



DOI: 10.29298/rmcf.v15i86.1496

Artículo de investigación

## ***Kawí Tamiruyé: Una parcela permanente de investigación forestal en la Sierra Tarahumara***

### ***Kawí Tamiruyé: A permanent research forest plot in the Sierra Tarahumara***

Marín Pompa-García<sup>1</sup>, Sergio Romero-Rocha<sup>1</sup>, José Alexis Martínez-Rivas<sup>1</sup>

Eduardo Daniel Vivar-Vivar<sup>1</sup>, Felipa de Jesús Rodríguez-Flores<sup>2\*</sup>, José

Israel Yerena-Yamalle<sup>3</sup>

Reception date/Fecha de recepción: 27 de junio de 2024.

Acceptance date/Fecha de aceptación: 14 de agosto de 2024.

<sup>1</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Laboratorio de Dendroecología. México.

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Durango, Ingeniería en Tecnología Ambiental. México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

\*Corresponding author; e-mail: felipa.rodriguez@unipolidgo.edu.mx

\*Autor para correspondencia; correo-e: felipa.rodriguez@unipolidgo.edu.mx

#### **Abstract**

Periodic and continuous monitoring is an appropriate strategy to identify information needs for the planning and management of forest resources. The aim of this work was to characterize the dasometric and structural parameters of a permanent research plot in Northern Mexico. From a census-based methodology, 2 165 trees ( $n$ ) were recorded in an area of  $1.4 \text{ ha}^{-1}$  and, through the application of various sampling schemes, dasometric variables, and diversity indices were estimated for comparison with the census of a reference plot. As result, we estimated the following dasometric measurements: Quadratic Mean Diameter ( $QMD$ )= $12.16 \text{ cm}$ , Crown Area ( $CA$ )= $61.6 \%$ , Reineke's Stand Density Index ( $SDI$ )= $668$  individuals, Basimetric Area ( $BA$ )= $25.16 \text{ m}^2$ , Total Volume ( $Vol$ )= $158.83 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , aboveground biomass ( $AGB$ )= $142.78 \text{ Mg ha}^{-1}$ , and Carbon ( $C$ )= $71.39 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Ecologically, the species with the highest Importance Value Index ( $IVI$ ) were *P. engelmannii* and *J. deppeana* ( $50.8$  and  $35 \%$ , respectively). The Simpson's dominance index ( $\delta$ )= $0.39$  and diversity ( $\lambda$ )= $0.61$  were low, as was the Shannon-Wiener index of diversity ( $H'$ )= $1.3$ , which is in agreement with the Margalef index ( $DMG$ )= $1.04$ . The value of Pielou's evenness ( $J'$ )= $0.53$  confirmed low abundance. Equidistant systematic sampling at  $40 \text{ m}$  was closer to the reference census, presenting lower values in the mean and variance estimators compared to the other sampling methods. This plot represents an important source of information for develop adaptative strategies in management portfolios to improve decision-making, in the face of forest stand dynamics. Although further studies on site size, inclusion of additive indices, and operational costs are required.

**Key words:** Diversity indices, ecosystem structure, forest monitoring, permanent plots, sampling strategies, UAV monitoring.

## Resumen

El monitoreo periódico y continuo es una estrategia apropiada para identificar información necesaria para la planeación y manejo de los recursos forestales. El objetivo de este trabajo fue caracterizar los parámetros dasométricos y estructurales de una parcela permanente de investigación en el norte de México. A partir de un censo total, se registraron 2 165 árboles ( $n$ ) en una superficie de  $1.4 \text{ ha}^{-1}$ , y mediante la aplicación de diversos esquemas de muestreo se estimaron variables dasométricas e índices de diversidad para su comparación con el censo de una parcela de referencia. Se estimaron las siguientes variables dasométricas: Diámetro Medio Cuadrático ( $DMC$ ) =  $12.16 \text{ cm}$ , Área de Copa ( $AC$ ) =  $61.6 \%$ , Índice de Densidad de Rodal de Reineke ( $IDRR$ ) = 668 individuos, Área Basal ( $AB$ ) =  $25.16 \text{ m}^2$ , Volumen Total ( $Vol$ ) =  $158.83 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , Biomasa Aérea ( $BA$ ) =  $142.78 \text{ Mg ha}^{-1}$  y Carbono ( $C$ ) =  $71.39 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Las especies con mayor Índice de Valor de Importancia ( $IVI$ ) fueron *Pinus engelmannii* y *Juniperus deppeana* (50.8 y 35 %, respectivamente). El Índice de Dominancia de Simpson ( $\delta$ ) = 0.39 y la diversidad ( $\lambda$ ) = 0.61 fueron bajos; al igual que el Índice de Diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ) = 1.3, que concuerda con el Índice de Margalef ( $DMG$ ) = 1.04. El valor de la Uniformidad de Pielou ( $J'$ ) = 0.53 confirmó la escasa abundancia. El muestreo sistemático equidistante a 40 m se aproximó más al censo de referencia, con valores inferiores en los estimadores de la media y la varianza, en comparación con los otros métodos de muestreo. Esta parcela representa una importante fuente de información para desarrollar estrategias adaptativas de manejo para mejorar la toma de decisiones, ante la dinámica del rodal. No obstante, se requieren estudios adicionales sobre el tamaño del sitio, la inclusión de índices aditivos y de los costos operativos.

**Palabras clave:** Índices de diversidad, estructura del ecosistema, monitoreo forestal, parcelas permanentes, estrategias de muestreo, monitoreo con UAV.

## Introducción

El monitoreo periódico y continuo es una estrategia adecuada para determinar las necesidades de información para la planificación y gestión de los recursos forestales; esto propicia el inicio de nuevos paradigmas que conducen a la toma de decisiones en materia de biodiversidad e implica métricas de múltiples recursos que amplifican su expansión hacia variables extendidas, no solo en el ámbito de la producción maderera (Kakkar *et al.*, 2021).

En la actualidad, el monitoreo forestal en parcelas permanentes ha ganado terreno a los procedimientos usuales (Laine *et al.*, 2013), en cuanto al uso de métricas no tradicionales que tratan de adherirse a los compromisos internacionales. Además, el inventario pretende ser multipropósito, aunque el debate sobre el papel del monitoreo ecológico asociado a la gestión forestal sigue abierto (Magagnotti *et al.*,

2023). Esta vinculación es estratégica para ampliar las variables relacionadas con la producción maderera mediante la evaluación de la composición, estructura y función del ecosistema; lo que permite comprender mejor el papel que tienen los componentes de la biodiversidad en el desempeño de múltiples funciones del ecosistema forestal.

Dado que las poblaciones arbóreas en los bosques de la Sierra Tarahumara de México presentan una amplia variedad en su composición de especies, requerimientos del sitio, las edades y tasas de crecimiento (Graciano-Ávila *et al.*, 2020), estos bosques son estratégicos para establecer protocolos de monitoreo. Así, el gestor forestal debe buscar la selección adecuada de técnicas de inventario, en términos de alternativas económicamente viables y estadísticamente fiables. Bajo estas premisas, los bosques de la Sierra Tarahumara son estratégicos para establecer protocolos de monitoreo, dada su complejidad florística y la provisión de una extensa gama de bienes y servicios ambientales.

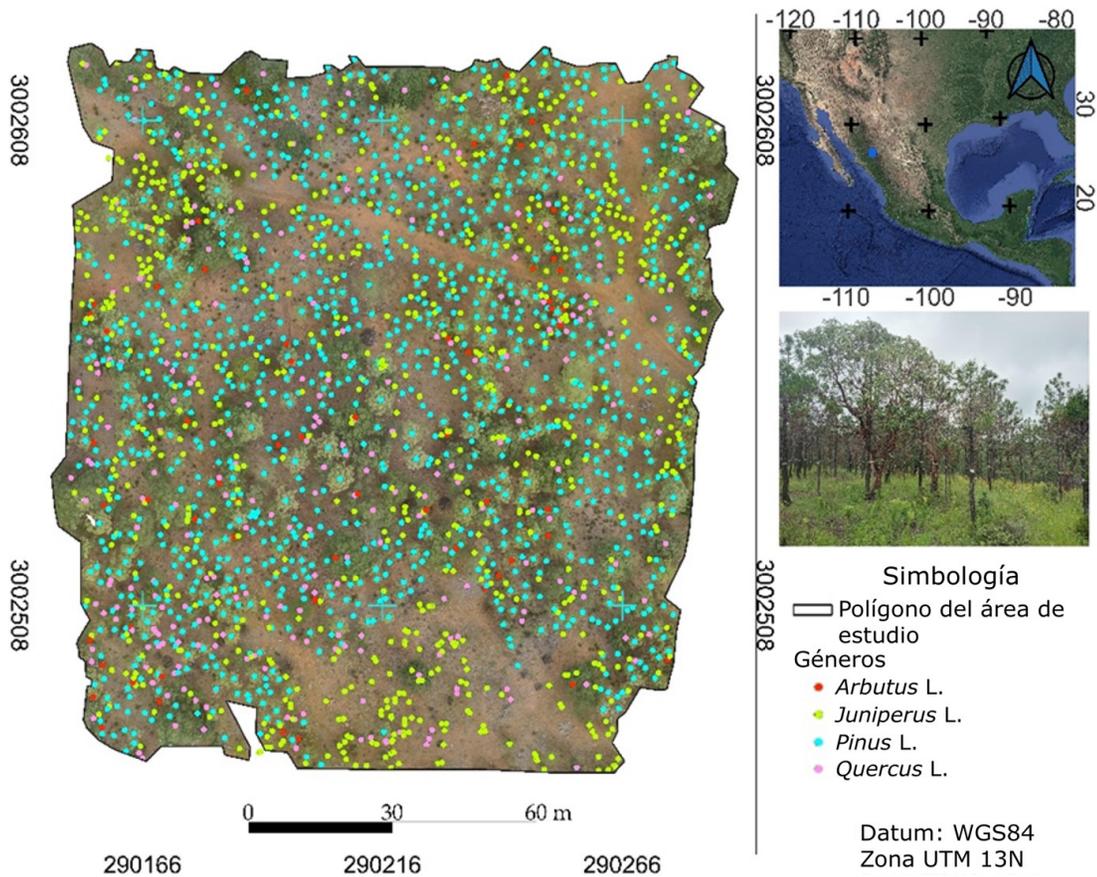
A partir de que las parcelas forestales ecológicas permanentes representan una estrategia adaptativa para generar conocimiento, este trabajo proporciona estimaciones dasométricas e índices estructurales para mejorar la relevancia de las métricas forestales con el fin de ampliar el alcance del monitoreo forestal. Por ejemplo, las estimaciones precisas de la composición, diversidad de especies y dinámica de crecimiento de los rodales son herramientas cruciales para modificar el monitoreo tradicional (Linder, 2000). Por lo tanto, la combinación de inventarios forestales e índices estructurales puede ser una valiosa contribución al seguimiento de los bosques.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue caracterizar los parámetros dasométricos y estructurales de una parcela permanente de investigación en el norte de México; para generar métricas que contribuyan a una mejor comprensión de los indicadores estructurales, de composición y diversidad forestal de la parcela estudiada. Las preguntas específicas de investigación fueron: ¿Cuáles son los

indicadores de la estructura y diversidad de la parcela estudiada?; ¿Existen diferencias al utilizar distintos esquemas de muestreo? Como hipótesis se plantea que esta estrategia de monitoreo mejora el conocimiento de los componentes del ecosistema, lo que promovería mejores políticas de gestión de acuerdo con los requisitos de los protocolos de manejo más recientes.

## **Materiales y Métodos**

El área de estudio, conocida como *Kawí Tamiruyé* (que significa: Bosque, enséñame de ti en lengua indígena *Rarámuri*), corresponde a una parcela de investigación continua y permanente ubicada en la Sierra Tarahumara al sureste del estado de Chihuahua, México (Figura 1). En enero de 2022 se realizó un censo total de la parcela experimental permanente.



**Figura 1.** La zona de estudio *Kawí Tamiruyé*, en la Sierra Madre Occidental de México.

Todos los árboles incluidos en el censo se etiquetaron, identificaron las especies y se determinó el diámetro a la altura del pecho (*DAP*, cm) y el diámetro basal (*DBA*, cm) con una cinta diamétrica (Cinta Métrica de Tela *Forestry Suppliers*<sup>®</sup> modelo 283D/5D de 160 cm); la altura comercial (*ACom*, m) y la altura total (*AT*, m) se midieron directamente, trepando a los árboles, con un medidor de longitud (*Truper*<sup>®</sup> modelo TFC-30ME). Para comparar las distintas estrategias de muestreo con respecto al censo realizado en la zona, se consideraron tres tipos de muestreo: (1) muestreo aleatorio simple (diez sitios), (2) muestreo aleatorio estratificado (tres estratos según la densidad de árboles: tres y cuatro sitios), y (3) muestreo sistemático con tres distancias (30 m: 14 sitios circulares, 40 m: nueve sitios y 50

m:cuatro sitios). En el mes de agosto (verano)se realizó un vuelo en la zona de estudio, para digitalizar la superficie de la copa ( $m^2$ ), individualmente y en porcentaje.

Se establecieron sitios circulares de 1 000  $m^2$  (17.84 m de diámetro), a partir de los cuales se obtuvo la información dasométrica de todos los individuos presentes en el sitio: área basal (*AB*), volumen total (*Vol*) (Graciano-Ávila *et al.*, 2019; Rascón-Solano *et al.*, 2022), biomasa aérea (*BSA*) (Návar, 2009), contenido de Carbono (*C*) (García *et al.*, 2021), densidad de sitio (*DMC* e *IDR*) (Tamarit-Urias *et al.*, 2020) e índices de biodiversidad (Índice de Dominancia y Diversidad de *Simpson* [ $\delta$  y  $\lambda$ ], Índice de Diversidad de *Shannon-Wiener* [ $H'$ ], Índice de Densidad de *Margalef* [*DMG*] e Índice de Equidad de *Pielou* [ $J'$ ]) (Thukral, 2017).

## Resultados

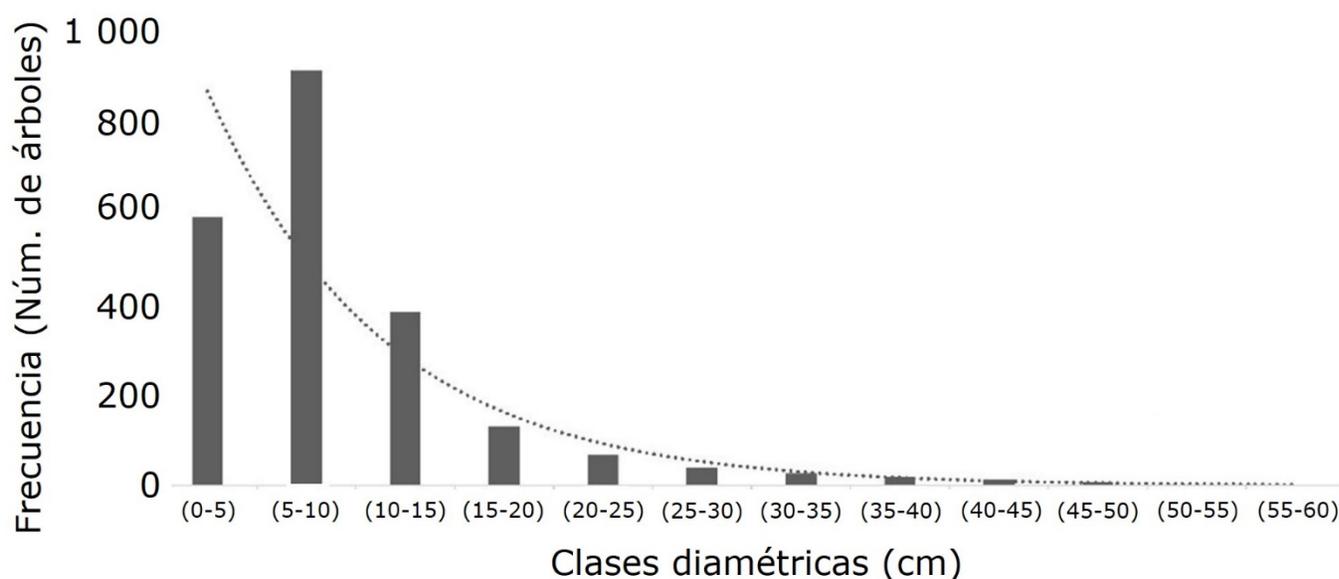
En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas descriptivas de los árboles presentes en *Kawí Tamiruyé*. Los géneros con mayor número de individuos fueron *Pinus*, *Juniperus*, *Quercus* y *Arbutus* (1 105, 758, 243 y 59 individuos, respectivamente). Los mayores promedios de *DAP* y *AT* se registraron en el género *Quercus* (28.5 cm y 7.2 m, respectivamente) (Cuadro 1). El valor más alto para *AT* correspondió a *Pinus* (21.4 m); mientras que para el *DAP* (62.3 cm) y área de copa (123.4  $m^2$ ) se registraron en *Quercus* (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Estadística descriptiva de las variables dasométricas por género arbóreo muestreado en Kawí tamiruyé, Chihuahua, México.

<b>Género</b>	<b>Var</b>	<b>n</b>	<b>Mín</b>	<b>Máx</b>	<b>Prom</b>	<b>c1</b>	<b>c3</b>	<b>DE</b>	<b>EE</b>
<i>Pinus</i> L.	<i>DB</i>	1 105	3.0	66.4	14.8	10.1	17.4	7.5	0.2
	<i>DAP</i>		0.0	56.4	11.1	7.1	13.2	6.5	0.2
	<i>ACom</i>		0.0	12.6	3.1	2.3	3.5	1.5	0.0
	<i>AT</i>		0.0	21.4	6.8	4.6	8.4	3.2	0.1
	<i>AC</i>		0.0	59.8	4.3	1.5	4.7	5.4	0.2
<i>Juniperus</i> L.	<i>DB</i>	758	2.4	39.6	9.0	5.3	11.6	4.9	0.2
	<i>DAP</i>		0.0	28.5	5.5	2.7	8.0	4.1	0.2
	<i>ACom</i>		0.0	3.4	1.6	1.3	2.0	0.5	0.0
	<i>AT</i>		0.9	9.7	3.3	2.3	4.2	1.3	0.1
	<i>AC</i>		0.0	14.9	1.5	0.4	1.8	1.8	0.1
<i>Quercus</i> L.	<i>DB</i>	243	2.5	69.5	22.6	8.9	33.3	16.9	1.1
	<i>DAP</i>		0.0	62.3	16.6	5.0	26.0	14.3	1.0
	<i>ACom</i>		0.0	9.2	2.0	1.4	2.5	1.2	0.1
	<i>AT</i>		1.2	16.8	7.2	3.9	10.3	3.9	0.3
	<i>AC</i>		0.0	123.4	14.6	1.1	16.4	22.1	1.5
<i>Arbutus</i> L.	<i>DB</i>	59	6.1	50.7	19.0	13.9	22.2	9.0	1.5
	<i>DAP</i>		0.0	36.3	12.6	8.0	15.0	7.4	1.3
	<i>ACom</i>		0.4	3.0	1.6	1.3	1.8	0.6	0.1
	<i>AT</i>		1.9	9.6	5.2	4.1	5.9	1.7	0.3
	<i>AC</i>		0.2	54.9	6.3	2.2	5.3	9.8	1.6

Var = Variable; *DB* = Diámetro basal (cm); *DAP* = Diámetro a la altura del pecho (cm); *ACom* = Altura comercial (m); *AT* = Altura total (m); *AC* = Área de copa (m<sup>2</sup>); *n* = Número de árboles; *Mín* = Mínimo; *Máx* = Máximo; *Prom* = Promedio; *c1* = Primer cuartil; *c3* = Tercer cuartil; *DE* = Desviación estándar; *EE* = error estándar.

La distribución diamétrica evidenció una tendencia exponencial negativa en forma de curva de *Liocourt* o "J" invertida (Figura 2), lo que demuestra que la mayoría de los individuos presentes en la zona estaban dentro de las primeras categorías diamétricas. Por lo tanto, el estrato arbóreo está en un estado de desarrollo de regeneración a juvenil, con algunos individuos presentes en las clases diamétricas superiores.



**Figura 2.** Densidad diamétrica de individuos de la parcela permanente *Kawí Tamiruyé*, Chihuahua, México.

El muestreo sistemático a 50 m presentó una varianza mínima; sin embargo, subestimó las variables *AB*, *Vol*, *BA*, *C* e *IDR*. El muestreo con el cual se subestimaron más las existencias reales fue el aleatorio estratificado; el método, cuyos resultados fueron muy cercanos a los valores totales reales fue el sistemático a 40 m (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Características dasométricas del censo y tipos de muestreo aplicados en *Kawí Tamiruyé*, Chihuahua, México.

Tipo de muestreo	AB	DE	EE	Vol	DE	EE	BA	DE	EE	C	DE	EE	Ind. ha <sup>-1</sup>	DE	EE	DMC	DE	EE	DEI	DE	EE	
Censo	25.2	0.6	0.5	158.9	0.0	0.0	142.8	24.7	0.34	71.4	6.18	0.17	2 165	2 533.52	76.43	12.2	3.3	0.6	668	1 713	41	
Muestreo aleatorio	17.7	4.1	2.0	112.6	273.7	16.5	86.1	314.0	17.7	43.8	155.6	12.5	1 599	5 001.14	70.72	11.7	3.9	0.6	472	2 076	46	
Muestreo sistemático	30 m	19.1	5.7	2.0	123.1	392.7	16.7	97.1	539.5	19.6	49.5	147.5	11.6	1 632	6 103.20	66.03	12.1	6.4	0.7	501	2 517	42
	40 m	20.4	3.8	2.1	133.5	321.0	18.9	108.6	599.2	25.8	54.2	165.2	12.3	1 658	6 398.80	84.32	12.5	4.8	0.7	530	1 637	43
	50 m	18.9	1.3	1.8	124.9	108.2	16.4	103.1	63.1	12.6	51.3	15.3	6.2	1 656	3 825.68	97.80	12.1	2.6	0.8	500	491	35
Muestreo estratificado	3 estratos	17.6	4.5	2.1	111.9	348.6	18.7	103.0	575.5	24.0	51.3	148.1	12.2	1 604	4 006.44	63.30	11.5	6.0	0.7	465	1 844	41

*AB* = Área basal; *Vol* = Volumen total; *BA* = Biomasa aérea; *C* = Carbono; Ind. ha<sup>-1</sup> = Número de individuos por hectárea; *DMC* = Diámetro medio cuadrático; *IDR* = Índice de Densidad del Rodal del Reineke; *DE* y *EE* = Desviación Estándar y Error Estándar, respectivamente, de diferentes variables. Las gamas de colores del verde al rojo indican los valores más próximos y más alejados de la referencia censal, respectivamente. En el muestreo estratificado, el *IDR* se subestimó en 203 individuos. Sin embargo, el muestreo sistemático a 40 m de distancia (530 individuos) fue el que más se aproximó a los valores reales del censo total.

Las existencias reales en *AB* y *Vol* en la zona de estudio fueron de 25.2 m<sup>2</sup> y 158.8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 2). Por otra parte, al extrapolar los resultados de los muestreos a la superficie total de la zona, se observó que todos los métodos subestimaban el *AB* total en hasta 8 m<sup>2</sup>, como en el muestreo estratificado aleatorio. El volumen, también se subestimó en 46 (muestreo aleatorio) y 47 m<sup>3</sup> (muestreo estratificado), en relación con el total del censo (Cuadro 2).

En el caso de la biomasa aérea (*BA*), la muestra que más subestimó el valor real fue la aleatoria (86.1 < 142.78 Mg ha<sup>-1</sup>); el carbono (*C*) presentó una subestimación de hasta 52.0 Mg ha<sup>-1</sup>, en el muestreo aleatorio (< 71.4 Mg ha<sup>-1</sup>) (Cuadro 2); y el *DMC* registró la peor subestimación, con 11.50 < 12.2 cm, cuando se usó el muestreo

estratificado. El número de individuos por hectárea también, se subestimó en el muestreo aleatorio hasta en 566 individuos ( $1\ 599 < 2\ 165$ ) (Cuadro 2).

El censo total de *Kawí Tamiruyé* registró 2 165 individuos ( $n$ ), distribuidos en nueve taxones en el estrato arbóreo, pertenecientes a cuatro géneros y representados por cuatro familias; Pinaceae y Fagaceae con tres taxones, Ericaceae dos y Cupressaceae uno, los cuales correspondieron a 51.03, 11.22, 2.75 y 35.01 % del total, respectivamente.

Con base en los resultados, el número máximo de especies (nueve) solo se registró en el muestreo sistemático a 30 m de distancia entre sitios y después de siete sitios; en el muestreo a 50 m de distancia, se consiguió posterior a los cuatro sitios. El muestreo que más se asemejó al porcentaje por especie observado en el censo fue el muestreo sistemático a 30 m, ya que se registraron las nueve especies en las mismas proporciones.

El Índice de Diversidad de *Simpson* ( $\lambda$ ) fue similar al del censo total (0.61) tras ocho sitios en el muestreo sistemático a 40 m; en el muestreo estratificado ese valor se alcanzó después de tres sitios por estrato, y lo mismo ocurrió con el Índice de Dominancia de *Simpson* ( $\delta$ ).

Los índices de dominancia y diversidad de *Simpson* indicaron una probabilidad de 39 % de que, al seleccionar dos taxones diferentes, estos fueran de la misma especie, una probabilidad de 61 % de que, al elegirlos al azar resultaran de especies distintas. Es decir, la dominancia fue baja.

El Índice de diversidad de *Shannon-Wiener* para el censo total fue de 1.16; los tipos de muestreo que más se acercaron a ese valor fueron el muestreo sistemático a 30, 40 y 50 m, después de 12, siete y dos sitios, respectivamente; y en el muestreo estratificado se consiguió después de tres sitios por estrato (Cuadro 3). El Índice de *Margalef* fue de 1.04 para el censo total, mientras que el muestreo que más se aproximó fue el sistemático a 40 m.

**Cuadro 3.** Índices de biodiversidad en los tipos de muestreo y en el censo total.

Tipo de muestreo	ns	Esp.	n	Simpson		H'	DMG	J'	
				$\lambda$	$\delta$				
Censo	--	9	2 165	0.61	0.39	1.16	1.04	0.53	
Random sampling	1	5	122	0.60	0.39	1.08	0.83	0.67	
	2	7	234	0.56	0.43	1.01	1.1	0.52	
	3	7	340	0.55	0.44	0.96	1.02	0.49	
	4	7	464	0.54	0.45	0.95	0.97	0.49	
	5	7	589	0.56	0.43	1.01	0.94	0.52	
	6	7	697	0.57	0.42	1.03	0.91	0.53	
	7	7	804	0.56	0.43	1.01	0.89	0.51	
	8	8	954	0.58	0.41	1.07	1.0	0.51	
	9	8	1 045	0.59	0.40	1.07	1.00	0.51	
	10	8	1 142	0.59	0.40	1.09	0.99	0.52	
Muestreo sistemático	30 m	1	5	136	0.57	0.42	1.0	0.81	0.64
		2	6	240	0.57	0.42	1.00	0.91	0.55
		3	7	384	0.57	0.42	1.04	1.0	0.53
		4	7	479	0.57	0.42	1.03	0.97	0.53
		5	7	599	0.58	0.41	1.07	0.93	0.55
		6	7	740	0.58	0.41	1.0	0.90	0.55
		7	9	857	0.57	0.42	1.0	1.18	0.49
	40 m	8	9	975	0.57	0.42	1.0	1.16	0.49
		9	9	1 100	0.58	0.41	1.09	1.14	0.49
		10	9	1 187	0.58	0.41	1.11	1.13	0.50
		11	9	1 294	0.59	0.40	1.12	1.11	0.51
		12	9	1 444	0.60	0.39	1.14	1.0	0.53
		13	9	1 541	0.60	0.39	1.14	1.0	0.52
		14	9	1 632	0.607	0.39	1.15	1.08	0.52
1	6	128	0.59	0.40	1.0	1.0	0.60		
2	7	249	0.56	0.43	0.98	1.08	0.50		
3	7	394	0.59	0.40	1.08	1.00	0.55		
4	8	519	0.59	0.40	1.11	1.12	0.53		
5	8	621	0.61	0.38	1.14	1.08	0.54		
6	8	719	0.59	0.40	1.11	1.06	0.53		

		7	8	865	0.60	0.39	1.14	1.03	0.55
		8	8	966	0.61	0.38	1.14	1.01	0.55
		9	8	1 066	0.61	0.38	1.15	1.00	0.55
	50 m	1	6	113	0.51	0.48	0.95	1.05	0.53
		2	8	255	0.59	0.40	1.17	1.26	0.56
		3	8	367	0.58	0.41	1.15	1.18	0.55
		4	9	473	0.59	0.40	1.17	1.29	0.53
Muestreo estratificado	3 estratos	1×1×1	7	360	0.56	0.43	1.05	1.01	0.54
		2×2×2	8	691	0.59	0.40	1.09	1.07	0.52
		3×3×3	8	999	0.60	0.39	1.12	1.01	0.53
		4×3×4	8	1 260	0.61	0.38	1.14	0.98	0.55

$ns$  = Número de sitios; Esp. = Número de especies;  $n$  = Número de individuos;  $\lambda$  = Índice de Diversidad de *Simpson*;  $\delta$  = Índice de Dominancia de *Simpson*;  $H'$  = Índice de Diversidad de *Shannon-Wiener*;  $DMG$  = Índice de Diversidad de *Margalef*;  $J'$  = Índice de Equidad de *Pielou*. Las gamas de colores del verde al rojo indican los valores más próximos y más alejados de la referencia del censo, respectivamente.

El Índice de Equidad de *Pielou* ( $J'$ ) fue de 0.53; los muestreos que más se acercaron a este valor fueron el muestreo sistemático a 30 m después de 12 sitios, a 40 m después de 4-6 sitios y a 50 m después de dos sitios; mientras que en el muestreo estratificado se consiguió después de 3×3×3 sitios por estrato (Cuadro 3).

## Discusión

En el estudio se documenta la estructura y composición de una parcela representativa de bosque mixto ubicada en el norte de México, mediante el seguimiento de 2 165 árboles individuales y la comparación de sus métricas a partir de diferentes estrategias de muestreo. Los árboles experimentan a lo largo de su vida cambios inducidos por la intensidad, frecuencia y duración de sus respuestas al contexto en el que se desarrollan; por ello, disponer de un diagnóstico ecológico es importante para futuras investigaciones.

La parcela estudiada presenta una distribución diamétrica típica de masas juveniles en desarrollo, que se atribuye a una gestión forestal irregular, con una corta de regeneración por árboles Padre (Maciel-Nájera *et al.*, 2020). Esta estrategia ha permitido que la regeneración se establezca, y constituya la base de una futura estructura deseable del rodal. Sin embargo, hay que tener cuidado a fin de evitar que se produzcan incendios que podrían ser catastróficos.

Los parámetros dasométricos coinciden con los registrados en estudios de zonas vecinas (García *et al.*, 2021; Rascón-Solano *et al.*, 2022) y representan métricas que permiten mediciones repetidas multitemporales para controlar la dinámica del rodal. Por ejemplo, las verdaderas existencias de *AB* y *Vol* (25.16 m<sup>2</sup> y 158.86 m<sup>3</sup>, respectivamente) concuerdan con las citadas por García *et al.* (2021) (18.72 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y 168.58 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente), pero son inferiores a las registradas por Rascón-Solano *et al.* (2022) (217.13 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y 1 810.38 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente).

El número de familias botánicas identificadas (cuatro) corresponden con las indicadas por García *et al.* (2021) para un bosque templado del sur del estado de Chihuahua (cuatro familias), aunque es inferior a lo señalado por Rascón-Solano *et al.* (2022) para un bosque templado de Guachochi, Chihuahua (cinco familias).

Estas diferencias podrían atribuirse a los distintos tamaños de las parcelas muestreadas.

El área basal ( $AB$ ,  $m^2$ ) fue superior a la consignada en otros estudios de bosques templados (Hernández-Salas *et al.*, 2013; Hernández-Salas *et al.*, 2018; Villela-Suárez *et al.*, 2022). Al respecto se sugiere que la variabilidad intraespecífica a nivel de sitio, incluidos los factores climáticos y de gestión, puede desempeñar un papel específico en las diferencias antes señaladas.

El número de árboles registrado (2 165) fue superior a los documentados para bosques templados en México (Graciano-Ávila *et al.*, 2020 [715, 685 y 714]), debido, probablemente, a las diferencias en cuanto al método de gestión forestal y a las condiciones del suelo. Los valores de biomasa aérea y Carbono ( $BA=142.78$   $Mg\ ha^{-1}$  y  $C=71.39$   $Mg\ ha^{-1}$ ) estuvieron dentro de los intervalos descritos por Martínez *et al.* (2016) en bosques de pino-encino del estado de Durango (75.43 a 176.06  $Mg\ ha^{-1}$ ). El  $IDR$  (668 ind.) concuerda con la línea de densidad máxima descrita por Tamarit-Urias *et al.* (2020) para los diagramas de gestión de la densidad de rodales basados en el Índice de *Reineke* (937-230 ind.).

La estrategia de monitoreo en *Kawí Tamiruyé* supone una viabilidad a largo plazo ya que reúne los aspectos más importantes para describir estructuralmente la vegetación (Storch *et al.*, 2018). Por ejemplo, la identificación de las clases diamétricas, las existencias reales de contenido de Carbono, la biomasa aérea y el volumen total proporcionan elementos valiosos para la toma de decisiones en la gestión forestal. A su vez, los índices de riqueza, abundancia e importancia de la vegetación son parámetros útiles de comparación en inventarios a gran escala y con ecosistemas vecinos.

El censo reveló que los bosques de la región tienden hacia rodales juveniles, con un cambio en la composición de especies a bosques de *Pinus-Juniperus*, donde los taxa de este último parecen desplazar a las otras. La ecología de *Juniperus* presenta ventajas comparativas sobre el resto de las especies, incluso su resistencia al fuego

(Blanco-Sacristán *et al.*, 2023), adaptaciones a largos periodos de estrés por sequía (Zhao *et al.*, 2022) y su capacidad de rebrotar en respuesta al ramoneo por herbívoros o daños mecánicos (Gill, 1992).

En cuanto a las estrategias de muestreo, se esperaban diferencias con respecto a los valores de referencia del censo. Los resultados muestran que la elección de la aplicación está influida por la precisión deseada, así como por los esfuerzos sobre el terreno, incluidos los costes (no evaluados aquí). Aunque, el muestreo sistemático es el que más se ajustó a los valores de referencia, los resultados no son definitivos. Queda por evaluar la posibilidad de realizar nuevos muestreos, que consideren diferentes tamaños de sitios, intensidades de muestreo, etcétera. La ventaja es que la propia parcela representa un laboratorio natural en el que pueden perfeccionarse tales procedimientos.

El muestreo aleatorio se ha utilizado comúnmente debido a su simplicidad de diseño y al hecho de que suele ser conservador (Scott y Gove, 2002); sin embargo, los resultados revelaron marcadas diferencias en las estimaciones a favor del muestreo sistemático. Este último mostró una reducción del error, produjo estimadores más eficientes como resultado de su efecto espacial equilibrado, frente a la heterogeneidad de la población (Räty *et al.*, 2020). Así, la distribución espacial de la cuadrícula, en términos de distancia y tamaño de los sitios, es importante como se desprende de los propios resultados del muestreo sistemático. Si bien, el muestreo estratificado arrojó el peor resultado, los expertos recomiendan incluir más información sobre la estratificación para construir estratos homogéneos que reduzcan la varianza antes del muestreo sobre el terreno. Aunque estos esfuerzos deben realizarse como parte de futuras investigaciones, la parcela establecida representa un laboratorio ideal en el que es factible optimizar diferentes esquemas de muestreo.

No obstante que, los resultados son útiles para describir la diversidad estructural del bosque estudiado, se puede hacer más para simplificar el esfuerzo y reproducirlo a

escalas geográficas mayores. Por ejemplo, la inclusión de índices aditivos que combinan las diferentes variables en un índice individual (Storch *et al.*, 2018) proporcionaría una evaluación objetiva del estado de la diversidad estructural a través de diferentes tipos de bosques sensibles a los cambios temporales. Ello implica la necesidad de futuras investigaciones en la parcela estudiada, que incluyan el análisis de costes, incorporación de teledetección, estudios de xilogénesis y ecofisiología, etcétera. Por ejemplo, cambiar el tamaño y la forma de los sitios en diferentes estaciones es ahora posible gracias a los registros de los árboles incluidos en el censo, sin los mayores costes de campo y esfuerzos que suponen los sitios temporales. Además, se deben incorporar evaluaciones de riesgo, dada la incertidumbre en los resultados, y es necesario considerar que los árboles están multiconectados y sus variables de desarrollo son multifactoriales.

En cuanto a la composición y estructura de la zona de estudio, se observó que los índices ecológicos registrados son similares a los de otros estudios relacionados (Graciano-Ávila *et al.*, 2020; García *et al.*, 2021; Rascón-Solano *et al.*, 2022). Sin embargo, las diferencias marginales pueden atribuirse a los criterios de muestreo. Es evidente que la modificación de la estructura de las comunidades ha provocado una pérdida de biodiversidad, que podría relacionarse con las perturbaciones derivadas de las actividades antrópicas como la tala, la sequía y los incendios. Sin embargo, la estructura del rodal amerita investigaciones subsecuentes.

## **Conclusiones**

Este estudio contribuye a aumentar el alcance del monitoreo permanente de las parcelas forestales, que tradicionalmente se ha centrado en la categorización de la producción maderera en términos cuantitativos (existencias en crecimiento, especies,

productos, tamaño, mortalidad). La recolecta de otras variables, como los índices estructurales, proporciona el conocimiento de los componentes del ecosistema para promover políticas de gestión acordes con los requisitos de los nuevos protocolos de orientación ecológica. La caracterización estructural es una medida factible de la condición de integridad del bosque, que indica que la parcela *Kawí Tamiruyé* es ecológicamente compleja; sin embargo, se necesita más investigación sobre el particular.

La utilización de diferentes sistemas de muestreo permite concluir que la estrategia de muestreo influye en la precisión de los resultados, aunque no se dispone de un análisis de costes. El muestreo sistemático evidencia que el equilibrio espacial es un factor que aumenta la precisión de las inferencias, tanto para los índices estructurales como para las variables dasométricas.

La sistematización de estas variables y la viabilidad de la metodología propuesta representan una importante fuente de información para el desarrollo de herramientas para la toma de decisiones en la gestión forestal, ante la dinámica de las masas forestales.

También sigue siendo importante explorar variaciones en la intensidad del muestreo, o incluso la combinación de diseños y escalas de muestreo, incluida la incorporación de la teledetección basada en VANT, así como la reproducción de este enfoque en otras regiones.

### **Agradecimientos**

Agradecemos al ejido Papajichi, a Andrés Cruz Cruz (El Kapy), Bersaín Acosta Barraza, Martín José Loya Barraza, Manuel de Jesús Espinoza Carrillo, José Pedro Lerma Chacarito, Alexis Arturo Chávez Cervantes, José Flores Ramírez y Uriel

Bustillos Espino por facilitar y apoyar la recopilación de datos de campo. Gracias a la Dra. M. Socorro González Elizondo por su apoyo en la identificación del material botánico y a Nancy Silva por su valioso apoyo. Agradecemos a Maestra Jovita Molina, por ayudar con la traducción *Rarámuri*. Por último, agradecemos a la redacción de la RMCF y a dos evaluadores anónimos sus valiosos comentarios.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### **Contribución por autor**

Marín Pompa-García: conceptualización, investigación, recursos y redacción-preparación del borrador original; Sergio Romero-Rocha: investigación y análisis formal; José Alexis Martínez-Rivas: metodología y software; Eduardo Daniel Vivar-Vivar: metodología, recopilación de datos de campo; Felipa de Jesús Rodríguez-Flores: recursos y redacción-preparación del borrador original; José Israel Yerena-Yamallel: revisión y corrección. Todos los autores leyeron y aceptaron la versión publicada del manuscrito.

### **Referencias**

Blanco-Sacristán, J., E. Guirado, J. L. Molina-Pardo, J. Cabello, E. Giménez-Luque and D. Alcaraz-Segura. 2023. Remote sensing-based monitoring of postfire recovery of persistent shrubs: The case of *Juniperus communis* in Sierra Nevada (Spain). *Fire* 6(1):4. Doi: 10.3390/fire6010004.

García G., S. A., E. Alanís R., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G. y G. Graciano Á. 2021. Contenido de carbono y estructura horizontal de un bosque templado en

- Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(63):48-70. Doi: 10.29298/rmcf.v12i63.800.
- Gill, R. M. A. 1992. A review of damage by mammals in north temperate forests: 3. Impact on trees and forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 65(4):363-388. Doi: 10.1093/forestry/65.4.363-a.
- Graciano-Ávila, G., E. Alanís-Rodríguez, O. A. Aguirre-Calderón, M. A. González-Tagle, ... y E. Buendía-Rodríguez. 2019. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(2):119-127. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802019000200119&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200119&lng=es&nrm=iso). (July 5<sup>th</sup>, 2024).
- Graciano-Ávila, G., E. Alanís-Rodríguez, O. A. Aguirre-Calderón, M. A. González-Tagle, ... y J. J. Corral-Rivas. 2020. Cambios estructurales de la vegetación arbórea un bosque templado de Durango, México. *Acta Botánica Mexicana* (127):e1522. Doi: 10.21829/abm127.2020.1522.
- Hernández-Salas, J., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, J. Jiménez-Pérez, ... y L. A. Domínguez-Pereda. 2013. Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(2):189-199. Doi: 10.5154/R.RCHSCFA.2012.08.052.
- Hernández-Salas, J., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, J. Jiménez-Pérez, ... y L. A. Domínguez-Pereda. 2018. Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México. *Madera y Bosques* 24(2):e2421767. Doi: 10.21829/myb.2018.2421767.
- Kakkar, R., K. H. V. Kumar, O. K. Remadevi, M. Manjunatha, ... and H. S. Suresh. 2021. Patterns of woody species diversity and structure in Thalewood House permanent preservation plot in Bannerghatta National Park, Bangalore, India. *Tropical Ecology* 62:626-643. Doi: 10.1007/s42965-021-00169-y.

Laine, C. M., K. M. Kettenring and B. B. Roper. 2013. An assessment of permanent and nonpermanent plots in riparian vegetation monitoring. *Western North American Naturalist* 73(3):337-346. Doi: 10.3398/064.073.0307.

Linder, M. 2000. Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiology* 20(5-6):299-307. Doi: 10.1093/treephys/20.5-6.299.

Maciel-Nájera, J. F., J. Hernández-Velasco, M. S. González-Elizondo, J. C. Hernández-Díaz, ... and C. Wehenkel. 2020. Unexpected spatial patterns of natural regeneration in typical uneven-aged mixed pine-oak forests in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Global Ecology and Conservation* 23:e01074. Doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01074.

Magagnotti, N., M. Mihelic, A. Perazzolo and R. Spinelli. 2023. Seventeen years of forest restoration with small-scale technologies: Time and fuel consumption for alternative operations and techniques. *Small-scale Forestry* 22:557-581. Doi: 10.1007/s11842-023-09543-1.

Martínez B., R. A., O. A. Aguirre C., B. Vargas L., J. Jiménez P., E. J. Treviño G. y J. I. Yerena Y. 2016. Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(35):91-105. Doi: 10.29298/rmcf.v7i35.77.

Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257(2):427-434. Doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028.

Rascón-Solano, J., V. S. Galván Moreno, O. A. Aguirre-Calderón y S. A. García-García. 2022. Caracterización estructural y carbono almacenado en un bosque templado frío censado en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(70):136-165. Doi: 10.29298/rmcf.v13i70.1123.

Räty, M., M. Kuronen, M. Myllymäki, A. Kangas, K. Mäkisara and J. Heikkinen. 2020. Comparison of the local pivotal method and systematic sampling for national forest inventories. *Forest Ecosystems* 7:54. Doi: 10.1186/s40663-020-00266-9.

Scott, C. T. and J. H. Gove. 2002. Forest inventory. In: El-Shaaraw, A. H., W. W. Piegorsch (Eds.). Encyclopedia of environmetrics, vol. 2. Wiley and Sons. Austin, TX, United States of America. pp. 814-820.

Storch, F., C. F. Dormann and J. Bauhus. 2018. Quantifying forest structural diversity based on large-scale inventory data: a new approach to support biodiversity monitoring. Forest Ecosystems 5:34. Doi: 10.1186/s40663-018-0151-1.

Tamarit-Urias, J. C., G. Quiñonez-Barraza y J. Hernández-Ramos. 2020. Aspectos metodológicos para generar diagramas de manejo de la densidad de rodales con base en el índice de Reineke. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 11(61):4-26. Doi: 10.29298/rmcf.v11i61.728.

Thukral, A. K. 2017. A review on measurement of Alpha diversity in biology. Agricultural Research Journal 54(1):1-10. Doi: 10.5958/2395-146X.2017.00001.1.

Villela-Suárez, J. M., G. G. García-Espinoza, J. J. Marroquín-Castillo, O. A. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño-Garza y E. Alanís-Rodríguez. 2022. Composición y diversidad arbórea de un bosque de coníferas en el suroeste de Chihuahua, México. eCUCBA 9(17):96-103. Doi: 10.32870/ecucba.vi17.217.

Zhao, W., H. Yang and J. Tang. 2022. Appeal: the protection of ancient tree species around the world, taking qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) as an example. Heliyon 8(8):e10232. Doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10232.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.