



Fondo
CONACYT
CONAFOR



UJED
Universidad Juárez
del Estado de Durango



CONAFOR



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



inifap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca



Comisión Nacional Forestal

Coordinación General de Producción y Productividad

Gerencia de Manejo Forestal Comunitario

Unidad de Educación y Desarrollo Tecnológico

Periférico Poniente 5360

Colonia San Juan de Ocotán Zapopan, Jalisco C.P. 45019

Tel: 01 (33) 3777 7000

Proyecto apoyado a través del Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONACYT-CONAFOR:

2017-4-292674

Mejores prácticas de manejo y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México.

Autores: Dr. Pablito Marcelo López Serrano¹, M.C. Adrián Hernández Ramos², Dr. Jorge Méndez González³, Dr. Martin Martínez Salvador⁴, Dr. Oscar Aguirre Calderón⁵, Dr. Benedicto Vargas Larreta⁶ y Dr. José Javier Corral Rivas¹.

¹Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ⁴Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y ⁵Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ⁶Instituto Tecnológico de El Salto (ITES).

Impreso en México

Primera edición, 2021.

Forma de citar:

López-Serrano, P.M., Hernández-Ramos, A., Méndez-González, J., Martínez-Salvador, M., Aguirre-Calderón, O., Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas J.J. 2021. Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca. Proyecto: 2017-4-292674. CONAFOR-CONACYT. México.

PRESENTACIÓN

En la última década se ha visto reflejada la importancia del estudio, manejo y aprovechamiento de especies provenientes de zonas áridas y semiáridas de México, en especial las que poseen interés comercial, por ser pioneras en el sustento de las familias que habitan en estas regiones y realizan su aprovechamiento como una de las fuentes para mejorar su ingreso familiar. En este documento se hace referencia a la especie *Agave potatorum* por su importancia en la elaboración de mezcal, producto forestal no maderable que representa el principal interés económico para empresas comercializadoras.

Dependencias gubernamentales como la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), instituciones educativas y de investigación como la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES), en su afán de contribuir a mejorar el manejo y aprovechamiento de los recursos forestales no maderables, han diseñado el presente documento denominado “Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca”, con el fin de que se utilice como una herramienta técnica de apoyo para los técnicos y productores de zonas áridas, promoviendo su aprovechamiento con el mínimo impacto ambiental en zonas donde habita la especie. Al mismo tiempo se busca aprovechar

el máximo potencial productivo (dadas las condiciones medioambientales), favoreciendo las condiciones de vida de los habitantes de las zonas áridas y semiáridas, aplicando criterios que logren la máxima productividad, prospere la regeneración y mantenga la conservación de dicha especie.

El interés colectivo para el desarrollo y generación de herramientas tecnológicas (como mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa) es un paso significativo para quienes trabajan activamente en el cuidado del medio ambiente y la conservación de los recursos aprovechando su máximo potencial productivo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. LEGISLACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO FORESTAL DE LA ESPECIE	8
2.1. Procedimientos legales para la autorización del aprovechamiento forestal no maderable del <i>Agave potatorum</i>	8
2.2. Leyes y normas.....	10
3. INVENTARIO FORESTAL CON FINES DE MANEJO	17
3.1. Técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie.....	17
4. MEJORES PRÁCTICAS DE MANEJO	21
4.1. Mejoras en las técnicas de aprovechamiento de la especie.....	21
4.2. Mejoras en las técnicas de extracción y beneficio del producto final.....	22
4.3. Reforestaciones con fines de enriquecimiento de rodales	23
5. ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA	27
5.1. Ecuaciones alométricas	30
6. MAPA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA ESPECIE.....	26
7. CONCLUSIONES.....	36
8. BIBLIOGRAFÍA	40
9. GLOSARIO	42
10. SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	31

1. INTRODUCCIÓN

El *Agave potatorum* (Maguey tobalá), es uno de los recursos forestales no maderables más aprovechados por los productores en el estado de Oaxaca para la producción de mezcal (Sánchez, 2005). Son plantas con rosetas densas, con numerosas hojas aplanadas, margen con mamilas y dientes pequeños; inflorescencia paniculada con ramas primarias de 10-30 cm largo, distantes entre sí por 15.0-30.0 cm, presentes en la mitad o el tercio superior de la inflorescencia, las flores presentan tubo campanulado a ligeramente urceolado, los estambres insertos a la mitad del tubo o en el tercer cuarto superior; relación de tubo: tépalos 1:1 o incluso el tubo llega a ser hasta 2 veces más largo que los tépalos. Se usa principalmente en la elaboración de mezcal, las flores se emplean en la alimentación al igual que el pedúnculo floral cuando ha comenzado su desarrollo y las hojas en la medicina tradicional para disminuir hinchazones y para el tratamiento de lesiones internas tanto de personas como de animales domésticos. Se distribuye en los estados de Oaxaca y Puebla. En Oaxaca en los distritos: Coixtlahuaca, Ejutla, Etlá, Huajuapán, Ixtlán, Miahuatlán, Mixe, Nochixtlán, Ocotlán, Teotitlán, Tlacolula, Yautepec, Zaachila y Zimatlán (García-Mendoza, 2007). Dado el aprovechamiento de esta especie, existen registros de programas relacionados con plantaciones escalonadas de *Agave potatorum*, en la región de la mixteca oaxaqueña, con el

fin de preservar la especie (Martínez *et al.*, 2001), de acuerdo con varias fuentes de información se considera que el cultivo de esta especie es una alternativa de producción apropiada al entorno regional, que se caracteriza por su relativa aridez y suelos de escasa productividad agrícola, forestal y ganadera (Gentry, 1982; Sánchez, 1997; Granados, 1999; Blanco *et al.*, 2001; Vera *et al.*, 2009); además, debido a sus compuestos aromáticos volátiles, esta especie produce un mezcal que tiene alta demanda (Sandoval y Rubio, 1997). Por otro lado, las inflorescencias son aprovechadas como alimento en las regiones del estado donde se desarrolla la especie, lo que repercute en el proceso reproductivo sexual, y por ende permanencia de esta especie.

2. LEGISLACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO FORESTAL DE LA ESPECIE

2.1. Procedimientos legales para la autorización del aprovechamiento forestal no maderable del *Agave potatorum*

De acuerdo con el artículo 85 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS, 2021), y el artículo 72 y 73 del Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (RLGDFS, 2020), este recurso forestal no maderable requiere de una autorización de aprovechamiento, que se obtiene mediante solicitud que se presenta ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), mediante un formato que contenga el nombre, denominación o razón social y domicilio del propietario o poseedor del predio o conjunto de predios y, en su caso, número de oficio de la autorización en materia de impacto ambiental. El procedimiento y requisitos para la obtención del código de identificación para el aprovechamiento de *Agave potatorum*, se muestran en la Figura 1.

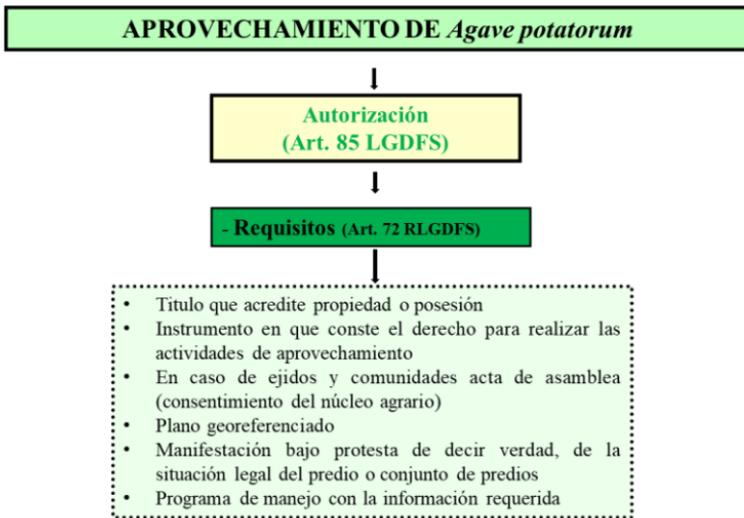


Figura 1. Requisitos que debe contener la autorización del aprovechamiento para el *Agave potatorum* en México.

2.2. Leyes y normas

Leyes vigentes

La legislación vigente que se describe a continuación regula el aprovechamiento de *Agave potatorum*.

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) Esta Ley hace referencia a temas del aprovechamiento sustentable y la preservación de este recurso forestal no maderable.</p>	<p>1, 3, 15, 84, 87 y 100.</p>
<p>Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) Legisla el fomento a la silvicultura, el manejo y regulación del aprovechamiento sustentable de los recursos forestales maderables y no maderables. Así como los documentos que se considerarán para acreditar la posesión o derecho para realizar las actividades mencionadas. Además de la ejecución, desarrollo y cumplimiento de los programas de manejo forestal y los estudios técnicos.</p>	<p>1, 3, 5, 7, 10, 21, 31, 39, 50, 53, 54, 55, 56, 59, 70, 84, 85, 91 y 97.</p>

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Reglamento de la LGDFS)</p> <p>Menciona los procedimientos y requisitos para las autorizaciones y avisos de aprovechamientos no maderables ante la Secretaría, quien resolverá las solicitudes de conformidad con lo dispuesto en la LGDFS y el presente Reglamento.</p>	<p>1, 2, 4, 12, 14, 18, 27, 30, 32, 33, 34, 38, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 98, 141, 164, 165 y 166.</p>
<p>Ley General de Vida Silvestre (LGVS)</p> <p>Legisla el aprovechamiento sustentable y conservación por parte de los propietarios de un predio, de la vida silvestre que se desarrolla libremente en su hábitat, incluyendo sus poblaciones menores e individuos que se encuentran bajo el control del hombre, así como las especies domésticas que, al quedar fuera de control del hombre, se establecen en el hábitat natural.</p>	<p>1, 3, 18, 19, 56, 83, 84 y 97.</p>
<p>Ley Agraria</p> <p>Estos artículos hacen mención a la personalidad jurídica de los núcleos de población ejidales o ejidos. Así como su organización económica y social para el aprovechamiento de las tierras de uso común.</p>	<p>9, 10, 73, 116 y 119.</p>

Leyes y Reglamentos	Artículos
<p>Ley Federal de Procedimiento Administrativo (LFPA).</p> <p>Menciona los actos, procedimientos y resoluciones administrativas de orden e interés públicos ante una Administración Pública Federal centralizada, sin perjuicio de lo dispuesto en los Tratados Internacionales de los que México sea parte. La Administración Pública Federal no podrá exigir más formalidades que las expresamente previstas en la ley. Se menciona de los requisitos de las promociones que realice el interesado o su representante legal.</p>	<p>1, 15, 15-A, 17-A, 19 y 43.</p>

Normas vigentes

Las Normas Oficiales Mexicanas vigentes que se describen a continuación regulan el aprovechamiento de *Agave potatorum*.

NOM-005-SEMARNAT-1997

Norma Oficial Mexicana **NOM-005-SEMARNAT-1997** que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de corteza, tallos y plantas completas de vegetación forestal.

Apartado	Especificaciones
Aprovechamiento	<p>Para realizar el aprovechamiento de corteza, tallos y plantas completas de vegetación forestal, el dueño o poseedor del predio correspondiente, deberá presentar una notificación por escrito ante la Delegación Federal o Secretaría en la entidad federativa correspondiente, misma que podrá ser anual o por un periodo máximo de 5 años.</p>
	<p>El aprovechamiento quedará sujeto a los siguientes criterios y especificaciones técnicas:</p> <ol style="list-style-type: none"> I. Sólo se podrán aprovechar plantas en la etapa de madurez de cosecha. II. Deberá dejarse distribuido uniformemente, en el área de

Apartado	Especificaciones
	<p>aprovechamiento sin intervenir, como mínimo el 20% de las plantas en etapa de madurez de cosecha, para propiciar la regeneración por semillas.</p>
Almacenamiento	<p>Los responsables de los centros de almacenamiento deberán:</p> <p>I. Solicitar la inscripción de los mismos en el Registro Forestal Nacional, acreditando su personalidad.</p> <p>II. Informar trimestralmente dentro de los primeros 10 días hábiles de los meses de abril, julio, octubre y enero de cada año, a la Delegación Federal de la Secretaría en la entidad federativa correspondiente, sobre las entradas y salidas del producto durante el trimestre inmediato anterior.</p>
Transporte	<p>El transporte de las plantas completas, desde el predio bajo aprovechamiento, hacia los centros de almacenamiento o de transformación, se realizará al amparo de remisión o factura comercial, expedida por el dueño o poseedor del recurso, o el responsable del centro de</p>

Apartado	Especificaciones
	almacenamiento, siempre y cuando dicho producto se transporte en cualquier vehículo automotor.

NOM-152-SEMARNAT-2006

Norma Oficial Mexicana **NOM-152-SEMARNAT-2006**, que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas.

En el apartado 5 de la Norma, se describen los criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo, así como en el apartado 6, se hace mención de la estructura para la presentación del programa de manejo.

Apartado	Especificaciones
Aprovechamiento no maderable	Cuando se pretenda solicitar una autorización de aprovechamiento de Recursos Forestales No Maderables, para los recursos indicados en el artículo 85 de la Ley (LGDFS). De acuerdo con el artículo 72 del Reglamento (RLGDFS), las solicitudes se presentarán ante la Secretaría y contendrán el nombre o denominación o razón social y domicilio del interesado. En su caso, se señalará el número de

Apartado	Especificaciones
	<p>oficio y fecha de la autorización en materia de impacto ambiental. Asimismo, con la solicitud a que se refiere el presente artículo deberá presentarse un programa de manejo forestal (Artículo 72, fracción VI), con los requisitos que se establecen en el artículo 73 del Reglamento (RLGDFS).</p>

3. INVENTARIO FORESTAL CON FINES DE MANEJO

La planificación para el manejo de cualquier recurso requiere en primer lugar un conocimiento del mismo, de las restricciones posibles para su utilización y de los medios disponibles. Con ello se pueden evaluar, en pasos sucesivos, alternativas de manejo que conduzcan al logro de los objetivos planteados. La planificación forestal se inicia, por tanto, con una toma de datos a través de un inventario (Madrigal, 1994). Para hacer extensivo el aprovechamiento de las especies no maderables de zonas áridas y semiáridas de manera sustentable, es indispensable el desarrollo de un inventario que proporcione datos confiables de ubicación, existencias reales y magnitud del recurso, así como la estimación y monitoreo de la tasa de crecimiento anual, biomasa y la productividad (López, 2005).

3.1. Técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie

Los programas de manejo para el aprovechamiento forestal de esta especie no maderable requieren del uso de técnicas de muestreo que permitan la estimación de la estructura poblacional y existencias reales de acuerdo con las especificaciones que se mencionan en la NOM-152-SEMARNAT-2006.

Para el inventario de *Agave potatorum* se debe de entrar al contexto de las técnicas de muestreo para la evaluación de las poblaciones naturales de la especie, es necesario enfatizar primero los conceptos de catastro y división dasocrática. Donde

en el primer concepto se busca recabar toda la información necesaria acerca de un área o superficie de estudio conjuntando la documentación legal y planos geográficos para ubicarla en un espacio municipal, regional, estatal y nacional. Este procedimiento conlleva al análisis espacial de los vértices, linderos, superficies con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), con reconocimiento en campo, si es necesario, para finalmente elaborar la cartografía temática del área de estudio. Por otra parte, el término de división dasocrática hace referencia a una unidad mínima de manejo que bien puede ser un rodal o un subrodal, entendiéndose a éstos como el área definida por características permanentes como el suelo, pendiente, parteaguas y arroyos. El rodal es la unidad básica de manejo y sobre todo de seguimiento a las variables forestales a través del tiempo y como tal, debe ser permanente a través de los ciclos de corta sucesivos, aun cuando haya cambios en la vegetación, tal como se establece en la NOM-152-SEMARNAT-2006.

Por la forma de crecimiento de los individuos y la aplicabilidad que representa el muestreo sistemático en la evaluación de especies de zonas áridas y semiáridas, en este manual se recomienda utilizar la siguiente metodología de muestreo para *Agave potatorum*:

- 1. Diseño de muestreo.** Un muestreo sistemático con base en cuadrículas o grillas (a nivel predial o de unidad mínima de manejo). El procedimiento que generalmente se emplea es el siguiente: 1) en la cartografía elaborada para el área de estudio y con apoyo de sistemas de información geográfica, se genera una malla de puntos regulares (cuadrículas o grillas)

distribuidos a una distancia prefijada por el responsable de la planeación del muestreo considerando las características fisiográficas y topográficas del terreno.

2. **Número total de sitios a muestrear.** Dado que se tienen los puntos de muestreo definidos en el apartado anterior, el responsable de realizar el muestreo definirá el número de sitios a muestrear que servirá como un pre-muestreo para obtener los parámetros y estimadores que nos permitan determinar el tamaño de muestra en la fórmula o ecuación, tomando en cuenta que la normatividad requiere una confiabilidad mínima del 95% y un error de muestreo máximo de 10%.
3. **Forma de los sitios.** La forma de los sitios recomendada es circular por tener poseer ésta figura geométrica la conjunción de dos criterios básicos de muestreo: por un lado, la relación perímetro-superficie del sitio debe ser mínima; de este modo, se consigue reducir los problemas que se presentan en los bordes de las parcelas para determinar si una planta debe ser incluido o no; por otro lado, el número de puntos de referencia (centro o esquinas) del sitio debe reducirse siempre y cuando esto no suponga un inconveniente para su replanteo (Gadow and Hui, 1999).
4. **Tamaño de los sitios expresados en metros cuadrados.** Las dimensiones de los sitios circulares recomendadas son 500 m^2 (radio = 12.6157 m) o de 1000 m^2 (radio = 17.8412 m). Entre más pequeño sea un sitio, más fácil y precisa será su delimitación.
5. **Intensidad de muestreo en porcentaje.** La intensidad o fracción de muestreo es la relación porcentual de la

superficie de la muestra con respecto a la superficie total. Normalmente, en inventarios forestales se han utilizado intensidades de muestreo del orden de 1%, 0.5% y 0.1%, dependiendo de varios factores; superficie por inventariar, factores económicos, precisión requerida, etcétera. Por ello, podemos definir la intensidad de muestreo de acuerdo a la precisión con la que deseamos medir las características de la población de estudio y el costo que esto conlleva, recomendándose en base a la experiencia de los autores una intensidad de muestreo mayor de 1% y hasta el 3%.

- 6. Información a medir.** En cada uno de los sitios se medirán las siguientes variables: Diámetro de cobertura Norte-Sur (D_{NS} , cm) y Diámetro de cobertura Este-Oeste (D_{EO} , cm) y Altura total (H , cm). En gabinete se obtendrá el diámetro promedio de cada una de las plantas evaluadas. Empleando la ecuación alométrica generada en el presente documento, se sustituye el valor de las variables indicadas y se obtiene el volumen o biomasa por individuo, por sitio o hectárea. Para ello, en el caso de estimaciones de biomasa o volumen promedio por sitio, se realiza la sumatoria de la biomasa o volumen total de cada sitio y se divide entre el número de ellos. Para estimaciones de biomasa o volumen promedio por hectárea ($\text{Ha}^{-1} = 10,000 \text{ m}^2$), el volumen o biomasa promedio por sitio se multiplica por un factor de superficie que depende del tamaño del del sitio y se obtiene el correspondiente a una hectárea (Berlanga *et al.*, 1992).

4. MEJORES PRÁCTICAS DE MANEJO

Las siguientes mejores prácticas se realizaron con base en el diagnóstico de cómo se aprovecha actualmente la especie del *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca, dentro del proyecto “Mejores prácticas de manejo y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México” y estas son propuestas por un grupo de investigadores de la Juárez del Estado de Durango (UJED), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES).

4.1. Mejoras en las técnicas de aprovechamiento de la especie.

El *Agave potatorum* es un recurso forestal no maderable de importancia económica y ecológica a escala local y regional en el estado. Sin embargo, su aprovechamiento, no está reglamentado. Se lleva a cabo extrayendo solo en poblaciones silvestres, lo que ha repercutido en la baja regeneración en dichas zonas. En este sentido, se proponen las siguientes prácticas de aprovechamiento y manejo para esta especie.

- El intercambio de experiencias entre comunidades puede potenciar la efectividad de las acciones y acortar el camino para el aprovechamiento sustentable de esta y otras especies forestales de las zonas áridas.

- Establecer un acuerdo entre comunidades y ejidos, para que la cosecha se realice en no más del 70% de individuos adultos por población.
- Marcar en pie aquellos agaves jóvenes que se encuentran en una etapa reproductiva, con el fin de considerarlos como individuos semilleros que realicen la reproducción sexual y dispersen semillas para asegurar el mantenimiento de las poblaciones de este agave.
- Acordar fechas de corte del cañahual, después de que las semillas hayan madurado y se hayan dispersado

4.2. Mejoras en las técnicas de extracción y beneficio del producto final

Actualmente a nivel nacional el aumento en la demanda de la industria mezcalera ha determinado mayor presión sobre las poblaciones silvestres de esta especie. Por ello se recomiendan las siguientes mejoras en la extracción con fin de conservación y producción.

- La extracción debe llevarse a cabo justo antes de que ocurra la producción del escapo. y la inflorescencia en aquellos agaves destinados para la cosecha.
- Generar estudios técnicos que indiquen la tasa de regeneración y tasa de extracción. de magueyes maduros, cuantos deben ser dejados en pie para mantener sin alteración grave la estructura del ecosistema.

- Cultivar la planta en vivero y después llevarla a lugares con alto potencial productivo.
- Realizar foros de transferencia de conocimientos en las comunidades y ejidos con énfasis en las mejores prácticas para el manejo y la conservación de este recurso.
- Buscar canales de distribución y comercialización del mezcal a escala nacional e internacional.

4.3. Reforestaciones con fines de enriquecimiento de rodales

Es de suma importancia realizar acciones puntuales que favorezcan la propagación o permanencia de este agave, sobre todo en las principales zonas de extracción del mismo para producción de mezcal. La implementación de estas propuestas de reforestación se debe realizar de preferencia, en zonas donde se realiza el aprovechamiento de la misma. Esto permitirá contribuir en la disminución del déficit de abasto de materias primas y productos para la industria mezcalera. Además de disminuir la presión del aprovechamiento sobre las poblaciones naturales. Por otro lado, permitirá la incorporación de una mayor superficie a la producción sustentable. Los pasos a seguir para la reforestación con fines de enriquecimiento de rodales de *Agave potatorum*, se describen a continuación:

1. **Selección de material para plantación:** dadas las características de la especie, se propone el establecimiento de rodales semilleros de *Agave potatorum* para mejorar la calidad de semilla, lo que

contribuye al mejoramiento genético de la misma en el estado de Oaxaca.

2. **Preparación del terreno:** Esta actividad asegura una gran parte del éxito esperado en el establecimiento de la reforestación por lo que se recomienda: sí el lugar de establecimiento fuera inclinado o presentara pendientes ligeras, realizar la reforestación en línea a una zanja bordo con terraza individual, realizar cajete o media luna opuesta a la pendiente con el fin de asegurar la captación de agua. Si el lugar de establecimiento fuera casi plano se recomienda realizar obras escarificación del suelo.
3. **Densidad de reforestación:** la distancia promedio a la que debe estar separada una planta y otra es 3 m y 4 m entre líneas, con este método se obtendrá una densidad recomendada de 840 individuos por hectárea.
4. **El diseño de la reforestación puede ser a manera de:**
 - a) **Marco real:** en este diseño las plantas se colocan formando cuadros o rectángulos. Se recomienda utilizarlo en terrenos planos o con pendientes menores a 20%.
 - b) **Diseño a tresbolillo:** las plantas se colocan formando triángulos equiláteros (lados iguales). La distancia entre planta y planta dependerá del espaciamiento que la especie demande al ser adulta. Este arreglo se deberá utilizar en terrenos con pendientes mayores a 20%, aunque también se puede utilizar en terrenos planos. Las líneas deberán seguir las curvas de nivel. Con este tipo de diseño

se logra minimizar el arrastre de suelo y a su vez aprovechar los escurrimientos.

5. **Establecimiento de la reforestación:** se deben considerar prioritarias aquellas áreas con registro de poblaciones naturales de la especie. Al realizar el establecimiento de la reforestación durante un periodo de 10 años y que cada año se establezca una superficie adecuada de la reforestación de *Agave potatorum*, para el onceavo año, ya la reforestación establecida en el primer año estará en la etapa de aprovechamiento y una vez aprovechada se podrá a volver a establecer la reforestación y seguir con el ciclo de producción de materia prima, la superficie a establecer sería de acuerdo con la capacidad de producción y elaboración del producto final.
6. **Reposición de plantas:** aunque los índices de supervivencia sean altos (entre 95 al 100%) en su etapa inicial, pueden presentarse pérdidas de planta por diversos factores, como el mal manejo de la planta durante la extracción y transporte de la misma al lugar de reforestación o presencia de plagas. Por lo tanto, es recomendable realizar una evaluación de sobrevivencia y hacer reposición de las plantas afectadas.
7. **Deshije:** por razones fisiológicas de la planta a los pocos meses de realizada la reforestación empieza a surgir la regeneración mediante hijuelos a los cuales si se permite su desarrollo en el mismo lugar estará en competencia con la planta madre. Se recomienda retirar los hijuelos y usarlos para reposición de planta fallida dentro de la misma área reforestada.

Actividades complementarias en las áreas con reforestaciones con fines de enriquecimiento de rodales:

- Cercar las áreas destinadas a producir semilla, para evitar que el ganado coma o pisotee las plantas en aquellos sitios donde se quiere asegurar que el maguey se desarrolle, sobre todo si ha sido reforestado.
- Recoger semilla de varios sitios para que se asegure la diversidad genética del material que se use para producir plantas en vivero. Aunado a esto se pueden hacer actividades de dispersión manual de semilla en sitios seguros bajo nodrizas en el campo.
- Trasplantar en campo las plantas de *Agave potatorum* bajo nodrizas.
- Realizar siembra de agaves, en primer lugar, con criterio de conservación y restauración de los ecosistemas y en segundo plano con criterio de productividad para aprovechamiento en la producción de mezcal.
- Crear una comisión encargada del monitoreo de las reforestaciones

5. ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA

Los modelos de predicción presentados en este documento son ecuaciones alométricas que proporcionan estimaciones fiables de biomasa de *Agave potatorum*. Representan una herramienta útil para la gestión forestal, ya que permiten la estimación de la biomasa total en kilogramos o por fracciones (componentes), con variables fáciles de medir en campo, como la altura y cobertura de la planta. El uso y aplicación de estas ecuaciones permiten estimar el valor de cada componente de manera indirecta antes del aprovechamiento de la planta, y dado que se trata de un método de cuantificación no destructivo, su impacto ecológico es prácticamente nulo.

El muestreo utilizado para el desarrollo de las ecuaciones alométricas de biomasa consistió en seleccionar aleatoriamente 150 individuos, los cuales fueron muestreados considerando sus dimensiones estructurales (altura de la planta y diámetros de cobertura) siguiendo una distribución uniforme; es decir tratando que fuera la misma cantidad de individuos en todas las categorías de diámetro de cobertura y altura. Para cada individuo se midieron en pie la altura total (H cm) y el diámetro de la cobertura (DC, cm). Una vez derribados, se separaron las siguientes fracciones de biomasa: piña y pencas verdes. Cada fracción se pesó en verde utilizando una báscula con una precisión de ± 1 g (ver Figura 2). Para el desarrollo de las ecuaciones se probaron diferentes combinaciones de variables predictivas o independientes (diámetro de cobertura (DC) y altura (H)). Se ajustaron diferentes modelos lineales y no lineales por el método mínimos cuadrados empleando el

procedimiento MODEL del programa SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2009); y el método iterativo de Gauss-Newton. Posteriormente, se seleccionaron los mejores modelos por componente en peso verde (piña, pencas verdes y peso total) y se ajustaron simultáneamente para garantizar la aditividad, característica que se recomienda en las ecuaciones desarrolladas para la estimación de biomasa de los distintos componentes, y que implica que la suma de las estimaciones de los diferentes componentes sea igual a la estimación de biomasa total del propio sistema.

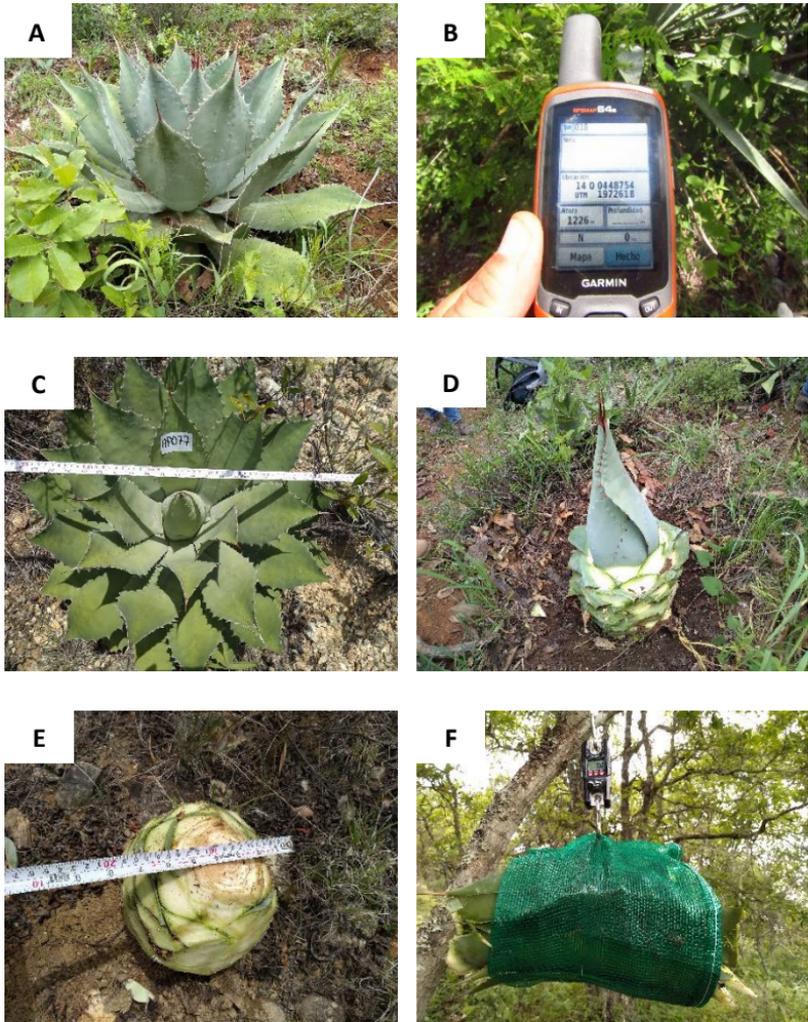


Figura 2. Muestreo realizado en el estado de Oaxaca. A) Planta completa muestreada, B) Ubicación de la planta, C) Medición de cobertura, D) Separación de los componentes, E) Medición de la piña y F) Peso de las pencas verdes.

5.1. Ecuaciones alométricas

En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas descriptivas por componente (piña y penca) de los individuos muestreados para desarrollar las ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa por componente y/o total de la planta en el estado de Oaxaca. En la Figura 3, se muestra la distribución de las dimensiones de la cobertura y la altura de las plantas muestreadas.

Cuadro 1. Resumen descriptivo de la muestra de *Agave potatorum*, colectada en el estado de Oaxaca.

Variable	No. Obs	Media	Std	Min.	Max.
<i>DC (cm)</i>	150	63.23	18.56	26.5	125
<i>H (cm)</i>	150	35.48	8.73	20	75
<i>Peso piña (kg)</i>	150	2.77	2.73	0.3	18.5
<i>Peso penca(kg)</i>	150	5.35	4.66	0.5	33.7
<i>Peso total (kg)</i>	150	8.12	7.08	0.9	52.2

Dónde: No. Obs= número de observaciones; Std= desviación estándar;

Min= valor mínimo; Max= valor máximo.

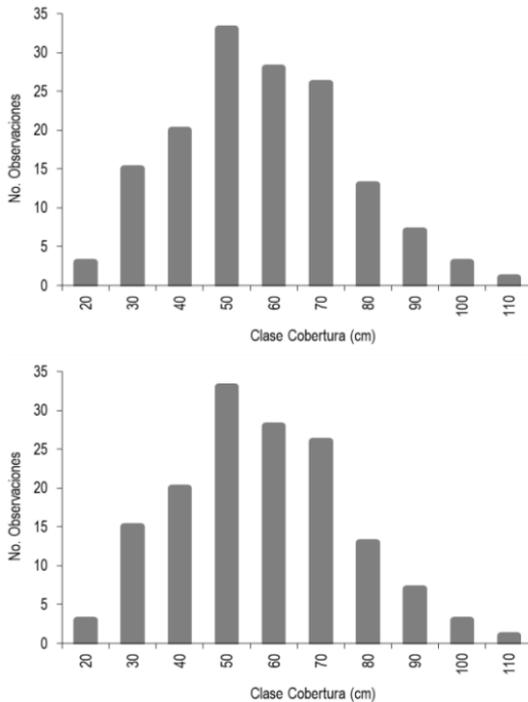


Figura 3. Distribución de la cobertura y altura de las plantas muestra en el estado de Oaxaca.

Las expresiones matemáticas, la estimación de los parámetros y los estadísticos de ajuste de las ecuaciones alométricas aditivas desarrolladas para estimación de peso verde por componente y total de *Agave potatorum*, en el estado de Oaxaca se muestra en los Cuadros 2 y 3.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación del peso verde por componente y peso total de *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca.

Componente	Modelo	No.
Piña verde	$W_C = b_0DC^2 + b_1H + b_2$	(1)
Penca verde	$W_l = \exp(b_3 + b_4 \ln(DC))$	(2)
Peso total	$W_t = b_0DC^2 + b_1H + b_2 + \exp(b_3 + b_4 \ln(DC))$	(3)

Dónde: W_i = peso verde de los componentes o total (kg), b_j =parámetro j para la estimación de los pesos, DC =diámetro de cobertura de cada planta (cm), H =altura total de cada planta (cm), \ln = logaritmo natural, \exp = exponente.

Cuadro 3. Estimación de los parámetros, contrastes de significación aproximados, y estadísticos de bondad de ajuste para las ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación de peso verde por componente y total de *Agave potatorum* en el estado de Oaxaca.

Componente	Parámetro	Estimación	Error estándar aprox.	t	Prob.		R ²	REMC (kg)	
					Aprox	> t			
Piña verde	b ₀	0.000542	0.000062	8.8	<.0001		0.67	1.03	
	b ₁	0.037988	0.0187	2.03	<.0001				
	b ₂	-1.26069	5.27E-01	-2.4	<.0001				
Penca verde	b ₃	-9.06935	0.9036	-10	<.0001		0.66	2.29	
	b ₄	2.534356	0.2042	12.4	<.0001				
Peso total								0.70	3.05

t = estadístico de t de Student; R² = Coeficiente de determinación; REMC = Raíz del Error Medio Cuadrático.

Ejemplo práctico de la aplicación de las ecuaciones alométricas:

Para estimar la biomasa por componente (piña o penca verde) del agave, sería como se explica a continuación. Supongamos que un agave tiene una altura total (H) de 80 cm y una cobertura (DC) de 150 cm; y si quisiéramos saber el volumen total, se aplicaría la ecuación 3 para el peso total, como se muestra de la siguiente manera:

Información dasométrica: $H=80 \text{ cm}$; $DC=150 \text{ cm}$

Ecuación para estimar la biomasa verde de la piña:

$W_t = b_0 DC^2 + b_1 H + b_2 + \exp(b_3 + b_4 \ln(DC))$, se
sustituyen las variables con los valores del Cuadro 3:

$$W_t = (0.000542 * (150)^2) + 0.037988 * 80 + (-1.26069 + \exp(-9.06935 + 2.534356 \ln(150))),$$

$W_t = 21.63 \text{ kg}$; Peso total de piña verde dadas esas condiciones de la planta.

En el Cuadro 4 se muestra los predios en el estado de Oaxaca donde se llevó a cabo el muestreo.

Cuadro 4. Municipios y predios en donde se llevó a cabo el muestreo en el estado de Oaxaca.

Estado	Municipio	Predio	
Oaxaca	Santa Catarina Cuixtla	Santa Catarina Cuixtla	
	Villa de Diaz Ordaz	Villa de Diaz Ordaz	
	San Lorenzo Albarradas	San Lorenzo Albarradas	
	Santa María Ecatepec	Santa María Ecatepec	
	San Juan La jarciá	Santa María Zoquitlan	Villa Sola De Vega
			La Zeta
			Morales
			Ojo De Agua
			San Ildefonso Sola
			La colorada
	San Juan del Estado	San Juan del Estado	
	Magdalena Apasco Etlá	Santa Martha Etlá	
	Santa Catarina Ixtepeji	Santa Catarina Ixtepeji	
	Nuevo Zoquiapam	Nuevo Zoquiapam	Teococuilco De Marcos Pérez
			Santiago Zochila
	Santiago Zochila	Santiago Zochila	
	San Francisco Cajonos	San Francisco Cajonos	
	Santiago Nacaltepec	Santiago Nacaltepec	
	San Juan Bautista Coixtlahuaca	San Juan Bautista Coixtlahuaca	
	Tepelmeme Villa de Morelos	Tepelmeme Villa de Morelos	
Zimatlán de Álvarez	Zimatlán de Álvarez		
San Bernardo Mixtepec	San Bernardo Mixtepec		
Magdalena Mixtepec	Santa Catalina Mixtepec		
San Juan Bautista Jayacatlan	San Juan Bautista Jayacatlan		

6. MAPA DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA ESPECIE

Los modelos de distribución potencial de las especies son de gran relevancia en la actualidad ya que emplean información característica del sitio y registros de su presencia. El principio de máxima entropía trata de encontrar aquellas zonas del terreno en las cuales se encuentran las condiciones óptimas para que las especies sobrevivan, mostrando una aproximación de su distribución que es útil en áreas de la conservación como la biología y la biogeografía (Phillips *et al.*, 2006). La importancia de los modelos de nicho ecológico, así como los mapas de distribución y su proyección al espacio geográfico son importantes en ecología, puesto que por medio de estas herramientas es posible conocer los requerimientos ecológicos de las especies (Leal-Nares *et al.*, 2012), y otras zonas con condiciones climáticas similares que puedan favorecer su establecimiento. Lo anterior puede ser aplicado tanto a especies de zonas boscosas, tropicales o zonas áridas, en especial especies endémicas o en algún grado de riesgo. Sin embargo, la aplicación de los modelos de distribución en el manejo de especies de importancia económica es de gran relevancia, por ubicar áreas o regiones con diferentes grados de potencial productivo, en este caso las áreas de mayor potencial son las más atractivas para el establecimiento de áreas de conservación o programas de reforestación de *Agave potatorum*. A pesar de que los modelos de distribución pueden ser muy robustos en la ubicación de sitios potenciales, se recomienda considerar terrenos con condiciones de suelo y relieve similares a zonas donde la especie se desarrolla de manera natural.

La Figura 4 muestra el mapa del área de distribución potencial de *Agave potatorum*, el cual fue construido por los autores de este documento utilizando variables bioclimáticas como predictores, lo que resulta en áreas que son climáticamente adecuadas para el desarrollo la especie. El mapa cuenta con una escala de idoneidad que va desde 0 a 1 (cero es inexistencia de condiciones adecuadas para la especie y 1 es presencia de condiciones óptimas). Posteriormente, se reclasificaron estos valores mediante el procedimiento estadístico de Método de Cuantiles Relativos (INEGI, 2010), para obtener las regiones de clases de idoneidad ambiental de potencial Bajo, Media y Alta. Entendiéndose por “Alta” aquellas áreas donde existen las mejores condiciones climáticas para la especie.

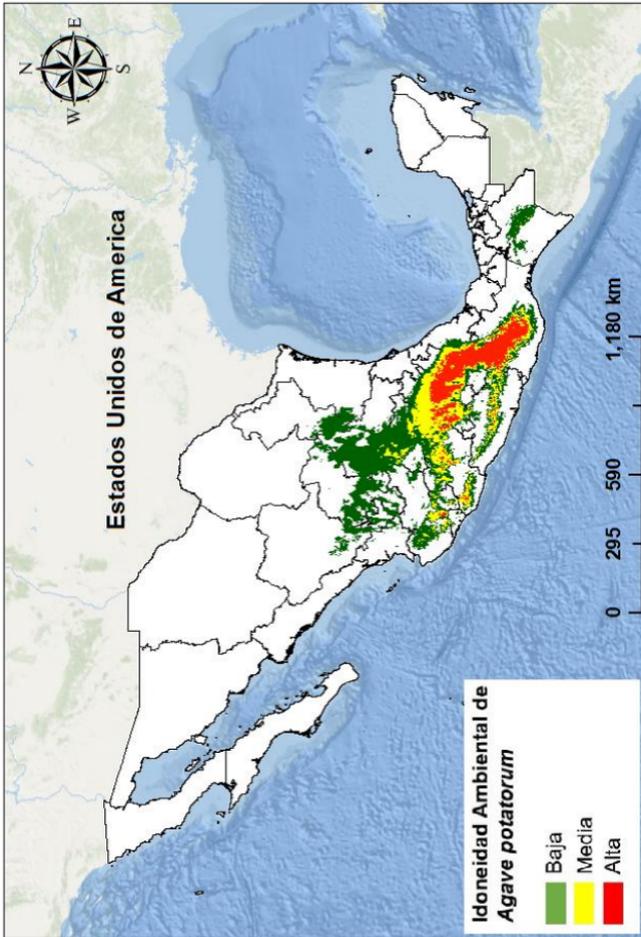


Figura 4. Clases de idoneidad ambiental para *Agave potatorum*, generadas a partir de modelos de distribución potencial

7. CONCLUSIONES

El *Agave potatorum* es un recurso forestal no maderable con alta importancia económica y ecológica. Su aprovechamiento no está regulado y la extracción generalmente se realiza en individuos reproductivos, lo que repercute drásticamente en el decremento de las poblaciones silvestres. Las ecuaciones alométricas de biomasa de *Agave potatorum* generadas para el estado, constituyen una herramienta útil para estimar con precisión la biomasa verde de la especie en las autorizaciones del aprovechamiento, asegurando un menor sesgo en las estimaciones totales. El mapa de distribución potencial del *Agave potatorum*, presentado en este documento representa un esquema gráfico de áreas o regiones con diferente grado de potencial productivo, para el establecimiento de áreas de conservación y programas de reforestación de la especie.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Gadow, K. and Hui, G. 1999. Modelling forest development (Vol. 57). Springer Science & Business Media.
- García-Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. Ciencias 87: 14-23.
- Gentry H S (1982) Agaves of Continental North America. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. 670 p.
- Granados S D (1999) Los Agaves en México. 1a. reimp. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. México. 252 p.
- INEGI, 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; Nota técnica univariada. 17 p.
- Leal-Nares, O., M. E. Mendoza, D. Pérez, D. Geneletti, E. López y E. Carranza. 2012. Distribución potencial del *Pinus martinexii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. Revista Mexicana de Biodiversidad, 83: 1152-1170.
- LGDFS. 2021. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada 26-04-2021.
- López B. L. A. 2005. El sotol en Coahuila, potencialidades y limitaciones. Capítulo 3. In: Contreras D., C. e I. Ortega R. 2005. Bebidas y Regiones: Historia e impacto de la cultura etílica en México. Plaza y Valdés, S.A de C.V. 200p.
- Madrigal Collazo, A. 1994. Ordenación de montes arbolados.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapired. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190: 231-259.
- RLGDFS. 2020 reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada 09-12-2020.
- Sánchez L A (2005) Oaxaca, Tierra de Maguey y Mezcal. 2a ed. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca. México. 235 p.
- Sandoval H E, M Rubio E (1997) La situación actual de la industria mezcalera del estado de Oaxaca. Bebidas Mex. 6:12-13.
- SAS Institute. 2009. SAS Proprietary Software Version 9.3. SAS Institute, Cary, NC.
- Torres Ignacio AC. Delgado-Lemus A. Rangel-Landa S., 2013. Aprovechamiento, demografía y establecimiento de *Agave*

potatorum en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable. Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Apartado Postal 27-3, Santa María Guido, C.P. 58090, Morelia, Michoacán, México. Zonas Áridas 15 (1): 92-109.

Velasco B, E., M. C. Zamora-Martínez, H. Espinosa P., C. Sampayo B. y F. Moreno S. 2009. Modelos Predictivos para la Producción de Productos Forestales No Maderables: Agaves Mezcaleros. Manual Técnico Núm. 3. CENID-COMEF. INIFAP, México, D. F. México, 60 p.

9. GLOSARIO

Acahual: Hierba alta y silvestre, de tallos algo gruesos, que suele cubrir los terrenos cultivados o los que están en barbecho.

Capado: Consiste en cortar el vástago floral a una altura menor a 1.5 metros, después de caparlo se deja en pie el agave por un tiempo no mayor a un año para que éste tenga una mayor concentración de azúcares en la piña o cabeza.

Ecuación alométrica. Fórmula matemática que representa la relación entre la biomasa y el diámetro o la altura de la planta y permite realizar predicciones con bajos requerimientos de datos.

Especie. Unidad básica de clasificación de los organismos; incluye a todos los individuos que se parecen entre sí más que a otros y que producen descendencia fértil.

Hijuelos: Son plantas que se desarrollan a partir del tallo principal de la planta madre, cada uno de ellos cuenta con su propio sistema radicular y características fenotípicas similares a las de la progenitora.

Manejo forestal sustentable. Es el proceso que comprende el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto la ordenación, el cultivo, la protección, la conservación, la restauración y el aprovechamiento de los recursos y servicios ambientales de un ecosistema forestal, considerando los principios ecológicos, respetando la integralidad funcional e interdependencia de recursos y sin que disminuya o ponga en riesgo la capacidad productiva de los ecosistemas y recursos existentes en la misma.

Norma Oficial Mexicana. La regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación.

Regeneración. Capacidad natural del bosque para reproducirse o capacidad de un organismo vivo para recuperar por sí mismo sus partes pérdidas o dañadas.

Rodalización. Proceso que consiste básicamente en definir los rodales que tiene en un área, entendiendo como rodal el espacio continuo en el que la disposición de la vegetación dominante responde a unas mismas características en cuanto a su grado de cubierta, composición específica, regularidad, tamaño de los individuos, densidad y patrón de distribución de estos caracteres.

10. SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal.
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
ITES	Instituto Tecnológico de El Salto.
LFPA	Ley Federal de Procedimiento Administrativo.
LGDFS	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
LGVS	Ley General de Vida Silvestre.
NOMs	Normas.
RLGDFS	Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
UAAAN	Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
UACH	Universidad Autónoma de Chihuahua.
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León.
UJED	Universidad Juárez del Estado de Durango



Fondo

CONACYT

CONAFOR

**Fondo Sectorial para la
Investigación, el Desarrollo y la
Innovación Tecnológica Forestal**



CONAFOR

COMISIÓN NACIONAL FORESTAL



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología