

Determinación de la calidad de sitio y productividad de los bosques de *Palo Santo* en el norte de Argentina

Determination of site quality and productivity of *Palo Santo* forests in northern Argentina

Sebastian Kees ^{a*}, Dante Loto ^b, Maximiliano Azcona ^c, Santiago Telleria ^c, Eduardo Manghi ^c, Juan Gaitán ^d, Vanina Chifarelli ^e, Pablo Peri ^f

* Autor de correspondencia: ^a Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Campo Anexo Estación Forestal Plaza – Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña, Argentina, kees.sebastian@inta.gob.ar

^b Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Santiago del Estero, Argentina.

^c Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (DNB, MAyDS), Dirección Nacional de Bosques (Autoridad Científica CITES en especies forestales), Buenos Aires, Argentina.

^d Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina.

^e Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Investigador independiente, Santiago del Estero, Argentina.

^f Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Santa Cruz, Argentina.

SUMMARY

The general objective of this study was to provide information regarding the productivity and site quality of Palo Santo forests in their Argentinean distribution area in order to establish guidelines for sustainable management and use. We used data taken from 482 plots as part of national, regional and local forest inventories in northern Argentina, carried out in native forests within aboriginal and peasant community tenures and management plans. Basal area, stem volume and dominant height of Palo Santo trees were used to determine site quality class. This was correlated to forest structure by using a classification mosaic from Landsat satellite images. A sustainable cutting cycle duration and harvest intensity for Palo Santo forests were calculated according to their site quality. The results suggest that the current stocks of Palo Santo are sufficient to continue with its sustainable use without compromising its long-term availability. This information is useful for decision makers and defines the potential of the species to provide resources to regional economies and provincial productive development.

Keywords: native forests, harvest intensity, timber production.

RESUMEN

El objetivo general del trabajo fue aportar información sobre la productividad y calidad de sitio para los bosques de Palo Santo en su área de distribución en Argentina, a fin de establecer lineamientos unificadores de manejo y uso para su aprovechamiento sostenible. Se utilizó información de 482 parcelas de inventarios forestales nacionales, regionales y locales de diferentes años en el norte de Argentina, que provienen de muestreos realizados en bosques nativos en tenencias de comunidades aborígenes, campesinas y planes de manejo. Se utilizó el área basal, volumen de fuste y altura dominante de Palo Santo de cada una de las parcelas para determinar clases de calidad de sitio y mediante una clasificación de un mosaico de imágenes satelitales Landsat del año 2019 con sus bandas originales y diferentes índices, fracciones, pendientes y proxys relacionados a la estructura de la vegetación. A partir de los datos, se calculó la duración del ciclo de corta y la intensidad de corta sostenible para los bosques de Palo Santo según su calidad de sitio. Los resultados permiten asumir que las existencias de Palo Santo son suficientes para continuar con su aprovechamiento sostenible sin comprometer su persistencia. La información generada es de utilidad para los tomadores de decisión, reflejando, además, el potencial forestal de la especie su aporte a las economías regionales y al desarrollo de los entramados productivos provinciales.

Palabras clave: bosques nativos, intensidad de corta, producción.

INTRODUCCIÓN

El Palo Santo, *Gonopterodendron sarmientoi* (Lorentz ex Griseb.) AC Godoy-Bürki (*Zygophyllaceae*) es un árbol endémico del sur de Sudamérica. Se distribuye en la región del Gran Chaco seco, incluyendo el norte de la Argentina, el este de Bolivia y el oeste de Paraguay; (Barstow 2018); es una especie forestal de madera dura (Giménez y Moglia 2003), y es utilizado principalmente para pisos y postes debido a su alta durabilidad, obtención de aceites esenciales y en diversos productos de tornería y tallados (Céspedes *et al.* 2018). En las últimas décadas, este recurso maderero también es apreciado en un mercado internacional con gran demanda de volumen de madera (CITES 2010, Céspedes *et al.* 2018). El Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES) recategorizó a la especie en Latinoamérica dentro del apéndice II (mayor amenaza). Esto, en Argentina, habilita su exportación internacional con previa concesión del organismo regulador para garantizar la sostenibilidad de su aprovechamiento sostenible sin afectar su supervivencia (Ley Nacional Argentina 22.344). Sin embargo, hasta el momento la información acerca del manejo y conservación de este recurso está poco desarrollada. Además, existen reportes de aprovechamientos no planificados, extracción de tipo minera y degradación de rodales dentro del área de distribución del Palo Santo en Argentina (Loto *et al.* 2018). Debido a esto, desde 2019, se está trabajando en herramientas técnico - administrativas que regulen la situación de explotación del palo santo (Resolución MAyDS N° 108/19 y 59/21) (MAyDS 2021).

Un paso necesario para la planificación del manejo de los recursos forestales es conocer los aspectos básicos de la estructura y la dinámica forestal del bosque (Lamprecht 1990). Se han determinaron tres tipos de estructuras de bosques con presencia de Palo Santo (palosantal y bosques con baja y alta presencia de Palo Santo), asociados a un gradiente temperatura, precipitación, evapotranspiración y texturas del suelo en el norte de Argentina (Loto *et al.* 2021). Sin embargo, para la determinación de los esquemas silvícolas que puedan emplearse en la elaboración de los planes de manejo de los bosques, como así también para establecer la potencialidad productiva, es relevante poder discriminar, como primera medida, las calidades de los sitios (Carrero *et al.* 2008), por lo que se puede inferir que es esencial medir e interpretar la calidad de sitio con fidelidad ya que, en conjunto con la densidad del rodal, controla el tamaño, cantidad y valor de los productos. El mapeo de la calidad de sitio es una de las principales variables para el pronóstico del rendimiento, la regulación e intervenciones silvícolas de los rodales.

En este sentido, la calidad de sitio generalmente es interpretada como la productividad potencial promedio de un área determinada, usualmente expresada en volumen de rodal o a través de otros parámetros como el área basal y la altura dominante (Kershaw *et al.* 2017). Además, las condiciones ambientales del sitio pueden no ser homogé-

neas, pudiendo variar las condiciones climáticas, fertilidad del suelo, historia de disturbios naturales y topografía. Esto no solo otorga relevancia para la productividad, sino también a la disponibilidad y crecimiento anual de los recursos en el sitio (Kershaw *et al.* 2017). La forma de determinar cuánta madera puede extraerse cada año, varía según el tratamiento silvícola aplicado a cada masa la densidad y de la calidad de sitio forestal (Montero *et al.* 2001). Hasta el momento, existen 7 planes de manejo productivo de Palo Santo en la región Chaqueña argentina (MAyDS 2021). A pesar de la demanda sostenida por el comercio internacional, aún hay una cantidad importante de individuos que aseguran una buena regeneración, pero con una distribución espacial acotada. Argentina, dictamina a través de la Ley Nacional 26.331, los lineamientos de su manejo mediante un Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) a escala predial, donde, la determinación de volumen de madera, turnos de cortas, crecimiento y recuperación de este recurso están regulados por instrumentos reglamentarios (Resolución MAyDS N° 59/21). La superficie de distribución actual de palo santo es de 2.477.009 ha, en donde la mayor parte con el 57,9 % se encuentra en categoría amarillo (bosques bajo diferentes usos con planes de manejo forestal), el 24,3 % en categoría verde (sujetas a cambio de uso del suelo), y solo el 10,6 % se encuentra en categoría roja (bosques de alto valor de conservación) en el marco del OTBN, y alrededor de 178.107 ha en bosques sin categorizar (7,2 %) (Peri *et al.* 2022). Esto determina que, principalmente para las áreas en categoría amarilla, las provincias involucradas (Salta, Chaco y Formosa) necesitan contar con información de lineamientos silviculturales y de productividad para la toma de decisiones respecto al manejo del Palo Santo.

El presente trabajo tiene como objetivo general aportar información sobre la productividad y calidad de sitio para los bosques de Palo Santo en su área de distribución en Argentina a fin de establecer lineamientos unificadores de manejo y uso para su aprovechamiento sostenible.

MÉTODOS

Área de estudio. El área de estudio se encuentra ubicada en el norte de Argentina (figuras 1A y 1B), dentro del dominio fitogeográfico regional del Chaco Seco (Cabrera 1976), incluyendo el oeste de las provincias de Chaco y Formosa, y al este de la provincia de Salta (22° - 25° S, 59° - 64° O).

Este bosque, xerófilo y semicaducifolio, cuenta con un estrato superior dominado por el quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii* Engl.) y el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco* Schltr.) de entre 15 y 25 metros de altura. En el límite oriental de la ecorregión, estas especies coexisten también con el quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae* Engl. 1885), en lo que se conoce como el “bosque de los tres quebrachos”, una de las comunidades más particulares. El quebracho colorado santiagueño, que delimita tradicionalmente el

Chaco Semiárido con su distribución, es, sin duda, una de las especies más emblemáticas de la región. Integran esta subregión también otros árboles más bajos como el mistol (*Sarcomphalus mistol* (Griseb.) Hauenschild) de frutos comestibles, el palo cruz (*Tabebuia nodosa* Griseb.), palo borracho de flor blanca (*Ceiba chodatii* (Hasl.) Ravenna) y una gran variedad árboles y arbustos, con una importante presencia de algarrobos (*Prosopis alba* Griseb., *Prosopis nigra* (Griseb.) Hieron., *Prosopis ruscifolia* Griseb., *Prosopis kuntzei* Harms ex Kuntze). Se encuentran también bosques de xerófitas con Palo Santo (*Bulnesia sarmientoi* ahora *Gonopterodendron sarmientoi* (Lorentz ex Griseb.)

A.C. Godoy-Bürki) y Quebracho blanco lagunero (*Aspidosperma triternatum* Rojas Acosta) ocupando suelos generalmente deprimidos arcillo-limosos (MAyDS 2020).

Datos de campo. Se utilizó información recopilada a partir de inventarios forestales realizados para diferentes años en el norte de Argentina (cuadro 1). Estos inventarios, nacionales, regionales y locales provienen de muestreos realizados en bosques nativos en tenencias de comunidades aborígenes, campesinas y planes de manejo cubriendo el área de estudio regional dentro de las provincias de Salta, Formosa y Chaco (figura 1 B, cuadro 1).

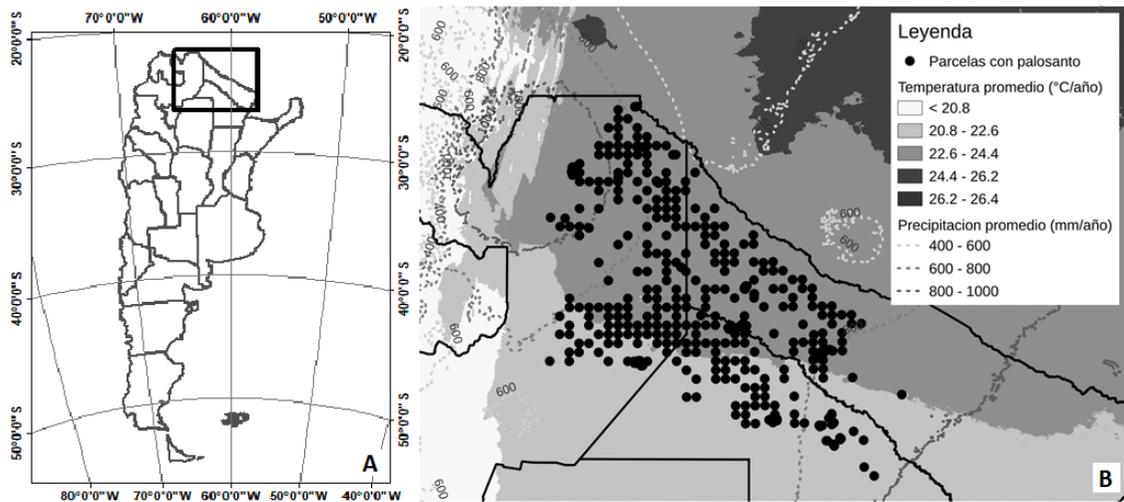


Figura 1. (A) Área de estudio ubicada en Argentina en las provincias de Chaco, Formosa y Salta. (B) Detalle de la distribución de parcelas con presencia de Palo Santo en bosques del Chaco Seco Argentino.

(A) Study area located in the provinces of Chaco, Formosa and Salta, Argentina. (B) Distribution of plots containing Palo Santo in the forests of the Dry Chaco ecoregion of Argentina.

Cuadro 1. Detalle de inventarios y registros forestales recopilados en el área de distribución con presencia de Palo Santo en el norte de Argentina.

Details of forest inventories and records compiled within the distribution area of Palo Santo in northern Argentina.

| Origen de datos | Año de muestreo | Número de unidades | Provincia |
|--|-----------------|--------------------|-----------------------|
| Inventario Forestal Comunidad Wichí Lote 27 | 2004 | 37 | Formosa |
| Inventario Forestal Loto <i>et al.</i> 2018 | 2007 | 55 | Formosa, Salta |
| Inventario Forestal EEA – INTA. Ing. Juárez ² | 2013 | 11 | Formosa |
| 1 ^{er} Inventario Nacional de Palo Santo. SAyDS ¹ | 2014 | 8 | Salta, Formosa, Chaco |
| Inventarios Forestales de Planes de manejo | 2018 | 42 | Salta, Chaco |
| Inventario Forestal PIC “Los Labradores”. PBNyC, MAyDS ³ | 2018 | 41 | Chaco |
| 2 ^{do} Inventario Nacional de Bosque Nativo. MAyDS ¹ | 2019 | 288 | Salta, Formosa, Chaco |

¹ Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Dirección Nacional de Bosques.

² Estación Experimental Agropecuaria Guillermo N. Juárez. INTA – Provincia de Formosa.

³ Proyecto Bosque Nativos y Comunidades.

Se trabajó sobre datos de 482 parcelas circulares de 1.000 m² de superficie, con presencia de la especie (figura 1 B), con registros del diámetro a la altura del pecho (DAP) (cm), la altura total (m) y la longitud o altura del fuste (m) de todos los individuos de cada especie. Para el cálculo de volumen del fuste por individuo se utilizó la ecuación de Cotta [1] (Thren 1993), utilizando para ello un coeficiente de forma de 0,7; debido a que solo se cuentan con ecuaciones de tipo local y solo para algunos lugares del área de dispersión.

$$VF (m^3) = G (m^2) \times AF (m) \times CF \quad [1]$$

Donde VF es el volumen de fuste en m³, G es la sección normal en m², AF es la altura de fuste en m y CF el coeficiente o factor de forma.

Con base en los datos de cada individuo, se calculó el área basal (m² ha⁻¹), densidad (ind ha⁻¹), volumen del fuste (m³ ha⁻¹) y altura media dominante (m). La altura dominante fue calculada como el promedio de los 3 árboles de Palo Santo con mayor altura en cada parcela.

Clasificación de bosques con Palo Santo. Se utilizó al área basal, volumen de fuste y altura dominante de Palo Santo de cada una de las parcelas para elaborar clases de calidad de sitio. Dichas clases ordinales consideran de mejor (clase I) a peor (clase III) calidad de sitio siguiendo un gradiente decreciente de los parámetros dasométricos (cuadro 2).

Mapas de distribución de la calidad de sitio para bosques con Palo Santo. Tomando la cobertura de distribución actual de Palo Santo (Peri *et al.* 2022), como sitios de entrenamiento para la clasificación se utilizaron 299 parcelas seleccionadas al azar. Para la validación de los mapas se utilizaron las restantes 141 parcelas junto con 187 parcelas con ausencia de la especie.

Para la clasificación se utilizó un mosaico de imágenes satelitales Landsat del año 2019 generado por el proyecto Mapbiomas Chaco (<https://chaco.mapbiomas.org/>). El mosaico final utilizado para la clasificación contó con un total de 63 bandas, incluyendo las bandas originales y diferentes índices, fracciones, pendientes y valores acumulados como proxys de diferentes características del comportamiento espectral correlacionados con la vegeta-

ción del área de estudio. Para cada uno de estos índices se calcularon métricas de tendencia central (mediana) y de la variabilidad (rango, desviación estándar y coeficiente de variación) para el período anual. Algunas variables (por ejemplo, fracciones) se obtuvieron a partir de métodos de “desmezclado espectral” (Souza *et al.* 2005), otras involucraron operaciones aritméticas con diferentes bandas espectrales (GCVI, NDVI y NDFI), o se calcularon a partir de modelos lineales ajustados a la relación entre un determinado índice y el tiempo (por ejemplo, pendiente) o como la suma de cada valor de índice a lo largo del período anual.

Determinación del Ciclo de Corta y la Intensidad de Corta Sostenible. La metodología que se empleó es la desarrollada por Louman (2001), la cual describe paso a paso la información necesaria y su tratamiento para las estimaciones.

Para la determinación del ciclo de corta (CC) [2] se tuvo en cuenta una amplitud de clase diamétrica de 5 cm y un valor de crecimiento promedio anual (CPA) de Palo Santo de 0,36 cm año⁻¹. Este valor resultó del promedio de los valores de incremento determinados con técnicas dendrológicas (incremento medio anual (IMA) = 0,42 cm año⁻¹, Giménez *et al.* 2007, 2008; IMA = 0,30 cm año⁻¹ Chifarelli *et al.* 2022) calculados en ambos estudios sobre el espesor de los anillos a la base tomando 4 radios de cada muestra para minimizar el error. Posteriormente se determinó el ciclo de corta (CC) como:

$$CC \text{ en función del espesor de radios} = \frac{AC}{CPA} = \frac{5cm}{0,36 \frac{cm}{año}} = 13,7 \cong 14 \text{ años} \quad [2]$$

Donde, AC corresponde a la amplitud de clase diamétrica de Palo Santo equivalente a 5 cm, CPA es el crecimiento promedio anual del Palo Santo en cm año⁻¹.

La duración del CC indica que una determinada clase diamétrica con 5 cm de amplitud recuperará este recurso luego de 14 años aproximadamente.

Se utilizó el modelo de proporción de movimiento (PM) [3] bajo el supuesto de que los árboles dentro de una clase diamétrica están uniformemente distribuidos y crecen con una misma tasa promedio. La PM se obtuvo

Cuadro 2. Clases de calidad de sitio para bosques con Palo Santo de acuerdo con los valores de área basal, altura dominante y volumen de fuste de la especie.

Site quality classes of forests containing Palo Santo, sorted according to basal area, dominant height and stem volume of the species.

| Clase | Área basal (m ² ha ⁻¹) | Altura dominante (m) | Volumen de fuste (m ³ ha ⁻¹) |
|-------|---|----------------------|---|
| I | > 5 | > 11 | > 9 |
| II | 2 - 4,99 | 9 - 10,99 | 3 - 8,99 |
| III | < 1,99 | < 8,99 | < 2,99 |

dividiendo el crecimiento promedio anual proyectado a 14 años sobre la amplitud diamétrica.

$$PM = \frac{CPA \times CC}{AC} = \frac{0,36 \frac{cm}{año} \times 14 años}{5 cm} = \frac{5,04 cm}{5 cm} = 1,008 \quad [3]$$

La PM indica la cantidad de árboles que se pasarán de una clase a otra después de 14 años. En este caso, la PM obtenida fue de 1,008.

Se utilizó como regla silvícola de aprovechamiento de Palo Santo al diámetro mínimo de corta (DMC), ya que se mantiene como práctica vigente en la región del Parque Chaqueño y las cortas por encima de los 35 cm de diámetro establecido por las tres provincias (MAyDS 2021)

El cálculo de la intensidad de corta sostenible (ICS) [4] se efectuó a partir de la distribución diamétrica del volumen de fuste por clase de calidad de sitio de Palo Santo tomando como referencia el diámetro mínimo de corta (DMC) y CC establecidos, la cual es el cociente entre el volumen de la clase diamétrica que contiene a los árboles que constituyen la futura cosecha, es decir aquellos ubicados en la clase diamétrica inmediata anterior al DMC, según la proporción de movimiento y el volumen de los árboles que se encuentran por sobre el DMC, multiplicado por 100.

$$ICS = \frac{V_0 (clase < DMC \text{ segun } PM)}{V_1 (> DMC)} \times 100 \quad [4]$$

Donde V_0 es el volumen de la clase diamétrica inferior al DMC indicada según la PM y V_1 es el volumen de todas las clases diamétricas superiores al DMC.

De esta manera, se aplicó la ICS de Palo Santo en las clases superiores al DMC.

RESULTADOS

En las figuras 2, 3 y 4 se presentan los bosques con presencia de Palo Santo categorizados de acuerdo al área basal, la altura de los árboles dominantes y el volumen de fuste. La mayor parte de los bosques con área basal media y alta se asociaron a los cursos de agua o paleocauces, mientras que los de baja área basal se ubicaron sobre grandes llanuras sedimentarias asociadas a los posibles movimientos de los ríos en épocas pasadas (figura 2). La exactitud del mapa área basal fue del 61,6 %, lo que da una idea de la alta variabilidad que presentan las condiciones regionales respecto del estado de conservación y desarrollo de la especie.

Al igual que con el área basal, se observó que los sitios de mejor calidad de sitio, tomando como base la altura dominante, estuvieron asociados a los cauces de los ríos (figura 3), en forma similar al volumen de fuste (figura 4). De análisis de la matriz de validación del mapa de altura dominante de Palo Santo, se desprende una exactitud global del 60,9 % y del 62,8 % para el volumen de fustes.

A nivel general, dentro del área de distribución, las calidades de sitio de mayor productividad para el Palo Santo, se ubicaron en los sectores oeste de las provincias de Chaco y Formosa y este de Salta, principalmente asociadas a las cuencas de los ríos.

En el cuadro 3 se presentan las superficies para las clases de altura dominante, área basal y volumen de fuste discriminado para cada provincia. A nivel regional, de la superficie total de bosques con presencia de Palo Santo, el

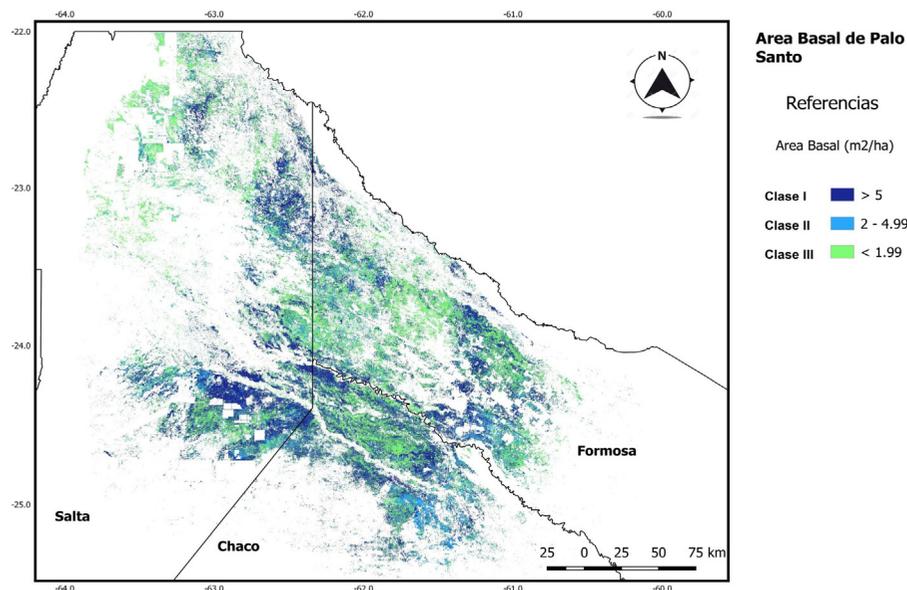


Figura 2. Bosques con presencia de Palo Santo categorizados de acuerdo al área basal de la especie.

Forests containing Palo Santo categorized according to the species' basal area.

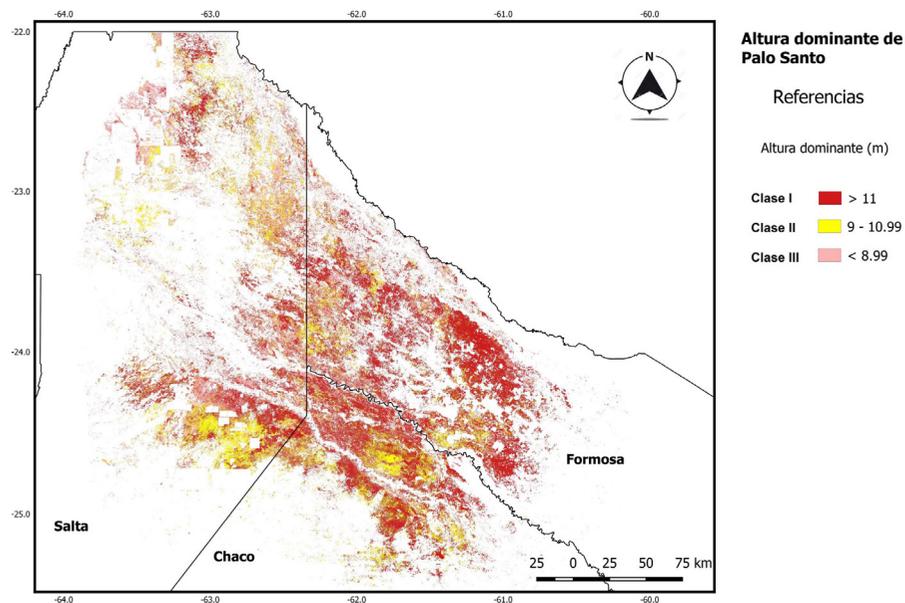


Figura 3. Bosques con presencia de Palo Santo categorizados de acuerdo a la altura dominante de la especie.
Forests containing Palo Santo categorized according to the species' dominant height.

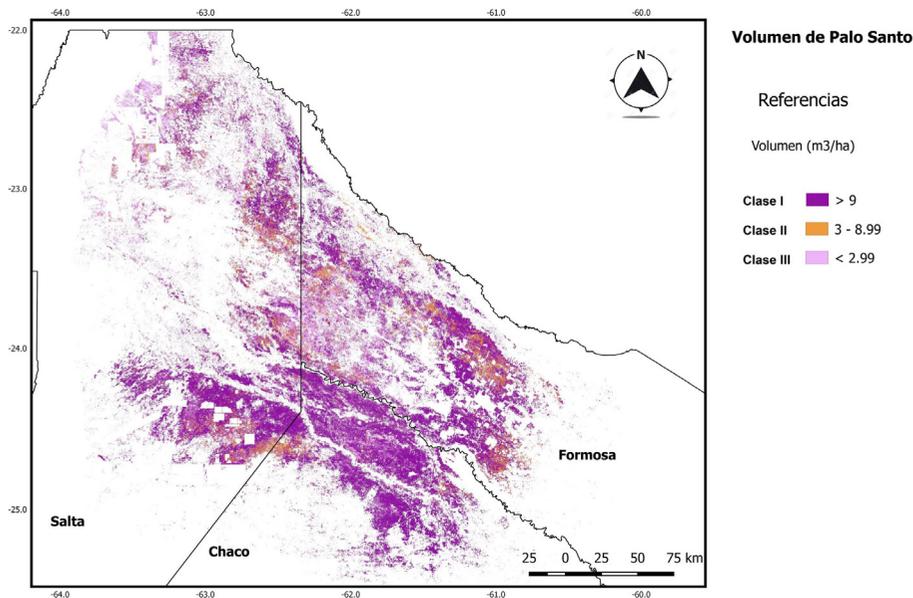


Figura 4. Bosques con presencia de Palo Santo categorizados de acuerdo al volumen de fuste de la especie.
Forests containing Palo Santo categorized according to the species' stem volume.

52 % correspondió a clases de altura dominante > 11 m, el 43 % a clases con área basal > 5 m² ha⁻¹ y el 65 % a clases con volumen de fuste > 9 m³ ha⁻¹ (cuadro 3). Se observó que la provincia de Formosa posee la mayor superficie con las mejores condiciones de altura dominante de Palo Santo (556.307 ha) y Salta con la mayor superficie con valores altos (> 5 m² ha⁻¹) de área basal (447.025 ha) y de volumen > 9 m³ ha⁻¹ (601.996 ha) (cuadro 3).

A partir de la clasificación de la altura dominante de los bosques con Palo Santo se determinaron las clases de calidad de sitio cuyos valores descriptivos se presentan en el cuadro 4.

Con base en los mapas de calidad de sitio propuestos para *G. sarmientoi*, los valores medios y sus desvíos en términos de densidad de individuos, área basal y volumen de fuste por clase diamétrica se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 3. Superficies (ha) para las clases de altura dominante, área basal y volumen de fustes por provincias.

Areas (ha) corresponding to class of dominant height, basal area and stem volume, sorted by province.

| Variable | Clase | Formosa | Chaco | Salta | Total |
|---|----------------|---------|---------|---------|-----------|
| Altura dominante (m) | I (> 11) | 556.307 | 355.159 | 382.451 | 1.293.917 |
| | II (9 - 10,99) | 95.060 | 131.445 | 224.974 | 451.479 |
| | III (< 8,99) | 200.935 | 120.345 | 410.383 | 731.663 |
| Área Basal (m ² ha ⁻¹) | I (> 5) | 324.423 | 288.406 | 447.025 | 1.059.854 |
| | II (2 - 4,99) | 101.900 | 83.446 | 123.033 | 308.379 |
| | III (< 1,99) | 425.979 | 235.097 | 447.749 | 1.108.825 |
| Volumen (m ³ ha ⁻¹) | I (> 9) | 525.286 | 478.788 | 601.996 | 1.606.070 |
| | II (3 - 8,99) | 142.154 | 33.837 | 150.258 | 326.249 |
| | III (< 2,99) | 184.862 | 94.325 | 265.553 | 544.740 |

Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de los bosques de Palo Santo según clases de calidad de sitio.

Descriptive statistics of Palo Santo forests according to site quality class.

| Clase de Calidad de Sitio | Área basal (m ² ha ⁻¹) | Volumen fuste (m ³ ha ⁻¹) | Densidad (ind ha ⁻¹) | Altura dominante (m) |
|---------------------------|---|--|----------------------------------|----------------------|
| I | 6,41 ± 4,52 | 9,422 ± 2,071 | 149,2 ± 185,2 | 13,0 ± 2,1 |
| II | 3,93 ± 3,36 | 4,879 ± 0,934 | 167,2 ± 287,5 | 10,0 ± 0,6 |
| III | 2,51 ± 3,09 | 2,817 ± 0,391 | 200,1 ± 337,0 | 7,0 ± 1,4 |
| Total general | 4,38 ± 4,12 | 5,706 ± 1,443 | 171,8 ± 274,0 | 10,1 ± 3,0 |

Cuadro 5. Densidad (N), área basal (AB) y volumen de fuste (VF) discriminado por clases diamétricas y clases de calidad de sitio basado en la altura de los árboles dominantes (I: > 11 m, II: 9 - 10,99 m; III: < 8,99 m).

Tree density (N), basal area (AB) and stem volume (VF) sorted by diametric class and site quality class based on dominant tree height (I: > 11 m, II: 9 - 10.99 m III: < 8.99 m).

| Clase diámetro (cm) | Clase I (Alta) | | | Clase II (Media) | | | Clase III (Baja) | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | N (ind ha ⁻¹) | AB (m ² ha ⁻¹) | VF (m ³ ha ⁻¹) | N (ind ha ⁻¹) | AB (m ² ha ⁻¹) | VF (m ³ ha ⁻¹) | N (ind ha ⁻¹) | AB (m ² ha ⁻¹) | VF (m ³ ha ⁻¹) |
| 5,0 a 9,9 | 25,9 | 0,12 | 0,181 | 42,2 | 0,20 | 0,305 | 70,2 | 0,31 | 0,463 |
| 10,0 a 14,9 | 20,5 | 0,25 | 0,484 | 22,8 | 0,28 | 0,467 | 35,6 | 0,41 | 0,716 |
| 15,0 a 19,9 | 17,0 | 0,41 | 0,892 | 19,2 | 0,45 | 0,860 | 14,6 | 0,33 | 0,678 |
| 20,0 a 24,9 | 10,6 | 0,43 | 0,923 | 7,2 | 0,28 | 0,579 | 5,1 | 0,20 | 0,385 |
| 25,0 a 29,9 | 7,8 | 0,46 | 0,951 | 5,1 | 0,29 | 0,658 | 2,3 | 0,13 | 0,255 |
| 30,0 a 34,9* | 5,5 | 0,46 | 1,020 | 2,9 | 0,24 | 0,547 | 0,9 | 0,07 | 0,166 |
| 35,0 a 39,9** | 3,9 | 0,43 | 1,024 | 1,6 | 0,18 | 0,409 | 0,2 | 0,02 | 0,045 |
| 40,0 a 44,9** | 2,0 | 0,28 | 0,769 | 1,1 | 0,16 | 0,316 | 0,3 | 0,04 | 0,086 |
| 45,0 a 49,9** | 1,7 | 0,28 | 0,674 | 1,3 | 0,23 | 0,651 | 0,0 | 0,00 | 0,000 |
| 50,0 a 54,9** | 1,2 | 0,26 | 0,781 | 0,0 | 0,00 | 0,000 | 0,1 | 0,02 | 0,022 |
| 55,0 a 59,9** | 0,8 | 0,21 | 0,566 | 0,3 | 0,06 | 0,087 | 0,0 | 0,00 | 0,000 |
| 60,0 a 64,9** | 0,5 | 0,14 | 0,383 | 0,0 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,00 | 0,000 |
| > 65,0** | 0,5 | 0,18 | 0,772 | 0,0 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,00 | 0,000 |
| Total general | 97,8 | 3,91 | 9,422 | 103,7 | 2,37 | 4,879 | 129,3 | 1,54 | 2,817 |

* Clase futura de cosecha, ** Clases aprovechables según DMC.

El volumen de fuste en las clases diamétricas mayores al DMC para la especie se distribuye de la siguiente manera: Clase I: 53 %; Clase II: 30 %, y Clase III: 5,4 % en volumen de fuste (cuadro 5). El volumen de fuste de la clase diamétrica inmediata inferior al DMC (árboles de futura cosecha) según cada clase de sitio fue para la Clase I: 10,8 %; para la Clase II: 11 % y para la Clase III: 5,9 % en volumen de fuste (cuadro 5). Es necesario aclarar que para este trabajo no se dispone de la información acerca de las proporciones de individuos según su estado sanitario por clase diamétrica, lo cual podría influir sensiblemente en los resultados obtenidos.

La ICS calculada a partir de la fórmula [4] para cada clase de sitio en términos porcentuales del volumen de fuste fue de: 20,5 % para la Clase I (equivalente a 1,9 m³ ha⁻¹); 37,4 % para la Clase II (equivalente a 1,8 m³ ha⁻¹) y para la Clase III se obtuvo un valor de 5,4 % (equivalente a 0,2 m³ ha⁻¹).

En consecuencia, los volúmenes aprovechables según la ICS para cada calidad de sitio por provincia se presentan discriminados en el cuadro 6.

DISCUSIÓN

Los datos de crecimiento diamétrico tienen aplicación práctica en la determinación del ciclo de corta y en la regulación de la producción del bosque. Particularmente el crecimiento de la clase diamétrica anterior a la clase aprovechable sirve para calcular el tiempo de tránsito y el ciclo de corta (Araujo *et al.* 2007). En este trabajo se pudo observar que la mayor parte de los bosques con mejores calidades de sitio (Clases I y II) de volumen de fuste, altura total y área basal están asociados a los cursos de agua o paleocauces, es decir, a la mayor disponibilidad de agua. Mientras que los bosques de menor calidad de sitio (Clase III) se extienden sobre grandes llanuras sedimentarias con condiciones edáficas pobres, menor disponibilidad de agua y eventualmente asociados a disturbios (Loto *et al.* 2021). Estos altos valores de área basal en las clases de sitio I y II, indican la presencia de una formación estructural del bosque heterogénea, en términos de estructura horizontal

Cuadro 6. Volumen aprovechable según la intensidad de corta sostenible (ICS) de Palo Santo según clases de calidad de sitio basado en la altura de los árboles dominantes (I: > 11 m, II: 9 - 10,99 m; III: < 8,99 m).

Harvestable volume according to the sustainable cutting cycle of Palo Santo, depending on site quality classes based on dominant tree height (I: > 11 m, II: 9 - 10.99 m; III: < 8.99 m).

| Clase de Sitio | Superficie (ha) | Volumen aprovechable (m ³) |
|----------------|-----------------|--|
| I | 1.293.624 | 2.501.254,9 |
| II | 451.987 | 825.150,5 |
| III | 731.325 | 111.954,1 |

considerando las frecuencias por clases diamétricas, mientras que valores bajos se corresponden a bosques homogéneos según estudios similares de la especie distribuida en Paraguay donde el área basal obtenida fue de 1,6 m² ha⁻¹, (Peña *et al.* 2017).

Los mapas de distribución de las variables evaluadas (área basal, calidad de sitio y volumen de fuste) reflejan la alta variabilidad espacial que presentan las condiciones regionales respecto del estado de conservación y desarrollo de la especie. Esto nos lleva a considerar la necesidad de evaluar condiciones de micro sitio para lograr una mayor exactitud y tener una idea más aproximada de la distribución de estas variables en el territorio, mediante el uso de imágenes de mayor resolución, otros algoritmos, metodologías o una intensidad mayor de muestreo a campo en los inventarios forestales. No obstante, dada la escala de trabajo y la precisión lograda, estos mapas son los primeros instrumentos cartográficos generados para la especie por lo cual se los considera adecuados para el abordaje de los futuros estudios en la temática.

La regla silvícola de aprovechamiento utilizada en el presente trabajo para Palo Santo fue la del diámetro mínimo de corta (DMC), que establece cortas por encima de los 35 cm de diámetro (Waller *et al.* 2012). Sin embargo, estudios realizados por Zerbato *et al.* 2009 y Waller *et al.* 2012 en las localidades de Las Lomitas, Juan Gregorio Bazán e, Ingeniero Juárez de la provincia de Formosa (Argentina), determinaron que solo el 10 % de los árboles remanentes mayores a los 30 cm de DAP se encuentran sanos y con aptitud para el uso, lo que sugiere que la persistencia de los árboles grandes en la masa corresponden a una exclusión del aprovechamiento que hace la industria forestal en la región, dado que las empresas utilizan árboles de mejor sanidad de clases diamétricas inferiores. Esto demuestra, que a pesar de no cumplirse actualmente la regla silvícola del DMC, sobrevive una proporción considerable de árboles, presuntamente sanos, de gran porte que cumple la función de portagranos cuya condición sanitaria reviste de mayor importancia para cumplir este rol.

En las clases de sitio I y II, más del 70 % del área basal se acumula por sobre el DMC, mientras que en el caso del volumen de fuste ese porcentaje es mayor al 80 %, siendo reflejo de la alta productividad de los bosques incluidos en estas clases. En función de cada clase de sitio, tanto el área basal como el volumen de fuste de la clase diamétrica inmediata inferior al DMC presentan un comportamiento similar, siendo mayor en aquellas clases donde se presenta una mayor calidad de sitio.

Se obtuvo una proporción de movimiento de 1,008 por debajo del DMC, con un ciclo de corta de 14 años aproximadamente para un diámetro de 30 a 34,9 cm. Estudios previos de crecimiento y productividad de palo santo en Paraguay (Peña *et al.* 2017) revelan que presentan un crecimiento en diámetro de 0,31 cm año⁻¹, similar al crecimiento obtenido por Giménez (2007, 2008) y Chifarelli (2022) en el norte argentino con un promedio de 0,36 cm

año⁻¹. Esto indicaría que el crecimiento medio anual presenta un ritmo similar en toda su área de distribución, con un ciclo de corta entre 15 y 20 años. Sin embargo, se necesitan mediciones de crecimientos diamétricos relacionados a las diferentes calidades de sitio, manejo silvicultural y estado sanitario para ajustar los valores de la edad del ciclo de corta, lo cual es determinante para definir valores de posibilidad más ajustadas para los bosques con Palo Santo.

Según las superficies de las diferentes clases de sitio en cada provincia, Salta cuenta con el 37 % del total del volumen, Formosa el 35 %, y la provincia del Chaco cuenta con el 28 %.

Teniendo en cuenta la información brindada por el MAyDS (2021) la cual refleja que la demanda actual de la especie es creciente debido al incremento en los volúmenes exportados y al consumo cuyo destino tiene el mercado de artesanías regionales, las existencias en términos de volumen aprovechable de las clases de calidad de sitio I y II pueden satisfacer dicha demanda y sostenerla en el tiempo.

CONCLUSIONES

Las existencias estimadas de Palo Santo, en primera instancia, permiten suponer que son suficientes para continuar con su aprovechamiento sostenible, siempre que se mantengan las condiciones actuales de aprovechamiento, sin comprometer su persistencia como recurso maderero y no maderero, no obstante, es necesario profundizar el estado del conocimiento a través de estudios que tengan en cuenta la influencia del estado sanitario, las condiciones de micrositio y el manejo silvicultural sobre el crecimiento y la regeneración natural. El presente trabajo aporta información valiosa a escala regional para los tomadores de decisión como herramienta para el desarrollo de planes de manejo; reflejando el potencial forestal de la especie y su aporte tanto a las economías regionales como al desarrollo de los entramados productivos provinciales.

REFERENCIAS

- Araujo P, M Juárez de Galíndez, M Iturre. 2007. Crecimiento de las especies principales de un bosque en regeneración del Chaco Santiagueño. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales* (14): 36-46. Consultado el 25 noviembre 2022. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101404>
- Barstow M. 2018. *Bulnesia sarmientoi*: The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T32028A68085692. DOI: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T32028A68085692.en>
- Cabrera AL. 1976. Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería Regiones Fitogeográficas Argentinas. Buenos Aires, Argentina. Acme. 85 p.
- Carrero O, M Jerez, R Macchiavelli, G Orlandoni, J Stock. 2008. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia* 33(4): 265-272. Consultado el 25 noviembre 2022. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933406>
- Céspedes G, F Mereles, RM Navarro-Cerrillo. 2018. Método cualitativo para la determinación del estatus de conservación de *Bulnesia sarmientoi* (Zygophyllaceae) en Paraguay con fines de exportación. *Collectanea Botanica* 37: e006. DOI: <https://doi.org/10.3989/collectbot.2018.v37.006>
- Chifarelli V, M Senilliani, T Longhi-Santos, J Moglia, A Gimenez. 2022. *Gonopterodendron sarmientoi* Lorentz ex Griseb (Palo santo): evaluación del crecimiento para fines maderables. *Revista Madera y Bosques* 28(1). e2812401. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812401>
- CITES (Convention on International Trade in Endangered Species). 2010. Examen de las propuestas de enmienda a los apéndices I y II. 15 Reunión de la Conferencia de las Partes. Doha, Qatar.
- Giménez AM, J Moglia. 2003. Árboles del Chaco Argentino. Guía para el reconocimiento dendrológico. Santiago del Estero, Argentina: Editorial Secretaría de Recursos Naturales de La Nación.
- Giménez AM, P Hernández, C Spagarino, J Moglia, Ríos N. 2008. Calidad de madera y potencialidad de crecimiento de Palo Santo (*Bulnesia sarmientoi* Lorentz ex Griseb.) *Yvyrareta* 15: 60-67. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: <http://www.vvyrareta.com.ar/index.php/component/k2/item/149-calidad-de-madera-y-potencialidad-de-crecimiento-de-palo-santo-i-bulnesia-sarmientoi-i-lorentz-ex-griseb>
- Giménez AM, P Hernández, R Gerez, Spagarino C. 2007. Anatomía de leño y anillos de crecimiento de Palo Santo (*Bulnesia sarmientoi* Lorenz ex Griseb Zygophyllaceae). *Quebracho* 14: 23-35. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30262007000100004
- Gomez C, S Kees, J Skoko. 2013. Estructura, Sanidad y Composición Florística del Bosque del predio de la EEA Ing. Guillermo N. Juárez en la Provincia de Formosa-Argentina. Ediciones INTA. 27 p. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_inv_for_corregido_final_para_publicacion_forma.pdf
- Kershaw J A, M Ducey, T Beers, B Husch. 2017. Forest mensuration. 5th edition. Wiley/Blackwell, Chichester, UK. Hoboken, NJ.
- Lamprecht H. 1990. Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Eschborn, Germany. GTZ. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. 335 p.
- Loto D, S Kees, M Azcona, S De Telleria, E Manghi, J Gaitan, C Spagarino, I Gasparri, PL Peri. 2021. Estructura de bosques con Palo Santo (*Gonopterodendron sarmientoi*): Evaluación regional para su manejo y conservación en la Argentina. *Ecología Austral* 31: 558-574. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.3.0.1795>
- Loto DE, I Gasparri, M Azcona, S García, C Spagarino. 2018. Estructura y dinámica de bosques de Palo Santo en el Chaco Seco. *Ecología Austral* 28: 064-073. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.615>
- Louman B. 2001. Levantamiento de información y toma de decisiones. In Louman B, D Quirós, M Nilsson eds. 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis

- en América Central. Serie Técnica. Manual Técnico n° 46. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 175-228 p. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3971/Silvicultura_de_bosques.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- MAYDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, AR). 2020. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: informe Parque Chaqueño: primera revisión. Buenos Aires, Argentina. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_region_forestal_parque_chaquito_primeira_revision_0.rar
- MAYDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, AR). 2021. Informe de estado de implementación. Ley N° 26331 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2020/10/2021_informe_estado_implementacion.pdf
- MAYDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, AR). 2021. Resolución 059/2021. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-59-2021-347840>
- Montero G, A Rojo-Alboreca, M Río, F Alvarez-Taboada. 2001. Aspectos selvícolas y económicos de los pinares de “*Pinus Sylvestris* L.” en el Sistema Central. *Revista española de estudios agrosociales y pesqueros* 193: 27-56. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=261640&orden=104889&info=link>
- Peña M, R Dure Rodas, R Barreto, M Quintana, L Pérez de Molas, V Soerensen, M Villalba, T Rios. 2017. Dictamen de Extracción No Perjudicial de *B. sarmientoi* Lorentz ex Griseb. (Palo Santo), en Paraguay. Dirección General de Protección y Conservación de la Biodiversidad Dirección de Investigación Biológica / Museo Nacional de Historia Natural del Paraguay Autoridad Científica CITES PY. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en: https://cites.org/sites/default/files/ndf_material/Dictamen%20de%20Extracci%C3%B3n%20No%20Perjudicial%20de%20Bulnesia%20sarmientoi%20Lorentz%20ex%20Griseb.%2C%20en%20Paraguay.pdf
- Peri PL, J Gaitán, D Loto, S Kees, M Azcona, S De Telleria, I Teich, E Manghi, GA Camps. 2022. Linking species distribution and territorial planning to the management of the endangered *Gonopterodendron sarmientoi* in native forests of the Chaco region, Argentina. *Journal for Nature Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126220>
- SAyDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, AR) 2014. Inventario forestal en bosques con presencia de Palo Santo (*Bulnesia sarmientoi*) en la zona del parque chaqueño semi-árido. Provincias de Salta y del Chaco, Informe final, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Dirección de Bosques. Ministerio de Salud y Ambiente. Fundación ProYungas. Buenos Aires, Argentina.
- SAyDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, AR). 2019. Resolución 108/2019. Disponible en: <https://www.boletinooficial.gob.ar/detalleAviso/primer/203461/20190318>
- Souza Jr CM, DA Roberts, MA Cochrane. 2005. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment* 98(2-3): 329-343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.013>
- Thren M. 1993. Serie técnica forestal dasometría Apuntes de Clase. Proyecto UNSE/GTZ. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.
- Waller T, M Barros, J Draque, P Micucci. 2012. Conservation of the Palo Santo tree, *Bulnesia sarmientoi* Lorentz ex Griseb, in the South American Chaco Region. *Medicinal Plant Conservation* 15: 4-9. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en https://www.academia.edu/2120881/Conservation_of_the_Palo_Santo_tree_Bulnesia_sarmientoi_Lorentz_ex_Griseb_in_the_South_American_Chaco_Region
- Zerbatto M, W Degano, M Barros, J Draque, E Alvarenga, T Waller (2009). Situación de la especie Palo Santo (*Bulnesia sarmientoi* Lorentz ex Griseb.) en la provincia de Formosa: estudio de sitios de extracción en los departamentos Matacos y Bermejo. Fundación Biodiversidad Argentina. Argentina. 45 p. Consultado 25 noviembre 2022. Disponible en https://www.academia.edu/3481993/Situaci%C3%B3n_de_la_especie_Palo_Santo_Bulnesia_sarmientoi_Lorentz_ex_Griseb_en_la_provincia_de_Formosa_estudios_de_sitios_de_extracci%C3%B3n_en_los_Departamentos_Matacos_y_Bermejo

Recibido: 03.06.21
Aceptado: 07.10.22