



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE
INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA**

Maestría en Ciencias en Conservación y
Aprovechamiento de los Recursos Naturales
(Ingeniería)

**“DISTRIBUCIÓN POTENCIAL Y REPRODUCCIÓN POR
SEMILLA, DE ESPECIES DE AGAVE EMPLEADAS EN
LA ELABORACIÓN DE MEZCAL EN EL MUNICIPIO DE
VILLA DE SOLA DE VEGA, OAXACA”**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Raymundo Martínez Jiménez

Directores de tesis:

Dr. Magdaleno Caballero Caballero

Dr. Jaime Ruíz Vega

Santa Cruz, Xococotlán.

Diciembre de 2016



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 07 del mes de diciembre del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca** (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: **Distribución potencial y reproducción por semilla de especies de agave empleadas en la elaboración de mezcal, en el Municipio de Villa de Sola de Vega, Oaxaca.**

Presentado por el alumno:

Martínez

Apellido paterno

Jiménez

materno

Raymundo

nombre(s)

Con registro:

B	1	4	0	0	4	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

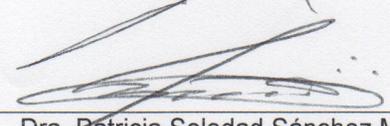
Directores de tesis



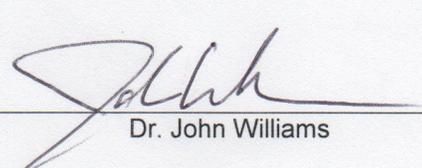
Dr. Magdalena Caballero Caballero



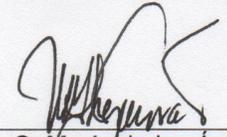
Dr. Jaime Ruiz Vega



Dra. Patricia Soledad Sánchez Medina



Dr. John Williams



M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACION PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL C.I.I.D.I.R. UNIDAD OAXACA I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 07 del mes de diciembre del año 2016, el (la) que suscribe **Martínez Jiménez Raymundo**, alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B140041, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Drs. Magdaleno Caballero Caballero y Jaime Ruiz Vega y cede los derechos del trabajo titulado: **“Distribución potencial y reproducción por semilla de especies de agave empleadas en la elaboración de mezcal, en el Municipio de Villa de Sola de Vega, Oaxaca”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó raymundomj@hotmail.com, Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Martínez Jiménez Raymundo



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

DEDICATORIA



A ti Aida que eres
mi luz de noche,
mi luz de día.
Gracias por todo.

A nuestra pequeña
Camila que viene a
dar más alegría
a nuestra vida.

A mis padres Raymundo y Nohemí por su amor ,
a mis hermanos Baldomero, José Eduardo y su familia

A la pequeña Mía

A los productores de Mezcal de Sola de Vega

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico parcial brindado en el transcurso de estos estudios.

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN), por el apoyo económico brindado a través de la beca tesis.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR-Oaxaca) del IPN, por brindarme un espacio de formación científica y desarrollo profesional.

Al Dr. Magdaleno Caballero Caballero por el apoyo incondicional, por su asesoría y por la confianza brindada desde antes de comenzar mi estancia en el CIIDIR-IPN.

Al Dr. Jaime Ruiz Vega, por sus asesorías, sugerencias y comentarios en la realización del presente trabajo.

Al comité revisor del presente trabajo, conformado por el Dr. John Williams, Dra. Patricia Soledad Sánchez Medina y M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres, por sus sugerencias y recomendaciones.

Al Dr. José Cristobal Leyva López, por ser un asesor sin título oficial y por su sincera amistad.

Al M. en C. Luis Silva Santos y el M. en C. José Luis Montes Bernabé por el gran apoyo en la realización del presente trabajo.

A la Unión de Productores de Maguey y Mezcal Raíces Soltecas SPR de RL, por las facilidades proporcionadas para llevar a cabo el desarrollo experimental del presente trabajo.

A los productores de maguey y mezcal del municipio de Villa Sola de Vega por su amistad y compromiso en el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación.

Al personal docente y administrativo del CIIDIR-IPN, unidad Oaxaca y compañeros de generación .

A mi familia por ser el más importante pilar.

CONTENIDO

Resumen	i
Abstract	ii
Introducción	iii
Planteamiento del problema:	v
Justificación	v
Objetivos e hipótesis.....	vi
Hipótesis	vi
Objetivo General.....	vi
Objetivos Específicos	vi
Capítulo I. Marco teórico conceptual.....	1
1.1. El género <i>Agave</i>	1
1.2. Distribución del género <i>Agave</i>	2
1.3. Usos de los <i>Agaves</i>	4
1.5. Endemismo y conservación del género <i>Agave</i>	8
1.6. Estudios sobre reproducción del género <i>Agave</i>	11
1.7. Reproducción de agaves mezcaleros.....	13
1.7.1. Reproducción por hijuelos rizomatosos o vástagos de raíz.....	14
1.7.2. Reproducción por bulbilos o vástagos de inflorescencia.....	14
1.7.4. Reproducción sexual o por semilla	15
1.8. La producción de planta forestal	16
1.8.1. La importancia del germoplasma forestal	16
1.8.2. Germinación	17
1.8.3. Factores que influyen en la germinación	18
1.9. Tratamientos especiales a las semillas-Tratamientos pregerminativos.....	19
1.9.1. Secado de semillas.....	19
1.9.2. Remojo de semillas	20
1.9.3. Escarificación	20
1.9.4. Estratificación.....	20
1.9.5. Alternancia de luz.....	21
1.10. Normatividad sobre el aprovechamiento de magueyes mezcaleros	21
1.10.1. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS).....	21
1.10.2. Reglamento de la LGDFS	22
1.10.3. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) ..	22
1.10.4. Ley de vida silvestre.....	22
1.10.5. NOM-070-SCFI-Bebidas Alcohólicas Mezcal.....	23
1.11. Distribución potencial	23
Capítulo II. Materiales y métodos.....	25
2.1. Área de estudio	25

2.2. Metodología	26
2.2.1. Identificación de las especies y variedades empleadas para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	27
2.2.2. Caracterización de semillas de agave	28
2.2.2.1. Cosecha de semilla.....	28
2.2.2.2. Muestreo	30
2.2.2.3. Análisis de calidad de las semillas	31
• Pureza	31
• Viabilidad.....	32
2.2.2.4. Características físicas de las semillas	33
• Determinación de contenido de humedad.	33
• Peso:.....	34
2.2.2.5. Propiedades geométricas.....	35
2.2.3. Distribución potencial de agaves empleados en la elaboración de mezcal.....	36
2.2.3.1. Construcción del modelo de distribución potencial	36
2.2.4. Evaluación del método de reproducción por semilla.....	38
Capítulo III. Resultados y discusión.....	40
3.1. Identificación de las especies y variedades empleadas para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	40
3.1.1. Valoración económico-productiva de los agaves empleados para elaborar mezcal en Sola de Vega.....	41
3.2. Caracterización de semillas de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	46
3.2.1. Análisis de calidad de las semillas de Agave	46
• Pureza	46
• Viabilidad.....	48
3.2.2. Análisis de características físicas de la semilla	48
3.2.2.1. Contenido de Humedad.....	48
3.2.2.2. Peso.....	49
3.2.3. Propiedades geométricas	51
3.2.3.1. Longitud, ancho, espesor y esfericidad.....	51
3.3. Distribución potencial de agaves silvestres empleados en la elaboración de mezcal	53
3.3.1. Muestreo.....	53
3.3.2. Modelos de distribución potencial	53
3.3.2.1. Aportación de las variables al modelo.....	54
• Vegetación	56
• Humedad del suelo	58
• Tipo de clima.....	60
• Precipitación anual.....	61
• Temperatura media anual (TMA).....	63
• Elevación	65

• Tipo de suelo	67
3.3.2.2. Validación del modelo	69
• Prueba Jackknife.....	69
• Gráfico de omisión y área predicha	70
• Curva AUC.....	72
3.3.2.3. Mapa de distribución potencial para <i>Agave potatorum</i>	80
3.3.2.4. Mapa de distribución potencial para <i>Agave rhodacantha</i>	81
3.3.2.5. Mapa de distribución potencial para <i>Agave marmorata</i>	82
3.3.2.6. Mapa de distribución potencial para <i>Agave karwinskii</i>	83
3.3.2.7. Mapa de distribución potencial para <i>Agave convallis</i>	84
3.3.2.8. Mapa de distribución potencial para <i>Agave angustifolia</i>	85
3.3.2.9. Mapa de distribución potencial para <i>Agave americana</i>	86
3.3.2.10. Mapa de distribución de especies de agaves empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega	87
3.4. Reproducción por semilla de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	89
Capítulo IV. Conclusiones.....	102
Capítulo V. Recomendaciones.....	104
Capítulo VI. Referencias consultadas	105

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de las Agavaceae de Oaxaca por tipo de vegetación.....	4
Cuadro 2. Agaves; sus principales categorías de uso, partes de la planta utilizadas y especies importantes para la obtención de benefactores para el hombre.....	6
Cuadro 3. Especies del género Agave incluidas en alguna categoría de riesgo por la NOM 059 SEMARNAT 2010.....	10
Cuadro 4. Diseño experimental utilizado.....	39
Cuadro 5. Magueyes empleados para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	40
Cuadro 6. Matriz de valoración de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	44
Cuadro 7. Resultados del muestreo del análisis de pureza	46
Cuadro 8. Viabilidad de las semillas de <i>Agave</i> analizadas	48
Cuadro 9. Datos del análisis de contenido de humedad	49
Cuadro 10. Peso de semillas de agave.....	50
Cuadro 11. Dimensiones de semilla de <i>A. karwinskii</i> (Maguey Tobasiche).....	52
Cuadro 12. Estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de Maxent.....	54
Cuadro 13. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable uso de suelo y vegetación	56
Cuadro 14. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable humedad del suelo	59
Cuadro 15. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima	60
Cuadro 16. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable precipitación anual.....	62
Cuadro 17. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable temperatura media anual.....	63
Cuadro 18. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación	65
Cuadro 19. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación	67
Cuadro 20. Área de distribución de agaves mezcaleros en el municipio de Villa Sola de Vega	89
Cuadro 21. Porcentaje de germinación de tratamientos y repeticiones	91
Cuadro 22. Porcentaje de germinación y promedios	91
Cuadro 23. Anova diseño factorial	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del municipio de Villa Sola de Vega	25
Figura 2. Metodología general del proyecto de investigación	26
Figura 3. Almacenamiento en envases de vidrio de la semilla de agave	28
Figura 4. Cosecha de semilla de agave	29
Figura 5. Pasos para la construcción de modelos de distribución potencial	37
Figura 6. Gráfica de valoración productiva, (Rendimiento y Tiempo de madurez) de agaves mezcaleros	41
Figura 7. Gráfica de valoración productiva (%Azúcares Reductores Totales ART y Litros de mezcal por piña de agave).....	42
Figura 8. Gráfica de valoración económica (Valor en pesos mexicanos de un maguey en litros y precio de litro de mezcal).	43
Figura 9. Gráfica de valoración de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega	45
Figura 10. Detalle de semillas de agave puras (a) e impuras (b).....	47
Figura 11. Análisis de varianza del análisis de pureza.....	47
Figura 12. Análisis estadístico para los grupos de semillas. (Comparación de medias por el método LSD de Fisher)	47
Figura 13. Determinación de contenido de humedad.....	49
Figura 14. Pesado de las semillas de agave.....	51
Figura 15. Medición de semillas con proyector de perfiles Mitutoyo.....	52
Figura 16. Aportación de las variables a los modelos de distribución.....	55
Figura 17. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación	57
Figura 18. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable humedad del suelo	59
Figura 19. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima	61
Figura 20. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima	62
Figura 21. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable temperatura media anual.....	64
Figura 22. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación	66
Figura 23. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de suelo	68
Figura 24. Resultados de la prueba Jackknife para la importancia de cada variable por especie de agave modelada.....	69
Figura 25. Gráficos de omisión y área predicha.....	71
Figura 26. Curva AUC para <i>Agave potatorum</i>	73
Figura 27. Curva AUC para <i>Agave rhodacantha</i>	74
Figura 28. Curva AUC para <i>Agave marmorata</i>	75
Figura 29. Curva AUC para <i>Agave karwinskii</i>	76
Figura 30. Curva AUC para <i>Agave convallis</i>	77

Figura 31. Curva AUC para <i>Agave angustifolia</i>	78
Figura 32. Curva AUC para <i>Agave americana</i>	79
Figura 33. Mapa de distribución de <i>Agave potatorum</i>	80
Figura 34. Mapa de distribución de <i>Agave rhodacantha</i>	81
Figura 35. Mapa de distribución de <i>Agave marmorata</i>	82
Figura 36. Mapa de distribución de <i>Agave karwinskii</i>	83
Figura 37. Mapa de distribución de <i>Agave convallis</i>	84
Figura 38. Mapa de distribución de <i>Agave angustifolia</i>	85
Figura 39. Mapa de distribución de <i>Agave americana</i>	86
Figura 40. Mapa de distribución de agaves mezcaleros	87
Figura 41. Vegetación de Sola de Vega, contrastada con distribución real de agaves	88
Figura 42. Instalación de semillero experimental tipo casa sombra.....	90
Figura 43. Resultado de la prueba de comparación de medias de Fischer LSD para el factor especie de agave.....	93
Figura 44. Resultado de la prueba de comparación de medias Tukey-Kramer para el factor especie de agave.....	93
Figura 45. Resultado de la prueba de comparación de medias de Fischer LSD para el factor imbibición.....	94
Figura 46. Resultado de la prueba de comparación de medias Tukey-Kramer para el factor imbibición	94
Figura 48. Curva de germinación acumulada para <i>Agave rhodacantha</i>	96
Figura 50. Curva de germinación acumulada para <i>Agave angustifolia</i>	98
Figura 51. Curva de germinación acumulada para el factor imbibición.....	99
Figura 52. Curva de germinación acumulada para el factor imbibición.....	100

Resumen

Las poblaciones de agaves se ven comprometidas por su uso intensivo como materia prima en la industria del mezcal, es necesario contar con herramientas que faciliten su manejo. Se identificaron las especies empleadas en la elaboración de mezcal y se clasificaron las que mayor importancia tuvieron, tomando en cuenta parámetros ecológicos, económicos y socio-culturales. Se generó información de distribución potencial a través del algoritmo de Máxima Entropía (Maxent), para *Agave potatorum*, *A. americana*, *A. karwinskii*, *A. angustifolia*, *A. convallis* y *A. marmorata*, que fueron las especies con mayor importancia en el municipio. Se caracterizó la semilla de *A. potatorum*, *A. angustifolia*, *A. karwinskii* y *A. rhodacantha*, realizando pruebas de calidad (contenido de humedad, peso, pureza) y forma (dimensiones: largo, ancho, espesor). Para las mismas especies se evaluó la germinación en charolas de unicel, donde se analizó la especie de *Agave* y el tiempo de imbibición (0, 12, 24 y 48 horas). Los valores del área bajo la curva (AUC) en Maxent fueron para todas las especies mayores a 0.8, lo que habla de la bondad de ajuste del modelo para estos agaves. Las especies con mayor distribución en el territorio fueron *A. potatorum*, *A. americana* y *A. angustifolia*; en el caso de las demás especies, se cuenta con distribución restringida. Respecto a la caracterización, la especie con mayores dimensiones fue *A. angustifolia* (9.23mmX7.45mmX1.03mm), seguida de *A. karwinskii* (8.92mmX6.44mmX0.64mm), *A. rhodacantha* (8.12mmX6.36mmX0.67mm) y *A. potatorum* (7.94mmX5.79mmX0.79mm) respectivamente, sin embargo *A. potatorum* tuvo resultados superiores a las otras especies en las pruebas de calidad. La germinación inició al día 11 de establecidos los experimentos y la especie que mejor respondió a la germinación fue *A. potatorum* con un 84.5 %. El tiempo de imbibición en agua por 24 horas fue el mejor.

Palabras clave: Maxent, AUC, *germinación*, *Agave*, mezcal

Abstract

The *Agave* populations are compromised by their intensive use as raw material in the mezcal industry, it is necessary to have tools to facilitate their management. The species used in the elaboration of mezcal were identified and the most important were classified, taking into account ecological, economic and socio-cultural parameters. Potential distribution information was generated for *Agave potatorum*, *A. americana*, *A. karwinskii*, *A. angustifolia*, *A. convallis* and *A. marmorata*, which were the most important species in the municipality, using the Max entropy algorithm (Maxent). Seeds of *A. potatorum*, *A. angustifolia*, *A. karwinskii* and *A. rhodacantha* were characterized by quality (moisture content, weight, purity) and shape (dimensions: length, width, thickness). For the same species germination was evaluated in unicef trays, where the *Agave* species and the imbibition time (0, 12, 24 and 48 hours) were analyzed. The values of the area under the curve (AUC) in Maxent were for all species greater than 0.8, which speaks of the good fit of the model for these agaves. The species with greater distribution in the territory were *A. potatorum*, *A. americana* and *A. angustifolia*; In the case of the other species, there is a restricted distribution. As for the characterization, the species with larger dimensions was *A. angustifolia* (9.23mmX7.45mmX1.03mm), followed by *A. karwinskii* (8.92mmX6.44mmX0.64mm), *A. rhodacantha* (8.12mmX6.36mmX0.67mm) and *A. potatorum* (7.94mmX5.79mmX0.79mm) respectively, however *A. potatorum* had superior results to the other species in the quality tests. Germination started on day 11 of established experiments and the species that best responded to germination was *A. potatorum* with 84.5%. The time of imbibition in water for 24 hours was the best.

Key words: Maxent, AUC, *germination*, *Agave*, mezcal

Introducción

El mezcal es una de las actividades productivas y culturales más importantes con que cuenta el Estado de Oaxaca, su valía radica en los procesos artesanales con los que se produce esta bebida. En la región mezcalera de Oaxaca 4,355 familias dependen directamente de esta actividad (OEIDRUS, 2011). Representa para Oaxaca y sus estrategias de desarrollo rural una de las tres cadenas productivas prioritarias, junto al café y el maíz, tomando en cuenta su superficie, derrama económica y cantidad de productores dedicados a la actividad (SAGARPA, 2009). Durante el año 2015, en Oaxaca se produjo el 97.3% del Mezcal certificado a granel (2, 353, 857 litros) comprendido dentro del área con denominación de origen mezcal en la república mexicana (CRM, 2016).

El municipio de Villa Sola de Vega, se encuentra inserto dentro del área comprendida en la resolución mediante la cual se otorga la protección prevista a la denominación de origen Mezcal, para ser aplicada a la bebida alcohólica del mismo nombre (DOF, 2015). El proceso artesanal que se lleva a cabo en Sola de Vega para producir mezcal, exige el aprovechamiento de plantas del género *Agave*, que de acuerdo con Espinosa *et al.*, 2002, Eguiarte, 2006 y García *et al.*, 2007, de un total de 166 especies vegetales que se incluyen en el género *Agave* a nivel mundial, el 75% son nativas de México; por ello, se considera a este país como centro de origen del género, cifra de suma importancia dadas las similitudes ecológicas y morfológicas de este grupo taxonómico. En Oaxaca, gracias a los innumerables microclimas existentes, se han desarrollado cerca de 30 especies del género *Agave* (Palma, 1991).

Los agaves pueden crecer en tierras áridas y semiáridas marginales (García, 2010), donde sus adaptaciones ecológicas y fisiológicas propician que Oaxaca sea la entidad con mayor riqueza de agaváceas y Sola de Vega el distrito con la mayor diversidad de agaves mezcaleros (Sánchez, 2005). En el distrito de Sola de Vega se emplean para elaborar mezcal especies cultivables como: Maguey Espadin (*Agave angustifolia*), domesticadas como: Maguey Arroqueño (A.

americana var. *oaxacensis*), Barril/Tobasiche (*A. karwinskii*) o silvestres como: Maguey Mexicano (*A. rhodacantha*), Maguey Jabalí (*A. convallis*), Maguey Tepeztate (*A. marmorata*) y la más importante en la Región, el Maguey Tobalá (*A. potatorum*), de las cuales siete presentan bajas poblaciones y riesgo de extinción (Espinosa *et al.*, 2002). Las causas que han influido en el declive de las poblaciones de agaves empleados en la producción de mezcal son diversas, entre ellas: la ampliación de la frontera agrícola, pérdida de especies polinizadoras, ataque de animales silvestres o domésticos que impiden el desarrollo de los pedúnculos florales, pero principalmente por su explotación para la obtención de mezcal (Illsey *et al.*, 2005). Ante ello se presenta otra problemática: la diversidad genética del agave se ve amenazada por la reproducción clonal y el cambio climático, la reproducción sexual es poco común y la investigación sobre la germinación por semilla es escasa (Ramírez-Tobías *et al.*, 2014).

En la presente investigación se identificaron las especies empleadas para elaborar mezcal a través de entrevistas a productores de mezcal de la región y revisión de los registros de producción con productores certificados ante el Consejo Regulador del Mezcal, dado que ellos diferencian sus lotes de producción de acuerdo a la especie de agave utilizada. Con dicha información se elaboró una matriz, en la cual se evaluaron criterios económicos, sociales, técnico-productivos y ecológicos relativos a las especies de agave que se utilizan como materia prima para la elaboración de mezcal, con el fin de determinar cuales tienen mayor importancia para los productores de la región. Se colectó semilla en los años 2014 y 2015 en parcelas de cultivo y áreas de producción natural de cuatro especies de agave (*Agave karwinskii*, *A. angustifolia*, *A. rhodacantha* y *A. potatorum*), misma que se caracterizó física y geoméricamente, obteniendo los siguientes parámetros: Contenido de humedad, porcentaje de pureza, peso, largo, ancho, espesor, esfericidad, y viabilidad. Para las especies mencionadas, se evaluó el método de reproducción por semilla en charolas de germinación, comparando en un análisis factorial el efecto de la especie de agave y cuatro niveles de escarificación (0,12, 24, 48 hr) en agua fría, realizando 4x100 repeticiones para

cada tratamiento. Finalmente se realizaron muestreos en áreas de distribución reconocidas por productores de mezcal y recolectores de agave, para obtener información de presencia de las especies de agave determinadas con mayor importancia. Se modeló a través de herramientas geoestadísticas con el algoritmo Máxima Entropía (MAXENT), la distribución de los agaves en el municipio de Villa Sola de Vega.

Planteamiento del problema:

En los últimos cinco años, la industria mezcalera ha tenido un crecimiento importante, pasando de 980,375 litros producidos en 2011 a 2,419,175 litros producidos en 2016 a nivel nacional (CRM, 2016). Este aumento de la producción de mezcal, ha impactado en todas las regiones productoras del país y particularmente en el estado de Oaxaca, obedeciendo a una alta demanda en el consumo de mezcales en los mercados nacional e internacional. La materia prima que se utiliza para elaborar este destilado, es el maguey o agave, la alta demanda de esta bebida alcohólica tradicional, ha generado una fuerte presión en las plantaciones y poblaciones de agaves, reflejándose en un problema de escasez. La investigación sobre la reproducción por semilla y el conocimiento de la distribución de los agaves en el municipio es escasa, contar con este tipo de información, permitirá generar herramientas de análisis que a su vez faciliten la toma de decisiones en la conservación y aprovechamiento de la biodiversidad de agaves y fortalecer la agroindustria mezcalera en la región.

Justificación

Con la presente investigación se contribuirá al estudio y conservación de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega. Se generará conocimiento sobre las especies de agave empleadas en la elaboración del mezcal, su distribución potencial, la caracterización de la semilla y el método de reproducción sexual de dichas especies, que en términos económicos implica

una técnica de bajo costo para el abasto de material vegetativo. Al ser la reproducción por semilla un método de fácil adopción y replicación, contribuye socialmente al fomento a la conservación del conocimiento y uso tradicional de la diversidad de agaves en la elaboración de mezcal.

Objetivos e hipótesis

Hipótesis

H₁: A través de la modelación bioclimática, se podrá determinar la distribución potencial de los agaves en el municipio de Villa Sola de Vega, Oaxaca

H₂: Existe escasez de agaves con alto potencial productivo empleados en la elaboración de mezcal, la propagación por semilla es una técnica que permitirá reproducir las especies de agave con potencial productivo

Objetivo General

Evaluar la distribución potencial y el método de reproducción por semilla en vivero de especies del género agave, con bajas poblaciones en estado silvestre y alto potencial productivo en el municipio de Villa Sola de Vega, Oaxaca.

Objetivos Específicos

- Identificar las especies empleadas en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega.
- Determinar la distribución potencial de las especies y variedades empleadas para la producción de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

- Caracterizar física y geométricamente la semilla de las especies y/o variedades de agave empleadas en la elaboración de mezcal
- Propagar por el método de reproducción por semilla las especies y/o variedades de agaves empleadas en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

Capítulo I. Marco teórico conceptual

1.1. El género Agave

Entre las familias de monocotiledóneas incluidas en el orden Asparagales, se encuentran las Agavaceae, cuyo centro de diversidad está en México. Se reconocen dos subfamilias (Agavoideae y Yuccoideae), nueve géneros y aproximadamente 330 especies (García-Mendoza *et al.*, 2004). El origen de la familia está relacionado con el surgimiento de las zonas áridas de Norteamérica, desde mediados del mioceno y la evolución de su flora (Briones, 1994). Usando un reloj molecular Eguiarte (1995) y Eguiarte *et al.* (2000) estiman que las Agavaceae se originaron hace 15 millones de años (Mioceno) y mencionan que al analizar más evidencias, posiblemente este periodo temporal deba ampliarse.

Magüey es la forma común de referirse a las especies del género *Agave*, el cuál es uno de los nueve géneros de la familia Agavaceae, actualmente se reconocen más de 200 especies. *Agave* proviene del griego “admirable” y fue asignado por Carl von Linné en 1753, en *Species Plantarum*, siendo *Agave americana* la primer especie descrita de esta obra. Hay un importante componente endémico en la diversidad de agaves en México, la gran mayoría (75%) son originarios del territorio mexicano, por lo que nuestro país es considerado centro de origen de este género (García-Mendoza, 2002). El alto grado de endemismo de especies que existe en México se debe a la heterogeneidad del territorio y a las propiedades intrínsecas de cada especie, tales como su plasticidad fenotípica, tolerancia ecológica, capacidad de dispersión, germinación de sus semillas, así

como a sus interacciones bióticas con otros organismos, como los polinizadores (principalmente de hábitos nocturnos, murciélagos y polillas), y a factores como los eventos históricos.

1.2. Distribución del género *Agave*

En México se encuentran las dos subfamilias y los nueve géneros de la familia Agavaceae. El género más extenso es *Agave* y tiene un 69% de endemismos en México (García-Mendoza, 2002), a su vez es el género con la mayor distribución de la familia, pues crece desde el sur de Estados Unidos hasta Colombia y Venezuela, incluyendo las Islas del Caribe (García-Mendoza *et al.*, 2004).

Las especies de *Agave* crecen en un gran número de hábitats de México, desde el nivel del mar hasta 3 400 metros de altitud, aunque son más comunes entre 1 000 y 2 000 metros, por lo que comparten hábitat con una gran variedad de especies de flora y fauna (García-Mendoza, 2002). Son muy diversos en las provincias áridas y semiáridas del centro y norte, pero su número disminuye drásticamente hacia las provincias húmedas y cálidas del sur. Son abundantes en las provincias florísticas de las Serranías Meridionales del centro de México, Sierra Madre Occidental, Altiplano mexicano, península de Baja California y Sierra Madre Oriental. Son especialmente abundantes en los diferentes tipos de matorral xerófilo, en bosque tropical caducifolio, bosque espinoso y pastizal. En el matorral xerófilo pueden llegar a ser dominantes o codominantes, de tal manera que las comunidades vegetales reciben nombres que aluden a sus formas de vida, como lo es el matorral rosetófilo. También prosperan en tipos de vegetación templada, preferentemente en el bosque de encino (*Quercus*) y, en menor proporción, en el de coníferas y el mesófilo de montaña. Los tipos de suelos que favorecen el crecimiento de los agaves son diversos y pueden ser tanto de origen ígneo como sedimentario. Esta diversidad de ambientes es uno de los factores que ha favorecido el gran número de taxones en México. Los magueyes mexicanos presentan una notable variedad en cuanto a su altura, su color y la forma de la

penca, entre otros aspectos. Esta variabilidad es consecuencia del alto grado de adaptación de la planta a diferentes medios ambientes, aún los más difíciles y, sin duda a su milenaria interacción con el hombre (García-Mendoza, 2007).

Oaxaca es uno de los estados que presentan la mayor diversidad de agaváceas en el país, reportando hasta seis géneros (Magallan y Hernández, 2000), encontrándose en todos los distritos políticos del Estado (García-Mendoza, 2004). Los distritos más diversos en agaváceas y particularmente el género *Agave* son: Huajuapán, Tlacolula, Cuicatlán, Juxtlahuaca, Coixtlahuaca, Tehuantepec y Teposcolula (Palma, 1991; García-Mendoza *et al.*, 2004; García-Mendoza, 2011). Algunas especies tienen una distribución ecológica amplia y se localizan en numerosos distritos; tal es el caso de especies como *Agave angustifolia* y *Agave potatorum* presentes en 21 distritos en un intervalo altitudinal de 50-2300 msnm para el primer caso y el segundo con un rango altitudinal mucho más estrecho; a su vez *A. angustifolia* está presente al menos en cuatro tipos de vegetación, mientras que *Agave potatorum* reduce su área de incidencia al bosque templado (García *et al.*, 2004). Por el contrario, existen 18 especies que se conocen al menos en un distrito, pero puede tratarse de especies con distribuciones compartidas en otros estados, como es el caso de *Agave cupreata* y *A. isthmensis* o bien son especies raras endémicas del estado, como *Agave quiengola* y *A. nizandensis*.

La riqueza de especies en las provincias fisiográfico-florísticas de Oaxaca propuesto por García-Mendoza y Torres (1999), sugiere que las regiones con el número mayor de especies son la Mixteca y la Depresión del Balsas, con el 46% y 41% de la riqueza del estado. Ambas regiones se encuentran en la porción noroeste del estado y corresponden a las cuencas de los ríos Papaloapan y Balsas, esta última una de las cuencas con mayor número de endemismos del País. La compleja Geología del Área (Centeno, 2004), la abrupta topografía (Ortiz *et al.*, 2004) y la disparidad de climas (Trejo, 2004), reflejan una gran variabilidad micro-ambiental en la zona, lo que seguramente juega un papel vital en la riqueza biológica del área. Los agaves son abundantes en las montañas y cañadas de los

ríos donde predomina el bosque tropical caducifolio, el matorral xerófilo y el bosque de *Pinus-Quercus* (Cuadro 1.) Los agaves disminuyen notablemente en aquellas provincias donde predominan el bosque tropical perennifolio y el bosque mesófilo de montaña, existen excepciones notables como es el caso de *Agave pendula*, que se desarrolla en el bosque tropical perennifolio (García *et al.*, 2004).

Cuadro 1. Distribución de las Agavaceae de Oaxaca por tipo de vegetación

Tipo de Vegetación	Número de Especies
Bosque Mesófilo de Montaña	5
Bosque de <i>Pinus-Quercus</i>	16
Bosque de <i>Quercus</i>	4
Bosque tropical caducifolio	21
Bosque tropical subcaduciflio	4
Bosque tropical perennifolio	2
Bosque tropical subperennifolio	1
Matorral xerófilo	26
Sabana	2
Cultivadas	10

1.3. Usos de los Agaves

“El árbol de las maravillas es el maguey... que da agua y vino, y aceite y vinagre, y miel y arrope e hilo, y aguja, y otras cien cosas”, así lo describe Joseph de Acosta (2008) en su libro *Historia Natural y Moral de las Indias*, al narrar las múltiples bondades que el maguey en la Nueva España y es que como lo menciona García-Mendoza (2007), entre las plantas más conspicuas del paisaje mexicano, en especial de las zonas áridas y semiáridas de México, están los agaves o magueyes, considerados especies clave en esas regiones, tanto por su abundancia como por la cantidad de recursos que proporcionan a otros organismos. En México, los agaves han tenido y tienen una gran importancia económica y cultural para numerosos pueblos indígenas y mestizos, que los han

aprovechado durante siglos como fuente de alimento, bebida, medicina, combustible, cobijo, ornato, fibras duras extraídas de las hojas (ixtle), abono, construcción de viviendas y elaboración de implementos agrícolas, entre otros usos. Los magueyes fueron una de las primeras plantas aprovechadas por los pobladores de Mesoamérica para alimentarse, el empleo como alimento y fibras pervive en México desde hace por lo menos siete mil años (Colunga-García *et al.*, 2007).

Los grupos humanos que se establecieron en estas regiones desarrollaron uno de los principales centros agrícolas de América. Al aprovechar los magueyes, estos pueblos hicieron de México su centro de domesticación y diversificación mediante la selección humana, pues los escogían por sus fibras, el aguamiel o las altas cantidades de azúcares que les proporcionaba (lo que posteriormente se denominaría en nahuatl como mexcalli), es decir el tallo y bases de las hojas (cabezas) cocidos. Es por esto que los agaves no sólo tienen su máxima expresión de diversidad morfológica, filogenética y evolutiva en México, sino también cultural, ya que los seres humanos que lo han poblado han sabido aprovechar al máximo los beneficios que producen.

Palma (1991; 1998), menciona los principales usos para los agaves en Oaxaca e indica los nombres comunes que estos reciben. En el cuadro 2 se enlistan los usos comunes reconocidos así como los órganos aprovechados de la planta. La elaboración de mezcal es el uso más importante e involucra a ocho especies de agaves silvestres o cultivados (García-Mendoza, 2004). Aunque se produce “Mezcal” en una buena porción del estado y el mismo se encuentra dentro del área protegida por la denominación de origen mezcal (DOM) y con vigilancia del Consejo Regulador del Mezcal (CRM) que evalúa la conformidad de la Norma Oficial Mexicana (NOM 070); la mayor producción se concentra en los valles centrales y la sierra sur, en la denominada “Región del Mezcal”, donde se elabora más del 90% del mezcal nacional (CRM, 2015; CRM, 2016) cubriendo una superficie de cultivo de agaves de 12,000 ha en 69 municipios y participan en su elaboración 6249 productores (Espinosa *et al.*, 2002), siendo más de 25,000

familias las que dependen de directa o indirectamente de l cultivo y aprovechamiento del agave (Sánchez, 2005).

Cuadro 2. Agaves; sus principales categorías de uso, partes de la planta utilizadas y especies importantes para la obtención de benefactores para el hombre

Categoría de uso	Parte de la planta utilizada	Especies
Alimento	Tallo, base de hojas, pedúnculo floral, flores	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A. applanata</i> , <i>A. chiapensis</i> , <i>A. karwinskii</i> , <i>A. marmorata</i> , <i>A. potatorum</i> , <i>A. rhodacantha</i> , <i>A. salmiana</i> , <i>A. seemanniana</i>
Bebidas fermentadas (Aguamiel y pulque)	Jugos de tallos y hojas	<i>Agave americana</i> var. <i>americana</i> , <i>A. americana</i> var. <i>oaxacensis</i> , <i>A. mapisaga</i> , <i>A. salmiana</i> var. <i>ferox</i> , <i>A. salmiana</i> var. <i>salmiana</i>
Bebidas destiladas (Mezcal)	Jugos de tallos y base de hojas cocidas	<i>Agave americana</i> var. <i>americana</i> , <i>A. americana</i> var. <i>oaxacensis</i> , <i>A. convalis</i> , <i>A. karwinski</i> , <i>A. marmorata</i> , <i>A. potatorum</i> , <i>A. rhodacantha</i> , <i>A. seemanniana</i>
Medicina	Hojas, cutículas, jugos	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustiarum</i> , <i>A. marmorata</i> , <i>A. potatorum</i>
Fibras	Hojas	<i>Agave americana</i> var. <i>americana</i> , <i>A. americana</i> var. <i>oaxacensis</i> , <i>A. Angustiarum</i> , <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> , <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> , <i>A. convalis</i> , <i>A. horrida</i>
Construcción	Pedúnculo floral, hojas	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A. atrovirens</i> , <i>A. marmorata</i> , <i>A. salmiana</i>
Forraje	Inflorescencias, hojas	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A. atrovirens</i> , <i>A. ghiesbreghtii</i> , <i>A. karwinskii</i> , <i>A. macricantha</i> , <i>A. rhodacantha</i> , <i>A. salmiana</i> , <i>A. stricta</i>
Ornato	Planta completa, inflorescencias	<i>Agave americana</i> 'Marginata', <i>A. applanata</i> , <i>A. dasyliroides</i> , <i>A. guiengola</i> , <i>A. isthmensis</i> , <i>A. macrocantha</i> , <i>A. salmiana</i> , <i>A. stricta</i>
Cercas vivas	Planta completa	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustiarum</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A. ghiesbreghtii</i> , <i>A. karwinskii</i> , <i>A. macrocantha</i> , <i>A. stricta</i>
Combustible	Planta completa seca	<i>Agave americana</i> , <i>A. angustifolia</i> , <i>A. karwinski</i> , <i>A. salmiana</i> , <i>A. stricta</i>

Fuente: García-Mendoza *et al.*, 2004.

Aunque se suele pensar en el pueblo otomí como el pueblo del maguey (Parsons y Parsons, 1990), en realidad los pueblos del altiplano limitan el uso de especies y variedades (García-Mendoza, 2004), no rebasando los 10 taxones (Parson y Parson, 1990; Ramsay, 2002). En Oaxaca se utilizan 26 taxones y la tecnología para su uso es muy diversa (Palma, 2000).

1.4. Importancia ecológica del género Agave

Existen evidencias que apoyan la relación entre la fenología de las plantas del género Agave y los eventos en el ciclo de vida de los animales que interactúan con ellas, como son los movimientos estacionales de agentes polinizadores y dispersores. Con base en esta última relación, se han definido los “corredores de néctar” o “corredores de recursos”, que consisten en extensiones espaciales a lo largo de las cuales especies de plantas florecen y fructifican en sincronía con la llegada de sus agentes polinizadores (Figueredo, 2010). A lo largo de las zonas desérticas de la costa Oeste de México y el Suroeste de Estados Unidos, las poblaciones de murciélagos antófilos de los géneros *Leptonycteris* Lydekker y *Choeronycteris* Tschudi realizan migraciones anuales (Brusca et al. 2009). Estos murciélagos se alimentan en buena proporción del néctar de las flores de agaváceas y cactáceas, cuyos períodos de floración parecen formar latitudinalmente un amplio corredor de néctar que mantiene a las poblaciones de murciélagos durante su desplazamiento, llegando a depender en un 98 % de agaves y cactus columnares para su alimentación. La de estos corredores de recursos florales, además, tendría implicaciones muy importantes para la ecología reproductiva y la evolución de las plantas del género agave y de otras plantas de zonas áridas que establezcan interacciones mutualistas de polinización y dispersión con aves y murciélagos que transiten por dichos corredores.

Con las ideas antes planteadas se puede mencionar que los de agaves son considerados no solo para el hombre por la multiplicidad de usos sino también para los ecosistemas el “árbol de las maravillas”, y su diversidad permite a especies de flora y fauna obtener una múltiple cantidad de beneficios, como la

absorción de agua de lluvia en zonas donde es generalmente escasa, debido al sistema de la raíz de los agaves que es superficial, lo cual facilita la absorción de agua (por ello se emplean como cultivos de cobertura en laderas o en la conservación de suelos); de tal manera que la probabilidad de supervivencia de una roseta en sequías prolongadas depende del volumen de agua y de los carbohidratos almacenados durante la época favorable, permitiendo así brindar a otras especies de alimento o cobijo en épocas secas, como el caso de algunos insectos que también son de importancia económica y gastronómica de México como los escamoles y la hormiga escamolera (*Liometopum apiculatum* M.), el Gusano Blanco (*Acentrocneme hesperiaris*) o el Gusano Rojo (*Hypopta agavis* B.) llamado "chinicuil".

1.5. Endemismo y conservación del género Agave

Oaxaca cuenta con 13 especies endémicas de agaváceas, más dos variedades; esto coloca a la entidad como la principal en México. Estos endemismos encontrados en Oaxaca, se pueden definir como microendemismos, puesto que se distribuyen en áreas menores a 30,000 km², lo que representa una superficie inferior al 1.5% del territorio nacional (García-Mendoza, *et al.*, 2004). En la conservación de las especies hay que considerar no solamente la riqueza y los endemismos, sino también otros factores de diversidad como rareza, diversidad filogenética, riesgo de extinción, diversidad de grupos taxonómicos y patrones biogeográficos (Tambutti, 2002).

La rareza es un concepto demográfico que aplica a todas aquellas especies que se encuentran en números lo suficientemente bajos como para representar un problema de conservación (Halffter, 1998). Las especies raras se pueden clasificar de varias formas: la más útil puede ser la propuesta por Rabinowitz *et al.*, (1986) quienes utilizan una matriz basada en su distribución, especificidad de hábitat y abundancia local. En Oaxaca todas las especies endémicas de agaves, se encuentran en alguna categoría de rareza, siendo las más importantes *Agave*

guiengola, que se reduce al cerro del mismo nombre en el Istmo de Tehuantepec (García-Mendoza, 2004); *Agave nizandensis*, especie microendémica de algunos cerros calizos de la selva baja caducifolia en el Istmo de Tehuantepec (Palma, 1991; Pérez-García, *et al.*, 2001).

Fenómenos como el cambio climático y la actual crisis financiera mundial resaltan la importancia de dar un manejo integral y sustentable a los recursos naturales, a fin de mantener el equilibrio en los agroecosistemas. En México los Agaves desde épocas precolombinas destacan en importancia por su distribución y uso. Actualmente este recurso aunque con problemas en su manejo, recobra vigencia desde el punto de vista socioeconómico y agroecológico por los beneficios que trae a los pobladores del medio rural y al medio ambiente donde se desarrolla (García *et al.*, 2010).

Tomando en consideración las condiciones en que se aprovechan las especies de maguey mezcalero en el estado de Oaxaca, se puede señalar una producción limitada por factores de tipo económico, social y tecnológico; a su vez la explotación que se hace a las especies silvestres y cultivadas, acarrea problemas de tipo ecológico (Espinosa, 2005), que se manifiestan principalmente en la disminución de las poblaciones en estado silvestre (Illsey *et al.*, 2005), destacando así la importancia por promover acciones tecnológicas que busquen la conservación y reproducción de los agaves mezcaleros.

De acuerdo a la última modificación de la Norma Oficial Mexicana (NOM) **NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo**, se encuentran enlistadas en alguna de las categorías de riesgo 18 especies del género *Agave*, mismas que se detallan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Especies del género *Agave* incluidas en alguna categoría de riesgo por la NOM 059 SEMARNAT 2010

Familia	Género	Especie	Nombre Común	Distribución	Categoría
Agava- ceae	<i>Agave</i>	<i>bracteosa</i>	Magüey Huasteco	Endémica	Amenazada
		<i>chiapensis</i>	Magüey Chamula	Endémica	Sujeta a protección especial
		<i>congesta</i>	Magüey Tzotzil	No	
		<i>dasyliroides</i>	Magüey Intrépido	Endémica	Amenazada
		<i>guiengola</i>	Magüey plateado	Endémica	
		<i>gypsophila</i>	Magüey gipsófilo	No	Sujeta a protección especial
		<i>impressa</i>	Magüey masparrillo	Endémica	
		<i>kewensis</i>	Magüey del Grijalva	Endémica	Sujeta a protección especial
		<i>lurida</i>	Magüey de la Luna	Endémica	
		<i>nizandensis</i>	Magüey de Nizanda	Endémica	En peligro de Extinción
		<i>ornithobroma</i>	Magüey Pajarito	No	Sujeta a protección especial
		<i>parrasana</i>	Magüey de Parras	Endémica	
		<i>parviflora</i>	Magüey Sóbari	No	Amenazada
		<i>peacockii</i>	Magüey Fibroso	Endémica	
		<i>polianthiflora</i>	Magüey de Colibrí	No	Amenazada
		<i>titanota</i>	Magüey del Sol	Endémica	
<i>victoriae-reginae</i>			Endémica	En peligro de extinción	
<i>vizcainoensis</i>	Magüey del Vizcaíno	Endémica	Sujeta a protección especial		

De las especies mostradas en el Cuadro 3. ninguna se reporta en Sola de Vega, sin embargo Espinosa et al, 2002, mencionan al menos siete especies o variedades de agave en peligro de extinción en el municipio por sus bajas poblaciones, siendo estas: Magüey arroqueño (*Agave americana* L. var. *Oaxacensis*), Mexicano penca ancha (*Agave rhodacantha* Trel), Sierra Negra o sierrudo (*Agave americana* L. var. *Oaxacensis* Gentry), Cincoañero (*Agave aff. angustifolia* Haw.), Coyote (*Agave americana* L.), Mexicano sin espinas (*Agave aff. angustifolia* Haw.), magüey de campo (*Agave sp.*), Tobasiche (*Agave sp.*), Pelón o liso (*Agave angustifolia* Haw.), y Mexicano penca angosta (*Agave sp.*).

1.6. Estudios sobre reproducción del género *Agave*

Hasta ahora las poblaciones silvestres y manejadas de las diferentes especies de magueyes mezcaleros, están en manos de productores con carencias económicas, muchos de ellos indígenas; suelen manejarse como recursos de uso común y son una más de las fuentes de ingreso que conforman las economías familiares campesinas diversificadas. Los arreglos para regular el acceso, la exclusión y el manejo varían de una comunidad a otra (Pérez *et al.*, 2012), son pocas las especies de *Agave* que han sido domesticadas y cultivadas, este es el caso de *Agave angustifolia* (maguey espadín) y *A. tequilana* (agave azul), usadas para la producción de destilados; *A. fourcroydes* (henequén) y *A. sisalana* (sisal) para la extracción de fibras. Sin embargo, la mayoría de las especies del género, si bien son explotadas aún no se han domesticado; en estos casos los ejemplares se extraen de las poblaciones naturales, casi siempre de una manera no sostenible (Pérez *et al.*, 2012).

La investigación enfocada a la reproducción del género *Agave*, se ha centrado principalmente en la reproducción asexual (Hijuelos rizomatosos, bulbilos de inflorescencia e *in vitro*). Pérez *et al.*, 2012, demostraron que los sistemas de conservación *in vitro* de germoplasma en condiciones de crecimiento retardado causado por agentes osmóticos, como manitol y sorbitol, son eficientes en el género *Agave*, permitiendo mantener colecciones de germoplasma viable con una mínima inversión de tiempo y recursos, haciendo posible contar con una fuente ilimitada de material vegetal para diversos fines, como el establecimiento de cultivos para su explotación o su uso ornamental, sin necesidad de recurrir a la colecta de ejemplares silvestres. Aureoles-Rodríguez *et al.*, 2008, propagaron *in vitro* la especie *A. inaquidens* Koch, para ello se obtuvieron brotes de secciones de tallo y yemas axilares, las secciones de tallo formaron hasta 72 brotes, con porcentajes de sobrevivencia en sustrato que oscilaron del 70% para plantas pequeñas con una raíz hasta 100% para plantas medianas y grandes con dos o más raíces. Sin embargo, recientes estudios apuntan al desgaste genético de las plantaciones comerciales, producto de la reproducción asexual, como es el caso

de Díaz, *et al.*, 2012, que en su trabajo encontraron en plantaciones de *A. tequilana* un bajo flujo genético debido principalmente al alto grado de homocigosis presente en esta especie, producto de las prácticas agronómicas que consisten en cortar el eje floral para concentrar azúcares en el tallo, impidiendo la floración y muerte de la planta hasta la jima (eliminación de las hojas y cosecha de piñas). Así mismo estudiaron la diversidad genética de individuos de plantaciones de *A. tequilana* bajo tres métodos de reproducción asexual (Hijuelos rizomatosos, bulbilos de inflorescencia y reproducción *in vitro*), concluyendo bajos niveles de variabilidad genética en comparación con plantas empleadas como ornato. De igual forma Ruvalcaba *et al.*, 2002, evaluaron el polen de *A. tequilana*, encontrando una baja viabilidad del mismo, producto de los métodos de reproducción asexuales.

Los estudios orientados a la reproducción sexual del género agave, han sido desarrollados principalmente en el análisis de los estadios reproductivos del género mencionado, tal es el caso de Figueredo *et al.*, 2011, que analizaron la especie *A. cocui* en Venezuela y Colombia, con periodos de desarrollo del pedúnculo floral en los finales de la temporada de lluvias (Septiembre-Octubre), el periodo de floración entre enero y marzo y el desarrollo de frutos en el mes de mayo. Trabajos más específicos abordan temas sobre los estadios reproductivos del género agave, abarcando la relación de especies de mamíferos e insectos y el éxito de la polinización, como el caso de Arizaga *et al.*, 2000, donde se menciona a los murciélagos como principales polinizadores en *A. machrocantha*, dada la producción nocturna de néctar por parte de las especies del género, dicho estudio coincide con el de Molina *et al.*, 2003, que asocian la polinización de *A. Angustifolia* y *A. subsimplex* a los murciélagos principalmente y las polillas en menor escala. Se han realizado algunos ensayos de germinación a nivel laboratorio, empleando técnicas de micropropagación, como es el caso de Noble, 2002, que estudió la relación de la luz UV y su efecto en la germinación, mostrando una aceleración de la misma en condiciones de exposición a luz UV y un retraso en el desarrollo de plántulas en condiciones de semillero. Godinez *et al.*, 2012 estudiaron la relación

de las costras biológicas del suelo (BSC-cianobacterias y corteza mixta), y su efecto en la germinación, encontrando una mayor eficiencia germinativa de *A. Marmorata*, en presencia de BSC, que la germinación en suelo desnudo. Ello se relaciona con lo mencionado por Rivera *et al.*, 2004, quienes atribuyen un papel importante de las BSC en la fijación de nitrógeno en zonas áridas, influyendo directamente en la fertilidad y estabilidad del suelo.

Ramírez *et al.*, 2014, realizaron un estudio sobre reproducción por semilla de siete especies del género agave, en el cual se evaluó el porcentaje de germinación con relación a la temperatura y al potencial hídrico de los sustratos, encontrándose vital el contenido de humedad del sustrato y temperaturas promedio de 20°C, para una óptima germinación. Así mismo Sacramento,*et al.*, 2012, realizaron estudios sobre germinación empleando técnicas de micropropagación en *A. salmiana*, mencionan porcentajes de germinación de 86.76%, llevaron el estudio al nivel de plantación, donde los porcentajes de sobrevivencia fueron del 30% a los 90 días de establecidas las plantas en campo. Díaz *et al.*, 2012 demostraron que *A. tequilana* puede reproducirse en forma sexual, obteniendo progenie viable, generando variación genética y de esta manera incrementar los niveles de diferenciación.

1.7. Reproducción de agaves mezcaleros

De acuerdo con Gentry (1982), el género Agave se propaga por semilla, vástagos vegetativos y propágulos en la inflorescencia. Dependiendo de la especie, algunos se propagan solamente por semillas, otros por semillas y vástagos vegetativos, mientras que otros pueden propagarse por las tres formas. La forma común de propagación de los agaves cultivados es asexual, técnica que consiste en separar los vástagos (hijuelos) que se derivan del rizoma que emite la planta madre después del primer año de plantación, los cuales, dependiendo de su tamaño son plantados en el terreno definitivo, o en el caso de ser pequeños, se mantienen en vivero por un período de 12 meses o más, hasta su plantación definitiva. Existen también otros métodos de propagación asexual como bulbillos apomícticos de la inflorescencia y la propagación in vitro (García *et al.*, 2010).

1.7.1. Reproducción por hijuelos rizomatosos o vástagos de raíz

El hijuelo es la planta generada por un rizoma producido mediante cultivo de tejidos de la planta madre de agave, que se emplea como una técnica de propagación vegetativa o asexual (Ceja *et al.*, 2011). El número de hijuelos por planta durante su ciclo varía de acuerdo con el tipo de maguey, los que más producen son el *Agave angustifolia* y el *A. karwinskii*, los que menos producen son el Mexicano (*A. rhodacantha*), Coyote (*A. americana* L.), Arroqueño y Sierra Negra (*Agave americana var oaxacensis*) (Arredondo *et al.*, 2005). De acuerdo a Ceja *et al.*, 2011, los aspectos más relevantes a considerar al momento de realizar la selección de hijuelos son: Seleccionar hijuelos con apariencia vigorosa, de coloración intensa, visualmente libres de insectos, enfermedades o desórdenes fisiológicos, con hojas enteras, bien formadas, sin malformaciones visibles. Arredondo *et al.*, 2005 agregan que la altura del hijuelo debe oscilar entre los 30 y 40 cm, que normalmente ocurre entre el segundo y tercer año de edad, así mismo la temporada sugerida para la cosecha de hijuelos es en los meses de abril y mayo, para que tras el proceso de cicatrización de los sistemas radiculares, estén listos en la temporada de lluvias. En el municipio de Villa Sola de Vega esta es la forma común de reproducción de agaves, siendo las especies *Agave angustifolia*, *A. rhodacantha*, *A. americana* y *A. karwinskii*, las comúnmente propagadas por este método.

1.7.2. Reproducción por bulbilos o vástagos de inflorescencia

El maguey haciendo referencia a su nombre es una planta generosa, que permite reproducirse de diversas formas, una de ellas se da al podar las flores en formación de los escapos florales (Arredondo *et al.*, 2005). Con este método pueden obtenerse entre 2500 y 3500 bulbilos y su trasplante a vivero debe ser al alcanzar de 3 a 5 cm (Sánchez, 2005). Los agaves o bulbilos contienen la misma información genética que la planta madre, de ahí que para este tipo de reproducción se requiera seleccionar plantas sanas, vigorosa y con buena adaptación al medio en que se desarrollan (Arredondo *et al.*, 2005). A pesar de su

bajo costo de producción esta técnica, pocos productores la implementan en el municipio de Villa Sola de Vega, algunos por desconocimiento del método reproductivo y otros por la preferencia al método de reproducción por rizomas.

1.7.3. Reproducción por cultivo de tejidos in-vitro

La propagación por el método de obtención de tejidos in vitro, ha tenido en los últimos años una gran difusión (Arredondo *et al.*, 2005). Piven *et al.*, 2005, mencionan que en la propagación de henequén (*Agave fourcroydes*) y su ancestro espadín (*Agave angustifolia*) por el método in vitro, se obtienen individuos genéticamente estables y con buen desarrollo en campo. Esta técnica ofrece ciertas ventajas, como el uso de pequeñas cantidades de tejido para la obtención de grandes cantidades de individuos, sin embargo se requiere de instalaciones avanzadas, equipos especializados y desarrollar técnicas específicas para cada especie propagada, situación que imposibilita su aplicación a una escala rural.

1.7.4. Reproducción sexual o por semilla

La reproducción sexual se logra mediante la polinización que efectúan algunos animales, como los murciélagos nectarívoros y en menor grado, insectos como: las palomillas, abejas, abejorros y aves (García, 2007). La floración de algunas especies de *Agave* inicia en el mes de febrero, su fructificación varía de marzo a julio (Figura 1), y su germinación inicia en temporada de lluvia. Sin embargo, otras especies producen semillas de octubre a diciembre, por lo que permanecen en latencia hasta la siguiente temporada de lluvias (Rosales *et al.*, 2013). En el estado de Oaxaca la reproducción por semilla es poco practicada, debido al tiempo requerido en comparación con los métodos expuestos anteriormente, sin embargo Arredondo *et al.*, 2005 recomiendan la reproducción por semilla cada 5 años para mantener la variabilidad genética del maguey espadín y otras especies propagadas por métodos asexuales, que a largo plazo generan la pérdida de la diversidad de especies en el género *agave*, modifican el paisaje y se alteran los

procesos naturales y genéticos(Eguiarte et al, 2007). La opción más viable para la conservación de especies silvestres o endémicas empleadas en la producción de mezcal, es el método por semilla, de esta forma se puede iniciar un proceso de domesticación de estas especies, para su manejo y conservación, obteniendo porcentajes de germinación que de acuerdo a la especie oscilan entre el 85-90% (Sánchez, 2005).

1.8. La producción de planta forestal

La reproducción o propagación de especies forestales maderables y no maderables, se realiza cuando el ecosistema natural es incapaz de regenerarse por sí mismo; también cuando se requiere aumentar la productividad o bien cuando se requieren acciones de restauración (Pimentel, 2009). Este último fin es al que más se ha destinado la producción de planta forestal en México; en menor cantidad se establecen plantaciones con fines comerciales (Martínez *et al.*, 2006). Olivas *et al.*, 2007 y Rosales *et al.*,2013, mencionan necesario impulsar la producción de planta en vivero, para satisfacer la necesidad de planta en cantidad y calidad suficiente.

1.8.1. La importancia del germoplasma forestal

Durante el desarrollo del ser humano, sus acciones han sido orientadas a satisfacer las necesidades de su vida diaria, esta búsqueda ha generado en numerosos casos que los recursos naturales sean impactados que inclusive han llegado a la alteración de ecotipos, poblaciones, géneros y especies vegetales con cierto valor económico. Pimentel 2009, menciona que la semilla es el medio para la perpetuación de las especies y asegurar la existencia de las mismas. En general el germoplasma de las poblaciones naturales de especies forestales, tiene alta variabilidad genética y fenotípica, por lo tanto deben elegirse aquellas especies que reflejen el fenotipo al que se quiere llegar de acuerdo a los objetivos perseguidos. La semilla es la forma más práctica y eficiente para recolectar, transportar, estudiar y almacenar la diversidad vegetal, por corresponder a un estado compacto, resistente e independiente dentro del ciclo de vida de una

planta. Cada una de ellas es, potencialmente, un nuevo individuo que contiene parte de la variabilidad genética presente en toda una población (Gold *et al.*, 2004), es por ello que esta es la forma de conservar el material genético cuando las poblaciones se encuentran amenazadas o en peligro de extinción (Zobel y Talbert, 1988; FAO *et al.*, 2007).

1.8.2. Germinación

La germinación es aparentemente un proceso simple, sin embargo es una serie de acontecimientos complejos que ocurre al conjuntarse las condiciones idóneas (Pimentel, 2009). El proceso comienza con la rehidratación de los diferentes tejidos que constituyen la semilla y terminan con el inicio del crecimiento de la radícula (Bidwell, 1990; González, 2009).

El proceso de germinación consiste en la absorción de agua, la reactivación del metabolismo y la iniciación del crecimiento (Bidwell, 1990); a su vez Pimentel 2009, menciona ocho etapas bien diferenciadas que ocurren en la germinación de las semillas:

- Absorción de agua (generalmente por imbibición)
- Inicio de elongación y división celular
- Activación enzimática
- Hidrolización de sustancias de reserva
- Traslocación de nutrimentos a regiones de crecimiento
- Incremento en la tasa de respiración y asimilación de nutrimentos
- Incremento de la elongación y división celular (crecimiento)
- Diferenciación de células en tejidos y órganos (Desarrollo)

1.8.3. Factores que influyen en la germinación

Para que las semillas puedan germinar, son necesarios 3 elementos:

- **Agua:**

Es el punto de partida del reinicio de la vida en el embrión, ya que es necesaria para debilitar la cubierta seminal e hidrolizar los compuestos vitales para el inicio de las actividades metabólicas, temporalmente suspendidas (Pimentel, 2009).

- **Temperatura:**

La germinación ocurre en intervalos de tiempo que varían de acuerdo a la especie. De acuerdo al departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (1986), la temperatura óptima de germinación ocurre entre los 20 y 30°C. Para el agave en el estudio de Ramírez *et al.*, 2014, se evaluó la temperatura de germinación de ocho especies de importancia económica, siendo el óptimo de 20°C.

- **Aireación:**

Un buen intercambio de gases entre el medio germinativo y el embrión es vital para una germinación rápida y uniforme (Pimentel, 2009). Es necesario tomar en cuenta este factor, dado que los procesos de la germinación, demandan oxígeno; es decir en condiciones anaerobias no germinan.

- **Luz:**

La mayoría de las especies germinan en forma natural bajo condiciones oscuras, pero muchas requieren de luz para germinar sus semillas (Greulauch y Adams, 1986). Las semillas cuya germinación ocurre al recibir un estímulo luminoso se denominan fotoblásticas (Pimentel, 2009).

- **Latencia, letargo, quiescencia, reposo y dormancia:**

Las plantas que se desarrollan en ecosistemas con notables cambios estacionales, han generado mecanismos que le permiten asegurar su supervivencia en periodos adversos (Serrano, 2005). Existe confusión entre diversos autores sobre el uso de términos relacionados con estos mecanismos; muchos autores los consideran como sinónimos al emplearlos indistintamente (Pimentel, 2009).

1.9. Tratamientos especiales a las semillas-Tratamientos pregerminativos

Todas las semillas sin importar su origen, pueden encontrarse impedidas para germinar, ya sea por no encontrarse en completa maduración o por que no se le han propiciado las condiciones idóneas para la germinación.

La latencia y el letargo son obstáculos para la germinación uniforme, para asegurar que todas las plantas tengan el mismo tamaño al momento de transplantarlas, por ello es necesario romper con estos estadios a través de tratamientos especiales (Pimentel, 2009).

Los tratamientos pregerminativos fundamentales son los siguientes:

1.9.1. Secado de semillas

Una semilla recién extraída o cosechada (principalmente de frutos carnosos), puede tener excesos de humedad. Un tratamiento sencillo es el secado previo a la siembra, con el fin de controlar la humedad interna y concentración de sustancias (Pimentel, 2009).

1.9.2. Remojo de semillas

Consiste en sumergir las semillas en agua ya sea fría, tibia o caliente para violentar el proceso de germinación. En el caso de frutos secos como el de las especies del género *Agave*, un remojo previo a la siembra puede potenciar la germinación. La temperatura del agua en el remojo es variable, dependiendo de cada especie y del tiempo que tenga colectada la semilla. Las semillas nuevas se recomiendan remojar en agua fría y las viejas en agua caliente. El tiempo de exposición de la semilla al remojo puede ser: 5-6 minutos en agua caliente; 1 a 12 horas en agua tibia; 12-48 horas para agua fría (Pimentel, 2009).

1.9.3. Escarificación

La escarificación consiste en la eliminación total o parcial de las partes duras o impermeables de la semilla, existen tres tipos de escarificaciones: Escarificación física, consiste en tratamientos físicos y mecánicos para adelgazar las testas de la semilla y se puede realizar empleando materiales abrasivos, golpeando las semillas (esta técnica es exclusiva de semillas de testa dura); Escarificación química, consiste en el uso de ácidos abrasivos para adelgazar la testa de las semillas; Escarificación Biológica, consiste en el ablandamiento o adelgazamiento por la acción de aves o mamíferos (Vargas, 2011).

1.9.4. Estratificación

La estratificación se emplea para fomentar cambios bioquímicos que se deben dar en el embrión para hacer germinar la semilla; es decir, romper la latencia. Consiste en colocar las semillas en capas o estratos húmedos a temperaturas altas o bajas, dichos estratos pueden ser: Yocuela, aserrín, vermiculita, perlita o musgo. Cada especie responde a tratamientos particulares, por lo que se recomienda ensayar más de un método a la vez, si se carece de una experimentación seria y de información necesaria (Pimentel, 2009).

1.9.5. Alternancia de luz

La luz juega un papel importante en algunas especies para la germinación de sus semillas. Para las pruebas de germinación se programan diferentes regímenes de luz, ya que alternando horas de oscuridad y de luz, las semillas responden mejor a la germinación.

1.10. Normatividad sobre el aprovechamiento de magueyes mezcaleros

Para el aprovechamiento legal de magueyes mezcaleros silvestres, es necesario conocer las disposiciones que la legislación mexicana ofrece y que están presentes en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, La Ley General de Vida Silvestre, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Ley Agraria, Ley General de Desarrollo Rural Sustentable y la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994-Bebidas Alcohólicas Mezcal.

1.10.1. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)

El artículo 97 de la LGDFS, menciona que el uso de los recursos forestales no maderables únicamente requerirá de un aviso por escrito a la autoridad competente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT). También menciona que no se autorizaran permisos de aprovechamiento si el recurso forestal maderable corre el riesgo de mantenerse en sus poblaciones naturales y los servicios ecosistémicos que ofrece. A su vez este artículo se complementa de la Norma Oficial Mexicana NOM-005-RECNAT-1997-Extracción de individuos completos, que regula la posibilidad de aprovechar los recursos forestales no maderables.

1.10.2. Reglamento de la LGDFS

El reglamento de la LGDFS, menciona en sus artículos 26, 27 y 28 lo conducente a los requisitos, documentación, criterios, vigencia y especificaciones técnicas para el aprovechamiento de los recursos forestales no maderables.

1.10.3. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

Derivado de la LGEEPA, se desprende la NOM-005-Recnat-1997-Extracción de plantas completas, que regula la posibilidad de aprovechar recursos forestales no maderables, mencionando el procedimiento, aspectos técnicos a considerar y los mecanismos de respuesta de a Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

1.10.4. Ley de vida silvestre

La ley de vida silvestre, toma en cuenta los usos tradicionales que para los pueblos y comunidades rurales tienen los recursos forestales no maderables, es por ello que en el Capítulo II “Aprovechamiento para fines de subsistencia”, menciona en sus artículos 92 y 93, que las personas que empleen ejemplares, partes y derivados de vida silvestre para el cumplimiento de sus actividades de subsistencia y de sus dependientes económicos asesoría técnica y capacitación para el cumplimiento de las disposiciones legales relacionadas a la Ley General de Vida Silvestre, así mismo los volúmenes de aprovechamiento de ejemplares, partes y derivados de vida silvestre, relacionadas a actividades ceremoniales y rituales por parte de comunidades rurales, se podrán realizar dentro de los predios o bajo el consentimiento de los legítimos propietarios, siempre que no afecte la viabilidad de las poblaciones y técnicas y medios de aprovechamiento tradicionales, a menos que estas mejoren la sustentabilidad en el proceso.

1.10.5. NOM-070-SCFI-Bebidas Alcohólicas Mezcal

La NOM 070, menciona que la materia prima para la producción de mezcal es maguey (agave), sin embargo no menciona restricciones en cuanto a las especies y volúmenes empleados en la producción. Así mismo se enlistan cinco especies en particular para la elaboración de mezcal aunque no se excluye a otras especies del género *Agave*, siempre y cuando no se empleen para la elaboración de destilados con denominación de origen, dentro del estado productor.

1.11. Distribución potencial

Poca atención se ha puesto a la distribución geográfica de las plantas en México, que se ha reducido a aspectos generales de la distribución de conjuntos de especies a nivel de tipos de vegetación o de sus afinidades geográficas; igualmente, se han registrado patrones de riqueza local o regional a partir de estudios florísticos, pero poco o nada se ha hecho para documentar el área total que una especie ocupa, dando como resultado mapas de distribución, en los cuales las especies se representan como un conjunto de puntos, cada punto representando una localidad de colecta. Al unir los puntos periféricos, se circunscribe un área que representa la distribución geográfica de la especie. Lo anterior se hace sin un marco teórico formal, solamente definido por la experiencia del taxónomo (Villaseñor *et al.*, 2004) Actualmente una herramienta utilizada por manejadores de recursos naturales por su simplicidad y su marco teórico formal son los modelos predictivos de distribución potencial, que de acuerdo a Gamez, 2011 hace alusión a las áreas que tienen condiciones ambientales muy similares a los sitios donde se encuentran las especies y que tienen muy altas probabilidades de estar ocupadas por estas mismas, parteendo del supuesto de que la distribución de los seres vivos es consecuencia de la combinación de múltiples factores tanto ambientales como históricos, entendidos estos últimos como los relacionados con eventos geológicos. Debido a ello y a la carencia de

información fiable sobre la ausencia verdadera de las especies, las hipótesis de distribución generadas mediante estas técnicas suelen representar simulaciones de la distribución potencial de las especies, es decir, mapas de idoneidad o probabilidad que indican la presencia de lugares favorables desde el punto de vista climático para la aparición de la especie (Trotta-Moreu *et al.*, 2008).

Capítulo II. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El municipio de Villa Sola de Vega, pertenece al Distrito Político Número 23 Sola de Vega de la Región Sierra Sur del Estado de Oaxaca, dicho distrito se encuentra inserto en la denominada “Región del Mezcal”, que de acuerdo al Diario Oficial de la federación con modificación de 24 de diciembre de 2015, es la porción del estado de Oaxaca que cuenta con un mayor arraigo socioeconómico y cultural hacia la producción de mezcal. Villa Sola de Vega es el municipio con mayor tradición en cuanto a producción de maguey y mezcal dentro del distrito, por lo que la importancia económica, ecológica y cultural del sistema productivo es muy alta dentro del territorio.

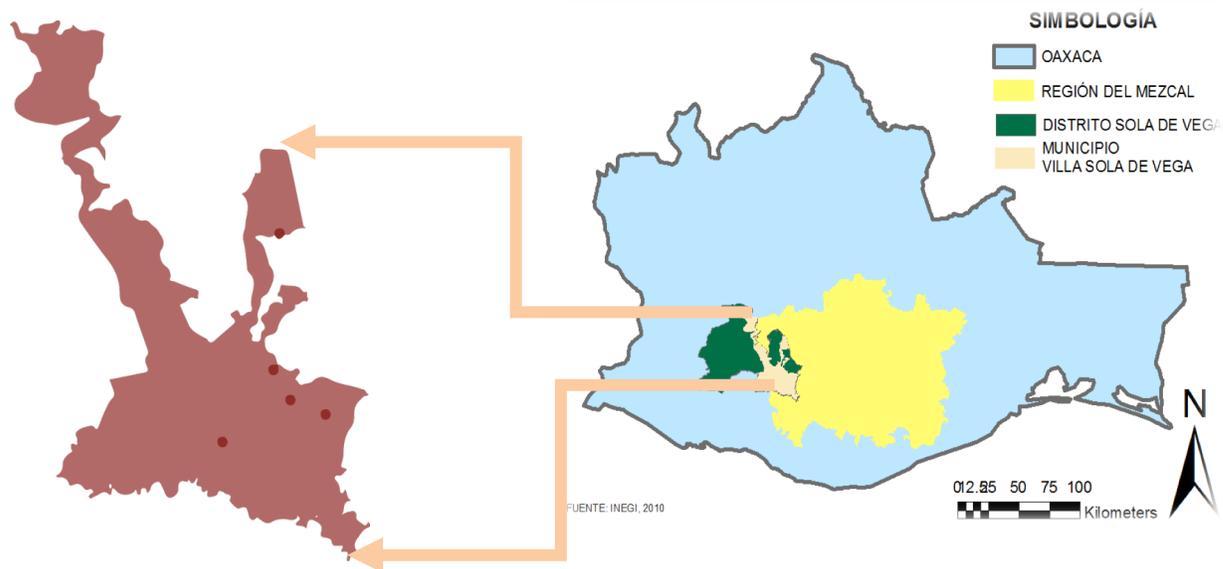


Figura 1. Ubicación del municipio de Villa Sola de Vega

2.2. Metodología

La metodología general del presente proyecto de investigación se muestra en el diagrama de flujo ilustrado en la figura 2.

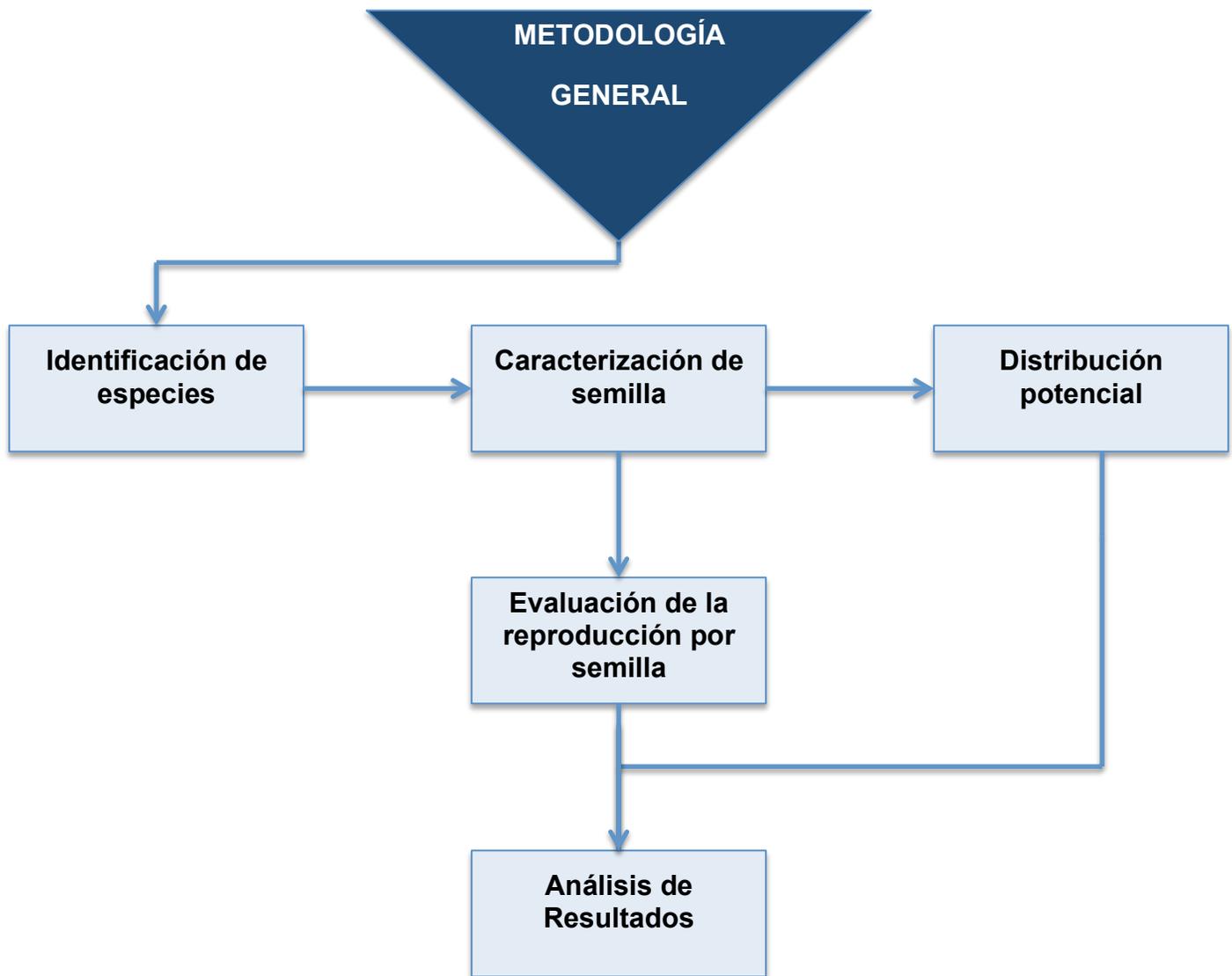


Figura 2. Metodología general del proyecto de investigación

2.2.1. Identificación de las especies y variedades empleadas para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

La identificación de las especies de agave empleadas para la producción de mezcal, se realizó en dos etapas que se desglosan a continuación:

- **Entrevistas con productores**

Se realizaron encuestas con productores certificados por el Consejo Regulador del Mezcal (CRM), para obtener información productiva y de eficiencia, referente a las especies y/o variedades de agaves silvestres en el municipio de Villa Sola de Vega.

- **Seguimiento a lotes de producción y análisis de bitácoras con productores certificados por el Consejo Regulador del Mezcal (CRM)**

Dado que son los productores certificados los que principalmente diferencian los lotes de producción por especie o variedad empleada, se cuenta con la información histórica de los registros de producción de lotes certificados de 2012 a 2015.

- **Análisis de entrevistas y registros de producción**

Una vez realizadas las entrevistas y capturados los registros de producción, se procedió al análisis de los mismos con el fin de obtener información relevante sobre las especies/variedades de agaves silvestres, que permitan identificar que especies son las más importantes tomando en cuenta su escasez, su contenido de azúcares reductores totales (ART), su precio en el mercado, el rendimiento expresado en kilogramos de agave/litro de mezcal /kg/l) y de esta forma priorizar entre aquellas que sean más importantes para su reproducción.

2.2.2. Caracterización de semillas de agave

Se realizó la caracterización de las semillas de las especies de agave en cuanto a pruebas de calidad de la semilla (Pureza, Vigor, Viabilidad, Número de Semillas por Kilogramo), características físicas (Densidad, peso, contenido de humedad) y morfológicas (longitud, anchura, espesor, esfericidad), basándose en los trabajos desarrollados por Dutta *et al.*, 1988; Gupta *et al.*, 1997; Aviara *et al.*, 1999; Abalone *et al.*, 2004; Akaimo *et al.*, 2006; y Zebib *et al.*, 2015, los cuales consistieron en los siguientes pasos:

2.2.2.1. Cosecha de semilla

Se colectó semilla de cuatro especies de agave empleadas en la elaboración de mezcal identificadas para Sola de Vega, las especies son: *Agave angustifolia* (Maguey Espadín) colectada en la localidad de San Pedro Totolapan, municipio del mismo nombre entre los meses de Agosto-October de 2014 por el productor de mezcal Taurino Ruiz Luis; *Agave potatorum* (Maguey Tobalá) colectada en el Barrio Las Peñas de la Localidad de Rancho Viejo, Sola de Vega, por el productor de maguey Enrique Méndez Antonio entre los meses de marzo-abril de 2015; *Agave rhodacantha* (Maguey Mexicano) colectada en la localidad de El Vado, Municipio de La Compañía, Ejutla de Crespo por el responsable del estudio Ing. Raymundo Martínez Jiménez en Noviembre de 2014; *Agave karwinskii* (Maguey Tobasiche) colectada por el M.C. Luis Silva Santos, investigador del CIIDIR-IPN.



Figura 3. Almacenamiento en envases de vidrio de la semilla de agave

Para obtener semilla de buena calidad se seleccionaron individuos con mayor altura, y diámetro de la roseta, libres de plagas y enfermedades. La cosecha se realizó cuando los frutos presentaban una coloración amarilla, para evitar que la cápsula abriera y liberara la semilla. Debido al alto contenido de humedad, es necesario deshidratar los frutos, para ello se secaron a temperatura ambiente en cajas de cartón para evitar infección de las cápsulas o frutos por hongos. El procedimiento general de la cosecha de semillas se muestra en la figura 4. Posteriormente se almacenaron en envases de vidrio como lo recomienda FAO (2008) a temperatura ambiente (Figura 3).

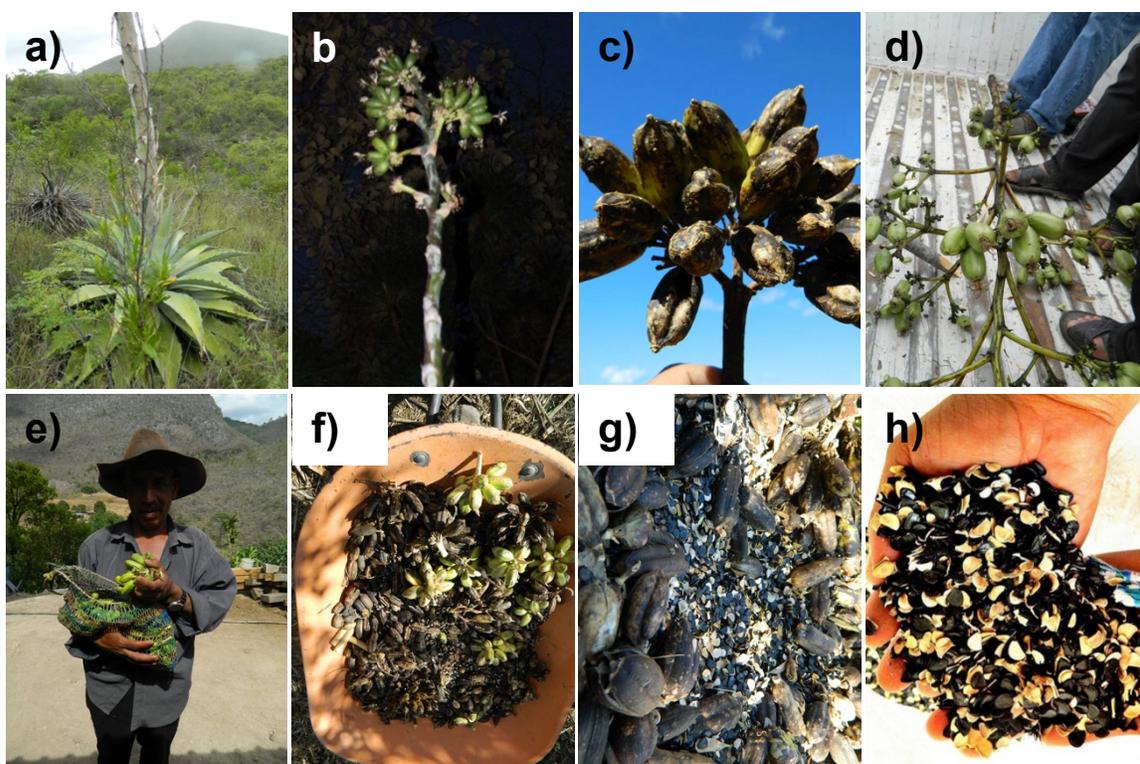


Figura 4. Cosecha de semilla de agave a) Magüey con pedúnculo floral o quito emergido; b) Cápsulas o frutos en proceso de maduración; c) Cápsulas o frutos de agave maduros, coloración amarilla y café, indica el punto óptimo de madurez para cosechar; d) Transporte de cápsulas o frutos cosechados en camioneta; e) Transporte de cápsulas o fruto en redes de carga; f) Transporte de cápsulas o frutos en carretilla; g) Detalle de frutos y semillas de agave cosechados; h) Detalle de semillas de agave (Negras=maduras o completas, blancas=inmaduras o no completas).

2.2.2.2. Muestreo

Un requisito para análisis confiables de semillas es un procedimiento de muestreo que dará como resultado una muestra representativa (Poulsen, 2000). Si la muestra no representa bien al lote de semillas, los resultados del análisis no tienen valor y se vuelven innecesarios. De acuerdo a ISTA (1993), el objetivo del muestreo es obtener una muestra de tamaño adecuado para realizar el análisis, en el cual la probabilidad de un componente presente se determine sólo por su nivel de ocurrencia en el lote de semillas (ISTA 1993).

Los muestreos pueden ser hechos tantas veces como sean necesarios y en el momento adecuado, el tipo de muestra y los análisis a realizar dependen de la especie, etapa y factor que se desea controlar, haciéndose esto en referencia a un lote, lo cual se entiende como una área, cantidad o volumen específico de semillas, semilla a granel o envasada, que sea identificada físicamente y que corresponda a una sola especie (Antonio, 2012).

Para el muestreo de semillas se emplearon las recomendaciones de ISTA (1993), ISTA (2004) Poulsen (2000), Antonio (2012), AOSA (1993) y Willan (1991), con el fin de generar una metodología que permitiera una toma representativa de la muestra a analizar. Los pasos fueron los siguientes:

- Mezclado de la semilla: La semilla de cada especie de agave se mezcló en cubetas de plástico hasta apreciar una mezcla lo más homogénea posible.
- Partido de la semilla: Del lote primario de semillas se fueron haciendo subdivisiones, hasta obtener una subdivisión aproximada a 5000 semillas, que es un tamaño de muestra recomendado para realizar los ensayos básicos de semillas forestales.

2.2.2.3. Análisis de calidad de las semillas

En el análisis de semillas forestales, las pruebas mínimas incluyen contenido de humedad, pureza, peso de semilla y porcentaje de germinación, ya que esta información será requerida por el usuario (Poulsen, 2000). Para el presente trabajo, se siguen las recomendaciones de ISTA (1993), ISTA (1999), ISTA (2004), FAO (2008), Poulsen (2000) y Antonio (2012).

- **Pureza**

El análisis de pureza es el primero que se debe realizar (Poulsen, 2000). Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en la evaluación de la calidad de las semillas (Rita *et al.*, 2001). Para determinar la pureza se dividió la muestra de trabajo entre semilla pura, otra semilla y materia inerte. Se calculó el porcentaje por peso de cada parte. La muestra de trabajo debe contó para cada especie al menos con 2500 semillas de acuerdo a lo sugerido por Poulsen, 2000. La definición de materia inerte, semilla pura y otra semilla se da para cada especie en las reglas del ISTA (ISTA 1993). La semilla pura se refiere a la de la especie en consideración. Adicionalmente a semilla madura y no dañadas incluye: semilla pequeña, marchita, inmadura y germinada, teniendo en cuenta que se puede identificar como semilla de la especie en consideración. Además, la fracción de semilla pura incluye pedazos de semillas resultantes de quebramiento y que deben tener más del 50% del tamaño original. Otra semilla incluye semilla pura de otras especies. Materia inerte comprende estructuras derivadas de semillas como alas de semilla, otras materias no definidas como semilla pura. Las definiciones del ISTA contemplan todas las semillas de especies forestales tropicales, pero basados en experiencias se puede obtener una definición propia o se puede aplicar una definición a otra especie. Para los ensayos de pureza, se seleccionaron para cada especie ocho muestras de 100 semillas cada una y se esparcieron sobre una mesa, examinando las fracciones con un cúter exacto.

El porcentaje de pureza se calculó con la ecuación 1:

$$Pureza (\%) = \frac{\text{Peso de la fracción de semilla pura}}{\text{peso total de la muestra de trabajo}} \times 100 \dots\dots (1)$$

- **Viabilidad**

La viabilidad se refiere a la capacidad potencial de la semilla para poder germinar en condiciones favorables (Niembro, 1988). La viabilidad real de las semillas, puede determinarse solamente por medio de la germinación de una muestra promedio (Pimentel, 2009). Por ello, a la prueba de germinación se le considera como una de las más importantes y definitivas, ya que a través de ella, se puede conocer el verdadero valor aprovechable de las semillas destinadas a la siembra. Para hacer la prueba de germinación en interiores, generalmente se utilizan medios esterilizados (Pimentel, 2009) recomienda cajas Petri, aunque también pueden utilizarse cajas de plástico, de cartón encerado o medios inertes como agrolita, papel absorbente o algodón. En algunos casos se necesita una estimación rápida y una prueba indirecta de viabilidad puede ser realizada. El objetivo de estas pruebas es:

- Hacer un estimado rápido de la viabilidad de las muestras de semillas en general y las que muestran latencia en particular.
- Para muestras que al final de la prueba de germinación revelan un alto porcentaje de semillas con latencia, para determinar la viabilidad individual de las semillas con latencia o la viabilidad de una muestra de trabajo (ISTA 1993).

Para el presente trabajo se utilizó una prueba de viabilidad utilizada también como prueba de germinación forzada utilizada por Prieto *et al.*, 2011 en semillas de Cebada (*Hordeum distichon* L. Maltera); Mápula-Larreta *et al.*, 2008 en pruebas de imbibición de *Pseudotsuga menziesii* y recomendada como prueba de vigor en semillas por Poulsen, 2000, por su simplicidad y bajo costo. La prueba consiste en

obtener una muestra de 300 semillas y sumergirlas 24 horas en una solución al 1% de H₂O₂, se abre un pequeño hueco en el extremo radicular de la testa de la semilla, se colocan 50 semillas en recipientes con 150 ml de la solución al 1% de H₂O₂, colocados a la oscuridad en temperatura ambiente 20/30°C. Se cuentan las semillas con mejor crecimiento (en grupos de longitud de la radícula de 0-5 mm y > 5mm) y la solución se enfría después de 3-4 días; la prueba concluye después de 7-8 días (Bonner 1974).

2.2.2.4. Características físicas de las semillas

Se determinaran algunas características físicas de las semillas como densidad, peso y contenido de humedad, bajo la siguiente metodología:

- **Determinación de contenido de humedad.**

El contenido de humedad es importante para la preservación y manejo poscosecha de las semillas (Pimentel, 2009), se realizó la determinación del contenido de humedad con el método de secado al horno, que estima el contenido de humedad con diferencia de pesos, mismo que se describe a continuación:

- a) Peso húmedo (w₁): Se pesaron dos muestras de cinco gramos de semilla por separado de cada especie de agave a analizar a temperatura ambiente en balanza analítica con precisión 0.001 (Vásquez *et al.*, 2011 y Ramírez *et al.*, 2014)
- b) Peso seco (w₂): Cada muestra se secó a 103°C por 17 días para retirar la humedad y se pesó en balanza analítica con precisión 0.001 (ISTA, 1993; Poulsen, 2000; ISTA, 2004; Antonio, 2012)
- c) El contenido de humedad se calculó con base en peso fresco de la semilla: Se determinó el contenido de humedad con la Ecuación 2, utilizada por Vásquez *et al.* (2011) y Ramírez *et al.* (2014).

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(w1 - w2)}{w1} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

w1= peso húmedo

w2= peso seco

d) El resultado se estableció como el promedio de las dos mediciones expresado en un decimal.

- **Peso:**

El peso de la semilla es un parámetro que indica la calidad de la misma (Poulsen, 2000), por ello se estimó el peso de 1000 semillas con lo sugerido por FAO, 2006 y Poulsen, 2000, descrito a continuación:

- a) Se determinó el peso de la semilla en 8X100 semillas tomadas del componente de semilla pura del ensayo de pureza.
- b) Se estimó la media, desviación típica y coeficiente de variación (C.V).
- c) ISTA prescribe un valor inferior a cuatro en el C.V. para considerar la muestra como homogénea, de lo contrario la prueba debe volver a realizarse.
- d) Se obtuvo el peso de 1000 semillas como la media de las muestras por 10.
- e) Se estimó el número de semillas por gramo de semilla pura, dividiendo 1000/la media de las repeticiones.
- f) Se calculó el número de semillas por kg de semilla pura, dividiendo 1000X1000 entre la media de las repeticiones.

2.2.2.5. Propiedades geométricas

Con el fin de determinar el tamaño y la forma de las semillas, se utilizó un proyector de perfiles (Marca Mitutoyo) con precisión 0.001 mm. Las semillas se escogieron al azar y se midieron sus tres ejes (X,Y, Z), como lo proponen Abalone *et al.*, 2004. A partir de las mediciones de longitud A, B y Espesor C, en mm, se determinaron: Diámetro medio geométrico (Dg) en mm y esfericidad (f), a través de las ecuaciones 3 y 4, como Abalone *et al.*, (2014).

$$Dg = (AXBXC)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

Dg= Diámetro geométrico

A=Largo

B=Ancho

C=Espesor

$$f = \frac{Dg}{A} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

f= esfericidad

Dg= Diámetro geométrico

A=Largo

2.2.3. Distribución potencial de agaves empleados en la elaboración de mezcal

La información de las poblaciones de agaves silvestres empleados en la elaboración de mezcal, sólo es válida en el área geográfica y ecológica donde se toman los datos de campo. Su aplicación fuera del ámbito recomendado tiene por consecuencia la sub o sobreestimación de la población. Por lo anterior, la elaboración del mapa base del área de trabajo es el primer punto a considerar para la generación del mapa de distribución potencial de agaves silvestres. Para tal efecto, se utilizan herramientas modernas como las imágenes satelitales, complementando la información con cartografía temática de Uso de Suelo y Vegetación SERIE IV del INEGI (INEGI, 2010) y la información recabada en campo.

Cuando se emplean las imágenes de satélite, el punto inicial consiste en generar la cartografía de uso de suelo y vegetación, para lo cual se aplican técnicas de percepción remota conocidas como clasificación de imágenes: supervisada y no supervisada. En la primera, se considera el conocimiento previo del área de estudio y trabajo de campo (verificaciones); mientras que, en la segunda a partir de software especializado, se obtienen agrupaciones de acuerdo a similitudes entre píxeles. En ambas técnicas el principio fundamental son las propiedades ópticas de la vegetación, que permiten al software separarla en tipos. El grado de detalle y la exactitud de la clasificación depende de la clase de sensor y de la resolución del mismo.

2.2.3.1. Construcción del modelo de distribución potencial

De acuerdo a la revisión sintética de los modelos de distribución potencial de Mateo *et al.*, (2013), se revisan las bases estadísticas, matemáticas y biológicas de los modelos de distribución potencial. En la figura 5, se muestra la metodología estandarizada para la construcción de modelos de distribución potencial (Mateo *et al.*, 2013). En donde se menciona la importancia de recopilar información sobre

presencia o ausencia de especies (incluso herbarios), asociar estos datos matemática y estadísticamente con variables independientes de interés bioclimáticas y extrapolar al territorio.

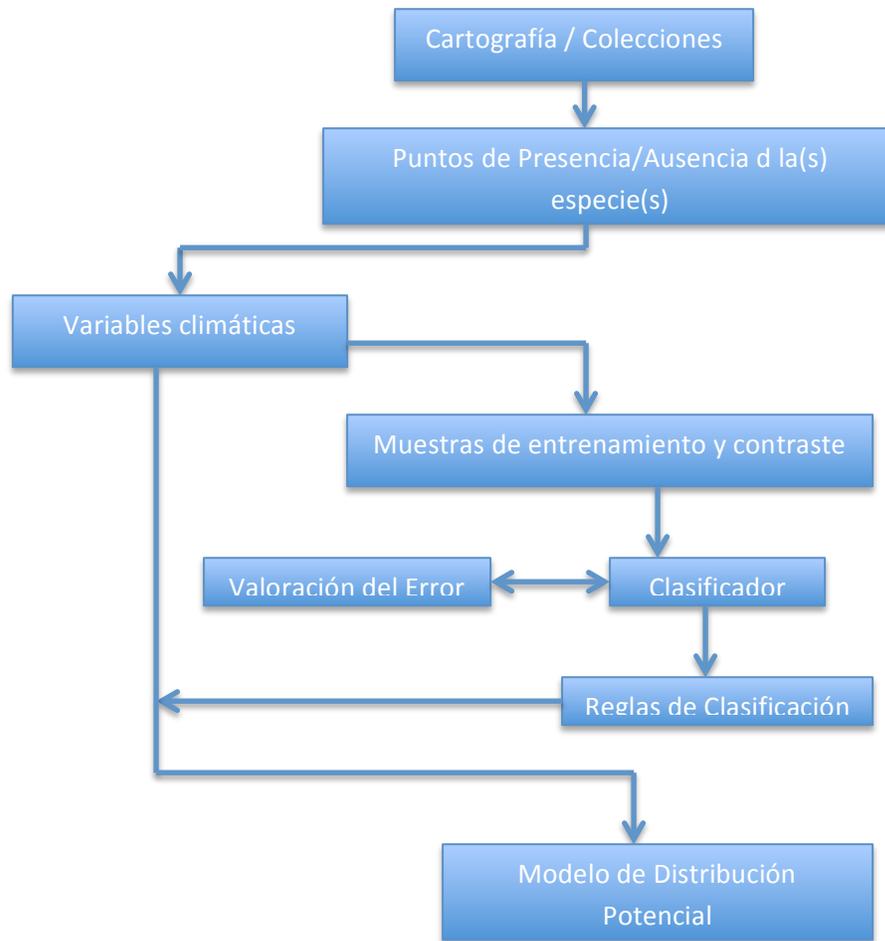


Figura 5. Pasos para la construcción de modelos de distribución potencial

Mateo *et al.*, 2013, hace un énfasis especial en técnicas discriminantes como Maxent, que requiere solamente datos de presencia, ya que realiza sus propios datos de pseudo-ausencia de la especie, a través de una caracterización de fondo de las zonas que maxent genera de acuerdo a las variables que ingresamos al algoritmo y en las cuales estadísticamente no existe probabilidad de encontrar la especie, por esta razón es una de las técnicas más empleadas en la distribución de especies vegetales. En el caso del presente trabajo se tomará como base el trabajo de Delgado *et al.*, (2014), con una modificación en la paquetería utilizada,

en la que se realizaron transectos y se identificaron 40 sitios de extracción de maguey, se analizaron con la paquetería Anuclim del Software Bioclim (en el caso del presente estudio se analizaran con el algoritmo Maxent, utilizando el Software ARCGIS 9.3). Se correrá el modelo con información de cartografía temática (PP, TMA) y además se probaran las variables elevación (msnm), vegetación y tipo de suelo (edafología), que están altamente correlacionadas a la distribución de agaves.

2.2.4. Evaluación del método de reproducción por semilla

Al iniciar la planificación de un programa de reforestación deben tomarse en cuenta dos factores fundamentales; la especie/procedencia y el sistema de producción para obtener el tipo de planta (Pineda *et al.*, 2004). Los sistemas más comunes en la producción de plantas son producción en contenedores y a raíz desnuda (Landis *et al.*, 1998). Las plantas producidas en el sistema de contenedores, generalmente tienden a elevar los costos de producción y se producen daños en el sistema radicular si no se utiliza la planta a tiempo o se lleva a camas de crecimiento. El sistema de producción de planta a raíz desnuda o en almácigos se hace básicamente cuando se efectuaran trabajos con especies forestales, destinadas a plantaciones, ya sea protectoras o comerciales (Pimentel, 2009). En este caso el agave es considerado como una especie forestal no maderable. Este método se basa en que la planta se produce directamente en el terreno sin aditamentos especiales (envases o contenedores) ni protección a la raíz (cepellones). Es por ello que se requiere mayor atención en la técnica a emplear en la producción de planta a raíz desnuda.

Se realizó un diseño factorial 4X4, siendo un factor la especie de agave a germinar (*Agave potatorum*, *A. rhodacantha*, *A. karwinskii*, *A. angustifolia*) y otro el tiempo de imbibición en agua como tratamiento pregerminativo (0 hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). Para cada tratamiento se realizó la germinación de 4X100 semillas como lo sugiera ISTA (2004), en charolas de unisel de 200 cavidades. Se consideraron para cada tratamiento dos charolas de germinación, cada una correspondiente a

una repetición. Se realizó la inspección diaria de la germinación durante 50 días y se anotó la información en una bitácora, finalmente se estimó el porcentaje de germinación por tratamiento. El diseño experimental empleado, se esquematiza en el cuadro 4.

Cuadro 4. Diseño experimental utilizado

Factor 1.	Factor 2. Especie a germinar			
Imbibición en Agua	Agave potatorum	Agave angustifolia	Agave karwinskii	Agave rhodacantha
0 hr	T11	T21	T31	T35
12 hr	T12	T22	T32	T36
24 hr	T13	T23	T33	T37
48 hr	T14	T24	T34	T38

Capítulo III. Resultados y discusión

3.1. Identificación de las especies y variedades empleadas para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

Se constituyó a través de datos del Consejo Regulador del Mezcal (CRM) una base de datos de los productores certificados en el municipio de Villa Sola de Vega, registrados desde el año 2012 a 2015. Se visitó a los 21 productores reportados con certificación ante el CRM y se acordó realizar el seguimiento a lotes de producción con 11 de ellos. Con estos 11 productores se capturaron las bitácoras de producción del CRM y se realizaron entrevistas para obtener información de los agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega.

Cuadro 5. Magueyes empleados para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

Nº	Nombre Común	Nombre Científico	Silvestre/Cultivado
1	Maguey tobalá	<i>Agave potatorum</i> Zucc	Silvestre
2	Maguey espadín	<i>Agave angustifolia</i> Haw	Silvestre/Cultivado
3	Maguey arroqueño	<i>Agave americana</i> ssp. <i>Oaxacensis</i>	Silvestre/Cultivado
4	Maguey sierrudo o sierra negra	<i>Agave americana</i> ssp. <i>Oaxacensis</i>	Cultivado
5	Maguey coyote	<i>Agave americana</i> L.	Cultivado
6	Maguey mexicano; mexicano penca larga o mexicano amarillo	<i>Agave rhodacantha</i> Trel	Silvestre/Cultivado
7	Maguey mexicano azul o penca angosta	<i>Agave aff. rhodacantha</i>	Silvestre/Cultivado
8	Maguey mexicano rellisto o rollisto	<i>Agave sp.</i>	Cultivado
9	Maguey mexicanito	<i>Agave sp.</i>	Silvestre
10	Maguey tobasiche o barril verde	<i>Agave karwinskii</i>	Silvestre/Cultivado
11	Maguey barril	<i>Agave aff. Karwinskii</i>	Silvestre/Cultivado
12	Maguey barril chino o chino	<i>Agave aff. Karwinskii</i>	Cultivado
13	Maguey verde o chino verde	<i>Agave sp</i>	Cultivado
14	Maguey jabali	<i>Agave convallis</i>	Silvestre
15	Maguey tepeztate	<i>Agave marmorata</i>	Silvestre
16	Maguey blanco	<i>Agave americana</i>	Silvestre
17	Maguey de pulque	<i>Agave sp</i>	Silvestre
18	Maguey de pita o espadín sin espinas	<i>Agave aff. Angustifolia</i>	Cultivado

El Cuadro anterior muestra las especies y/o variedades de agave empleadas en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega, se mencionaron por parte de los productores de Mezcal 18 especies utilizadas para elaborar mezcal en el municipio, de las cuáles se pudo extraer información de 9 de ellas en las bitácoras de producción de los productores certificados ante el Consejo Regulador del Mezcal CRM. Las fotografías y sitios de captura de los 18 agaves reportados por los productores encuestados se muestra en el Anexo 1.

3.1.1. Valoración económico-productiva de los agaves empleados para elaborar mezcal en Sola de Vega

Con la información recabada de las bitácoras de producción y las encuestas realizadas a productores certificados ante el CRM, se realizó una valoración de los agaves en cuanto a su importancia productiva (rendimiento, peso por piña, tiempo de madurez), su importancia económica (precio del mezcal en el mercado, precio actual del agave, ingresos anuales generados al productor), social (arraigo cultural, importancia para el productor) y ecológica (cual es cultivada, cual silvestre y su disponibilidad). La información del análisis realizado se muestra en las gráficas siguientes:

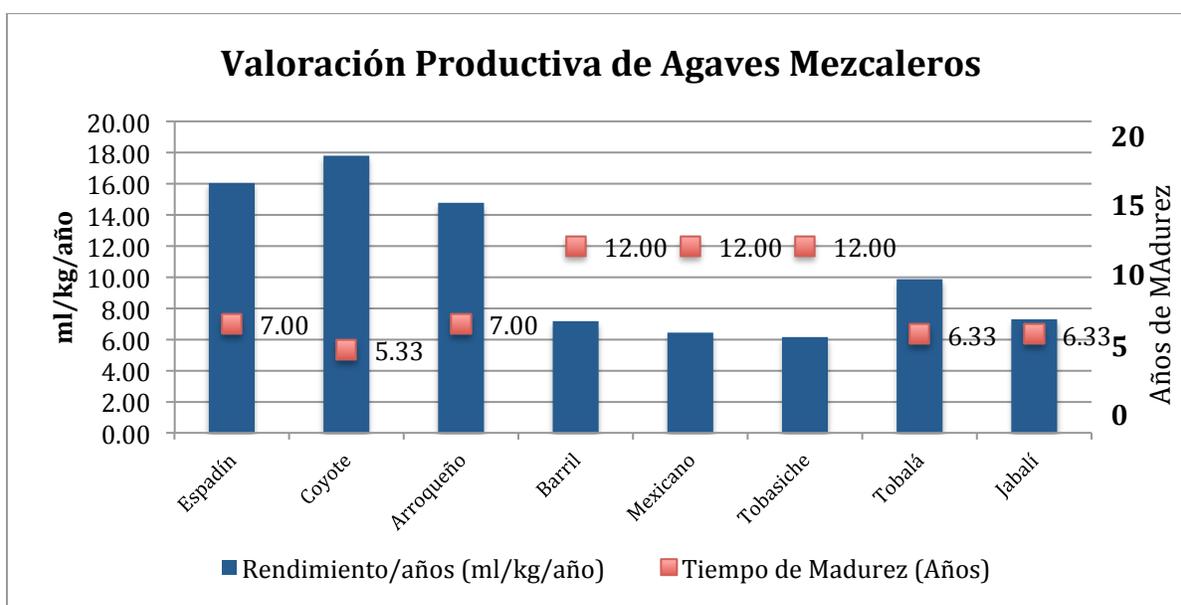


Figura 6. Gráfica de valoración productiva, (Rendimiento y Tiempo de madurez) de agaves mezcaleros.

La figura 6 muestra en las columnas, la media del rendimiento expresado en mililitros producidos por kilogramo de agave por año de madurez (ml/kg/año), siendo el maguey coyote (*Agave americana*) el que mas rendimiento presenta al producir 17.78 ml/kg/año, por los 6.16 ml/kg/año del maguey jabalí que es el de menor rendimiento. Así mismo se muestra con marcadores cuadrados la media del tiempo expresado en años que necesita en promedio cada agave en madurar. Los datos fueron analizados mediante diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) con el software MiniTab Express, para encontrar los agaves que estadísticamente presentan medias distintas para el rendimiento traducido en ml/kg/año, siendo maguey Coyote, Arroqueño y Espadín los que presentan la mayor productividad anual.

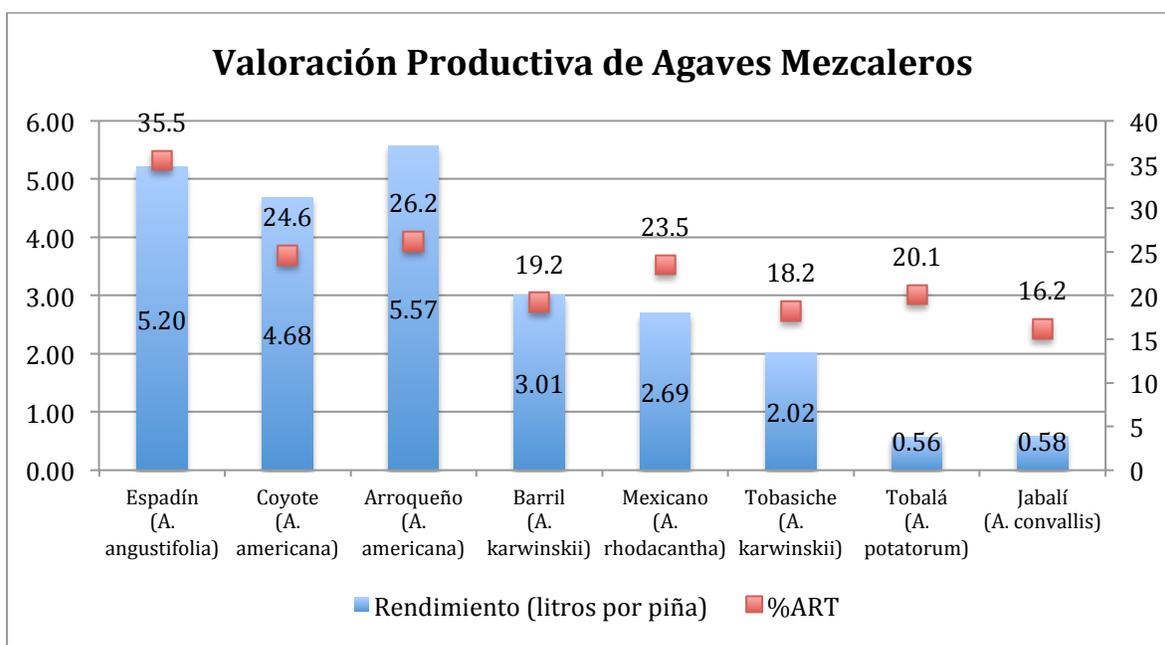


Figura 7. Gráfica de valoración productiva (%Azúcares Reductores Totales ART y Litros de mezcal por piña de agave).

La figura 7 muestra el rendimiento medio expresado en litros de mezcal por planta o piña (l/piña) graficado con columnas, siendo los magueyes Arroqueño, Espadín y Coyote los de mayor producción. Así mismo se muestra en rojo con marcadores cuadrados el porcentaje medio de azúcares reductores totales (%ART) de las especies de agave analizadas. Los datos de l/piña fueron analizados mediante

diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) con el software MiniTab Express, para encontrar los agaves que estadísticamente presentan medias distintas para, siendo maguey Coyote, Arroqueño y Espadín los que presentan la mayor productividad y aprovechamiento de los azúcares reductores totales. En un grupo intermedio se encuentran los magueyes Mexicano, Barril y Tobasiche, que presentan un contenido de ART cercano a 20%, pero probablemente por su alto contenido de fibra, los azúcares no pueden ser asimilados por las levaduras nativas en la fermentación, por ello su rendimiento bajo en la producción mezcal. Finalmente se encuentran los magueyes Jabalí y Toba lá que tienen piñas con los pesos más pequeños (12.66 y 9.22 kg respectivamente) y contenidos de ART bajos (inferiores al 20%), por ello su rendimiento es menor a un litro de mezcal por cabeza o piña de agave.

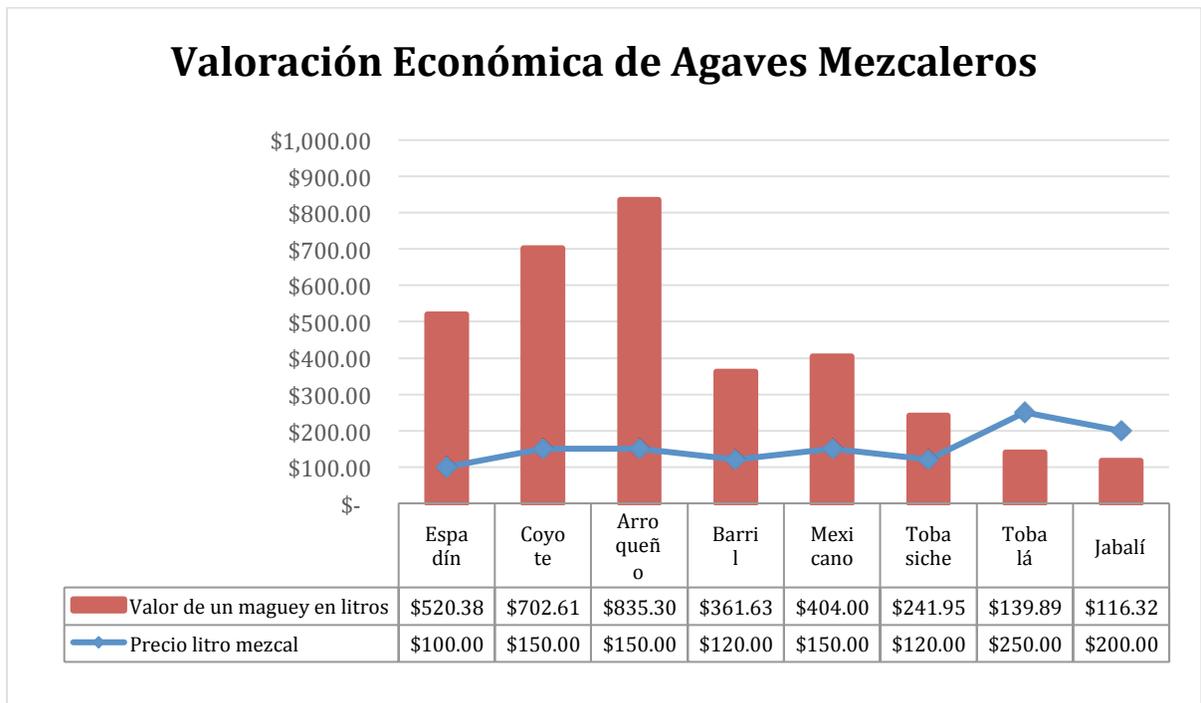


Figura 8. Gráfica de valoración económica (Valor en pesos mexicanos de un maguey en litros y precio de litro de mezcal).

La figura 8 muestra el valor que representa una planta al ser procesada en mezcal, siendo los magueyes Arroqueño y Coyote los de mayor producción (Columnas). Así mismo se muestra con marcadores cuadrados (línea azul) el precio por litro de mezcal de las especies de agave analizadas.

Finalmente se realizó una matriz de valoración de los agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega con la información recabada de las bitácoras de producción y encuestas a productores certificados del municipio. Para elaborar la matriz, se consideraron aspectos productivos (Rendimiento, contenido de azúcares, litros producidos por piña), aspectos del desarrollo de la planta (peso de una piña expresado en kg/piña, tiempo de madurez), aspectos económicos (Precio del mezcal, demanda), aspectos sociales (importancia cultural) y aspectos ecológicos (existe en estado silvestre). Se consideraron en total 10 criterios de decisión, de tal forma que la máxima calificación que pudiera tener un agave fuera 100 y la mínima 10. Los resultados se muestran en el cuadro 6 y la figura 9.

Cuadro 6. Matriz de valoración de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

Magüey	Rendimiento (kg/l)	Azúcares Reductores Totales (%ART)	Kg/ Piña	Tiempo de Madurez	Precio de venta	Litros/piña	Escasez	Demanda	Importancia Cultural	Silvestre/ Cultivado	Total
Arroqueño (<i>A. americana</i>)	10	10	10	5	10	10	10	10	10	5	90
Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	10	10	10	5	1	10	10	10	10	1	77
Coyote (<i>A. americana</i>)	10	10	10	10	10	10	10	5	1	1	77
Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	1	5	1	10	10	1	10	10	10	10	68
Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	5	10	5	1	5	5	5	5	5	5	51
Barril (<i>A. karwinskii</i>)	5	5	5	1	5	5	5	5	5	5	46
Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	1	1	5	1	5	5	5	5	5	10	43
Jabalí (<i>A. convallis</i>)	1	1	1	10	10	1	1	1	1	10	37
Alto	10	10	10	1	10	10	10	10	10	10 Silvestre	10
Medio	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5 Semi-cultivado	5
Bajo	1	1	1	10	1	1	1	1	1	1 Cultivado	1

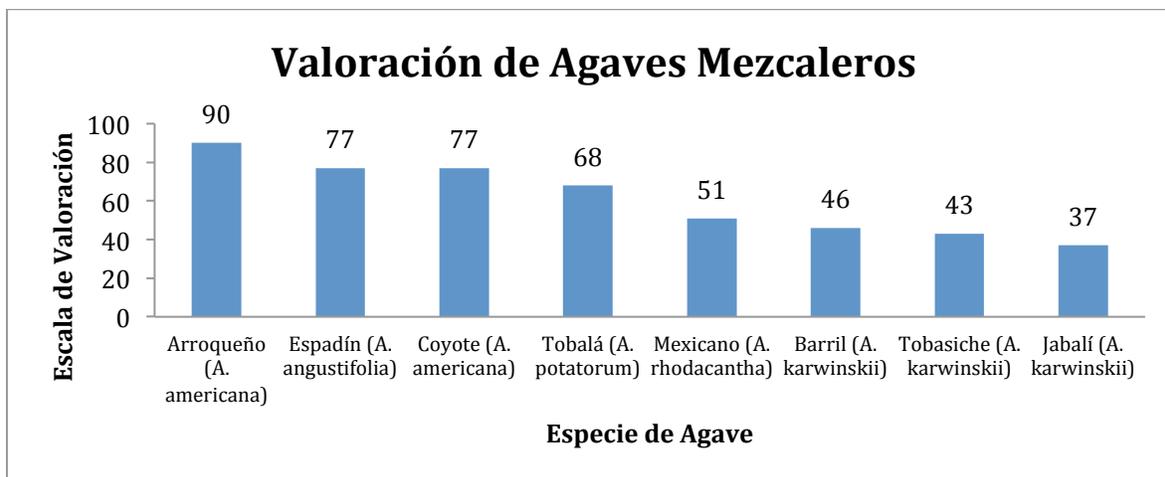


Figura 9. Gráfica de valoración de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

De acuerdo a los datos obtenidos de la matriz de valoración de agaves (Cuadro 4), se construyó la figura 9, graficando los valores de la sumatoria obtenida en la matriz de análisis (Cuadro 4). Los agaves empleados para la elaboración de mezcal artesanal con mayor importancia son: Arroqueño, Espadín y Coyote, ambos con rendimientos altos, demanda en el mercado, arraigo entre los productores, pero tienen con problemas de escasez en la región. En un segundo bloque se encuentra el Maguey Tobalá, siendo el más emblemático culturalmente hablando y con mayor demanda en la región pero con un rendimiento bajo, solamente se encuentra en estado silvestre, el tamaño de la piña es pequeño (peso menor a 10 kg en promedio) y existe alta escasez de este agave en el municipio. En el último bloque se encuentran los agaves Mexicano, Barril, Jabalí y Tobasiche, todos son agaves que tienen un rendimiento bajo en comparación con Arroqueño, Espadín y Coyote, el tamaño de su piña es pequeño, presentan un mediano arraigo entre los productores al ser generalmente ocupados como relleno para completar lotes de producción, es hasta que el productor se certifica que comienza a diferenciar sus mezcales por el tipo de agave empleado. De este último grupo de agaves, Jabalí presenta una amplia distribución en el territorio, el maguey tobasiche es cultivado aunque aún existen individuos en estado silvestre, los magueyes Barril y Mexicano, se encuentran generalmente cultivados en el municipio.

3.2. Caracterización de semillas de agaves empleados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

3.2.1. Análisis de calidad de las semillas de Agave

- **Pureza**

Agave potatorum (Tobalá) es la especie con mayor porcentaje de pureza con un 74.31% esto se debe probablemente a una mejor polinización, ya que como lo menciona García (2007), la polinización de los agaves es fundamental para la producción de frutos y semillas. *A. potatorum* por ser la única especie silvestre de las cuatro analizadas, tiene mas probabilidades de ser polinizada y generar más semillas puras, las especies *A. rhodacantha*, *A. karwinskii* y *A. angustifolia* se obtuvieron de parcelas de cultivo, donde había pocos individuos que promovieran el intercambio de polen, para una adecuada polinización. Los datos se analizaron con el software MiniTab Express y los principales datos se muestran a continuación:

Cuadro 7. Resultados del muestreo del análisis de pureza

SEMILLAS PURAS				
Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	
70.30	47.40	53.50	58.50	
74.00	48.30	53.50	61.40	
77.30	46.30	53.60	58.30	
73.90	47.90	52.60	65.20	
73.90	46.80	52.10	64.10	
76.40	47.40	54.40	67.30	
73.10	49.90	55.90	58.50	
75.90	45.20	51.90	55.40	
75.30	47.00	56.50	61.10	
73.00	45.60	52.40	63.20	
%PUREZA				
74.31	47.18	53.64	61.30	



Figura 10. Detalle de semillas de agave puras (a) e impuras (b)

La figura 10, muestra la apreciación visual de las semillas puras (Figura 10a) e impuras (Figura 10b), estadísticamente ninguna de las especies tiene porcentajes de pureza iguales, se realizó un análisis de varianza, para rechazar la hipótesis de igualdad de medias y posteriormente una prueba de diferencia mínima significativa de Fischer y cada semilla corresponde estadísticamente a un grupo distinto, estos datos se pueden corroborar en las figuras 11 y 12.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Agave	3	4080.82	1360.27	248.24	<0.0001
Error	36	197.27	5.48		
Total	39	4278.09			

Figura 11. Análisis de varianza del análisis de pureza

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Agave	N	Mean	Grouping
Tobalá	10	74.3100	A
Espadín	10	61.300	B
Tobasiche	10	53.6400	C
Mexicano	10	47.1800	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 12. Análisis estadístico para los grupos de semillas. (Comparación de medias por el método LSD de Fisher)

- **Viabilidad**

La siguiente prueba a realizar fue la de viabilidad, se realizó mediante una prueba de germinación inducida con Peróxido de Hidrógeno al 1% , con el fin de obtener datos al final del potencial germinativo y calidad de la semilla de las cuatro especies de agave. Los resultados fueron los siguientes:

Cuadro 8. Viabilidad de las semillas de *Agave* analizadas

Especie	Viabilidad
<i>Agave potatorum</i>	92.33%
<i>Agave rhodacantha</i>	78.00%
<i>Agave angustifolia</i>	67.67%
<i>Agave karwinskii</i>	54.00%

A. potatorum fue la especie que mejores resultados obtuvo en esta prueba al igual que en la prueba de pureza, seguida de *A. rhodacantha*, ambas obtenidas del medio silvestre, lo que facilita la interacción con especies polinizadoras y de esta manera obtener una polinización adecuada; en el caso de *A. angustifolia* y *A. karwinskii*, sus porcentajes de viabilidad fueron menores y estas semillas provienen de parcelas de cultivo, por lo que la interacción con especies polinizadoras es menor.

3.2.2. Análisis de características físicas de la semilla

3.2.2.1. Contenido de Humedad

El cuadro 9 muestra los datos del análisis de contenido de humedad, que en todos los casos se encuentra en los niveles recomendados por Poulsen (2000) para semillas pequeñas (<12% de humedad). Así mismo las diferencias entre submuestras fue inferior a 0.3, por lo que no fue necesario tomar más muestras.

Cuadro 9 Datos del análisis de contenido de humedad

Muestra	PESO INICIAL (gramos)				PESO FINAL (gramos)			
	Tobalá (A. <i>potatorum</i>)	Mexicano (A. <i>rhodacantha</i>)	Tobasich e (A. <i>karwinskii</i>)	Espadín (A. <i>angustifolia</i>)	Tobalá (A. <i>potatorum</i>)	Mexicano (A. <i>rhodacantha</i>)	Tobasich e (A. <i>karwinskii</i>)	Espadín (A. <i>angustifolia</i>)
Muestra 1	5.0	5.0	5.0	5.0	4.6	4.5	4.5	4.6
Muestra 2	5.0	5.0	5.0	5.0	4.6	4.5	4.5	4.6
DIFERENCIA ENTRE SUBMUESTRAS (gramos)								
CONTENIDO DE HUMEDAD POR SUBMUESTRA					0.1	0.1	0.1	0.1
					<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
					8.9	9.1	9.4	8.3
CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO					9.0	9.1	9.4	8.2



Figura 13. Determinación de contenido de humedad a) Preparación de muestras en Cajas Petri; b) Peso inicial de la muestra ajustado a 5.000 ± 0.001 gr; Secado en estufa a 103° ± 0.5 gr por 17 horas; d) Desechado por 30 minutos; e) Peso final de la muestra con precisión ± 0.001.

3.2.2.2. Peso

El objetivo fue determinar el peso de 1 000 semillas. Esto permitirá el cálculo del número de semillas por kg, que es una información muy importante en las operaciones del vivero y para determinar el rendimiento de las plantas en la etapa de evaluación de la germinación. El peso de la semilla está positivamente relacionado con calidad de semilla (Poulsen, 2000). El proceso se muestra en la Figura 14. Los principales resultados del análisis se muestran a continuación:

Cuadro 10. Peso de semillas de agave

Muestra	Tobalá (<i>A. potatorum</i>) gramos	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>) gramos	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>) gramos	Espadín (<i>A. angustifolia</i>) gramos	Varianza	Desviación	C.V.
1	0.71	0.46	0.51	1.47	0.00	0.02	2.08
2	0.72	0.48	0.49	1.40			
3	0.7	0.49	0.49	1.48			
4	0.74	0.47	0.47	1.41			
5	0.74	0.5	0.49	1.47			
6	0.74	0.47	0.48	1.45			
7	0.72	0.45	0.51	1.50			
8	0.72	0.47	0.47	1.42			
COEFICIENTE DE VARIACIÓN MEXICANO							
					Varianza	Desviación	C.V.
					0.00	0.02	3.37
COEFICIENTE DE VARIACIÓN TOBASICHE							
					Varianza	Desviación	C.V.
					0.00	0.02	3.18
PESO PROMEDIO 100 SEMILLAS (gramo)							
	Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)			
	0.72	0.47	0.49	1.45			
COEFICIENTE DE VARIACIÓN ESPADÍN							
					Varianza	Desviación	C.V.
					0.00	0.04	2.50
PESO 1 SEMILLA (gramo)				PESO 1000 SEMILLAS (gramo)			
Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)
0.007	0.005	0.005	0.015	7.24	4.74	4.89	14.50
NUMERO DE SEMILLAS EN UN gramo				NÚMERO DE SEMILLAS EN UN KG			
Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	Mexicano (<i>A. rhodacantha</i>)	Tobasiche (<i>A. karwinskii</i>)	Espadín (<i>A. angustifolia</i>)
138.17	211.08	204.60	68.97	138,169.26	211,081.79	204,603.58	68,965.52

El cuadro anterior muestra el peso de las semillas de agave, siendo la semilla de *Agave angustifolia* la más pesada, seguida de la semilla de *A. potatorum*, *A. karwinskii* y *A. rhodacantha*. Los coeficientes de variación para todas las semillas fueron inferiores a cuatro, por lo que no fue necesario tomar más muestras.

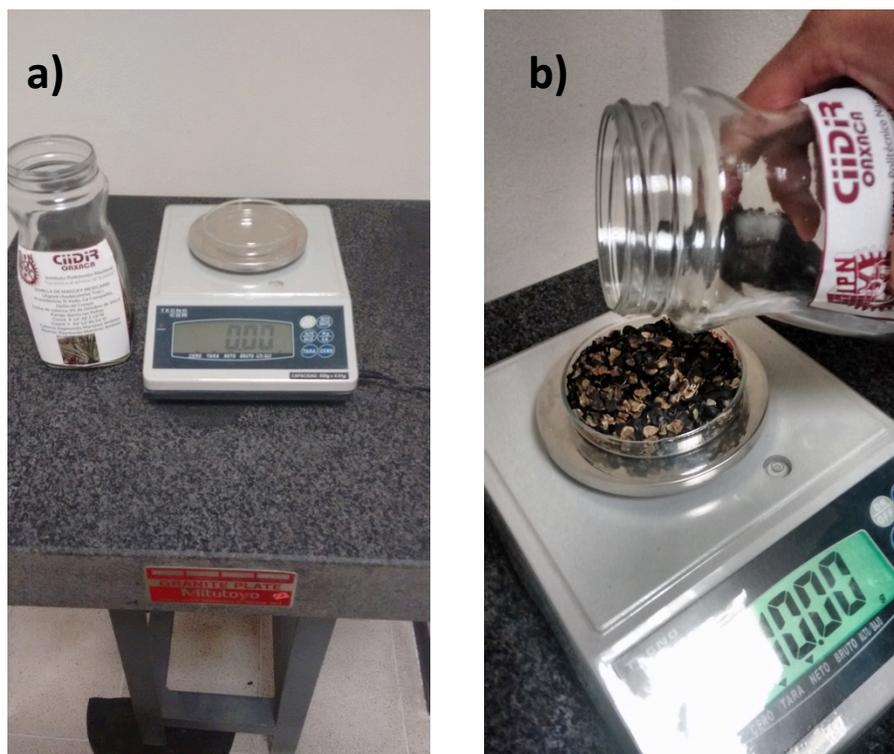


Figura 14. Pesado de las semillas de agave. a) Calibración de bascula con precisión 0.01 gr y mesa de granito para medición Mitutoyo; b) Peso de la muestra.

3.2.3. Propiedades geométricas

3.2.3.1. Longitud, ancho, espesor y esfericidad

Las mediciones se realizaron en el laboratorio de metrología del CIIDIR-IP, con el proyector de perfiles Mitutoyo de la serie PJ-A300 (Figura 15). Para la medición de espesor se preparó un arreglo con portaobjetos y plastilina blanca. Los resultados para las especies *Agave potatorum*, *A. rhodacantha*, *A. angustifolia* y *A. karwinskii*, se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11 . Dimensiones de semilla de *A. karwinskii* (Maguey Tobasiche)

Propiedades geométricas					
Nº	l	a	e	Dg	ES
<i>Agave angustifolia</i>	9.23	7.45	1.03	4.14	0.45
<i>Agave rhodacantha</i>	8.12	6.36	0.67	3.26	0.40
<i>Agave potatorum</i>	7.94	5.79	0.73	3.23	0.41
<i>Agave karwinskii</i>	8.92	6.44	0.64	3.33	0.37

En cuanto a las variables Largo, Ancho y Espesor la especie *Agave angustifolia*, presenta dimensiones mayores que las otras especies analizadas, sin embargo *A. potatorum* presenta un porcentaje de esfericidad mayor.

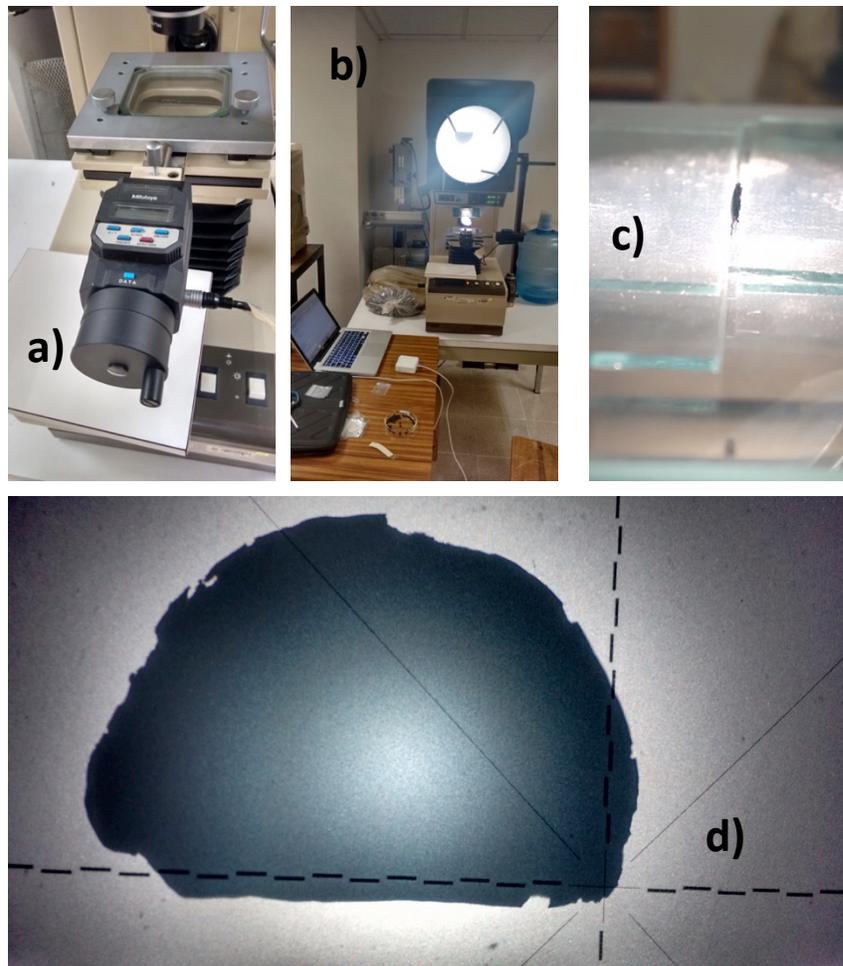


Figura 15. Medición de semillas con proyector de perfiles Mitutoyo. a) Calibración de manuales de medición; b) Preparación de proyector de perfiles Mitutoyo y equipo de computo para toma de datos; c) Arreglo con porta objetos para medición de espesor en semillas de agave; d) Detalle de semilla de agave proyectada.

3.3. Distribución potencial de agaves silvestres empleados en la elaboración de mezcal

3.3.1. Muestreo

Se realizaron transectos en las zonas de distribución conocidas por los productores de mezcal, donde se tomaron datos de presencia de las especies de agave silvestre distribuidas en el municipio de Villa Sola de Vega, se levantaron 100 unidades muestrales que fueron levantadas entre los meses de Agosto 2014 a Diciembre de 2015. Se abarcaron todas las unidades edafológicas y tipos de vegetación primaria presentes en el municipio.

3.3.2. Modelos de distribución potencial

Para la generación del mapa de distribución potencial, se obtuvo información de distribución de puntos de presencia para las especies *Agave potatorum*, *Agave americana*, *Agave karwinskii*, *Agave rhodacantha*, *Agave angustifolia*, *Agave convallis* y *Agave marmorata*. Se utilizó para los modelos de distribución potencial el modelo Maxent (Máxima entropía), por ser un modelo robusto y que no necesita la obtención de datos de ausencia, estos datos los genera mediante la interacción de las variables utilizadas en el modelo, así mismo permite utilizar variables continuas y categóricas. El programa se configuró para un máximo de 1000 interacciones como lo propuesto por Trotta *et al.* (2008) y se utilizó la salida logística. Así mismo se validó el modelo con un remuestreo bootstrap, que se configuró en las propiedades del algoritmo.

Las variables utilizadas para los modelos de distribución potencial de las especies de *Agave* fueron: Temperatura Media Anual-TMA, Precipitación, Unidad Climática (Variable Climática), Tipo de suelo y Humedad del Suelo (Variable Edafológica), Elevación (Variable topográfica) y tipo de Vegetación (Variable categórica). Las variables fueron obtenidas de la cartografía libre de INEGI en formato Shapefile a escala 1:100,000 y convertidas a formato Raster en el software Arcgis 9.3,

posteriormente las variables se transformaron a formato ASCII para poder ser utilizadas desde el algoritmo MAXENT. Los datos de presencia de la especie se exportaron a EXCEL y se convirtieron a formato CSV (Texto limitado por comas).

3.3.2.1. Aportación de las variables al modelo

El programa calcula los porcentajes de contribución de las variables escogidas, ya que a cada paso del algoritmo Maxent incrementa la ganancia del modelo modificando el coeficiente de una sola característica y convirtiéndolo a porcentaje al final del proceso. En el Cuadro 12, se muestran los porcentajes promedio para las siete especies modeladas.

Cuadro 12. Estimaciones de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de Maxent

Agave potatorum	Porcentaje de Contribución de la Variable (%)	Importancia de la permutación (%)
Uso de Suelo y Vegetación	54.0	33.5
Humedad del Suelo	5.2	10.0
Tipo de Clima	7.9	4.6
Precipitación	22.5	37.3
Temperatura	4.4	8.2
Elevación	3.3	5.6
Tipo de Suelo	2.7	0.7

A primera vista la variable uso de suelo y vegetación es la que mayor contribución tiene al modelo de distribución, en la figura 16 se puede apreciar la contribución de las variables a cada uno de los modelos, siendo vegetación la de mayor aportación general al modelo. Para las especies *A. americana* y *A. angustifolia*, se aprecia una evidente dependencia del modelo a la variable uso de suelo y vegetación, pudiendo ser esta la única variable que describa al modelo. Para las

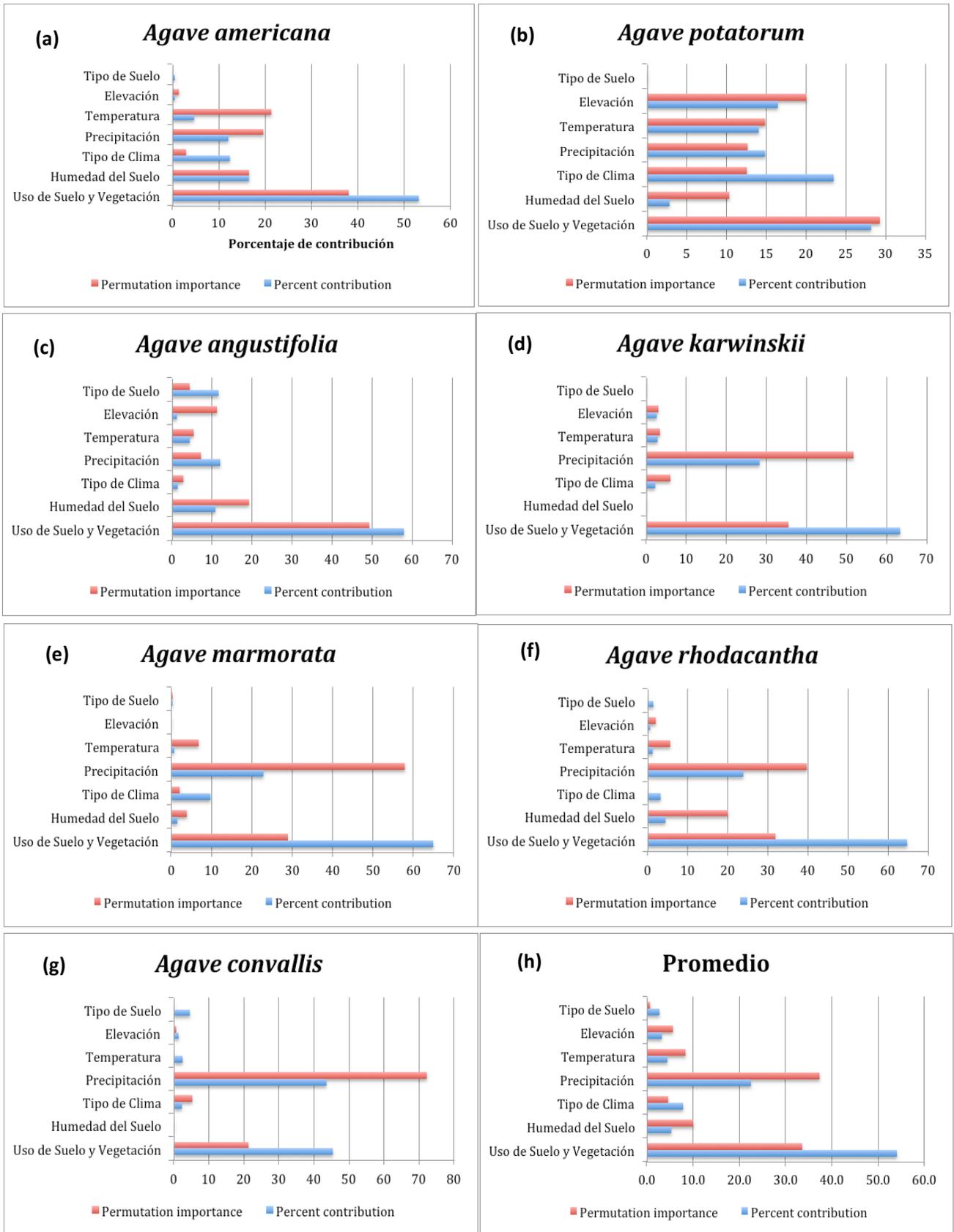


Figura 16. Aportación de las variables a los modelos de distribución

especies *A. convallis*, *A. marmorata*, *A. rhodacantha* y *A. karwinskii*, la segunda variable en importancia y que en conjunto con uso de suelo y vegetación aportan el mayor porcentaje de ganancias al modelo es precipitación, siendo un factor de vital importancia para especies vegetales en modelos de distribución. Finalmente en el caso de *A. potatorum*, aunque la variable con mayor aportación al modelo es uso de suelo y vegetación, no existe una variable que suponga por si misma la mayor ganancia al modelo. En todos los casos la variable tipo de suelo, apporto un porcentaje de contribución al modelo bajo o insignificante.

- **Vegetación**

El cuadro 13 y la figura 17 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable uso de suelo y vegetación. Para esta variable se utilizó la información de la serie IV de uso de suelo y vegetación de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en seis categorías: Bosque Mesófilo de Montaña (1), Bosque de Pino (2), Bosque de Pino-Encino (3), Bosque de Encino-Pino (4), Bosque de Encino (5) y Selva Baja Caducifolia (6). García (2007), comenta que los agaves prosperan en vegetación templada, preferentemente en el bosque de *Quercus* y en menor proporción en el de coníferas y el bosque mesófilo de montaña.

Cuadro 13. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable uso de suelo y vegetación

CONTRIBUCIÓN AL MODELO DE LA VARIABLE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (USV) (%)						
ESPECIE	Bosque Mesófilo	Bosque Pino	Bosque Pino-Encino	Bosque Encino-Pino	Bosque Encino	Selva Baja
<i>A. potatorum</i>	0.00%	0.00%	0.00%	95.42%	54.41%	0.00%
<i>A. americana</i>	0.00%	0.00%	0.00%	90.31%	0.00%	0.00%
<i>A. karwinskii</i>	0.00%	0.00%	17.61%	47.71%	0.00%	0.00%
<i>A. convallis</i>	0.00%	49.14%	11.39%	54.41%	0.00%	0.00%
<i>A. rhodacantha</i>	0.00%	0.00%	0.00%	61.28%	7.92%	0.00%
<i>A. marmorata</i>	0.00%	0.00%	39.79%	14.61%	0.00%	0.00%
<i>A. angustifolia</i>	0.00%	0.00%	0.00%	77.82%	0.00%	69.90%
USV	Bosque Mesófilo	Bosque Pino	Bosque Pino-Encino	Bosque Encino-Pino	Bosque Encino	Selva Baja

El modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando la vegetación es Encino-Pino, que es la mayor comunidad vegetal del municipio. En los Bosques de Pino-Encino, Pino, Encino y Selva Baja Caducifolia, la aportación al modelo fue menor, en el bosque mesófilo de montaña ninguna especie tuvo contribución al modelo.

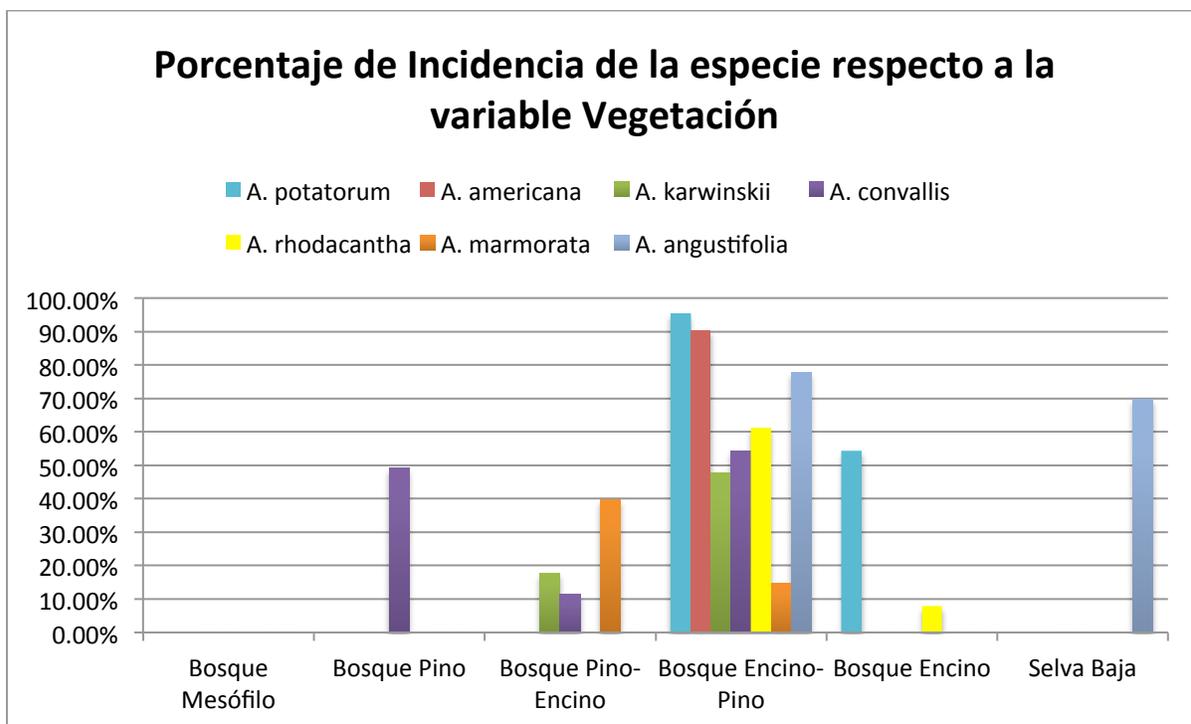


Figura 17. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación

A. potatorum tuvo la mayor probabilidad de incidencia de la especie, cuando se encuentra en bosque de Encino-Pino y Bosque de Encino, difiere de lo descrito por García-Mendoza (2010) para la especie, quien la menciona preferentemente en la Selva Baja Caducifolia y Matorral Xerófilo. *A. americana*, solamente tuvo porcentaje de incidencia en el bosque de Encino-Pino, ello concuerda con Santos *et al.* (2016) que estudiaron a *Agave americana* en la meseta Comiteca y lo ubicaron principalmente en los bosques de encino y coníferas; en otras comunidades vegetales la aportación al modelo fue nula. *A. karwinskii*, tuvo los mayores porcentajes de probabilidad de incidencia de la especie en Bosques de Encino-Pino y Pino, difiere de lo mencionado por Enríquez del Valle *et al.*, (2013),

quienes describen su preferencia de hábitat en matorrales secos o pastizales, sin embargo Conabio (2005), menciona que es necesario estudiar más a fondo la especie por su alta variabilidad morfológica y conocer mejor los ecotipos en los que se desarrolla. *A. convallis*, fue la especie con mayor plasticidad en cuanto a la variable uso de suelo y vegetación, aportando positivamente al modelo en tres comunidades vegetales, Bosque de Pino, Bosque de Pino Encino y Bosque de Encino, tuvo la mayor probabilidad de incidencia de la especie en Bosque de Pino y Bosque de Encino-Pino, García-Mendoza (2010) ubica a la especie en asociación con *A. potatorum* y *A. nussavioarum*, que se desarrollan en el bosque de encino-pino. *Agave rhodacantha* es una especie con amplia distribución en el país, el rango mayor de probabilidad de distribución de la especie fue en el Bosque de Encino-Pino y en menor medida en Bosque de Encino, Conabio (2005) lo ubica en el Bosque de Pino-Encino. *A. marmorata* tuvo mayores porcentajes de incidencia en el Bosque de Pino-encino, dato que contradice lo propuesto por Conabio (2005), que sugiere el desarrollo óptimo de la especie en la Selva baja Caducifolia y el Matorral Xerófilo, sin embargo Flores-Maya *et al.* (2015), realizaron un estudio cariotípico y bioeográfico de *la especie* en la zona de Zapotitlán, Puebla y concluyen que no se ve afectada en su establecimiento por las variaciones de vegetación,. *A. angustifolia* tuvo una probabilidad de incidencia óptima en la Selva Baja Caducifolia, dato que coincide con el descrito por Garnica (2002) quien menciona su cultivo en este tipo de vegetación.

- **Humedad del suelo**

El cuadro 14 y la figura 18 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable humedad del suelo. Para esta variable se utilizó la información de de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en cinco categorías: seis meses (Junio-Noviembre) (1), 7 meses (Junio-Diciembre) (2), 7 meses (Mayo-Noviembre) (3), 8 meses (Mayo-Diciembre) (4) y 9 meses (Mayo-Enero) (5). Los agaves son plantas sensibles a la humedad por el sistema radicular con el que cuentan (García, 2007), el modelo supone una mayor

incidencia de distribución de los agaves cuando el tiempo de humedad del suelo es de 6 meses en el periodo Junio-Noviembre, seguido del tiempo de humedad de 7 meses en el periodo Junio-Diciembre. A distintos periodos de humedad del suelo, la aportación al modelo es baja e incluso negativa, quiere decir que en suelos con largos periodos de humedad no habrá incidencia de la especie.

Cuadro 14. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable humedad del suelo

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE HUMEDAD DEL SUELO					
ESPECIE	6 Meses (Junio- Noviembre)	7 Meses (Junio- Diciembre)	7 meses (Mayo- Noviembre)	8 Meses (Mayo- Diciembre)	9 Meses (Mayo-Enero)
A. <i>potatorum</i>	17.61%	7.92%	0	-15.49%	-30.10%
A. <i>americana</i>	20.41%	17.61%	4.14%	0.00%	-52.29%
<i>A. karwinskii</i>	4.14%	0.00%	-4.58%	-22.18%	-39.79%
<i>A. convallis</i>	17.61%	0.00%	-4.58%	-30.10%	-52.29%
A. <i>rhodacantha</i>	4.14%	17.61%	0.00%	-15.49%	-39.79%
A. <i>marmorata</i>	4.14%	17.61%	0.00%	-15.49%	-30.10%
A. <i>angustifolia</i>	7.92%	4.14%	0.00%	-30.10%	-52.29%

Humedad del Suelo	6 Meses (Junio- Noviembre)	7 Meses (Junio- Diciembre)	7 meses (Mayo- Noviembre)	8 Meses (Mayo- Diciembre)	9 Meses (Mayo-Enero)
----------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	------------------------------	-------------------------

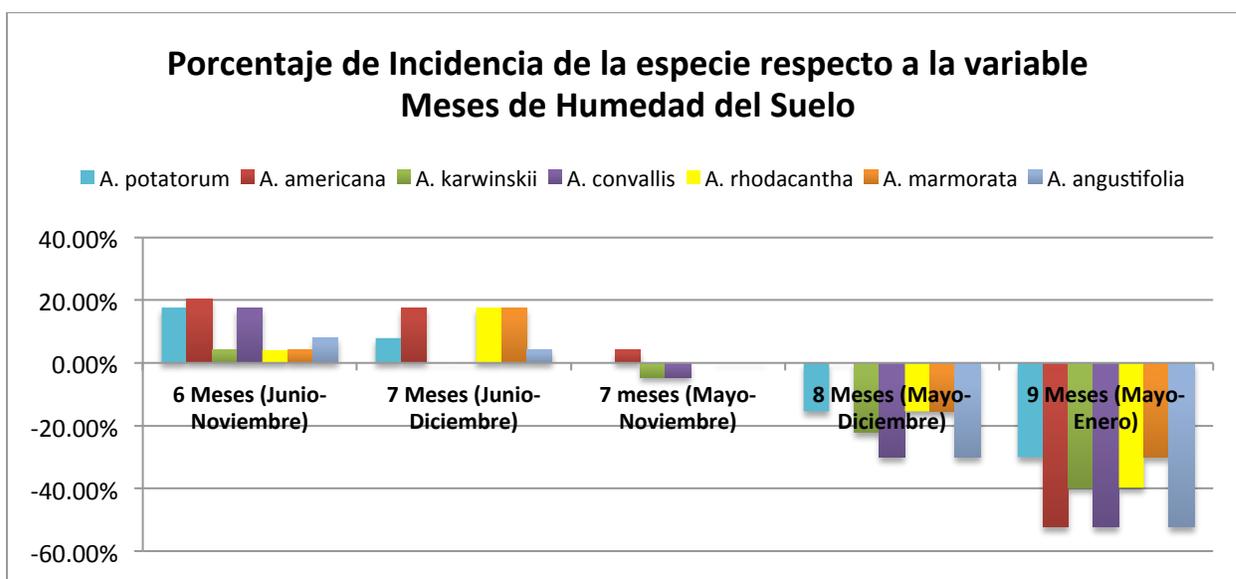


Figura 18. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable humedad del suelo

- **Tipo de clima**

El cuadro 15 y la figura 19 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima. Para esta variable se utilizó la información de de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en cinco categorías: Templado húmedo C(m)(w) (1), Templado subhúmedo (A)C(w0)(w) (2), Semicálido subhúmedo A(C)w1(w) (3), Cálido subhúmedo Aw0(w); Aw1(w);Aw2(w) (4) y Semiseco semicálido BS1hw(w) (5). Los agaves son plantas sensibles a la humedad por el sistema radicular con el que cuentan (García, 2007), el modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando el tiempo de humedad del suelo es de 6 meses en el periodo Junio-Noviembre, seguido del tiempo de humedad de 7 meses en el periodo Junio-Diciembre. A distintos periodos de humedad del suelo, la aportación al modelo es baja e incluso negativa, quiere decir que en suelos con largos periodos de humedad no habrá incidencia de la especie.

Cuadro 15. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE TIPO DE CLIMA					
ESPECIE	Templado húmedo	Templado subhúmedo	Semicálido subhúmedo	Cálido subhúmedo	Semiseco semicálido
A. potatorum	0.00%	38.02%	46.24%	0.00%	0.00%
A. americana	0.00%	17.61%	30.10%	0.00%	0.00%
A. karwinskii	0.00%	39.79%	27.88%	0.00%	0.00%
A. convallis	0.00%	36.17%	32.22%	0.00%	0.00%
A. rhodacantha	0.00%	43.14%	20.41%	0.00%	0.00%
A. marmorata	0.00%	49.14%	17.61%	0.00%	0.00%
A. angustifolia	0.00%	14.61%	27.88%	4.14%	0.00%
	Templado húmedo	Templado subhúmedo	Semicálido subhúmedo	Cálido subhúmedo	Semiseco semicálido

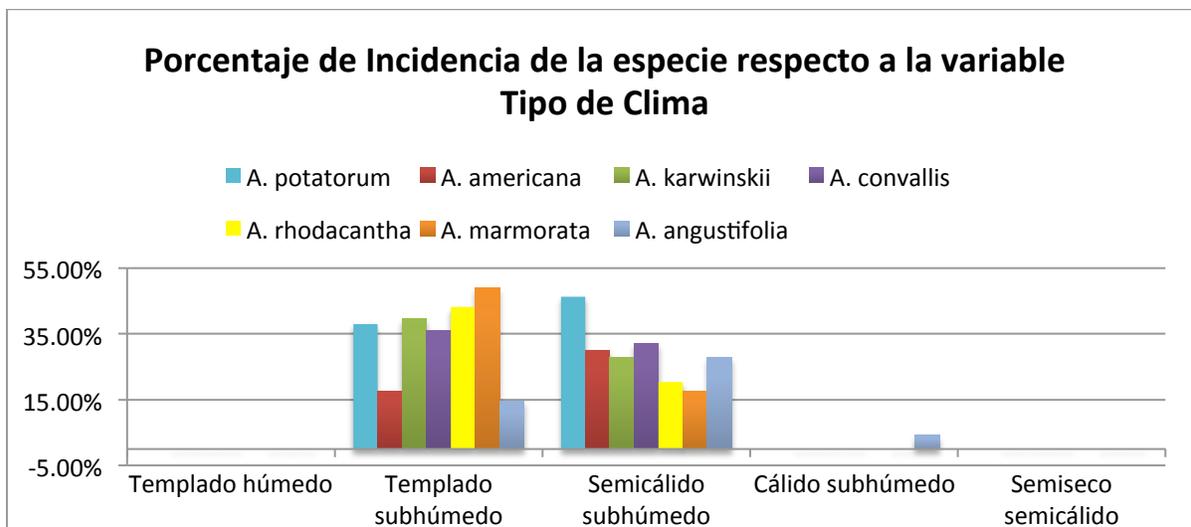


Figura 19. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima

El género *Agave* se encuentra en el régimen de los climas templado, semi-cálido o cálido (Ruiz *et al.*, 1999), ello se puede comprobar con el gráfico 19, dado que todas las especies aumentaron su porcentaje de incidencia de la especie cuando los climas fueron Templado subhúmedo y Semicálido subhúmedo. A pesar de ello debe resaltarse que el agave se adapta en regiones semi-áridas y sub-húmedas (Gacía, 2007), con ambientes seco a moderadamente secos la mayor parte del año (Ruiz *et al.*, 1999).

- **Precipitación anual**

El cuadro 16 y la figura 20 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable precipitación. Para esta variable se utilizó la información de de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en siete categorías: ≤ 700 mm (1), 800 mm (2), 900 mm (3), 1000 mm (4), 1200 mm (5), 1500 mm (6) y 2000 mm (7). Los agaves son plantas sensibles a la humedad y tienen diversos mecanismos para adaptarse a cambios de humedad (García, 2007), el modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando la precipitación anual se encuentra en el rango de los 800 mm a los 1200 mm anuales, a menor precipitación hay contribución del modelo para todas las especies, pero baja significativamente, a mayor precipitación el porcentaje de incidencia también baja, incluso la aportación al modelo se vuelve negativa en los 2000 mm de precipitación anual para cinco de las siete especies.

Cuadro 16. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable precipitación anual

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE PRECIPITACIÓN ANUAL							
ESPECIE	<=700 mm	800 mm	900 mm	1000 mm	1200 mm	1500 mm	2000 mm
<i>A. potatorum</i>	30.10%	60.21%	65.32%	60.21%	59.11%	57.98%	0.00%
<i>A. americana</i>	11.39%	54.41%	66.28%	69.02%	70.76%	74.04%	66.28%
<i>A. karwinskii</i>	47.71%	74.04%	69.90%	65.32%	69.90%	4.14%	-4.58%
<i>A. convallis</i>	4.14%	47.71%	60.21%	47.71%	4.14%	0.00%	-30.10%
<i>A. rhodacantha</i>	47.71%	76.34%	71.60%	68.12%	44.72%	0.00	-30.10%
<i>A. marmorata</i>	60.21%	85.13%	77.82%	65.32%	47.71%	4.14%	-4.58%
<i>A. angustifolia</i>	39.79%	64.35%	65.32%	64.35%	62.32%	59.11%	54.41%

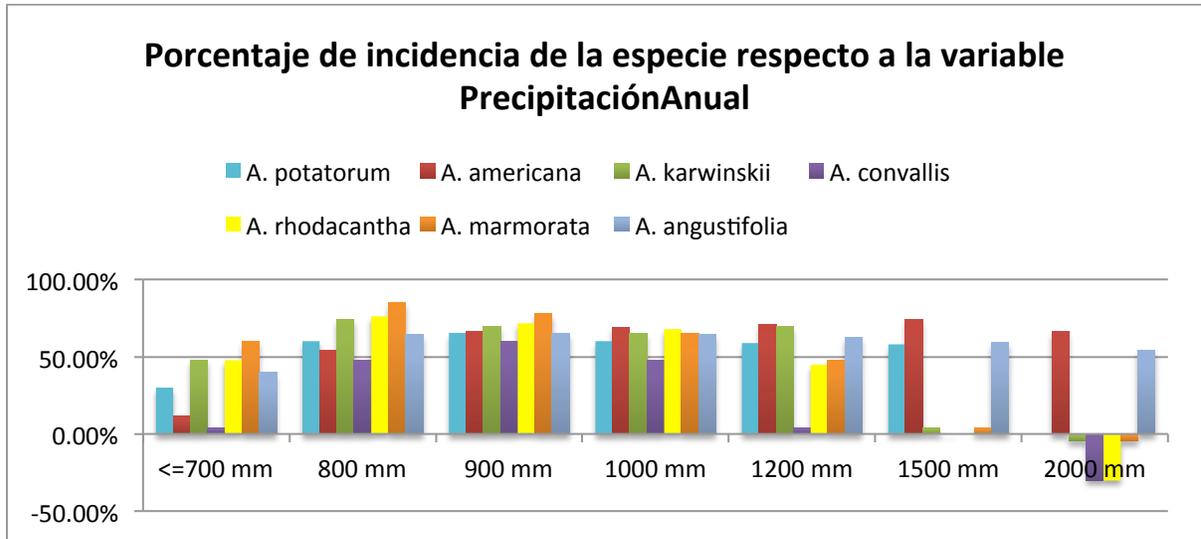


Figura 20. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de clima

El género *Agave* se adapta al régimen de precipitación anual ubicado entre los 600 mm a 1800 mm (Ruiz *et al.*, 1999), ello concuerda con el modelo desarrollado y se comprueba con el gráfico 20, dado que las siete especies tuvieron mayores porcentajes de incidencia de la especie en el rango de 800 a 1500 msnm. *A. americana* y *A. angustifolia*, fueron las únicas especies que tuvieron un porcentaje de incidencia de la especie en el rango de 2000 mm, aunque sus requerimientos óptimos se ubican entre los 600-1500 mm (Santos *et al.*, 2016; Garnica, 2002).

- **Temperatura media anual (TMA)**

El cuadro 17 y la figura 21 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable temperatura. Para esta variable se utilizó la información de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en cinco categorías: 16°C (1), 18°C (2), 20°C (3), 22°C (4), y 24°C (5). Los agaves son plantas sensibles a bajas temperaturas y generalmente saben adaptarse a condiciones extremas y largos periodos de sequía (García, 2007).

Cuadro 17. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable temperatura media anual

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE TEMPERATURA MEDIA ANUAL (TMA)					
ESPECIE	16°C	18°C	20°C	22°C	24°C
A. <i>potatorum</i>	39.79%	77.82%	81.29%	60.21%	0.00%
A. <i>americana</i>	17.61%	56.82%	65.32%	47.71%	17.61%
A. <i>karwinskii</i>	39.79%	74.04%	65.32%	51.85%	23.04%
A. <i>convallis</i>	30.10%	66.28%	62.32%	47.71%	17.61%
A. <i>rhodacantha</i>	39.79%	75.59%	65.32%	47.71%	14.61%
A. <i>marmorata</i>	47.71%	81.95%	68.12%	39.79%	0.00%
A. <i>angustifolia</i>	30.10%	71.60%	74.82%	69.90%	49.14%
TMA	16°C	18°C	20°C	22°C	24°C

El modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando la temperatura media anual se encuentra en el rango de los 18°C a los 20°C , a menor o mayor temperatura hay contribución al modelo para todas las especies, pero disminuye el porcentaje de incidencia, a mayor temperatura el porcentaje de incidencia también baja, incluso la aportación al modelo se vuelve negativa en los 24°C de TMA para cinco de las siete especies.

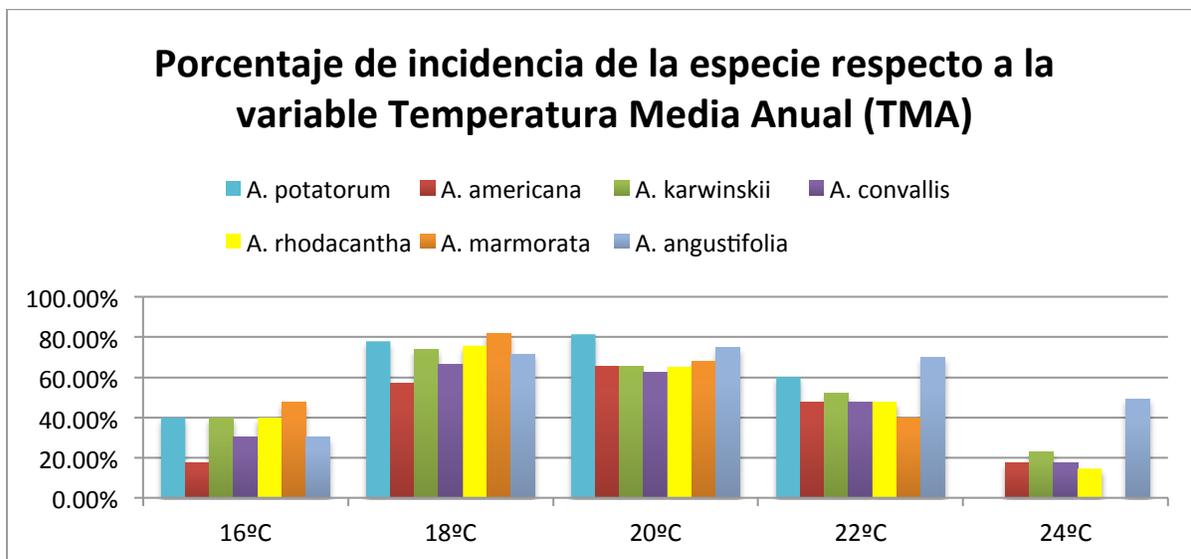


Figura 21. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable temperatura media anual

A. potatorum tiene la mayor probabilidad de incidencia de la especie, cuando se encuentra en los 20°C, ello concuerda con lo reportado por Enríquez del Valle *et al.*, (2013) para la especie, quien menciona su hábitat óptima en climas templados. *A. americana*, tuvo mayores porcentajes de incidencia a 20°C, rango que coincide con el rango agroecológico óptimo para el cultivo, mencionado por Santos *et al.* (2016). *A. karwinskii*, tuvo los mayores porcentajes de probabilidad de incidencia de la especie a los 18°C; Enríquez del Valle *et al.*, (2013), mencionan que la especie puede tolerar temperaturas extremos. *A. convallis* y *A. rhodacantha*, tuvieron la mayor probabilidad de incidencia de la especie a los 18°C, con mayor preferencia a las temperaturas bajas. *A. marmorata* tuvo mayores porcentajes de incidencia en el rango de temperatura de 18-20°C, a mayores o menores temperaturas su porcentaje de incidencia disminuye significativamente. *A. angustifolia* tuvo una probabilidad de incidencia óptima amplio (18-22°C) y presentó porcentajes de incidencia en los extremos de las categorías del modelo (16°C y 24°C), ello debido a su fácil adaptación a variaciones de clima y temperatura.

- **Elevación**

El cuadro 18 y la figura 22 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación. Para esta variable se utilizó la información de curvas a nivel de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió en seis categorías: <800 msnm (1), 800-1200 msnm (2), 1200-1600 msnm (3), 1600-2000 msnm (4), 2000-2400 msnm (5) y 2400-3000 msnm (6). El modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando el rango de elevación va de los 800 a los 2000 msnm. A elevaciones menores a 800 msnm y superiores a 2000 msnm, la aportación al modelo es menor, ello coincide con lo mencionado por García (2010), que menciona un rango de desarrollo de los agaves que va de los 1000-2000 msnm. Las únicas especies que tienen una aportación positiva al modelo en todas las categorías de elevación son *A. potatorum* y *A. convallis*.

Cuadro 18. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE ELEVACIÓN						
ESPECIE	<800	800-1200	1200-1600	1600-2000	2000-2400	2400-3000
<i>A. potatorum</i>	47.71%	68.12%	76.34%	79.24%	74.04%	54.41%
<i>A. americana</i>	14.61%	20.41%	23.04%	14.61%	-15.49%	-100.00%
<i>A. karwinskii</i>	46.24%	65.32%	77.82%	60.21%	39.79%	-100.00%
<i>A. convallis</i>	17.61%	39.79%	50.51%	54.41%	53.15%	17.61%
<i>A. rhodacantha</i>	30.10%	53.15%	65.32%	69.90%	36.17%	-30.10%
<i>A. marmorata</i>	-4.58%	16.14%	30.10%	41.50%	44.72%	38.02%
<i>A. angustifolia</i>	-4.58%	14.61%	25.53%	39.79%	36.17%	-30.10%

Metros sobre el Nivel del Mar (msnm)	<800	800-1200	1200-1600	1600-2000	2000-2400	2400-3000
--------------------------------------	------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

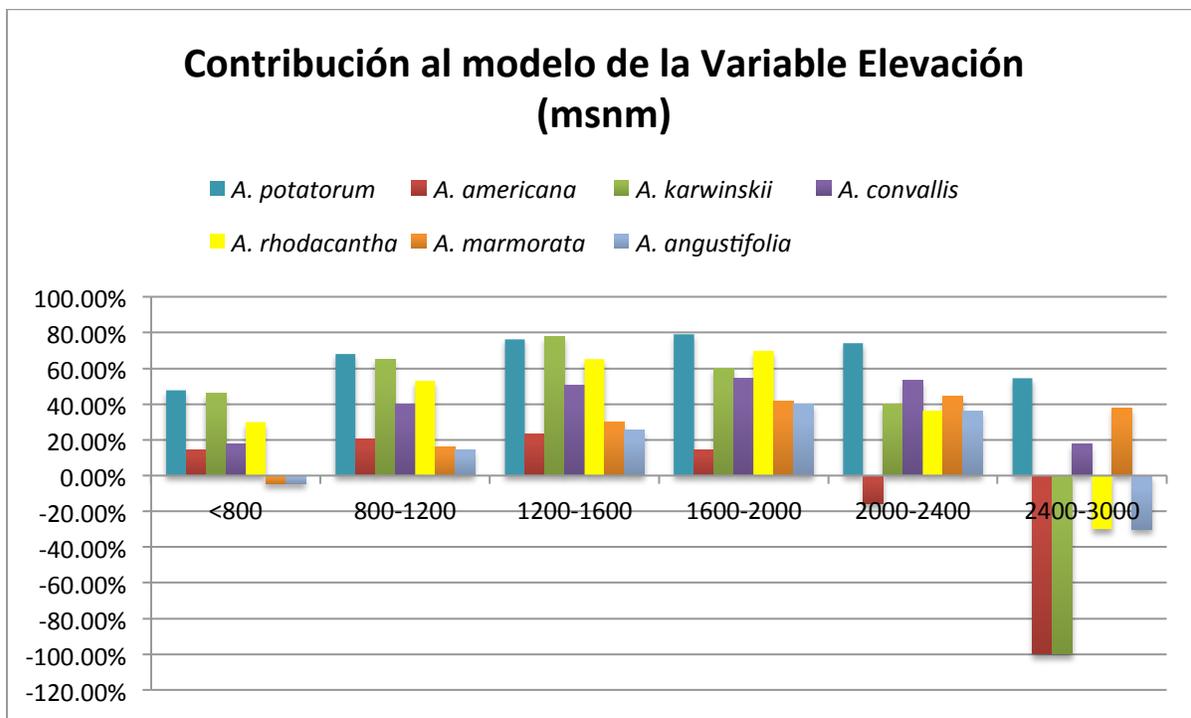


Figura 22. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación

A. potatorum tiene la mayor probabilidad de incidencia de la especie, cuando se encuentra en el rango altitudinal de los 1200 a los 2400 msnm, ello concuerda con lo reportado por García (2007) para la especie, quien la menciona un rango altitudinal de distribución de los 1300 a los 2400 msnm. *A. americana*, tuvo mayores porcentajes de incidencia entre los 800-2000 msnm, rango que coincide con el rango agroecológico óptimo para el cultivo, mencionado por Santos *et al.* (2016), que es de los 1000-2000 msnm; a rangos menores a 800 msnm el porcentaje de incidencia es menor al 20% y cuando la altitud es superior a 2000 msnm, la aportación al modelo es negativa. *A. karwinskii*, tuvo los mayores porcentajes de probabilidad de incidencia de la especie entre los 1200 y 1600 msnm, Enríquez del Valle *et al.*, (2013), mencionan el rango de desarrollo de la especie entre los 1500 y 1900 msnm, sin embargo Conabio (2005), ubica a la especie en el rango de los 750 msnm a los 2000 msnm, dato que se ajusta a los resultados del modelo. En rangos inferiores a los 800 msnm y superiores a los 2000 msnm, la probabilidad de incidencia disminuye y en rangos altitudinales superiores a los 2400 msnm, la aportación al modelo de la variable elevación es

negativa. *A. convallis*, tuvo la mayor probabilidad de incidencia de la especie en el rango comprendido de los 1200-2400 msnm, siendo 1800 msnm la altitud promedio, coincide con lo reportado por Espinosa *et al* (2002), que ubican a la especie a los 1750 msnm para el estado de Oaxaca. *Agave rhodacantha* es una especie con amplia distribución en el país, el rango mayor de probabilidad de distribución de la especie fue de 1600-2000 msnm, Conabio (2005) lo ubica en el rango de los 1000-2500 msnm. *A. marmorata* tuvo mayores porcentajes de incidencia en el rango altitudinal de los 1600-2400 msnm. *A. angustifolia* tuvo una probabilidad de incidencia óptima entre los 1600-2000 msnm, Garnica (2002) menciona su cultivo entre los 800-1500 msnm y CONAFOR (2002), menciona su altitud máxima de desarrollo a los 2000 msnm.

- **Tipo de suelo**

El cuadro 19 y la figura 23 muestran el porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de suelo. Para esta variable se utilizó la información de la carta de edafología de la cartografía de INEGI, 2010 en escala 1:100,000, misma que se dividió de acuerdo a sus unidades edafológicas primarias en el municipio en tres categorías: Feozem (1), Litosol (2) y Regosol (3).

Cuadro 19. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable elevación

PORCENTAJE DE INCIDENCIA DE LA ESPECIE RESPECTO A LA VARIABLE TIPO DE SUELO			
ESPECIE	FEOZEM	LITOSOL	REGOSOL
<i>A. potatorum</i>	0.00%	7.92%	0.00%
<i>A. americana</i>	0.00%	0.00%	4.14%
<i>A. karwinskii</i>	0.00%	4.14%	0.00%
<i>A. convallis</i>	0.00%	14.61%	0.00%
<i>A. rhodacantha</i>	0.00%	-4.58%	17.61%
<i>A. marmorata</i>	0.00%	-9.69%	4.14%
<i>A. angustifolia</i>	0.00%	0.00%	25.53%
Metros sobre el Nivel del Mar (msnm)	FEOZEM	LITOSOL	REGOSOL

El modelo supone una mayor incidencia de distribución de los agaves cuando tipo de suelo corresponde a la unidad edafológica primaria Regosol en el cuál presentan porcentaje de incidencia positivo cuatro de las siete especies modeladas. En el caso de la unidad edafológica primaria Litosol, tres especies tienen un porcentaje incidencia positivo para esa unidad edafológica y dos presentan un porcentaje de incidencia negativo. En el caso del Feozem, ninguna especie tuvo algún porcentaje de incidencia para esa unidad edafológica.

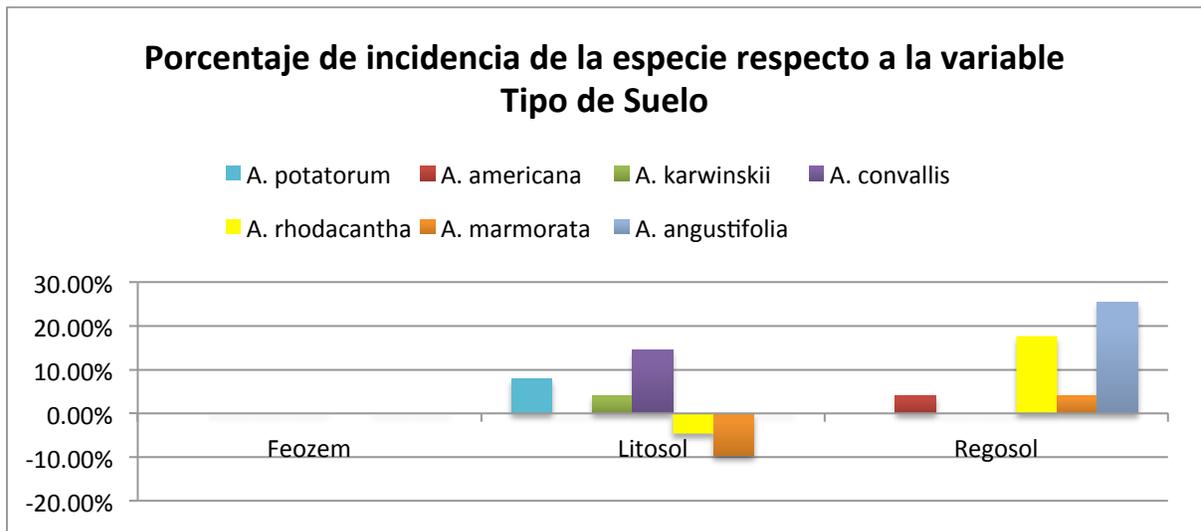


Figura 23. Porcentaje de incidencia de la especie respecto a la variable tipo de suelo

Aunque esta variable categórica no tuvo una aportación significativa al modelo, supone una contribución positiva cuando el tipo de suelo corresponde a litosoles y Regosoles. Este tipo de suelos se caracterizan por contar con suelos muy delgados, poco desarrollador compuestos principalmente por arenas. Este dato concuerda con lo reportado por García (2010) para los agaves, quien menciona la distribución del género en suelos arenosos poco profundos y desarrollados. Los Feozem, son suelos ricos en materia orgánico y bien desarrollados, por ello en esta categoría de tipo de suelo, no hubo incidencia positiva de ninguna de las siete especies de agave modeladas.

3.3.2.2. Validación del modelo

- Prueba Jackknife

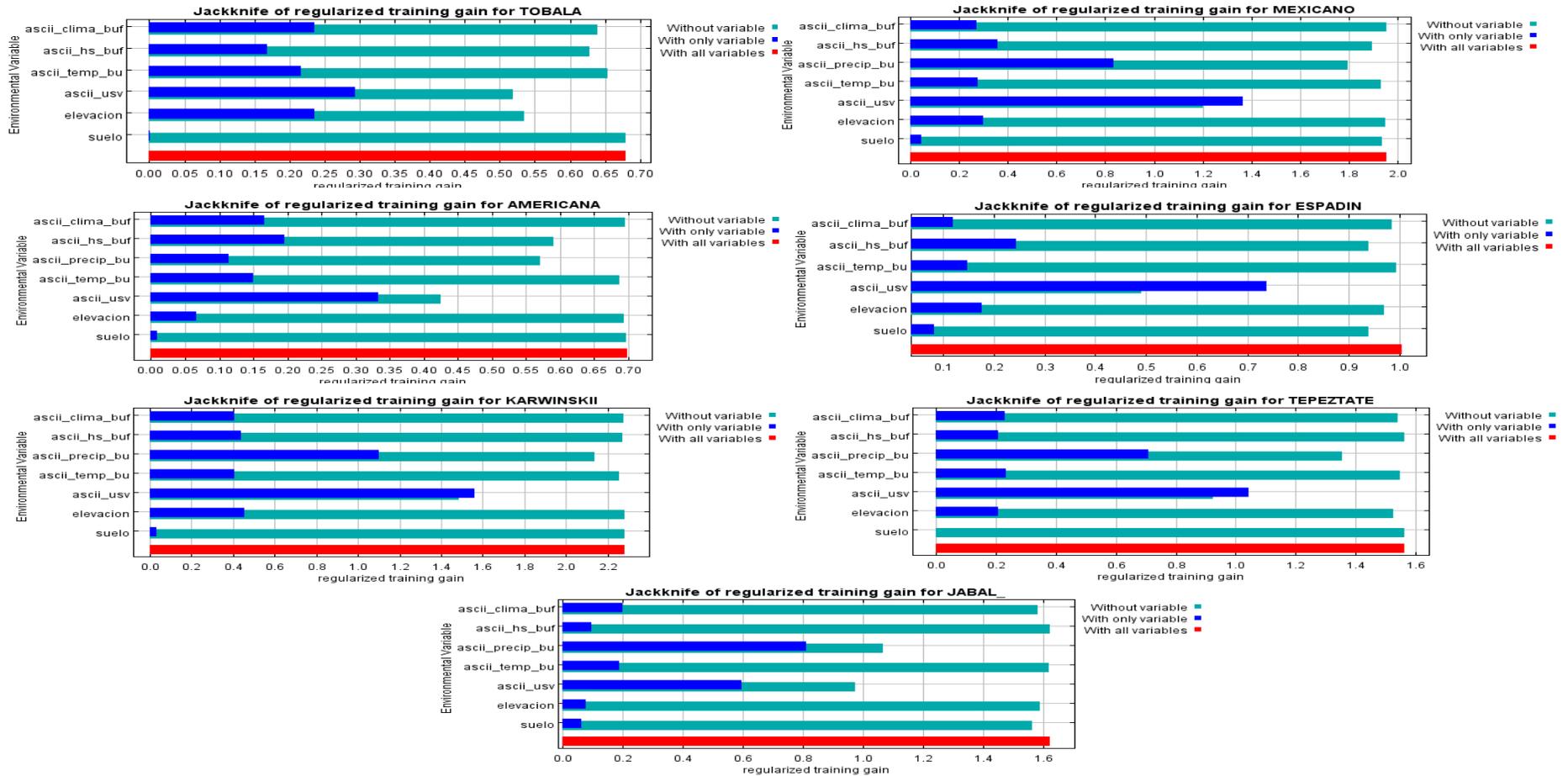


Figura 24. Resultados de la prueba Jackknife para la importancia de cada variable por especie de agave modelada. En la página siguiente se explican las claves utilizadas para identificar a las variables.

La imagen anterior muestra los resultados de la prueba de Jackknife para la importancia de cada variable. Se muestra el resultado de la prueba para cada especie analizada. Las claves utilizadas para las variables fueron las siguientes:

- ascii_clima_buf: Clima
- ascii_hs_buf: Humedad del suelo
- ascii_precip_bu: Precipitación anual
- ascii_temp_bu: Temperatura media anual
- ascii_usv: Uso de suelo y vegetación
- elevación: Elevación
- suelo: Tipo de suelo

La variable con mayor ganancia o representatividad cuando se utilizó en los modelos para las siete especies es vegetación, que, por tanto, parece tener la información más útil por sí misma y por tanto, parece tener la mayoría de la información que no está presente en el resto de variables. Así mismo se muestra la eficacia del modelo sin la variable y es la que más afecta al modelo al estar ausente.

- **Gráfico de omisión y área predicha**

Una de las ventajas más importante de utilizar Maxent es que permite medir el rendimiento y ajuste del modelo, a través de estadísticos y gráficos que genera, estos se muestran a continuación:

La tasa de omisión es una estadística que indica el rendimiento del modelo. La matriz “Omission and Predicted Area”(Figura 18), consta de tres líneas:

- Omission on training samples (línea azul): Muestra las fracciones de los puntos de presencia ubicados por fuera del área potencial con base en el modelo de Maxent (Fraction value), por los valores del umbral de probabilidad (de bajo a alto) que limita el área predicha (Cumulative threshold). “Training samples” (muestras de entrenamiento) se utiliza como sinónimo de “puntos de presencia”.

- Fraction of background predicted (línea roja) muestra las fracciones de los puntos de fondo (aleatorios) del área de estudio incluidos en el área predicha, usando diferentes umbrales acumulativos (Cumulative thresholds)..
- Predicted omission (línea negra) es una línea de referencia.

Si la línea azul (Omission on training samples) aparece bien ajustado por debajo de la línea de referencia (Predicted omission), es posible que el modelo se haya sobreajustado (overfitting) por dependencia entre los puntos (Phillips 2009).

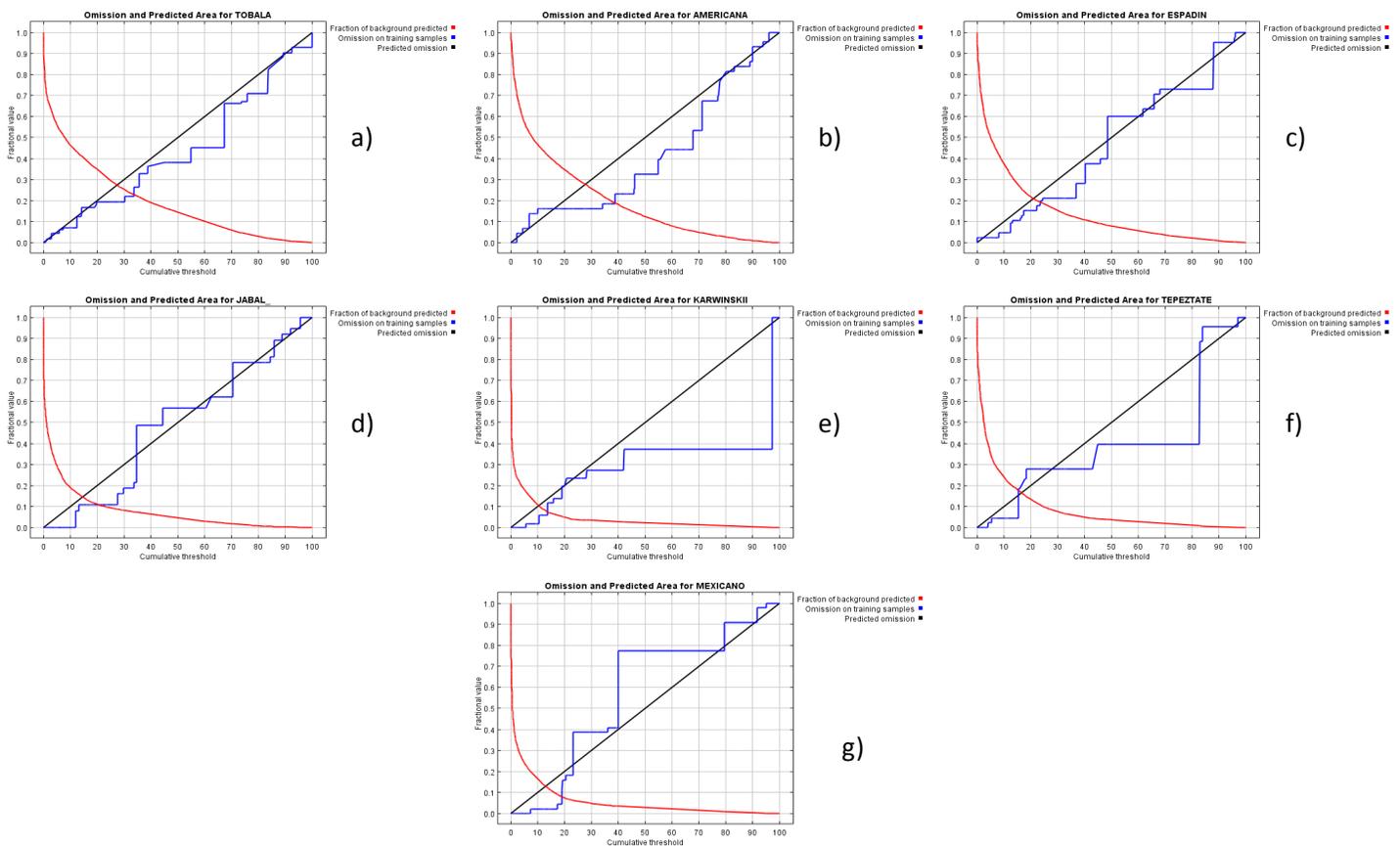


Figura 25. Gráficos de omisión y área predicha. a) *A. patorum*, b) *A. americana*, c) *A. angustifolia*, d) *A. convallis*, e) *A. karwinskii*, f) *A. marmorata*, g) *A. rhodacantha*

Para todas las especies, la línea azul de omisión de sitios de entrenamiento presenta cercanía a la línea predicha, también se rechaza un sobreajuste, ya que la curva no se ajusta de forma perfecta a la línea predicha, este es un primer indicador del buen ajuste del modelo para esta especie.

- **Curva AUC**

Un parámetro utilizado para evaluar la capacidad de predecir de los modelos generados por Maxent es el Área debajo de la curva (AUC). La fracción del área predicha (Fractional predicted area) en el eje-x se refiere a la fracción del área total de estudio donde se está modelando la especie, mientras que la sensibilidad (Sensitivity) en el eje "y" se refiere a la proporción de puntos de presencia dentro del área de ocurrencia predicha en relación con el número total de puntos de presencia (Phillips *et al.*, 2009). El AUC es equivalente a la probabilidad de que un punto de presencia seleccionado al azar esté ubicado en una celda del raster con un valor de probabilidad mayor para la ocurrencia de la especie que un punto de ausencia seleccionado al azar. La modelación de la distribución de especies en maxent incluye solamente puntos de presencia, para poder calcular el AUC, Maxent reemplaza los puntos de ausencia con puntos del área de estudio generados aleatoriamente. El AUC se puede entonces interpretar como la mayor probabilidad de que un punto de presencia seleccionado aleatoriamente esté ubicado en una celda del raster con un alto valor de probabilidad para la presencia de la especie que un punto generado aleatoriamente (Phillips *et al.* 2006). La mayor capacidad de predecir de un modelo generado por Maxent se alcanza cuando el AUC tiene un valor de 1. En la práctica, ningún AUC será inferior a 0.5. En este caso, las celdas del raster en las que están ubicados los puntos de presencia no tienen valores de probabilidad mayores que las celdas del raster donde están ubicados los puntos generados aleatoriamente y el modelo generado por Maxent no tiene ninguna capacidad de predecir. Esta situación se refleja en el gráfico en la línea de referencia Random Prediction. Araújo *et al.* (2005) recomiendan la siguiente interpretación del AUC para los modelos generados:

- Excelente si el $AUC > 0.90$;
- Buena si $0.80 > AUC < 0.90$;
- Aceptable si $0.70 > AUC < 0.80$;
- Mala si $0.60 > AUC < 0.70$;
- No válida si $0.50 > AUC < 0.60$.

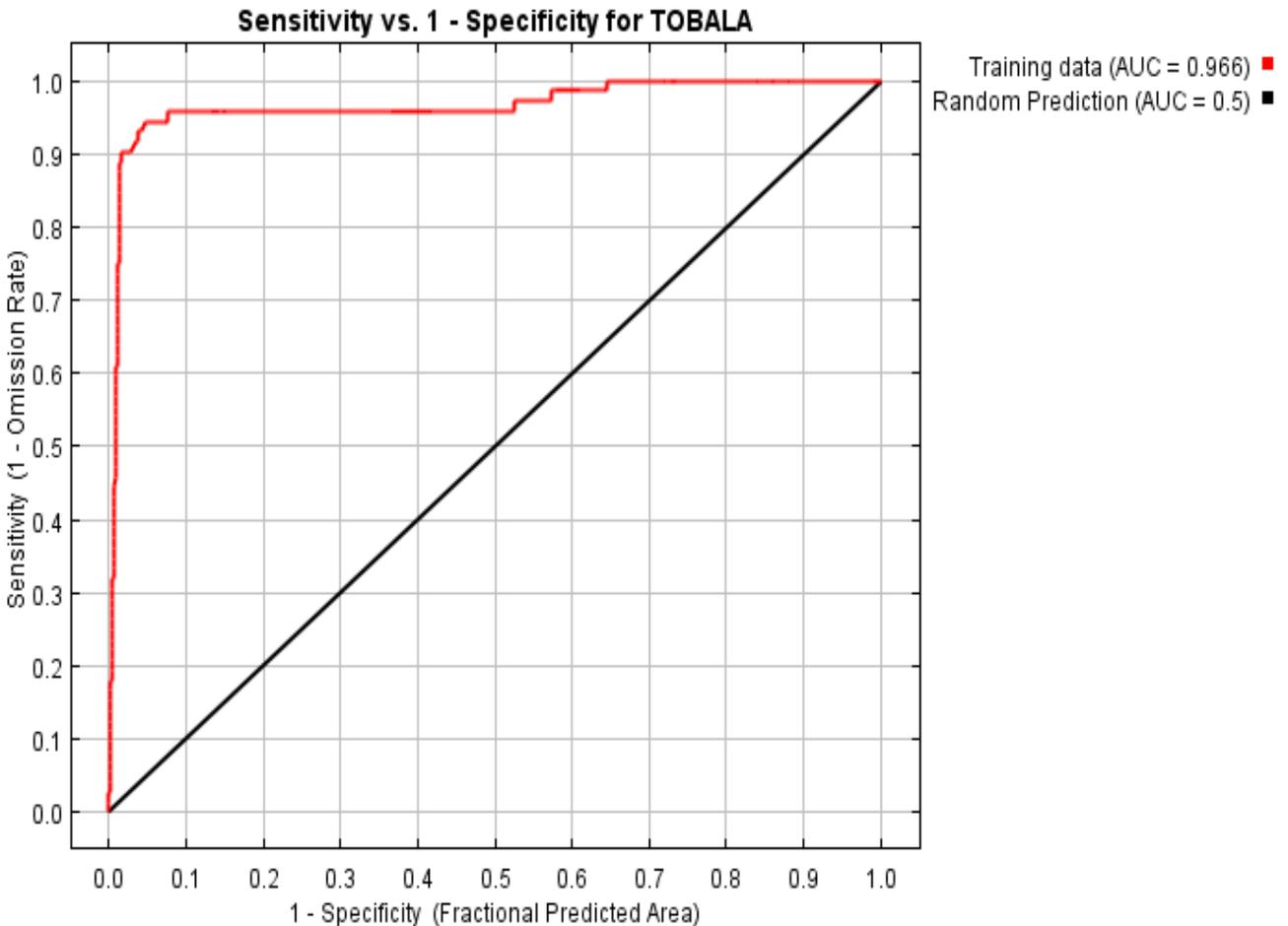


Figura 26. Curva AUC para *Agave potatorum*

En el caso de este análisis, el AUC es 0.966, por lo que se consider aun excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la linea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 26 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en una buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave potatorum* y las variables contrastadas.

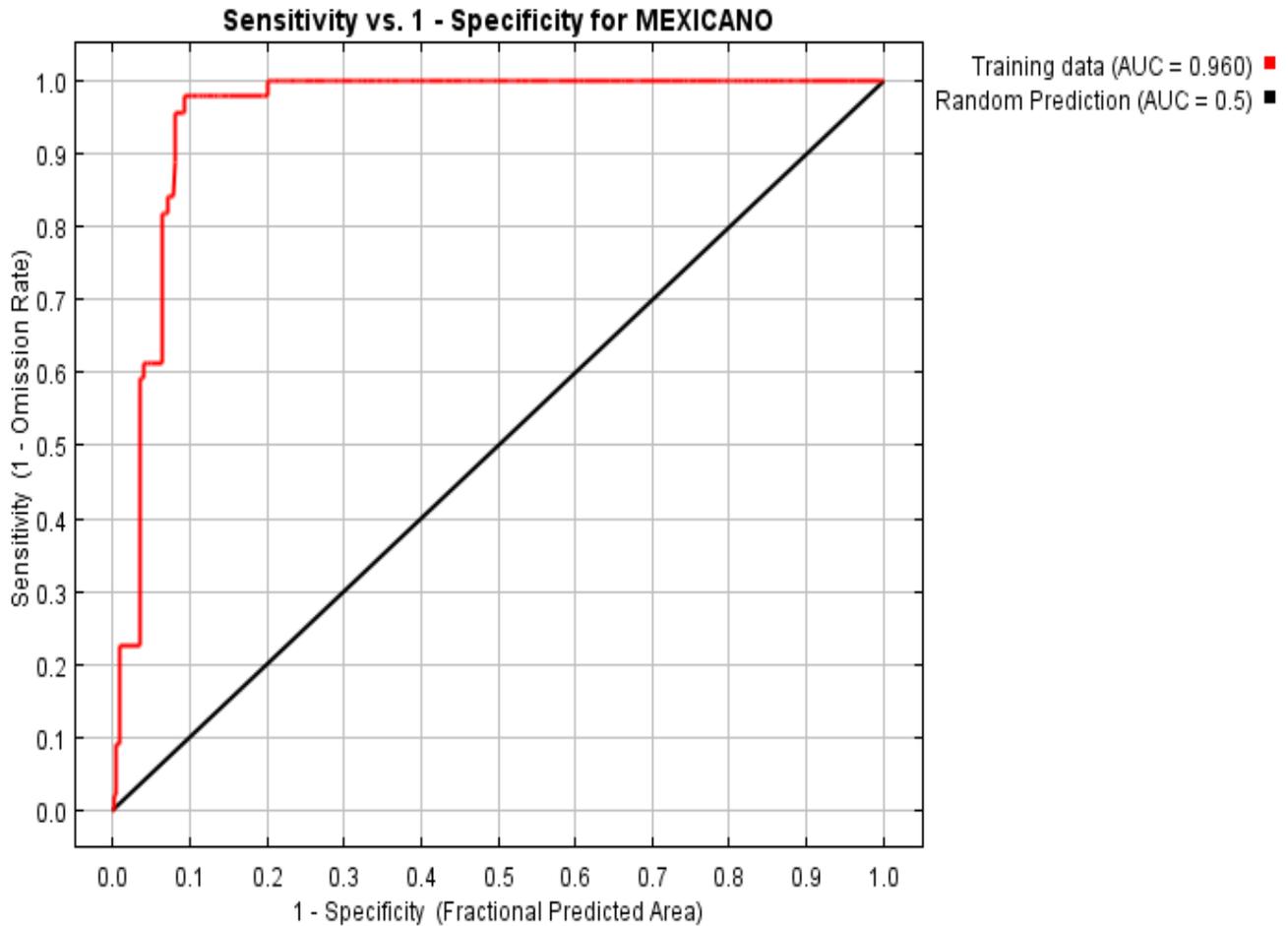


Figura 27. Curva AUC para *Agave rhodacantha*

En el caso de *A. rhodacantha*, el AUC es 0.960, por lo que se consideró un excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 27 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en un buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *A. rhodacantha* y las variables contrastadas.

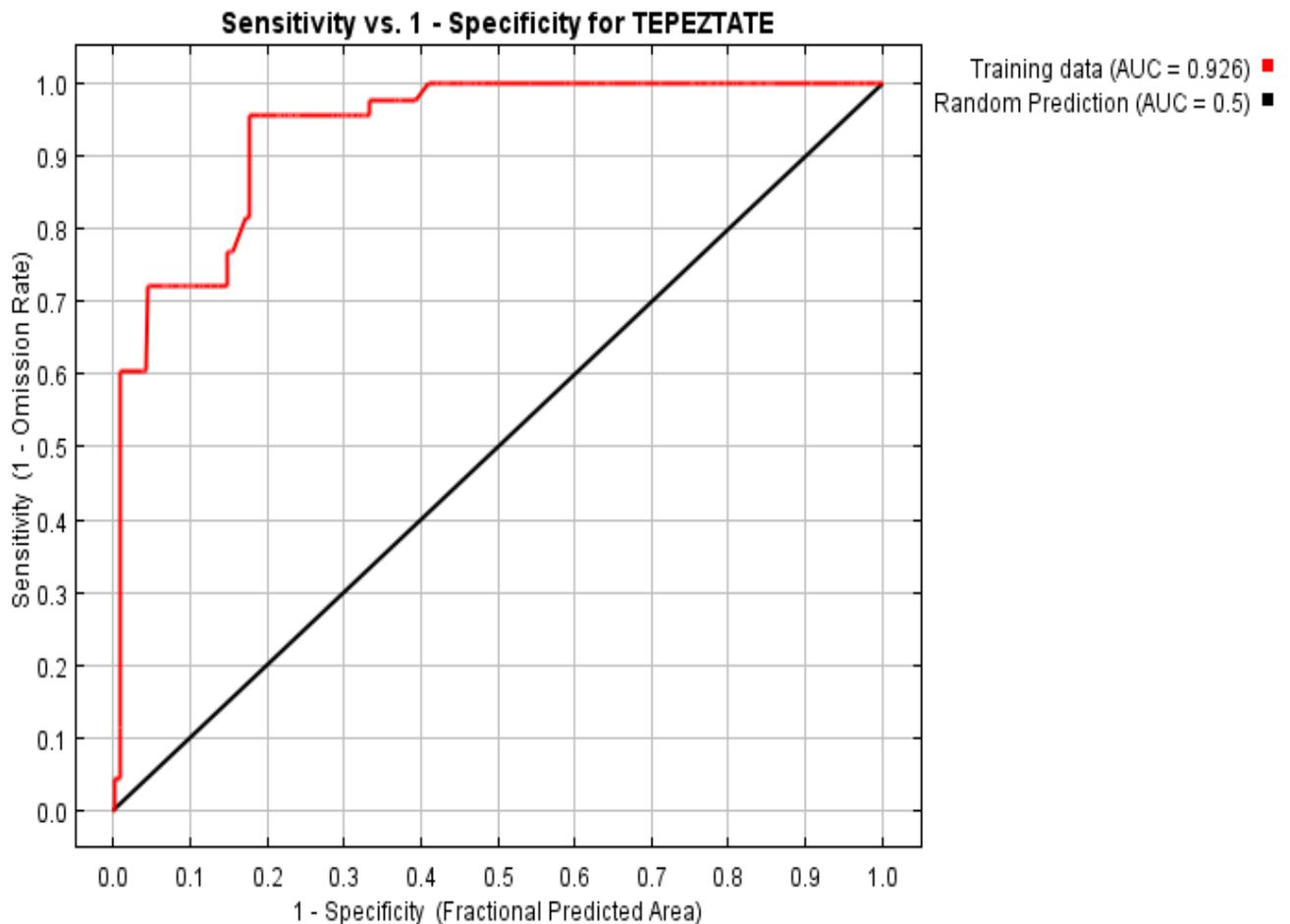


Figura 28. Curva AUC para *Agave marmorata*

En el caso de *A. marmorata*, el AUC es 0.926, por lo que se considera un excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 28 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en un buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave marmorata* y las variables contrastadas.

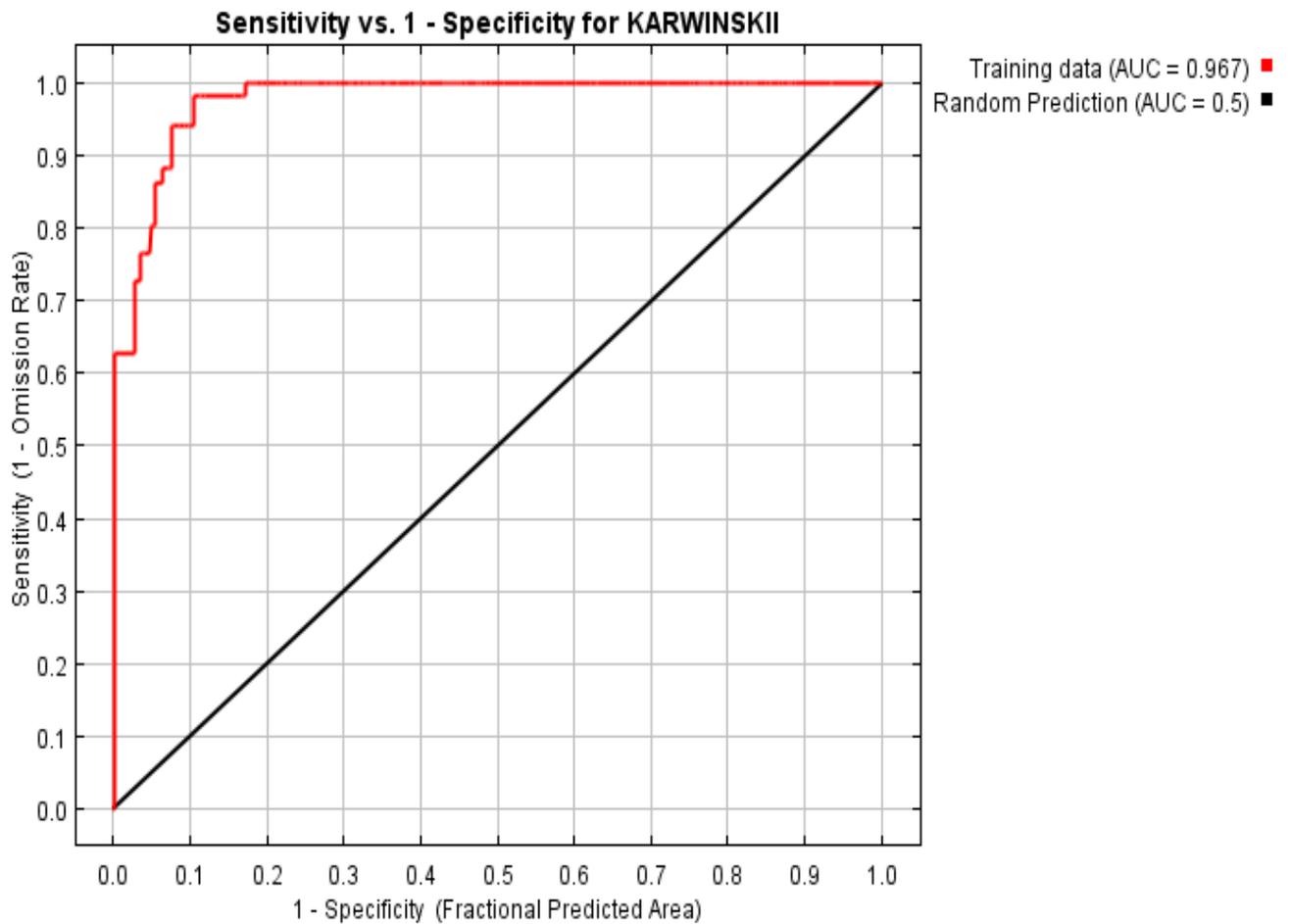


Figura 29. Curva AUC para *Agave karwinskii*

En el caso de *A. karwinskii*, el AUC es 0.967, por lo que se considera un excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 29 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en un buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave karwinskii* y las variables contrastadas.

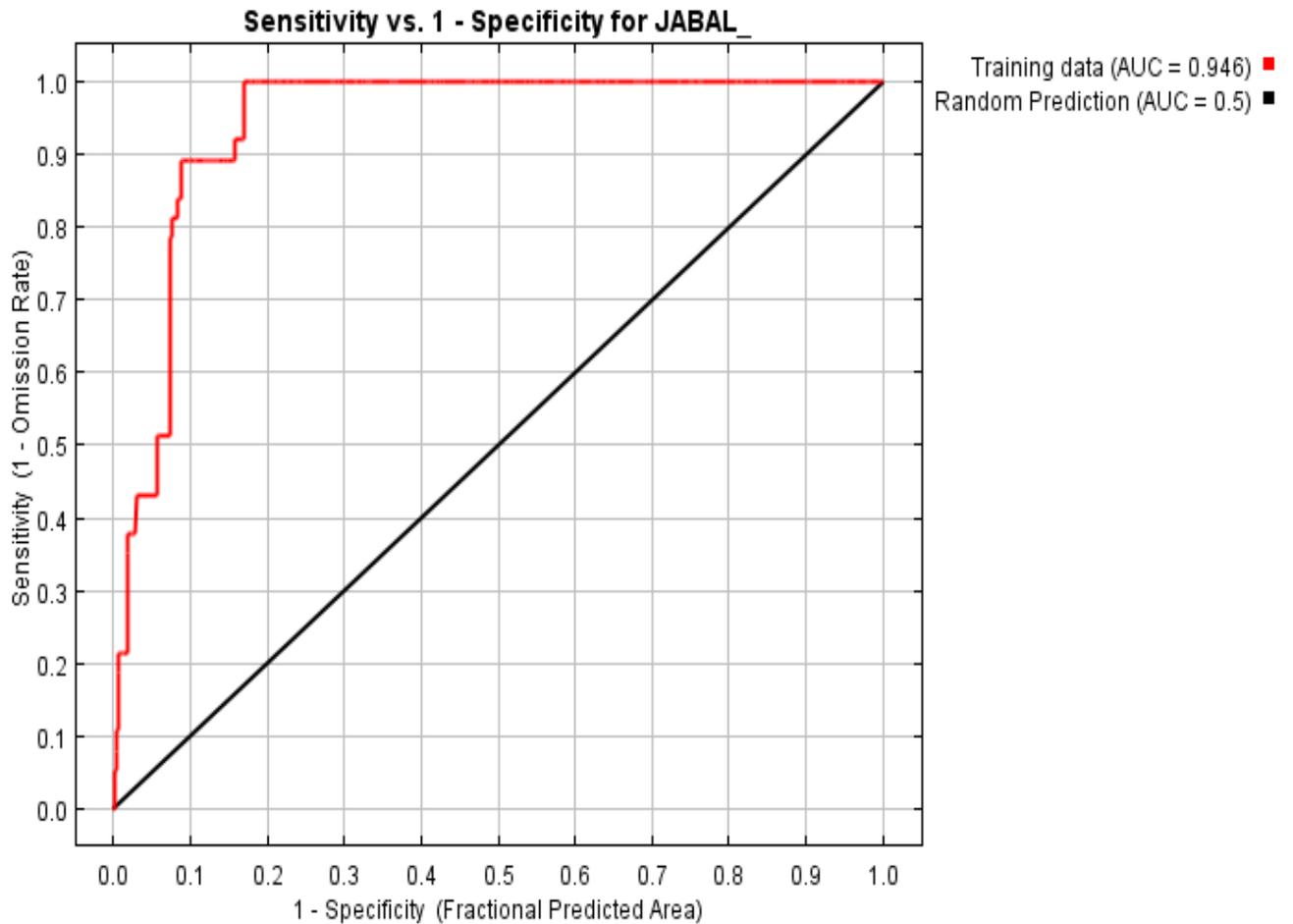


Figura 30. Curva AUC para *Agave convallis*

En el caso de *A. convallis*, el AUC es 0.967, por lo que se considera aun excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 30 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en una buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave convallis* y las variables contrastadas.

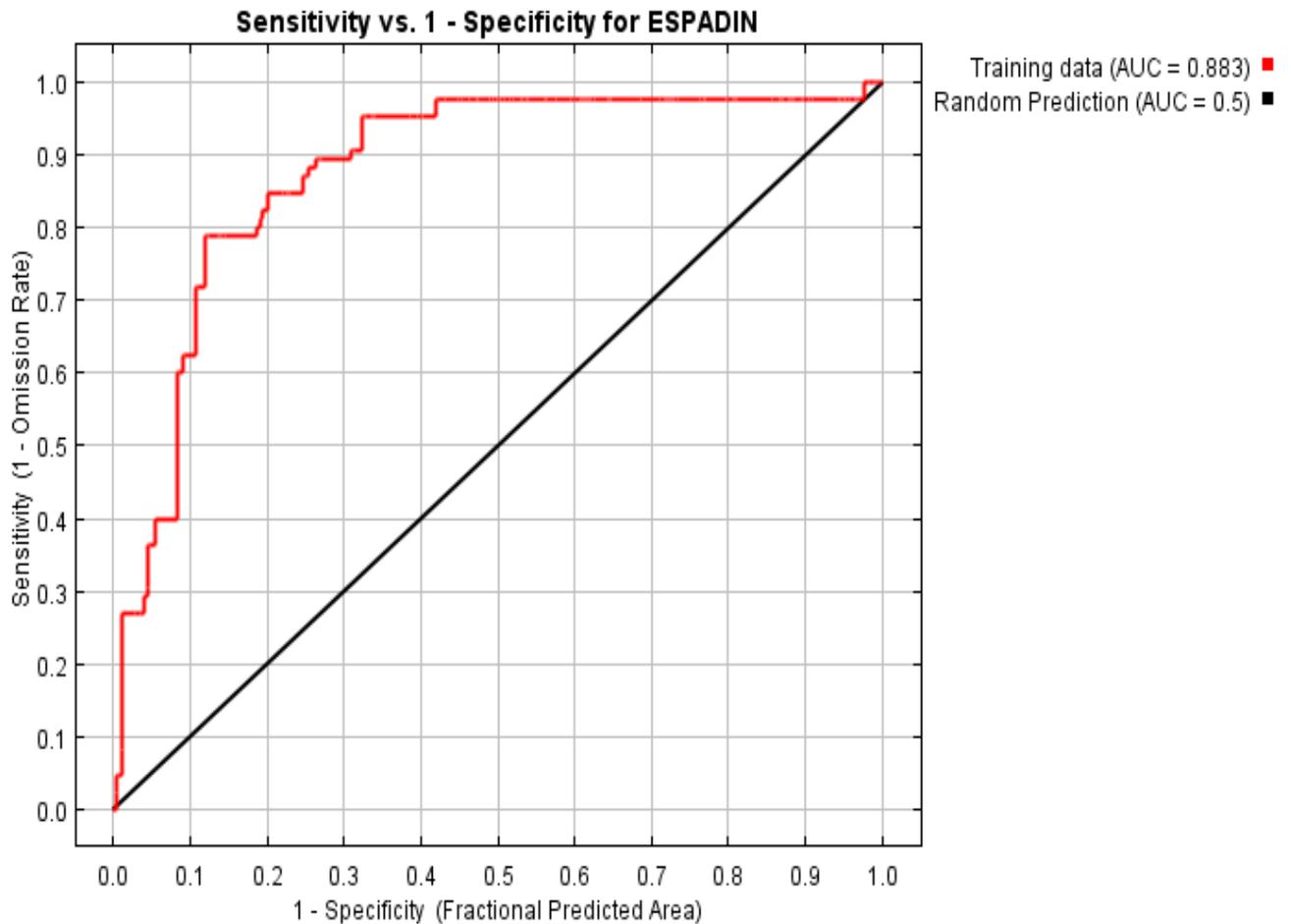


Figura 31. Curva AUC para *Agave angustifolia*

En el caso de *A. angustifolia*, el AUC es 0.883, por lo que se considera un excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 31 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en un buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave angustifolia* y las variables contrastadas.

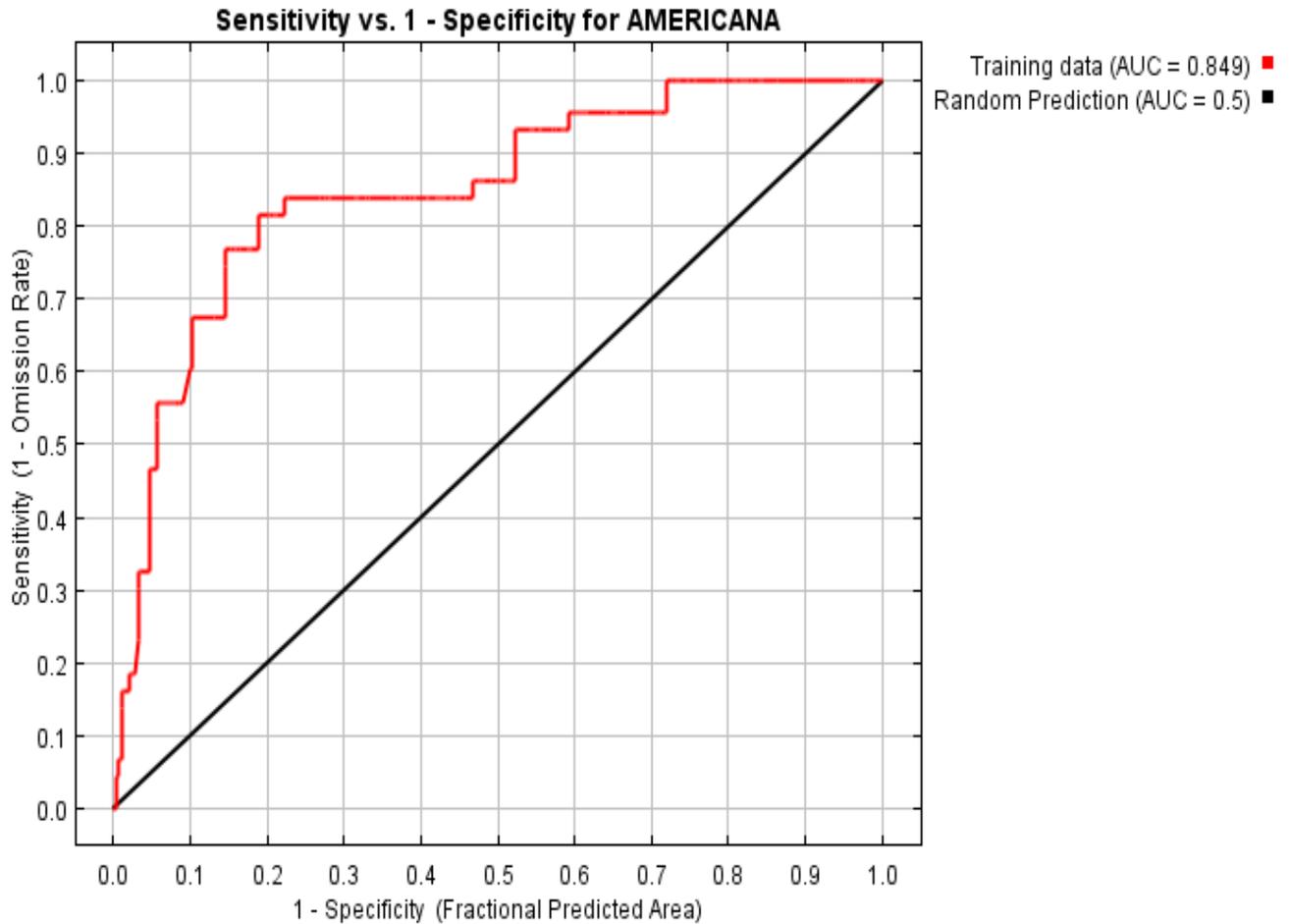


Figura 32. Curva AUC para *Agave americana*

En el caso de *A. americana*, el AUC es 0.967, por lo que se considera un excelente ajuste. Finalmente se termina de validar el modelo analizando la gráfica AUC, donde se espera que la distribución de la especie genere una curva AUC que siga el lado izquierdo hasta lo alto del gráfico, mientras que una distribución que se acerque a la línea predicha tendrá un menor ajuste. En la figura 32 se aprecia visualmente como el modelo tiene una amplia área bajo la curva (AUC), por lo que se puede confiar en un buen ajuste del modelo MAXENT para la especie *Agave americana* y las variables contrastadas. En las figuras 33, 34, 35, 36, 37 y 38, se muestran los mapas de distribución elaborados con los resultados del algoritmo Maxent, mostrando en porcentajes la probabilidad de distribución de las especies de agave modeladas por máxima entropía.

3.3.2.3. Mapa de distribución potencial para *Agave potatorum*

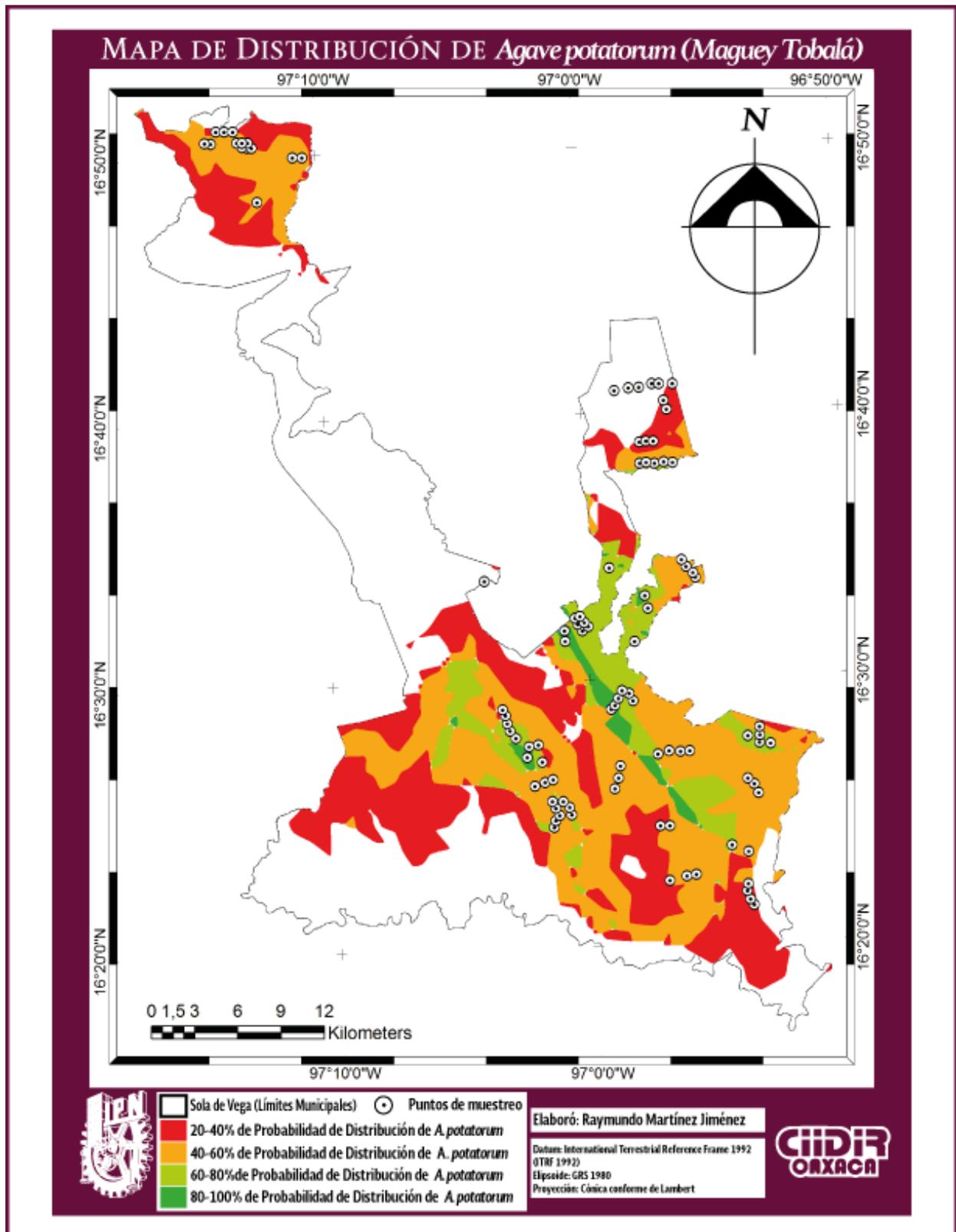


Figura 33. Mapa de distribución de *Agave potatorum*

3.3.2.4. Mapa de distribución potencial para *Agave rhodacantha*

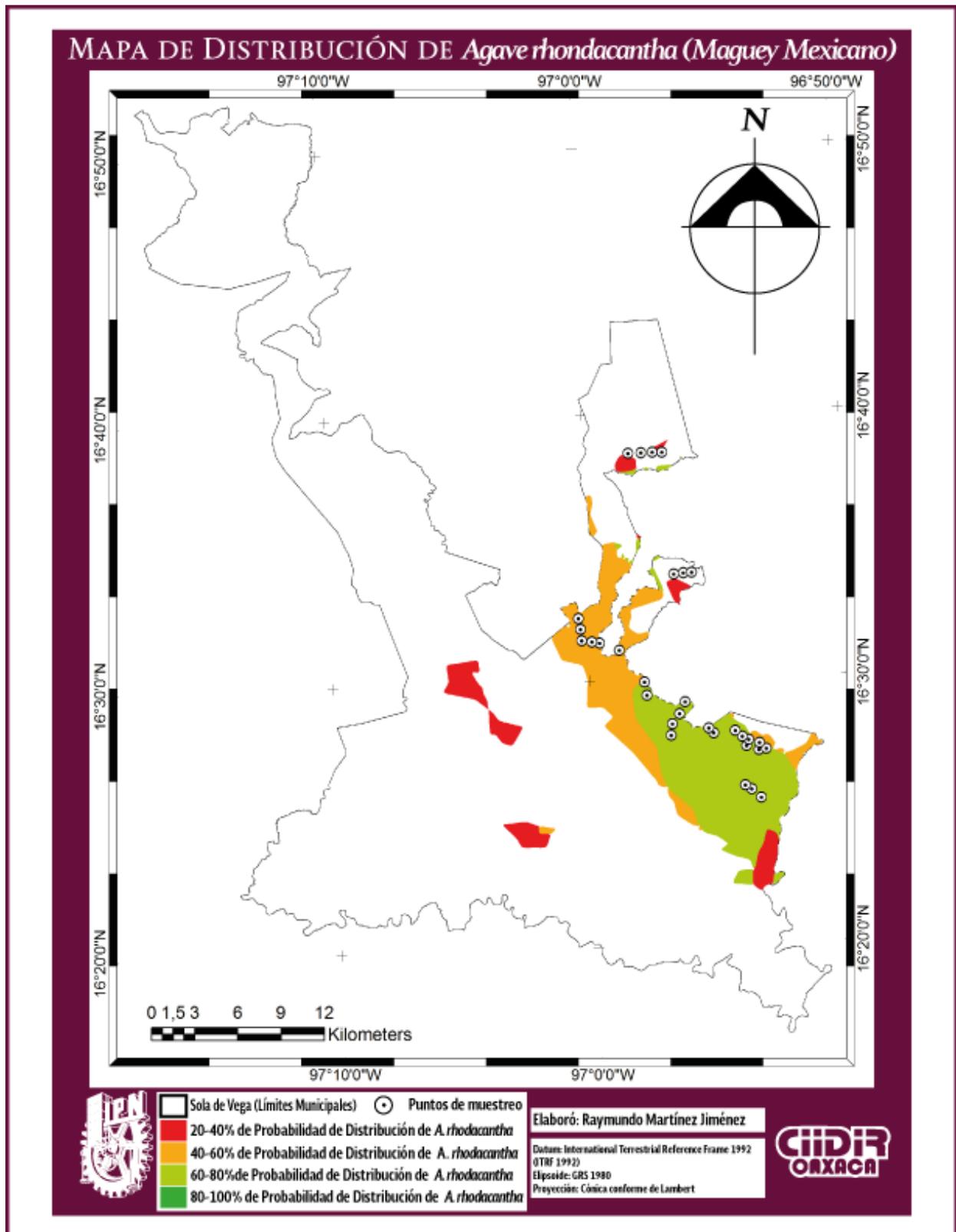


Figura 34. Mapa de distribución de *Agave rhodacantha*

3.3.2.5. Mapa de distribución potencial para *Agave marmorata*

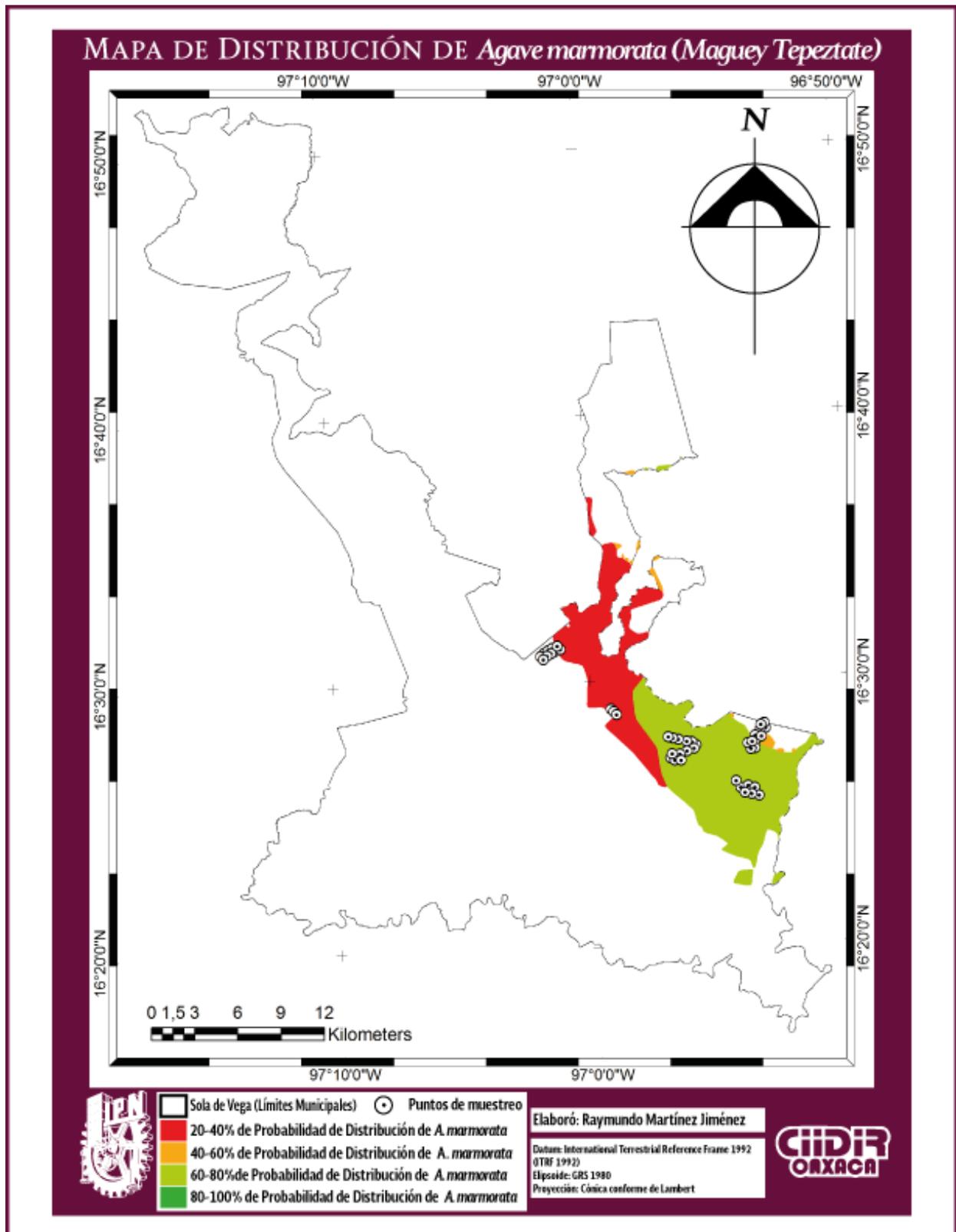


Figura 35. Mapa de distribución de *Agave marmorata*

3.3.2.6. Mapa de distribución potencial para *Agave karwinskii*

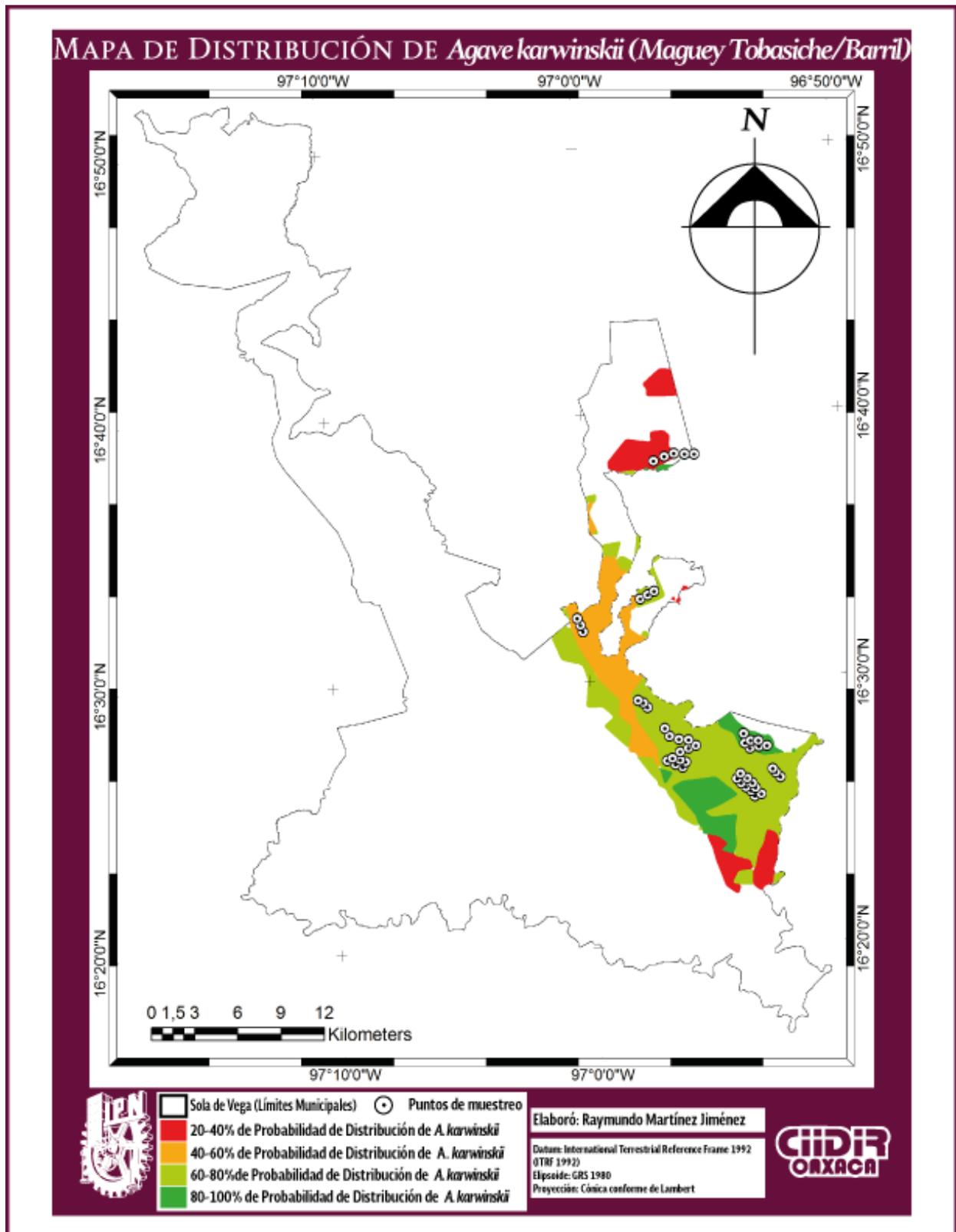


Figura 36. Mapa de distribución de *Agave karwinskii*

3.3.2.7. Mapa de distribución potencial para *Agave convallis*

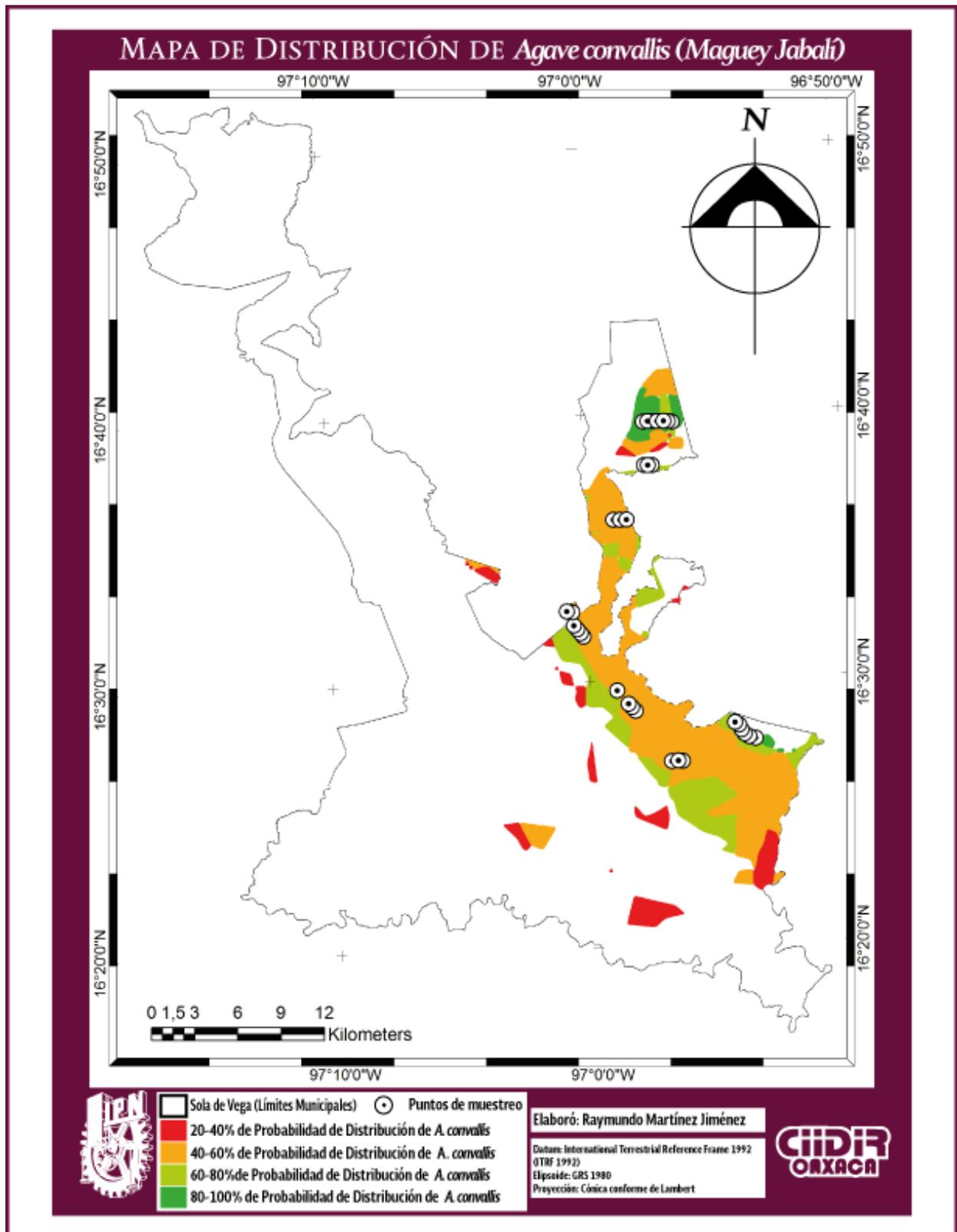


Figura 37. Mapa de distribución de *Agave convallis*

3.3.2.8. Mapa de distribución potencial para *Agave angustifolia*

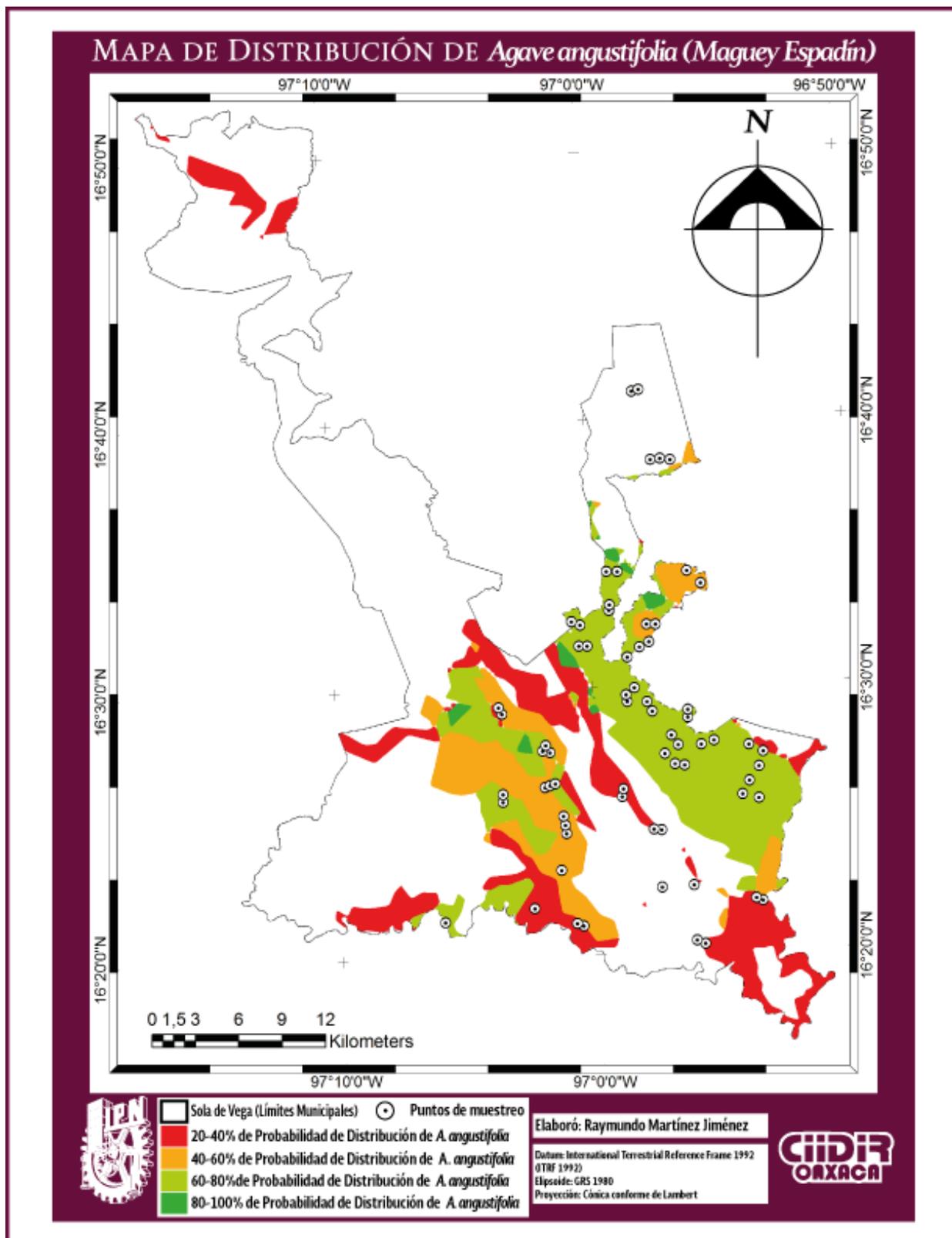


Figura 38. Mapa de distribución de *Agave angustifolia*

3.3.2.9. Mapa de distribución potencial para *Agave americana*

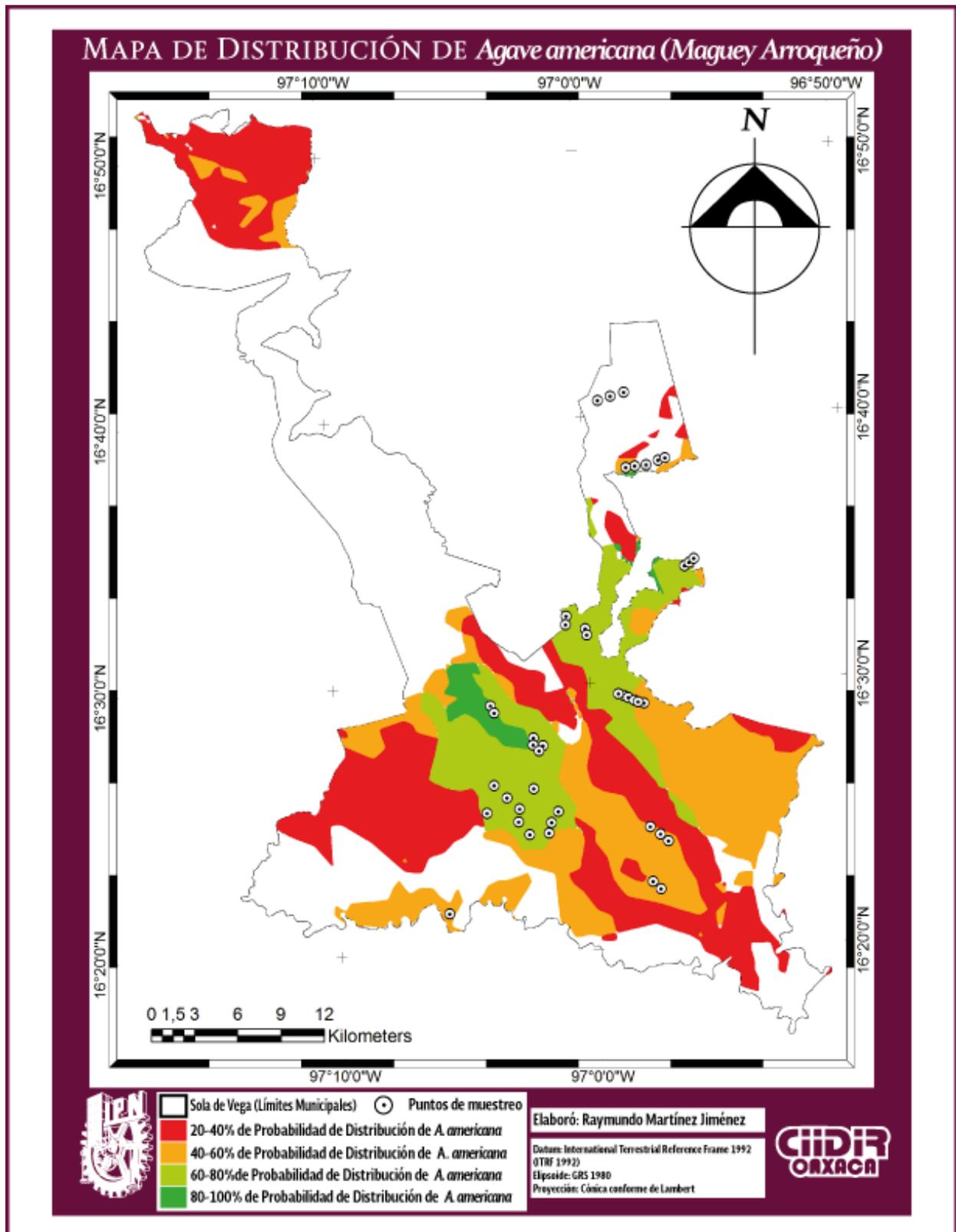


Figura 39. Mapa de distribución de *Agave americana*

3.3.2.10. Mapa de distribución de especies de agaves empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega

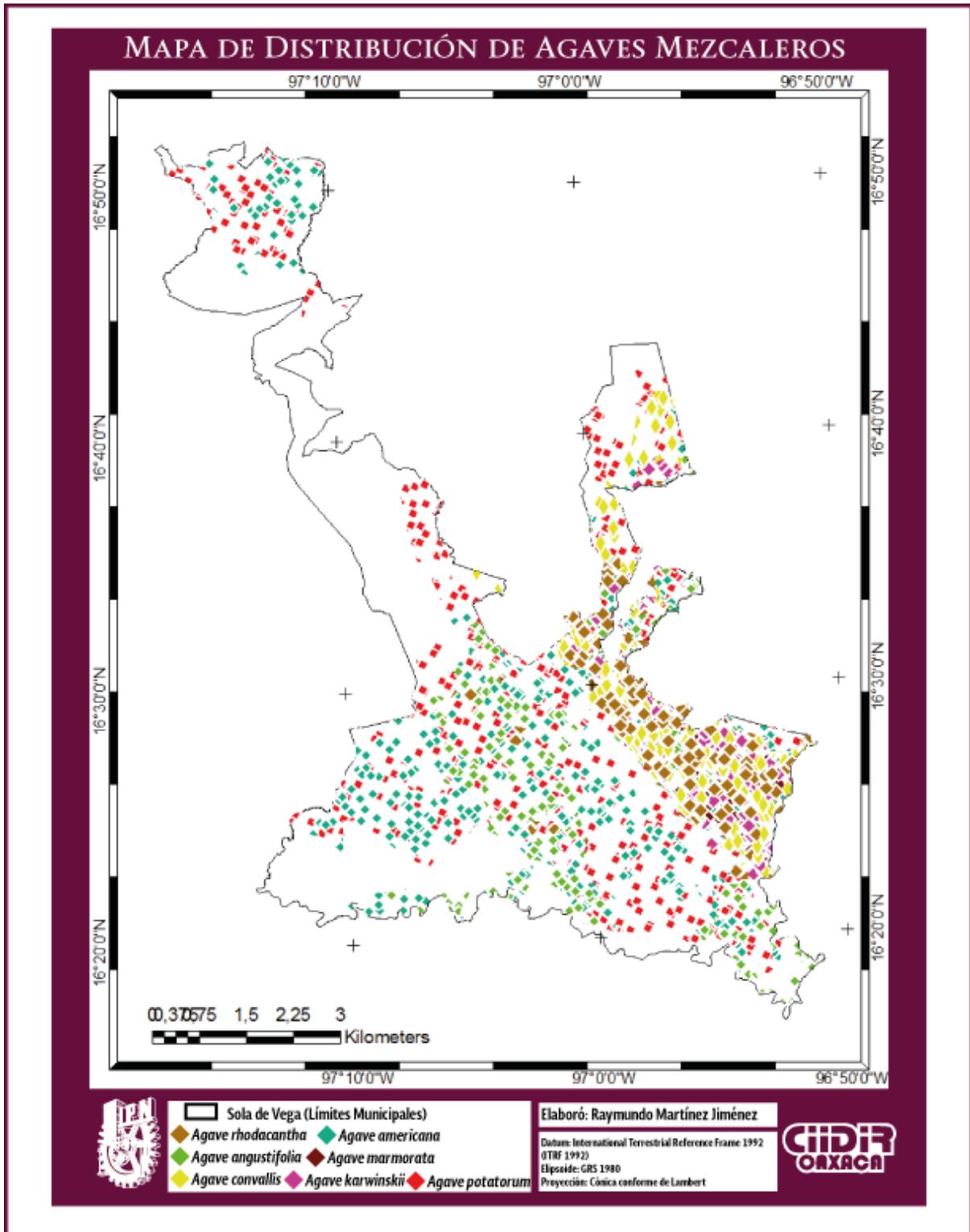


Figura 40. Mapa de distribución de agaves mezcateros

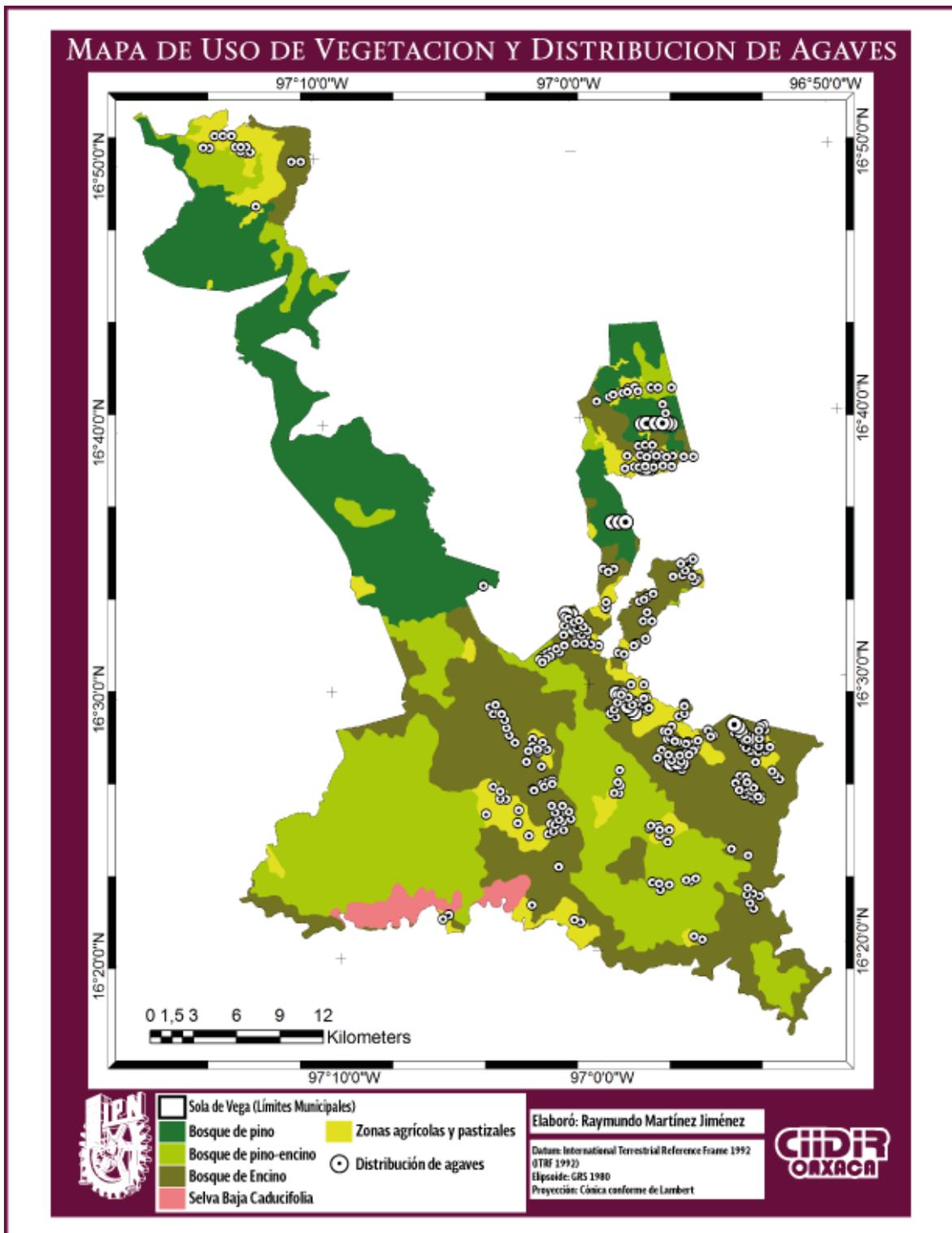


Figura 41. Vegetación de Sola de Vega, contrastada con distribución real de agaves

Con los mapas de distribución potencial elaborados para las especies *Agave potatorum*, *A. rhodacantha*, *A. marmorata*, *A. karwinskii*, *A. convallis*, *A. angustifolia* y *A. americana* se elaboraron el mapa de distribución de agaves silvestres en Sola de Vega (Figura 40) y el mapa de Uso de Vegetación y Distribución de Agaves(Figura 41)

Cuadro 20. Área de distribución de agaves mezcaleros en el municipio de Villa Sola de Vega

Espece	Extensión km2	% Municipio
<i>Agave americana</i>	581.39	59.51%
<i>Agave potatorum</i>	580.83	59.45%
<i>Agave angustifolia</i>	365.54	37.41%
<i>Agave convallis</i>	175.81	17.99%
<i>Agave karwinskii</i>	173.2	17.73%
<i>Agave rhodacantha</i>	143.95	14.73%
<i>Agave marmorata</i>	127.5	13.05%

En la figura 40 y cuadro 20, se detalla la extensión que cubre la distribución de cada una de las especies analizadas con Maxent, así mismo se enmarca el porcentaje que esta distribución representa del total del municipio. *A. americana* y *A. potatorum*, fueron las especies con el área de distribución más amplia. Las especies *A. rhodacantha* y *A. marmorata*, tuvieron un área de incidencia más restringida. *A. karwinskii* y *A. rhodacantha*, tuvieron similitud en el área de distribución. En la figura 41, se aprecia visualmente el tipo de vegetación en el que predominan los agaves, siendo los bosques de encino y encino-pino, los que mayor área de hábitat presentan para los agaves.

3.4. Reproducción por semilla de agaves empeados en la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega

Se construyó un vivero experimental (Figura 42) de 5 X 15 m, en forma de casa sombra a dos aguas, se colocó en su interior una platabanda de 1.50 X 10 m, a una altura de 80 cm, sobre la platabanda se colocaron 32 charolas de unicel de

200 cavidades. Los tratamientos se establecieron el 04 de marzo de 2016 y se efectuó el riego diario para mantener la humedad constante, durante los 50 días del monitoreo.

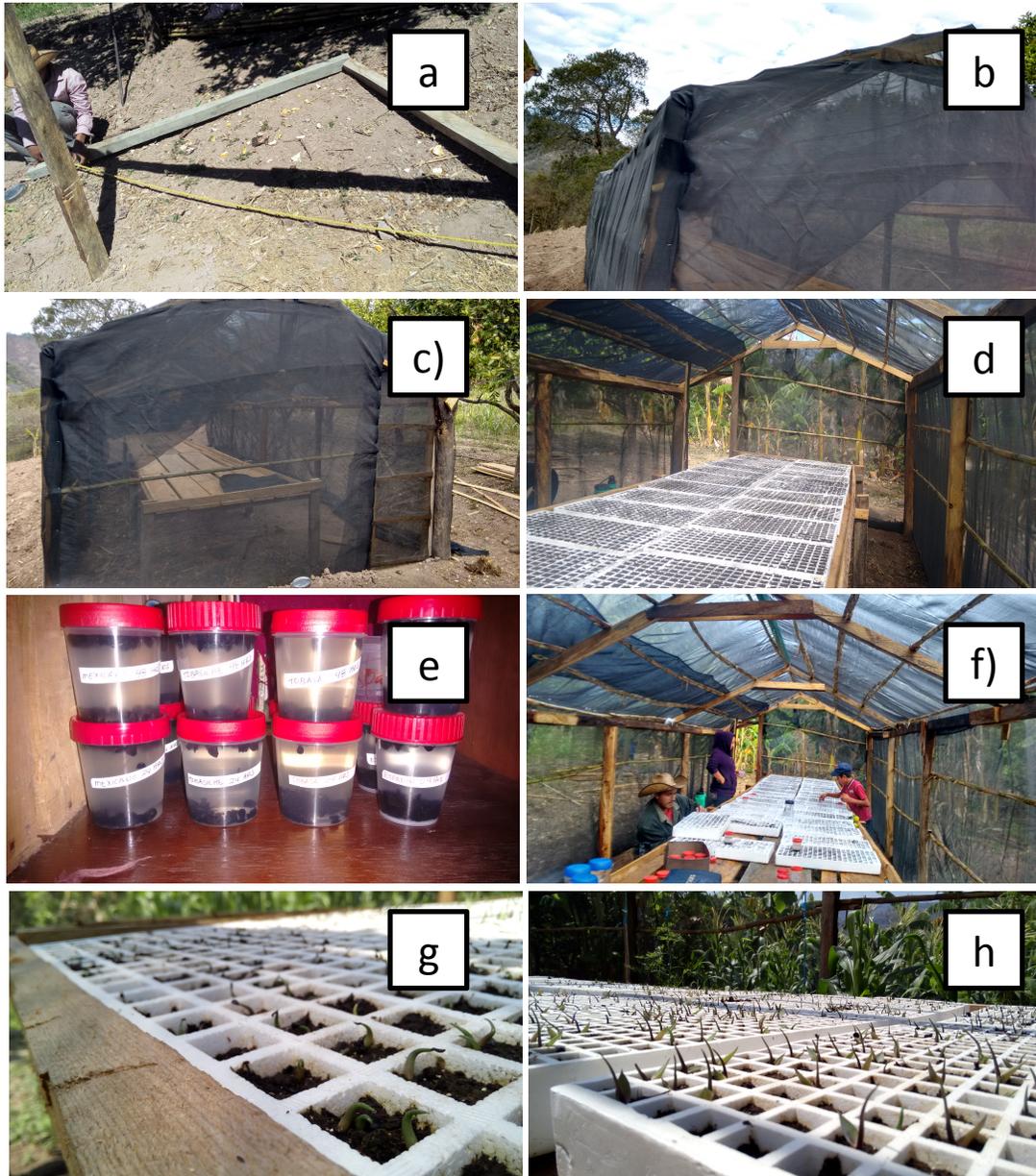


Figura 42. Instalación de semillero experimental tipo casa sombra, con charolas de germinación. a) Construcción y nivelación de casa sombra b) Colocación de malla sombra c) Vista exterior casa sombra terminada d) Instalación de platabanda y preparación de charolas e) Preparación de tratamientos pregerminativos (Imbibición) f) Siembra de semilla g) Monitoreo inicio de germinación h) monitoreo fin de germinación.

Cuadro 21. Porcentaje de germinación de tratamientos y repeticiones

Factor 1. Imbibición en Agua	Factor 2. Especie a germinar			
	Agave potatorum	Agave angustifolia	Agave karwinskii	Agave rhodacantha
0 hr	46.00%	37.00%	23.00%	52.00%
	47.00%	25.00%	22.00%	44.00%
	44.00%	38.00%	26.00%	42.00%
	44.00%	24.00%	25.00%	29.00%
12 hr	66.00%	39.00%	33.00%	48.00%
	59.00%	37.00%	25.00%	54.00%
	62.00%	41.00%	27.00%	59.00%
	74.00%	37.00%	24.00%	41.00%
24 hr	85.00%	52.00%	44.00%	58.00%
	85.00%	51.00%	41.00%	50.00%
	84.00%	56.00%	47.00%	51.00%
	83.00%	51.00%	46.00%	58.00%
48 hr	79.00%	58.00%	33.00%	58.00%
	74.00%	51.00%	41.00%	48.00%
	65.00%	65.00%	45.00%	59.00%
	63.00%	57.00%	44.00%	54.00%

Cuadro 22. Porcentaje de germinación y promedios

Factor 1. Imbibición en Agua	Factor 2. Especie de agave				Promedio Niveles Factor 2
	Agave potatorum	Agave angustifolia	Agave karwinskii	Agave rhodacantha	
0 hr	45.25%	31.00%	24.00%	41.75%	35.50%
12 hr	65.25%	38.50%	27.25%	50.50%	45.38%
24 hr	84.25%	52.50%	44.50%	54.25%	58.88%
48 hr	70.25%	57.75%	40.75%	54.75%	55.88%
Promedio Niveles Factor 1	66.25%	44.94%	34.13%	50.31%	

El cuadro 21 muestra los resultados del porcentaje de germinación de cada una de las cuatro repeticiones en cada tratamiento, a su vez el cuadro 22, muestra la media de los tratamientos experimentados y la media de cada uno de los niveles de los factores imbibición en agua (0 hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr) y especie de Agave (*Agave potatorum*, *Agave rhodacantha*, *Agave angustifolia* y *Agave karwinskii*). A primera vista se distingue una mejor respuesta a la germinación de la especie *Agave potatorum* y de los niveles de imbibición en agua por 24 y 48 horas.

Cuadro 23. Anova diseño factorial

ORIGEN DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	MEDIAS DE CUADRADOS	F CALCULADA	Ftablas (GLT,GLE)	Criterio de Decisión
TRATAMIENTO IMBIBICIÓN	3	2721.09	907.03	28.71	5.18	Rechazo Ho
TRATAMIENTO ESPECIE	3	4296.16	1432.05	45.32	5.18	Rechazo Ho
INTERACCIÓN	9	576.72	64.08	2.03	2.28	
ERROR	8	252.75	31.59	Valor P: <0.		
TOTAL	23	7846.72	341.16			

Ho: La media del efecto de todos los tratamientos sobre la germinación es igual

Ha: Al menos la media de un tratamiento es diferente

Una vez culminado el monitoreo de los semilleros y capturado los datos de germinación se realizó el análisis de varianza del diseño factorial en el una hoja de cálculo del software Microsoft Excel para Mac 2010, mismo que se muestra en el Cuadro 23. El resultado del Anova fue que estadísticamente todos los tratamientos analizados tienen un efecto distinto en la germinación de las semillas y que el factor que tiene mayor influencia en el efecto de la germinación es la especie de agave empleada, por ello se procedió a analizar los datos en el software estadístico NCSS 2007 y realizaron las prueba **Fisher's LSD Multiple-Comparison Test**, y **Tukey-Kramer Multiple comparison Test** para comparar las medias de los tratamientos y encontrar cuales tienen diferencia estadística.

Fisher's LSD Multiple-Comparison Test

Response: Germinación

Term A: Especie

Alpha=0,050 Error Term=S(AB) DF=16 MSE=15,74219 Critical Value=2,1199

Group	Count	Mean	Different From Groups
A. karwinskii	8	34,125	A. angustifolia, A. rhodacantha A. potatorum
A. angustifolia	8	44,875	A. karwinskii, A. rhodacantha A. potatorum
A. rhodacantha	8	50,313	A. karwinskii, A. angustifolia A. potatorum
A. potatorum	8	66,250	A. karwinskii, A. angustifolia A. rhodacantha

Figura 43. Resultado de la prueba de comparación de medias de Fischer LSD para el factor especie de agave

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Germinación

Term A: Especie

Alpha=0,050 Error Term=S(AB) DF=16 MSE=15,74219 Critical Value=4,0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
A. karwinskii	8	34,125	A. angustifolia, A. rhodacantha A. potatorum
A. angustifolia	8	44,875	A. karwinskii, A. potatorum
A. rhodacantha	8	50,313	A. karwinskii, A. potatorum
A. potatorum	8	66,250	A. karwinskii, A. angustifolia A. rhodacantha

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Figura 44. Resultado de la prueba de comparación de medias Tukey-Kramer para el factor especie de agave

Los resultados de los test de comparación de medias para la especie de agave, se muestran en las figuras 43 y 44. Ambos test coinciden en que para la especie de agave, el efecto de la germinación es distinto para cada especie, por lo que al comparar los valores de las medias se puede apreciar que *A. potatorum* y *A. rhodacantha* fueron las especies con mejores resultados, en ambos casos la semilla se colectó del medio silvestre, en el caso de *A. angustifolia* y *A. karwinskii*, los individuos de colecta se encontraban en parcelas de cultivo.

Fisher's LSD Multiple-Comparison Test

Response: Germinación

Term B: Remojo_Agua

Alpha=0,050 Error Term=S(AB) DF=16 MSE=15,74219 Critical Value=2,1199

Group	Count	Mean	Different From Groups
0 Hr	8	35,500	12 Hr, 48 Hr, 24 Hr
12 Hr	8	45,375	0 Hr, 48 Hr, 24 Hr
48 Hr	8	55,875	0 Hr, 12 Hr
24 Hr	8	58,813	0 Hr, 12 Hr

Figura 45. Resultado de la prueba de comparación de medias de Fischer LSD para el factor imbibición

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Germinación

Term B: Remojo_Agua

Alpha=0,050 Error Term=S(AB) DF=16 MSE=15,74219 Critical Value=4,0461

Group	Count	Mean	Different From Groups
0 Hr	8	35,500	12 Hr, 48 Hr, 24 Hr
12 Hr	8	45,375	0 Hr, 48 Hr, 24 Hr
48 Hr	8	55,875	0 Hr, 12 Hr
24 Hr	8	58,813	0 Hr, 12 Hr

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Figura 46. Resultado de la prueba de comparación de medias Tukey-Kramer para el factor imbibición

Los resultados de los test de comparación de medias para el factor tiempo de imbibición, se muestran en las figuras 46 y 46. Ambos test coinciden en que para el tiempo de imbibición, el efecto de la germinación es mayor en los tratamientos 24 hr y 48 hr, así mismo para estos niveles no existe diferencia estadísticamente significativa, la cual si existe con los niveles de imbibición de 0 hr y 12 hr. Se recomienda entonces aplicar como tratamiento pregerminativo para semillas de agave el remojo en agua previo a la siembra de 24 a 48 horas.

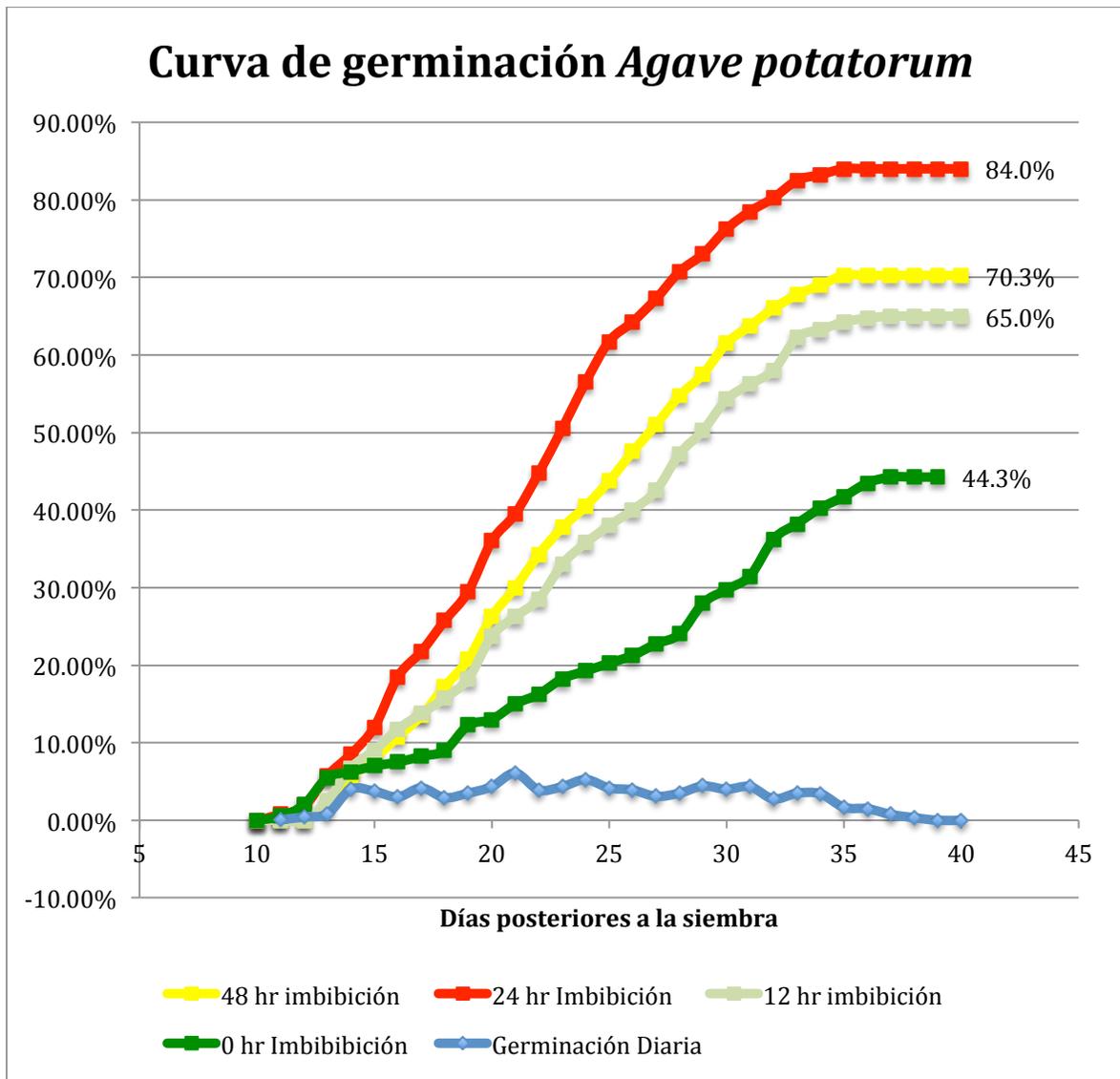


Figura 47. Curva de germinación acumulada para *Agave potatorum*

La figura 47, muestra el gráfico de la curva de germinación acumulada correspondiente a *A. potatorum* y a los cuatro niveles de imbibición en agua que fueron probados para la especie (0hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). Las pruebas de comparación de medias permiten concluir que los mejores tratamientos son la imbibición por 24 y 48 horas, este gráfico de manera visual nos permite ver que el remojo óptimo previo a la siembra de la semilla fue el de 24 horas, donde se alcanzó un 84% de germinación. La germinación inicia al día 11 y culmina el día 39. El máximo incremento de la germinación sucedió entre los días 15 y 35 posteriores a la siembra.

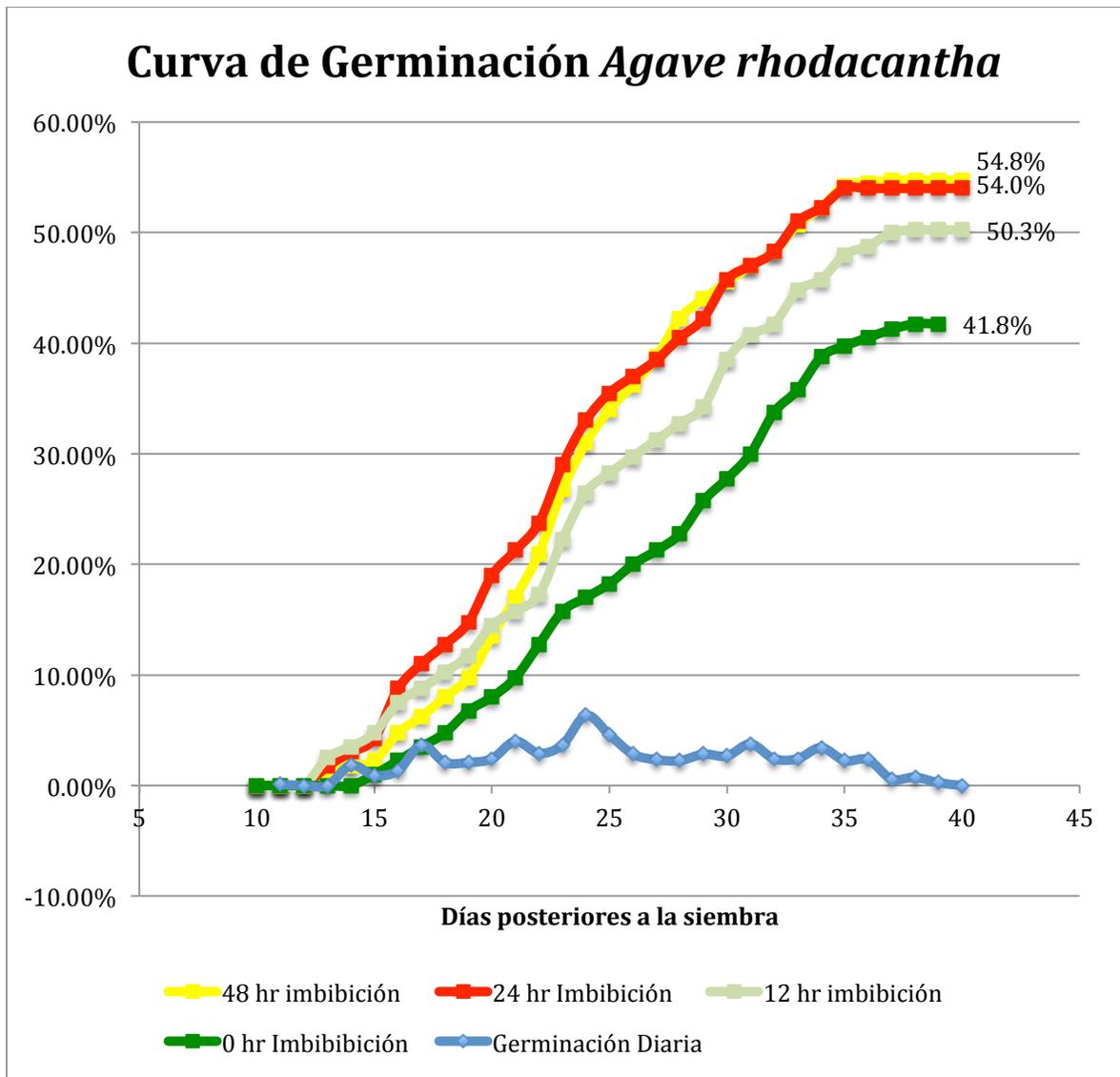


Figura 48. Curva de germinación acumulada para *Agave rhodacantha*

La figura 48, muestra el gráfico de la curva de germinación acumulada correspondiente a *Agave rhodacantha* y a los cuatro niveles de imbibición en agua que fueron probados para la especie (0hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). El gráfico de manera visual permite apreciar que el remojo óptimo previo a la siembra de la semilla puede ser de 24 o 48 horas, niveles donde se alcanzó un 54.8%(48 hr) y 54%(24 hr) de germinación. La germinación inicia al día 11 y culmina el día 39. El máximo incremento de la germinación sucedió entre los días 15 y 35 posteriores a la siembra.

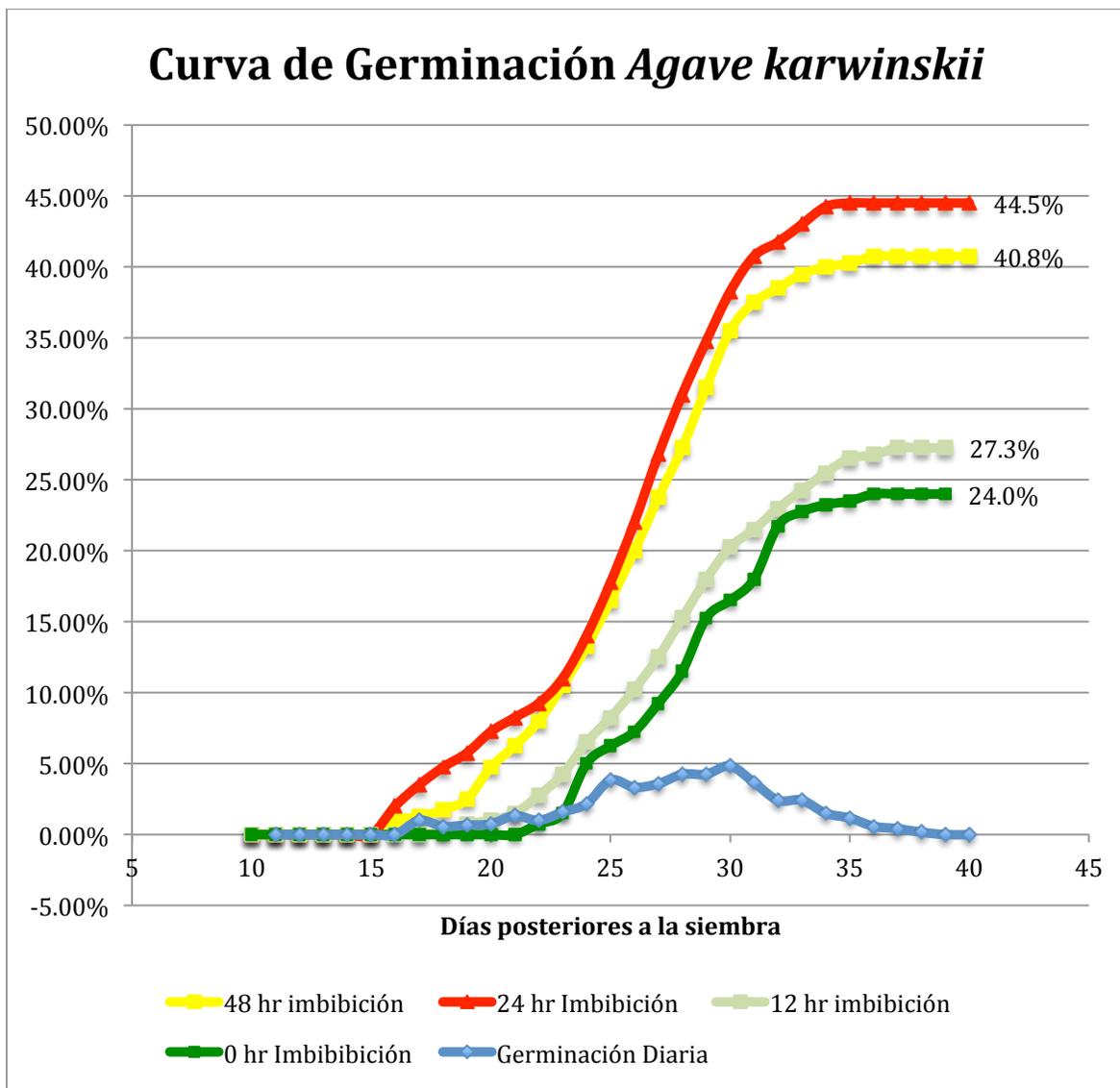


Figura 49. Curva de germinación para *Agave karwinskii*

La figura 49, muestra el gráfico de la curva de germinación acumulada correspondiente a *Agave karwinskii* y a los cuatro niveles de imbibición en agua que fueron probados para la especie (0hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). El gráfico de manera visual permite apreciar que el remojo óptimo previo a la siembra de la semilla puede ser de 24 o 48 horas, niveles donde se alcanzó un 44.5%(48 hr) y 40.8%(24 hr) de germinación. La germinación inicia al día 17 y culmina el día 39. El máximo incremento de la germinación sucedió entre los días 15 y 35 posteriores a la siembra.

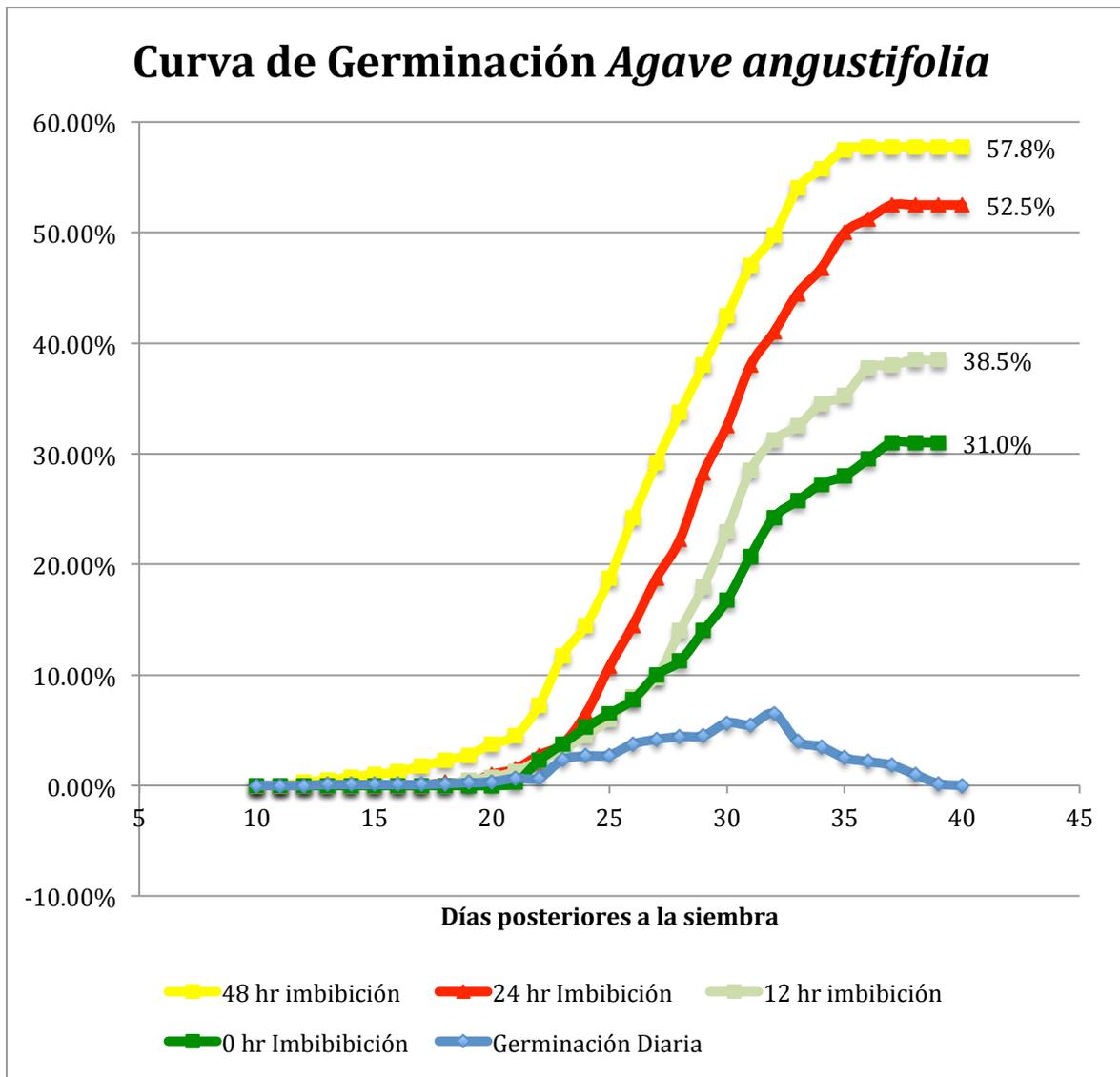


Figura 50. Curva de germinación acumulada para *Agave angustifolia*

La figura 50, muestra el gráfico de la curva de germinación acumulada correspondiente a *Agave angustifolia* y a los cuatro niveles de imbibición en agua que fueron probados para la especie (0hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). El gráfico de manera visual permite apreciar que el remojo óptimo previo a la siembra de la semilla puede ser de 24 o 48 horas, niveles donde se alcanzó un 57.8%(48 hr) y 52.5%(24 hr) de germinación. La germinación inicia al día 17 y culmina el día 39. El máximo incremento de la germinación sucedió entre los días 25 y 35 posteriores a la siembra.

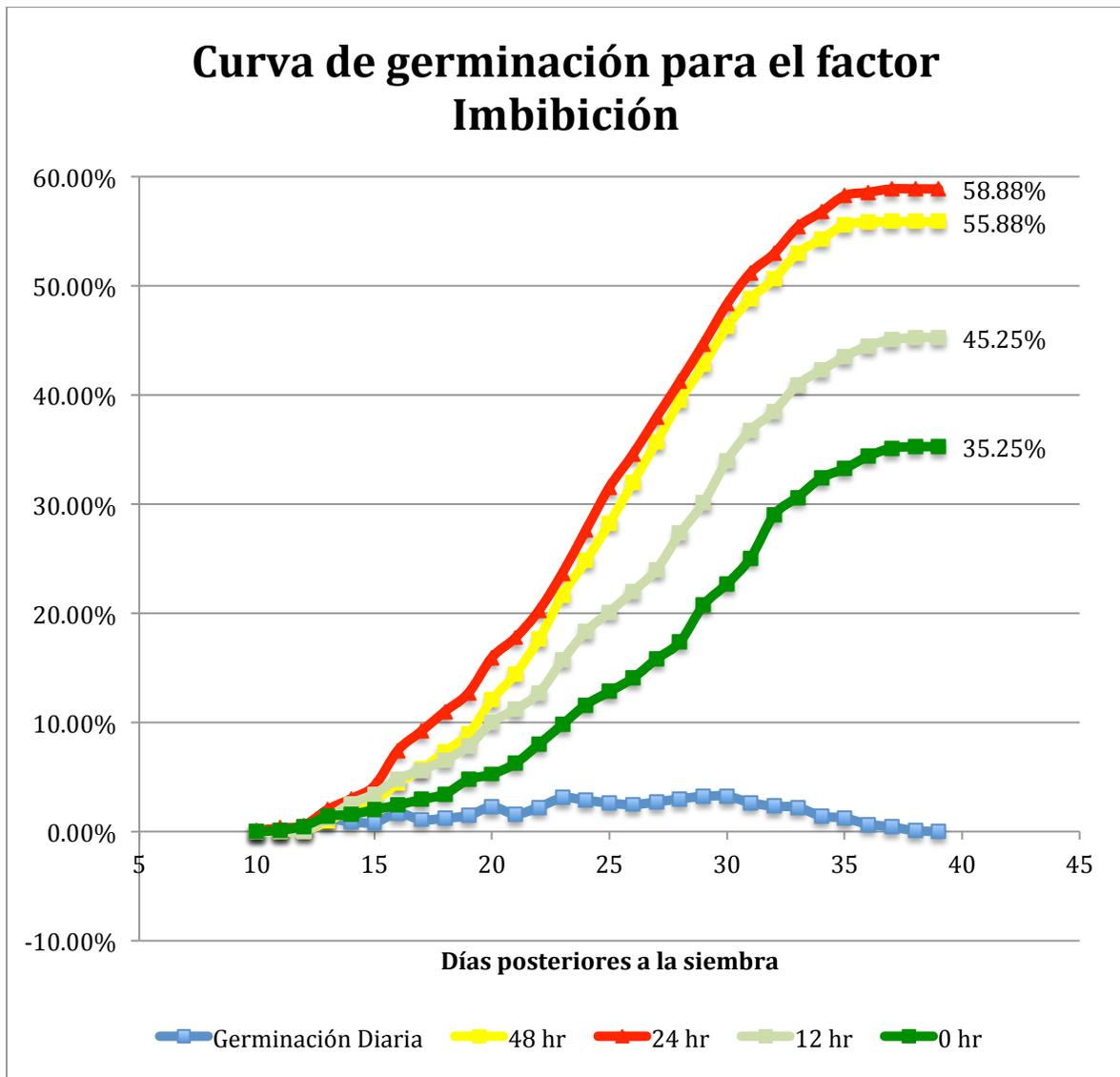


Figura 51. Curva de germinación acumulada para el factor imbibición

La figura 51, muestra el gráfico de la curva de germinación correspondiente a los cuatro niveles del factor imbibición en agua que fueron probados para las cuatro especies de agaves mezcaleros (0hr, 12 hr, 24 hr y 48 hr). El gráfico de manera visual permite apreciar que el remojo óptimo previo a la siembra de la semilla puede ser de 24 o 48 horas, niveles donde se alcanzó un 55.88%(48 hr) y 58.88%(24 hr) de germinación.

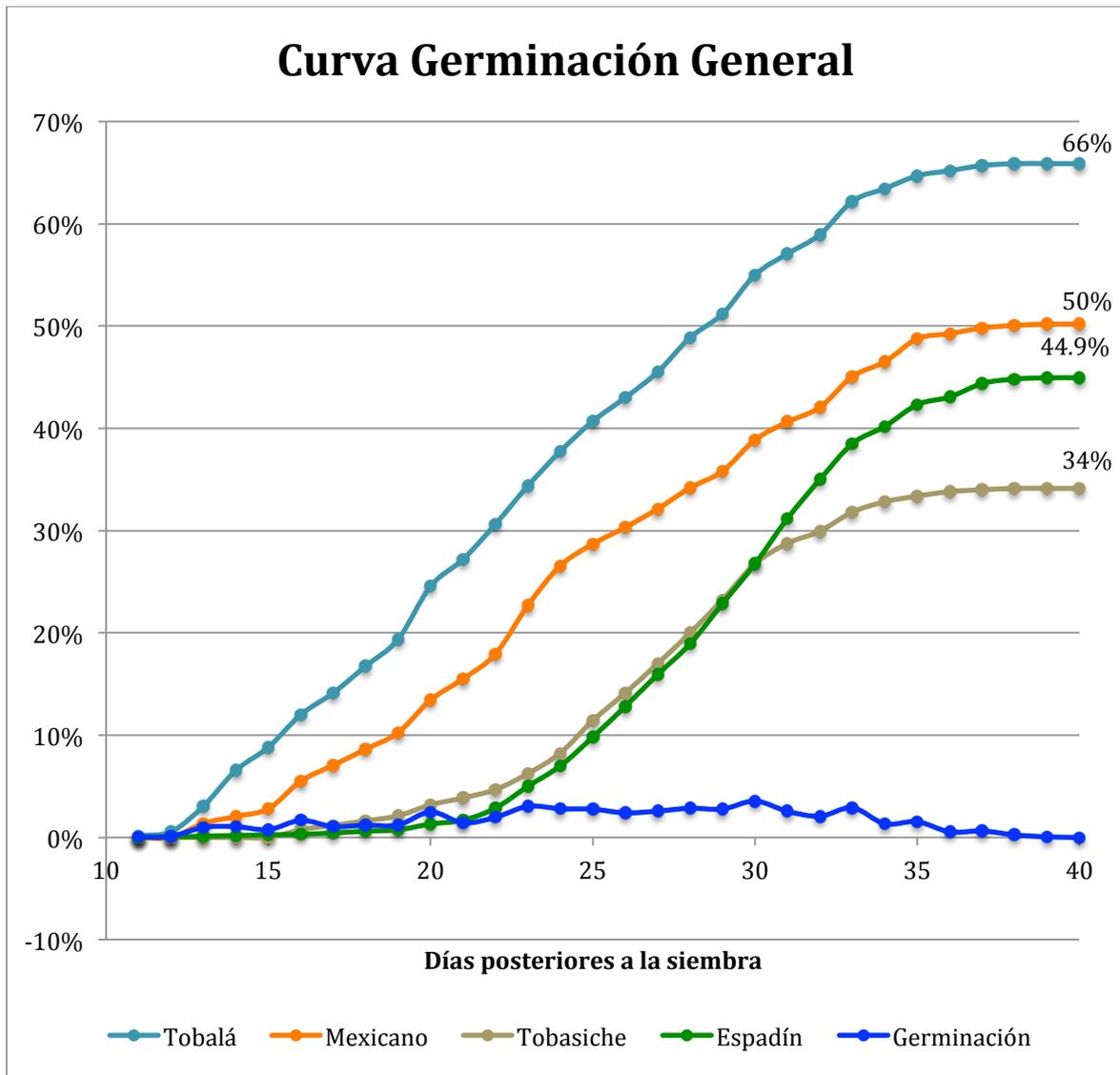


Figura 52. Curva de germinación acumulada para el factor imbibición

La figura 52, muestra el gráfico de la curva de germinación correspondiente a las cuatro especies evaluadas. El gráfico de manera visual permite apreciar que la especie con el mayor porcentaje de germinación fue *A. potatorum* con 66%, seguido de *A. rhodacantha* con 50%, ambas especies fueron colectadas en parcelas silvestres y la polinización pudo ser un factor determinante en la calidad de la semilla. *A. angustifolia* tuvo un 44.9% de germinación, la especie con el

porcentaje de germinación más bajo fue *A. karwinskii* con un 34%, ambas especies se colectaron de parcelas de cultivo y probablemente la polinización fue menos eficiente para estas especies. Así mismo se confirma la correlación entre el peso de la semilla y la calidad de la misma, la semilla de *A. karwinskii* fue la más ligera y a su vez la que menos germinación tuvo.

Capítulo IV. Conclusiones

Se identificaron 18 especies y/o variedades empleadas para la elaboración de mezcal en el municipio de Villa Sola de Vega, de los cuales seis son silvestres, seis cultivadas/silvestres y seis cultivados. Las especies que más se utilizan en el municipio son *Agave potatorum* (Maguey Tobalá), *Agave americana* var. *Oaxacensis* (Maguey Arroqueño) y *Agave angustifolia* (Maguey Espadín). Existe un potencial importante por la diversidad de agaves mezcaleros con que cuenta el municipio, pero existe un riesgo importante de perder varias de estas especies de no generarse acciones concretas de manejo de los agaves mezcaleros. El productor está ocupando más materia prima de la que tiene disponible y pocos productores reproducen los agaves mezcaleros, se enfocan en los que tienen mayor importancia económico-productiva.

Existe una diversidad importante de agaves mezcaleros, principalmente por las características agroclimáticas del municipio. Maxent permitió a través de modelación bioclimática, determinar la distribución potencial de siete especies de *Agave*. Existe una fuerte correlación de la diversidad de agaves con el ecosistema en el que se desarrolla. Los bosques de encino-pino, encino y pino-encino, fueron los que albergaron la mayor diversidad de especies, a su vez los bosques de encino-pino y encino, son los más abundantes del municipio (Figura 41). La precipitación, humedad de suelo y temperatura también aportaron ganancias importantes a los modelos de distribución, las siete especies de agave modeladas se encontraron en 20°C, precipitación de 800-1200 mm y periodos de humedad del suelo de 6-7 meses. La elevación que prefieren los agaves del municipio es de los 1000 a los 2000 msnm y los agaves se encontraron en suelos poco desarrollados como los regosoles y litosoles. Los rangos de todas las variables incluidas en los modelos concuerdan con los requisitos de preferencia de hábitat que menciona la bibliografía para el género agave. Las especies *A. potatorum*, *A. americana* y *A. angustifolia* que tienen una mayor importancia, son también los que mayor distribución tienen en el municipio, lo que las convierte en prioritarias para su domesticación y/o conservación.

Respecto a la calidad de las semillas, *A. potatorum* y *A. rhodacantha*, tuvieron los mejores indicadores, ello se refleja en las pruebas de viabilidad y germinación, donde se tuvieron porcentajes más altos para estas especies. Las semillas de las cuatro especies de agave analizadas (*A. potatorum*, *A. angustifolia*, *A. karwinskii* y *A. rhodacantha*) a pesar de tener longitudes X,Y y Z estadísticamente diferentes, tienen valores de Diámetro Cuadrático similares (3-4mm) y esfericidad (0.37-0.45), ello se percibe visualmente en la forma de las semillas que sigue el mismo patrón para las cuatro especies. Ello se puede corroborar empíricamente en la evaluación de la germinación, donde existen una relación importante de la forma semilla con la germinación: a mayor tamaño de semilla, mayor tiempo de imbibición.

Las cuatro especies de agave, pudieron reproducirse por semilla, la especie que mejor respondió a la germinación fue *A. potatorum*, que tuvo porcentajes de germinación promedio de 66%, sin embargo en el tratamiento de 24 horas de imbibición, la especie alcanzó el 84.25% de germinación. Este patrón se repite en las demás especies (*A. rhodacantha*, *A. karwinskii* y *A. angustifolia*). Los tratamientos de 24 hr y 48 hr de imbibición no tuvieron diferencias estadísticamente significativas y pueden utilizarse indistintamente para estas especies de agave, sin embargo para las semilla de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* que tuvieron mayores dimensiones, el remojo en agua por 48 hr fue el tratamiento que mejores resultados brindó; para *A. potatorum* y *A. rhodacantha*, el remojo en agua por 24 hr de la semilla previo a la siembra, fue el tratamiento mas eficiente.

Si se considera que una sola planta de agave puede generar hasta 50,000 semillas puras y los porcentajes de germinación oscilaron entre los 44.5% y 84.5%, la reproducción por semilla es una alternativa económica y de fácil adopción para la producción de plantula de agave, de un solo individuo se pueden obtener entre 20,000 y 40,000 plántulas si se reproduce por semilla.

Capítulo V. Recomendaciones

Hay un importante potencial en la diversidad de agaves mezcaleros en el municipio de Villa Sola de Vega, se cuenta con 18 especies mezcaleras en el territorio, en su mayoría silvestres, sin embargo no se están realizando acciones de manejo para todas las especies. Es importante realizar nuevos estudios que aporten más información para la domesticación y conservación de las especies mezcaleras.

Aunado a la diversidad de especies de agave mezcaleras se encuentra la amplia distribución de los agaves en el territorio, derivado de las características agroclimáticas favorables para el desarrollo de los agaves. Es necesario desarrollar trabajos demográficos que permitan cuantificar las existencias reales de los agaves en el territorio y poder tomar decisiones de manejo prioritarias de acuerdo a la abundancia y densidad de las especies en el municipio. Así mismo se recomienda proyectar la distribución de las especies, para poder contrastar con la información generada en este proyecto de investigación.

Se plantea derivado del presente trabajo de investigación la hipótesis de una correlación entre la calidad de la semilla y la eficiencia en la polinización, las semillas de agaves provenientes del medio silvestre, tuvieron mejores indicadores de calidad, así como los mayores porcentajes de viabilidad y germinación en comparación a las especies obtenidas de parcelas de cultivo.

Capítulo VI. Referencias consultadas

- Abalone, R., Cassinera, A., Gaston, A., & Lara, M. A. 2004. Some physical properties of amaranth seeds. *Biosystems Engineering*, 89(1), 109-117.
- Akaaimo, D.I. and Raji, A.O. 2006. Some physical and engineering properties of prosopis Africana seed. *Journal of Bio-systems Engineering* 95(2): 197-205.
- Antonio, B.A. 2012. Manual de ensayos de semillas forestales. Secretaría de Medio Ambiente. SEMA. Gobierno del Estado de Coahuila. 55 p.
- Association Of Official Seed Analysts(AOSA). 1993. *Journal Of Seed Technology*. Volume16 Number 3. Bozeman, Montana.
- Araújo M.B, Pearson R.G 2005 Equilibrium of species' distributions with climate. *Ecography*. **28**, 693–695.
- Arizaga, S., E. Ezcurra, et al. (2000). "Pollination ecology of *Agave macroacantha* (Agavaceae) in a Mexican tropical desert. I. Floral biology and pollination mechanisms." *American Journal of Botany* 87(7): 1004-1010.
- Arredondo, V.C. y Espinoza, H. 2005. Manual del Magueyero. Consejo Oaxaqueño del maguey y mezcal, A. C. p. 142.
- Aureoles-Rodríguez F, J L Rodríguez-de la O, J P Legaria-Solano, J Sahagún-Castellanos, M G Peña-Ortega (2008) Propagación *in vitro* del «maguey bruto» (*Agave inaequidens* Koch), una especie amenazada de interés económico. *Rev. Chapingo S. Hort.* 14:263-269.
- Aviara N.A., Gwandzang M.I., and Haque M.A., 1999. Physical properties of guna seeds. *J. Agric. Eng. Res.*, 73, 105-111.
- Bonner, F.T. 1974. Seed testing. In: *Seeds of woody in the United States, Agriculture Handbook*. N° 450. USDA For. Serv, Washington.
- Briones, V.O. 1994. Origen de los desiertos mexicanos. *Ciencia* 45:263-279.
- Brusca, R.C., T.A. Hubbard, T.R. Van Devender, M.A. Dimmitt, K. Krebbs, Y. Gray, T.H. Fleming & C. Martínez del Río. 2009. Arizona-Sonora Desert Museum. Consultado: 20 de octubre 2009, [www. desertmuseum.org.htm](http://www.desertmuseum.org.htm)).

- Ceja, R. R.; Rendón, S. L.A. y de la Torre, O. C. 2011. Selección de Terrenos. In: Manual técnico para el establecimiento de huertas madre de agave azul. Rendón, S. L. A.; Ávila, M. M. E.; Rodríguez, G. B. y del Real, L. J. I (eds). Prometeo Editores, S.A de C.V. Guadalajara, Jalisco, México. 13-32 pp.
- Conabio, 2005. Mezcales, usos, diversidad biológica. Biodiversidad Mexicana. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en línea, consultado en: < http://www.biodiversidad.gob.mx/usos/mezcales/A_karwinskii.html>.
- Centeno-García, E. 2004. Configuración Geológica de Estado. En: García-Mendoza, A.J. M.J. Ordoñez, M.Briones-Salas. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-Worl Wild Life Fund, México, pp.29-42.
- Colunga-García, M. P., A. S. Larqué, L. E. Eguiarte y D. Zizumbo-Villarreal. 2007. En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves. CICY-CONACYT-CONABIO-INE. Mérida, Yucatán. 402 p.
- CONAFOR. 2002. *Agave angustifolia*. Fichas técnicas elaboradas por el Sistema de Información para la Reforestación (SIRE). Comisión Nacional Forestal. CONAFOR.
- CRM, 2015. Segundo Informe de Actividades Consejo Directivo 2012-2015 [en línea]: documento electrónico disponible en línea. [fecha de consulta: 25 Agosto 2015]. Disponible en: <<http://www.crm.org.mx/PDF/INFORMES/INFORME2013.pdf>>.
- CRM, 2016. Informe 2015 de Actividades Consejo Directivo 2012-2016 [en línea]: documento electrónico disponible en línea. [fecha de consulta: 08 Junio 2016]. Disponible en: < <http://www.crm.org.mx/VIRTUAL/INFORME2016/>>.
- Cruz-Cárdenas, Gustavo, Villaseñor, José Luis, López-Mata, Lauro, Martínez-Meyer, Enrique, & Ortiz, Enrique. (2014). Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en Maxent. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(2), 187-201. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.09.034>
- De Acosta, J. 2008. Historia natural y moral de las Indias (No. 2). Editorial CSIC-CSIC Press.

Delgado- Lemus, A., Casas, A. y Tellez, O., 2014. Distribution, abundance and traditional management of *Agave potatorum* in the Tehuacán Valley, Mexico: bases for sustainable use of non-timber forest products. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10:63.

Departamento de agricultura de los Estados Unidos de América. 1986. Semillas. Editorial C.E.C.S.A. México, D.F. 1020 p.

Díaz, M. M.; Nava, C. A.; et al. (2012). "Polymorphism and methylation patterns in *Agave tequilana* Weber var. 'Azul' plants propagated asexually by three different methods." *Plant Sci* 185-186: 321-330.

DOF, Diario Oficial de la Federación. 2015. Resolución por la que se modifica la Declaración General de Protección de la Denominación de Origen Mezcal. DOF: 24/12/2015. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421317&fecha=24/12/2015. (Agosto, 2016).

Dutta, S. K., Nema, V. K., & Bhardwaj, R. K. 1988. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39(4), 259-268.

Enríquez-del Valle, J R; Rodríguez Ortiz, G; Marini Zúñiga, F; Campos Ángeles, G V; Velasco Velasco, V A; León Vázquez, N I; 2013. Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, () 1185-1195. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263128353010>

Eguiarte, L.E. 1995 Hutchinson (Agavales) vs Huber y Dahlgren (Asparagales): análisis moleculares sobre la filogenia y evolución de la familia Agavaceae sensu Hutchinson dentro de las monocotiledóneas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 56:45-56.

Eguiarte, L.E., V. Souza y A. Silva-Montellano. 2000. Evolución de la familia Agavaceae: filogenia, biología y genética de poblaciones. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 66:131-150.

- Eguiarte, F.L. E; Gonzalez, G.A. 2007. De genes y magueyes estudio y conservación de los recursos genéticos de tequila y mezcal. Ciencias [en línea]. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 1982 - [citado (23-04-2014)]. Trimestral. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/ciencias/ciencias_index.html>. ISSN 0187-6376. P.28-35
- Espinosa, P.H; Arredondo, V. C.; cano, G.M.A; Vásquez, Q.F; Canseco, L.A.M. 2002. Estudio y preservación de la diversidad genética de maguey mezcalero en el estado de Oaxaca. INIFAP. 34 pp.
- FAO. 2006. *Quality declared seed: technical guidelines for standards and procedures*. FAO Plant Production and Protection Paper 185, Rome, Italy.
- FAO, FLD, Bioversity International. 2007. Conservación y manejo de recursos genéticos forestales. Vol. 3: en plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma, Italia.
- Figueredo, C. J. and J. M. Nassar (2011). "Population Genetics of Agave cocui: Evidence for Low Genetic Diversity at the Southern Geographic Limit of Genus Agave." *Journal of Heredity* 102(3): 306-314.
- Flores-Maya, S., Vargas-Jurado, M.A., Suárez-Mota, M.E., & Barrera-Escorcia, H. 2015. Análisis cariotípico de Agave marmorata y Agave peacockii (Agavaceae) ubicados en las terrazas aluviales del río Zapotitlán, Puebla, México. *Polibotánica*, (40), 109-125. Recuperado en 11 de enero de 2016, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682015000200007&lng=es&tlng=es.
- Fundación Produce Oaxaca. 2007. El mezcal. Bebida de los dioses. México. Agroproduce. Órgano informativo de la Fundación PRODUCE Oaxaca. A. C. 2(16):5-9.
- García, M. A. J. (2007). Los Agaves de México. Ciencias-Universidad Nacional Autónoma de México, 087, 14-23. Disponible en línea en: [<http://www.redalyc.org/pdf/644/64408704.pdf>].
- García, M.A.J. 2010. Los Agaves de México. Ciencias [en línea]. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, 1982 - [citado (23-04-2014)]. Trimestral. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/pdf/644/64408704.pdf>>. ISSN 0187-6376. P.28-35

- García, M.A.J. 2010b. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae): nuevos taxa y neotipificación. *Act. Bot. Mex* [online]. 2010, n.91, pp. 71-93. ISSN 0187-7151.
- García Mendoza, A. 2002. The distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico. *Cact. Succ. J. (U.S.)* 74(4):177-187
- García-Mendoza, A. J. 2011. Agavaceae. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Instituto de Biología, UNAM. D. F, México. 88: 95 pp
- García-Mendoza, A.J. M.J. Ordoñez, M.Briones-Salas. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wild Life Fund, México
- Garnica, S.Z. 2002. Las plantaciones de maguey espadín (*Agave angustifolia*), y su impacto en las Selvas Bajas Caducifolias y sus alternativas. Semarnat. Conafor.
- Gamez, P.R. 2011. Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. 38 pp.
- Gentry, H.S. 1982. *Agaves of Continental North America*. Arizona, University Press, Tucson, 670 pp.
- Godinez-Alvarez, H., Morin, C., Rivera-Aguilar, V., 2012. Germination, survival and growth of three vascular plants on biological soil crusts from a Mexican tropical desert. *Plant Biol (Stuttg)* 14, 157-162.
- Gold, K., León-Lobos, P., & Way, M. 2004. Manual de recolección de semillas de plantas silvestres. *Boletín INIA*, 110.
- González Romero, S. L. 2009. Germinación de Diferentes cultivos en condiciones de salinidad cuantitativa y cualitativa.
- Greulach , V.A. y J.E. Adams. 1986. Las plantas; Introducción a la botánica moderna. Trad. por Ramón Roba y Nava Esparza. México, D.F. Limusa.
- Gupta, R. K., & Das, S. K. 1997. Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(1), 1-8.

- Halffter, G. (Comp.) 1998. *La Diversidad Biológica de Iberoamérica II*. Volumen Especial, Acta Zoologica Mexicana, nueva serie. 337 p.p. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México.
- Ilsey, G.C.; Gomez, A.T.; alarcón,T.; Rivera, M.G.; Morales, M.M.P.; García, B.J.; ojeda, S.A.; Calzada, R.; Mancilla, N. 2005. Conservación in situ y manejo campesino de magueyes mezcaleros. Grupo de Estudios Ambientales AC. Informe final
- Jiménez-Valverde, A., Lobo, J. M., & Hortal, J. (2008). Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling. *Diversity and distributions*, 14(6), 885-890.
- International Seed Testing Association (ISTA). 1993. International rules for seed testing. Seed Science and Technology. 21.
- International Seed Testing Association (ISTA). 1999. International rules for seed testing. Seed Science and Technology.27.302p.
- International Seed Testing Association (ISTA). 2004. Rules for Seed Testing. Seed Sc. And Tech. 24 (Supplement).
- Landis, T. D., R. W. Tinus, and J. P. Barnett. 1998. Seedling propagation. Vol. 6. The Container Tree Nursery Manual. Agriculture Handbook 674. USDA Forest Service. Washington. 166 p.
- Lescure, J-P., Emperaire, L. & Franciscon, C. 1992. Leopoldinia piassaba Wallace (Arecaceae): a few biological and economic data from the Rio Negro region (Brazil). *Forest Ecology and Management* 55: 83-86.
- Mateo, R. G., de la Estrella, M., Felicísimo, A. M., Muñoz, J. & Guisan, A. 2013. A new spin on a compositionalist predictive modelling framework for conservation planning: A tropical case study in Ecuador. *Biological Conservation*, 160: 150-161.
- Magallán, H.F. y Hernández, L. 2000. La familia Agavaceae en el estado de Querétaro, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 66:103-112.
- Mapula, L.M., J.U. López, J.H. Vargas, A.L. Hernandez. 2008. Germinación y vigor de semillas en *Pseudotsuga mensiezii* de México. *Ra Ximhai* 4(1):119-134.

- Molina-Freaner, F. y L. Eguiarte. (2003). The pollination biology of two paniculate agaves (Agavaceae) from northwestern Mexico: contrasting roles of bats as pollinators. *American Journal of Botany*. 90: 1016-1024.
- Noble, R. E. (2002). "Effects of UV-irradiation on seed germination." *Sci Total Environ* 299(1-3): 173-176.
- Niembro, R.A. 1988. Algunos métodos para determinar la viabilidad y el vigor de semillas forestales. *México y sus bosques*. 20(1):27-32.
- Olivas G., U. E., J. R. Valdez L., A. Aldrete, M. de J. González G. y G. Vera C. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Fitotecnia Mexicana* 39(4):411-419.
- Ortiz-Pérez, M.A. , J.R, Hernández-Santana y J.M. Figueroa Mah-Eng. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En García-Mendoza, A.J. M.J. Ordoñez, M.Briones-Salas. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza- World Wild Life Fund, México, pp.43-54.
- Palma C., F. de J. 1991. El género *Agave* L. y su distribución en el estado de Oaxaca. Tesis profesional. Escuela Nacional de Estudios Profesionales "Iztacala" –UNAM. México, D. F. 161 p.
- Palma, C.F. 1998. Las especies útiles del género *Agave* en Oaxaca. *Huaxyacac* 16:12-16.
- Palma, C.F. 2000. Agaves productores de fibras duras en el estado de Oaxaca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 66:93-102.
- Parsons, J.R. y M.H. Parsons. 1990. Maguey, utilizations in Highland, Central, México. *Anthropological Papers, Museum of Anthropology, University of Michigan*, num. 82, 388 pp.
- Patiño, V., De la Garza, P. Villagomez, A.I., Talavera, A. y Camacho, M. 1983. Guía para la recolección y manejo de especies forestales. INIF. (México). Bol. Div. N° 63. Pp. 33-51.

- Pérez M. B. E; Esparza, A. M. J; Pérez, R. M. E. (2012). Conservación in vitro de germoplasma de *Agave* spp. bajo condiciones de crecimiento retardado. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(4), 279-287. Recuperado en 02 de septiembre de 2014, disponible en línea en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000400004&lng=es&tlng=es.]
- Pérez-García, E., J. Meave y C. Gallardo. 2001. Vegetación y flora de la región de Nizanda, Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. *Acta botánica Mexicana* 56:19-88.
- Phillips S. *et al.* 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* **190**: 231–259.
- Phillips S. *et al.* 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecol. Appl.* **19**: 181–197.
- Pimentel, B. L. 2009. Producción de árboles y arbustos de uso múltiple. Mundi Prensa, Universidad Autónoma Chapingo. 2009. 272 pp.
- Pineda, O.T., Alcalá, C., Vera, J.C.A., Cervantes, M.C.T., Khalil, G.A. 2004. El trasplante contenedor-contenedor (1+1) y contenedor-raíz desnuda (P+1) en la producción de planta de *Pinus greggii* engelm. *Agrociencia*, vol. 38, núm. 6, noviembre-diciembre, 2004, pp. 679-686
- Piven, N. M., Barredo-Pool, F. A., Borges-Argáez, I. C., Herrera-Alamillo, M. A., Mayo-Mosqueda, A., Herrera-Herrera, J. L., & Robert, M. L. (2001). Reproductive biology of henequen (*Agave fourcroydes*) and its wild ancestor *Agave angustifolia* (Agavaceae). I. Gametophyte development. *American Journal of Botany*, 88(11), 1966-1976.
- Poulsen, Karen. 2000. Análisis de semillas. En: Técnicas para la escarificación de semillas forestales. Programa de Investigación. Proyecto de semillas forestales (PROSEFOR) – Danida Forest Seed Centre. Costa Rica. p. 2
- Prieto, M. J., Prieto, G. F., Hernández, C. N., Domínguez, S. J. M., Román, G. A. D. 2011. Métodos comparativos del poder germinativo en *Hordeum distichon* L. calidad maltera. *Multiciencias* 11, 121-128

- Rabinowitz, D., S. Cairns., T.Dillon. 1986. Seven forms of rarity and their frequency in the flora of the British Isles. En: M.E. Soulé Ed. Conservation, Biology and Science of Scarcity and Diversity. Sinauer Associates, pp 182-204.
- Ramírez, T; Pena-Valdivia, H.M.; Aguirre, C. B.; Reyes, A. J. R.; Sánchez, U.J.A. 2012. Seed germination temperatures of eight Mexican Agave species with economic importance. *Plant Species Biology*, 27: 124–137. doi: 10.1111/j.1442-1984.2011.00341.x
- Ramirez-Tobias, H. M., C. B. Pena-Valdivia, et al. (2014). "Seed germination of Agave species as influenced by substrate water potential." *Biological Research* 47(1): 11.
- Ramsay, M.R. 2002. Cambio cultural en el uso del maguey en Gundho. IV coloquio internacional sobre Otopames, Guanajuato, Guanajuato. Memorias del coloquio.
- Rivera Aguilar, Víctor; Manuell Cacheux, Irma, Las costras biológicas del suelo y las zonas áridas, Ciencias , No. 075, julio 2004
- Rita, A.S., Yoldijan, A.M., Craviotto, R.M., Bisaro, V. 2001. Pruebas de vigor y calidad fisiológica de semillas de soja. *Pesc. Agropec. Bras.*, Brasilia, v. 36, n2, p. 371-379.
- Rosales, M.S.; Hernández, A.M.; Sarmiento, L.H.; Sigala, R. J.A. 2015. Producción de planta de *Agave duranguensis* en sistema de riego por goteo. INIFAP. Disponible en línea en: <https://www.researchgate.net/publication/273972254_PRODUCION_DE_PLANTA_DE_Agave_durangensis_EN_SISTEMA_DE_ACOLCHADO_Y_RIEGO_POR_GOTEO>
- Ruiz, J. A.; Medina G.; González, I. J.; Ortiz, C.; Flores, H. E.; Martínez, R. y Byerly, K. F. 1999. Agave. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro (CIRPCE), México. Libro técnico Núm. 3. 11-13. pp.
- Ruvalcaba-Ruiz, D. and B. Rodriguez-Garay (2002). "Aberrant meiotic behavior in Agave tequilana Weber var. azul." *BMC Plant Biol* 2: 10.

- Sacramento, L.J; Carmona, V.T.F; Suárez, G. A.I. (2012). Éxito reproductivo y demografía de *Agave salmiana* Otto ex *Salm-Dyck* ssp. *crassispina* (Trel.) Gentry) en San José Alchichica, Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana, Facultad de Biología. 35 pp.
- SAGARPA, Informe de la Evaluación Externa Estatal de Funcionamiento y Operación 2008, Programa para la Adquisición de Activos Productivos [en línea]: documento electrónico disponible en línea. 2009 [fecha de consulta: 25 Agosto 2014]. Disponible en: <http://www.fao-evaluacion.org.mx/pagina/documentos/sistemas/eval2008/resultados2008/PDF2/OAX/INFORME_FINAL_EVAL_PAAP_201109final.pdf>.
- Sánchez, L.A. 2005. Oaxaca tierra del maguey y mezcal. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Segunda edición. 235 pp.
- Santos, JA, R. C., Castro-Mendoza, I., Cadena-Iñiguez, P., Valenzuela-Núñez, L. M., & Camas-Gómez, R. 2016. ÁREAS POTENCIALES PARA EL CULTIVO DEL AGAVE (*Agave americana* L.) EN LA MESETA COMITECA, CHIAPAS. *Agroproductividad*, 9(2).
- Semarnat. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF), jueves 30 de diciembre de 2010.
- Tambutti, A.M.I. 2002. Diversidad del género *Agave* en México: una síntesis para su conservación. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 53 pp.
- Téllez-Valdés, Oswaldo; Villaseñor, José Luis. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, julio-diciembre, 205-220.
- Trejo, I. 2004. Clima. García-Mendoza, A.J. M.J. Ordoñez, M.Briones-Salas. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wild Life Fund, México, pp.67-85.
- Trotta-Moreu, N., J.M. Lobo & F.J. Cabrero-Sañudo 2008. Distribución conocida y potencial de las especies de Geotrupinae (*Coleoptera: Scarabaeoidea*) en México. *Acta Zool. Mex. (n.s.)*, 24(2): 39-65.

- Vargas, R.G. 2011. Botánica General. Desde los musgos, hasta los árboles. Universidad estatal a distancia. San José, Costa Rica. pp. 348-349.
- Vázquez Díaz, E., García Nava, J. R., Peña Valdivia, C. B., Tobías, R., Hugo, M., & Morales Ramos, V. (2011). Tamaño de la semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista fitotecnia mexicana*, 34(3), 167-173.
- Vilchez, B.V. 2004. Muestreo de *Zamia fairchildiana*: un producto no maderable del bosque. *Revista Forestal (Costa Rica)* 1(1).
- Willan, R. (Comp.) 1991. Guía para la manipulación de semillas forestales. ROMA. FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/ad232s/ad232s00.htm#TOC>
- Zebib, H., Bultosa, G., & Abera, S. 2015. Physico-Chemical Properties of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Varieties Grown in Northern Area, Ethiopia. *Agricultural Sciences*, 6(2), 238.
- Zobel, B. y Talbert, J. 1988. Técnicas de Mejoramiento Genético de árboles forestales. Trad. Guzmán, Editorial Limusa, S.A. México. 545 p.