0	0	0	0	0.44	0.24	0.07	0	0.46	0	0.15	0	0.14	0.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.27	0	0	0					
RU (%)	2.60	38.46	33.33	2.90	0	0	0	0	44.44	23.53	6.67	0	46.15	0	15	0	14.29	16.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.11	27.27	0	0	0					

Nota: EU = Exactitud del usuario, RP = Riesgo del productor, EP = Exactitud del productor y RU = Riesgo del usuario

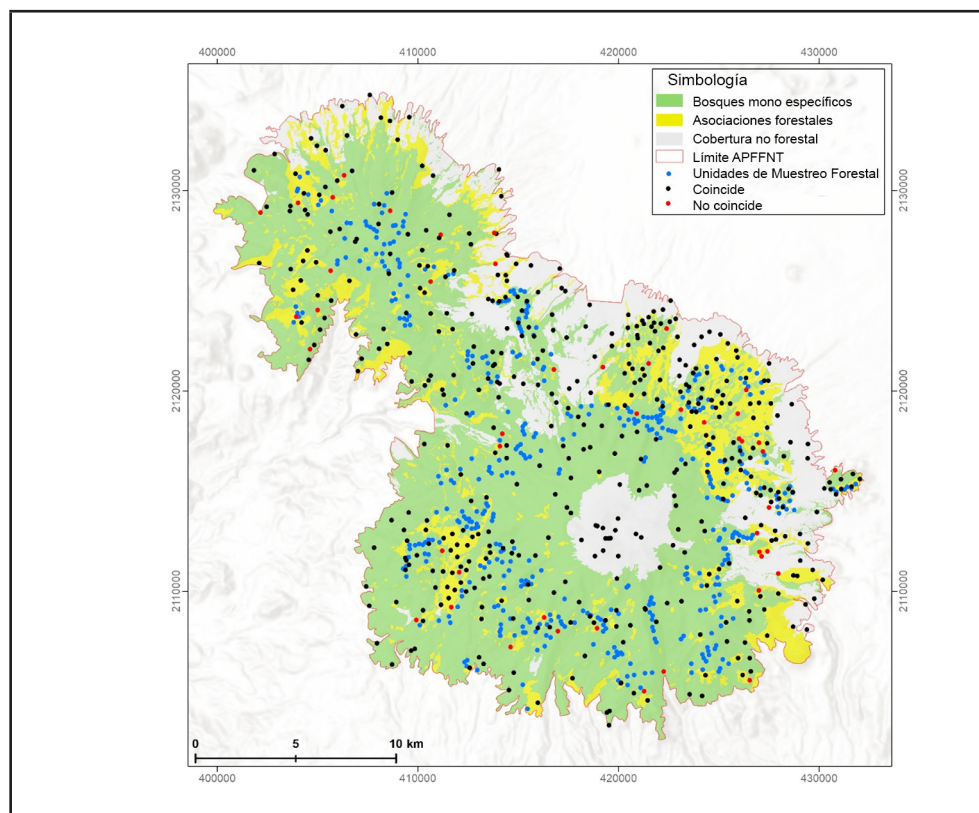


FIGURA 3
Distribución de los puntos de verificación y coberturas forestales
Fuente: elaboración propia.

de cada punto.

Se obtuvieron 464 coincidencias, lo que arroja una confiabilidad global de 90.8% (Mas *et al.*, 2003) y un resultado global Kappa de 92%. Desde el punto de vista de la exactitud del productor (valores de los errores de omisión), se detectaron cuatro tipos de cobertura con los mayores errores (A-Ph, A-Pp, Al-Pp y Pn con valores respectivos de 38.46%, 33.33%, 44.44% y 46.15%). Entre ellas destaca la asociación *A. religiosa* y *P. hartwegii*. Por otro lado, 19 clases fueron perfectamente clasificadas en el mapa (error de 0.00%).

En cuanto a la exactitud de usuario se observa que los valores más bajos fueron para cuatro clases (A-Pp, Ref, Pp-A y Al con valores de 70, 72.7, 78 y 78.6 %, respectivamente). Si bien *P. pseudostrobus* abarca una superficie relativamente pequeña del ANP, es una de las categorías que presenta mayores problemas para su clasificación.

En términos generales, los polígonos con menor certidumbre tienden a localizarse en zonas de transición, tal es el caso de *A. religiosa* que tiende a confundirse con *P. pseudostrobus* y con la asociación de *A. religiosa*-*P. hartwegii*.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El APFFNT es una región forestal compleja con diversos tipos de poblaciones y asociaciones forestales. Por ello, la metodología empleada hizo posible obtener un mapa altamente confiable de cobertura forestal, con una gran resolución temática que incluye 27 tipos de bosque y cinco categorías de cobertura no forestal. De las 53 590 ha que abarca el APFFNT, 41 307 ha presentan cobertura forestal (34 834 ha de bosques monoespecíficos y 6 473 ha de asociaciones forestales), mientras que el zacatonal alpino cubre 1 348 ha y otros

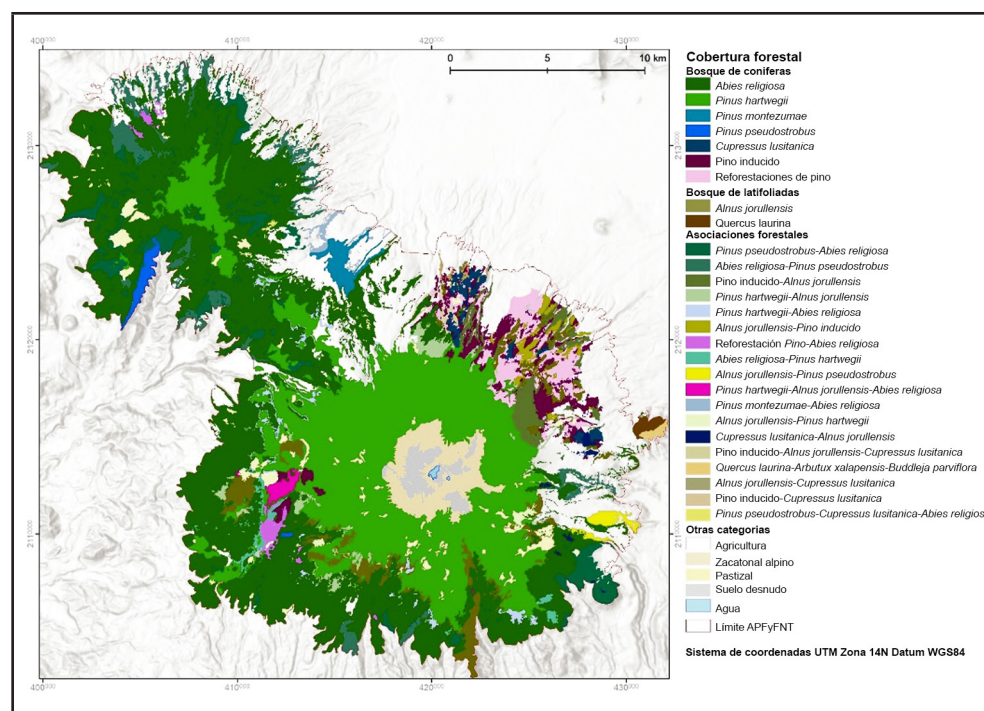


FIGURA 4
Coberturas forestales
Fuente: elaboración propia.[1]

tipos de cobertura con predominancia agrícola ocupan 10 926 ha (figura 4).

El estudio revela ciertos patrones de distribución, por ejemplo las asociaciones forestales de la ladera nororiental (*Alnus*, pino inducido y reforestaciones) se deben a procesos de perturbación como tala, agricultura y ganadería extensiva (Franco *et al.*, 2006). Por otro lado, en la porción noroccidental las asociaciones de *Abies* y *Pinus* son producto de procesos naturales de transición.

Con base en los muestreos de campo y el mapa de cobertura forestal, se obtuvieron las características generales de cada tipo de cobertura, en términos de altitud, abundancia y datos promediados de diámetro y altura (tabla 4).

Si bien existen muchas coberturas, que por la superficie que ocupan son menos significativas, permiten tener una idea general sobre la problemática forestal del Nevado de Toluca. El encino, otrora presente en superficies más amplias del piedemonte, se encuentra muy disminuido. De igual manera, la presencia del cedro es indicativo de programas de reforestación mal dirigidos.

Hacia el noroeste, en la cima del volcán San Antonio predominan poblaciones de *Pinus hartwegii* y en las partes bajas *Abies religiosa*, donde ocurre la transición con *P. pseudostrobus*. Por otro lado, los bosques en torno al volcán Xinantécatl están dominados por poblaciones de *P. hartwegii* a partir de los 3 400 m y alcanzando altitudes de 4 200 msnm. Las partes bajas de las laderas sur y suroeste se encuentran cubiertas por *A. religiosa*, mientras que las laderas norte y nororiental son de una gran complejidad, donde se entremezclan poblaciones, asociaciones y otras categorías de cobertura del suelo, entre ellas destaca la presencia de poblaciones de *Alnus jorullensis* (establecidos en zonas agrícolas o de pastoreo abandonadas), *Cupressus lusitanica* (producto de las campañas de reforestación en la década de los ochenta), así como los bosques inducidos y sus diferentes asociaciones forestales.

El desarrollo de dichas asociaciones se debe al pastoreo, incendios forestales, los cuales modifican la estructura forestal en términos espaciales (Díaz, 2020; Rodríguez, 2008) y la tala inmoderada (Franco *et al.*, 2006; Endara *et al.*, 2013). Dichas alteraciones se prolongan y se vuelven irreversibles; por esta razón, es imprescindible tener un amplio conocimiento de la estructura y distribución espacial de las especies forestales (Barrios *et al.*, 2022).

TABLA 4
Características por cobertura forestal

Cobertura forestal	Superficie en ha	Árboles/ha*	Rango altitudinal (msnm)	Diámetro promedio de árboles ≥ 20 cm de DN*			Altura promedio de árboles ≥ 20 cm de DN*		
Bosque de coníferas									
<i>Abies religiosa</i>	17 586	169	3 000-3 600	51.4			25.0		
<i>Pinus hartwegii</i>	12 485	202	3 400-4 200	39.3			15.7		
<i>Pinus montezumae</i>	355	127	3 000-3 500	57.7			22.0		
<i>Cupressus lusitanica</i>	328	757	3 100-3 600	24.3			8,8		
<i>Pinus pseudostrobus</i>	213	330	3 000-3 500	41.4			35.9		
Pino inducido	1 084	N/M	3 000-3 500	N/M			N/M		
Reforestaciones de pino	1 168	N/M	3 000-3 500	N/M			N/M		
Bosque de latifoliadas									
<i>Alnus jorullensis</i>	1 512	120	3 000-3 500	40.2			12.1		
<i>Quercus laurina</i>	103	246	3 000-3 200	31.1			10.9		
Asociaciones forestales									
<i>Pinus pseudostrobus</i> - <i>Abies religiosa</i>	1 825	249	3 000-3 500	45.8	36.7	22.7	20.4		
<i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus pseudostrobus</i>	1 463	415	3 000-3 500	42.0	48.3	24.9	22.7		
Pino inducido- <i>Alnus jorullensis</i>	807	N/M	3 000-3 400	N/M	N/M	N/M	N/M		
<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Alnus jorullensis</i>	444	184	3 200-3 700	38.4	42.8	14.7	11.5		
<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i>	347	202	3 000-3 600	36.3	41.2	14.5	16.4		
<i>Alnus jorullensis</i> -Pino inducido	278	N/M	3 000-3 400	N/M	N/M	N/M	N/M		
Reforestación de Pino- <i>Abies religiosa</i>	234	N/M	3 000-3 400	N/M	N/M	N/M	N/M		
<i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i>	209	227	3 000-3 600	39.6	42.9	18.5	19.5		
<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Pinus pseudostrobus</i>	177	203	3 000-3 600	35.9	78.0	9.9	22.3		
<i>Pinus hartwegii</i> - <i>Alnus jorullensis</i> - <i>Abies religiosa</i>	151	195	3 200-3 600	39.1	39.6	40.2	14.9	10.8	14.4
<i>Pinus montezumae</i> - <i>Abies religiosa</i>	122	295	3 000-3 300	33.8	21.0	9.9	10.0		
<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>	102	160	3 200-3 700	37.8	42.4	10.6	15.0		
<i>Cupressus lusitanica</i> - <i>Alnus jorullensis</i>	92	503	3 100-3 500	28.0	45.1	11.1	14.9		
Pino inducido- <i>Alnus jorullensis</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>	74	N/M	3 000-3 500	N/M	N/M	N/M	N/M		
<i>Quercus laurina</i> - <i>Arbutus xalapensis</i> - <i>Buddleja cordata</i>	62	190	3 000-3 200	29.4	29.75	31.7	15.2	8.6	9.5
Pino inducido- <i>Cupressus lusitanica</i>	61	N/M	3 000-3 400	N/M	N/M	N/M	N/M		
<i>Pinus pseudostrobus</i> - <i>Cupressus lusitanica</i> - <i>Abies religiosa</i>	13	240	3 400-3 500	34.6	26.17	55.3	35.2	9.3	33.9
<i>Alnus jorullensis</i> - <i>Cupressus lusitanica</i>	12	253	3 400-3 500	49.9	31.3	14.4	12.4		
Otras categorías									
Agricultura	9 370	N/A	3 000-3 600	N/A			N/A		
Zacatonal alpino	1 348	N/A	4 100-4 400	N/A			N/A		
Pastizal	925	N/A	3 000-3 800	N/A			N/A		
Suelo desnudo	609	N/A	3 800-4 600	N/A			N/A		
Agua	22	N/A	4 200	N/A			N/A		

Fuente: elaboración propia.

Nota: *= datos obtenidos en los muestreos de campo; N/M = sin datos de muestreo; N/A = no aplica; DN = Diámetro norma; msnm = metros sobre nivel del mar.

Villers *et al.* (1998) reportaron para esta ANP una cobertura forestal de 37 740 ha, donde se identifican *A. religiosa*, *P. hartwegii* y bosques mixtos, mientras que, en el presente estudio, se cuantificaron 41 307 ha, es decir, casi 4 000 ha más de bosque debido a que se reportan nuevas asociaciones forestales. Regil (2009), por su parte, reportó una superficie forestal de 37 200 ha, esto sin considerar algunas categorías como reforestación de pino y bosque inducido de pino. Estas diferencias en los reportes no solo se explican por el hecho de no haber considerado ciertas asociaciones, sino que sugieren una aparente recuperación, producto de la reforestación en zonas de cultivo y pastoreo abandonadas.

La superficie del género *Pinus* en esta investigación fue de 13 053 ha (*P. hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. montezumae*), a diferencia de las 17 604 ha que señala Regil (2009). Lo anterior se atribuiría a una posible confusión visual de la técnica de fotointerpretación entre las coberturas de oyamel y pino. Rojas-García *et al.* (2019) reportan 12 924 ha de *Pinus hartwegii*, 3% mayor a la encontrada en este estudio (12 485 ha), probablemente debido a la diferencia en la intensidad de muestreo.

La clasificación supervisada a través del uso de imágenes SPOT 7 discrimina de mejor manera la diversidad de especies forestales (Buendía *et al.*, 2002; Torres-Vivar, 2017; Muñoz Ruiz *et al.*, 2014); sin embargo, la complejidad del relieve, clima y altitud de los ecosistemas de alta montaña generan problemas de confusión en un nivel espectral, en particular en la identificación de las asociaciones coníferas-latifoliadas. Su aplicación al Nevado de Toluca requirió de un amplio conocimiento geográfico de la zona y se apoyó en un intenso trabajo de campo.

CONCLUSIONES

Las zonas de alta montaña como el Nevado de Toluca tienden a presentar coberturas forestales muy complejas. Las variaciones de altitud, condiciones del suelo, exposición y presión antropogénica son factores que inducen la formación de múltiples asociaciones forestales. Ante la necesidad de contar con un mapa de cobertura forestal que expresara toda esa complejidad se desarrolló y aplicó una metodología que permitió obtener, gracias a un intenso trabajo de campo y técnicas de teledetección, un mapa de alta resolución espacial y temática del Nevado de Toluca que incluye la distribución de los bosques monoespecíficos y de las principales asociaciones forestales.

En este sentido, mediante la aplicación de una metodología basada en la subdivisión del territorio en subescenas se consiguieron óptimos resultados. La investigación reveló que para la definición de regiones no basta con tomar en cuenta información del medio físico, puesto que se requiere un amplio conocimiento previo de la zona de estudio.

ANÁLISIS PROSPECTIVO

El planteamiento metodológico que se presenta puede contribuir significativamente al monitoreo y conservación de los bosques de alta montaña en México. Su aplicación repetida en el territorio facilitaría los procesos de cambio en la ocupación y uso del suelo, los impactos por incendios forestales, plagas y enfermedades del bosque y la incidencia de la intervención humana en la conservación o deterioro de la masa forestal. Con base en los resultados que se obtienen de dicho monitoreo, se definen planes de intervención para el control de daños, así como políticas ambientales de conservación, regeneración y aprovechamiento de los bosques. Lo anterior trae consigo beneficios a nivel local, dado que las acciones de conservación beneficiarían a la población residente y posesionaria de los bosques, y a nivel regional, puesto que la población se vería beneficiada por la recuperación de la capacidad de los bosques para la provisión de servicios ambientales.

Por otro lado, los avances de la teledetección espacial son cada vez mayores, ya que durante la última década se han incorporado nuevas técnicas y tecnologías de *hardware* y *software* en el sector forestal, las cuales ayudan a supervisar las masas forestales de forma remota, detectar la deforestación y recibir notificaciones en tiempo real sobre cualquier cambio (Nitoslawski *et al.*, 2021). Tal como se menciona, la aplicación de GEE resulta muy útil. Las innovaciones basadas en sensores remotos para el monitoreo, planificación y gestión forestal mediante el

aprendizaje automático desempeñan un papel primordial (Singh *et al.*, 2022), incluyendo las aplicaciones emergentes en entornos virtuales (3D) y realidad aumentada para comprender las relaciones entre humanos y naturaleza (D'Urban Jackson *et al.*, 2020). Un aspecto indispensable es lograr un incremento en la resolución espacial y espectral de las imágenes con el fin de alcanzar una mayor resolución temática con procesos de clasificación más precisos. Pese a ello, ante la complejidad de los ecosistemas forestales, persiste la necesidad de contar con un alto conocimiento de las zonas estudiadas y al mismo tiempo de bases de datos de libre acceso y *software* de código abierto que modifican de forma sustancial la forma de analizar los ecosistemas forestales (Liang y Gamarra, 2020).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las comunidades del APFFNT por su apoyo y enseñanzas en campo, así como al grupo de investigación Bosques de Alta Montaña del ICAR. También, a los árbitros que aportaron una mejora a la estructura del artículo y al fondo sectorial Conacyt-Conafor que financiaron el proyecto “Identificación, evaluación y manejo integrado de plantas parásitas en cuatro regiones de México: noroeste (Durango), centro-occidente (Michoacán y Jalisco), oriente (Puebla y Veracruz), y centro-sur (Estado de México y Tlaxcala)” con clave 4938-2019C.

REFERENCIAS

- Ahmed, O. S., Franklin, S. E., & Wulder, M.A. (2014). Integration of LiDAR and landsat data to estimate forest canopy cover in coastal British Columbia. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80, 953-961. <https://doi.org/10.14358/PERS.80.10.953>
- Arzate, F., Amaury, M., Gutiérrez, G. G. y Heredia-Bobadilla, R. L. (2016). *Diversidad genética de dos especies de coníferas en el Nevado de Toluca: una alternativa de conservación*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Barrios, C. R., Pérez, P. J., Torres, V. J. y Aguirre, C. J. (2022). Estructura y composición florística de un bosque de Pinus-Quercus en El Porvenir, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(73), 50-74. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1252>
- Bobbe, T., Lachowski, H., Maus, P., & Greer, J. (2001). A primer on mapping vegetation using remote sensing. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 277-287. <https://doi.org/10.1071/WF01029>
- Buendía, R. E., Terrazas, D. S. y Vargas, P. E. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del Oriente del Valle de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 13-19.
- Caballero, C. P., Treviño, G. E., Mata, B. M., Alanís, R. E., Yarena, Y. J. y Cuéllar, R. L. (2022). Análisis de la estructura y diversidad de bosques templados en la ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 76-102. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1253>
- Candeau, D. R. y Franco, M. S. (2007). Dinámica y condiciones de vida de la población del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) en la generación de presión a los ecosistemas circundantes y de impactos ambientales a través de un sistema de información geográfica. *Investigaciones geográficas*, 62, 44-68.
- Candeau, R. (2005). *Regionalización socioeconómica automatizada del Parque Nacional Nevado de Toluca y su relación con el deterioro ambiental* (tesis de maestría). México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Carleer, A., & Wolff, E. (2004). Exploitation of very high-resolution satellite data for tree species identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 135-140. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.1.135>
- Carreiras, J. M., Pereira, J. M., & Pereira, J. S. (2006). Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 223, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.056>

- Cedillo, A. (2017). *Análisis espacial del nivel de infestación por muérdago enano en el bosque de pino del área de protección de flora y fauna nevado de Toluca* (tesis de maestría). México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Chávez, S. F. R., Carreto, B. F. y Serrano, B. R. del C. (2019). Turismo de naturaleza en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, Estado de México, a través de la geoinformática. *Espacio y Desarrollo*, 34, 33-56. <https://doi.org/10.1016/10.18800/espacioydesarrollo.201902.002>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2017). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca*. México.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2012). *Inventario nacional forestal y de suelos. Informe de resultados 2004-2009. Anexo 7*. Jalisco: Conafor-Semarnat.
- Córdoba, S. P., Mendoza, E. A., Atkinson, T. H. y Manzo, M. V. (2021). Diversidad y dinámica poblacional de Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) en plantaciones de palto y bosque natural circundante en el NW de Argentina. *Dugesiana*, 28(2). <https://doi.org/10.1016/10.32870/dugesiana.v28i2.7151>
- Coulston, J. W., Jacobs, D. M., King, C. R., & Elmore, I. C. (2013). The influence of multi-season imagery on models of canopy cover: A case study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79, 469-477. <https://doi.org/10.14358/PERS.79.5.469>
- Díaz, F. D. (2020). Pastoreo prescrito y prevención de incendios forestales. *Revista Incendios y Riesgos Naturales*, 1, 1-5.
- D'Urban Jackson, T., Williams, G. J., Walker-Springett, G., & Davies, A. J. (2020). Three-dimensional digital mapping of ecosystems: A new era in spatial ecology. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287 (1920), 20192383. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.2383>
- Endara, A. A., Calderón, R., Nava, G., & Franco, M. S. (2013). Analysis of fragmentation processes in high-mountain forests of the center of Mexico. *American Journal of Plant Sciences*, 4, 697-704. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.43A088>
- Endara, A. A., Franco, M. S., Nava, B. G., Valdez, H. J., & Fredericksen, T. S. (2012). Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research*, 23(1), 39-44. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0226-8>
- Everett, R., Oliver, C. & Saveland, J. (1994). Adaptive ecosystem management. In *Vol. II Ecosystem management: principles and applications* (pp. 340-354). Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-318. Portland.
- Franco, M. S. y Burrola, A. C. (2010). *Los hongos comestibles del Nevado de Toluca*. México: ICAR, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Franco, M. S., Regil, G. H., González, E. C. y Nava, B. G. (2006). Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. *Investigaciones geográficas*, 61, 38-57.
- Franklin, J., Woodcock, C. E., & Warbington, R. (2000). Multi-attribute vegetation maps of forest service's lands in California supporting resource management decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1209-1217.
- García, M. J. y Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones geográficas*, 67, 7-19.
- Grabska, E., Hostert, P., Pflugmacher, D., & Ostapowicz, K. (2019). Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 11(10), 1197. <https://doi.org/10.3390/rs11101197>
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F. y Hernández-García, M. A. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo Serie Ciencias forestales y del ambiente*, 13(1), 67-83.

- Greenberg, J. A., Dobrowski, S. Z., Ramirez, C. M., Tull, J. L. & Ustin, S. L. (2006). A bottom-up approach to vegetation mapping of the Lake Tahoe Basin using hyperspatial image analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 581-589. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.5.581>
- Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., & Sohlberg, R. A. (2003). Global percent tree cover at spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions*, 7, 1-15. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:-GPTCAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:-GPTCAA>2.0.CO;2)
- Homer, C., Huang, C., Yang, L., Wylie, B., & Coan, M. (2004). Development of a 2001 national land-cover database for the United States. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 829-840. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.7.829>
- Jennings, M., Loucks, O., Peet, R., Faber-Langendoen, D., Glenn-Lewin, D.,... & Grossman, D. (2003). *Guidelines for describing associations and alliances of the U. S. National Vegetation Classification*. Washington: The Ecological Society of America, Vegetation Classification Panel.
- Johansen, K., & Phinn, S. (2006). Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using IKONOS and Landsat ETM+ data in Australian tropical savannahs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 71-80. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.1.71>
- Kim, S. R., Lee, W. K., Kwak, D. A., Biging, G. S., Gong, P., Lee, J. H., & Cho, H. K. (2011). Forest cover classification by optimal segmentation of high-resolution satellite imagery. *Sensors*, 11, 1943-1958. <https://doi.org/10.3390/s110201943>
- Leija, E. G., Valenzuela-Ceballos, S. I., Valencia-Castro, M., Jiménez-González, G., Castañeda-Gaytán, G., Reyes-Hernández, H. y Mendoza, M. E. (2020). Análisis de cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo en la región centro-norte de México. El caso de la cuenca baja del río Nazas. *Ecosistemas*, 29(1), 1826. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1826>
- León-Bañuelos, L. A., Endara-Agramont, A. R., Gómez-Demetrio, W., Martínez-García, C. G., & Nava-Bernal, E. G. (2020). Identification of *Arceuthobium globosum* using unmanned aerial vehicle images in a high mountain forest of central Mexico. *Journal of Forestry Research*, 31, 1759-1771. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00954-5>
- Liang, J., & Gamarra, J. G. (2020). The importance of sharing global forest data in a world of crises. *Scientific Data*, 7.
- Madrigal, D. & González, A. (1991). *Distribución del impacto ambiental en los bosques de Pinus hartwegii del Nevado de Toluca, México* (377-384). *Memoria del IIIer. Encuentro de Geógrafos de América Latina. Tomo II*. México: INEGIUAEM.
- Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., & Pérez, V. A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas*, 51, 53-72.
- Montiel, G. R., Bolaños, G. M., Macedo, C. A., Rodríguez, G. A. & López, P. A. (2022). Clasificación de uso del suelo y vegetación con redes neuronales convolucionales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 97-119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1269>
- Muñoz-Ruiz, M. Á., Valdez-Lazalde, J. R., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., & Monterroso-Rivas, A. I. (2014). Inventario y mapeo del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. *Agrociencia*, 48(8), 847-862.
- Nitoslawski, S. A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J. W. N., Witherspoon, K., Nesbitt, L., & Konijnendijk van den Bosch, C. C. (2021). The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9(8), e2021EF002123. <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Principales resultados*. Roma.
- Perry, J., & Perry, J. Jr. (1991). *The Pines of Mexico and Central America*. Portland: Timber Press.
- Regil, H. (2013). *Pérdida y recuperación de carbono derivadas de la dinámica de cambio y uso del suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca en el periodo 2000-2009* (tesis doctoral). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Regil, H. (2009). *Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000* (tesis de licenciatura). Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Regil, H. (2005). *Análisis del cambio de uso de suelo y vegetación para la obtención de la dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca 1972-2000* (tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Rodríguez, T. D. & Fulé, Z.P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 23-37. <https://doi.org/10.1071/WF02040>
- Rodríguez, T. D. (2008). Fire regimes, Fire Ecology, and Fire Management in México. *Ambio*, 37, 7-8. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-37.7.548>
- Rojas-García, F., Fredericksen, T. S., Vazquez Lozada, S., & Endara, A. A. (2019). Impact of timber harvesting on carbon storage in montane forests of central Mexico. *New Forests*, 50, 1043-1061. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09714-z>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2009). *Inventario nacional forestal y de suelos 2004-2009; una herramienta que da certeza a la planeación; evaluación y desarrollo forestal de México*. Jalisco.
- Singh, R. K., Das, A. K., Jain, H., Singh, P., & Kumar, P. (2022). Mapping and identification of trees using semantic segmentation deep learning neural network. In *Forest Dynamics and Conservation* (pp. 385-398). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0071-6_18
- Solórzano, J. V., Mas, J. F., Gao, Y., & Gallardo-Cruz, J. A. (2020). Spatiotemporal patterns of Sentinel-2 observations at image- and pixel-level of the Mexican territory between 2015 and 2019. *Revista de Teledetección*, 56, 103-115. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14044>
- Szostak, M., Hawryło, P., & Piela, D. (2018). Using of Sentinel-2 images for automation of the forest succession detection. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 142-149. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1412272>
- Torres-Vivar, J. E., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., & Aguirre-Salado, C. A. (2017). Inventario y mapeo de un bosque bajo manejo de pino con datos del sensor SPOT 6. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(39), 25-44. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.41>
- Tottrup, C., Rasmussen, M. S., Eklundh, L., & Jonsson, P. (2007). Mapping the fractional forest cover across the highlands of Southeast Asia using MODIS data and regression tree modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 23-46. <https://doi.org/10.1080/01431160600784218>
- Trejo, I. y Hernández, J. (1996). Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 5, 11-18.
- Villers, L., García, L., & López, J. (1998). Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el parque nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones Geográficas*, 36, 7-19.

- Zhao, Q., Yu, L., Li, X., Peng, D., Zhang, Y., & Gong, P. (2021). *Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. Remote Sensing*, 13, 3778. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>
- Zhu, Z. L., Yang, L. M., Stehman, S. V., & Czaplewski, R. L. (2000). Accuracy assessment for the U.S. Geological Survey Regional Land-Cover Mapping Program: New York and New Jersey Region. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1425-1435.

NOTAS

- [1] El presente estudio es producto del proyecto UAEM “Distribución espacial y diversidad de plantas parásitas de los bosques de alta montaña, México” clave 4994/2020CIB, del cual también se derivó el reporte de investigación del segundo autor.



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/21021>

Cómo citar el artículo:

Endara Agramont, A. R., Vazquez Lozada, S., Franco Maass, S., García Almaraz, L. A. y Luna Gil, A. A. (2025). Mapa forestal del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, México. *CIENCIA ergo-sum*, 31. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a19>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a19>



Licencia Creative Commons Atribución-No-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Angel Rolando Endara Agramont: conceptualización, metodología, supervisión, redacción-revisión y edición.

Santiago Vazquez Lozada: curación de datos, análisis formal, redacción-borrador original.

Sergio Franco Maass: validación y redacción-borrador original.

Luis Antonio García Almaraz: investigación, visualización.

Alma Abigail Luna Gil: metodología, redacción-revisión y edición.