

Monitoreo de la fenología de bosques de alta montaña a través de la dinámica de NDVI

A. Correa-Díaz¹, F. Moreno-Sánchez¹, A. González-Hernández¹ y R. Pérez-Miranda¹

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales CENID - COMEF, INIFAP. Coyoacán, Ciudad de México, CP 04010.

* Correo electrónico: correa.arian@inifap.gob.mx

Introducción

Preguntas centrales

Los bosques de alta montaña (BAM) son ecosistemas vulnerables al cambio climático debido a su alta sensibilidad a variaciones en la temperatura. Sin embargo, también son una fuente de información para monitorear y evaluar sus efectos. En México, la especie forestal dominante de los BAM es *Pinus hartwegii* Lindl., la cual puede encontrarse incluso por encima de los 4,000 msnm, sin embargo, poco se sabe acerca de la modificación en su fenología debido al cambio climático.

¿Cuál es el inicio y fin de la estación de crecimiento en tres bosques de alta montaña en el Estado de México?

¿Existe una variación espacio-temporal en los indicadores fenológicos de bosques de alta montaña en las últimas dos décadas?

Materiales y Métodos

El uso de sensores remotos permite el monitoreo sobre grandes superficies, a través de la dinámica temporal de indicadores espaciales. Por ejemplo, indicadores fenológicos (i.e. inicio y fin de estación de crecimiento), derivados a partir de sensores remotos, aportan información relacionada a procesos de adaptación de los bosques tales como un aumento en el secuestro de carbono.

Series temporales de NDVI (MODIS) con una resolución de 250 m cada 16 días fueron procesadas en tres bosques: Nevado de Toluca (NTOL), Tlaloc (TLA) e Iztaccíhuatl-Popocatepetl (IZPO) para el periodo 2000 – 2019 (Figura 1a).

Cuatro indicadores fenológicos: inicio, fin y duración de la estación de crecimiento (SOS, EOS y LOS, respectivamente), y posición del máximo (POP) fueron extraídos de las series temporales de NDVI usando la librería *greenbrown* en R (Figura 1b).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permite estimar la cantidad y desarrollo de la vegetación con base a la intensidad que emite o reflejan la vegetación en ciertas bandas del espectro electromagnético.

Tendencias temporales fueron evaluadas usando regresión lineal por mínimos cuadrados (OLS) a nivel pixel y resumidos a nivel montaña.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR – Banda del Infrarrojo cercano

RED – Banda visible -rojo

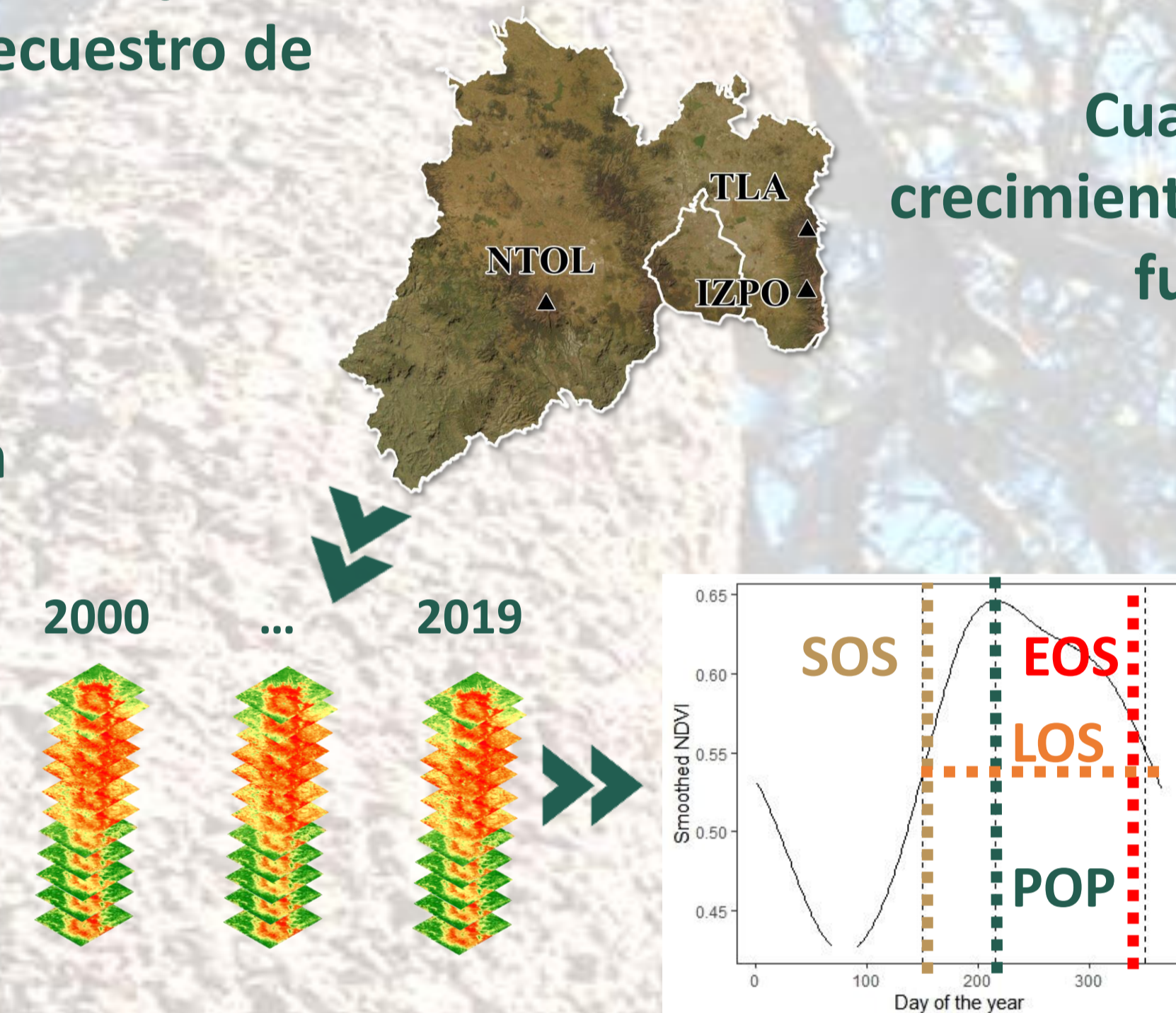


Figura 1. Diagrama de flujo. (a) Sitios, (b) Series temporales de NDVI y (c) Indicadores fenológicos

Resultados y discusión

Durante el periodo 2000 – 2019, el promedio de inicio y fin de la estación de crecimiento (SOS y EOS) fueron los días del año (DOY) 147 ± 8 (fin de Mayo) y 7 ± 6 (inicio de Enero), respectivamente. Por tanto, la duración de la estación de crecimiento fue de 217 ± 13 días. Sin embargo, otros autores sugieren que la estación de crecimiento (formación de madera) inicia en Marzo-Abril y termina en Octubre-Noviembre (Biondi et al., 2005). Esto sugiere un desfase entre procesos a nivel dosel (NDVI) y en su xilogénesis. Finalmente, el máximo NDVI (POP) fue encontrado a mediados de Septiembre (DOY 260) (Cuadro 1).

Respecto a las tendencias temporales, se encontró una variación marginal para SOS en TLA (-1.6 días año⁻¹, $p = 0.09$), mientras que significativa para EOS en NTOL ($+0.7$ días año⁻¹, $p = 0.02$). Esto significa que se ha retrasado el término de la estación de crecimiento en NTOL. Igualmente, la posición del máximo (POP) se ha retrasado en los últimos años en la región ($p < 0.05$), exceptuando TLA ($p = 0.68$) (Figure 2). Estos resultados rechazan la idea de una expansión de la estación de crecimiento a pesar de los recientes aumentos de temperatura.

Cuadro 1. Indicadores fenológicos en tres bosques de alta montaña del Estado de México

Montaña	Inicio de estación de crecimiento ¹	Fin de estación de crecimiento ¹	Duración de la estación de crecimiento ¹	Posición del máximo ¹	NDVI Máximo
Nevado de Toluca	150 ± 14	5 ± 9	210 ± 29	250 ± 15	0.67 ± 0.02
Tlaloc	150 ± 26	8 ± 11	210 ± 36	270 ± 21	0.69 ± 0.02
Iztaccíhuatl Popocatepetl	140 ± 15	7 ± 11	230 ± 21	260 ± 26	0.68 ± 0.01

¹ Referidos al día del año (DOY)

Se encontró una alta variación intra anual en los indicadores fenológicos, lo que demuestra que estos indicadores responden activamente a variables ambientales como temperatura y precipitación.

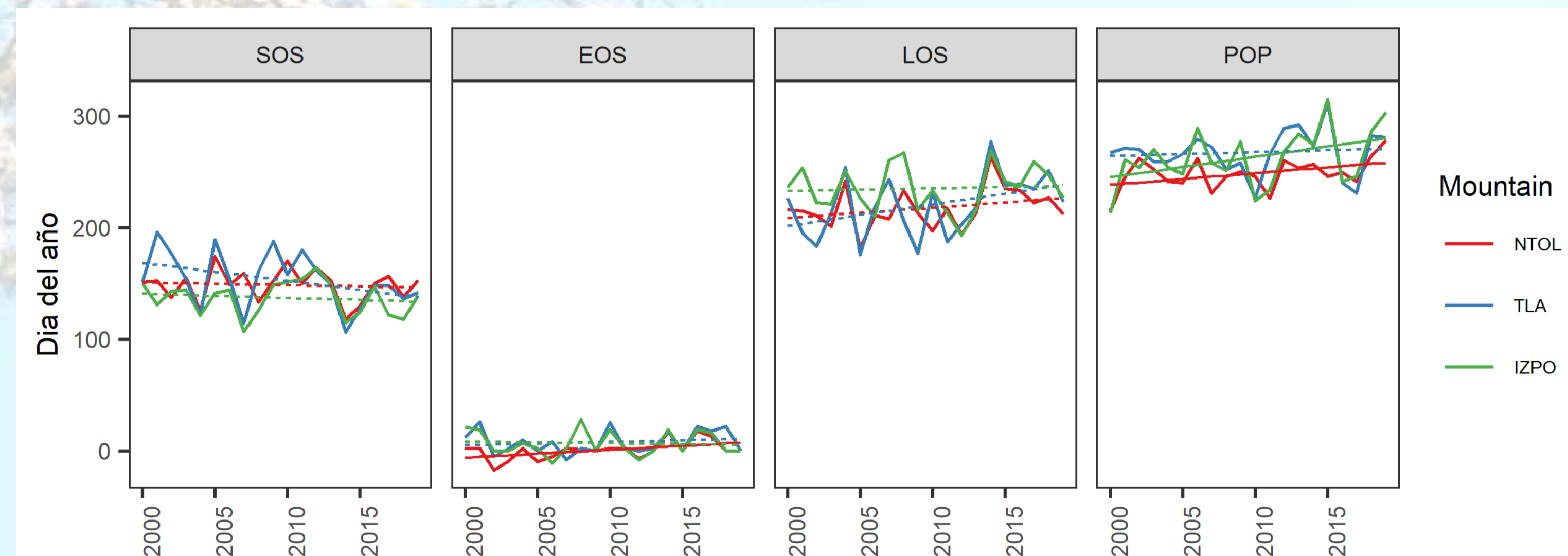


Figura 2 . Tendencias temporales en los indicadores fenológicos derivados a partir de NDVI. Líneas sólidas representan una regresión estadísticamente significativa ($p < 0.05$)

Literatura citada

Forkel M., Carvalhais N., Verbesselt J., Mahecha M. D., Neigh C. S. R., Reichstein M. (2013). Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113-2144.
 Biondi F., Hartsough P. C., Galindo-Estrada I. 2005. Daily weather and tree growth at the tropical treeline of North America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(1), 16-24.