

MODELOS DE REGENERACION Y MORTALIDAD PARA Pinus arizonica Engelm.

Fabián ISLAS GUTIERREZ (1)
Martín A. MENDOZA BRISEÑO (2)

RESUMEN

Se presentan dos modelos matemáticos que estiman respectivamente la regeneración y la mortalidad no catastrófica del Pinus arizonica Engelm.

Los datos con los que se realizó el trabajo, se obtuvieron de un bosque que ha estado en aprovechamiento maderable durante un gran período de tiempo bajo diferentes sistemas silvícolas y que cuenta con la información histórica sobre los tratamientos aplicados, de tal forma que se pudo suplir satisfactoriamente la carencia de sitios permanentes.

Se utilizó regresión lineal para ajustar los modelos obteniéndose en el caso de la regeneración un coeficiente de determinación (R^2) de 0.73 y en el de la mortalidad un $R^2 = 0.58$.

INTRODUCCION

El desarrollo de rodales se compone de varios procesos interrelacionados, siendo los más importantes la regeneración, el crecimiento y la mortalidad. De los tres, el crecimiento es el que ha recibido mayor atención referente a la elaboración de modelos de predicción del comportamiento, quedando relegados a un segundo plano la regeneración y la mortalidad, lo cual demerita las predicciones que se obtienen con ellos.

La construcción de modelos que predicen el desarrollo de masas forestales ha cobrado importancia paulatinamente en México, lo cual se refleja en la cantidad de trabajos realizados en los últimos años. Desafortunadamente, la inclusión en ellos de rutinas demográficas es prácticamente nula, situación que hace muy rígidos los modelos hasta la fecha reportados.

Uno de los últimos trabajos realizados en el país sobre predicción del crecimiento de rodales, es el elaborado por Mendoza (1985). Sin embargo, este trabajo carece de una rutina de regeneración y la de mortalidad está basada en elementos arbitrarios, factores que afectan la confiabilidad de sus predicciones a largo plazo.

- (1) Investigador adjunto, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias.
- (2) Profesor-Investigador, programa Forestal, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Como una continuación al trabajo de Mendoza (1985) y debido a la necesidad de construir modelos que representen fielmente el desarrollo de las masas arbóreas, se planteó el presente trabajo con el objetivo de elaborar dos modelos que permitan predecir la regeneración y la mortalidad no catastrófica del Pinus arizonica engelm.

REVISION DE LITERATURA

1. Modelo de regeneración.

Las experiencias sobre modelos matemáticos para predecir la presencia de regeneración son en extremo reducidas y de ellas no se puede hablar propiamente de simular el proceso de regeneración, sino de estimar un número de brinzales establecidos de ciertas características bajo determinadas condiciones de sitio y rodal. De acuerdo con la clasificación de Mendoza (1983), los trabajos reportados se pueden considerar como modelos predictores, los cuales aunque irrealistas, dado que no describen propiamente el proceso, reproducen las principales características del comportamiento de la variable de respuesta, basados en la estructura de modelo que mejor la represente.

De los modelos reportados, los hay que predicen el establecimiento de regeneración obtenida sexualmente (Leak y Graber; 1976, Ferguson y Crookston, 1984) o bien en forma asexual (Ek y Brodie, 1975), habiéndolos también que utilizan plantaciones para incorporar nuevos árboles al rodal (Nevárez, 1986).

Las estrategias seguidas para estimar la regeneración se han basado principalmente en el uso de técnicas de regresión tanto con modelos lineales (Leak y Graber, 1976) como con no-lineales (Stage y Ferguson, 1982; Ferguson et al., 1986) aunque también se han desarrollado modelos tipo Monte Carlo (Fox et al., 1984), siendo éstos los menos confiables debido a la serie de suposiciones en que se basan.

Las experiencias en México sobre modelos de crecimiento son reducidas. En ellos la inclusión de rutinas de regeneración ha sido prácticamente olvidada. En las tres tablas de producción realizadas: Garzón (1976), Carrillo (1984) y Torres (1984), se han asumido una densidad de regeneración arbitraria a partir de la cual se proyecta el crecimiento del arbolado.

De los modelos reportados, Franco y Zarukhán (1979) incorporan árboles multiplicando por 0.7 el número de veces que la cobertura de un árbol de 10 años de edad cabría en la cobertura de un individuo de edad $i > 10$, cuando dicho árbol muriera. Cano y Nevárez (1979) asumen el establecimiento de 10,000 brinzales por hectárea bien distribuidos a 10 años de ejecutada la corta de regeneración. Mendoza (1986) considera 7,500 brinzales por hectárea de un año de edad establecidos durante los cuatro primeros años después de ejecutada la corta de regeneración o bien una densidad arbitraria cuando se utilizan plantaciones.

2. Modelos de mortalidad

Debido a lo complejo del proceso, representar la mortalidad es difícil; sin embargo, su inclusión en los modelos que simulan el desarrollo de masas forestales es necesario.

El problema en los modelos de mortalidad estriba en que si bien se tiene detectados los agentes que pueden ocasionar la muerte, es difícil, en la mayoría de los casos, determinar con exactitud cuál fué la causa que mató al árbol ya que dichos agentes generalmente actúan en forma conjunta. Por otra parte, la respuesta de árboles con características fenotípicas similares a un mismo factor pueden ser diferentes, pues ésta depende en gran medida de la constitución genética que tenga cada individuo.

Las estrategias seguidas para la elaboración de modelos de mortalidad han sido de forma diversa. Bruner y Moser (1973) utilizan un modelo Markoviano para hacer la proyección del crecimiento de árboles en rodales incoetáneos, en el cual la matriz de transición refleja la probabilidad de sobrevivencia entre una categoría diamétrica y otra. Keister y Tidwell (1975) emplean también un modelo markoviano para hacer producciones de mortalidad en base a un índice de competencia.

Otros modelos hacen estimaciones de mortalidad aplicando ecuaciones deterministas como es el caso de Botkin *et al* (1972) que asigna valores arbitrarios de sobrevivencia basados en el incremento en diámetro y la edad máxima que alcanza la especie. Wykoff *et al* (1982) predice la mortalidad conjugando tres modelos que se aplican según las condiciones de densidad de rodal y el diámetro el árbol de interés, tratando con ello de representar el fenómeno en una forma más realista.

La corriente principal en cuanto a tipo de modelos, es la que hace predicciones en base a funciones empíricas ajustadas con técnicas de regresión, las cuales incluyen desde modelos sencillos como el de Keister (1972) que utiliza regresión lineal simple para identificar árboles con alta probabilidad de morir, hasta ecuaciones más elaboradas en las cuales es necesario utilizar regresión no-lineal, como los trabajos de Monserud (1976) Buchman *et al* (1983) y Zuuring *et al* (1984).

En los trabajos reportados en México sobre modelos de crecimiento, la mortalidad no ha sido considerable en ninguno de ellos, excepto Mendoza (1985) donde la mortalidad es una función arbitraria ligada a densidad, tamaño del árbol, senilidad y normalidad.

METODOLOGIA

1. Area de estudio

Para realizar la presente investigación, se localizó un bosque que haya estado bajo aprovechamiento maderable durante un gran período de tiempo y que contará con los registros sobre fechas y ubicación de los diferentes tratamientos efectuados con el fin de poder suplir la carencia de tiempo que se necesita para seguir los resultados que se obtienen de aplicar un determinado tratamiento silvícola.

Estas características las cumple satisfactoriamente el área arbolada del ejido Retiro y Gumeachi, razón por la cual se eligió trabajar en él. Dicho predio se localiza en el municipio de Bocoyna, Chihuahua, dentro de la Unidad de Administración Forestal # 5, del Organismo Público Descentralizado Productos Forestales de la Tarahumara.

2. Toma de datos

La toma de datos se realizó con un muestreo selectivo sobre la zona de estudio, buscando cubrir las diversas condiciones del sitio referente a exposición, pendiente y microtopografía, así como de la masa arbórea en cuando a densidad, etapa de desarrollo, altura y número de pisos. En cada condición se ubicó un punto al azar que se consideró como sitio de muestreo.

En cada sitio se contemplaron los aspectos de regeneración y mortalidad, sin embargo, en algunos de ellos no fue posible encontrar ambos fenómenos.

Las densidades de regeneración y mortalidad se estimaron utilizando métodos basados en las distancias entre los puntos ubicados al azar y los individuos de interés más cercanos. Específicamente, en el caso de la regeneración se eligió el método de cuadrante centrado en un punto y en el de mortalidad el denominado individuos más cercanos (Pieper, 1978).

En el caso de la regeneración, para considerar a un brinzal como contable, debería tener las siguientes características: (1) altura total, entre 0.3 y 1.3 m, (2) dominando a los brinzales vecinos y a la vegetación herbacea, (3) follaje suficiente para sobrevivir y (4) verticilos bien diferenciados.

Debido a que durante la toma de datos se muestrearon sitios que ya tenían establecida la regeneración, fué necesario reconstruir el escenario que propicio su establecimiento.

En la muestra de mortalidad, se incluyeron únicamente árboles que a juicio de los autores hubieran muerto durante el último período de crecimiento o bien que estuvieran a punto de morir. Para lograrlo se consideraron los siguientes aspectos: (1) que estuvieran en pié, (2) que tuvieran hojas en la copa y (3) que la madera no tuviera indicios de pudrición.

3. Obtención de modelos

Para obtener los modelos que mejor estiman los fenómenos en estudio se utilizó regresión lineal, probando diferentes modelos tanto en estructura como en variables que lo forman, teniendo como variable dependiente la distancia entre el punto elegido al azar y los árboles de interés más cercanos.

Posteriormente, se hizo la transformación de estas distancias hacia densidad de regeneración y mortalidad, entendiéndose por lo anterior al área en la cual se localiza al menos un brinzal contable o bien un árbol muerto.

Para estimar el tiempo que transcurre desde el momento que se crean las condiciones propicias para el establecimiento de la regeneración y el momento en que la regeneración se considera establecida, se obtuvo el promedio de edad que tienen los brinzales de 0.3 m de altura. El resultado de esta medida fue de 5 años, es decir 5 años después que se crea la condición empezarán a aparecer brinzales en el sitio.

Un aspecto necesario de considerar, es que no todos los brinzales que forman la regeneración se establecen el mismo año, sino que existe un período de tiempo en el cual esto sucede.

La forma en que se abordó lo anterior fue obtener para cada sitio la diferencia de edades entre el brinzal más joven y el más viejo para posteriormente calcular la medida de estas diferencias, la cual fue de 4 años. Este valor se utilizó como período en el que se establece la regeneración asumiendo que en cada años se establece la misma cantidad. Por lo tanto el valor de la superficie regenerada se multiplicó por cuatro para obtener la densidad anual de regeneración.

RESULTADOS

En el caso de la regeneración el modelo que dió los mejores ajustes estadísticos y que hacia las mejores estimaciones fue:

$$\begin{aligned} \text{DISTANCIA R} = & -0.047007 + 0.01511 \text{ AB} + 0.227216 \text{ PENDIENTE} \\ & (0.6968) \quad (0.0013) \quad (0.0347) \\ & + 8.67727 \tan \text{ PENDIENTE} (\cos \text{ AZIMUT}) \\ & (3.0390) \\ & + 3.175519 \text{ MICROTOPO} \\ & (1.8074) \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.73 \quad n = 91 \quad S^2 = 12.87$$

donde.

DISTANCIA R = Distancia al brinzal más cercano (m).

AB = Área basal del arbolado adulto (m^2/ha).

PENDIENTE = Pendiente del sitio (%)

AZIMUT = Azimut

MICROTOPO = Microtopografía del sitio

Los resultados que se obtienen con el modelo indican que el *Pinus arizonica* Engelm. no tiene grandes problemas para su regeneración. Esta se presenta abundantemente en un rango de 0-10 m²/ha de área basal para sitios con poca pendiente y en un número bajo en densidades entre 10-30 m²/ha, lo cual concuerda con lo reportado sobre el grupo ponderosa por Fowells (1965), Schubert (1974) y Ronco y Ready (1983). Es decir la especie puede ser regenerada con silvicultura de tipo coetáneo pues el reducir la densidad del arbolado adulto la densidad de regeneración es alto o bien con sistemas incoetáneos ya que en este caso el número de brinzales que se establecen es bajo, tal y como es el objetivo del método. En la Figura 1, la regeneración se representa por el número de brinzales establecidos por unidad de superficie, de tal forma que a mayor número de brinzales, la densidad de regeneración es mayor.

Con respecto a la variable pendiente del terreno, se observa en la Figura 1 que no es una limitante significativa abajo del 15% para rangos de densidad entre 0-5 m²/ha de área basal. Sin embargo, para valores superiores al 15% de pendiente, el establecimiento de la regeneración sí se ve limitado.

La orientación de la pendiente provoca diferentes condiciones de sitio. De acuerdo con los resultados del modelo, las exposiciones sur son más favorables para el establecimiento de la regeneración del *Pinus arizonica*, lo cual indica que es una especie que prefiere condiciones soleadas para su establecimiento.

En general, la microtopografía del área de estudio es uniforme, sin embargo, existen lugares con microtopografías irregulares caracterizadas por la presencia de grandes piedras y rocas que obligan a que la regeneración se establezca en las pequeñas islas de suelo que existen entre las rocas. Debido a lo anterior cuando la microtopografía del terreno es irregular, las densidades de regeneración son bajas aún para condiciones favorables en otros sentidos.

Debido a las variables que lo forman, el presente modelo es sensible a tratamientos silvícolas, lo que en cierto modo lo hace superior a aquellos en los que no se introducen variables que indiquen densidad del arbolado adulto como el de Leak y Graber (1976). Sin embargo, es necesario complementarlo con una ecuación que estime el crecimiento en altura de los brinzales y hacer una mejor aplicación de la variable tiempo como en el trabajo de Ferguson *et al* (1986).

En el caso de la mortalidad, se escogió un modelo de tipo exponencial, el cual fue linealizado. La ecuación resultante fue:

$$\begin{aligned} \text{Ln (DISARMU)} = & 3.67155 + 0.921912 \text{ Ln (DIAMUER)} - 0.031269 \text{ AB} \\ & (0.3217) \quad (0.1047) \quad (0.0069) \\ & - 0.00270162 \text{ ABAC} - 0.010963 \text{ PENDIENTE} \\ & (0.0013) \quad (0.0037) \end{aligned}$$

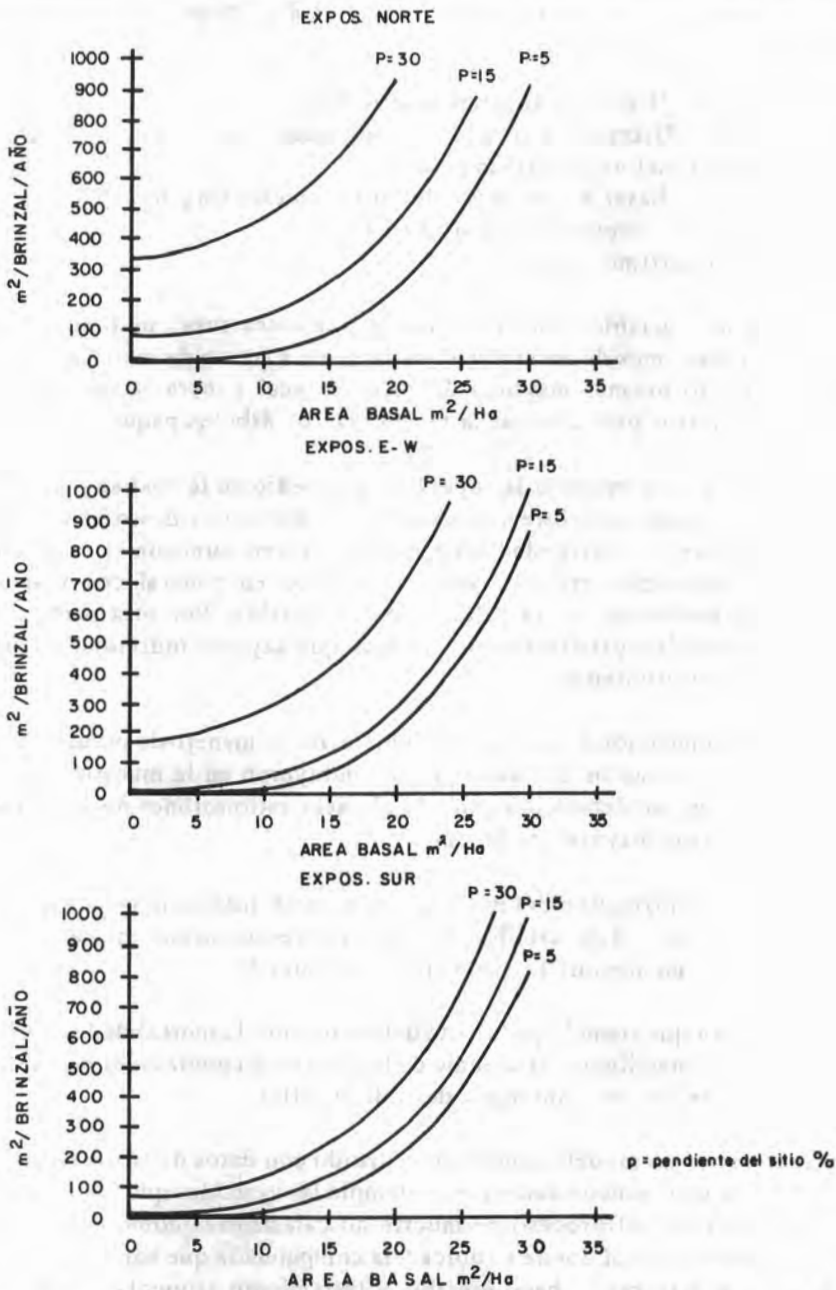


Figura 1. Densidades de regeneración estimadas al 5o. año después de creada la condición propicia para el establecimiento de los brinzales, bajo diferentes condiciones de área basal del arbolado adulto, pendiente y exposición en sitios con microtopografía uniforme.

$$R^2 = 0.58 \quad n = 119 \quad S^2 = 0.46$$

Donde

DISARMU = Distancia al árbol muerto (m)

DIAMEUR = Diámetro normal del árbol muerto (cm)

AB = Area basal del rodal (m^2/ha)

ABAC = Area basal acumulativa del árbol muerto (m^2/ha).

PENDIENTE = Pendiente del sitio (%).

Ln () = Logaritmo natural (.)

Debido a las variables que lo forman y a la estructura que tiene, el presente modelo hace estimaciones de mortalidad unicamente a partir de que el arbolado toma valores de diámetro normal mayores de cero, lo cual genera la necesidad de una investigación posterior para estimar la mortalidad de árboles pequeños.

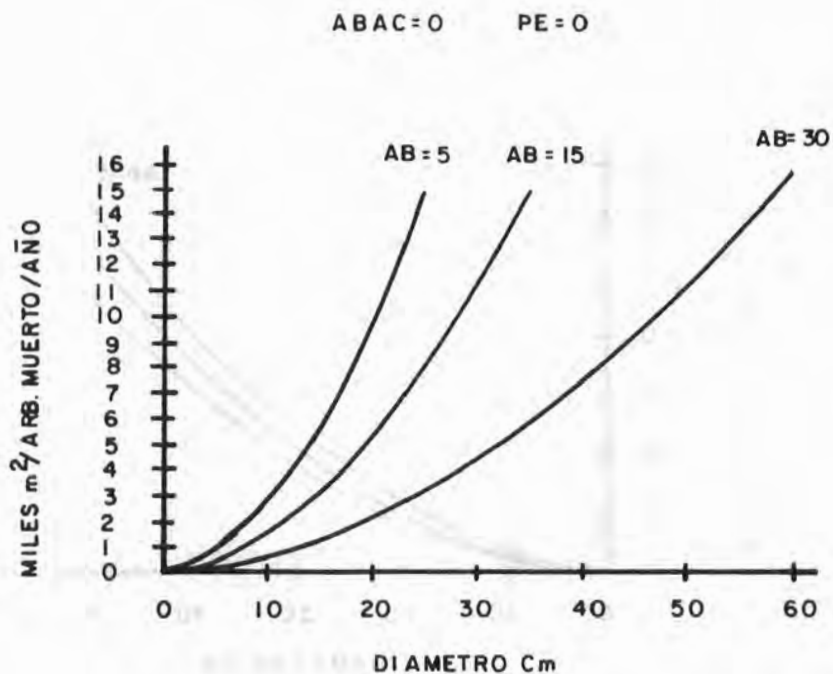
En la Figura 2, se muestra la superficie promedio en la cual se puede localizar un árbol muerto por año, para diferentes valores de diámetro y de area basal del rodal. Como era de esperar, la mortalidad disminuye conforme aumenta el diámetro de los árboles ya que entre más grandes son, su posición en general con respecto a la competencia por nutrientes, agua y luz es más favorable. Por otra parte a mayores valores de área basal la mortalidad aumenta dado que hay mas individuos compitiendo por factores que son limitados.

Es necesario mencionar que debido al historial de manejo de predio y de la zona en general donde se tomaron los datos, no se incluyeron en la muestra árboles en la etapa senil por lo que se debe tener cuidado al hacer estimaciones de mortalidad para árboles con diámetros mayores de 80 cm.

Un aspecto significativo del modelo es su sensibilidad a la posición que tienen los árboles en el rodal. Los árboles dominantes tienen menor mortalidad que los intermedios y estos menor que los suprimidos (Figura 3).

La influencia que tiene la pendiente del sitio sobre la mortalidad se puede deber a que al aumentar la pendiente, el drenaje de la zona crea condiciones mas secas en las cuales no es posible que se mantengan densidades altas.

A pesar de ser un modelo sencillo construido con datos de sitios temporales, se considera que este es adecuado dado que contempla las variables que la literatura marca como determinantes en el proceso de muerte no catastrófica como es el tamaño del árbol, la densidad del rodal donde se ubica y la competencia que soporta. La inclusión de las variables anteriores lo hace sensible a tratamiento silvícolas. A pesar, de lo anterior es recomendable tener en mente que la mortalidad es un evento sumamente complejo debido a la cantidad de factores que intervienen por lo que hacer estimaciones con información de sitios temporales debe ser un paso inicial que deberá superarse con el establecimiento de parcelas permanentes.

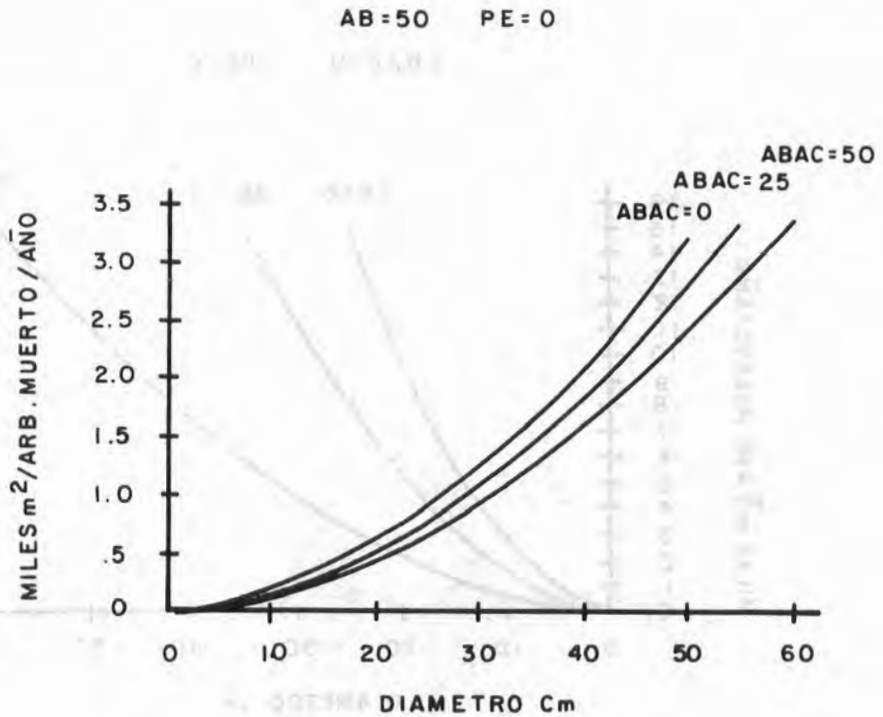


AB = área basal m^2/h

ABAC = área basal acumulativa m^2/ha

PE = pendiente %

Figura 2. Mortalidad anual estimada para diferentes valores de diámetro normal y área basal del rodal, para árboles con área basal acumulativa de cero, ubicadas en sitios con cero por ciento de pendiente.



AB = área basal m²/ha
 ABAC = área basal acumulativa m²/ha
 PE = pendiente %

Figura 3. Mortalidad anual estimada para árboles de diferente diámetro y área basal acumulativa, en rodales con 50 m²/ha de área basal y cero por ciento de pendiente.

Para un análisis detallado de este trabajo es necesario incorporarlo al modelo que hace crecer los árboles para poder seguir la dinámica de rodales específicos y ver cuál es la disminución que se tiene tanto en número de árboles como en área basal y que tipo de arbolado desaparece del rodal.

CONCLUSIONES

1. Aunque las predicciones de los modelos son acordes con el conocimiento teórico sobre la regeneración y mortalidad del Pinus arizonica Engelm, es necesario un proceso de validación de los resultados cuantitativos que se obtienen.
2. La inclusión de los modelos de regeneración y muerte al modelo de crecimiento elaborado por Mendoza (1985), permitirá conocer más a detalle el desarrollo de rodales naturales de Pinus arizonica Engelm.
3. Se recomienda el establecimiento de parcelas permanentes bajo un amplio rango de condiciones de rodal y de sitio que permitan en un futuro tener un mejor banco de datos para la construcción de nuevos modelos.

LITERATURA CITADA

- BOTKIN, D.B., JANAK, J.F. y J.R. WALLIS. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*. 60:849-872.
- BRUNER, H. D. y J.W. MOSER Jr. 1973. A markov chain approach to the prediction of diameter distribution in uneven-aged forest stands. *Can J. For Res.* 3:409-417.
- BUCHMAN, R.G., PEDERSON, S.P. y N.R. WALTERS. 1983. A tree survival model with application to species of the great lakes region. *Can J. For. Res.* 13:601-608.
- CARRILLO, E.G. 1984. Elaboración de una tabla de producción empírica para rodales de Pinus montezumae Lamb, en el C.E.F. San Juan Tetla, Puebla. Tesis. UACH. Chapingo, Mex. 92 p.
- CANO, C.J. y D. NEVAREZ. 1979. Simulación a través del tiempo de algunos parámetros de crecimiento del Pinus douglasiana, Mimeo. 122 p. Anexos.
- EK, A.R. y J.D. BRODIE. 1975. A preliminary analysis of short rotation aspen management. *Cant. J. For. Res.* 5:245.258.
- FERGUSON, D.E. y N.L. CROOKSTON. 1984. User's guide to the regeneration establishment model a Prognosis model extension. U.S.D.A. For Serv. Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Gen. Tech. REP. INT-161. 23 p.

- FERGUSON, D.E., STAGE, A.R. y R.J. BOYD. 1986. Predicting regeneration in the Grand Fir Cedar-Hemlock Ecosystem of the northern Rocky Mountains. Forest Science Monograph 26. 41 p.
- FOWELLS, H. A. (Comp). 1965, Silvics of forest tree of the Unites States. US.D.A. Agric. Handb. 271. Washington DC. pp. 417-431
- FOX, J.D., J.C. ZASADA, A.F. GASBARRO y R. VAN VELDHUIZEN. 1984. Monte Carlo simulation write spruce regeneration after loggins in interior Alaska. Can. J. For. Res. 14:617-622.
- FRANCO, B.M. y J. SARA KHAN. 1979, Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. sub. Ftal. y de la Fauna. Serie Premio Nacional Forestal No. 1. 71 p.
- GARZON, R.G. 1976. Tabla normal de producción para Pinus hartwegii de la Estación Experimental Forestal Zoquiapan Tesis. ENA. Chapingo, México. 63 p.
- KEISTER, T.D. 1972. Predicting individual tree mortality in simulated souther pine plantations. Forest Science. 18 (3): 213-222.
- KEISTER, T.D. y G.R. TIDWELL. 1975. Competition ratio dynamics for improved mortality estimates in simulate growth of forest stands. Forest Science. 21 (1): 46-51.
- LEAK, W.B. y R.E. GRABER. 1976. Seedling input, death and growth in uneven-aged northern hardwoods. Can. J. For. Res. 6:368-374.
- MENDOZA, B. M. A. 1983. Conceptos generales sobre modelaje matemático. In: Primero Reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. INIF. Publicación especial No. 44. pp 35-45.
- , 1985. Response of ponderosa pine stands with a history of selective management to simulated even-aged silviculture. Ph. D. Thesis. University of Idaho. 172 p.
- MONSERUD, R.A. 1976. Simulation of forest tree mortality. Forest Scince. 22 (4): 438-444.
- NEVAREZ, CH. D.J. 1986. SIMSIL; Un modelo para simular el efecto de determinadas políticas de manejo silvícola en la dinámica de crecimiento de rodales coetáneos de Pinus douglasiana Mtz. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. 135 p.

- RONCO Jr. F. y READY, J. I. 1983. Southwestern ponderosa pine. In: Silvicultural systems for the major forest types of the United States. (R.M. Burns comp). U.S.D.A Agric. Handb. 445 Washington, D.C. pp 70-72.
- SCHUBERT, G. H. 1974. Silviculture of southwestern ponderosa pine: the status of our Knowledge, U.S.D.A. For. Serv. Rocky Mountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. RM-123. 71 P.
- STAGE, A. R. y D.E. FERGUSON. 1982. Regeneration modeling as a component of forest succession simulation. In: Menas, Joseph E., ed. Forest succession and stand development research in the northwest. Symposium, 1981 March 26; Corvallis, OR. Oregon State University. pp. 24-30.
- TORRES, R. J. M. 1984. Tablas de rendimiento de densidad variable para *Pinus hartwegii* Lindl. en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, Edo. de México. Tesis UACH. Chapingo, México 276 p.
- WYKOFF, W. R., CROOKSTON, N.L. y A.R. STAGE. 1982. User's guide to the stand prognosis model. U. S. D. A. For Serv. Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Gen. Tech. Rep. Int-133, 111 p.
- ZUURING, H R., TESCH, S. D. y J. L. FAUROT. 1984. Past tree spacing levels estimated by current stand conditions and past radial growth rates. Forest Science. 30 (1): 209-218.