

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Capacidad de provisión de servicios ecosistémicos en la ecorregión de las Yungas (Argentina): análisis y evaluación



CONAMA 2024

CAPACIDAD DE PROVISIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA ECORREGIÓN DE LAS YUNGAS (ARGENTINA): ANÁLISIS Y EVALUACIÓN

Autor Principal: Mosconi, Laura Ailén (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional -INENCO-, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET-, Universidad Nacional de Salta -UNSa-, Salta, Argentina, lauraailen.mosconi@gmail.com).

Otros autores: Subelza, Carolina del Rosario (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional- INENCO-, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET-, Universidad Nacional de Salta -UNSa-, Salta, Argentina, c.subelza.95@gmail.com); Manrique, Silvina Magdalena (Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Campus Científico Tecnológico, Universidad de Alcalá, ctra. Madrid-Barcelona km 33,600, código 28802, Alcalá de Henares, Madrid, España, silvina.manrique@uah.es).

ÍNDICE

ÍNDICE	1
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Servicios ecosistémicos.....	2
1.2. Soluciones basadas en la naturaleza.....	3
1.3. Ecorregión de Yungas, Argentina.....	4
2. Estudio de casos	5
3. Resultados	9
4. Discusión	11
4.1. Servicio ecosistémico almacenamiento de carbono.....	11
4.2. Servicio ecosistémico de calidad de suelo.....	12
4.3. Servicio ecosistémico de biodiversidad.....	13
4.4. Servicio ecosistémico de provisión de madera.....	14
4.5. Certificaciones de sostenibilidad y soluciones basadas en la naturaleza: aplicación en la cuenca forestal.....	15
5. Conclusiones finales	16
6. Agradecimientos	17
7. Bibliografía	17

RESUMEN

Las poblaciones humanas obtienen de los ecosistemas múltiples bienes y servicios que aseguran su bienestar. La estructura y los componentes de los ecosistemas, tanto bióticos como abióticos, junto con sus interacciones, determinan la capacidad del ecosistema de proveer dichos servicios ecosistémicos (SE). En particular, la ecorregión de Yungas Andinas Meridionales, en adelante Yungas, caracterizada por selvas de montaña que se extienden sobre los faldeos orientales de la cordillera de los Andes y que ocupa en Argentina más del 8% de la superficie boscosa nacional, constituye una fuente de provisión de innumerables SE y es uno de los principales reservorios de biodiversidad del país. Sin embargo, en la actualidad se encuentra amenazada principalmente por el cambio de uso de suelo (deforestación) y la sobreexplotación maderera (degradación), que ha afectado por décadas los distritos forestales inferiores de la ecorregión. Con el propósito de poner en valor el bosque nativo como proveedor de bienes y servicios y asegurar su potencial a largo plazo, nuestro proyecto tuvo como objetivos: caracterizar el estado actual del bosque nativo analizando la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos, y definir estrategias optimizadas de gestión. El proyecto se desarrolló en una gran cuenca forestal de la provincia de

Jujuy que cuenta con más de 740000 ha. El diseño del estudio fue de tipo observacional y la estrategia seleccionada fue la investigación basada en estudio de casos. Se seleccionó un caso para cada uno de los sistemas de gestión forestal más frecuentes (uso intensivo: caso A, uso parcial: caso B y sin intervención: caso C, bosque de referencia), con una superficie media de 2000 ha. Se definió una metodología propia, que fue utilizada para evaluar los tres estudios de caso y fue puesta a punto para replicar en toda la cuenca forestal. Se estudiaron los siguientes SE: i) almacenamiento de carbono (biomasa aérea leñosa, hojarasca y suelo); ii) calidad del suelo (calidad física y química); iii) biodiversidad (especies bajo riesgo, composición florística y estructura arbórea); y iv) provisión de madera (volumen maderable). La metodología resultó útil y ágil para la evaluación de los SE definidos. Los SE se encuentran reducidos en su potencialidad en los bosques intervenidos respecto del bosque de referencia: entre un 44-62% (con significancia estadística) en el almacenamiento total de carbono; entre un 14-23% en relación a la calidad del suelo (con significancia estadística entre el caso A y C); entre 43-22% en el servicio de biodiversidad; y entre un 60-71% en la provisión de madera (aunque sin significancia estadística). Se plantean reflexiones y estrategias para conservar y aumentar la potencialidad de los ecosistemas en su provisión de SE y promover su manejo racional a largo plazo, valorizando su importancia en el marco del cambio climático, el Convenio de Diversidad Biológica y la Agenda 2030.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Servicios ecosistémicos

Es una realidad bien conocida que las poblaciones humanas han dependido y dependen de los ecosistemas para asegurar su bienestar y supervivencia. Los ecosistemas nos proveen desde elementos básicos, como alimento, fuentes de energía y materiales de construcción, hasta las condiciones apropiadas para vivir, mediante las funciones de regulación de la calidad del agua, suelo y clima, y además influyen en los valores culturales y espirituales. Estos bienes y servicios son conocidos como servicios ecosistémicos (SE), y si bien existen diferentes marcos teóricos para abordar su concepto y clasificación, dependiendo del enfoque de estudio, contexto histórico, geográfico y político, el concepto vincula los ecosistemas con el bienestar humano y sus necesidades [1-2-3]. Por lo tanto, es importante mantener la estructura de los ecosistemas, sus componentes bióticos y abióticos, y sus interacciones, ya que esto determina la capacidad de proveer dichos SE y su funcionamiento [4]. Bajo este contexto, la gestión adecuada de todos los ecosistemas de forma sostenible es clave para contribuir con el objetivo de alcanzar el crecimiento económico que permita tanto la inclusión social, como la protección ambiental, y así garantizar los recursos para nuestra generación sin comprometer los de las generaciones futuras, como proyecta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Los ecosistemas forestales en particular, cumplen un rol muy importante en la provisión de SE a nivel mundial, nacional y regional. Son el hábitat de múltiples especies, por lo que contribuyen a la conservación de la biodiversidad; constituyen el reservorio de carbono terrestre más importante, y secuestran carbono durante su crecimiento, mitigando los gases de efecto invernadero (GEI) y regulando el clima mundial; además, regulan los ciclos hidrológicos, controlando los caudales, previniendo inundaciones y manteniendo la calidad del agua; y, por otro lado, fijan y forman el suelo, aumentan el carbono orgánico y previenen la desertificación

[5]. Localmente, son fuente de ingresos para los pobladores y forman parte de las creencias y valores culturales.

Sin embargo, los bosques nativos han sido sometidos a procesos de deforestación, estimándose una pérdida del 46% de los bosques del mundo desde los inicios de la civilización hasta el año 2015 [6]. El balance neto de emisiones por año debidas a los cambios de uso del suelo, sobre todo relacionadas con la deforestación, corresponde al 14% de las emisiones antropogénicas totales, calculadas en el periodo 2010-2019 [7]. En la actualidad el almacenamiento de carbono de los ecosistemas boscosos del mundo está muy por debajo de su potencial natural [8].

Según el último informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [9], gran parte de los países de América Latina, incluida Argentina, muestran un deterioro en la tasa de crecimiento anual de los bosques, lo que implica una reducción de la superficie forestal, sobre todo debido a los avances en la agricultura. Los esfuerzos regionales por mantener las áreas forestales son esenciales, especialmente en los países en desarrollo.

Frente a esto, han surgido organizaciones como la Forest Stewardship Council (FSC) o Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC), que, mediante la certificación bajo estándares y criterios de sostenibilidad, promueven y garantizan que los bosques sean manejados correctamente, que la cadena de producción asociada a los recursos madereros sea adecuada, tanto ambiental, social como económicamente, y que el manejo de los bosques conserve o aumente la provisión de SE. Estos elementos, constituyen una oportunidad para los dueños de los bosques y establecimientos de la cadena forestal, de crecer en el mercado con productos de mayor valor agregado y de mayor demanda en la actualidad, gestionando sosteniblemente los bosques. Además, promueve la valoración de los bosques más allá de la provisión de recursos madereros, para poder asegurar tanto su conservación como la provisión de los múltiples SE que aseguran la salud de los ecosistemas y actividades humanas.

1.2. Soluciones basadas en la naturaleza

Las actividades humanas han sido responsables de un aumento de la temperatura media global de 1,1°C en relación con los niveles de 1850-1900, en 2011-2020, registrándose ya eventos climáticos extremos, como aumento de temperaturas calientes máximas, fuertes precipitaciones y sequías más acentuadas, provocando la escasez de alimentos y mortalidad en áreas vulnerables [10]. Según el último Informe de Síntesis del IPCC 2023 [10], para limitar a nivel mundial el aumento de la temperatura a 1,5°C o a 2°C es necesaria una rápida y profunda reducción, y hasta inmediata, de las emisiones de GEI en todos los sectores, durante esta década. Sin embargo, es imposible la reducción de las emisiones a cero de forma inmediata, debido a los sectores industriales, por lo que son necesarias otras alternativas complementarias que permitan la eliminación de GEI [11]. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), son acciones proyectadas con el objetivo de proteger los ecosistemas de la pérdida y degradación, de gestionar los ecosistemas sosteniblemente y de restaurar ecosistemas naturales o modificados [12] y son un complemento para la descarbonización, y permiten alcanzar el cumplimiento de diversos ODS [12]. Las SBN tienen que ser necesariamente complementadas con la reducción de emisiones provenientes del sector de la industria, energía y transporte, para lograr dichos objetivos [12]. Girardin et al. (2021) concluyen en su investigación que las SBN, aun llevándose a cabo la descarbonización por las industrias, pueden ayudar a reducir el

calentamiento global, siendo más significativa su contribución en el escenario de 2°C, debido al tiempo en lograr un impacto sobre el pico de temperatura [11]. La solución que promete un mayor potencial de mitigación es la protección de los ecosistemas [12], dado que reducir las emisiones al evitar la pérdida de ecosistemas es la opción más rentable y rápida a corto plazo, mientras que la restauración es esencial para el mantenimiento de las cualidades intrínsecas de los ecosistemas. En cuanto al potencial de mitigación de las soluciones referidas a bosques, la protección es la práctica que proyecta mejores resultados, seguida de la reforestación [12-13].

1.3. Ecorregión de Yungas, Argentina

Las Yungas son bosques de montaña que se extienden sobre las laderas orientales de la cordillera de los Andes desde el sur de Bolivia hasta el noroeste de Argentina, donde forman una franja que se despliega de norte a sur por las provincias de Salta, Jujuy y Tucumán, hasta el norte de Catamarca [14-15]. Se caracterizan por un fuerte gradiente altitudinal que hace a la región muy heterogénea en la composición de la vegetación y condiciones climáticas y también, un gradiente latitudinal de biodiversidad originado principalmente por la discontinuidad de las masas boscosas, producto de la distribución irregular de los cordones montañosos [16]. Poseen una vital importancia para la región debido a su gran diversidad biológica, por ser cabecera de importantes ríos y por la captación de agua de lluvias y niebla durante todo el año, lo que regula el régimen hídrico [17]. Esta ecorregión ha sido fuertemente modificada desde principios del siglo XX, principalmente por los desmontes destinados a la agricultura, y por la extracción de madera selectiva de especies con gran valor económico [14,16]. El piso altitudinal más afectado es la Selva Pedemontana, que corresponde al sector más bajo, el cual para el año 2005 contaba con 560000 hectáreas deforestadas para agricultura solo en el sector norte de la ecorregión, estimando que se encuentra transformado el 80% del piso altitudinal. Si bien la Selva Pedemontana se menciona como una región de transición entre las Yungas y la ecorregión Chaqueña, presenta características únicas: una estacionalidad muy marcada (el 70% de las especies pierden sus hojas), posee un gran porcentaje de especies exclusivas, presenta humedales importantes para la región y junto con los restantes pisos altitudinales, representa una de las áreas con mayor riqueza específica del país [16]. Por otro lado, las Yungas son importantes sumideros de carbono, mitigando el efecto de los GEI y presentando, junto con todos los bosques andinos, un incremento neto de 0,67 MgC.ha⁻¹año⁻¹ [18].

Con el propósito de poner en valor el bosque nativo del noroeste de Argentina, como proveedor de bienes y servicios y asegurar su potencial a largo plazo y capacidad de mitigación de GEI, nuestro proyecto tuvo como objetivos:

- Caracterizar el estado actual del bosque nativo analizando la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos, estudiando tres sistemas de gestión forestal representativos de la región.
- Definir, ensayar y ajustar una metodología propia, potencialmente aplicable en la cuenca, para la determinación de los servicios ecosistémicos de los bosques.
- Proponer estrategias de gestión para optimizar el potencial de SSEE de los bosques nativos a largo plazo.

2. ESTUDIO DE CASOS

El proyecto se desarrolló en una gran cuenca forestal de la provincia de Jujuy, Argentina, que cuenta con más de 740000 ha, a 130 km aproximadamente de la capital, San Salvador de Jujuy (23° latitud sur y 64° longitud oeste) (Figura 1). La temperatura media anual en la zona de estudio es de 20,8°C y la precipitación de 825mm [19]. La altitud oscila entre 400 y 700 msnm. Los suelos predominantes son del orden molisol y entisol según la clasificación USDA (Soil Taxonomy). Las especies más abundantes son palo amarillo (*Phyllostylon rhamnoides*), palo blanco (*Calycophyllum multiflorum*), cedro (*Cedrela balansae*), quina (*Myroxylon peruiferum*), cebil colorado (*Anadenanthera colubrina*), entre otras, y la vegetación muestra facetas del ecosistema de Yungas y de transición a la ecorregión Chaqueña occidental. Debido a las características mencionadas, la región se corresponde con la zona de vida de bosque seco subtropical (bs-ST) según Holdridge (1967) [20]. Una de las actividades económicas más importantes en esta región es la industria forestal, en la cual la materia prima predominante es de origen nativo, siendo, por lo tanto, importante el uso sostenible y responsable de estos bosques.

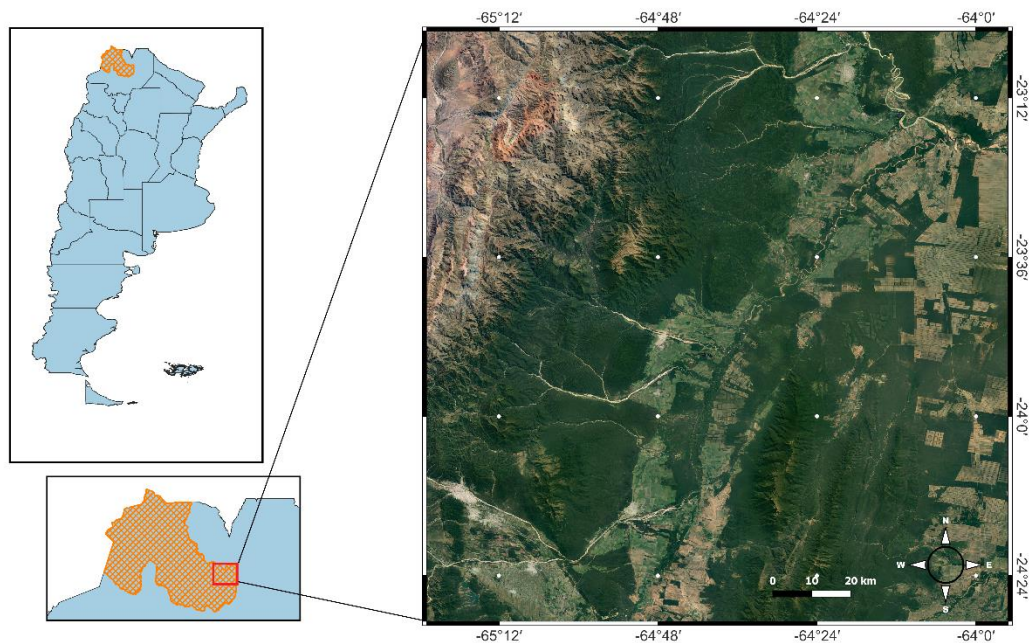


Figura 1. Zona de estudio.

El diseño del estudio fue de tipo observacional y la estrategia seleccionada fue la investigación basada en estudio de casos. Se seleccionó un caso para cada uno de los sistemas de gestión forestal más frecuentes: uso intensivo (caso A), uso parcial (caso B) y sin intervención (caso C), con una superficie total media de 2000 ha (Figura 2). El caso C fue considerado como caso de referencia para su comparación con los otros sistemas de gestión.



Caso A

Caso B

Caso C

Figura 2. Casos de estudio (Jujuy, Argentina). Donde: Caso A (bosque bajo uso intensivo), Caso B (bosque bajo uso parcial) y Caso C (bosque sin intervención). (Fuente propia)

Se analizaron cuatro servicios ecosistémicos provistos por el bosque: 1) Almacenamiento de carbono, 2) Calidad del suelo, 3) Biodiversidad, 4) Provisión de madera.

El almacenamiento de carbono es uno de los servicios clave en la actualidad ya que permite la mitigación del dióxido de carbono contenido en la atmósfera y las Yungas han sido reportadas como sumideros de carbono [18], almacenándolo tanto en la biomasa aérea, como en el suelo y hojarasca [21]. Por otro lado, la cobertura boscosa provee el servicio de calidad del suelo, que permite mantener el ciclo hidrológico y varios procesos importantes, tales como la infiltración del agua, la recarga de aguas subterráneas, el almacenamiento de agua en el suelo para la absorción por parte de la vegetación y la consecuente productividad y por último, el control de la escorrentía y erosión [22-23], siendo importantes las características físicas, y químicas del suelo, como su densidad aparente, contenido de materia orgánica, y cantidad de agua disponible para la vegetación. Como tercer SE estudiado, la biodiversidad del bosque es esencial para el funcionamiento del ecosistema y es el sustento de los demás servicios ecosistémicos [1], siendo mencionada como un servicio de soporte. Por último, se decidió trabajar con el servicio de provisión más característico de estos bosques, que es la provisión de madera.

Para lograr una aproximación a la realidad de los ecosistemas, se decidió trabajar con variables cuantitativas (indicadoras), de fácil medición a campo y sencillo procesamiento posterior, a partir de las cuales se determinaron aspectos intermedios (categorías) relacionados con la calidad de cada SE, construyendo con éstos, finalmente, el rendimiento de cada SE (Figura 3, Cuadro 1). Para el cálculo del rendimiento de los SE se procedió a sumar, con igual peso, los valores de las categorías y relativizar el resultado en función del caso C, de referencia, por lo que el rendimiento final de cada SE (SC: rendimiento servicio carbono, SS: rendimiento servicio de calidad de suelo, SB: rendimiento servicio de biodiversidad y SPM: rendimiento servicio de provisión de madera) es adimensional. Además, se calculó el rendimiento total, sumando el

CAPACIDAD DE PROVISIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA ECORREGIÓN DE LAS YUNGAS (ARGENTINA): ANÁLISIS Y EVALUACIÓN

rendimiento de cada servicio, otorgándole un mayor peso al SB, dado que es el sustento y la base de los otros SE. Este valor también se reportó como relativo al caso C, y su valor es adimensional.

Cuadro 1. Categorías y variables definidas para el análisis de los servicios ecosistémicos. Donde: adim= adimensional y *= según se definió en Materiales y métodos.

Servicio ecosistémico	Categoría	Variable	Método	Referencia
Almacenamiento de carbono (tC.ha ⁻¹)	Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea leñosa (tC.ha ⁻¹)	Diámetro a la altura del pecho de los árboles (cm)	Medición con una cinta métrica	[34]
		Altura total (m)	Prueba de la vara	[34]
		Especie (adim)	Identificación en campo mediante bibliografía de referencia	[35] [36]
	Almacenamiento de carbono en el suelo (30 cm profundidad) (tC.ha ⁻¹)	Carbono orgánico (%)	Método micro Walkley- Black a partir de muestras de suelo	[37]
		Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Método del cilindro	[38]
	Almacenamiento de carbono en la hojarasca (tC.ha ⁻¹)	Peso de muestra de hojarasca (g)	Pesado en campo	[28]
		Fracción seca hojarasca (adim)	Secado en estufa de las muestras	[28]
Calidad del suelo (adim)	Calidad física	Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Método del cilindro	[38]
		Agua disponible (%)	Determinación de contenido de humedad en laboratorio	Método propio
	Calidad química	Materia orgánica (%)	Método micro Walkley- Black a partir de muestras de suelo	[37]
Biodiversidad (adim)	Especies bajo riesgo	Abundancia de especies amenazadas (adim)	Identificación de especie y conteo de árboles adulto en campo	[30]
		Abundancia de especies de Importancia biológica* (adim)	Identificación y conteo de árboles adultos en campo	[36] [39]
		Número de especies amenazadas con frecuencia por bosque igual a 1 (adim)	Identificación y conteo de árboles adultos en campo	[36] [39]
	Composición florística	Diversidad mediante el índice de Shannon (adim)	Identificación y conteo de árboles adultos en campo	[36] [39]
		Riqueza específica (adim)	Identificación y conteo de especies	[36]
	Estructura arbórea	Diámetro de los árboles (cm)	Medición con una cinta métrica	[34]
		Altura de los árboles (m)	Prueba de la vara	[34]
Provisión de madera (m ³ .ha ⁻¹)	Volumen maderable (m ³ .ha ⁻¹)	Diámetro de los árboles (cm)	Medición con una cinta métrica	[34]
		Altura del fuste (m)	Prueba de la varar	[34]
		Calidad del árbol (adim)	Identificación en campo de la calidad de los árboles adultos (buena, deforme o bifurcado, hueco, muerto o caído)	[34]

Fuente: Propia

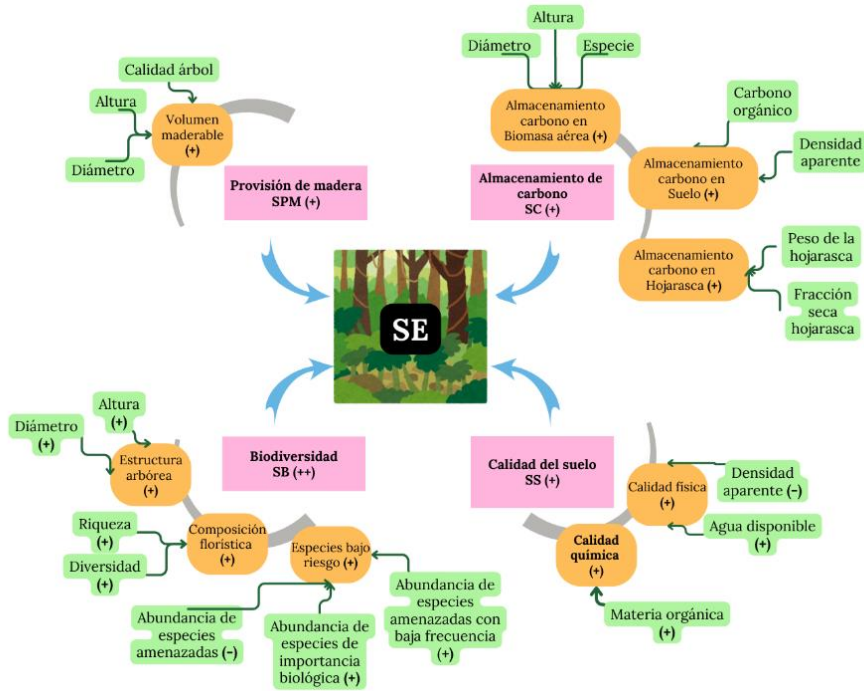


Figura 3. Esquema metodológico utilizado, donde se incluyen: a) en verde, las variables; en naranja, las categorías intermedias; en rosa, los servicios ecosistémicos. Los signos + representan un efecto positivo, y los signos – representan un efecto negativo sobre las categorías construidas, el rendimiento de cada SE y el rendimiento total. (Fuente propia)

El almacenamiento de carbono en la biomasa aérea se calculó mediante la utilización de las ecuaciones alométricas reportadas por [24-25-26] para zonas ecológicas similares, utilizando la fracción de carbono 0,47 [27]. Para la determinación del carbono en la hojarasca se siguió la metodología citada en [28] y se utilizó el valor de 0,37 para la fracción de carbono [29]. La metodología seguida para el cálculo del carbono almacenado en el suelo, se describe en [21]. La categoría de calidad física del suelo se obtuvo sumando los valores de cada variable, excepto por la densidad aparente que se restó al tener un efecto negativo, todas con igual peso. Esto mismo se realizó con la categoría composición florística y estructura vegetal, otorgando un peso positivo a todas sus variables. En particular para la categoría “Especies bajo riesgo”, se tuvieron en consideración tres aspectos ecológicos importantes en los casos de estudio. El primero es la abundancia de especies presentes reportadas en las categorías de la IUCN 2024 [30], casi amenazada (NT), vulnerable (VU) y en peligro (EN). El segundo es la importancia biológica, definido aquí, como especies de lento crecimiento: *Phyllostylon rhamnoides*, *Calycophyllum multiflorum* y *Handroanthus impetiginosus* [31], especies semilleras a grandes diámetros: *Amburana cearensis* [33] y ejemplares importantes para la nidificación de aves: árboles de *Amburana cearensis* y *Calycophyllum multiflorum* con huecos y árboles muertos en pie de *Myroxylon peruiferum* y *Anadenanthera colubrina* [14] y el tercero es la frecuencia de aparición en los casos de estudio, es decir si las especies en alguna categoría de amenaza de la IUCN se encontraron en uno, dos o los tres casos de estudio. Se determinó que el efecto de la abundancia de especies reportadas en categorías de amenaza, es negativo sobre la categoría de “especies bajo riesgo”, y por lo tanto negativo para el SE de biodiversidad, ya que los bosques con mayor predominancia de estas especies representan ecosistemas fragilizados, en los cuales sería

necesario la preservación de ellas. Por lo tanto, para la conformación de la categoría “especies bajo riesgo” se restó el valor de esta variable, y se sumó el valor de la abundancia de especies de importancia biológica y la abundancia de las especies amenazadas de frecuencia 1.

Para el cálculo del volumen maderable solo se consideraron los árboles adultos de calidad 1 (sanos y de fuste recto), utilizando el factor de forma de 0,65 citado para los árboles de esta región por otros autores [33], y la altura del fuste (desde la base hasta la primera ramificación). Solo se consideraron árboles adultos de diámetro a la altura del pecho ≥ 10 cm, para los SE de almacenamiento de carbono, biodiversidad y volumen maderable.

Los datos obtenidos se exploraron primero mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP), analizando las variables de mayor influencia en la caracterización de los casos bajo estudio, además de gráficos descriptivos. Luego se realizaron análisis estadísticos mediante el software Infostat v. 2020 [40] aplicando la prueba de ANOVA con un nivel de confianza del 95%. De no cumplir las variables con los supuestos se utilizaron test no paramétricos.

3. RESULTADOS

De forma exploratoria, los casos de estudio parecieron diferenciarse en relación a las variables cuantitativas, observando su proyección sobre el componente principal 1 (CP1) (Figura 4).

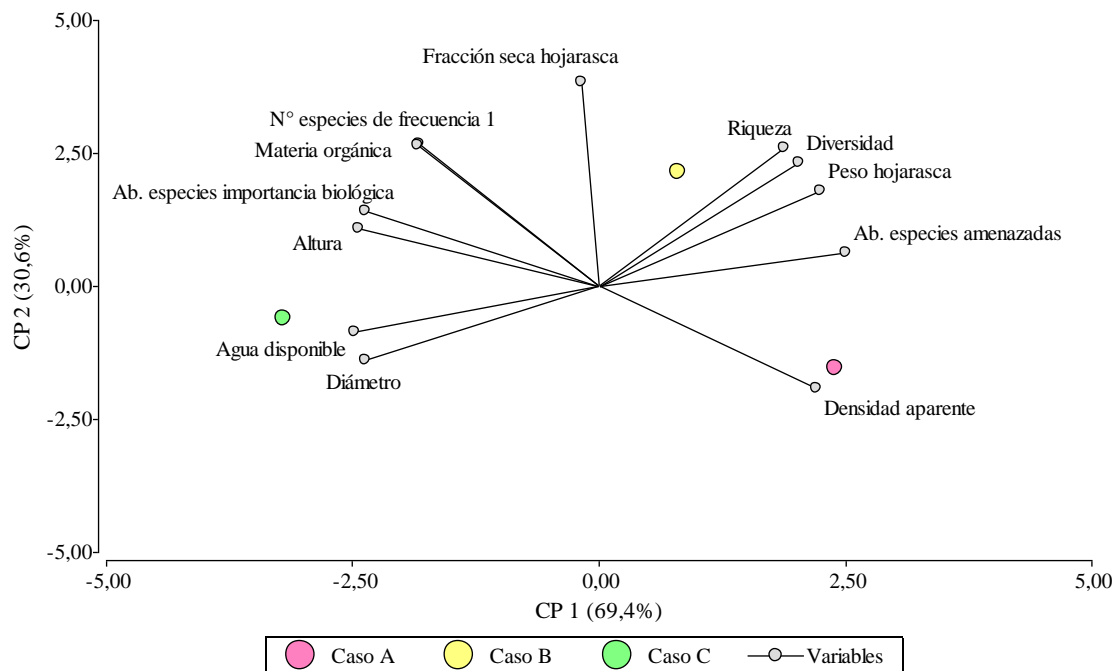


Figura 4. Gráfico Biplot del Análisis de Componentes Principales obtenido a partir de las variables estudiadas. (Fuente propia)

El CP1 muestra que el caso C, sin intervención, se asoció con mayor contenido de agua disponible, árboles de mayor altura y diámetro y mayor abundancia de especies de importancia biológica; mientras que el caso A se caracterizó por mayor abundancia de especies amenazadas, mayor densidad aparente y mayor peso de hojarasca. Estos dos casos parecerían separarse,

primeramente, proyectándose en orientaciones opuestas sobre el CP1 y las variables nombradas son las que tuvieron mayor peso sobre este componente. Por otro lado, en el CP2 la variable con mayor importancia y proyección positiva fue la fracción seca de hojarasca, seguida del contenido de materia orgánica, abundancia de especies de frecuencia igual a 1, riqueza y diversidad. La proyección del caso B, es cercana a las proyecciones de estas variables sobre este eje, infiriéndose que este caso de estudio tuvo mayor aptitud en estas variables.

Por otro lado, en relación con las categorías definidas a partir de las variables cuantitativas recién mencionadas, el caso C de referencia fue dominante en las categorías de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, calidad física del suelo, especies bajo riesgo, estructura arbórea y volumen maderable, mientras que el caso B lo fue en las categorías carbono almacenado en la hojarasca, carbono almacenado en el suelo, composición florística. El caso A no tuvo los mayores valores para ninguna categoría. En las categorías de carbono almacenado en la hojarasca y composición florística, los dos casos de estudio con intervención tuvieron valores mayores que el caso sin intervención (Figura 5).

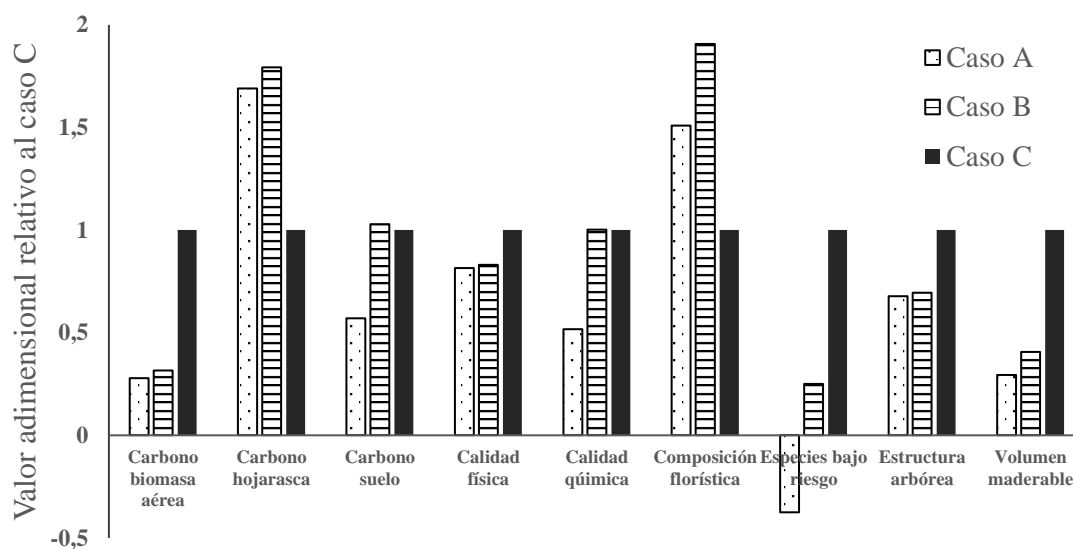


Figura 5. Valores relativizados al caso de referencia para cada categoría y caso de estudio. (Fuente propia)

Finalmente, los casos de estudio presentaron diferencias en cuanto al rendimiento de los distintos servicios ecosistémicos (Figura 6). Los casos de estudio con intervención de los bosques (A y B), en relación al caso sin intervención (C), mostraron una reducción significativa del 62% y del 44% respectivamente en el rendimiento de almacenamiento de carbono (SC), del 23% y 14% en el rendimiento del servicio ecosistémico de calidad de suelo (SE), aunque este último en el caso B no fue significativo y del 43% y 22% en cuanto al rendimiento del servicio ecosistémico de biodiversidad (SB). Para el servicio de provisión de madera (SPM), los casos A y B presentaron una reducción del 71% y 60% sin significancia estadística (Figura 6). El rendimiento total de los servicios ecosistémicos provistos por estos ecosistemas, fue de 0,52, 0,67 y 1 para los casos A, B y C respectivamente.

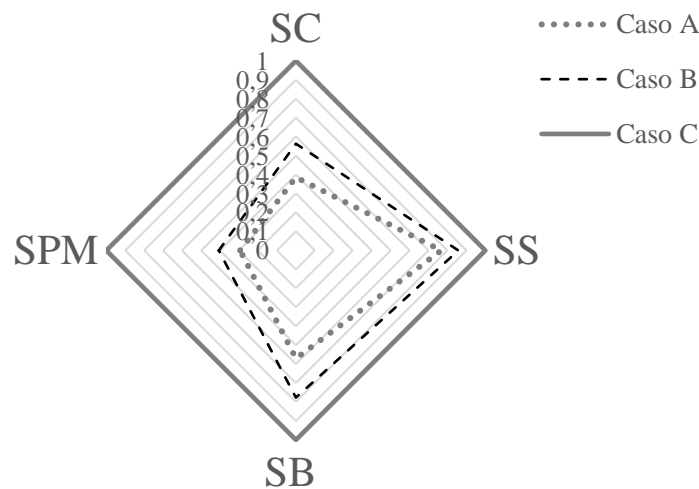


Figura 6. Rendimiento de los servicios ecosistémicos estudiados, relativizados al caso C. Donde: SC: almacenamiento de carbono; SS: calidad de suelo; SB: biodiversidad y SPM: provisión de madera. (Fuente propia)

4. DISCUSIÓN

4.1. Servicio ecosistémico almacenamiento de carbono

El grado de intensidad de uso de estos bosques impactó en gran medida sobre el SE de almacenamiento de carbono, siendo el servicio donde más se diferenciaron los rendimientos, y de forma estadísticamente significativa, con una reducción del 62 y 44%, para los casos de uso intensivo y parcial (caso A y B), respectivamente, en relación al caso C de referencia. El carbono total está mayormente asociado al almacenamiento de carbono en la biomasa aérea, lo cual a su vez es indicativo de un bosque con árboles de mayor diámetro y altura o bien de un bosque con muchos individuos de menor tamaño. En este sentido, a fin de lograr la configuración de un bosque clímax, solo la primera opción estaría asociada a una mejor condición de bosque en la zona, y siempre y cuando los árboles en crecimiento sean los típicos del ecosistema original, mayormente umbrófilos y sensibles a los cambios en las condiciones microclimáticas del bosque.

Otros estudios citados para las Yungas argentinas mencionan un 62% menos de $tC \cdot ha^{-1}$ en la biomasa aérea, en relación a los obtenidos para el caso C de referencia, y 38% y 20% más que los casos A y B respectivamente [21]; mientras que para el carbono almacenado en el suelo, los casos B y C mostraron un valor un 47% mayor, y el caso A una reducción del 19% en relación a lo reportado en dicho trabajo. Internacionalmente el valor reportado para el carbono almacenado en la biomasa aérea es $54,47 tC \cdot ha^{-1}$ [43], valor cercano a lo obtenido para los casos A y B, pero 70% menor a lo encontrado aquí para el caso C.

Con estos valores comparativos, el caso C se encontraría con una mayor capacidad de proveer el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono, probablemente asociado a conservar árboles de gran diámetro y altura, mientras que, en los casos con intervención, este servicio

podría ser potenciado con estrategias de manejo. Por la distribución diamétrica en forma de “J” invertida de estos ecosistemas en la cual la abundancia de individuos disminuye con el aumento del diámetro, característica de bosques disetáneos (como se verifica asimismo en este estudio, resultados no mostrados), existe una base regenerativa de los bosques, para futuros árboles adultos. Sin embargo, sería recomendable planificar un ordenamiento forestal, en el cual se preserve un porcentaje de árboles adultos de importancia biológica, como los definidos para el SE de biodiversidad, acompañado de restauración con especies nativas de valor maderable, que asegure la regeneración en zonas explotadas y en los claros generados. Asimismo, es urgente profundizar el entendimiento de las interacciones ecológicas entre especies, que permita identificar las especies clave de soporte del ecosistema y, por tanto, poder asegurar el mantenimiento de sus características originales, ya que solo se valoran actualmente las maderables.

Por otro lado, se ha observado que la conversión de bosques a cultivos reduce el almacenamiento de carbono en el suelo [44], pero no es muy certero el efecto de la tala forestal sobre el carbono almacenada en el suelo [45-46]. Dean et al. (2017) mencionan que a largo plazo el carbono se ve reducido cuando un bosque primario es talado, y sometido a sucesivos ciclos de corta, pero no son significativas las diferencias a corto plazo [46]. Frente a esto, en los bosques intervenidos podrían aplicarse prácticas alternativas que impliquen menor impacto en el suelo, como el uso de largos cables para la atadura de trozas al tractor, tractores con torre y guincho para elevar las trozas y disminuir el arrastre, el uso del tractor con la cuchilla baja, cambios en la maquinaria como la reducción de la presión, y la previa elaboración del mapa de explotación y planificación de vías de saca, y otras prácticas de tala de impacto reducido, RIL por sus siglas en inglés [34,45,47].

4.2. Servicio ecosistémico de calidad de suelo

El rendimiento del SE de calidad de suelo difirió entre los bosques. El bosque con uso intensivo (caso A) presentó una disminución significativa del 23% en la capacidad de proveer este SE, relativo a la no intervención. De lo observado en el análisis exploratorio este bosque estuvo asociado a valores más altos de densidad aparente, es decir, un suelo más compactado, y a su vez, con los menores contenidos de agua disponible y materia orgánica. Por el contrario, el bosque sin intervención (caso C) presentó valores menores de densidad aparente y mayor contenido de agua disponible y materia orgánica. Por último, el suelo del bosque con uso parcial (caso B), tuvo características más similares al bosque sin intervenir, pero con menor contenido de agua disponible.

Valores reportados de densidad aparente para suelos de bosque de la misma ecorregión son 1,01 y 1,035 g.cm⁻³ [48-49], siendo los valores obtenidos en este trabajo mayores para los tres casos, desde 29% a 45%. Cabe reconocer que este parámetro del suelo muestra una gran variabilidad por sitio. Por otro lado, Ontiveros et al. (2016) reporta un contenido de materia orgánica de 4,32%, presentando los bosques de menor intervención en este trabajo un valor ligeramente superior al citado, y el bosque de mayor intervención una disminución del 47% [49].

No se encontraron reportes locales para el contenido de agua disponible para la vegetación.

Las prácticas tradicionales de explotación forestal en la región, están asociadas inevitablemente con la perturbación de los suelos, aumentando la compactación y la densidad aparente del

suelo, disminuyendo la infiltración, potenciando la erosión, disminuyendo la materia orgánica y la humedad en la capacidad de campo [45,50-51-52]. La aplicación de las prácticas mencionadas en el apartado anterior para la reducción del impacto en el suelo, también se aplican para mejorar las propiedades físicas y químicas del mismo, sobre todo en los bosques con un uso intensivo. Otra práctica recomendada por FAO (2021) para el adecuado manejo de los suelos durante las actividades forestales, es la de Cobertura Forestal Continua [45]. Esta incluye sistemas silviculturales que involucran una cobertura continua del bosque, y que se aplican en bosques irregulares con árboles de diferentes edades y especies. Dado que estos bosques son bosques nativos, multiespecíficos y disetáneos, estas técnicas de favorecimiento y selección de árboles individuales, acompañadas de un registro continuo de los diámetros y mapas de explotación, son potencialmente aplicables.

4.3. Servicio ecosistémico de biodiversidad

El rendimiento del servicio ecosistémico de biodiversidad se vio reducido en un 43% y 22% en los bosques con uso intensivo y parcial respectivamente. Con el esfuerzo de muestreo realizado, los bosques intervenidos presentaron mayor riqueza específica, mayor diversidad, pero tuvieron mayor abundancia de especies en categorías de amenaza de la IUCN y menor abundancia de ejemplares de importancia biológica, en relación al caso de no intervención, mostrando ecosistemas fragilizados y más vulnerables frente a las actividades de extracción. La especie amenazada más abundante en estos bosques fue *Cedrela balansae*, la cual se reportó en la categoría EN (en peligro) en 2022 y en los dos casos de estudio con intervención, esta especie se utilizó y se está utilizando para enriquecimiento forestal. Si bien los bosques intervenidos tuvieron mayor valor en la composición florística por tener mayor riqueza de especies maderables, quizás por presentar una distribución más agregada, de estos ejemplares solo el 11% tuvieron un diámetro mayor o igual a 30 cm que corresponde al diámetro mínimo de corta reglamentado, mientras que el bosque sin intervención presentó el 34% de los árboles con diámetro mayor o igual a 30 cm (resultados no mostrados), indicando que los bosques intervenidos pasaron por un proceso de degradación por la selección selectiva y no controlada de los mejores ejemplares. Por otro lado, en el caso C, se registró un mayor porcentaje de especies consideradas climácicas según Cabrera (1971) [15], -resultados no mostrados-, y mayor abundancia de ejemplares de importancia biológica

De acuerdo a lo reportado en otros trabajos realizados en áreas naturales de la ecorregión [41-42], la riqueza de especies relevadas en el presente trabajo fue mucho menor a lo reportado, mientras que la abundancia se encontró dentro de los rangos informados y hasta fue mayor en los bosques de baja y nula intervención (resultados no mostrados).

Así mismo, para el ecosistema forestal, es importante también la distribución diamétrica y de alturas de los árboles, para asegurar la regeneración, la presencia de árboles semilleros y la reproducción de las especies arbóreas, y el hábitat para otros organismos, como la nidificación de aves. En otros estudios, se cita para estos bosques valores de altura promedio mayores a 14 metros, y sitios con abundancia de hasta 15 árboles con diámetro mayor a 50 cm en 0,1 ha [33], considerándose, además, que sectores de buen estado de conservación presentan un dosel casi continuo de entre 25 y 35 metros de altura, y con entre dos y tres estratos arbóreos [41-42]. Los bosques intervenidos estudiados en este trabajo presentaron alturas y diámetros promedio menores a lo reportado, y al bosque sin intervención.

Por lo tanto, en los bosques intervenidos, sería necesario asegurar la composición florística, en todos los aspectos aquí considerados, como riqueza de especies, representación de especies amenazadas y abundancia de ejemplares de importancia biológica, y recuperar la estructura forestal, en sus diámetros y alturas. Esto implica sin duda, tiempos de descanso sin explotación de los bosques muy superiores a los que actualmente se manejan, dado que los años necesarios estimados para que estas especies alcancen el diámetro mínimo de corta es de entre 35 y 135 años [31]. Asimismo, a fin de restaurar la estructura del bosque, se recomiendan prácticas relacionadas con el aumento de luz y exposición de ejemplares, como cortas intermedias de clareo, raleo, limpieza y corta de lianas, que permitan aumentar la altura y diámetro de los árboles, lo cual requiere una gestión organizada y constante del bosque.

Además, resultaría necesario realizar un inventario más exhaustivo de las explotaciones forestales, y en particular, del caso de referencia, a fin de ser utilizado como guía orientativa para la recuperación de los demás casos, debido a que no alcanzó a ser representativo el área de muestreo con la realidad del bosque.

Por otro lado, sería importante estudiar la posibilidad y características de resguardar un porcentaje del área como zona de refugio para la fauna, donde también se puede conservar la vegetación arbórea en todos sus estratos y especies, y posibilitando la conexión entre sectores asegurando los corredores biológicos en el total de la cuenca forestal, y permitiendo también, una sinergia con el almacenamiento de carbono.

4.4. Servicio ecosistémico de provisión de madera

La provisión de madera se vio afectada en un 71% y 60% en los bosques con intervención, aunque sin significancia. Esto se relaciona con el mayor diámetro y altura promedio de los árboles en el bosque sin intervención. Según el volumen maderable reportado en [14] para la ecorregión, el bosque de mayor intervención presenta una reducción del 23%, mientras que los otros bosques mostraron un aumento del 7% y 163%. Claramente la intensidad del aprovechamiento forestal y la falta de implementación de prácticas posteriores, lleva a una reducción del servicio de aprovisionamiento de madera, reduciendo la productividad de bosque.

Un estudio en mayor profundidad sobre la regeneración del bosque, posibilitaría proyectar el bosque futuro, e intervenir en la composición de especies deseables. Sin embargo, una vez más se destaca la necesidad de mayor desarrollo de investigación sobre la ecología forestal de la región, puesto que solo se conoce el comportamiento ecológico de unas pocas especies forestales, y mucho más escaso es aún el estado del conocimiento de las posibles interacciones entre ellas. Intervenir el bosque solo en favor de especies maderables, podría modificar la ecología del ecosistema, y actuar en detrimento de su posibilidad de supervivencia. Lo que se observa en este estudio, y de lo manifestado por los mismos productores, es que la capacidad de los bosques de proveer madera ha ido disminuyendo progresivamente con el paso de los años. Dado que se trata de una actividad fundamental en la economía de la región, esta conclusión resulta preocupante.

Una discusión en mayor profundidad respecto a las prácticas de gestión forestal actuales, sobre base de evidencia científica, resulta fundamental para adecuar los planes de manejo y la posibilidad futura del bosque de continuar brindando soporte a la actividad forestal de la región.

Desde dichas bases científicas, la planificación de todas las actividades forestales, como son el censo, la demarcación de vías y canchones y la explotación, resultan prioritarias [17,53].

4.5. Certificaciones de sostenibilidad y soluciones basadas en la naturaleza: aplicación en la cuenca forestal

Los bosques de las Yungas están sometidos a una fuerte presión de cambio de uso de la tierra, para ser sustituidos por cultivos agrícolas, sobre todo en los casos de uso intensivo. A pesar de ello, existe una buena disposición por parte de las autoridades y propietarios de bosques, a implementar gestiones más sostenibles en el marco de una bioeconomía forestal circular [54], que permitan un menor impacto en el bosque, mejore el rendimiento y conserve el capital forestal para las siguientes generaciones. Asimismo, se está comenzando a trabajar en los mercados de servicios ecosistémicos. Si bien la brecha para la posible certificación de SE es todavía muy grande, representa una oportunidad a tener en cuenta para la región y permitiría un financiamiento para resguardar los SE y valorizar el bosque. Existen a la fecha por lo menos dos experiencias que están trabajando en este sentido, vinculadas con secuestro de carbono. Asimismo, se reconoce una experiencia de certificación FSC del manejo forestal en la zona, la cual comercializa madera nativa, mientras que la mayoría de las certificaciones del país corresponden a bosques implantados de especies exóticas. En cuanto a la certificación de otros SE, solo se reconoce a nivel de país, un caso con certificación de conservación de la biodiversidad, siendo todavía un desafío la implementación de este tipo de proyectos.

Por otro lado, en los bosques naturales de la cuenca forestal pueden implementarse SBN. La protección de los bosques es considerada, de manera fehaciente, la solución que permite el mayor potencial de almacenamiento de carbono al conseguir beneficios inmediatos, provenientes de evitar la deforestación y retener los bosques, mientras que las otras soluciones tardarían mucho más tiempo en recuperar estas pérdidas [12], encontrándose en la cuenca forestal cerca del 26% del área en categorías de conservación [55]. Detener la deforestación en las áreas intervenidas, debería ser la primera opción a considerar, pero de difícil implementación en la región, por los intereses económicos, y requiere, además, un cumplimiento y una regulación más estricta de las reglamentaciones sobre el uso de los bosques. En este sentido la conservación y protección rigurosa de áreas dentro de los bosques intervenidos, sobre todo los de uso intensivo, sería importante como SBN. Por otro lado, como mencionan Girardin et al. (2021) y Başsüllü et al. (2023), la Mejora de la Gestión Forestal (IFM, por sus siglas en inglés), es una metodología propuesta en el marco de las SBN con gran potencial de almacenamiento y mitigación del cambio climático [11,56], la cual podría aplicarse en los bosques intervenidos de la región. Esta metodología incluye prácticas silvícolas como cortas intermedias de mantenimiento para mejorar la masa forestal, reducción de los turnos de corta e intensidad de cosecha, prácticas de RIL, retención de restos leñosos gruesos en los rodales, fortalecimiento de especies secundarias y promoción de una estructura arbórea disetánea con corta selectiva [56]. Si bien algunas de estas actividades son aplicadas en los bosques de la región, no lo son de manera planificada a largo plazo. Por ejemplo, la retención de los restos de tala, poda y árboles muertos en el área de extracción, ; mantener la prevalencia de la estructura arbórea en todas sus clases diamétricas; el fortalecimiento de especies secundarias, ; el resguardo de los árboles de mayor porte semilleros; y/o planificar las cortas sin otra regulación que el diámetro mínimo de corta, carente de fundamentos ecológicos.

Las SBN, son un concepto que aún no ha sido aplicado ni estudiado en la región, pero que puede ser incluido en las prácticas de gestión forestal, para lograr beneficios sociales y ambientales, además de otorgar una importancia internacional. Esto, como se ha mencionado en el apartado anterior, requiere “una puesta sobre la mesa” de las prácticas forestales llevadas a cabo en la cuenca actualmente, para poder discutir y analizar, con evidencia científica, metodologías sostenibles organizadas, que aseguren beneficios para el productor, para los habitantes, y para el medio ambiente, y que se incluyan en las propuestas internacionales de mitigación del cambio climático.

5. CONCLUSIONES FINALES

Los bosques de los casos A y B (uso parcial y uso intensivo respectivamente) se vieron reducidos en su capacidad de proveer los servicios ecosistémicos de almacenamiento de carbono, calidad del suelo y provisión de madera, en relación al bosque del caso C, de no intervención (Cuadro 2). El rendimiento del servicio de biodiversidad fue levemente mayor, en el caso B, por la representatividad de especies amenazadas, mayor riqueza y diversidad, aunque el caso C, presentó mayor abundancia de ejemplares de importancia biológica y especies clímax.

Cuadro 2. Nivel de rendimiento de cada SE, para cada caso de estudio. Verde: bueno. Amarillo: regular. Rojo: inferior.

	A	B	C
Almacenamiento de carbono	Red	Yellow	Green
Calidad del suelo	Red	Yellow	Green
Biodiversidad	Red	Yellow	Green
Provisión madera	Red	Yellow	Green

Fuente: Propia

Los casos de estudio seleccionados son representativos de los sistemas de gestión forestal típicos y más frecuentes de la cuenca forestal. Se estimó de forma aproximada según (SAyDS, 2019) [55], que los bosques correspondientes a la clase A (uso intensivo) corresponden a un 44% del área total de la cuenca (320000 ha), mientras que los bosques con sistema de gestión de uso parcial, representan el 26% de la cuenca (190000 ha) y los bosques de la clase C, sin intervención y protegidos el 26% (190000 ha).

Los bosques clasificados como clase A, representan la mayor superficie de la cuenca, y se corresponderían con bosques que tienen una capacidad inferior de proveer los SE de almacenamiento de carbono, calidad de suelo, biodiversidad y provisión de madera. Los bosques clasificados como clase B, son representativos de bosques con un nivel regular en la provisión de estos SE, con algunos de las variables evaluadas similares al caso C, mientras que los bosques de clase C, tendrían buena capacidad de proveer estos SE.

Algunas estrategias de optimización de la gestión silvícola ya han sido definidas en este trabajo. Sin embargo, un conocimiento más profundo de los ecosistemas posibilitará adecuar para cada una de estas categorías de manejo, las mejores prácticas para asegurar el mantenimiento a futuro del capital natural forestal de la región. Sin duda la participación de múltiples actores y sectores, incluyendo sectores políticos y gubernamentales, resultará fundamental para lograr acuerdos que puedan ser base de políticas y reglamentaciones que perduren a largo plazo y consideren las realidades y percepciones locales, como así, los avances científicos y técnicos.

Por último, la metodología desarrollada fue útil para caracterizar los SE de almacenamiento de carbono, calidad del suelo, biodiversidad y provisión de madera los bosques de la cuenca en sus tres sistemas de gestión más frecuentes.

En un desafío a futuro, continuaremos trabajando para incorporar nuevos servicios ecosistémicos que permitan una visión cada vez más completa de la importancia de estos bosques y la posibilidad de su valorización en algunos de los mercados ambientales existentes, como estrategia complementaria a la actividad forestal.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con financiamiento del Proyecto Unidades Ejecutoras CONICET titulado: “Innovaciones Tecnológicas en Energía y Ambiente en Concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030”. Código Proyecto 229 201801 00032 CO, línea de Bioeconomía Forestal. Un agradecimiento especial a la Municipalidad de Caimancito (Jujuy, Argentina), que brindó el apoyo logístico para el desarrollo de los estudios actuales en el marco del Convenio de Colaboración Mutua N° PR5142/2021. Se agradece de manera particular a los productores locales, quienes gentilmente han facilitado el acceso a sus fincas para la recopilación de datos y muestras, y en general a toda la comunidad de Caimancito. Asimismo, se agradece a la empresa Ledesma SAAI, en particular a Arturo Blanco Massini y a José María Giagnoni, por el apoyo logístico en terreno.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Millennium Ecosystem Assessment (2003). *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. World Resources Institute.
<https://www.millenniumassessment.org/en/Framework.html>
- [2] Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. En D. Raffaelli & C. Frid (Eds.), *Ecosystem Ecology: a new synthesis* (pp.110-139). BES Ecological Reviews Series.
- [3] Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Laterra, P., Peña-Claros, M., Silva Matos, D. M., Romero-Duque, L. P., Vogl, A. L., Arreola, L. F., Caro-Borrero, A. P., Gallego, F., Jain, M., Little, C., Oliveira Xavier, R.,... Vallejos, M. (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services*, 2, 56-70.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.09.006>
- [4] Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2), 136-147.

- <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/33>
- [5] Jenkins, M. y Schaap, B. (2018). *Forest ecosystem services*. United Nations Forum on Forests. https://www.un.org/esa/forests/wp-content/uploads/2018/05/UNFF13_BkgdStudy_ForestsEcoServices.pdf
- [6] Crowther, T., Glick, H., Covey, K. R., Bettigole, C., Maynard, D. S., Thomas, S. M., Smith, J. R., Hintler, G., Duguid, M. C., Amatullis, G., Tuanmu, M. N., Jetz, W., Salas, C., Stam, C., Piotto, D., Tavani, R., Green, S., Bruce, G., Williams, S. J., ... Bradford, M. A. (2015). Mapping tree density at a global scale. *Nature*, 525, 201–205. <https://doi.org/10.1038/nature14967>
- [7] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- [8] Mo, L., Zohner, C.M., Reich, P.B., Liang, J., de Miguel, S., Nabuurs, G. J., Renner, S. S., den Hoogen, J., Araza, A., Herold, M., Mirzaghali, L., Ma, H., Averill, C., Phillips, O. L., Gamarra, J. G. P., Hordijk, I., Routh, D., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., ... Crowther, T. W. (2023). Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 624, 92–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>
- [9] Naciones Unidas (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Edición especial*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. The Core Writing Team, H. Lee y J. Romero. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- [11] Girardin, C. A. J., Jenkins, S., Seddon, N., Allen, M., Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Griscom, B. W. y Malhi, Y. (2021). Nature-based solutions can help cool the planet-if we act now. *Nature*, 593(7858), 191-194. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01241-2>
- [12] United Nations Environment Programme [UNEP] and International Union for Conservation of Nature [IUCN] (2021). *Nature-based solutions for climate change mitigation*. <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/37318/NBSCCM.pdf>
- [13] Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- [14] Politi, N., Rivera, L., Balducci, E., Malizia, L. R., Blundo, C., Fornes, L., Galarza, M., Alcalde, S., Aragón, R., Bardavid, S., Eliano, P., Gómez, D., Jayat, P., Lupo, L., Malizia, A., Mangini, G., Mayol, E., Mazzini, F., Molineri, C., ... Brown, A. D. (2021). Capítulo 7: Yungas. En Pablo Luis Peri, P. L., Martínez Pastur, G. y Schlichter, T. (Eds.), *Uso sostenible del bosque: Aportes desde la Silvicultura Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación Argentina.
- [15] Cabrera, A. L. (1971). Fitogeografía de la república Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 14(1-2).
- [16] Brown, A. D., Pacheco, S., Lomáscolo, T., y Malizia, L. (2005). Situación ambiental en los bosques andinos yungueños. En Brown, A. D., Martínez Ortiz, U., Ascerbi, M., Corcuera, J. (Eds.), *La situación ambiental argentina* (pp.53-61). Fundación Vida Silvestre Argentina. <https://siga.proyungas.org.ar/wp-content/uploads/2017/07/Situacion-Ambiental->

- [Argentina Ecoregion-Yungas.-2005-2-10.pdf](#)
- [17] Arana, M. D., Natale, E. S., Ferretti, N. E., Romano, G. M., Oggero, A. J., Martínez, G., Posadas, P. y Morrone, J. J. (2021). Esquema biogeográfico de la República Argentina. Opera Lilloana. <http://www.lillo.org.ar/editorial/index.php/publicaciones/catalog/book/253>
- [18] Duque, A., Peña, M.A., Cuesta, F., González-Caro, S., Peter Kennedy, P., Phillips, O. L., Calderón-Loor, M., Blundo, C., Carilla, J., Cayola, L., Farfán-Ríos, W., Fuentes, A., Grau, R., Homeier, J., María I. Loza-Rivera, M. I., ... Kenneth J. Feeley, K. J. (2021). Mature Andean forests as globally important carbon sinks and future carbon refuges. *Nat Commun*, 12(2138). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22459-8>
- [19] Bianchi, A. R., & Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- [20] Holdridge, L.R. (1967). Life zone ecology. Tropical Science Center.
- [21] Manrique, S., Franco, J., Nunez, V., & Seghezzo, L. (2011). Potential of native forests for the mitigation of greenhouse gases in Salta, Argentina. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 2184-2193.
- [22] Zhang, W., Zhu, X., Xiong, X., Wu, T., Zhou, S., Lie, Z., Jiang, X. y Liu, J. (2023). Changes in soil infiltration and water flow paths: Insights from subtropical forest succession sequence. *Catena*, 221, 106748. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106748>
- [23] Lozano-Baez, S. E., Cooper, M., Meli, P., Ferraz, S. F., Rodrigues, R. R. y Sauer, T. J. (2019). Land restoration by tree planting in the tropics and subtropics improves soil infiltration, but some critical gaps still hinder conclusive results. *Forest Ecology and Management*, 444, 89-95.
- [24] Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87–99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- [25] Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de Las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S. y Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and management*, 267, 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- [26] Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- [27] Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W. A., Ogle, S., Raison, J., Dieter Schoene, D., Ravindranath, N. H., Elhassan, N. G., Heath, L. S., Higuchi, N., Kainja, S., Matsumoto, M., Sanz Sánchez, M. J. y Zoltan Somogyi, Z. (2006). Chapter 4, Volume 4: Forest Land. En Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (Eds.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- [28] Solórzano, J. W. Z., Guerrero, S. L. Z., y Minaya, L. G. M. (2018). Estimación de la biomasa y carbono almacenado en un sistema agroforestal del cafetal de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Investigación y Amazonía, Tingo María, Perú*, 8(5), 1-8.
- [29] The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2003). *Good Practice Guidance for*

- Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (Eds.). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf
- [30] IUCN. (21 de octubre 2024). The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2024-1. <https://www.iucnredlist.org>
- [31] Humano, C. A. (2020). Modelado del crecimiento de especies nativas forestales de la Selva Pedemontana de Yungas, Argentina. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 28(1), 5-19.
- [32] Villalba, M. S., Entrocassi, G. S., & Martínez Carretero, E. (2021). Propuesta de restauración ecológica del bosque de Amburana cearensis (Allemao) AC Sm. en la Sierra de Tartagal, Salta-Argentina. *Multequina*, 30(2), 227-245. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73292021000200227&script=sci_abstract&tlng=en
- [33] Malizia, L. R., Pacheco, S., y Loiselle, B. (2009). Árboles de valor forestal en las Yungas de la Alta Cuenca del río Bermejo. *Selva Pedemontana de las Yungas, historia natural ecología y manejo de un ecosistema en peligro*, 105-120.
- [34] Amaral, P., Veríssimo, A., Barreto, P. & Edson, V. (1998). Bosques para siempre: Un manual para la producción de madera en la Amazonía brasileña. IMAZON.
- [35] Grau, A., Malizia, L. R., & Brown, A. D. (2016). *Arboretum Calilegua: árboles nativos y exóticos del noroeste argentino*. Ediciones del Subtrópico.
- [36] Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible [BOLFOR].
- [37] Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2020). *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>
- [38] Peri, P., Maradei, D., Lupi, A., Vazquez, C., Gyenge, J., Gatica, M., Sandoval, M., Lupi, A. M. y Gaute, M. (2022). *Estimación de Las Reservas de Carbono Orgánico Del Suelo Con Plantaciones Forestales y Otros Usos de La Tierra En Distintas Regiones de Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]-Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial de la secretaria de Agricultura Ganadería y Pesca Argentina [SAGyP].
- [39] Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T–Manuales y Tesis SEA.
- [40] Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- [41] Brown, A. D. (2009). Las Selvas Pedemontanas de las Yungas Manejo sustentable y conservación de la biodiversidad de un ecosistema prioritario del noroeste argentino. En Brown, A. D., Blendinger, P. G., Lomáscolo, T. y García Bes, P. (Eds.), *Selva Pedemontana de las Yungas: Historia natural, ecología y manejo de un ecosistema en peligro* (pp.13-37). Ediciones del Subtrópico. <https://proyungas.org.ar/wp-content/uploads/2014/12/SelvaPedemontanadelasYungas.pdf>
- [42] Brown, A. D. y Malizia, L. R. (2007). Finca San Andrés: realidad ambiental de una propiedad cuenca en el noroeste de Argentina. En Alejandro D. Brown, A. D., García Moritán, M., Ventura, B., Hilgert, N. y Malizia, L. R., *Finca San Andrés: un espacio de cambios ambientales y sociales en el Alto Bermejo* (pp.85-100). Ediciones del Subtrópico. <https://proyungas.org.ar/wp-content/uploads/2015/07/finca-san-andres.pdf>
- [43] Grant Domke, G., Brandon, A., Diaz-Lasco, R., Federici, S., Garcia-Apaza, E., Grassi, G.,

- Gschwantner, T., Herold, M., Hirata, Y., Kasimir, A., Kinyanjui, M. J., Krisnawati, H., Lehtonen, A., Malimbwi, R. E., Niinistö, S., Ogle, S. M., Paul, T., Ravindranath, N. H., Rock, J., Sanquetta, C. R., Sanz Sanchez, M. J., ... Zhu, J. (2019). Chapter 4: Forest Land, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. En Buendia, E. C., Tanabe, K., Kranjc, A., Jamsranjav, B., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, J., Shermanau, P. y Federici, S. (Eds.), 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- [44] Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global change biology*, 8(4), 345-360.
- [45] Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] y The Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS] (2021). Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended management practices. Volume 5: Forestry, Wetlands and Urban Soils - Practices overview. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6606en>
- [46] Dean, C., Kirkpatrick, J.B. and Friedland, A.J. (2017), Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil. *Glob Change Biol*, 23,1-11. <https://doi.org/10.1111/gcb.13387>
- [47] Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2004). Reduced impact logging in tropical forests: Literature synthesis, analysis and prototype statistical framework, Forest Harvesting and Engineering Working Paper No.1. FAO. <https://www.fao.org/4/j4290e/j4290e.pdf>
- [48] Minervini, M. G. (2010). *Propiedades morfológicas, físicas y mineralógicas, y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos incendiados de humedal y de Yungas* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires]. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2017minervinimarianagabriela.pdf>
- [49] Ontiveros, S., Manrique, S. y Franco, J. (2016). Flujos de metano (CH₄) en suelos forestales: Dinámica y relación con factores ambientales y edáficos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 06.59-06.70.
- [50] Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. D. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- [51] Demir, M., Makineci, E., & Yilmaz, E. (2007). Investigation of timber harvesting impacts on herbaceous cover, forest floor and surface soil properties on skid road in an oak (*Quercus petraea* L.) stand. *Building and Environment*, 42(3), 1194-1199. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.008>
- [52] Von Wallis, A. (2004). *Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandiuudult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación del terreno forestal y bosque nativo* [Tesis de Magister, Univesidad de Buenos Aires]. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/5885?locale-attribute=en>
- [53] Balducci, E.D., Eliano, P., Iza, H.R. y Sosa, I. (2012). *Bases para el manejo sostenible de los bosques nativos de Jujuy*. Incotedes.
- [54] Manrique, S.M.; Subelza, C.R.; Toro, M.A.; Quintero Bertel, Q.R. y Tauro, R.J. (2023). Forest Supply Chain for Bioenergy: An Approach for Biomass Study in the Framework of a Circular Bioeconomy. *Energies*, 16(20), 7140. <https://doi.org/10.3390/en16207140>
- [55] Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación Argentina. (2019). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_estrategico_forestal_cuenca_caim_ancito.pdf

- [56] Başsüllü, Ç., Belen, İ. y Kaptanoğlu, E. (2023). Directrices para la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) para combatir el impacto negativo del cambio climático en la silvicultura: Azerbaiyán, Kazajstán, Kirguistán, Tayikistán, Turquía, Turkmenistán y Uzbekistán. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc7450en>