

Impacto de la sequía y el balance hídrico en el *Pinus hartwegii* de los Estados de México y Puebla

*Impact of drought and water balance on pinus hartwegii in the States of
Mexico and Puebla*

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20312871>

AUTORES: Leyva Ovalle Ángel¹

Tapia Zúñiga Mónica Virginia²

Gualpa Calva Miguel Ángel³

Arreguín Sámano Moisés⁴

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: aleyvao@chapingo.mx

Fecha de recepción: 19 / 10 / 2025

Fecha de aceptación: 06 / 11 / 2025

RESUMEN

Para lograr el objetivo de modelar la influencia humana en el agua subterránea, la investigación siguió varios pasos. Primero, se calculó el índice NDVI (usando Landsat 8 y GEE) para medir la salud de la vegetación en las áreas con *Pinus hartwegii* Lindl. Segundo, se determinó el grosor del agua subterránea mediante datos de GRACE. Finalmente, se emplearon modelos de regresión lineal para establecer una relación predictiva entre el volumen de madera (usando ecuaciones alométricas) y las variables NDVI y GRACE. Estos modelos se evaluaron en función de las condiciones climáticas

¹<https://orcid.org/0000-0003-1873-9797>, Universidad Autónoma Chapingo, aleyvao@chapingo.mx

²<https://orcid.org/0000-0002-5591-3603>, Universidad Estatal del Sur de Manabí, monica.tapia@unesum.edu.ec

³<https://orcid.org/0000-0001-5392-036X>, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, miguel.gualpa@epoch.edu.ec

⁴<https://orcid.org/0000-0001-9324-9400>, Tecnológico Nacional de México, Universidad Estatal de Bolívar, marreguin@ueb.edu.ec

(CHIRPS) para estimar la conexión entre el crecimiento volumétrico de los árboles y la infiltración en las zonas de estudio.

Palabras claves: Hidrología, Antropogenia, Pinus, Teledetección, Alometría

ABSTRACT

To achieve the objective of modeling human influence on groundwater, the research followed several steps. First, the NDVI index was calculated (using Landsat 8 and GEE) to measure vegetation health in areas with *Pinus hartwegii* Lindl. Second, groundwater thickness was determined using GRACE data. Finally, linear regression models were employed to establish a predictive relationship between timber volume (using allometric equations) and the NDVI and GRACE variables. These models were evaluated based on climatic conditions (CHIRPS) to estimate the connection between tree volumetric growth and infiltration in the study areas.

Keywords: Hydrology, Anthropogeny, Pinus, Remote Sensing, Allometry

INTRODUCCIÓN

La combinación de un mayor número de habitantes en el planeta y la creciente escasez de recursos hídricos en diversas regiones llevará a un incremento en el sufrimiento causado por eventos catastróficos asociados al agua. Estos desastres, como inundaciones y sequías, son cada vez más frecuentes y severos como consecuencia del calentamiento global (ONU-HABITAT, 2024). La influencia del clima global sobre la Tierra se ejerce a través de múltiples fenómenos, incluyendo la variación térmica, la modificación de los patrones de precipitación y el derretimiento de la nieve, los cuales a menudo son inducidos por procesos internos derivados de la acción humana. Dichos cambios repercuten directamente en el ciclo del agua, afectando parámetros fundamentales como el caudal, la evapotranspiración y la pluviometría (Valles, 2018).

De acuerdo con Naciones Unidas, en 2023, la sequía afectó una amplia porción de América Central y México—concretamente, más del 76% de su territorio—, siendo una situación exacerbada por los efectos del cambio climático (ONU, 2024). Las sequías han afectado consistentemente las regiones centro y centro-norte de México a lo largo de la historia, con una incidencia superior al 79% en los periodos prehispánico y colonial. El siglo XX registró más de tres docenas de sequías importantes. Recientemente, el evento

de 2011 en la zona norte demostró el severo impacto de estos fenómenos en la economía, la seguridad alimentaria y la disponibilidad de agua para la población e industria (Domínguez, 2016).

Según la investigación de Junju, et al. (2023), analizar en detalle las sequías causadas por el cambio climático y las actividades humanas es crucial. Este análisis contribuirá directamente a la planificación y gestión efectiva de los recursos hídricos, facilitando además la creación de estrategias de mitigación y la adaptación tanto de las comunidades como de los territorios (Jinfeng, Shihao, Baohui, & Hongrui, 2024). El objetivo principal de este estudio fue modelar cómo las actividades humanas afectan los sistemas de agua subterránea. Esto se logró cuantificando los patrones de sequía y el equilibrio hídrico dentro de áreas geográficas específicas que contienen árboles de *Pinus hartwegii* Lindl. (registrados en las bases SiBiFor de México y Puebla).

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso metodológico se fundamentó en el uso de herramientas de teledetección y procesamiento de datos geoespaciales a gran escala. Inicialmente, se delimitaron los polígonos de estudio en la plataforma Google Earth Engine, integrando registros de los árboles de *Pinus hartwegii* provenientes de las bases SiBiFor de México y Puebla. Para asegurar la precisión cartográfica, se realizó una limpieza de datos utilizando las librerías *sf* y *dplyr*, convirtiendo coordenadas UTM incompletas a formatos geográficos y organizando la información en estructuras de datos procesables (Cardille et al., 2024).

Para la caracterización de la salud vegetal y el estado hídrico, se calcularon diversos índices mediante imágenes satelitales. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se obtuvo de sensores Landsat 8, aplicando filtros de nubosidad menores al 30% y utilizando las bandas de infrarrojo cercano y rojo (Cardille et al., 2024; Crespo et al., 2024). Complementariamente, se determinó el almacenamiento de agua subterránea mediante datos de la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), específicamente procesando el componente de espesor equivalente de agua (*lwe_thickness_csr*) para capturar la dinámica de los recursos hídricos bajo la influencia antropogénica y natural (Cardille et al., 2024; Richey et al., 2015). El balance hídrico mensual para el periodo 2005-2014 se estableció restando la evapotranspiración (obtenida

de datos MODIS) de la precipitación (derivada de la colección CHIRPS), permitiendo identificar periodos de déficit o superávit de agua (Cardille et al., 2024).

Finalmente, el modelado predictivo de volúmenes maderables se ejecutó mediante una integración de variables climáticas y fisiográficas. Se calcularon mensualmente el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y el Índice de Estrés Hídrico (MSI), este último fundamental para identificar el grado de tensión hídrica en la vegetación (Cardille et al., 2024). La fase analítica empleó el algoritmo de aprendizaje automático XGBoost, utilizando el 70% de los datos para entrenamiento y el 30% para validación. Como variables independientes del modelo se incluyeron la precipitación, la evapotranspiración, el balance hídrico, el EVI y el MSI, evaluando el rendimiento a través del Error Cuadrático Medio y visualizando la estructura de toma de decisiones mediante árboles de regresión (GitHub, 2024).

RESULTADOS

Tabla 1. Statistical summary of vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE) for mexican state

Concept	State	Amorphous polygonal	Coordinates		NDVI	GRACE
			X	Y		
Min	Puebla	Puebla 1	-97.29898	18.96899	0.2822605	0.02376496
1st Qu			-97.29376	18.96899	0.3945997	0.02376496
Median			-97.29376	18.97495	0.4438231	0.02376496
3rd Qu			-97.29898	18.97495	0.5030457	0.02376496
Max			-97.29898	18.96899	0.6328571	0.02376496
Min		Puebla 4	-98.67154	19.41125	0.4551274	0.01709776
1st Qu			-98.65078	19.41125	0.6550504	0.01709776
Median			-98.65078	19.41961	0.6954328	0.01709776
3rd Qu			-98.67154	19.41961	0.7181615	0.01709776
Max			-98.67154	19.41125	0.7692392	0.01709776

Concept	State	Amorphous polygonal	Coordinates		NDVI	GRACE
			X	Y		
Min	state of México	Mexico 2	-99.40696	19.50719	-0.3089204	0.0140668
1st Qu			-99.33335	19.50719	0.4539997	0.0140668
Median			-99.33335	19.52718	0.5576222	0.0140668
3rd Qu			-99.40696	19.52718	0.6203941	0.0140668
Max			-99.40696	19.50719	0.7485467	0.0140668
Min		Mexico 3	-99.55017	19.60998	0.4598364	0.0140668
1st Qu			-99.54838	19.60998	0.6012394	0.0140668
Median			-99.54838	19.61917	0.6591494	0.0140668
3rd Qu			-99.55017	19.61917	0.6891929	0.0140668
Max			-99.55017	19.60998	0.7475536	0.0140668
Min		Mexico 4	-99.77687	19.74940	0.5005670	0.0140668
1st Qu			-99.77381	19.74940	0.5609691	0.0140668
Median			-99.77381	19.75206	0.5786600	0.0140668
3rd Qu			-99.77687	19.75206	0.5928945	0.0140668
Max			-99.77687	19.74940	0.6309397	0.0140668
Min		Mexico 6	-99.81729	19.07215	-0.4414186	0.0140668
1st Qu			-99.71547	19.07215	0.3386888	0.0140668
Median			-99.71547	19.10871	0.4260129	0.0140668
3rd Qu			-99.81729	19.10871	0.4777581	0.0140668
Max			-99.81729	19.07215	0.7739701	0.0140668

Figura 1. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Puebla 4 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)

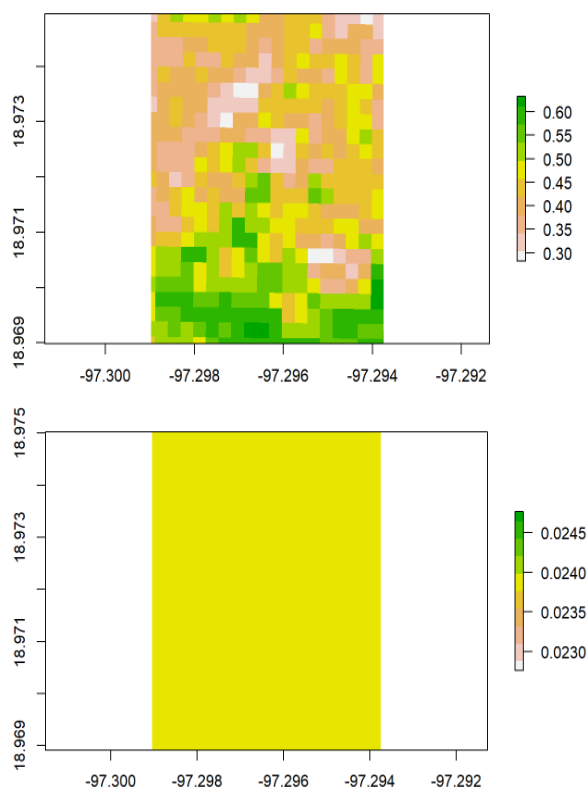


Figura 2. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Puebla 1 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)

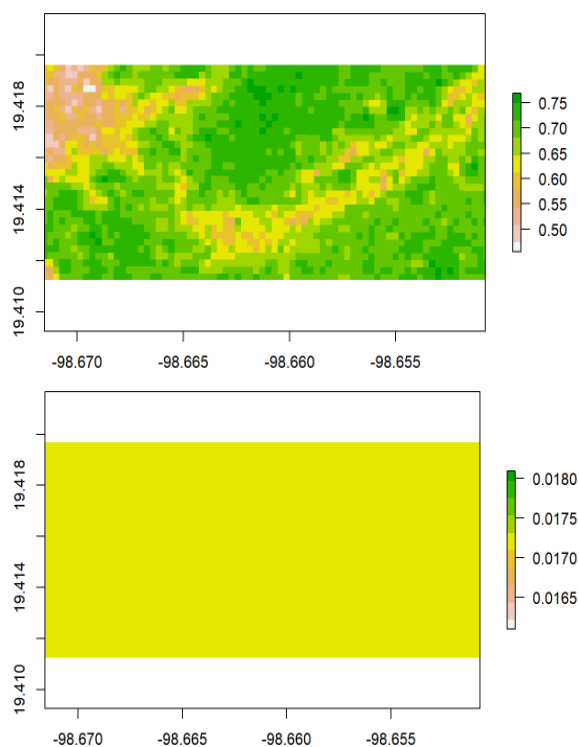


Figura 3. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Mexico 2 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)

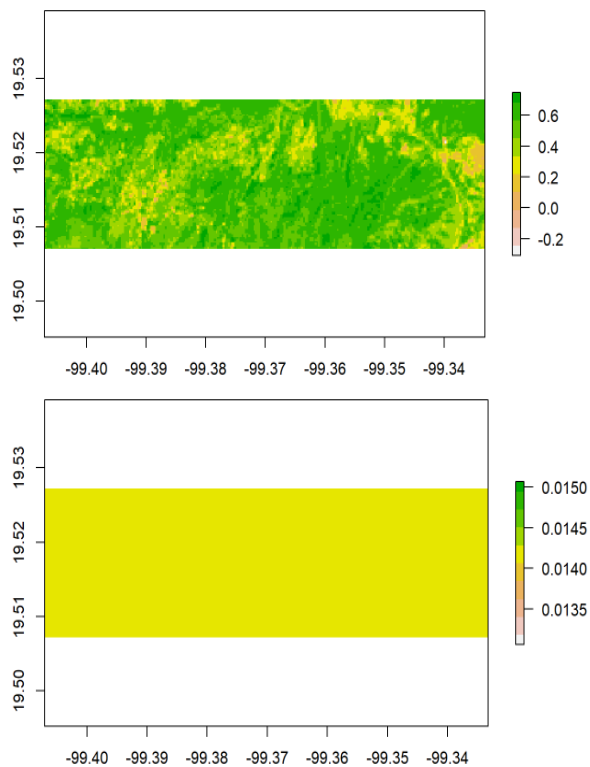
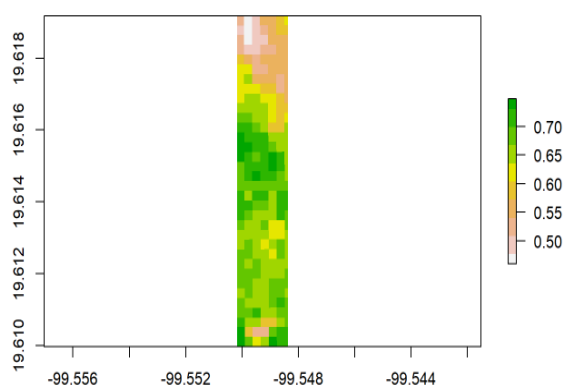


Figura 4. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Mexico 3 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)



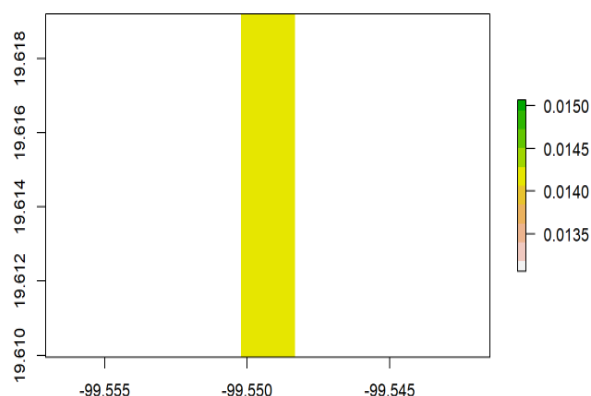


Figura 5. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Mexico 4 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)

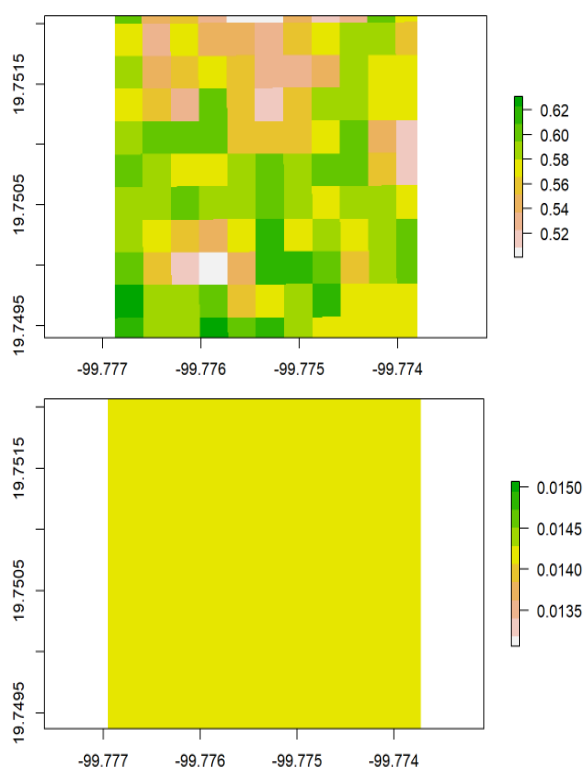
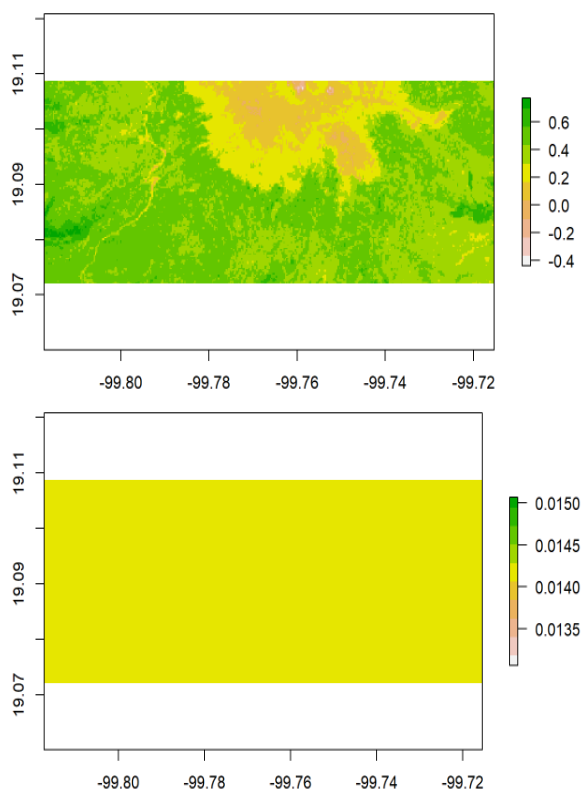


Figura 6. Vegetation index (NDVI) and code for finding groundwater (GRACE) by amorphous polygonal Mexico 6 to *Pinus hartwegii* Lindl. by Google Earth Engine (GEE)



La estimación del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en las áreas de interés irregulares correspondientes a *Pinus hartwegii* Lindl. posibilita evaluar el estado de salud y la densidad vegetal, estableciendo una conexión con el espesor equivalente promedio del agua subterránea mediante información satelital de GRACE, ya que el análisis de los datos de GRACE generó un intervalo de valores de agua subterránea entre -0.78 y 0.57 metros, identificando desde regiones con déficits considerables y posibles zonas de sequía hasta áreas con mayor acumulación hídrica. Los valores de NDVI próximos a 0.8 corresponden a zonas con vegetación densa y en buen estado de salud, como masas forestales; los valores de NDVI cercanos a 0.0 representan zonas con menor cobertura vegetal, como áreas afectadas por actividades antropogénicas; y los valores negativos de NDVI corresponden a superficies desprovistas de vegetación.

Los polígonos irregulares puebla 1 con valores medianos de NDVI 0.4438231 y GRACE 0.02376496, y mexico 6 con valores medianos de NDVI 0.4260129 y GRACE 0.0140668 podrían clasificarse dentro del subgrupo A; mientras que mexico 2, el cual mostró patrones distintivos en la distribución arbórea, con valores medianos de NDVI 0.558 y GRACE 0.014, y mexico 4 con valores medianos de NDVI 0.5786600 y GRACE 0.0140668 podrían clasificarse en el subgrupo B, ya que, según Gallardo, et al. (2023),

esto posiblemente se deba a que las poblaciones ubicadas a 3300 metros de altitud o menos presentaron niveles de estrés más elevados, un proceso de deterioro del bosque manifestado como una reducción en la actividad fotosintética, sequías progresivamente más severas y cálidas relacionadas con el límite xérico que ocasionan debilitamiento fisiológico en los árboles, favoreciendo daños ocasionados por plagas y patógenos, la eventual manifestación de fenómenos de declive forestal y la disminución hasta del 70% del área con aptitud ambiental para *Pinus hartwegii* Lindl., como consecuencia del incremento térmico derivado del cambio climático, representados por valores inferiores de NDVI (error cuadrático medio (error estándar): 0.1536 para Newton y 0.2242 para mediciones dendrométricas excurrentes o trozas).

Los polígonos amorfos de Puebla 4 (con NDVI mediano de 0.6954328 y GRACE de 0.01709776) y México 3 (con NDVI mediano de 0.6591494 y GRACE de 0.0140668) presentan características similares que permiten su agrupación. Según Gallardo, et al. (2023), los índices elevados de NDVI en vegetación sana se vinculan con la actividad fotosintética [100,101], lo cual se explica por la reducida reflectancia en la banda roja causada por la mayor absorción de clorofila y la elevada reflexión infrarroja en el mesófilo esponjoso de las hojas. Estos indicadores permiten proyectar los impactos del cambio climático en la biomasa forestal aérea total (Masěk, et al., 2023), evaluar la vitalidad y las dinámicas de desarrollo vegetal (Xue & Su, 2017), además de señalar zonas con alta concentración arbórea y su patrón de distribución espacial. Tales valores revelan una correlación favorable entre la densidad de cobertura vegetal y las reservas hídricas subterráneas, ya que las zonas con mayor vegetación suelen conservar niveles superiores de agua en el suelo, lo que podría atribuirse a la infiltración favorecida por la cubierta vegetal y la reducción de la evaporación directa. Por último, el polígono amorfo de Puebla 4 muestra una menor concentración arbórea respecto a Puebla 1, lo cual podría obedecer a condiciones ambientales o factores de origen antrópico.

Exste una correlación favorable entre el índice de vegetación y las propiedades subsuperficiales, tales como los recursos hídricos subterráneos y los modelos alométricos. El NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) permite establecer vínculos con el espesor promedio equivalente del agua subterránea mediante la valoración de la condición fitosanitaria y la densidad de la masa forestal de *Pinus hartwegii* Lindl. Esto se debe a que la capacidad anual considerable de infiltración, propiciada por la estructura

edáfica y su cobertura (Zavaleta, Cruz, & Márquez, 2012), junto con la retención hídrica a través del sistema de raíces, resultan esenciales para la alimentación de los acuíferos y la mitigación de la degradación del suelo, particularmente en regiones con patrones pluviométricos variables (Ortega, Mendiezábal, Alba, & Aparicio, 2003). La aplicación de modelos alométricos posibilita evaluaciones ágiles y precisas del estado forestal y evidencia una correlación relevante con su densidad vegetal (Chávez, Campos, & Pérez, 2022). Finalmente, las poligonales amorfas no incluidas en las tablas previas carecen de la solidez estadística necesaria para el cálculo de los modelos propuestos.

La intervención antropogénica en el ciclo del agua ha transformado la sequía hidrológica, dejando de ser estrictamente un fenómeno natural para convertirse en un evento condicionado por factores humanos que alteran la estacionariedad de los procesos hídricos (Li, et al., 2022). Procesos como el crecimiento urbano, la pérdida de cobertura forestal y las alteraciones climáticas, entre otros factores, modifican el ciclo hidrológico natural, afectando tanto la cantidad como la calidad de los recursos hídricos disponibles (Moreno, 2024). Los hallazgos evidencian que las acciones humanas constituyeron el factor preponderante en la reducción considerable del caudal superficial en la cuenca hidrográfica del río Xilin. Asimismo, la actividad antrópica extendió los periodos de sequía, incrementó su severidad y amplificó la variabilidad e impredecibilidad de estos eventos en dicha cuenca (Li, et al., 2022).

Se ha comprobado que la metodología de cuantificación basada en patrones de balance hídrico y eventos de sequía resulta efectiva para medir los impactos de la actividad antrópica sobre la sequía hidrológica. Los resultados de esta investigación ofrecen fundamentos científicos para la administración de recursos hídricos, los sistemas de alerta temprana ante sequías y la planificación en contextos ambientales cambiantes, adaptado de Li, et al. (2022). Los modelos hidrológicos, junto con los índices de vegetación y sequía, se emplean para evaluar los patrones del ciclo hídrico, comprender las repercusiones de las acciones humanas sobre el equilibrio del agua, modelar cómo distintos escenarios de transformación territorial y variaciones climáticas pueden impactar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, así como pronosticar episodios de sequía en diversas circunstancias.

Figura 7. Average monthly water balance, annual monthly evapotranspiration, monthly average improved vegetation indices (EVI) and water stress (MSI) for *Pinus hartwegii* Lindl. for the state of Puebla

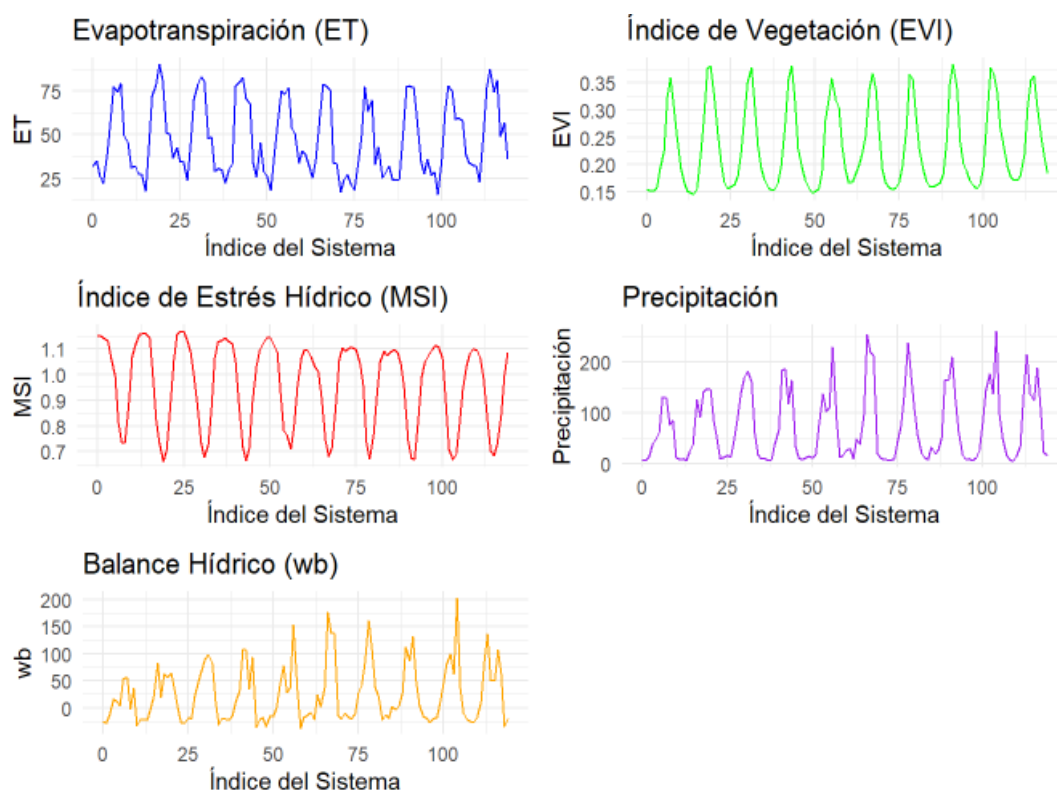


Figura 8. Average monthly water balance, annual monthly evapotranspiration, monthly average improved vegetation indices (EVI) and water stress (MSI) for *Pinus hartwegii* Lindl. for the state of México

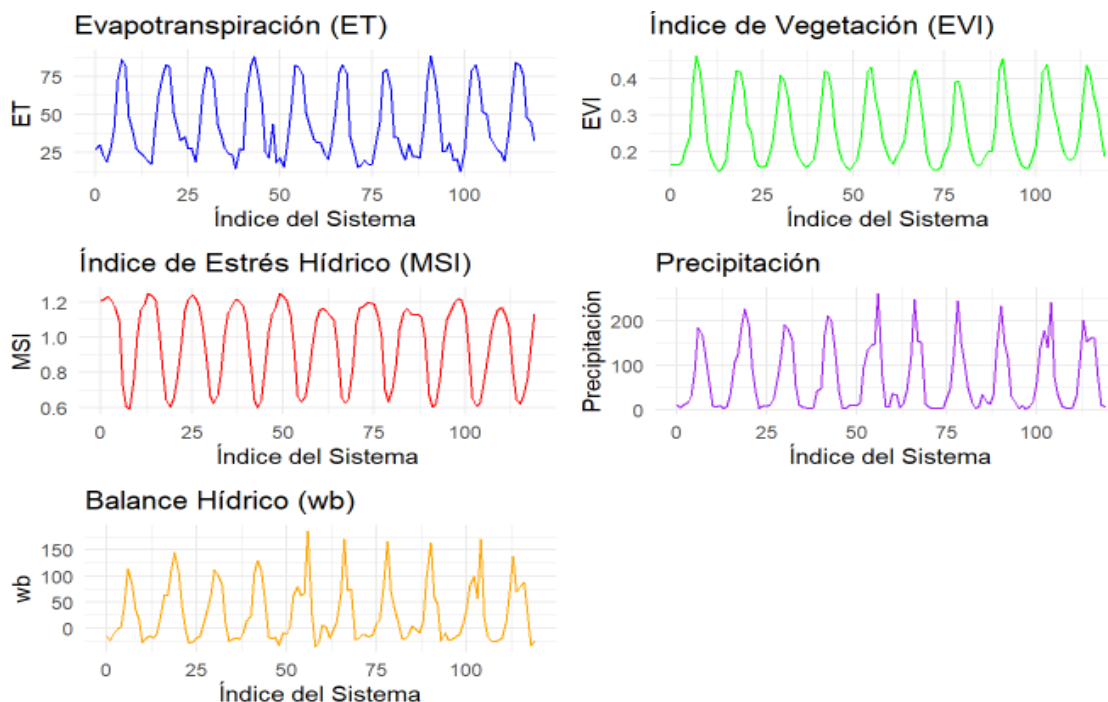


Tabla 2. Simulation of water balance based on precipitation, monthly average improved vegetation indices (EVI) and water stress (MSI) for *Pinus hartwegii* Lindl. by mexican state

State	Date	Statistical results of the water balance simulation						
		Precipitation	Evapotranspiration	Water balance	EVI	MSI	NDVI	Water table oscillation
Puebla	2025-01-01	8.24261	32.92585	-25.07314	0.1785968	1.0810438	0.1652077	-21.19965
	2025-02-01	5.73869	31.70487	-25.86038	0.1719896	1.1000093	0.1563529	-22.12316
	2025-03-01	13.93923	31.21233	-17.68696	0.1708934	1.0945344	0.1561334	-15.57130
	2025-04-01	34.75516	21.26212	14.40896	0.1787775	1.0672268	0.1675159	10.49155
	2025-05-01	137.69754	42.67369	98.42336	0.2170916	0.9855911	0.2202653	79.28563
	2025-06-01	216.04356	61.17882	147.86598	0.3022164	0.8171936	0.3698222	122.77631
state of México	2025-01-01	5.375047	30.15850	-22.15811	0.1935951	1.102638	0.1755744	-18.67012
	2025-02-01	3.416557	26.09864	-21.91196	0.1780094	1.157922	0.1537318	-19.23310
	2025-03-01	6.351458	24.26435	-18.37574	0.1778489	1.167884	0.1522830	-16.47728

State	Date	Statistical results of the water balance simulation						
		Precipitation	Evapotranspiration	Water balance	EVI	MSI	NDVI	Water table oscillation
	2025-04-01	32.389984	17.68780	15.21681	0.193424	1.131668	0.1709195	11.01314
	2025-05-01	113.152031	32.92150	79.13254	0.2407827	1.061197	0.2268974	63.81133
	2025-06-01	199.670807	55.20061	140.50430	0.3567792	0.792900	0.4499675	118.75625

Las simulaciones de datos para los estados de Puebla y México durante 2025 revelan los siguientes valores: precipitación mensual promedio de 74.45 mm y 72.94 mm respectivamente, evapotranspiración media de 43.65 mm y 40.51 mm, balance hídrico medio de 30.72 mm y 32.67 mm. Se observa que el incremento en la actividad antrópica se asocia con disminuciones en el balance hídrico. La recarga promedio actual registra valores de -2.52 mm y -2.34 mm, evidenciando una correlación inversa entre la densidad de cobertura vegetal y la recarga acuífera, lo que subraya las consecuencias de la intervención humana. En el primer escenario (reducción del 20% en actividad humana), la recarga promedio alcanza -2.02 mm y -1.88 mm, mostrando una recuperación frente a la situación actual con menor impacto adverso. En el segundo escenario (incremento del 20% en actividad humana), la recarga promedio desciende a -3.03 mm y -2.81 mm, representando una mayor disminución de la recarga y evidenciando el efecto perjudicial del aumento de actividades antrópicas. Por último, con valores p de 0.983 en ambos casos, las variaciones entre los escenarios carecen de significancia estadística.

Figure 9. Simulation of water balance based on precipitation, monthly average improved vegetation indices (EVI) and water stress (MSI) for *Pinus hartwegii* Lindl. state of Puebla

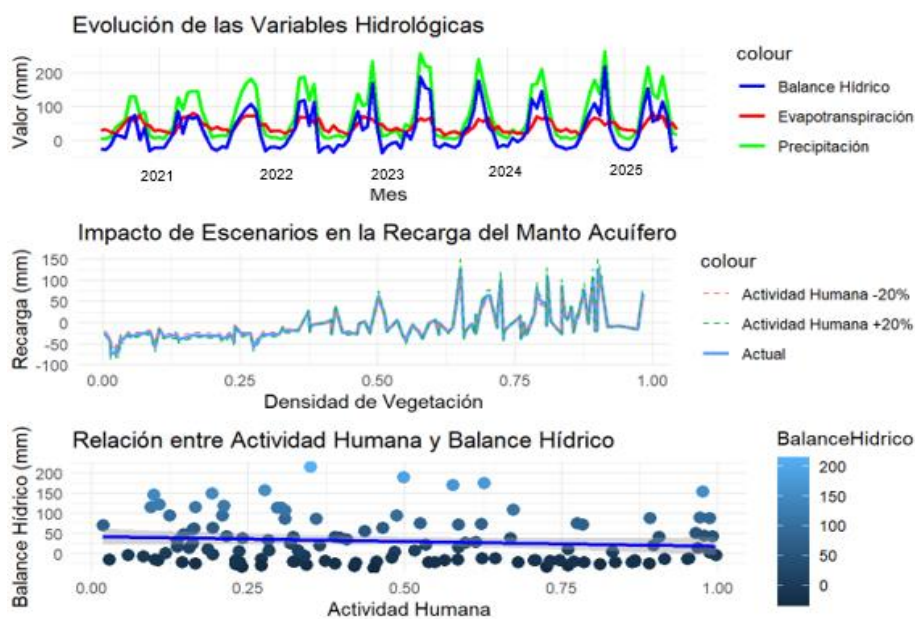


Figure 10. Impact of human influence on groundwater oscillation, relationship between NDVI with water table oscillation, water balance comparison (2025-2026) and water table oscillation (2025-2026) for *Pinus hartwegii* Lindl. state of Puebla

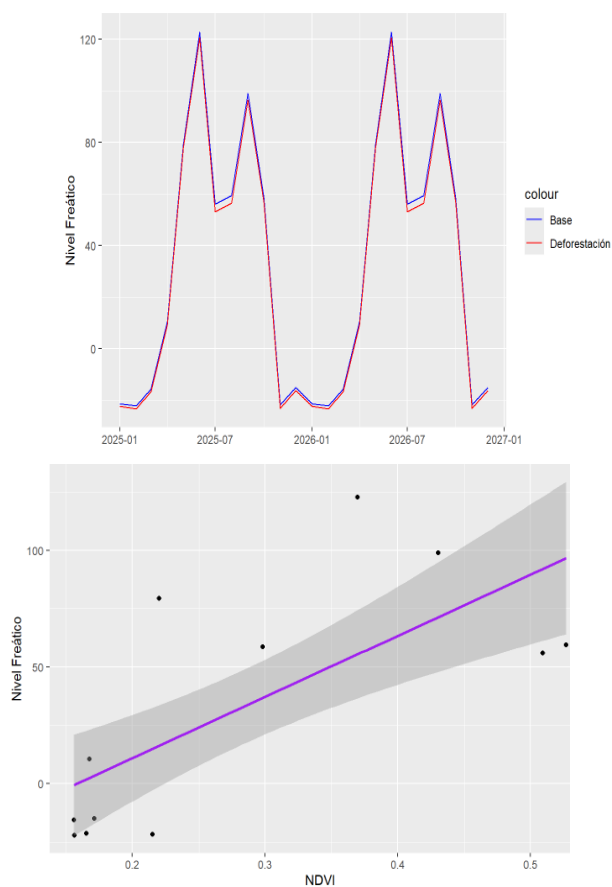


Figure 11. Simulation of water balance based on precipitation, monthly average improved vegetation indices (EVI) and water stress (MSI) for *Pinus hartwegii* Lindl. for the state of México

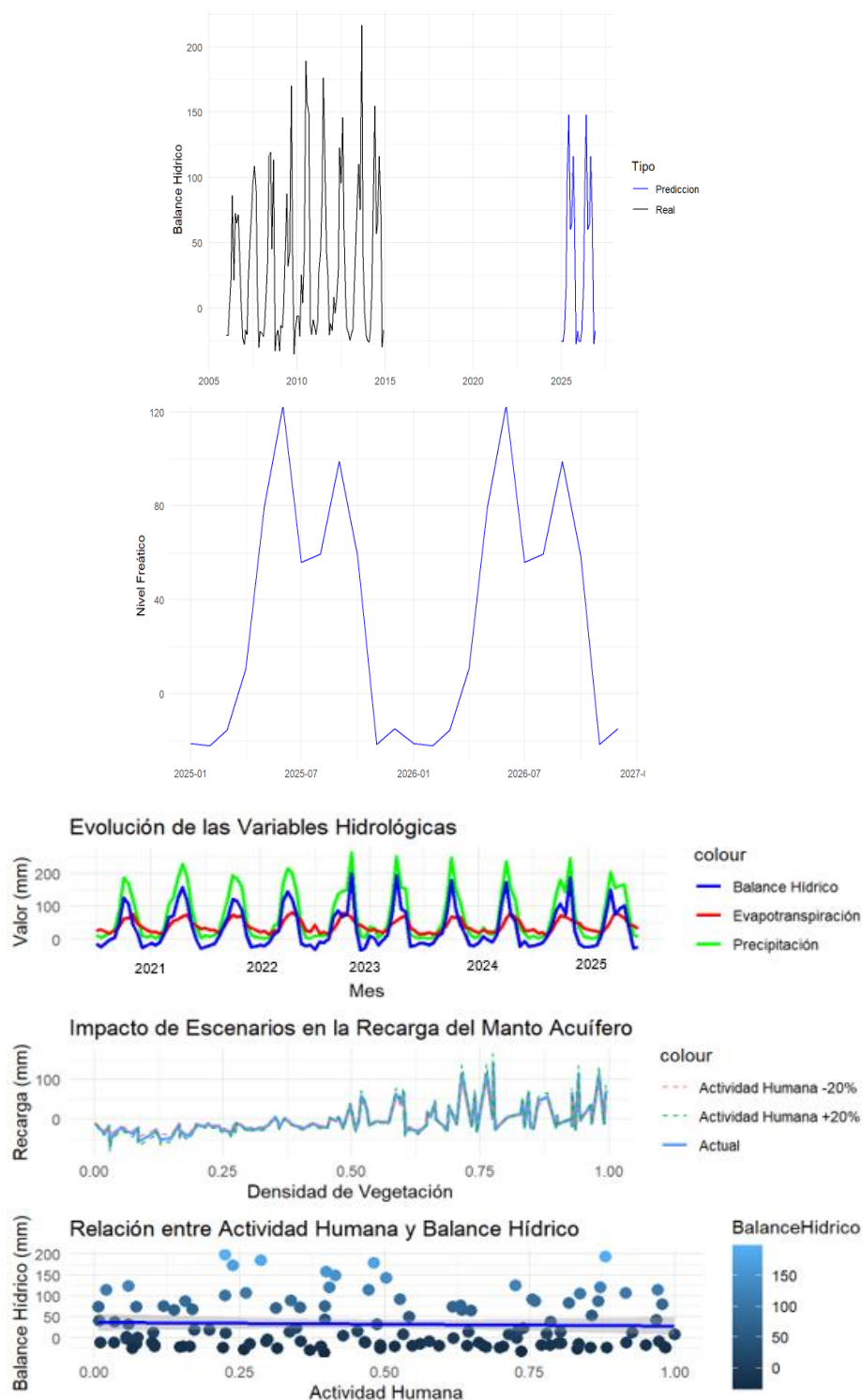
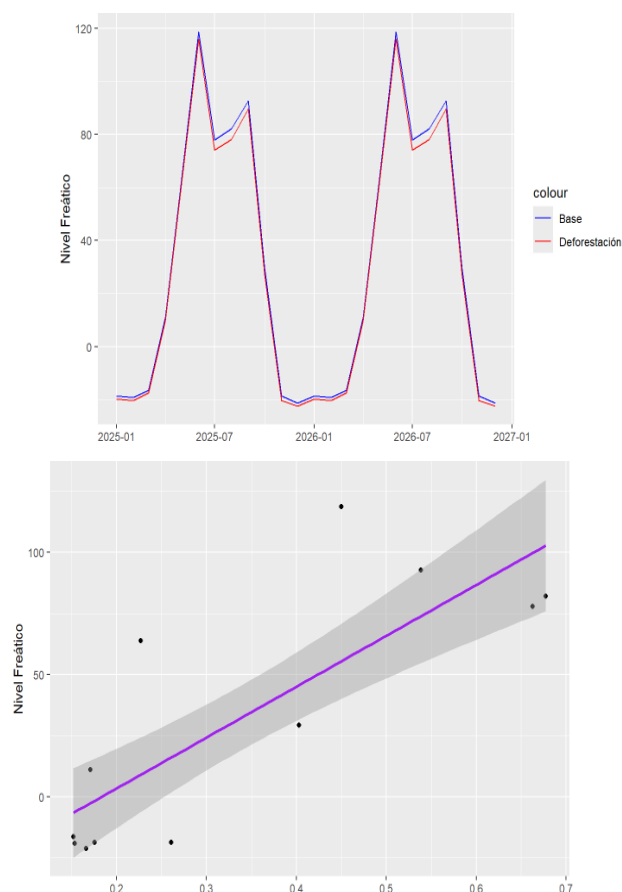
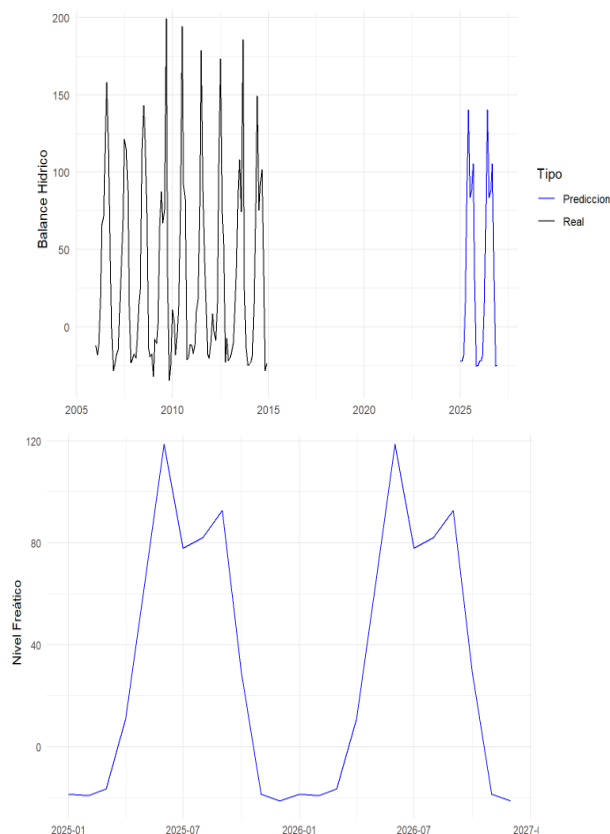


Figure 12. Impact of human influence on groundwater oscillation, relationship between NDVI with water table oscillation, water balance comparison (2025-2026) and water table oscillation (2025-2026) for *Pinus hartwegii* Lindl. state of México





El gráfico sobre la evolución de las variables hidrológicas sugiere la existencia de comportamientos estacionales, donde los máximos de precipitación podrían estar asociados con incrementos en el balance hídrico. El gráfico referente al impacto de diversos escenarios sobre la recarga acuífera muestra que esta mejora cuando existe mayor densidad de cobertura vegetal, mientras que experimenta una reducción considerable ante el aumento de actividades antrópicas. Los gráficos que analizan la relación entre la actividad humana y el balance hídrico para Puebla (coeficiente de correlación: -0.12, valor p: 0.1906, superior a 0.05) y Estado de México (coeficiente de correlación: -0.0439, valor p: 0.6339, superior a 0.05), revelan una tendencia levemente negativa en la relación entre ambas variables, aunque sin alcanzar significancia estadística.

DISCUSION

A diferencia de los trabajos de Li et al. (2022) y Lilla y Ferreira da Silva (2014), esta investigación se fundamentó en polígonos amorfos que contienen conjuntos de individuos georreferenciados procedentes de las bases de datos numéricas del Inventario Forestal INFyS (2009-2013) y SiBiFor (2013-2015) para *Pinus hartwegii* Lindl. en Puebla

y Estado de México. Estos datos no provienen de estudios excesivamente localizados o de sitios sobreestudiados, y proporcionan información fundamental sobre las variables climáticas de mayor relevancia (Pérez et al., 2021). Conforme a Richey et al. (2015), los hallazgos reflejan la dinámica del uso de recursos hídricos subterráneos al incorporar tanto impactos antrópicos como naturales en el almacenamiento acuífero. Los polígonos amorfos de Puebla 1 (NDVI 0.4438231, GRACE 0.02376496) y México 6 (NDVI 0.4260129, GRACE 0.0140668), clasificados en el subgrupo A, junto con México 2 (NDVI 0.558, GRACE 0.014) y México 4 (NDVI 0.5786600, GRACE 0.0140668), clasificados en el subgrupo B, sugieren, según Gallardo et al. (2023), sequías progresivamente más severas y cálidas vinculadas al límite xérico, que provocan la aparición eventual de fenómenos de deterioro forestal.

Los polígonos amorfos de Puebla 4 (NDVI 0.6954328, GRACE 0.01709776) y México 3 (NDVI 0.6591494, GRACE 0.0140668), agrupados en el subgrupo C, indican, según Gallardo et al. (2023), vegetación vigorosa y, conforme a Xue y Su (2017), zonas con elevada densidad arbórea que mantienen mayores niveles de agua subterránea debido a, según Flores et al. (2018), la alteración de la trayectoria de las precipitaciones y la redistribución hidráulica (HR) (Lubczynski, 2016). A pesar de presentar un coeficiente de correlación de -0.12, valor p de 0.1906 y cantidad insuficiente de datos con la robustez requerida, los resultados de la simulación mediante regresión lineal con el modelo XGBoost evidencian una tendencia donde la actividad humana impacta negativamente el balance hídrico. Esto se debe a que, según Rzedowski (2005), resulta altamente destructiva con efectos directos como desmontes, tala excesiva (Villanueva et al., 2015) y deforestación (Pérez et al., 2021), así como efectos indirectos en la modificación de regímenes hídricos y climáticos, que transforman la sequía hidrológica en un fenómeno que, según Li et al. (2022), ya no constituye estrictamente un desastre natural, influyendo en la estacionariedad del proceso hidrológico con extensión de la duración, intensificación e incertidumbre de las sequías.

Los propósitos de estimar ecuaciones alométricas por polígono amorfo para *Pinus hartwegii* Lindl. en Puebla y Estado de México fueron establecer una comparación referencial respecto a las estimadas por Arreguín et al. (2024) en estas entidades e identificar las variables climáticas significativas (TS, T2M, CLOUD_AMT, TOA_SW_DWN, ALLSKY_SFC_PAR_TOT, CLRSKY_SFC_PAR_TOT, PS, QV2M,

RH2M, GWETROOT, PRECOTCORR) y, mediante $\Pr(>|t|)$, los coeficientes paramétricos significativos por métodos volumétricos de Newton (ndvi_Pixel 0.0148 *, grace_Pixel 0.1162), Theoretical (wood logs) (ndvi_Pixel 0.000653 ***, grace_Pixel 0.125049) y Federal entity (ndvi_Pixel 0.00332 **, grace_Pixel 0.01658 *) que intervienen en su estimación volumétrica. Según Junju et al. (2023), investigaciones similares contribuirán a la planificación y gestión de recursos hídricos, formulación de estrategias y medidas de mitigación, evaluación de la salud forestal (Crespo et al., 2024), y adaptación de poblaciones y territorios (Jinfeng et al., 2024).

CONCLUSIONES

- Los polígonos amorfos de Puebla 1 (NDVI 0.4438231, GRACE 0.02376496) y México 6 (NDVI 0.4260129, GRACE 0.0140668), clasificados en el subgrupo A, junto con México 2 (NDVI 0.558, GRACE 0.014) y México 4 (NDVI 0.5786600, GRACE 0.0140668), clasificados en el subgrupo B, señalan la probabilidad de sequías progresivamente más severas y con temperaturas elevadas relacionadas con el límite xérico, lo que propicia la aparición eventual de procesos de deterioro forestal.
- Los polígonos amorfos de Puebla 4 (NDVI 0.6954328, GRACE 0.01709776) y México 3 (NDVI 0.6591494, GRACE 0.0140668), clasificados en el subgrupo C, reflejan vegetación vigorosa y zonas con elevada concentración arbórea, las cuales suelen conservar mayores cantidades de agua subterránea gracias a la alteración en la trayectoria del agua de lluvia y la infiltración propiciada por la cobertura vegetal.
- Con un coeficiente de correlación de -0.12, valor p de 0.1906 y datos insuficientes con la robustez requerida, los hallazgos de la simulación mediante regresión lineal con modelo XGBoost evidencian una tendencia donde la actividad antrópica impacta desfavorablemente el balance hídrico a través de efectos tanto directos como indirectos.
- De acuerdo con la estimación de los métodos volumétricos Newton, teórico (trozas) y entidad federativa para *Pinus hartwegii* Lindl, las variables climáticas relevantes que inciden en su estimación comercial son TS, T2M, CLOUD_AMT,

TOA_SW_DWN, ALLSKY_SFC_PAR_TOT, CLRSKY_SFC_PAR_TOT, PS, QV2M, RH2M, GWETROOT y PRECOTOTCORR.

- Conforme al criterio estadístico $Pr(>|t|)$, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el código para exploración de aguas subterráneas (GRACE), los coeficientes paramétricos relevantes que inciden en la estimación volumétrica comercial según cada método son: Newton con $ndvi_Pixel$ 0.0148 * y $grace_Pixel$ 0.1162, Theoretical (wood logs) con $ndvi_Pixel$ 0.000653 *** y $grace_Pixel$ 0.125049, Federal entity con $ndvi_Pixel$ 0.00332 ** y $grace_Pixel$ 0.01658 *.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arreguín, S. M., Paucar Camacho, J. A., Salazar, C. E., Vallejo, I. M., Guallpa, C. M., & Leyva, O. Á. (2024). Quantifying the impact of climate change on *Pinus hartwegii* Lindl. forests: A novel approach using AI-powered allometric models. *Journal of Ecohumanism*. Volume 3. No. 8. ISSN: 2752-6798 (Print) | ISSN 2752-6801 (Online). DOI: <https://doi.org/10.62754/joe.v3i8.5292>, 6936-6952 pp.
- Cardille, J. A., Crowley, M. A., Saah, D., & Clinton, N. E. (2024). *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine. Fundamentals and Applications*. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.
- Chávez, A. G., Campos, Á. G., & Pérez, S. M. (2022). Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 13 (74)*. Noviembre - Diciembre (2022). DOI: [10.29298/rmcf.v13i74.1257](https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1257), 1-23 pp.
- Crespo, A. J., Gazol, A., Pizarro, M., González, d. A., Valeriano, C., Rubio, C. Á., . . . Camarero, J. J. (2024). Matching Vegetation Indices and Tree Vigor in Pyrenean Silver Fir Stands. *Remote Sens.* 2024, 16, 4564. <https://doi.org/10.3390/rs16234564>, 1-25 pp.
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre, 77-93.
- Flores, A. E., Carrillo, A. F., Becerra, L. F., Islas, G. F., Buendía, R. E., Acosta, M. M., & Pineda, O. T. (2018). Estudios de interceptación de lluvia en bosques de importancia hidrológico-forestal. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente Año 2018 Vol.18 Núm 35*, 45-63 pp.
- Gallardo, S. J., Lindig, C. R., López, T. L., Endara, A. Á., Blanco, G. A., & Sáenz, R. C. (2023). Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. *Forests* 2023, 14, 1176., 1-22.

- GitHub. (25 de Noviembre de 2024). *XGBoost R Tutorial*. Obtenido de XGBoost R Tutorial: <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/R-package/xgboostPresentation.html>
- Jinfeng, P., Shihao, C., Baohui, M., & Hongrui, W. (2024). Causal networks and spatiotemporal patterns of different droughts from the perspective of hydrological cycle - a case study of the Nenjiang River Basin, China. *Ecological Indicators*, 1-11.
- Junju, Z., Qiaoqiao, L., Aizhong, Y., Shizhen, X., Yunhan, Y., Shiqin, X., . . . Xuemei, Y. (2023). An improved methodology for quantifying the impact of human activities on hydrological drought change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 1-13.
- Li, B., Li, B., Rodell, M., Kumar, S. V., Beaudoin, H. K., Getirana, A., . . . Bettadpur, S. (2019). Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges. *Water Resources Research (American Geophysical Union)*, 55, 7564-7586. <https://doi.org/10.1029/2018WR024618>, 7564-7586 pp.
- Lilla, M. R., & Ferreira da Silva, R. d. (2014). *Monitoramento de níveis freáticos e interações com clima e vegetação em área cultivada com pinus na estação ecológica de água de Santa Bárbara/Sp*. Brasília, Brazil: XVIII Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas.
- Lubczynski, M. W. (2016). The hydrogeological role of trees in water-limited environments. *Hydrogeology Journal (2009) 17*: 247–259. *ResearchGate*. DOI: [10.1007/s10040-008-0357-3](https://doi.org/10.1007/s10040-008-0357-3), 247–259 pp.
- Masěk, J., Tumajer, J., Lange, J., Kaczka, R., Fisër, P., & Treml, V. (2023). Variability in Tree-ring Width and NDVI Responses to Climate at a Landscape Level. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00822-8>, 1-14.
- Moreno, D. A. (2024). *Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático*. Obtenido de Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático: <https://www.atmosfera.unam.mx/eventos/aprendiendo-como-los-humanos-modifican-el-ciclo-hidrologico/>
- ONU. (2024). *Noticias ONU. Mirada global historias humanas*. Obtenido de América Latina sufre fenómenos extremos a causa de El Niño y el cambio climático: <https://news.un.org/es/story/2024/05/1529606>
- ONU-HABITAT. (2024). *Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres*. Obtenido de Sequías, tormentas e inundaciones: el agua y el cambio climático dominan la lista de desastres: <https://onu-habitat.org/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>
- Ortega, M. A., Mendiezábal, H. L., Alba, L. J., & Aparicio, R. A. (2003). Germinación y crecimiento inicial de *Pinus hartwegii* Lindl. de siete poblaciones del estado de México. *Foresta Veracruzana 5(2)*:29-34. 2003. ISSN: 1405-7247, 29-34 pp.
- Pérez, S. M., Ramírez, A. J., Vargas, H. J., & Alfaro, R. F. (2021). A review of the knowledge of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the

- need for improved future projections. *Trees* 36(26). Springer. DOI:10.1007/s00468-021-02221-9, 1-13 pp.
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., REager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., . . . Rodel, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resour. Res.*, 51, 5217–5238, doi:10.1002/2015WR017349, 5217–5238 pp.
- Rzedowski, J. (2005). *Vegetación de México*. México: Editorial Limusa, S. A. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Valles, L. J. (2018). *Impactos del Cambio Climático en la Hidrología y en los Recursos Hídricos*. San Salvador, El Salvador: Dirección Observatorio Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Congreso de Ingeniería y Arquitectura.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Vázquez, S. L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., . . . Ruíz, C. J. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM SSN 0188-4611, núm. 86, 2015. dx.doi.org/10.14350/rig.42003*, 5-14 pp.
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Hindawi. Journal of Sensors Volume 2017, Article ID 1353691*, 17 pages.
- Zavaleta, H. E., Cruz, J. H., & Márquez, R. J. (2012). Potencial de infiltración de agua de lluvia a partir de la retención de una plantación forestal. *Foresta Veracruzana* 14(1):23-28. 2012. ISSN: 1405-7247, 23-28 pp.