

COMPARACIÓN DE DISTRIBUCIONES PROBABILÍSTICAS PARA GENERAR INFORMACIÓN CLIMÁTICA EN ANÁLISIS DE APTITUD DEL TERRENO

Antonio González Hernández¹, Gustavo M. Cruz Bello¹,
Francisco Moreno Sánchez¹ y Efraín Velasco Bautista¹

RESUMEN

Durante los últimos años, en México se han aplicado varios métodos para determinar el potencial agrícola o forestal de una región con base en las condiciones climáticas. Sin embargo, a éstos no se les han realizado los ajustes necesarios para hacerlos más precisos a efecto de ubicar zonas aptas para diferentes especies. En el presente estudio dichos territorios fueron delimitados para tres especies forestales: *Pinus leiophylla*, *Pinus greggii* y *Pinus ayacahuite*, en la Cuenca Alta del Río Balsas modificando el método de zonificación más usado; así, se calculó la probabilidad al 80% para la temperatura y la precipitación pluvial por medio de una distribución normal y una distribución acumulativa. Las áreas con potencial productivo identificadas con cada una de ellas fueron comparadas contra las generadas con los valores promedio de ambas variables. Los resultados indican diferencias significativas entre las áreas delimitadas mediante los datos probabilísticos comparados con las derivadas de los datos promedio. Con la distribución normal se pudieron definir las zonas menos aptas para los tres pinos. La superficie forestal se ha reducido en 90%, aproximadamente, al considerar la aptitud potencial que tiene la cuenca para *P. leiophylla*, respecto a la obtenida con el uso de suelo del 2002.

Palabras clave: Aptitud, *Pinus ayacahuite*, *Pinus greggii*, *Pinus leiophylla*, probabilidad acumulativa, probabilidad normal.

Fecha de recepción: 12 de julio de 2005.

Fecha de aceptación: 07 de marzo de 2006.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (GENID-COMEF), INIFAP. Correo-e: gonzalez.antonio@inifap.gob.mx

ABSTRACT

Several methods have been applied to determine the agrological and forest potential of a region based on the climatic conditions in the last years in Mexico. However, those methods have not been modified to make them more precise to locate suitable areas for different species. In the present study suitable areas were delimited for three forest species *Pinus leiophylla*, *Pinus greggii* and *Pinus ayacahuite* in the High Balsas Watershed, by modifying the method used more frequently for zone location, by calculating the probability at 80% for temperature and precipitation, through a normal distribution and an accumulative distribution. The suitable zones obtained with each distribution were compared with those resulting from the average values of both variables. Significant differences were found between them; with the normal distribution the smaller suitable areas for the three pine species were obtained. The forest area has been around 90% approximately if the suitability potential that the watershed has for *P. leiophylla* is considered compared with the land use of 2002.

Key words: Aptitude, *Pinus ayacahuite*, *Pinus greggii*, *Pinus leiophylla*, cumulative probability, normal probability.

INTRODUCCIÓN

El manejo sostenible de los recursos naturales requiere de políticas y una planificación basada en el conocimiento de su demanda y usos, así como de las interacciones entre ellos. En ella, los estudios de zonificación permiten separar áreas homogéneas con similares aptitudes y limitaciones para llevar a cabo acciones de acuerdo a sus características climáticas, edafológicas y de manejo, entre otras.

En este contexto, "aptitud" se refiere a la capacidad del territorio para el desempeño de una actividad, por ejemplo la agricultura de regadío, agricultura de secano, pastoreo de ganado, silvicultura, recreo o desarrollo humano; o un uso de la tierra más específico como la producción de arroz en regadío o de madera de *Acacia* sp. Para cada tipo de uso se evalúa y se clasifica separadamente la idoneidad del terreno (Urbano y Rojo, 1992).

La relevancia de los análisis de aptitud radica en que para practicar una silvicultura o agricultura menos vulnerable, es necesario producir en los lugares que satisfagan los requerimientos agroecológicos de los cultivos, ya que cultivar una especie fuera de su ámbito natural, incrementa los costos y la demanda de tecnología, reduce el rendimiento y la calidad del producto. Por lo tanto, conocer las condiciones ambientales en las zonas de producción y delimitar el espacio geográfico de los cultivos permitirá ubicar con precisión los sitios con mayor

potencial de producción para los taxa vegetales de importancia agrícola, pecuaria y forestal (Meza y Reygadas, 2001).

Existen diversas formas de regionalización del terreno para alcanzar un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. En los últimos años se han aplicado y adaptado diferentes métodos en México, para determinar el potencial agroclimático de una región, si bien la mayoría de ellos se basa en el propuesto por FAO (1981) y se han ejecutado a nivel nacional, estatal, regional o inclusive municipal.

Se sabe que las condiciones de temperatura, precipitación y algunos atributos del suelo son los elementos fundamentales que rigen la distribución espacial de las plantas y que en las zonas áridas y semiáridas, la disponibilidad del agua es el factor más importante que controla la supervivencia de las plantas y su producción. Así, el uso potencial se puede considerar como la aptitud o capacidad del terreno determinado por las características climáticas, topográficas y edáficas; relacionado a esta capacidad de uso de la tierra; y desde el punto de vista agronómico de las especies, se diagnostica el potencial productivo, que se refiere a la producción total de materia seca o rendimiento que un cultivo puede expresar en condiciones óptimas de clima, suelo y sanidad bajo términos económicos de sustentabilidad del suelo (Lozano, 1996).

La delimitación de áreas potenciales con base en la temperatura u otra variable relacionada como la altitud es más sencilla que con la precipitación. La zonificación se puede hacer más completa si se estiman las probabilidades de temperatura extremas para las etapas en que las especies son más sensibles a este factor. La ubicación de zonas aptas por precipitación es más complicada que la correspondiente a la temperatura, debido al carácter aleatorio de la distribución de la lluvia en tiempo y espacio (Ortiz y Ruiz, 1987).

El conocimiento de la cantidad de precipitación diaria, mensual y anual en un lugar en particular, conlleva a la planificación y programación de forma adecuada cualquier actividad agrícola, pecuaria o forestal que se pretenda realizar (Castro y Arteaga, 1993).

La estimación de probabilidades de precipitación permite determinar la lluvia esperada a largo plazo; sin embargo, no existe un método conveniente para establecer la variación espacial de la precipitación, para lo cual es esencial la densidad y ubicación de las estaciones meteorológicas. En general, a menor precipitación media anual, mayor variación en la distribución espacial de la lluvia, lo que no significa que una zona con mayor precipitación tenga una mejor distribución espacial (Ortiz y Ruiz, 1987).

A través del cálculo de probabilidades de lluvia y temperatura es posible fijar y optimizar actividades como: fechas de siembra y cosecha, duración del período

húmedo, selección de especies tolerantes a sequía, prácticas de captación de agua de lluvia, dosis y fechas de aplicación de fertilizante, entre otras (Villalpando, 1985).

Con frecuencia los porcentajes de probabilidad que se adopten dependen de consideraciones económicas, es decir se acepta que una especie fracase uno de cada cinco años ó uno de cada diez años dependiendo de su rentabilidad. Las consecuencias de estos análisis son evidentes en las prácticas de manejo, una vez que se conoce la demanda mínima de lluvia de una especie, se pueden evaluar rápidamente los riesgos de establecerla en una región (Ortiz, 1987).

Resulta impreciso relacionar los valores medios anuales, mensuales y decenales de la precipitación con los requerimientos hídricos de cierta especie. Una mejor forma de utilizar la precipitación es en términos de probabilidad con fines de predicción a largo plazo, a fin de estimar la frecuencia de ocurrencia de un valor específico. Con este análisis se evalúan los riesgos de introducir cierta planta en una región (Rivera, 2003).

Sin embargo, en México existen pocos estudios de zonificación para el área forestal donde se empleen datos probabilísticos para precipitación y temperatura, por lo que el presente estudio tuvo como objetivo comparar las zonificaciones para tres especies de pinos utilizando datos de precipitación y temperatura generados con diferentes distribuciones probabilísticas, contra datos promedio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Cuenca Alta de Río Balsas, situada en los estados de Puebla y Tlaxcala dentro de la región administrativa IV Balsas y constituye una de las subregiones hidrológicas en que está dividida la región hidrológica 18 de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2004). Se ubica entre los 18° 52' 12" y 19° 31' 12" de latitud norte y los 98° 43' 12" y 98° 01' 48" de longitud oeste, con un área de 243 468 ha y un perímetro de 375.40 km (Figura 1).

La cuenca forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, litológicamente constituida por rocas volcánicas de los períodos Terciario y Cuaternario. La morfología del paisaje se caracteriza por la presencia de diferentes tipos de estructuras volcánicas, que por ser relativamente jóvenes están bien conservadas.

Con base en la clasificación de Köppen modificada por García (1973), los climas que predominan en el lugar son: C(w₂), templado subhúmedo con lluvias de verano de 5 al 10.2% anual; C(w₁), templado subhúmedo con lluvias de verano de 5 al 10.2% anual; Cb'(w₂), templado semifrío con verano fresco largo subhúmedo, lluvias de verano del 5 al 10.2% anual; E(T)Chw, frío con lluvias de verano en las intermediciones de los volcanes Iztaccihuatl y La Malinche.

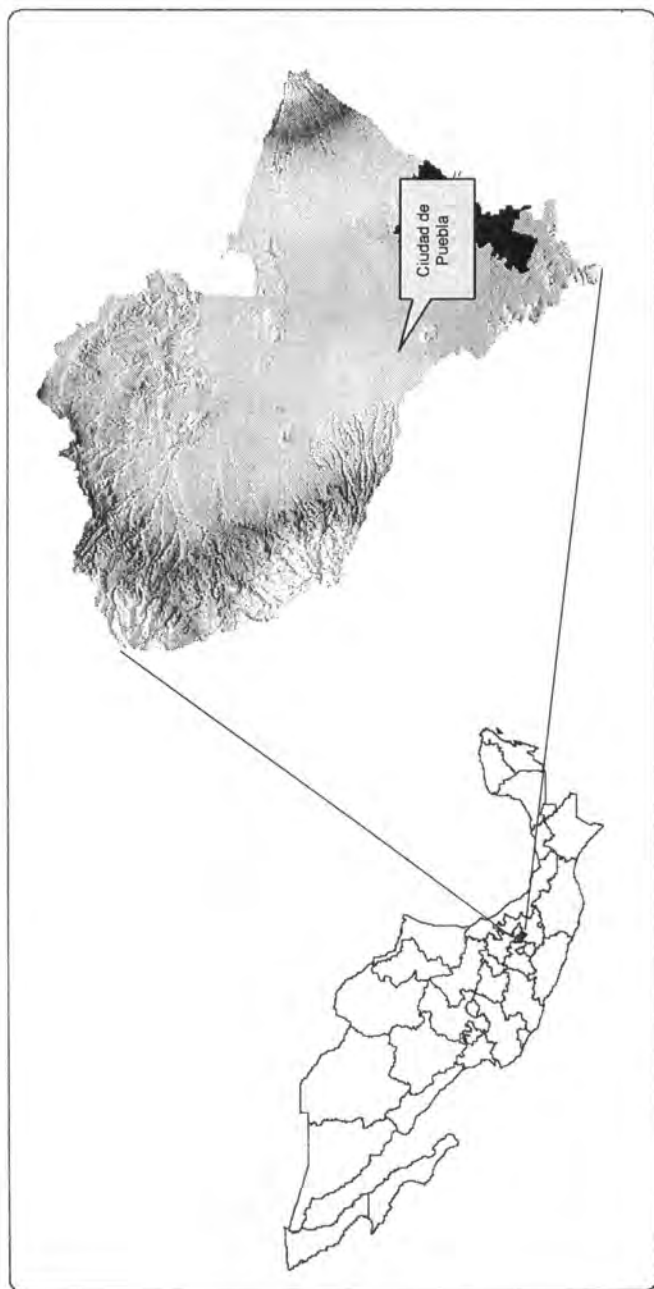


Figura 1. Área de estudio correspondiente a la Cuenca Alta del Río Balsas.

El límite de la cuenca se derivó a partir del modelo de elevación digital y el programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool; DiLuzio *et al.*, 2002). Para la región se consideraron las exigencias ambientales de dos pinos de distribución local (*Pinus leiophylla* Schiede & Deppe y *P. ayacahuite* Ehrenberg & Schltldl.) y otro introducido (*P. greggii* Engelm.) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Requerimientos por especie de los pinos estudiados.

Variable	<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus greggii</i>
Precipitación total anual (mm)	600-1500	700-1000	700-1000
Temperatura media anual (°C)	10-17	12-16	13-18
Altitud (msnm)	2000-3000	2500-3000	2200-2600
Suelo	Delgado	Delgado	Delgado

El estudio consistió en comparar la zonificación para dichas especies forestales, con base en sus requerimientos climáticos y edáficos, estimando las variables de precipitación y temperatura mediante:

- a) El promedio de los datos
- b) La probabilidad al 80% para un valor \geq por medio de la distribución acumulativa, a partir de la fórmula para datos ordenados (Ortiz, 1987):

$$F = \frac{N}{n + 1}$$

Donde:

N = número de orden en la serie ordenada

n = número de años

F = probabilidad de ocurrencia de una cantidad de lluvia mayor o igual a un valor establecido.

- c) La probabilidad al 80% para un valor \geq con la distribución normal, de acuerdo a la función:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \cdot 2\pi} e^{-1/2(X-\bar{X})^2/\sigma^2}$$

Donde:

σ = Desviación estándar

\bar{X} = Media

e = Base de los logaritmos neperianos

π = 3.1416

Para el inventario climático se seleccionaron 35 estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca, con más de 20 años de datos regulares. Con los datos de las estaciones meteorológicas se generaron capas continuas de temperatura media anual y precipitación total anual; se aplicó el método de interpolación Inverso de la Distancia al cuadrado (IDW2) con el apoyo de seis estaciones cercanas mediante el programa de ARC/INFO 8.3, debido a que es el de tiene menor error en la interpolación de este tipo de variables.

Además, se creó un inventario edáfico mediante la digitalización en el programa ARC/INFO versión 4.1 de 11 cartas edafológicas 1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de los años 1982 y 1983. En la parte sur de la cuenca, donde no existió información a esta escala, se utilizó una carta 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática correspondiente a 1983. La información incluida fue: unidad de suelo, textura, fases químicas y físicas.

Otras variables consideradas en la determinación de zonas aptas, fueron la altitud, tomada directamente del modelo de elevación digital (MED), del INEGI con un píxel de 50 x 50 m y la pendiente derivada del MED.

Una vez realizados los inventarios climáticos y edáficos, se procedió a delimitar las áreas Muy Aptas (MA). Esto se llevó a cabo por medio de sobreposición de los mapas de aptitud del clima con los mapas de aptitud del suelo de acuerdo a los requerimientos de cada especie (Cuadro 1) mediante los sistemas de información geográfica ARCGIS 8.3 y ARCVIEW 3.2. Finalmente las áreas de aptitud de cada una de las especies evaluadas se superpusieron con la carta del

uso de suelo del 2002 (López, 2005), generada en un estudio simultáneo para evitar recomendar alguna especie en un territorio que tenga otro uso.

Con la finalidad de conocer si existían diferencias entre las áreas aptas de cada especie de pino por tipo de distribución se hizo un análisis de varianza y una prueba de medias por Tukey, en el que se tomaron las distribuciones como tratamientos y la superficie de cada especie como repetición.

Se realizó una comparación para *P. leiophylla* entre el área potencial para su establecimiento y el uso del 2002, con la finalidad de determinar cuanta área forestal se ha perdido por cambio de uso.

RESULTADOS

Las superficies aptas para las tres especies de pino se ubicaron principalmente en las faldas de los volcanes (Popocatepetl, Ixtaccihualtl y La Malinche) y, de acuerdo al análisis de varianza, siempre fueron significativamente mayores (al 5%) cuando se utilizaron valores promedio de temperatura y precipitación (cuadros 2 y 3); lo que indica que el área apta varía cuando se calculan la temperatura y la precipitación mediante distribuciones probabilísticas y datos promedio, sobreestimándose con esta última debido a que los datos promedio anuales no reflejan los cambios que se presentan a través de los años, o durante el ciclo de vida de un taxón.

Los resultados de la prueba de medias por Tukey para las áreas de alta aptitud fueron estadísticamente iguales para las dos distribuciones usadas, pero diferentes a los valores obtenidos con la media, en las variables de temperatura y precipitación (Cuadro 4).

En general, los datos de precipitación estimados a una probabilidad del 80% con las distribuciones tuvieron valores más bajos que redujeron las áreas al regionalizar. Algo similar ocurrió con la temperatura al utilizar las distribuciones, lo que hace más restrictiva la zonificación; como ejemplo se muestra *P. ayacahuite* (Figuras 2, 3 y 4).

Los resultados de zonas aptas para las variables calculadas por probabilidad al 80%, mediante la distribución normal siempre estuvieron por abajo de las estimadas con la distribución acumulativa. Sin embargo, para *P. leiophylla* la superficie muy apta determinada con la distribución acumulativa fue solamente superior en 20 ha, que representó menos de 0.1%, lo cual hace posible inferir que no importa la distribución que se use, la zonificación de *P. leiophylla* es muy similar; una posible explicación para dicho comportamiento es el amplio rango en los requerimientos ambientales de esta especie (Cuadro 1).

Cuadro 2. Superficies muy aptas para las especies forestales evaluadas.

Distribución	<i>Pinus leiophylla</i>		<i>Pinus greggii</i>		<i>Pinus ayacahuite</i>	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Promedio	4,028	1.7	6,371	2.6	6,891	2.8
Acumulativa	3,543	1.5	1,891	0.8	1,378	0.6
Normal	3,523	1.4	1,684	0.7	825	0.3

Cuadro 3. Análisis de varianza entre datos promedio y distribuciones.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrado medio total	Cuadrado medio del error	Probabilidad F.	R ²
Modelo	2	26,350,871.24	13,175,435.62	0.0256	0.70
Error	6	11,012,597.95	18,355,432.99		
Total	8	37,363,469.20			

Significancia: $\alpha = 0.05$.

Cuadro 4. Prueba de medias por método para obtener valores de precipitación y temperatura.

Método	Media	Grupo
Promedio	5,763	A
Distribución acumulativa	2,271	B
Distribución normal	2,011	B

Valores con la letra similar son estadísticamente iguales (Tukey $\alpha = 0.05$).

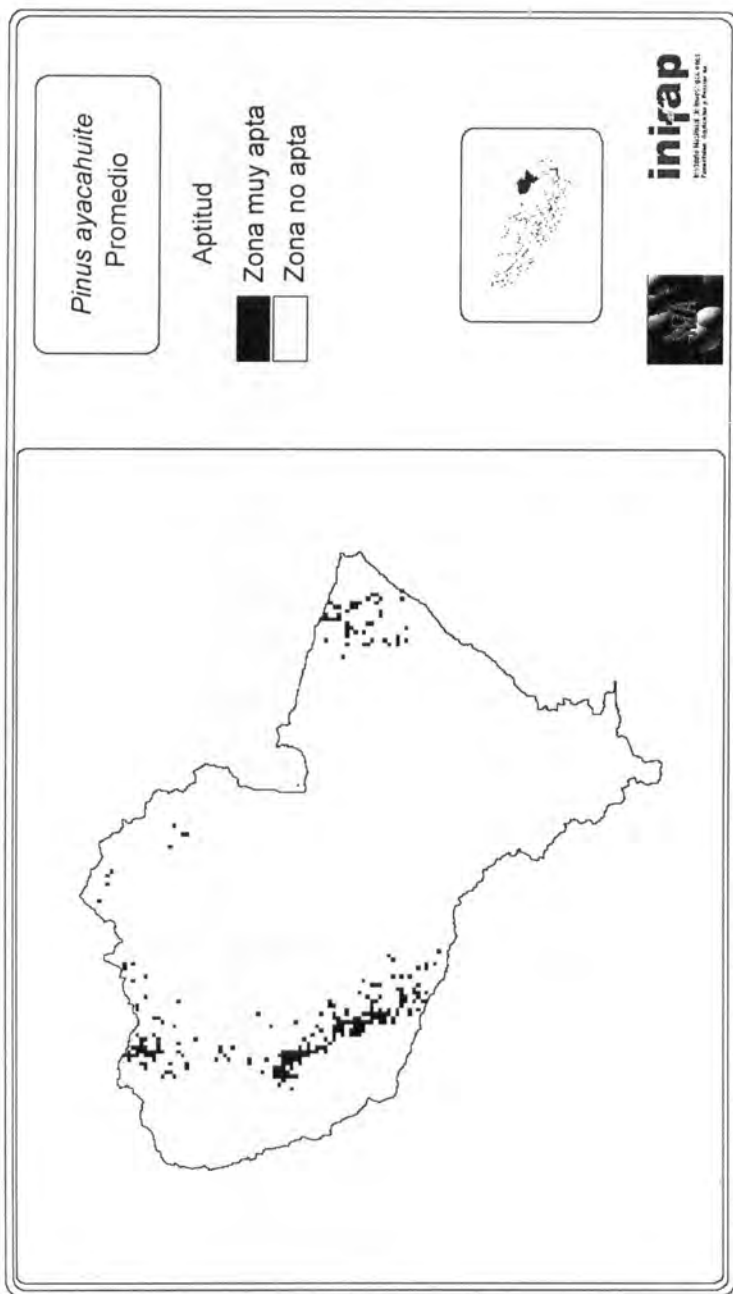


Figura 2. Zonas aptas para *Pinus ayacahuite* con datos promedio.

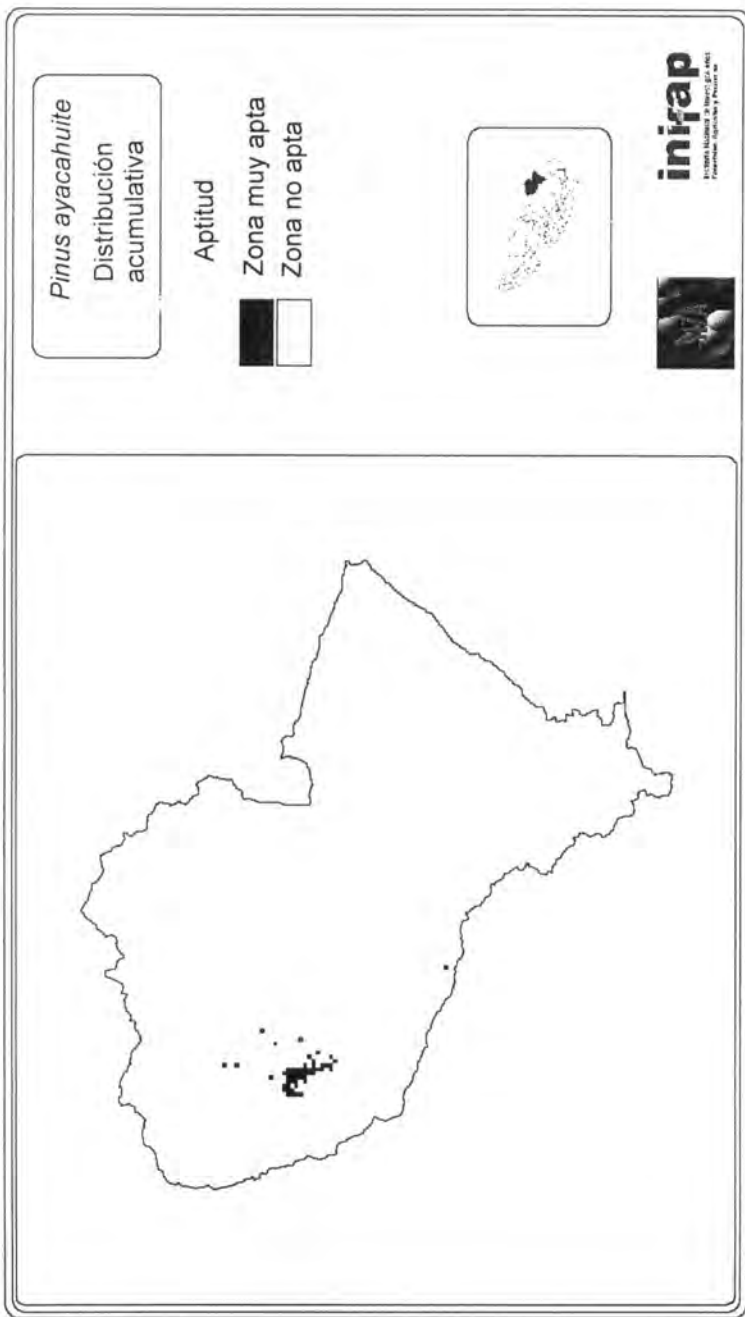


Figura 3. Zonas aptas para *Pinus ayacahuite* con distribución acumulativa.

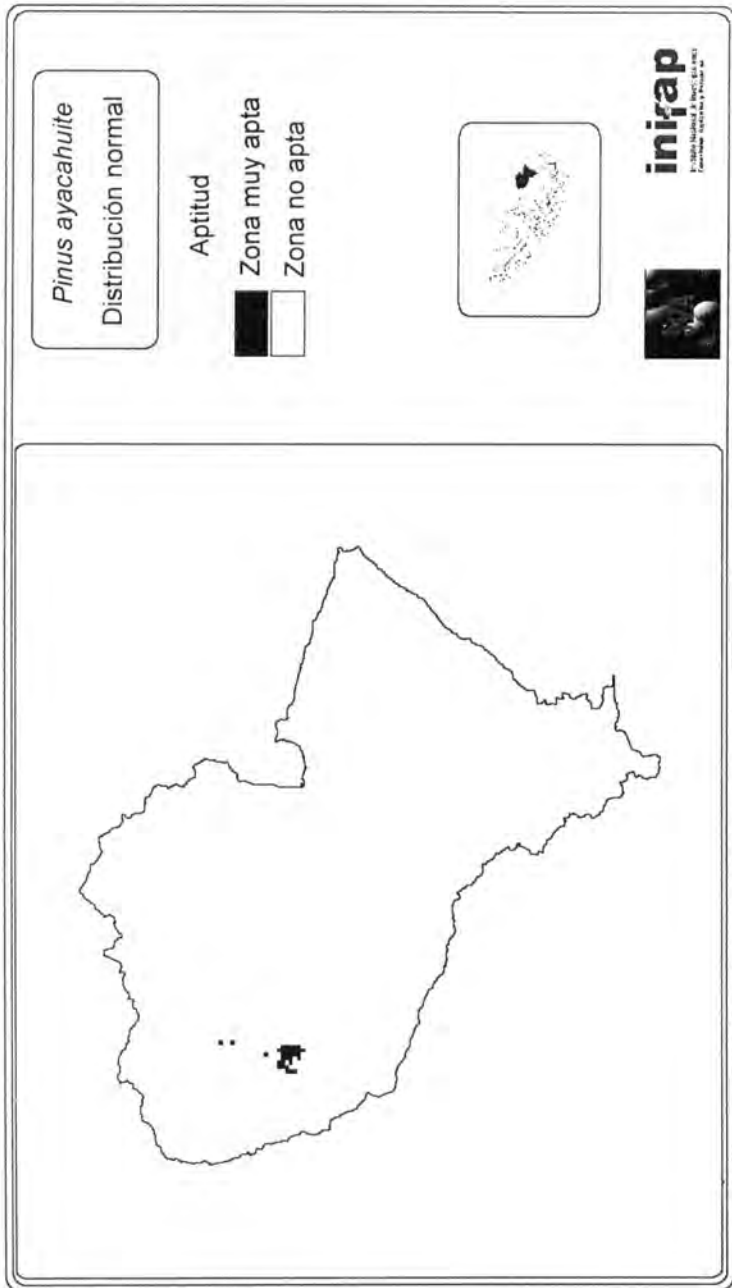


Figura 4. Zonas aptas para *Pinus ayacahuite* con distribución normal.

En *P. greggii* existió una diferencia de 207 ha entre ambas distribuciones, que equivale también a un 0.1% de la superficie de la cuenca; por ello, al igual que en *P. leiophylla*, parecería ser indistinto el tipo de distribución usado para definir la aptitud de las zonas para *P. greggii*.

En *P. ayacahuite* las diferencias fueron mucho más apreciables dependiendo del tipo de distribución utilizada; así con la acumulativa se obtuvieron 553 ha más de alta aptitud que con la normal, lo que corresponde a 0.3% de la superficie total de la cuenca.

Cuando se hizo la comparación de áreas aptas para la tres especies con referencia a las 67,283 ha con uso de suelo forestal (2002) se encontró que, con el promedio se estimó casi tres veces más área apta para los tres pinos en conjunto que al utilizar las distribuciones normal y acumulativa (Cuadro 5).

De *P. ayacahuite* se delimitaron 6,066 ha más de alta aptitud al usar los valores promedio que por medio de la distribución normal, lo que representó 88% de diferencia entre ambas formas de ubicar zonas aptas. Con la distribución acumulativa la diferencia fue de 5, 513 ha que fue equivalente a 80% del área obtenida con datos medios (Cuadro 5). Al comparar el área forestal de la cuenca, las diferencias entre los valores promedio y las distribuciones empírica y normal fueron de 8.2 y 9%, respectivamente.

Cuadro 5. Áreas aptas para tres especies de pino en la superficie forestal del 2002.

Distribución	<i>Pinus leiophylla</i>		<i>Pinus greggii</i>		<i>Pinus ayacahuite</i>	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Promedio	4,028.0	6.0	6,370.9	9.5	6,891.4	10.2
Acumulativa	3,542.7	5.3	1,890.6	2.8	1,378.3	2.0
Normal	3,523.3	5.2	1,683.8	2.5	825.0	1.2

En *P. greggii* se estimaron 4,687 hectáreas más de alta aptitud por medio de los valores promedio que con la distribución normal, lo que significó 73.6% de diferencia entre ambas. Con la distribución acumulativa la diferencia fue de 4,480 ha que constituye 70% del área obtenida con datos medios (Cuadro 5).

Las variaciones en porcentaje fueron de 6.7% para la distribución acumulativa y de 7% para la distribución normal al compararlas con el área apta para *P. greggii* cuando se hizo con base en la superficie del 2002.

En *P. leiophylla* las diferencias en áreas de aptitud definidas con las distribuciones acumulativa y normal *versus* los valores promedio nunca superaron las 500 ha que representan 15% del área y si se comparan los porcentajes de la superficie forestal del 2002, no superaron 1%. De lo anterior se infiere que para *P. leiophylla* los valores medio de la temperatura y precipitación pueden ser suficientes para determinar las áreas aptas de dicha especie por la aptitud de sus requerimientos.

Al hacer una comparación de especies en relación a la extensión total de la distribución natural de la cuenca, el *P. ayacahuite* ocupó la mayor superficie con 6,891 ha, que equivale a 2.8% de la misma. El segundo lugar lo ocupó *P. greggii* con 6,371 ha (2.6%), menor al anterior en 520 ha y en 0.2% entre ambas especies. Cabe aclarar que *P. greggii* no es una especie local, pero puede ser introducida para plantaciones forestales.

Finalmente, se contrastó el área potencial para *P. leiophylla*, con la que es posible establecer en la zona forestal del 2002. Resultó que la superficie actual ocupada por la especie con valores promedio, distribución normal y acumulativa constituyen aproximadamente 10% de la potencial, lo que indica una pérdida de uso potencial forestal de la cuenca.

Cuadro 6. Superficie potencial y del 2002 para *Pinus leiophylla*.

Distribución	Potencial		2002	
	Área (ha)	Porcentaje %	Área (ha)	Porcentaje %
Promedio	45,317.95	18.6	4,027.98	1.6
Normal	36,630.96	15.0	3,542.69	1.5
Acumulativa	37,261.86	15.3	3,523.27	1.4

Si se confronta la superficie potencial y la del 2002 con el área total de la cuenca, las diferencias para los valores promedios es de 17%, para la distribución normal de 13.5% y por último la variación para la distribución acumulativa de 13.9%.

CONCLUSIONES

La precipitación y temperatura se estiman mejor mediante distribuciones para su uso posterior en la determinación de zonas aptas para las especies de pino estudiadas.

Al evaluar la aptitud de las especies forestales, se obtienen las mayores superficies cuando se incorporan los promedios anuales; las menores áreas fueron obtenidas con las probabilidades a 80% en las distribuciones normal y acumulativa.

De acuerdo con la evaluación, *Pinus leiophylla* presenta la mayor cobertura dentro de la cuenca, lo que representa 1.5%, en el caso de las distribución acumulativa.

La superficie forestal se ha reducido en 90% aproximadamente, si se considera la aptitud potencial que tiene la cuenca, con las consideraciones realizadas en este trabajo sobre la superficie del 2002.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Sistema Regional de Investigación Zaragoza-CONACYT (SIZA) con clave de proyecto: 20020803003C.

REFERENCIAS

- Castro Z., R y R. Arteaga R. 1993. Introducción a la meteorología. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 275 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA).2004. Estadísticas del agua en México. Edición 2004. CNA. México.141 p.
- DiLuzio, M., R. Srinivasan and J. G. Arnold. 2002. Arcview Interface for SWAT2000 User's Guide. USDA, Agricultural Research Service. Temple, Texas. 345 p.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1981. Report on the agroecological zones project, Vol. 3. Methodology and results for South and Central America World Soil Resources Report 48/3. Rome, Italy. 132 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM. México, D. F. 246 p.
- López, F. 2005. Determinación del cambio de uso del suelo en la Cuenca Alta del Río Balsas, Región Puebla-Tlaxcala. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 49 p.
- Lozano T., S. 1996. Simulación de uso potencial bajo modelos de interpolación espacial y temporal de variables de clima en sistemas de información geográfica. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Chih. 191 p.

- Meza S., R. y D. D. Reygadas P. 2001. Áreas potenciales y tecnología de producción de cultivos en el Valle de Santo Domingo, B.C.S. Publicación Técnica No.1. SAGARPA-INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Todos Santos. La Paz, B.C.S. México. 133 p.
- Ortiz S., C. A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. 3ª edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 327 p.
- Ortiz, V. M. y J. Ruiz V. 1987. Climatología aplicada. Manual del curso de orientación para aspirantes a investigadores del INIFAP. INIFAP. SARH. Calera, Zacatecas, México. 256 p.
- Rivera, Z. J. 2003. Zonas con aptitud edafoclimática para el cultivo de hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) e incidencia de la enfermedad sudamericana de la hoja en el estado de Tabasco, México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 96 p.
- Urbano T., P. y C. Rojo H. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Ed. Mundi-prensa. Madrid, España. 870 p.
- Villalpando I., J. F. 1985. Metodología de investigación en agroclimatología. Manual del Curso de Orientación para aspirantes a investigadores del INIFAP. SARH. Zapopan, Jal. México. 183 p.