

**Estructura forestal y análisis de suelos en un programa de pago
por servicios ambientales en la cuenca del río Nazas**
**Forest structure and soil analysis in a payment program
for environmental services in the Nazas river basin**

Ricardo Peláez-Mora*✉, Oscar Alberto Aguirre-Calderón*, Eduardo Alanís-Rodríguez*, Eduardo Javier Treviño-Garza*, Marco Aurelio González-Tagle*, José Villanueva-Díaz**

Peláez-Mora, R., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., & Villanueva-Díaz, J. (2022). Estructura forestal y análisis de suelos en un programa de pago por servicios ambientales en la cuenca del río Nazas. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 30(87), e3741, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2022873741>

RESUMEN

Los bosques proporcionan bienes y servicios, los cuales brindan equilibrio en la naturaleza. En México algunos programas destinados a la conservación de los recursos forestales no tienen un análisis puntual de los beneficios que generan. El objetivo del estudio fue la evaluación in situ del programa Pago por Servicios Ambientales Irritila en la cuenca del río Nazas. Se analizaron índices de diversidad y riqueza, datos dasométricos de especies arbóreas, así como densidad aparente, textura, pH y materia orgánica del suelo. Los resultados mostraron a *Quercus sideroxylla* con el mayor Índice de Valor de Importancia. Se obtuvo un índice de Shannon de valor bajo de diversidad y el índice de Margalef de baja riqueza, así como suelos con textura franco arenoso con densidad aparente baja y ricos en materia orgánica.

Palabras clave: PSA (pago por servicios ambientales); diversidad; conservación; bosque templado; cuenca hidrológica; suelo.

ABSTRACT

Forests provide goods and services, which provide balance in nature. In Mexico, some programs aimed at the conservation of forest resources do not have a specific analysis of the benefits they generate. The objective of the study was the in situ evaluation of the Irritila Payment for Environmental Services program in the Nazas River basin. Diversity and richness indices, dasometric data of tree species, as well as bulk density, texture, pH and soil organic matter were analyzed. The results showed *Quercus sideroxylla* with the highest Importance Value Index. A Shannon index of low diversity value and the Margalef index of low richness were obtained, as well as soils with sandy loam texture with low apparent density and rich in organic matter.

Keywords: PES (payment for environmental services); diversity; conservation; temperate forest; hydrological basin; soil.

INTRODUCCIÓN

Los programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA) constituyen una de las herramientas de política pública que fueron desarrollados para prevenir la degradación ambiental y a la vez mejorar el bienestar humano mediante actividades de conservación (Perevochtchikova, 2014) al ser un mecanismo financiero de conservación, restauración y mejoramiento de las condiciones de los sitios proveedores de servicios ambientales (SA) (SEMARNAT, 2018). Los PSA fueron establecidos en América Latina a finales de la década de los noventa a partir de los acuerdos establecidos a nivel internacional en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo en Brasil en 1992 y en el Protocolo de Kioto, Japón en 1997; en dichos eventos se impulsaron mecanismos fiscales de distintas modalidades para el cuidado del medio ambiente (Bonell, 2007) para evitar la deforestación derivada del cambio de suelo por el establecimiento de la agricultura, el pastoreo extensivo y el aprovechamiento maderero (Calder, Hofer, Vermont, & Warren, 2007).

Es importante mencionar que este tipo de sistemas vanguardistas consiste en un pago a los dueños de los predios proveedores de SA, generalmente las cantidades pagadas se relacionan con el costo de oportunidad de la tierra en áreas rurales, considerándose como valor de referencia el valor de la ganadería en tierras marginales (Louman et al., 2005). De esta manera, en México el PSA se estableció mediante la aplicación de recursos federales a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y de aquellos de procedencia internacional, a partir de reglas de operación que establecieron criterios de elegibilidad como el porcentaje de cobertura arbórea; la localización de sitios en zonas críticas para la recarga de acuíferos, en zonas con aguas superficiales con problemas de escasez, de calidad; de sedimentos, o en zonas de riesgo de desastres hidrológicos y/o vinculadas con el abastecimiento de agua a centros de población, así como a la clasificación de las montañas del país (SEMARNAT, 3 de octubre de 2003); empleando herramientas como imágenes de satélites, métodos y procesos técnico-sociales para seleccionar los sitios a beneficiar, priorizándose el bosque mesófilo de montaña y otros bosques y selvas.

El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social evaluó dentro de los programas de desarrollo forestal sustentable el impacto del componente PSA en los periodos 2011-2014 y 2017-2018, analizando la cobertura forestal en áreas con alto riesgo de deforestación; el manejo forestal sustentable y el capital social, teniendo como resultados, la reducción en 40% de la tasa de pérdida de cobertura e incrementos de 50% en el manejo forestal y de 8% en el capital social (CONEVAL, 2018); sin embargo, la evaluación fue general; por ejemplo, sobre la incorporación de nueva superficie para la conservación o la disminución de predios con algún nivel de degradación, sin considerar una evaluación puntual de la vegetación mayor, la arbustiva y el repoblado, o en el caso de los suelos, de las características físicas y químicas en los sitios con programas PSA.

Conocer la estructura forestal y analizar los suelos es de suma importancia antes, durante y posteriormente a la implementación de este tipo de programas de conservación. Para el caso de la estructura del ecosistema arbóreo, está definida por el tipo, número,

arreglo espacial y ordenamiento temporal de los elementos que lo constituyen (Aguirre Calderón, 2002), destacando la estructura de especies en el espacio y la dimensión de los elementos, siendo una herramienta fundamental que debe retomarse para la selección de sitios de PSA, ya que conocer la estructura y diversidad de las especies arbóreas en bosques templados es importante para la gestión y conservación de aquellos lugares en donde no se han generado estudios específicos (Graciano-Ávila et al., 2017). Asimismo, es fundamental conocer las interacciones de los recursos forestales con el suelo para protegerlos de la erosión hídrica (Blanco, 2017), además de otros fenómenos como los antropogénicos, por lo que este trabajo también consideró el análisis de este elemento para dar certeza a los objetivos de este tipo de programas ante el fenómeno de la degradación de las tierras (Pulido & Bocco, febrero de 2011).

Este documento resalta la experiencia del ejido Potrero de Cháidez del municipio de Tepehuanes, Durango, ubicado en la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, localidad beneficiada del programa original PSA y del esquema Mecanismos Locales de Pago por Servicios Ambientales-Fondos Concurrentes (MLPSA-FC) (SEMARNAT, 20 de febrero de 2007) a través del PSA Irritila, encabezado por la Comisión de Cuenca Alto Nazas, A. C., órgano auxiliar del Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval (González-Ortega, 2016); teniendo como objetivo el presente, evaluar el impacto de las obras y acciones (CONAFOR, 2013; SEMARNAT & CONAFOR, 2014) en el periodo 2010-2019, respecto a la estructura forestal y a las propiedades físicas y químicas del suelo, planteando como hipótesis el impacto positivo que este programa ha tenido en los polígonos establecidos. Cabe destacar que Irritila es el nombre alusivo a la tribu seminómada que habitaba la región de las lagunas, parte de la Comarca Lagunera (Hernández, 2001). Es un Programa de Pago por Servicios Ambientales compuesto por recursos 50% federales y 50% de la sociedad de la Comarca Lagunera bajo un esquema de concurrencia, inició en el 2010 beneficiando 8,622 ha de bosque de pino-encino de 14 ejidos ubicados en la parte alta de la cuenca del río Nazas (González-Ortega, 2016).

Las actividades principales en el ejido son el aprovechamiento forestal, la ganadería y la agricultura de temporal; respecto a la superficie aprovechable maderable, 3,680.80 ha se explotan de las especies *Pinus arizonica*, *durangensis*, *engelmanni* y *teocote*, así como *Quercus sideroxylla* (Guerrero, R., comunicación personal, 22 de abril de 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La parte alta de la cuenca del Nazas está ubicada en la Sierra Madre Occidental (SMO) en el estado de Durango (figura 1), abarca una superficie de 18,310 km² (Fondo Metropolitano de la Laguna, 2015) equivalente a 36% de la superficie de la Cuenca del Río Nazas, está conformada por tres cuencas hidrológicas: Río Sextín; Río Ramos y Presa Lázaro Cárdenas; 81% del volumen medio anual de escurrimiento natural de la cuenca beneficia a la comarca lagunera (SEMARNAT, 21 de septiembre de 2020); en dicha parte alta se encuentra el ejido Potrero de Cháidez (figura 2), en los parteaguas de las cuencas río Ramos, río Humaya y San Lorenzo 1 (Sistema Nacional de Información del Agua & Comisión Nacional del Agua, 2020), tiene una superficie de 14,514.5 ha en un rango altitudinal entre 2080 y 2896 m s. n. m.; está inmerso en las subprovincias fisiográficas Gran Meseta y Cañadas Duranguenses, el tipo de clima es semifrío Cb(w2)x, subhúmedo verano fresco largo, la temperatura media anual oscila entre 5 ° y 12 °C, y clima templado Cwo entre 12 ° y 18 °C. La precipitación media anual es entre 800 y 1000 mm, presentándose lluvias importantes en

los meses de julio a septiembre (Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiaro, S. C., 2013).

La vegetación existente en el área de estudio corresponde a comunidades vegetales del bosque de coníferas y latifoliadas, destacando las especies *Pinus arizonica*, *ayacahuite*, *teocote* y *durangensis* y en los encinos el *Quercus sideroxyla*; además de especies arbustivas como el *Juniperus deppeana* y el *Arbutus xalapensis*. La pendiente es importante en el clima y el tipo de suelo, influyendo en los escurrimientos superficiales, subsuperficiales, la infiltración, entre otras variables, presentando pendientes superiores a 20% en poco más de 60% de la superficie PSA (Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiaro, S. C., 2016). El tipo de suelo de acuerdo con la clasificación de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (1968) adaptada para México por el Departamento de Estudios del Territorio Nacional (1972), es Regosol Eútrico "Re", siendo suelos de materiales originales con roca dura y horizontes menores a 30 cm, en general de tono claro y con presencia de roca o tepetate, con fertilidad variable dependiendo de su profundidad (Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiaro, S. C., 2013).

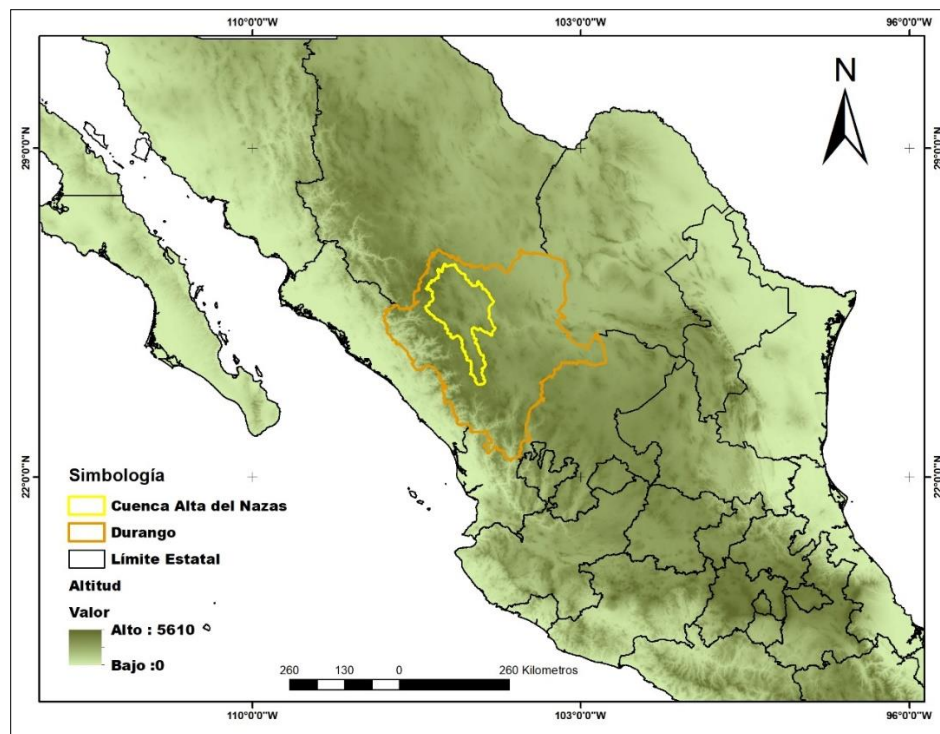


Figura 1. Parte alta de la cuenca del Río Nazas.
Elaboración propia.

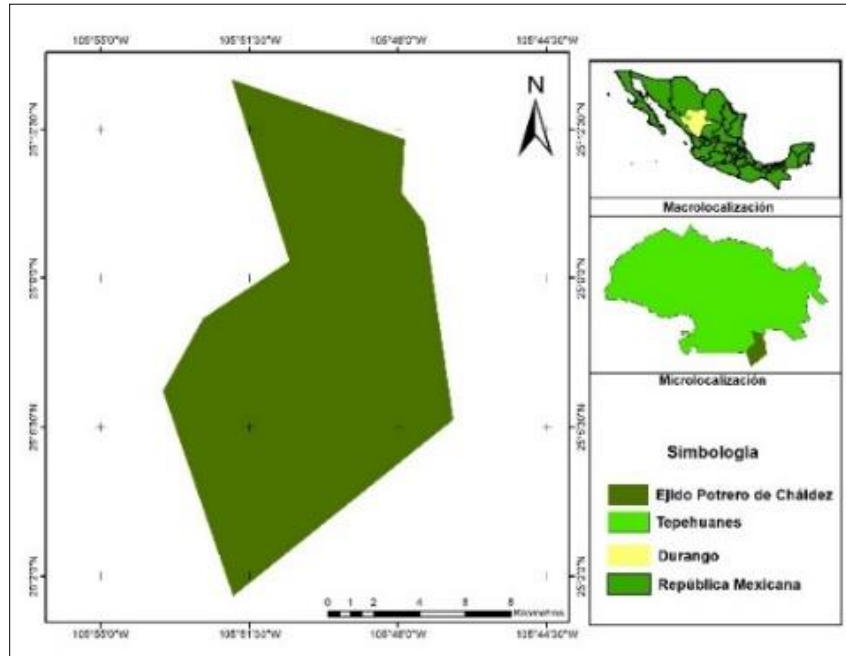


Figura 2. Ejido Potrero de Cháidez, municipio Tepehuans, Durango, México. Elaboración propia.

El ejido Potrero de Cháidez inició el PSA nacional en 2005 con una superficie de 1,235 ha en la cuenca del río San Lorenzo, posteriormente con la modalidad MLPSA-FC-PSA Irritila, se sumaron 724 ha en 2010 y 630 ha en 2015 (figuras 3, 4 y 5).

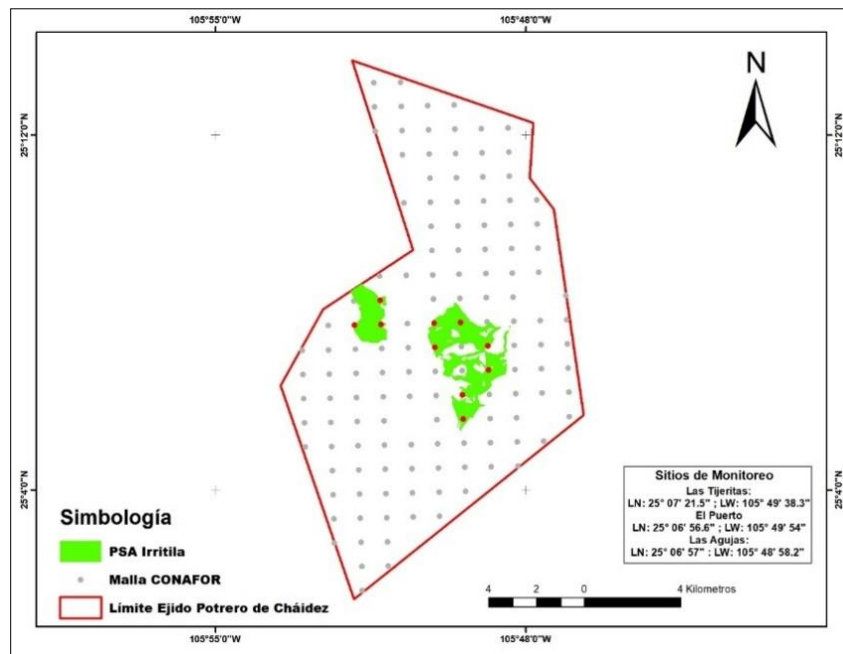


Figura 3. Polígonos PSA Irritila. Elaboración propia con datos de la malla de muestreo CONAFOR (2017).



Figura 4. Acordonamiento de material vegetal muerto
ejido Potrero de Cháidez, Tepehuanes, Durango, México.
Elaboración propia.



Figura 5. Cartel informativo alusivo al PSA Irritila.
Elaboración propia.

El análisis y evaluación del impacto de las obras y acciones (tabla 1) se inició recorriendo el ejido a partir de los puntos de la malla de muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), equidistantes a 5 km (CONAFOR, 2017), dentro de los polígonos PSA Irritila y se determinaron tres sitios de monitoreo correspondientes a los parajes Las Tijeritas, Las Agujas y El Puerto.

Tabla 1
Obras y acciones Programa de Mejores Prácticas de Manejo (PMPM) PSA Irritila

| Obra/Acción | 2010 | 2015 |
|------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| | Unidad de medida | Unidad de medida |
| Programa de Mejores Prácticas de Manejo | 1 | 1 |
| Taller de capacitación | 4 | 4 |
| Construcción de brechas corta fuego | 16.4 km | 10.5 |
| Mantenimiento de brechas corta fuego | 15.4 km | 45.5 |
| Acordonamiento de Material Vegetal Muerto (AMVM) | 173 ha | 76.5 ha |
| Construcción de presas filtrantes | | 30 ha |
| Conservación y mantenimiento de caminos | | 8.5 km |
| Limitar el pastoreo | 724.5 ha | 630 ha |
| Señalización de áreas mediante carteles informativos | 2 carteles | 2 carteles |
| Recorridos de vigilancia | 240 recorridos | 16 recorridos |
| Instalación de Brigada contra incendios | 5 grupos | |
| Muestreo de plagas y enfermedades | 16 muestreo | |

Nota: Elaboración propia con datos de los PMPM 2013 y 2016 (Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiario, S. C., 2013, 2016).

Con metodología del muestreo comunitario BIOCOMUNI (FMCN, CONAFOR, USAID, & USFS, 2018) se hizo el inventario y registro de la vegetación: arbolado, arbustos y repoblado, las unidades de muestreo fueron de 1000 m² (circulares con radio de 17.84 m), en ellas se registró el número de especies de arbolado y vegetación > 7.5 cm de diámetro, altura y área de la proyección de copa. También se establecieron subunidades de monitoreo en áreas de 12.56 m² (radio de 2 m, a 45° con orientación a las manecillas del reloj), registrándose los arbustos y repoblado < 7.5 cm de diámetro y > a 0.25 m de altura.

Respecto a los parajes Las Tijeritas, Las Agujas y El Puerto se realizaron registros y análisis de los siguientes parámetros estructurales: Abundancia Absoluta (A_i), Abundancia Relativa ($AR_i\%$), Frecuencia Absoluta (F_i), Frecuencia Relativa ($FR_i\%$), Dominancia Absoluta (Da) y Dominancia Relativa ($DR_i\%$) (Mostacedo & Fredericksen, 2000) mediante las siguientes fórmulas:

$$A_i = \frac{N_i}{E}$$

$$AR_i = \left(\frac{A_i}{\sum_{i=1..n} A_i} \right) \times 100$$

Abundancia: Donde A_i es la abundancia absoluta, AR_i es la abundancia relativa de la especie i respecta a la abundancia total, N_i es el número de individuos de la especie i y E es la superficie del muestreo en ha.

$$D_i = \frac{Ab_i}{E(ha)}$$

$$DR_i = \left(\frac{D_i}{\sum_{i=1..n} D_i} \right)$$

Con respecto a la Dominancia, donde D_i representa a la dominancia absoluta, DR_i es dominancia relativa de la especie i respecto a la cobertura, Ab el área basal de la especie i y E la superficie en ha.

$$F_i = \frac{D_i}{NS} \qquad FR_i = \left(\frac{F_i}{\sum_{i=1...n} F_i} \right)$$

Frecuencia: F_i es la frecuencia absoluta, FR_i es la frecuencia relativa de la especie i respecto a la sumatoria de las frecuencias, P_i es el número de sitios en el que se presenta la especie i y NS corresponde al número de sitios de muestreo del estudio. Respecto al índice de Valor de Importancia (IVI) (Moreno, 2001; Whittaker, 1972) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IVI = \left(\frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3} \right)$$

Para determinar la riqueza de las especies se empleó el índice de Margalef (D_{Mg}) y respecto a la diversidad alfa el índice Shannon-Weaver (H') (Magurran, 2004; Shannon & Weaver, 1948) mediante las fórmulas:

$$D_{Mg} = \frac{(S-1)}{\ln(N)}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln(P_i)$$

$$P_i = n_i/N$$

Donde S es el número de especies, N el número total de individuos, n_i el número de individuos de la especie i y P_i es la proporción de individuos de la especie i con respecto a la totalidad de individuos en el área de estudio; cada una de estas variables se ingresaron en una base de datos. Dentro de las subunidades de muestreo y en un predio adicional impactado denominado "La Joya del Tlacuache", con pala recta y en bolsas plásticas transparentes, mediante el procedimiento de muestra compuesta, se recolectó en abril de 2021 suelo de 1 a 2 kg a profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm y homogenizaron acorde a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo (SEMARNAT, 31 de diciembre de 2002); se analizaron en el Laboratorio de Suelos de la Sociedad Cooperativa Agropecuaria, Gómez Palacio, Dgo., determinándose las propiedades físicas y químicas como textura, densidad aparente, materia orgánica y pH.

RESULTADOS

Caracterización de la estructura de especies

Respecto a la caracterización de la diversidad, se realizó el registro de 239 individuos en los tres sitios de monitoreo (tabla 2).

Tabla 2
Información de las tres unidades de monitoreo

| Especie | El Puerto | Las Tijeritas | Las Agujas | Total |
|---------------------------|-----------|---------------|------------|-------|
| <i>Pinus ayacahuite</i> | 18 | 7 | 6 | 31 |
| <i>Quercus sideroxyla</i> | 28 | 54 | 12 | 94 |
| <i>Pinus teocote</i> | 4 | 27 | 0 | 31 |
| <i>Pinus durangensis</i> | 0 | 6 | 12 | 18 |
| <i>Arbutus xalapensis</i> | 0 | 1 | 6 | 7 |
| <i>Pinus lumholtzii</i> | 0 | 2 | 0 | 2 |
| <i>Pinus arizonica</i> | 25 | 0 | 30 | 55 |
| <i>Pinus Leiophylla</i> | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Total | 75 | 97 | 67 | 239 |

Nota: Elaboración propia con base en datos de campo.

La proporción de individuos por hectárea fue de 797 individuos, siendo la especie más abundante *Quercus sideroxyla*; sin embargo, en la dominancia respecto al área basal destacó *Pinus arizonica*, por lo que ambas especies sobresalieron en el Índice de Valor de Importancia (tabla 3).

Tabla 3
Parámetros estructurales del Área Basal

| Especie | ÁREA BASAL | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------|----------------------------------|---------------|------------------|----------------|-------|
| | Abundancia | Ab. Relativa | Dominancia | Dom. Relativa | Frec. Frecuencia | Frec. Relativa | IVI |
| | N/ha ⁻¹ | % | m ² /ha ⁻¹ | % | N*Parcela | % | |
| <i>Pinus ayacahuite</i> | 103.33 | 12.97 | 1.920 | 10.05 | 100 | 18.75 | 13.92 |
| <i>Quercus sideroxyla</i> | 313.33 | 39.33 | 5.38 | 28.17 | 100 | 18.75 | 28.75 |
| <i>Pinus teocote</i> | 103.33 | 12.97 | 3.35 | 17.56 | 66.66 | 12.5 | 14.34 |
| <i>Pinus durangensis</i> | 60 | 7.53 | 2.04 | 10.72 | 66.66 | 12.5 | 10.25 |
| <i>Arbutus xalapensis</i> | 23.33 | 2.92 | 0.46 | 2.43 | 66.66 | 12.5 | 5.95 |
| <i>Pinus lumholtzii</i> | 6.66 | 0.83 | 0.12 | 0.66 | 33.33 | 6.25 | 2.58 |
| <i>Pinus arizonica</i> | 183.33 | 23.01 | 5.76 | 30.18 | 66.66 | 12.5 | 21.89 |
| <i>Pinus leiophylla</i> | 3.33 | 0.41 | 0.03 | 0.20 | 33.33 | 6.25 | 2.28 |
| Total | 796.6 | 100 | 19.09 | 100 | 533.33 | 100 | 100 |

Nota: Elaboración propia con base en datos de campo.

Se obtuvo la dominancia respecto al área de copa de las especies de interés, en donde destaca *Quercus sideroxyla* seguida de *Pinus arizonica*, resultados que se reflejan en la tabla 4.

Tabla 4
Parámetros estructurales del Área Copa

| Especie | Área de Copa | | | | | | IVI |
|---------------------------|--------------------|--------------|----------------------------------|---------------|------------|----------------|-------|
| | Abundancia | Ab. Relativa | Dominancia | Dom. Relativa | Frecuencia | Frec. Relativa | |
| | N/ha ⁻¹ | % | m ² /ha ⁻¹ | % | N*Parcela | % | |
| <i>Pinus</i> | | | | | | | |
| <i>Ayacahuite</i> | 103.33 | 12.97 | 825.94 | 15.24 | 100 | 18.75 | 15.65 |
| <i>Quercus sideroxyla</i> | 313.33 | 39.33 | 1830.27 | 33.77 | 100 | 18.75 | 30.61 |
| <i>Pinus teocote</i> | 103.33 | 12.97 | 699.82 | 12.91 | 66.66 | 12.5 | 12.79 |
| <i>Pinus durangensis</i> | 60 | 7.53 | 365.76 | 6.74 | 66.66 | 12.5 | 8.92 |
| <i>Arbutus xalapensis</i> | 23.33 | 2.92 | 201.30 | 3.71 | 66.66 | 12.5 | 6.38 |
| <i>Pinus lumholtzii</i> | 6.66 | 0.83 | 61.92 | 1.14 | 33.33 | 6.25 | 2.74 |
| <i>Pinus arizonica</i> | 183.33 | 23.01 | 1417.34 | 26.15 | 66.66 | 12.5 | 20.55 |
| <i>Pinus leiophylla</i> | 3.33 | 0.41 | 17.02 | 0.31 | 33.33 | 6.25 | 2.32 |
| Total | 796.66 | 100 | 5419.39 | 100 | 533.33 | 100 | 100 |

Nota: Elaboración propia con base en datos de campo.

Índice de diversidad y riqueza de especies

En los valores obtenidos de los índices de riqueza y diversidad (Shannon y Margalef) se observó la presencia de ocho especies en el registro del arbolado >7.5 cm de diámetro arrojando un rango del Índice de Margalef $D_{Mg} = 1.27$ y un valor de diversidad $H = 1.59$ del Índice de Shannon. Asimismo, se realizó el registro de 81 individuos en los mismos tres sitios a nivel de subunidad (cuatro sitios de 12.56 m²/unidad de monitoreo) contabilizándose las siguientes especies (tabla 5).

Tabla 5
Información de subunidades de los tres sitios de monitoreo

| Especie | El Puerto | Las Agujas | Las Tijeritas | No. Total | % |
|-------------------------------|-----------|------------|---------------|-----------|------------|
| <i>Juniperus deppeana</i> | 2 | 0 | 0 | 2 | 2.5 |
| <i>Pinus ayacahuite</i> | 5 | 4 | 6 | 15 | 18.5 |
| <i>Arbutus xalapensis</i> | 1 | 0 | 0 | 1 | 1.2 |
| <i>Arctostaphylos pungens</i> | 5 | 3 | 6 | 14 | 17.2 |
| <i>Pinus arizonica</i> | 2 | 0 | 0 | 2 | 2.5 |
| <i>Pinus durangensis</i> | 2 | 1 | 0 | 3 | 3.7 |
| <i>Quercus sideroxyla</i> | 7 | 13 | 3 | 23 | 28.5 |
| <i>Pinus leiophylla</i> | 0 | 4 | 0 | 4 | 5 |
| <i>Quercus striatula</i> | 0 | 14 | 0 | 14 | 17.2 |
| <i>Prunus serótina</i> | 0 | 0 | 1 | 1 | 1.2 |
| <i>Pinus teocote</i> | 0 | 0 | 2 | 2 | 2.5 |
| Total | 24 | 39 | 18 | 81 | 100 |

Nota: Elaboración propia con base en datos de campo.

Lo observado en estas subunidades muestra la presencia de material vegetal de repoblado y arbustos del orden de 270 individuos por hectárea, siendo las especies *Quercus sideroxyla* y *Pinus ayacahuite* las más abundantes, seguida por arbustos como *Arctostaphylos pungens*.

La importancia del suelo en la estructura forestal

Las muestras del suelo se obtuvieron dentro de los parajes del área de estudio y en un sitio adicional conocido como La Joya del Tlacuache (tabla 6).

Tabla 6
Características de la estructura del suelo forestal

| Paraje | El Puerto | Las Agujas | Las Tijeritas | La Joya del Tlacuache | Valores óptimos |
|-----------------------------------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| Textura | Areno-Franco | Areno-Franco | Areno-Franco | Areno-Franco | |
| Densidad Aparente (Da)g/cm ³ | 0.56 | 0.42 | 0.43 | 1.22 | 1.3 |
| Materia Orgánica (MO) % | 17.89 | 22.82 | 15.42 | 4.81 | >3.0 |
| pH | 4.59 | 4.08 | 4.58 | 5.50 | 6.5 – 7.5 |

Nota: Elaboración propia.

Del muestreo de suelo se obtuvieron cinco muestras compuestas de 1 a 2 kg para un total de 20 (tablas 7 y 8), destacando en resultados la densidad aparente; la materia orgánica, porcentaje de saturación y otros elementos de los sitios conservados de PSA con respecto al perturbado.

Determinación de propiedades físicas - químicas del suelo

Tabla 7
Propiedades físicas

| Paraje | Las Agujas | Las Tijeritas | El Puerto | La Joya del Tlacuache | Valores óptimos |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Textura % | Areno Franco | Areno Franco | Areno Franco | Areno Franco | |
| Arena | 77 | 85 | 81 | 71 | |
| Limo | 20 | 12 | 15 | 26 | |
| Arcilla | 3 | 3 | 3 | 3 | |
| Cap. Int. Catiónico | 20.00 | 23.75 | 17.50 | 12.5 | 25-50 |
| Capacidad de Campo | 24.44 | 23.00 | 23.83 | 25,52 | |
| Punto de marchitez | 13.35 | 12.57 | 13.02 | 13.94 | |
| % Saturación | 125.00 | 132.86 | 135.71 | 33.33 | <50 |
| Densidad Aparente | 0.42 | 0.43 | 0.56 | 1.22 | 1.3 |

Nota: Elaboración propia.

Tabla 8
Propiedades químicas

| Paraje | Las Agujas | Las Tijeritas | El Puerto | La Joya del Tlacuache | Valores óptimos |
|--------------------------------------|------------|---------------|-----------|-----------------------|-----------------|
| Materia Orgánica (M.O.) | 22.82 | 15.42 | 17.89 | 4.81 | >3.0 |
| Fósforo (P) | 8.67 | 9.67 | 9.57 | 7.46 | 21-40 |
| Nitratos (N-NO ₃) | 12.16 | 11.01 | 10.67 | 3.13 | >60 |
| Carbonatos Totales CaCO ₃ | 6.88 | 6.42 | 6.68 | 6.16 | >15 |
| Potasio (K) | 450.00 | 539.00 | 358.00 | 287 | 800-1200 |
| Fierro (Fe) | 61.44 | 45.25 | 39.60 | 6.38 | |
| Cobre (Cu) | 0.21 | 0.18 | 0.14 | 0.17 | |
| Zinc (Zn) | 0.80 | 0.50 | 1.36 | 0.03 | |
| Manganeso (Mn) | 124.57 | 135.46 | 45.27 | 30.13 | |
| pH | 4.08 | 4.58 | 4.59 | 5.50 | 6.5-7.5 |
| Conductividad Eléctrica | 0.41 | 0.45 | 0.25 | 0.21 | 2.0-8.0 |

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Estudiar la estructura forestal y de los suelos desde la perspectiva de los programas de PSA en la SMO contribuye a entender la complejidad del binomio bosque-suelo y sus interacciones con otros recursos como los hídricos, para lo cual en esta investigación destacan especies como *Pinus arizonica*, *P. durangensis*, *P. teocote* y *Quercus sideroxylla*, al registrarse una densidad de individuos de 797 ha⁻¹, valores similares de abundancia

registrados en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango de 787 ha⁻¹ (Graciano-Ávila et al., 2017), aunque muy superiores a los 575 individuos ha⁻¹ de otros trabajos en la SMO (Graciano-Ávila, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez, & Luján-Soto, 2017) y aun mayor que en otros bosques templados con registros de 389 h⁻¹ (López-Hernández et al., 2017).

Para el presente estudio, la especie *Quercus sideroxyla* fue la que presentó mayor importancia (IVI) en el ecosistema del ejido Potrero de Cháidez; sin embargo, con respecto a los valores de dominancia a nivel de área basal el género *Pinus* y específicamente la especie *Pinus arizonica* fue la de mayor presencia, datos coincidentes con lo registrado en ecosistemas de bosque templado de Chihuahua (Hernández-Salas et al., 2013) y a lo señalado para bosques de coníferas (Granados-Sánchez, López-Ríos, & Hernández-García, 2007). Respecto a la dominancia de la cobertura o área de copa, el *Quercus sideroxyla* fue superior al *Pinus arizonica* y de acuerdo con el índice de Shannon obtenido ($H= 1.59$) se muestra un valor bajo de diversidad. En cuanto al índice de Margalef registrado ($DMg= 1.27$), se muestra también un bajo valor en riqueza respecto a otros estudios de bosques templados del estado de Durango como el valor ($DMg= 1.53$) registrado por Graciano-Ávila, Alanís-Rodríguez et al. (2017); el índice ($DMg= 1.35$) de López-Hernández et al. (2017); el ($DMg= 1.74$) de Zúñiga Vásquez et al. (2018); aunque superior al índice ($DMg= 1.04$) registrado por Navar-Cháidez y González-Elizondo (2009). Con respecto al registro de las subunidades de monitoreo, correspondiente a la regeneración de la masa forestal (arbustos y repoblado), los valores encontrados son semejantes al porcentaje de especies del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Durango (CONAFOR, 2013; SEMARNAT & CONAFOR, 2014).

Es importante incorporar el conocimiento de la estructura forestal y de las propiedades físicas y químicas del suelo en los predios sujetos a programas de PSA, dado que dicha relación es fundamental para prevenir y evitar fenómenos como la erosión hídrica y los deslizamientos superficiales, al mantenerse en buen estado la cubierta forestal (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2009), aunque es necesario en materia de PSA, abordar de manera integral la importancia de la profundidad del suelo forestal (Nadal-Sala, Sabaté, & Gracia, 2017); analizar el riesgo de perturbación de las estructuras macroporosas del suelo y los cambios que conlleva en las escorrentías superficiales, subsuperficiales y en la recarga de acuíferos (Navar, Lizárraga Mendiola, & Jiménez Gómez, 2017); así como los cambios en la cobertura tanto vegetal como de usos del suelo (CCVUS), lo cual genera un impacto negativo en los ecosistemas, como la afectación en la capacidad de proveer los SA y los efectos directos como el calentamiento global (Leija et al., 2020).

Dado que los suelos en los polígonos del PSA Irritila del ejido Potrero de Cháidez presentan una densidad aparente baja, al ser suelos porosos y ricos en materia orgánica y ante la eventualidad de una modificación a la estructura forestal se corre el riesgo de que aumente la erosión producto de las altas pendientes (Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiario, S. C., 2013), los bajos horizontes edáficos y la presencia de fenómenos de lluvia intensos en periodos cortos del año (Fondo Metropolitano de la Laguna, 2015); sin embargo, como lo mencionan Rodríguez, Arbelo, Guerra y Mora (2002) los rasgos morfológicos de erosión algunas veces correlacionan mejor con variables de uso y manejo del suelo que con propiedades intrínsecas del mismo, tales como las pendientes superiores a 30%, la cobertura vegetal inferior a 60% y la elevada erosividad de las lluvias estacionales, siendo los factores antrópicos de uso los que determinan en mayor medida la erosión que la erodibilidad en sí.

CONCLUSIONES

Esta investigación suma los primeros esfuerzos en el seguimiento puntual de un PSA en la parte alta de la cuenca del río Nazas, a partir de comparar los resultados del estudio con las problemáticas señaladas en el diagnóstico integral de la parte alta de la Región Hidrológica 36 y en los propios PMPM, por lo que derivado de los hallazgos en la vegetación como la base de datos de la estructura forestal: densidad de individuos ha⁻¹, altura, área basal y de copa, valor de importancia e índices de diversidad y riqueza, además de las cualidades en las características físicas y químicas del sustrato arbóreo respecto al sitio impactado por el CCVUS, permite conocer y determinar el impacto positivo de las obras y acciones implementadas en los polígonos del PSA Irritila durante el periodo de tiempo establecido.

La cuenca del río Nazas es la más importante del estado de Durango; conocer la estructura forestal y las propiedades físicas y químicas de los suelos es de suma importancia para la provisión de SA hídricos, por lo que se recomienda continuar con las actividades de conservación y las acciones de monitoreo y análisis, pudiéndose aplicar en otros ejidos del PSA Irritila y en futuros proyectos en bosques templados del país, siendo una herramienta integral para conocer con más precisión la relación Agua-Bosque-Suelo en los sitios con programas de conservación.

Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo del programa de becas nacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a las facilidades del ejido Potrero de Cháidez, a la disposición de información de la Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque de la CONAFOR y de la UAF Santiago Papasquiario, S. C.

REFERENCIAS

- Aguirre Calderón, O. (2002). Índices para la caracterización de la estructura de ecosistemas forestales. *Ciencia Forestal en México*, 27(92), 5-28.
- Blanco, J. A. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2), 1-9. doi: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01
- Bonell, R. (2007). El Protocolo de Kioto y la tributación ambiental. Recuperado de <http://Dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2267912>
- Calder, I., Hofer T., Vermont S., & Warren, P. (2007). *Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua*. *Unasylva*, 58(229), 3-10. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a1598s/a1598s.htm>
- Comisión Nacional Forestal. (2013). *Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales, Manual de Obras y Prácticas*. México: Autor.
- _____ (2017). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. Recuperado de http://www.biodiversidad.gob.mx/sistema_monitoreo/
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2018). *Ficha de Monitoreo 2017-2018, Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Departamento de Estudios del Territorio Nacional. (1972). *Modificaciones al Sistema de Unidades FAO-UNESCO 1968*. D. F.: Autor.
- FMCN, CONAFOR, USAID & USFS (2018). *Manual para Muestrear la vegetación en bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas, BIOCOMUNI – Monitoreo Comunitario de la*

Biodiversidad, una guía para núcleos agrarios (pp. 6-25). México: Comisión Nacional Forestal/Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.

- Fondo Metropolitano de la Laguna. (2015). *Diagnóstico Integral de la Parte Alta de la Región Hidrológica 36. Fondo Metropolitano de la Laguna* (pp. 10-52). México.
- González-Ortega, G. (2016). *Evaluación del Programa de Pago por Servicios Ambientales "Iritilla" de la Comisión de Cuenca Alto Nazas* (Tesis de Maestría). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 535-542.
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., & Mora-Olivo, A. (2017). Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México. *Madera y Bosques*, 23(3), 137-146.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F., & Hernández-García, M. A. (2007). Ecología y Silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(1), 67-83.
- Hernández, P. (2001). *La Antigua Laguna* (pp. 62-64). Coahuila, México: Impresora Dorado.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & González-Tagle, M. A. (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(3), 189-199.
- Leija, E. G., Valenzuela-Ceballos, S. I., Valencia-Castro, M., Jiménez-González, G., Castañeda-Gaytán, G., Reyes-Hernández, H., & Mendoza, M. E. (2020). Análisis de cambio de 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. Recuperado de <https://doi.org/10.7818/ECOS.1826>
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Monárrez-González, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39-51.
- Louman, B., Garay, M., Yalle, S., Campos, J. J., Locatelli, B., Villalobos, R., ... Carrera, F. (2005). Efectos del pago por servicios ambientales y la certificación forestal en el desempeño ambiental y socioeconómico del manejo de bosques naturales en Costa Rica (pp. 2-12). Serie Técnica. Informe Técnico. *Colección Manejo Diversificado de Bosques Naturales*. Costa Rica: GTZ- CATIE.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Oxford, UK: Blackwell Science.
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. *Manuales y tesis SEA: Vol. 1* (83 pp.). Pachuca, México: Cooperación Iberoamericana (CYTED)/Unesco (Oreyt)/SEA.
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: Bolfor.
- Nadal-Sala, D., Sabaté, S., & Gracia, C. (2017). Importancia relativa de la profundidad del suelo para la resiliencia de los bosques de pino-carrasco (*Pinus halapensis* Mill.) frente al incremento de la aridez debido al cambio climático. *Ecosistemas*, 26(2), 18-26. doi: 107818/ECOS.2017.2-2.03
- Navar, J., Lizárraga Mendiola, & Jiménez Gómez, M. A. (2017). Modelación de caudales en función de los macroporos del suelo en una microcuenca forestal en Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 89-100.

- Návar-Cháidez, J. J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71-87.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Los Bosques y el Agua* (pp. 32-50). Roma: Autor.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (1968). *Definitions of soil units for the soil map of the World. World soil resources*. Roma: Office Land and Water Development.
- Perevochtchikova, M. (2014). *Programa de Pago por Servicios Ambientales en México: Un acercamiento para su estudio* (pp. 17-34). México: El Colegio de México.
- Pulido, J., & Bocco, G. (febrero de 2011). ¿Cómo se evalúa la degradación de tierras? Panorama global y local. *Interciencia*, 36(2), 96-103. Recuperado de <https://www.interciencia.net/acerca-de/la-revista/>
- Rodríguez, R. A., Arbelo, C. D., Guerra, J. A., & Mora J. L. (2002). Erosión hídrica en andosoles de las islas canarias. *Edafología*, 9(1), 23-30. Recuperado de <https://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/partes%20volumen%209-1/pagina%2023-30.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (31 de diciembre de 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, Edición Matutina. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0
- _____ (3 de octubre de 2003). Acuerdo que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688512&fecha=03/10/2003#gsc.tab=0
- _____ (20 de febrero de 2007). Acuerdo por el que se expiden las Reglas de Operación del Programa Pro-Árbol de la Comisión Nacional Forestal. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4962757&fecha=20/02/2007#gsc.tab=0
- _____ (5 de junio de 2018). Decreto por el que se abroga la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 25 de febrero de 2003, se expide la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable; y se reforma el primer párrafo al artículo 105 y se adiciona un segundo párrafo al mismo artículo de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, México. *Diario Oficial de la Federación*.
- _____ (21 de septiembre de 2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional Forestal. (2014). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos Durango 2013*. México: SEMARNAT-CONAFOR.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1948). *The mathematical theory of communication*. Champaign, IL: University of Illinois Press.

- Sistema Nacional de Información del Agua & Comisión Nacional del Agua. (2020). [Mapa de cuencas hidrográficas]. Recuperado de <http://www.sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas>
- Unidad de Administración Forestal Santiago Papasquiaro, S. C. (2013). *Programa de Mejores Prácticas de Manejo*. México: U. A. F. Santiago Papasquiaro, S. C.
- _____ (2016). *Programa de Mejores Prácticas de Manejo* (pp. 4-11). México, U. A. F. Santiago Papasquiaro, S. C.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21, 213-251.
- Zúñiga-Vásquez, J., Martínez-López, J. M., Navarrete-Gallardo, E. A., Graciano-Luna, J. J., Maldonado-Ayala, D., & Cano-Mejía, B. (2018). Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(73), 27-36.



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material
La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.