

APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACION PARA PREDECIR LA RESPUESTA DE UN BOSQUE
TROPICAL AL APROVECHAMIENTO: UN CASO DE LOS LLANOS OCCIDENTALES VENEZOLANOS.

POR ROLY BALDOCEDA ASTETE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN GESTION DE RECURSOS NATURALES
RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE.

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACION AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA, VENEZUELA
1996

AGRADECIMIENTOS

Al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por haberme becado para seguir mis estudios de Postgrado.

Al CIDIAT, por sus conocimientos brindados y acogerme como alumno del Curso de Maestría.

Al Grupo de Investigación BIODSUS del Instituto de Silvicultura, por haber promovido la realización del presente trabajo.

Al Dr. Armando Torres Lezama, tutor del presente trabajo, por sus orientaciones y apoyo permanente.

Al Dr. Miguel Acevedo, por su asesoría y recomendaciones durante el proceso de formulación y ejecución del proyecto.

A la Ing For. M.Sc. Hirma Ramírez, por su permanente estímulo y apoyo incondicional en la realización del presente trabajo.

Al Ing M Sc. Miguel Cabeza, por su asesoría y apoyo constante.

Al personal del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Silvicultura y del CIDIAT por sus atenciones brindadas.

A todos que contribuyeron y me alentaron, muchas gracias.

INDICE

	Pag.
AGRADECIMIENTO.....	v
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE SIMBOLOS.....	xvii
RESUMEN.....	xix
Capítulo	
I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	3
Métodos de evaluación de impactos ambientales.....	4
La matriz de impactos.....	4
Técnica de superposición.....	4
Sistema Batelle.....	4
Plano de flujos.....	4
Modelos de simulación.....	4
Uso de modelos de simulación para la evaluación de efectos atribuibles al aprovechamiento forestal.....	6
Modelos de sucesión forestal.....	8
Modelos de base individual.....	9
Modelos de claros.....	10
La interacción entre los árboles individuales en el modelado espacial.....	10
Requisitos de los datos.....	12
Simulaciones.....	12
Estructura del modelo.....	12
Establecimiento o regeneración.....	14
Crecimiento.....	14
Mortalidad.....	16
Comprobación y capacidad de predicción de los modelos.....	16
Futuro de los modelos de base individual.....	17
Los modelos de base individual para bosques tropicales.....	18
Perspectivas.....	18
Modelo ZELIG. Versión 2.....	19
Base conceptual.....	19
El régimen de luz.....	19
El régimen del agua en el suelo.....	21
Formulaciones usadas en el modelo.....	21
Relaciones alométricas.....	21
Area foliar.....	23
Biomasa leñosa.....	23

INDICE (Continuación)

	Pag.
Crecimiento diamétrico.....	23
Extinción de luz.....	24
Respuesta a la luz.....	24
Humedad del suelo	24
Fertilidad del suelo.....	25
Temperatura.....	25
III. DESCRIPCION GENERAL DEL AREA.....	27
Ubicación y superficie.....	27
Altitud y topografía.....	27
Clima.....	27
Geología.....	30
Suelos.....	30
Vegetación.....	30
Historia.....	33
IV. METODOLOGIA.....	35
Descripción del área de estudio.....	35
Selección de especies.....	36
Agrupamiento de especies en grupos ecológicos.....	36
Estimación de valores de los parámetros.....	37
Cálculo de las relación alométrica altura-diámetro.....	38
Cálculo de las tasas de crecimiento.....	38
Estimación de los límites de tolerancia térmica.....	39
Ejecución preliminar del modelo	39
Preparación de los tratamientos o escenarios de aprovechamiento	39
Ciclos de corta.....	39
Diámetro mínimo de corta.....	40
Ejecución del modelo.....	40
Elaboración de los archivos de entrada.....	41
Archivo de entrada CONTROL.....	41
Archivo SITIO.....	41
Archivo ESPECIES	42
V. RESULTADOS.....	45
Obtención de parámetros y datos de entrada.....	45
Selección de especies.....	45
Agrupamiento de las especies.....	47
Coeficientes alométricos	47
Tasas de crecimiento (G) para las especies individuales y los grupos.....	47
Determinación de los límites de tolerancia.....	47

INDICE (continuación)

	Pag.
Resultados de la elaboración de los archivos de entrada.....	50
Archivos de salida	50
Archivo Z.PRINT.....	50
Archivo Z.LOG.....	50
Archivo Z.PUNCH.....	54
Archivo Z.TRACER.....	54
Archivo Z.PROFILE.....	54
Archivo Z.DUMP.....	54
Resultados de las simulaciones.....	55
Simulación del bosque natural con 230 años.....	55
Composición florística.....	55
Densidad de árboles, área basal, distribución diamétrica, Biomasa y altura.....	55
Simulación de los diferentes escenarios de aprovechamiento y sus efectos.....	60
Aprovechamiento con 30 cm de diámetro mínimo.....	61
Aprovechamiento con 60 cm de diámetro mínimo.....	63
Aprovechamiento con 80 cm de diámetro mínimo.....	64
Simulación del proceso de recuperación del bosque después del aprovechamiento.....	64
Proceso de recuperación del bosque en escenarios con ciclos de corta de 30 años.....	65
Composición florística.....	65
Número de árboles por hectárea.....	66
Diámetro promedio y área basal.....	68
Biomasa maderable.....	70
Altura promedio del rodal.....	72
Proceso de recuperación del bosque en escenarios con ciclos de corta de 60 años.....	72
Composición florística.....	74
Número de árboles por hectárea.....	74
Diámetro promedio y área basal.....	76
Biomasa maderable.....	78
Altura promedio del rodal.....	81
Proceso de recuperación del bosque en escenarios con ciclos de corta de 100 años.....	83
Composición florística.....	83
Número de árboles por hectárea.....	83
Diámetro promedio y área basal.....	84

INDICE (Continuación)

	Pag.
Biomasa maderable.....	86
Altura promedio del rodal.....	88
Simulación de la respuesta del bosque a tres escenarios de extracción de especies comerciales.....	91
Composición florística.....	92
Número de árboles por hectárea.....	92
Area basal.....	92
Biomasa maderable.....	95
Altura promedio del rodal.....	95
VI. DISCUSION.....	99
Composición florística.....	99
Densidad y número de árboles.....	100
Area basal.....	101
Biomasa.....	101
Altura.....	102
Simulación de los efectos del aprovechamiento forestal.....	103
El modelo de simulación como herramienta para el estudio y Gestión.....	107
El modelo como herramienta para el manejo sustentable.....	108
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
Conclusiones.....	109
Recomendaciones.....	110
BIBLIOGRAFIA.....	111
APENDICE A.....	121
APENDICE B.....	125
APENDICE C.....	131
APENDICE D.....	135

LISTA DE TABLAS

Tabla		Pag.
1	Valores medios mensuales de los principales parámetros climáticos de la zona de estudio	29
2	Caracterización de los suelos de cada una de las parcelas en estudio del Bosque Experimental "El Caimital"	32
3	Grupos ecológicos identificados en el Bosque Experimental "El Caimital"	37
4	Índice de valor para las especies y grupos de especies seleccionadas	45
5	Parámetros básicos de las especies seleccionadas en el Bosque Experimental "El Caimital"	46
6	Resultado del agrupamiento de las especies del Bosque "El Caimital"	48
7	Coefficientes alométricos para las especies seleccionadas y grupos de especies del Bosque Experimental "El Caimital"	49
8	Ejemplo de tres tipos de archivos CONTROL usados para las simulaciones	51
9	Ejemplo del archivo de entrada SITIO	52
10	Archivo ESPECIES.CAI generado para las especies seleccionadas y los grupos de especies	53
11	Distribución del número de árboles aprovechados por categoría diamétrica, cuando se aplicó la extracción con 30 cm de diámetro mínimo de corta	62
12	Número de árboles por hectárea del bosque remanente cuando se aplicó el aprovechamiento con 30 cm de diámetro mínimo de corta	62
13	Distribución del número de árboles aprovechados por categoría diamétrica, cuando se aplicó la extracción con 60 cm de diámetro mínimo de corta	63
14	Distribución del número de árboles remanentes cuando el aprovechamiento se realizó con 60 cm de diámetro mínimo de corta	64

Tabla	LISTA DE TABLAS (Continuación)	Pag.
15	Distribución de las especies y del número de árboles/ha aprovechados y recuperados en los escenarios 10, 11 y 12	93
16	Resumen de los valores del comportamiento del área basal en los nueve escenarios	104
17	Resumen de los valores de comportamiento del número de árboles recuperados en los nueve escenarios	105
18	Resumen de los valores del comportamiento de la biomasa en los nueve escenarios	105
19	Resumen del comportamiento de los principales parámetros en los tres escenarios adicionales experimentados.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pag.
1	Arbol genealógico de los modelos de claros	11
2	Los tres procesos de un árbol individual y los factores ambientales que afectan dichos procesos	13
3	Representación esquemática de la forma como se define las celdas de la cuadrícula del modo interactivo, en el modelo ZELIG	19
4	Ubicación relativa del área de estudio	28
5	Diagrama climático de "El Caimital"	31
6	Diagrama de las etapas seguidas durante el proceso de simulación	35
7	Comportamiento de la composición florística durante los 230 años de simulación	56
8	Resultado de la simulación de la densidad total de árboles a partir del suelo desnudo y para 230 años	57
9	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica en cuatro momentos de la simulación de 230 años	58
10	Resultado de la simulación del parámetro diámetro promedio a partir de un suelo desnudo y para 230 años	59
11	Resultado de la simulación del parámetro área basal, a partir de un suelo desnudo y para 230 años	59
12	Resultado de la simulación del parámetro biomasa maderable, a partir de un suelo desnudo y para 230 años	60
13	Resultado de la simulación del parámetro altura promedio del dosel, a partir de un suelo desnudo y para 230 años	61
14	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 1	66
15	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 4	67
16	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 7	68

Figura	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	Pag.
17	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 1	69
18	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 4	69
19	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 7	70
20	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro biomasa total en el escenario 1	71
21	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro biomasa total en el escenario 4	71
22	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro biomasa total en el escenario 7	72
23	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 1	73
24	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 4	73
24	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 7	74
26	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en tres momentos de la simulación del escenario 2	75
27	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en tres momentos de la simulación del escenario 5	76
28	Distribución del número de árboles por categoría diamétrica, en tres momentos de la simulación del escenario 8	77
29	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del área basal en el escenario 2	77
30	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del área basal en el escenario 5	78
31	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del área basal en el escenario 8	79

Figura	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	Pag.
32	Resultado de la simulación, mostrando la recuperación de la biomasa en el escenario 2	79
33	Resultado de la simulación, mostrando la recuperación de la biomasa en el escenario 5	80
34	Resultado de la simulación, mostrando la recuperación de la biomasa en el escenario 8	80
35	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 2	81
36	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 5	82
37	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro altura promedio del rodal en el escenario 8	82
38	Distribución de los árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 3	84
39	Distribución de los árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 6	85
40	Distribución de los árboles por categoría diamétrica, en cuatro momentos de la simulación del escenario 9	85
41	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 3	86
42	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 6	87
43	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 9	87
44	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 3	88
45	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 6	89
46	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 9	89

Figura	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	Pag
47	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 3	90
48	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 6	90
49	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 9	91
50	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 10	93
51	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 11	94
52	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación del parámetro área basal en el escenario 12	94
53	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 10	95
54	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 11	96
55	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la biomasa maderable total en el escenario 12	96
56	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 10	97
57	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 11	97
58	Resultado de la simulación, mostrando el proceso de recuperación de la altura promedio del rodal en el escenario 12	98

LISTA DE SIMBOLOS

ha	Hectárea
m	Metro
m ² /ha/año	Metro cuadrado por hectarea por año
dap	Diámetro a la altura del pecho (Dbh en inglés)
H	Altura total
G	Tasa de crecimiento
F	Forma del árbol
D _{max}	Diámetro máximo del árbol
A _{max}	Edad máxima del árbol
HC	Altura del fuste
Dinc	Incremento diamétrico
alai	Area foliar activa
elai	Area foliar efectiva
Mg/ha	Megagramos por hectárea
hmax	Altura máxima de un árbol
b ₀ y b ₁	Coefficientes alométricos obtenidos por regresión
seed	Tasa de establecimiento de plántulas
nprt	Número de brotes que llegan a ser árboles
sdmax	Diámetro máximo que se podría esperar de los brotes
ddmin	Grados-día mínimo
ddmax	Grados-día máximo
IV	Indice de valor
Ksol	Tipo de suelo
árb/ha	Número de árboles por hectárea
AB	Area basal
BOqu	<i>Bombacopsis quinata</i>
CEod	<i>Cedreia odorata</i>
SPmo	<i>Spondias mombin</i>
TAro	<i>Tabebuia rosea</i>
N0gr	Nómadas grandes
Plgr	Pioneras grandes
ALco	<i>Albizia colombiana</i>
CEpe	<i>Ceiba pentandra</i>
Plsa	<i>Pithecellobium saman</i>
COco	<i>Cordia alliodora</i>



RESUMEN

Con el propósito de explorar la aplicación de un modelo de simulación de base individual, como herramienta en la predicción de los efectos del aprovechamiento forestal en la dinámica del bosque, se utilizó el modelo ZELIG.2, tomando como antecedentes los trabajos de parametrización realizados anteriormente para el Bosque Experimental "El Caimital", de la región de los Llanos Occidentales venezolanos.

Para la aplicación del modelo se definieron inicialmente nueve escenarios de aprovechamiento forestal, considerándose la combinación de dos factores: a) el diámetro mínimo de corta con tres niveles 30, 60 y 80 cm ; y b) ciclos de corta, con periodos de 30, 60 y 100 años. Adicionalmente, como una aplicación práctica, se simularon tres escenarios de aprovechamiento de especies comerciales de acuerdo al diámetro mínimo de corta establecido legalmente, e incluyendo el daño que causa las actividades extractivas.

En cada escenario se evaluaron los archivos de salida referidos a los parámetros de composición florística, diámetro promedio, área basal promedio, biomasa total maderable y la altura promedio del rodal. Asimismo, se determinó el grado de sustentabilidad, en función del nivel de recuperación que mostraba el bosque remanente con respecto a los valores iniciales del bosque sin intervención.

Los parámetros que mejor comportamiento tuvieron en el proceso de simulación fueron: el área basal, la biomasa y la altura promedio, reportando valores muy cercanos a los esperados. Los parámetros de composición florística, altura comercial para especie y el diámetro promedio mostraron valores no muy confiables, por lo que se hace necesario revisar los parámetros o índices que los afectan.

Los escenarios que mostraron mejores niveles de recuperación de los diferentes parámetros analizados, fueron aquéllos que combinan el aprovechamiento de árboles con más de 60 cm de diámetro y ciclos de corta de más de 60 años.

En consecuencia, se puede concluir que el modelo de simulación, con algunos ajustes, se puede utilizar como herramienta para el estudio y gestión de los recursos forestales, y la predicción de las posibles consecuencias del aprovechamiento forestal.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La formulación de políticas de manejo para los bosques altos tropicales se ha visto limitada por la escasa información disponible sobre el comportamiento de dichos ecosistemas ante la aplicación de los diferentes tratamientos silviculturales, lo que ha dificultado la determinación de las cuotas volumétricas, ciclos de corta y adopción de diámetros mínimos de corta de acuerdo a la dinámica de los mismos, todo ello con la finalidad de propender al desarrollo forestal sustentable.

Adicionalmente a la escasez de información sobre el comportamiento del bosque, otras razones han contribuido a esa deficiencia, como: a) la dimensión temporal del problema a estudiar, ya que se requieren períodos largos de experimentación para comprobar si algunas opciones silviculturales son viables económica, social y ecológicamente; b) altos costos de la experimentación; y c) la irreversibilidad de los procesos reales.

Tal situación, unido a la urgencia de tomar decisiones, ha llevado a la planificación silvicultural a la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir los niveles de incertidumbre en el manejo forestal. Entre estas técnicas los métodos estadísticos y los modelos de simulación constituyen herramientas de gran utilidad para entender, experimentar y predecir los efectos que se producen en el sistema, cuando se adoptan determinados cursos de acción que afectan los procesos dinámicos de desarrollo del mismo, y a partir de los resultados obtenidos explorar estrategias y seleccionar las mejores alternativas que permitan resolver algunos de los problemas implícitos del manejo de bosques naturales.

Si bien es cierto que un modelo es una representación simplificada de un sistema del mundo real, su utilización se ha difundido en estos últimos años como herramienta de estudio y gestión de los recursos naturales, y sus aplicaciones en el área forestal se han incrementado en la medida que los modelos han ganado realismo y flexibilidad, principalmente para los bosques templados y boreales donde se han aplicado para apoyar los estudios de crecimiento, competencia, regeneración natural, productividad, impacto o reacción al aprovechamiento y a los cambios climáticos globales, entre otros.

Las experiencias del uso de la simulación en los bosques tropicales es muy reciente, por ello el presente Trabajo de Grado tiene como objetivo general estudiar la aplicabilidad de los modelos de base individual como herramienta de predicción de los efectos de las distintas estrategias de aprovechamiento forestal, sobre la dinámica del Bosque Experimental "El Calmital". Los objetivos específicos son los siguientes: a)

evaluar los efectos de los diferentes escenarios de aprovechamiento forestal sobre la estructura y composición del bosque, mediante el uso del modelo ZELIG.2; b) analizar las ventajas y desventajas del modelo y evaluar su aplicación para la predicción a largo plazo de los efectos de la explotación forestal; y c) explorar la aplicabilidad del modelo como herramienta para la evaluación del impacto ambiental y para la selección de las estrategias y mejores opciones que permitan resolver algunos problemas que causa el aprovechamiento forestal sobre la vegetación remanente.

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA

Los bosques tropicales cubrían a finales de 1990 una superficie estimada en 1.756 millones de hectáreas, la cual viene disminuyendo rápidamente. Según un reciente estudio de la FAO (1995), la deforestación de los bosques tropicales entre 1980 y 1990 se ha realizado a una tasa anual de 15,4 millones de hectáreas, las pérdidas mayores se han registrado en América Latina y el Caribe, con un promedio de 7,4 millones de ha/año. Las causas principales de la deforestación son: la transformación de las tierras forestales para uso agrícola; el cultivo migratorio, con periodos de barbecho demasiados breves; y la extracción insostenible de madera.

Por ello, la deforestación y el deterioro de los bosques tropicales constituyen uno de los grandes temas ambientales de actualidad, tanto por su impacto en el clima global, como la pérdida de la biodiversidad y la disminución de la capacidad productiva de los mismos.

Se prevé que en los próximos años, los bosques tropicales de Sudamérica serán sometidos a intensos programas de aprovechamiento forestal, ya que estos países y algunas grandes empresas están interesados en la madera para obtener divisas y ganancias, a esto se añade la mayor demanda de tierras agrícolas por parte de las poblaciones humanas crecientes, por lo que se hace muy necesario contar previamente con programas de manejo que puedan garantizar un desarrollo forestal sustentable (Stiles, 1995).

A partir de la década del 70 los países reconocen la necesidad del manejo, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques; de esa manera adoptan nuevos instrumentos para la gestión ecológicamente racional, entre los que se encuentra la exigencia de los estudios de impacto ambiental (EIA) para todos los proyectos de aprovechamiento forestal y cambio de uso de las tierras forestales, no como una medida para minimizar el empobrecimiento ambiental sino como un instrumento planificador para obtener la solución óptima (Abaza, 1995).

A pesar de haberse desarrollado nuevas técnicas para la evaluación de impactos (EIA), entre las que se encuentran los modelos de simulación, todavía quedan grandes inconvenientes, muchas preocupaciones, diferencias y problemas importantes que es necesario abordar para su aplicación, principalmente en países en desarrollo, debido a la falta de capacidades locales, incluidos el personal especializado, y de las instituciones; asimismo, se carece de una base de datos ambientales y socioeconómicos pertinente. En consecuencia, se hace necesario

fomentar y promover técnicas sencillas, claras, coherentes y adecuadas que puedan ser aplicadas a nivel nacional, local y de cada proyecto.

Métodos de evaluación de Impactos ambientales

Entre los principales métodos para evaluar los impactos ambientales de las distintas actividades forestales se encuentran las siguientes (Zimmermann, 1992):

La matriz de Impactos

Enumera las acciones en un eje y las modificaciones ambientales potenciales en el otro eje; se anota entonces el impacto de la interacción de los dos ejes por medio de un código que va normalmente de 1 a 10, el cual expresa la opinión del evaluador sobre la magnitud e importancia.

Técnica de superposición (Mcharg)

Mediante la cual se superponen mapas transparentes de los diferentes componentes ambientales, localizándose las áreas de sensibilidad acumulada máxima o mínima. Una variante de esta técnica consiste en preparar mapas que muestran las mismas características, por medio de valores digitales, a fin de poder determinar mediante un ordenador las áreas o pasillos de mínimo impacto.

Sistema Batelle

Es el método más cuantitativo y "objetivo" de los enumerados, porque se apoya en la transformación de los cambios de los parámetros (como diversidad de la vegetación, nivel de oxígeno, etc.) en niveles correspondientes de calidad ambiental, por medio de una función de valor.

Plano de flujos

Marca el impacto por medio de diagramas de flujo y pruebas procedentes de premisas y relaciones causales bien establecidas, terminando con juicios de valor referentes a la magnitud e importancia de los impactos previstos.

Modelos de simulación

La simulación ha adquirido, durante los últimos años, una gran difusión como herramienta de estudio y gestión de los recursos naturales (Castilla y Prieto, 1992; Uzcátegui, 1993). La razón fundamental para el uso de la simulación es la de aprovechar un instrumento que permite predecir el comportamiento del bosque,

tomando en cuenta las variables más importantes que inciden en la dinámica de la masa forestal.

La predicción de efectos es la medición de la magnitud, duración y extensión de los mismos basada en cálculos, conocimientos o inferencia de datos sobre los factores ambientales: agua, luz, temperatura, aire, suelo, paisaje, ecosistemas, etc. (Gómez, 1988; Weltzenfeld, 1990). Representa una etapa técnica fundamental en la evaluación de impactos ambientales, la cual se ha venido perfeccionando en el tiempo con el uso de nuevas y mejores técnicas y conocimientos científicos. Para ello suele usarse modelos matemáticos y físico-matemáticos, complementados con una serie de ensayos o pruebas experimentales (Bolea, 1977) ,

Inicialmente se construyeron programas computarizados como el que describe Duek (1979), enfocados o dirigidos específicamente a reducir el tiempo de los cálculos numéricos de algunos métodos usados en la evaluación de impacto ambiental, entre los que se mencionan el KSIM (Kane *et al.*, 1973), el GSIM (Gallopín, 1977) el método Batelle en Fortran IV, matriz de camino óptimo en PL/1, entre otros.

Actualmente, no existen modelos para predecir los impactos ambientales en forma global, más bien se han desarrollado algunos que permiten pronosticar los efectos sobre algunos de los factores o componentes ambientales. Cabeza (1987) menciona los modelos EXAMS, QUALSE, WASP3, PRZM, MINTEQ, SWRRB, que entre otros, son usados para medir la contaminación de los factores ambientales agua y suelo. Existen otros modelos para evaluar el grado de dispersión de contaminantes en la atmósfera (Bolea 1977), así como los efectos sobre la salud y la calidad de vida (Gómez, 1988).

Recientemente se han desarrollado modelos que relacionan la cuantificación de la producción con un factor ambiental; entre ellos se tiene el PROSAL (Pérez, 1993) que relaciona la producción y la salinidad de las aguas de riego y del suelo, el DRPR (Payen, 1985) que relaciona la producción con la elevación de los niveles freáticos, el EPIC (Williams, 1983) que relaciona la producción con la erosión de los suelos, el IP (Delgado, 1987) que relaciona el índice de productividad con la alteración de las propiedades físicas de los suelos.

En el manejo de bosques naturales, los modelos de simulación son usados porque permiten resolver algunos elementos implícitos en la problemática del manejo experimental (Uzcátegui, 1993), como la dinámica (Hartshorn, 1975), competencia (Hamilton, 1990), regeneración natural (Leak, 1968), crecimiento (Vanclay, 1995), productividad (Vanclay, 1992), condiciones demográficas (Ferguson, *et al.*, 1986) y flujo de energía . Asimismo, se aplican en la operación del bosque como sistema (Botkin, 1993), con respecto al diámetro mínimo de corta, ciclo de corta, tratamientos silvícolas (Howard *et al.*, 1992), reacción ante el aprovechamiento

(Vanclay, 1990), evaluación de impactos ambientales (Shugart y West, 1977) y cambio climático-vegetación (Shugart y Smith, 1992).

Uso de modelos de simulación para la evaluación de efectos atribuibles al aprovechamiento forestal

Diversos son los estudios llevados a cabo sobre los efectos directos e indirectos; a corto, mediano y largo plazo que causa el aprovechamiento forestal en bosques tropicales. Muchos de ellos coinciden en que los impactos directos más importantes son el resultado, tanto de los efectos de la reducción de la cobertura vegetal, como de los impactos físicos de las operaciones. La magnitud de ellos dependerá de las condiciones del sitio (el suelo, la topografía, la precipitación), las características ambientales (tipo de bosque, densidad de los árboles, las especies y poblaciones de la fauna), y los métodos de explotación y extracción (Banco Mundial, 1994).

Un especial interés ha despertado en los investigadores el estudio que causa el aprovechamiento en la dinámica del bosque húmedo tropical. Los antecedentes más abundantes proceden de los países tropicales de Asia y Africa, donde durante décadas se ha venido generando información sobre las implicancias de la explotación selectiva mecanizada, como por ejemplo sobre la regeneración natural (Wyatt-Smith y Foerner, 1962), el crecimiento de las especies remanentes (Miller, 1981), en la estructura, composición, regeneración y el hábitat de las especies forestales (Abdulhadi *et al.*, 1981; Oia-Adams, 1987; Borhan *et al.*, 1987; Woods, 1989), sobre la flora en general y sus consecuencias en la población de frugívoros y folívoros (Andrew, 1988). En el trópico americano, los estudios principalmente han sido sobre los efectos económicos, sociales y ecológicos que ocasiona la extracción forestal sobre los bosques amazónicos (Uhl y Guimaraes, 1989; Uhl *et al.*, 1991; Verissimo *et al.*, 1992; Macedo *et al.*, 1993). En Venezuela Plonczak (1993) y Kammesheidt (1994) evaluaron la estructura y diversidad de la vegetación remanente en los bosques de los Llanos Occidentales. En América Central, Chaves (1994), Gonzáles y Chaves (1994) estudiaron la estructura, composición y la dinámica de los bosques húmedos tropicales aprovechados de Costa Rica.

No obstante, son pocas las experiencias de aplicación de los modelos de simulación para los bosques tropicales, como herramienta para la predicción de los posibles cambios que pueden ocasionar los distintos sistemas de aprovechamiento forestal y de esa manera anticipar aquellos escenarios que no garantizan su sustentabilidad. Vanclay (1990) estimó la declinación de la productividad del bosque húmedo tropical de Queensland (Australia) simulando una serie de tipos de aprovechamiento selectivo, a los que denominó modelos; para ello usó ecuaciones de regresión que le permitieron estimar los cambios de la productividad después del aprovechamiento. El mismo Vanclay (1994), realizó un estudio demostrativo de la

aplicación de un modelo de crecimiento para estimar a corto y largo plazo la producción de madera, y examinar si la reciente práctica de aprovechamiento que se realiza en los bosques tropicales de Queensland sería sustentable en cuanto a producción de madera. Bossel y Krieger (1991) aplicaron el modelo FORMIX en bosques tropicales malasio para simular el efecto del sistema silvicultural denominado Sistema de Manejo Selectivo (SMS), muy utilizado en la península de Malasia, para calcular la producción de biomasa del bosque remanente sometido a diferentes ciclos de corta y así poder determinar la frecuencia de las intervenciones para garantizar la sustentabilidad del bosque de dipterocarpaceas; el modelo está integrado a un sistema de información geográfica (SIG) que permite simular el bosque con sus compartimientos a manera de un mosaico, los que pueden estar sometidos a diferentes tratamientos de raleo, métodos de extracción y otros tratamientos silviculturales.

Gullison y Hardner (1993) simularon los efectos y los cambios causados por las vías de saca y la intensidad de la extracción en los bosques tropicales de Bolivia; para ello usaron un programa computarizado que permitía simular y examinar los cambios que ocasionarían las distintas opciones de construcción de la vía principal; así mismo, simularon los daños de las construcciones de las vías de saca cuando se optaban diferentes grados de densidades de árboles comerciales de *Swietenia macrophylla*.

Boseel y Krieger (1994), usando el modelo FORMIX.2, simularon el comportamiento de la regeneración en los bosques de dipterocarpaceas en Sabah, después de haber sido sometido a un proceso de extracción forestal; para ello todas las especies fueron agrupadas en cinco grupos, de acuerdo a la altura de las copas:

brinzales de regeneración entre 0 - 1,3 m
árboles pequeños entre 1,3 - 15 m
árboles entre 15 - 25 m
árboles del dosel medio entre 25 - 36 m, y
árboles emergentes con más de 36 m de altura.

El modelo FORMIX.2 se puede usar de acuerdo a una determinada dimensión del claro, que puede variar entre 100 y 400 m², de acuerdo al área de la copa del árbol emergente dominante. Para ese estudio se usaron 25 (5x5) claros de 400 m². Considerándose los efectos de la interacción espacial se asumieron condiciones óptimas de agua y nutrientes, característica que lo limita para usarlo en bosques tropicales con épocas de sequía. Los resultados encontrados por las simulaciones son muy similares a los valores obtenidos empíricamente. Finalmente estos autores mencionan que la calidad, eficiencia y confiabilidad de futuros modelos para bosques tropicales dependerá de los datos disponibles.

Modelos de sucesión forestal

En los sistemas de larga vida, como los ecosistemas forestales, el desarrollo de los modelos es indispensable para analizar y predecir los efectos de los diferentes regímenes de crecimiento y del impacto de perturbaciones, tales como la contaminación ambiental, cambios climáticos y explotaciones (Monhren y Burkhart, 1994).

Existen cuatro técnicas para modelar los procesos ecológicos de sucesión. Estas, en la práctica, representan un *continuum* desde las puramente descriptivas a las altamente teóricas. Históricamente las más antiguas fueron las más sencillas entre las que se encuentran los modelos de figuras o gráficos y los verbales ("informales") que consisten en una serie de palabras, o descripciones que permitían suministrar el modelo del proceso. Durante más de 75 años, desde que esta técnica fue formulada, otros modelos descriptivos han surgido, tales como los modelos de diagramas que aplican los nuevos procedimientos de análisis de sistemas, tales como el diagrama de Odum de la acumulación de biomasa (Usher, 1992).

El salto a las expresiones matemáticas ("formales") y de éstas a los modelos computarizados es muy reciente, habiendo ocurrido durante los últimos 30 años. Continúa su desarrollo debido al surgimiento de nuevos instrumentos muy poderosos en términos de teoría matemática, cibernética, procesamiento de datos, entre otros. El advenimiento de herramientas, como las computadoras, llevó a posibilitar el desarrollo de los modelos de compartimientos, en los cuales cualquier organismo o parcela de tierra puede ser modelada para un periodo de tiempo; adicionalmente, permite la simplificación de ecosistemas complejos y proporciona una mayor esperanza de solución de los problemas ambientales del hombre que no pueden seguir dejándose por más tiempo a procedimientos de tanteo o especulaciones (Usher, 1992).

Estos modelos se pueden agrupar en dos tipos, dependiendo de la naturaleza de las variables y la probabilidad de ocurrencia; pueden ser modelos estocásticos, donde a cada subproceso, dentro del proceso sucesional total, se le asigna una probabilidad de ocurrencia. El segundo caso se trata de los modelos determinísticos, que no consideran la aleatoriedad, como los modelos de dinámica de población, donde cada especie es modelada y la integración de todas lleva a un modelo de comunidad (Usher, 1992).

Según Munro (1974), los modelos de sucesión forestal se pueden dividir en dos grandes categorías: modelos de bosque y modelos de base individual. En el primero de ellos, la unidad elemental y la información que se considera es a nivel de rodal. En el segundo, la unidad básica es el árbol.

Modelos de base individual

Existe una creciente necesidad de conocer cómo los ecosistemas boscosos son afectados por las perturbaciones naturales o antropogénicas, para ello se plantean muchas preguntas sobre las respuestas del bosque. Una valiosa herramienta para responderlas la constituyen los modelos de simulación ecológica, los cuales han sido desarrollados desde la década de los setenta.

Debido a que un bosque está compuesto por muchos individuos y, en el caso de los bosques tropicales, por un número elevado de especies; además de diversos factores que afectan la vida de cada uno de ellos, los modelos de dinámica forestal realísticos basados en árboles individuales, sólo se han desarrollado en medida del avance del poder computacional alcanzado.

Estos biomas son sistemas difíciles de estudiar, entre otras razones, debido a los procesos demográficos (establecimiento, crecimiento y mortalidad) que actúan sobre diferentes escalas de tiempo y espacio. Cada uno de estos procesos tiene un elemento estocástico intrínseco, el cual puede conjugarse, además, con las fluctuaciones ambientales; eventos raros, episodios de mortalidad y reclutamiento (Shugart y Urban, 1989)

De esa manera los modelos de base individual se han constituido en una valiosa herramienta para el estudio de las consecuencias de la interacción entre estos procesos demográficos, como también del papel que los factores ambientales juegan al limitar los mismos (Shugart, 1984; Shugart y Urban, 1989).

Estos toman el árbol como la unidad básica de un simulador de bosque. El grado de complejidad oscila entre aquellos modelos de simple tabulación donde la probabilidad que un individuo de un tipo sea reemplazado por uno de otro tipo, a modelos extremadamente detallados que incluyen la geometría tridimensional de diferentes especies con diferentes tamaños (Shugart y West, 1980). La mayoría de estos modelos están basados en reglas sencillas de interacciones entre individuos (e. g. sombra, competencia por recursos limitados) en conjunto con reglas de nacimiento, muerte y crecimiento de individuos.

Este tipo de modelado es el método dominante para proyectar el crecimiento y rendimiento en rodales mixtos; también ha tenido aplicaciones exitosas en ecología, tomando la historia de vida de cada individuo en una comunidad, e integrando estos comportamientos individuales para simular el del ecosistema (Haight y Monserud, 1990).

Los modelos pueden ser independientes o dependientes de la distancia. Aquellos modelos que son independientes de la distancia usan funciones de variables a nivel de rodal y las dimensiones iniciales del árbol. Usualmente describen el estado

del rodal a través de los datos de árboles individuales referidos a los componentes básicos de crecimiento del rodal: Ingreso, crecimiento de sobrevivientes y mortalidad, pero sin especificaciones de la localización del árbol. Son insensibles a diferencias en el arreglo espacial de los árboles sobre la parcela, por lo que no son apropiados para el análisis de las implicaciones espaciales de alternativas silviculturales (Martín y Ek, 1984; García, 1988; Tome y Burkhart, 1989).

En los modelos dependientes de la distancia, el rodal es representado por árboles individuales, para los cuales la posición exacta en el rodal es tomada en cuenta. Además, no solo las dimensiones del tronco son representadas, sino también consideran detalles de la estructura de la copa y características de la ramificación (Mohren y Burkhart, 1994).

Modelos de claros

Los modelos de claros usualmente se usan para describir sistemas ecológicos y los procesos de la dinámica del bosque para un período largo de tiempo (e.g. sucesión del bosque) (Shugart, 1984). Debido a que los ecólogos han mostrado especial interés en sistemas naturales estables o raramente perturbados antrópicamente, los modelos de claros se han desarrollado generalmente para el estudio de los bosques naturales.

El primer modelo de claros (JABOWA) lo construyó Botkin *et al.* (1972) en la Escuela de Silvicultura y Ciencias Ambientales de Yale; casi una década después de la formulación del primer modelo de bosques, del que recibió fuerte influencia. Todos los otros modelos de claros se han derivado de los modelos JABOWA y FORET (Shugart y West, 1977; Shugart, 1984). La Figura 1 muestra el árbol genealógico de los modelos de claros, indicando las relaciones entre ellos y los años cuando fueron publicados. Aunque Botkin y dos expertos en computación del Centro de Investigación Tomás Watson de la IBM fueron los pioneros de los modelos de claros. Los grupos de ecólogos de Oak Ridge National Laboratory y la Universidad de Virginia conducidos por Shugart, han jugado un papel crítico para el avance y popularización de los modelos de claros (Liu y Ashton, 1995).

Todos estos modelos tienen la misma relación y estructura básica, pero varían para satisfacer condiciones específicas. Por ejemplo, el modelo FORET desarrollado por Shugart y West (1977), eliminó varios subprogramas del modelo JABOWA y agregó dos nuevos subprogramas.

La Interacción entre los árboles individuales en el modelado espacial

Los modelos de claros tradicionales asumen diferencias verticales en utilización de la luz. Los árboles más pequeños reciben menos luz, pues ésta es

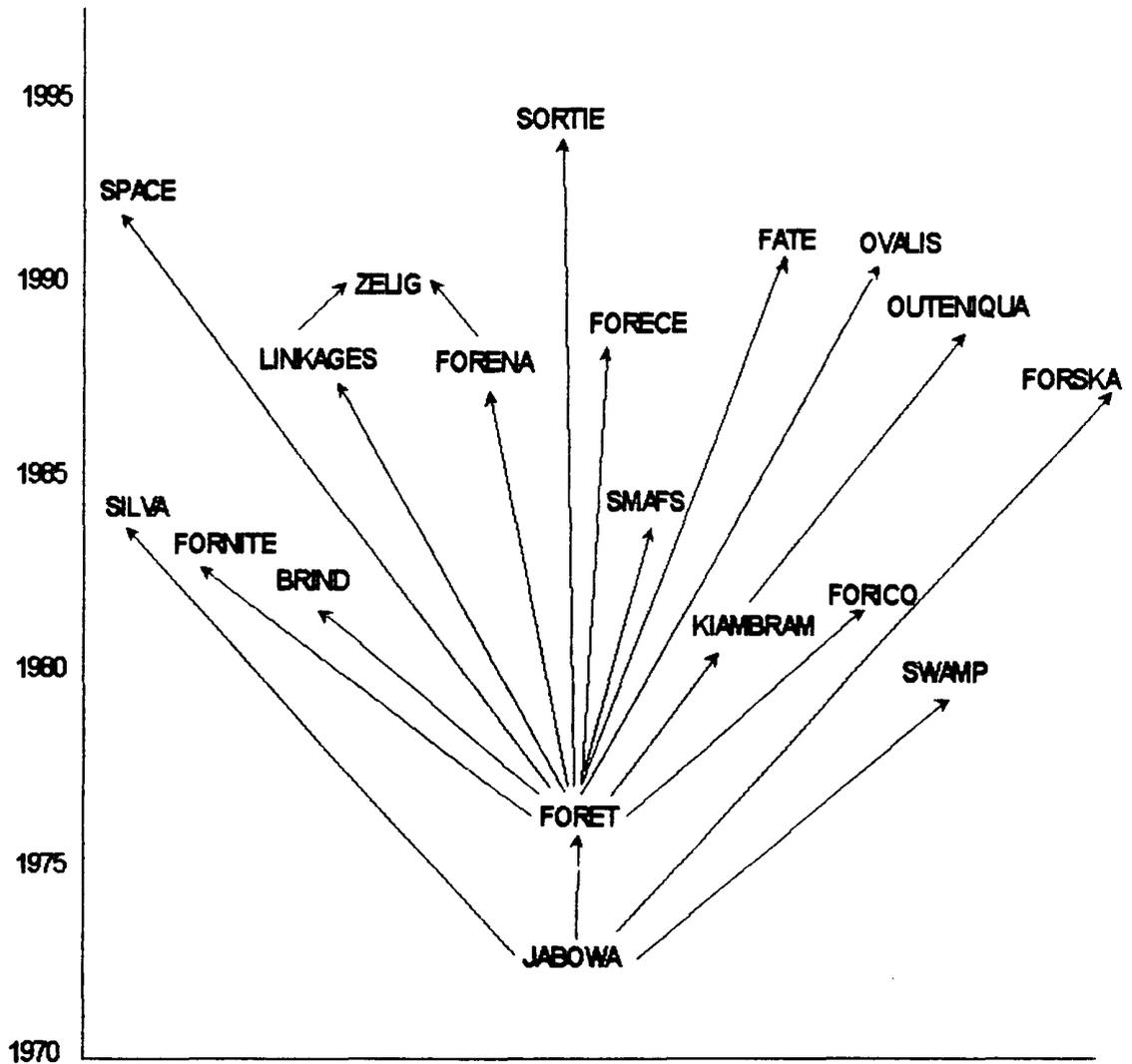


Figura 1. Arbol genealógico de los modelos de claros, generados a partir de JABOWA, los autores y año de publicación de cada modelo son los siguientes: JABOWA (Botkin *et al.* 1972), FORET (Shugart y West, 1977), SWAMP (Phipps, 1979), KIAMBRAM (Shugart *et al.*, 1980), FORICO (Doyle, 1981), BRIND (Shugart y Noble, 1981), FORNITE (Aber y Melillo, 1982), SMAFS (El-Bayoumi *et al.*, 1984), SILVA (Kercher y Axelrod, 1984), FORENA (Solomon, 1986), LINKAGES (Pastor y Post, 1986), FORSKA (Leemans y Prentice, 1987), ZELIG (Smith y Urban, 1988), FORECE (Kienast y Kuhn, 1989), OUTENIQUA (Van Daalen y Shugart, 1989), FATE (Moore y Noble, 1990), OVALI (Harrison y Shugart, 1990), SPACE (Busing, 1991) y SORTIE (Pacala *et al.*, 1993). Tomado de Liu y Ashton (1995).

interceptada por los individuos de copas más altas. Convencionalmente, la parcela es considerada horizontalmente homogénea, no toman en cuenta explícitamente las relaciones espaciales en una dimensión horizontal. Recientemente, se le ha dado especial atención a las diferencias horizontales y sus interacciones (Smith y Urban, 1988). En el modelo ZELIG (Smith y Urban, 1988) se asume la homogeneidad horizontal en la parcela (10 m) y a cada individuo se le asigna una celda de la rejilla y una localización específica de cada individuo. Una de las diferencias mayores entre el modelo ZELIG y los modelos de claros convencionales es que en éste las celdas adyacentes (o parcelas) interactúan por sombreado y dispersión de la semilla, mientras que en los modelos convencionales operan independientemente. El modelo SPACE desarrollado por Busing (1991), usa una escala espacial más pequeña (0,5 m de rejilla) que ZELIG; un individuo puede ocupar una o más celdas de la reja, dependiendo del tamaño de un árbol individual. En ese sentido, SPACE tiene más flexibilidad que ZELIG y puede usarse para estudios más detallados a escalas mucho más pequeñas.

Requisitos de los datos

En los modelos de claros, la información acerca de las características ecológicas de las especies se puede obtener de parcelas de estudio y/o de la literatura (Shugart, 1984). De cualquier modo, los datos acerca de las condiciones ambientales (e. g. humedad de la tierra, luz, temperatura, congelamiento, elevación, altitud, nutrientes) deben ser para cada sitio específico.

Simulaciones

La mayoría de los modelos de claros toman en cuenta una a varias docenas o incluso más de 100 especies ecológicamente importantes. Por ejemplo, en la aplicación de los modelos FORET (Shugart y West, 1977) y FORAR (Mielke *et al.*, 1978) se estudiaron 33 especies. Shugart *et al.* (1981) simularon la dinámica de 125 especies en diversos bosques subtropicales de Australia.

Los modelos de claros simulan la dinámica del bosque, la cual corresponde en tamaño a la misma escala de un claro del dosel. Las áreas simuladas usualmente varían de 0,01 a 0,1 ha. Por ejemplo, Botkin *et al.* (1972) hicieron simulaciones en parcelas de 10 x 10 m (0,01 ha). Shugart y West (1977) usando el modelo FORET simularon la dinámica de bosques de una área de 0,08 ha.

Estructura del modelo

En el modelo, los procesos demográficos de las especies comprenden tres fases: establecimiento, crecimiento y mortalidad (ver Figura 2). Estos procesos son afectados por factores bióticos y abióticos (ambientales), competencia por recursos

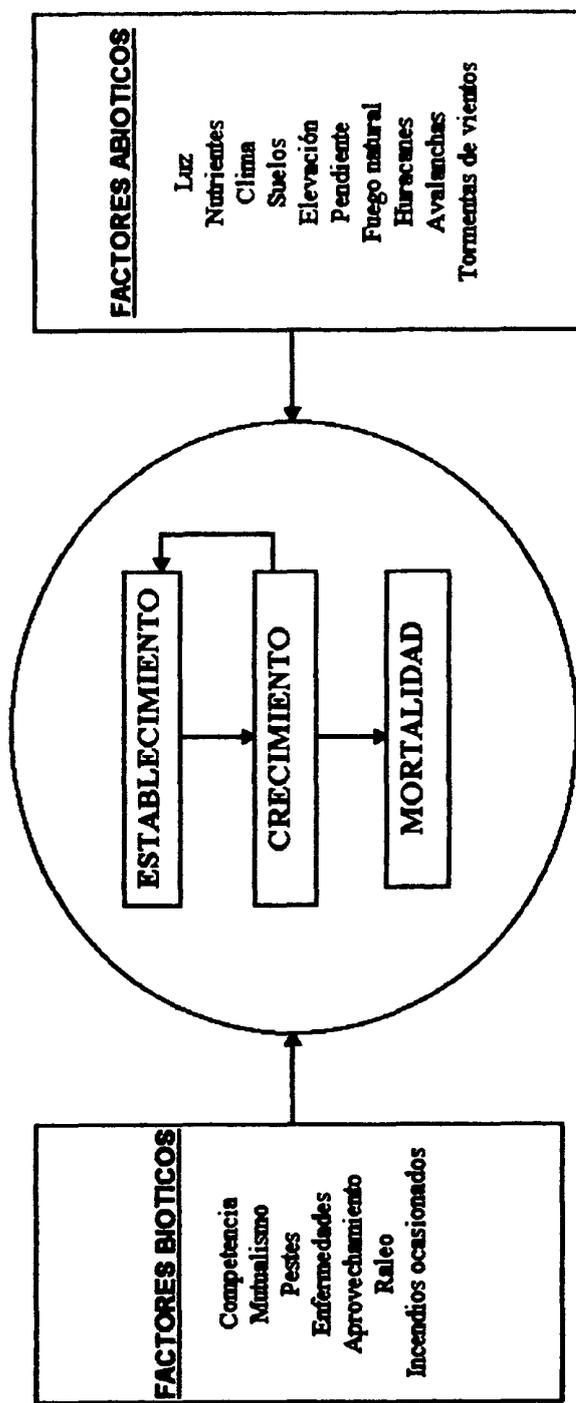


Figura 2. Los tres procesos de un árbol individual y los factores ambientales que afectan dichos procesos (tomado de Liu y Ashton, 1995).

limitados con individuos vecinos, reproducción, ataques de plagas y enfermedades, y prácticas silviculturales tal como la cosecha, raleo, incendios, y aplicación de fertilizantes.

Establecimiento o regeneración

Los modelos de claro convencionales ingresan nuevos individuos a una parcela a partir de una fuente externa de semilla (Shugart *et al.*, 1981). El éxito del establecimiento de estas semillas depende de las condiciones del sitio y factores específicos de la especie tales como la fenología, longevidad de la semilla, períodos de latencia, mecanismos de la dispersión de la semilla, las cantidades de semilla viable producida, y tolerancia de la sombra (Doyle, 1981). En los modelos de claros se asume, en forma general, que el establecimiento de una especie se realiza bajo condiciones climáticas dentro del rango grados-día de crecimiento de la especie (Shugart y Noble, 1981). En el modelo, al comenzar la sucesión las especies seleccionadas y el número de individuos juveniles se escogen estocásticamente de una fuente externa específica. El tamaño de cada individuo juvenil, introducido en el modelo, se determina al azar y varía en promedio aproximadamente entre 2 cm de diámetro.

Algunos descendientes recientes de modelos de claros, como ZELIG (Smith y Urban, 1988), dejan que las plantas produzcan semillas dentro de las parcelas de modelamiento y también permiten reclutar desde un progenitor cercano externo que dispersa sus semillas a las celdas. Pacala *et al.* (1993) asumieron que la densidad de individuos, producidos por un árbol semillero dentro de la parcela, está en función del tamaño (dap) y la distancia del mismo. Adicionalmente, consideran la posibilidad del establecimiento a través de los brotes; en ese caso, los individuos son más vigorosos y con diámetros más grandes, que los resultantes de la germinación, cuando son introducidos en el modelo.

Crecimiento

Un árbol crece en diámetro, altura, área basal y tamaño de la copa. La mayoría de los modelos desarrollados simulan el crecimiento a partir del diámetro, debido a que éste es mucho más fácil de medir que las otras variables; la altura y el área basal se puede derivar de alometrías diámetro-altura y diámetro-área basal (Ker y Smith, 1957).

La tasa de crecimiento es influenciada grandemente por las condiciones del sitio y las interacciones entre los árboles. La mayor interacción es la competencia, proceso que ocurre cuando los recursos luz y nutrientes son muy limitados.

Los modelos de claros, usualmente consideran separadamente cada factor ambiental pero durante la simulación sus efectos los combina. Asumen bajo condiciones ideales que el crecimiento de los árboles individuales es una función sigmoidea. La función se puede modificar a causa de la competencia por recursos limitados con los individuos vecinos (Liu y Ashton, 1995).

Los modelos de claros iniciados por Botkin *et al.*, (1972) asumen: (1) que el diámetro de un árbol aumenta hasta una tasa máxima bajo condiciones óptimas, y es restringido por características tales como edad máxima, diámetro máximo y altura máxima, y (2) ese crecimiento es modificado por sus condiciones específicas de sitio, y factores bióticos y abióticos del ambiente. Específicamente, el incremento del diámetro es el producto de una función del crecimiento potencial y se tienen en cuenta varios factores modificadores como la luz, temperatura, humedad de la tierra y nutrientes. El valor del modificador tiene un rango de 0 (nada de crecimiento) o 1 (no hay reducción del crecimiento). La ecuación de crecimiento potencial (óptimo) está en función del diámetro a la altura del pecho, diámetro máximo, altura, altura máxima, y un parámetro de crecimiento. El modificador luz considera relaciones del sombreado entre los árboles. La radiación disponible, por un árbol dado, es reducida por la suma de los efectos de sombreado que ejercen todos los árboles más altos. Los efectos de la temperatura en la reducción del crecimiento en los bosques templados se ha simulado por medio de la suma grados-día de crecimiento, que es la acumulación anual de diferencias diarias de temperatura sobre el óptimo, cuyo valor es de 40°F (aproximadamente 4°C). El factor suelo usa el área basal máxima y área basal existente en una parcela para estimar los efectos de competencia de ambos en nutrientes y humedad. Cuando el área basal existente se iguala a la máxima, el modificador suelo llega a ser cero (Liu y Ashton, 1995).

Aunque las relaciones básicas de otros modelos de claros son los mismos que lo de JABOWA, algunas nuevas modificaciones se hicieron debido a las condiciones explícitas del ecosistema o a procesos ecofisiológicos. Por ejemplo, Weinstein *et al.* (1982) indicaron que la reducción de la tasa de crecimiento diamétrico es causada por las limitaciones de nutrientes y usaron una función polinomial en donde la disponibilidad relativa de nutrientes es una variable independiente. Aber y Melillo (1982) también usaron la disponibilidad relativa de nutrientes en la modificación de la tasa de crecimiento y simularon los procesos de descomposición para calcular la dinámica anual de reserva de nutrientes en la parcela. Para Pacala *et al.* (1993) la disponibilidad local de luz está expresada con un "índice general de luz" (Canham, 1988) el cual incorpora la información de la radiación directa y difusa emitida, patrones espaciales de las copas, y movimiento diurno y estacional del sol, externamente complementan la estimación de los parámetros relevantes de nutrientes del suelo y del agua. Pacala *et al.* (1993) determinaron la regresión de crecimiento radial sólo comparando el diámetro y el índice general de luz.

Mortalidad

En los modelos de claros la mortalidad es causada por supresión, factores fortuitos, cosecha y longevidad (Botkin *et al.*, 1972). La probabilidad de la mortalidad a causa de la supresión es fijada por un número que varía entre 0,0 y 1,0 para un árbol individual, y la tasa de crecimiento de un individuo está bajo este umbral. La mortalidad por envejecimiento para un individuo sobre un periodo de tiempo (usualmente un año), está en función de la máxima edad (longevidad) y de las especies.

En algunos modelos de claros, se han considerado los efectos de las prácticas silviculturales. Por ejemplo, el modelo KIAMBRAM (Shugart *et al.*, 1981) tiene un subprograma LUMBER el cual simula los impactos de la corta de árboles basado en la práctica local, adoptada en la "Wiangaree State Forest" cerca de Kyogle, New South Wales, para el año inmediatamente después de la cosecha. La probabilidad de ocurrencia de mortalidad de un árbol enfermo fue fijada en 0,3 como una manera de considerar los daños de la extracción.

Son numerosos los modelos de claros que han considerado las perturbaciones como los huracanes, los incendios (Doyle, 1981) y la acción de los vientos (Pacala *et al.*, 1993). Los incendios naturales y ocasionados son importantes factores que influyen la dinámica forestal; porque pueden causar la muerte de los árboles individuales o incrementar la probabilidad de mortalidad en el futuro. Algunos modelos simulan el efecto de la intensidad y la frecuencia del fuego (Kercher y Axetrod, 1984). Por ejemplo, el modelo BRIND, desarrollado para zonas altas de bosques de eucaliptos en el territorio de la capital de Australia, Shugart y Noble (1981) asumieron una ocurrencia aleatoria de los incendios naturales pero con una probabilidad fija; la intensidad de los incendios estaba en función de la cantidad de combustible y de las condiciones climáticas. En el modelo FORICO (Doyle, 1981) se puede simular los efectos de los huracanes en la dinámica de los bosques, el modelo asume que la probabilidad de ocurrencia de un huracán es 0,11 y que pueden causar un daño equivalente entre 0 -10% de la densidad del rodal. El modelo SWAMP (Phipps, 1979) se utilizó para simular los efectos de la frecuencia y duración de las inundaciones sobre la dinámica de los bosques que se desarrollan en tierras inundables del Refugio de Fauna Silvestre de Río Blanco en el sudeste de Arkansas.

Comprobación y capacidad de predicción de los modelos

Un importante trabajo en el desarrollo de los modelos de base individual para la simulación de la sucesión y manejo de bosques, es comprobar el comportamiento del modelo. Como otros muchos modelos computarizados, se pueden hacer de dos maneras: verificación y validación. La verificación es un proceso donde los resultados de la simulación se contrastan con las observaciones usadas en la

construcción del modelo y en la estimación de los parámetros. La validación significa que los resultados de la simulación son probadas con datos que son independientes de la construcción de los modelos. Conforme a Shugart (1984) la aplicación de modelos son validaciones especiales, porque ellos usualmente implican la predicción de cambios futuros.

Los modelos de claros son muy usados para la evaluación de las consecuencias de los cambios en el ambiente y prácticas silviculturales en las condiciones futuras, por lo que deben de estar dentro del rango de extrapolación e interpolación del modelo. Muchos modelos han sido intensamente comprobados, por ejemplo en una tabla resumen, Shugart (1984) listó 7 ejemplos de verificación, 7 ejemplos de validación y 5 aplicaciones de 8 modelos de claros representativos.

Los modelos de claros han sido aplicados para entender la composición y estructura de la dinámica de bosques, principalmente en los bosques templados (Shugart, 1984), bosques boreales (Bonan, 1989) y bosques tropicales (Doyle, 1981; Fernández, 1995; Ramírez 1995), pero recientemente son muy aplicados a comunidades de pradera.

Futuro de los modelos de base individual

La tecnología computacional ha hecho posible el desarrollo de muchos modelos de simulación; no hay ninguna duda que en el futuro los modelos de base individual continuarán evolucionando con el explosivo advenimiento de las técnicas de la computación y debido a que las estaciones de trabajo y las computadoras personales ahora están más disponibles. A medida que las barreras computacionales se van superando y las computadoras se hacen mucho más rápidas, los forestales y ecólogos pueden ver al instante los resultados de simulaciones de periodos largos.

Adicionalmente a los equipos de computación, también los programas de computación son muy importantes en la formulación de los modelos de simulación. Muchos de los existentes fueron desarrollados usando procedimientos y lenguajes de estructura semejante al FORTRAN. Aplicaciones de lenguajes de computación más avanzados pueden reforzar la flexibilidad, efectividad y eficacia de las simulaciones (Liu y Ashton, 1995) .

La mayoría de los modelos anteriormente mencionados, fueron desarrollados por los modeladores mismos, por lo que son incomprensibles para la gente que carece de habilidades modernas de computación. Los futuros modelos tienden a tener una interfase de uso gráfico y a modelar en un ambiente que sea fácil de aprender, usar, y modificar para los novicios.

Los modelos de base Individual para bosques tropicales

Los bosques templados, subtropical y tropical cubren el 40,7%, 7,8% y el 51,5% del área boscosa del mundo respectivamente. Cientos de modelos de base individual se han desarrollado para bosques templados y regiones boreales. Pero solamente unos pocos modelos de base individual se han desarrollado para bosques tropicales y subtropicales. Hay dos razones que pueden explicar esta relativa carestía. Primero, muchas investigaciones forestales se han desarrollado en bosques templados y boreales, de esa manera éstos tienen más datos disponibles para desarrollar los modelos y no así para los bosques tropicales. La situación debe mejorar a causa de la atención mundial que se está brindando actualmente a los bosques tropicales, debido a la reciente preocupación de los científicos y gobiernos por la pérdida a gran escala de la biodiversidad y al acelerado aprovechamiento de la madera que se realiza en los trópicos. Segundo, muchos bosques tropicales se encuentran en países en vías de desarrollo, los que disponen de muy pocos investigadores para desarrollar modelos.

Los modelos para bosques tropicales están mayormente basados en modelos desarrollados para bosques templados y boreales. No obstante, muchas estrategias de modelamiento aplicadas en bosques templados y boreales son inapropiadas para los sistemas de bosques tropicales, debido a la disponibilidad de datos y diferencias significativas en la estructura de los bosques. Los bosques tropicales son mucho más complicados y difieren de los bosques templados. Por ejemplo, en una parcela experimental de 50 ha en Bosques Pasoh en una reserva de Malasia, existen más de 800 especies. Una importante variable en los modelos es la edad del árbol. La información de la edad estaría fácilmente disponible si se contara con la historia de las plantaciones o se basara en anillos de crecimiento del árbol. La estimación del incremento diamétrico es fácil para especies de los bosques templados que producen anillos anuales, pero ha sido difícil distinguir realmente el crecimiento anual en los árboles de bosques tropicales debido a que el crecimiento es intermitente, pero no necesariamente estacional (Liu y Ashton, 1995).

Perspectivas

Como Huston *et al.* (1988) señalan que el modelamiento de base individual tiene un gran potencial, el cual es necesario explorar. Se espera que durante los años próximos los modelos de simulación de base individual para bosques llegarán a ser una herramienta muy importante para comprender los mecanismos de la dinámica del bosque y para un manejo forestal sustentable.

Modelo ZELIG-versión 2

Es un modelo básico desarrollado con versatilidad en la aplicación (Smith y Urban, 1988). El mismo se deriva del FORET (Shugart y West, 1977; Shugart, 1984) manteniendo muchas de sus características sobresalientes. Difiere de las otras versiones en que se implementa sobre una cuadrícula o transecta de parcelas modelo (Urban *et al.*, 1991). Puede ser aplicado de dos maneras: a) interactiva, cuando las celdas de la cuadrícula interactúan entre ellas, b) no interactiva, donde la celda actúa independientemente (Figura 3).

Base conceptual

Hay dos submodelos conceptuales para ZELIG. El énfasis principal está en el régimen de luz, el cual difiere cualitativamente de otros modelos de claros. El segundo énfasis se pone en el balance del agua en el suelo, el cual ha sido ampliado de la rutina simple usada en la mayoría de los modelos de claros (Urban, 1993).

El régimen de luz

ZELIG modela un rodal boscoso como una red rectangular de celdas de tamaño de un árbol. Cada celda corresponde a una parcela en el modelo de claros, con la extensión de que los árboles pueden sombrear o ser sombreados por los de las celdas vecinas (condición interactiva). Se asume la homogeneidad horizontal a escala de celda, reteniendo esta función de simplificación que ha ayudado al éxito de los modelos de claros. La heterogeneidad vertical la asume como perfiles de altura en área foliar y luz disponible, a una resolución de un metro. El punto crítico del régimen de luz es el perfil del área foliar definido por cada celda de la red. Este arreglo es constituido por la estimación del área foliar total de cada árbol en la parcela y distribuyendo ésta a lo largo de cada copa de árbol vivo (Leemans y Prentice, 1987; citados por Urban, 1993). Además incluye alometrias para altura del árbol y área foliar (Urban, 1993).

El perfil del área foliar se usa para estimar el perfil de luz para cada posición (fila, columna y altura) dentro del rodal modelado. La luz es dividida en sus componentes: luz directa y luz difusa, y el dosel es muestreado para estimar cada componente. Este muestreo es acompañado por la construcción de perfiles de área foliar diagonal a un ángulo y dirección específica. La diagonal se aproxima como una serie de etapas o cortes transversales, las cuales van de celda en celda hasta que el perfil emerge del dosel (Urban, 1993).

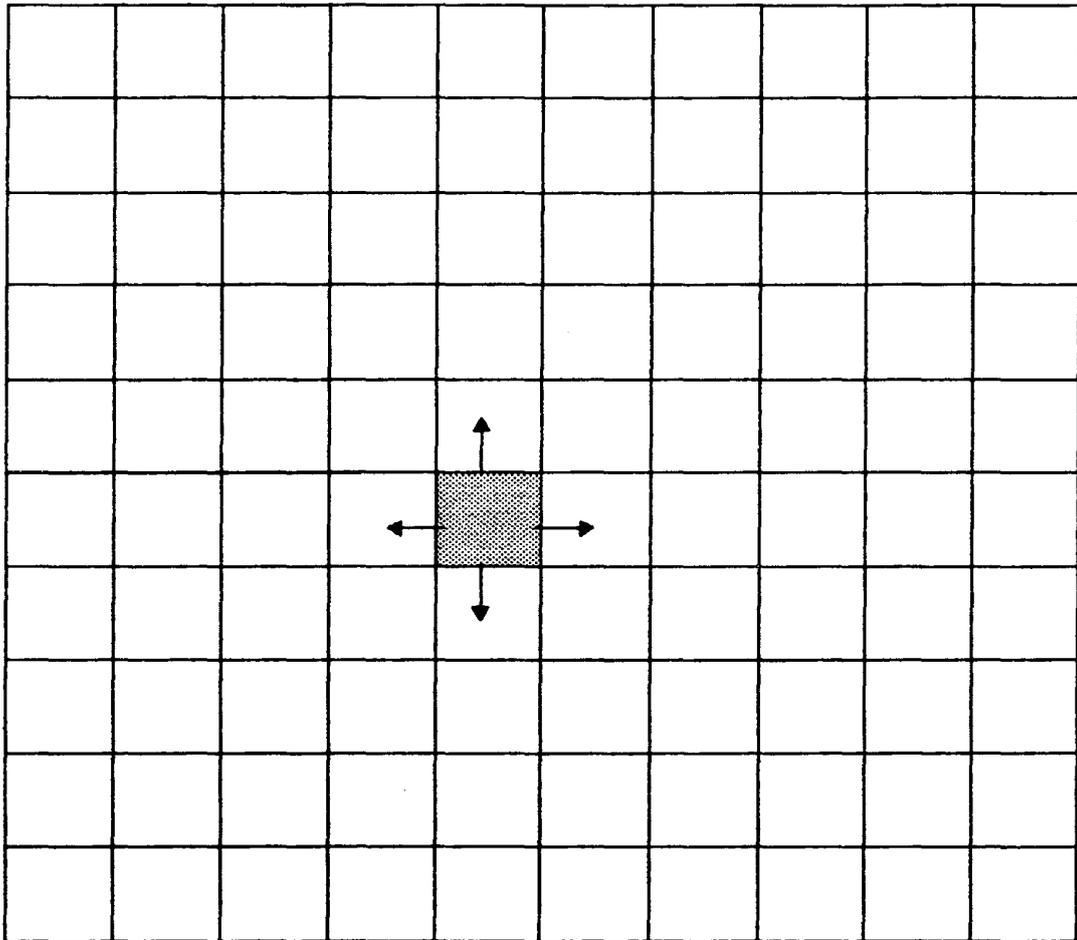


Figura 3. Representación esquemática de la forma como se define las celdas de la cuadrícula del modo interactivo, en el modelo ZELIG (Urban, 1993).

Al modelo le interesa la inclinación solar influenciada por la latitud. La dirección de la luz puede provenir de cualquier punto cardinal (N,E,S,O) o vertical. El componente luz directa se estima construyendo un perfil diagonal al sur, con un ángulo de luz derivado de la inclinación solar promedio, integrado bajo la estación de crecimiento (Urban *et al.*, 1991). El componente luz difusa se estima por muestreos múltiples de la luz, construyendo perfiles diagonales en diferentes ángulos y direcciones. La luz que incide a través del perfil se atenúa de acuerdo con la ley de Beer-Lambert. La luz total incidente en cualquier punto en el rodal (fila, columna, altura) es la suma de la luz directa y difusa.

Régimen de agua en el suelo

ZELIG tiene un sub-modelo que puede simular un número de suelos de múltiples niveles. El bosque es un "mapa de suelos" que asigna un tipo a cada celda. La dinámica de la humedad en el suelo es influenciada por el dosel a través de la intercepción y sombreado, y así el balance del agua en el suelo puede variar para cada celda. El modelo utiliza el estimador Priestley-Taylor para la evapotranspiración potencial (PET), como fue implementado por Bonan (1989). Debido a que la PET está dada por la radiación y ésta puede variar con la topografía, la rutina puede ajustar el balance del agua para los rodales (celdas) de diferentes pendientes y aspectos.

Finalmente el agua en el suelo se mide a través de un índice de días secos para cada nivel del suelo. Este índice se integra para el nivel superior del suelo (20 cm) y se usa para restringir el establecimiento de las plántulas, mientras que son integrados todos los niveles para limitar los árboles.

Formulaciones usadas en el modelo

Relaciones alométricas

Desde el modelo inicial JABOWA (Botkin *et al.*, 1972) hasta la más reciente versión de ZELIG 2 (Urban, 1993) usan una relación no-lineal entre la altura total del árbol y su diámetro a la altura del pecho, comúnmente conocido como dap (dbh en el modelo). Esta relación es usada para calcular la altura del árbol, una vez que el diámetro se incrementa de acuerdo con la ecuación diferencial ordinaria que describe la dinámica del crecimiento diamétrico.

ZELIG, para determinar esta alometría, utilizó previamente la ecuación cuadrática entre la altura total (H) y el diámetro a la altura del pecho (dap), que calculaba internamente el modelo JABOWA y FORET, del siguiente tipo:

$$H = H_0 + b_1 D + b_2 D^2 \quad (1)$$

donde:

- D : diámetro a la altura del pecho (dap) en m.
- H : altura total en m.
- H₀ : altura constante, igual a la altura a nivel del pecho (1,37 m)
- b₁ : coeficiente alométrico de primer orden; adimensional debido a que la altura y el diámetro se calculan en las mismas unidades.
- b₂ : coeficiente alométrico de segundo orden, expresado en m⁻¹, ya que proviene de la relación entre la altura y el diámetro elevado al cuadrado.

En esta ecuación cuadrática implicaba que cuando el dap tomaba el valor de cero (D = 0) el árbol alcanzaba la altura de H₀ es decir de 1,37 m. Esta suposición estaba fundamentada en el hecho de que los árboles recién establecidos, en un periodo de simulación alcanzaban la altura del pecho.

En ZELIG.2, Urban (1993) incorpora la relación alométrica diferente a la que venía usando los modelos anteriores, esta relación usa la fórmula exponencial de Chapman-Richards (Avery y Burkhardt, 1983 citados por Urban, 1993), la cual es suficientemente flexible para ajustar a la mayoría de las especies arbóreas. La forma de la ecuación es la siguiente:

$$H = H_{\max} [1 - \exp(-b_2 D)]^{b_3} \quad (2)$$

donde:

- H : altura total en m
- D : diámetro a la altura del pecho (dap) en m
- H_{max} : altura máxima en m
- b₂ : coeficiente de regresión que determina la pendiente de la curva exponencial, expresado en m⁻¹.
- b₃ : coeficiente de regresión adimensional que controla la curvatura

Fernández (1995) reporta que cuando se realiza la relación D=0 la rutina de ZELIG que calcula la altura, retorna un valor para la altura de H = 1,37 m, a pesar de que en la relación exponencial implica que para un valor de D=0 debe de retornar el valor de H=0. Con el propósito de seguir siendo consistentes con la relación cuadrática, introdujo una modificación en la relación exponencial a fin de que el valor de H = 1,37 m cuando se ingresaba el D=0.

La fórmula modificada es la siguiente:

$$H = (H_{\max} - H_0) [1 - \exp(-b_2 D)]^{b_3} + H_0 \quad (3)$$

Area foliar

Usa la siguiente ecuación (Sollins *et al.*, 1973; citado por Urban y Shugart, 1992):

$$L = 0,16094 D^{2,129} \quad (4)$$

donde:

L : área foliar en m^2
D : diámetro a la altura del pecho en cm

Biomasa leñosa

Utiliza la ecuación desarrollada por Sollins *et al.* (1973); citado por Urban y Shugart (1992).

$$B = 0,1193 D^{2,993} \quad (5)$$

donde:

B : biomasa
D : diámetro a la altura del pecho en cm

Crecimiento diamétrico

Usa la fórmula desarrollada por Botkin *et al.* (1972) citado por Urban y Shugart (1992).

$$d[D^2 H] / dt = r L (1 - DH / D_{\max} H_{\max}) \quad (6)$$

asume $L = cD^2$ y $G = rc$, luego por restitución y diferenciación, se obtiene:

$$dD/dt = G D (1 - DH / D_{\max} H_{\max}) / (274 + 3b_2 D - 4b_3 D^2) \quad (7)$$

donde:

G : tasa escalar de crecimiento
D : diámetro a la altura del pecho en cm
H : altura en cm

b_2 y b_3 : valores constantes

Los subíndices max. denotan valores máximos para cada especie.

Extinción de Luz

Utiliza la ecuación desarrollada por Monsi y Saeki (1953); citado por Urban y Shugart (1992).

$$Q_h = Q_0 \exp [-k L (h')] \quad (8)$$

donde:

Q : radiación incidente (1 = pleno sol)

h' : alturas > 1m

k : valor constante

L : área foliar en m^2

Respuesta a la luz

Usa la fórmula descritas por Botkin *et al.* (1972) citado por Urban y Shugart (1992).

$$r(Q_h) = c_1 (1 - \exp [-c_2 (Q_h - c_3)]) \quad (9)$$

donde:

Q : radiación incidente (1 = pleno sol)

c_1, c_2, c_3 , constantes

Humedad del suelo

Utiliza la fórmula desarrollada por Pastor y Post (1986) citado por Urban y Shugart (1992).

$$r(M) = [(M^* - M) / M^*]^{1/2} \quad (10)$$

donde:

M : índice de humedad del suelo (de 0 - 1)

M^* : máximo tolerable para la especie



Fertilidad del suelo

Usa la fórmula desarrollada por Aber y Melillo (1982) citado por Urban y Shugart (1992).

$$r(F) = c_1 + c_2 F - c_3 F^2 \quad (11)$$

donde:

F : fertilidad relativa del suelo (dimensión de 0-1)
c₁, c₂, c₃ son constantes

Temperatura

Utiliza la ecuación desarrollada por Botkin *et al.* (1972) citado por Urban y Shugart (1992).

$$r(T) = 4(T - T_{\min})(T_{\max} - T) / (T_{\max} - T_{\min})^2 \quad (12)$$

donde:

T : índice de temperatura
Los subíndices max y min son máximos y mínimos para las especies.

CAPITULO III

DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

Ubicación y superficie

El Bosque Experimental "El Calmital" está ubicado en los Llanos Occidentales venezolanos; políticamente se encuentra en el Municipio Autónomo Obispos del estado Barinas, a orillas del río Yuca, en las cercanías de las poblaciones de Barrancas y Obispos, al noreste de la ciudad de Barinas. Geográficamente se localiza en los 8° 40' de latitud norte y los 70° 13' de longitud oeste (Figura 4).

La superficie total del bosque hasta 1970 fue de 562 ha ; a comienzos del año 1971 el Instituto Agrario Nacional (IAN) donó, con derecho reconocido, una superficie adicional de 240 ha al Instituto de Silvicultura, que se encuentra adyacente al lindero del antiguo bosque. Con esta nueva ampliación, la superficie total de dicho bosque se aproxima a la 800 ha.

El área forma una superficie de "triángulo" bastante irregular, limitando por el oeste, con parte del viejo camino Barrancas-Calmital y Obispos; por el norte lo bordea el río Yuca muy cerca de la confluencia con el río Masparro; por el sur y el este lo limitan los terrenos de propiedad del IAN, adquiridos por éste mediante compra de la municipalidad del antiguo Distrito Barrancas.

Altitud y topografía

El bosque se encuentra enclavado en una llanura aluvial a 170 msnm. Su topografía se caracteriza por la existencia de pequeñas depresiones que retienen el agua de lluvia que son denominados "bajíos". En ellas predominan suelos con alta capacidad de retención de agua, debido a su textura arcillosa-limosa, y con baja capacidad de oxidación. Las partes más elevadas se denominan "bancos", éstos no se inundan durante la época de lluvia pero hace notar rápidamente los efectos de la estación seca; los suelos generalmente son de textura arenosa-francosa, franco arenosa o franco-arcillosa (Konrad, 1961).

Clima

Debido a la falta de estaciones climatológicas en el área de estudio, se han utilizado los datos de la estación meteorológica de Barinas, ubicada a 40 km del bosque experimental, para caracterizar el clima de la zona (Ramírez, 1995).

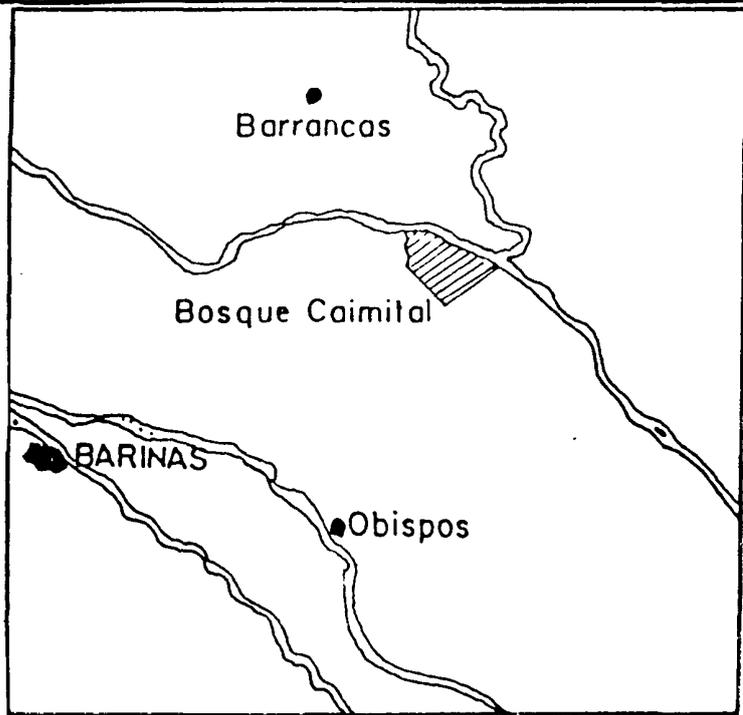
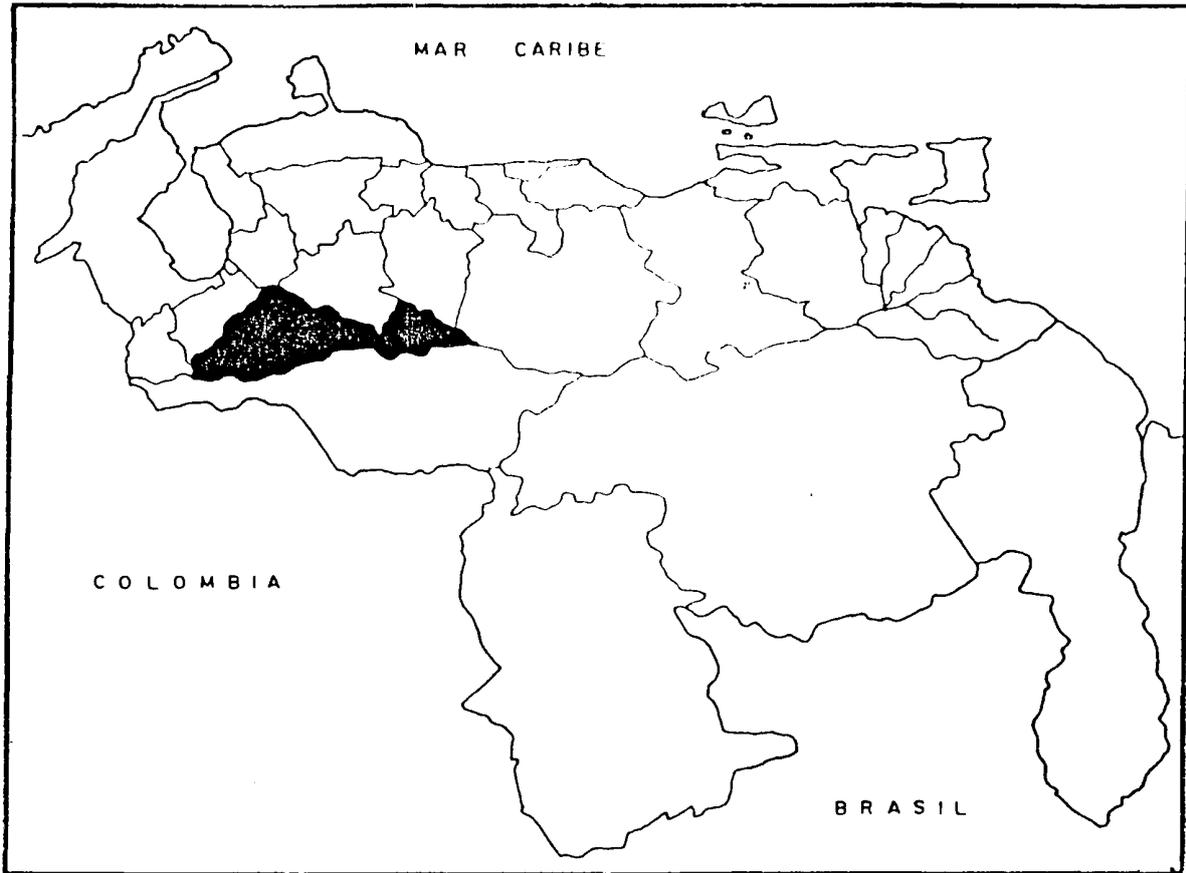


Figura 4. Ubicación relativa del área de estudio. Tomado de Ramírez (1995)

La temperatura media anual es de 26,7°C, la máxima promedio es de 37,4°C y la mínima promedio de 19,8°C. La precipitación media anual es de 1.590 mm, presentándose una marcada distribución estacional donde se distinguen dos periodos , uno de ellos por ser de intensas lluvias (may-nov) y el otro (dic-mar) por ser muy seco con mínimas precipitaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Valores medios mensuales de los principales parámetros climáticos de la zona de estudio.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROM
Temperatura media (°C)	26,6	27,6	28,9	28,1	26,3	25,7	25,0	25,2	26,0	26,5	26,0	27,0	26,7
Precipitación total (mm)	8	9	40	70	210	286	247	151	218	205	132	14	1590
Humedad media (%)	74,8	72,4	71,6	75,8	87,0	86,0	86,6	86,0	84,8	83,4	83,2	77,3	80,7
Insolación media (hr.)	7,03	6,33	4,10	4,40	4,20	4,57	5,20	6,43	6,27	6,37	6,93	7,95	5,80
Radiación media (cal/cm ²)	445	445	428	377	400	406	413	411	435	438	399	432	419
Evaporación total (mm)	239	272	295	200	124	115	105	120	135	169	145	233	2151

Fuente: Ramírez (1995)

La humedad promedio es de 81%, la variación anual está relacionada con la distribución de la precipitación, observándose los valores mínimos en la época seca con un 72% y una máxima de 87%.

El promedio de horas luz diario es de 5,8 horas. La evaporación total anual es de 2.151 mm, observándose un máximo en el mes de marzo (295 mm) y el mínimo en julio (105 mm). La radiación media anual es de 419 cal/cm², con ligeras variaciones a lo largo del año y un mínimo en el mes de abril y el máximo en febrero.

Según la clasificación de Köppen (1948) el área presenta un clima tropical (Awul), debido a que la temperatura media del mes más frío es superior a los 18 °C (A); las lluvias máximas ocurren en los meses de mayo, junio y julio y la época de menor precipitación se presentan en los meses de diciembre, enero y febrero (w); con una poca variación térmica anual menos de los tres grados centígrados (l) y la temperatura media más alta se registra antes del solsticio de verano (u).

De acuerdo al diagrama climático de Walter y Lieth (1960), para "El Calmital" se distinguen tres épocas muy marcadas; la perhúmeda, que dura un poco más de seis meses (mediados de abril a inicios de noviembre), se caracteriza por la excesiva precipitación y humedad del suelo lo cual provoca encharcamientos o inundaciones; la época húmeda, caracterizada por una menor precipitación que no afecta las condiciones de humedad para el crecimiento vegetativo ni tampoco se manifiesta las condiciones restrictivas de la sequía, abarca menos de dos meses durante el año distribuidos en dos periodos, la primera entre los meses de marzo - abril y la segunda de tan solo una quincena en el mes de noviembre; la época de sequía dura 3 meses, ésta se caracteriza por la poca precipitación y la reducción drástica de la humedad del suelo que afecta el crecimiento vegetativo; empieza a mediados del mes de noviembre y culmina a mediados del mes de marzo (Figura 5).

Geología

El área de estudio forma parte del paisaje llanero venezolano, se localiza sobre la formación "Río Yuca", la cual está constituida por capas altamente lenticulares que contienen todas las gradaciones de areniscas, lutitas arcillosas y conglomerados, dispuestas irregularmente; las areniscas son altamente micáceas y arcillosas (Castillo, 1966).

Suelos

De manera general los suelos de la zona se caracterizan por ser de origen aluvial y aluvial acustriano, los materiales edáficos son de edad reciente, siendo arrastrados por las aguas desde las formaciones montañosas andinas vecinas.

El material originario de estos suelos les confiere un particular grado de fertilidad, a pesar de las condiciones climáticas relativamente propicias la meteorización no ha avanzado, lo suficiente para destruir los minerales y provocar la pérdida de los elementos más solubles y necesarios a la nutrición vegetal (Castillo, 1966). La variación textural en el sentido vertical se debe a la disminución de la velocidad de transporte del material y a los cambios en los cursos de los ríos, de manera que hay una estrecha relación entre la posición topográfica y el contenido de arcilla o arena. Las características de los suelos de las parcelas estudiadas del bosque experimental se muestran en Tabla 2.

Vegetación

Estos bosques se caracterizan por la extrema variabilidad de la vegetación. En pequeñas áreas se encuentran bosques altos y bajos, así como ricos y pobres en palmas.

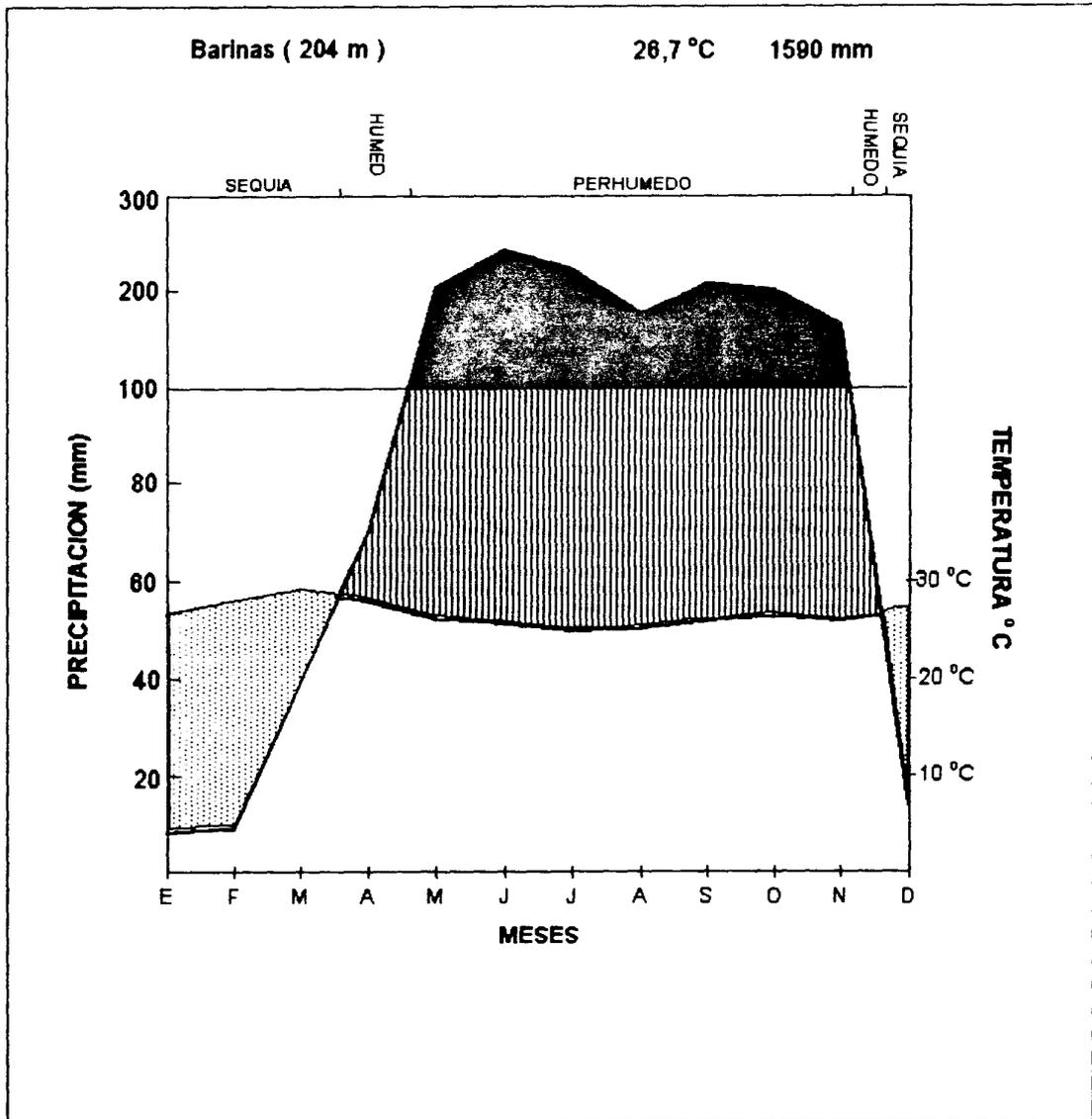


Figura 5. Diagrama climático de "El Caimital" según Walter y Leith (1960)

Tabla 2. Caracterización de los suelos de cada una de las parcelas en estudio del bosque experimental "El Calmital".

Parcela	Profundidad (cm)	Textura	Capacidad de campo (cm)	Punto de Marchitez (cm)
1	0-20	A	3,6	1,7
	20-50	A	3,6	1,7
2	0-20	FA-L	4,51	2,49
	20-50	FA-L	4,51	2,49
3	0-20	A	3,6	1,7
	20-50	A-L	3,83	2,1
4	0-20	A-L	3,83	2,1
	20-50	A-L	3,83	2,1
5	0-20	A-L	3,83	2,1
	20-50	A	3,6	1,7
6	0-20	A	3,6	1,7
	20-50	A	3,6	1,7

A = Arcilloso

FA-L = Franco arcilloso-limoso

A-L = Arcilloso-limoso

Fuente: Bello (1996).

La vegetación del área es la típica de un bosque tropical, caracterizada por su gran heterogeneidad. De acuerdo a estudios de composición florística realizados en el Bosque "El Calmital" se han encontrado 68 especies diferentes por hectárea, tomando en consideración individuos con más de 20 cm de diámetro a la altura del pecho (Konrad 1961). En otro estudio de análisis estructural de 3,0 ha realizado en la parte sur-oriental del bosque (Lamprecht, 1964) se encontró 66 especies arbóreas diferentes, tomando en cuenta individuos con más de 10 cm de dap, la especie más abundante fue la palma de agua (*Scheelea maracaibensis*). Bernal (1967) encontró más de 80 especies en el estrato arbóreo, además de varias palmeras. Así mismo, Marcano (1964) incluyendo el estrato arbóreo de menor tamaño (arbustos no maderables), describió 135 especies diferentes. Ramírez (1995) reporta que en las parcelas bajo estudio se consiguieron 64 especies arbóreas, además de un número considerable de palmas.

Según Pittier (1948) el bosque experimental se clasifica como bosque tropofítico macrotérmico, con transiciones hacia el bosque de galería. Según Holdridge (1967), corresponde a la zona de vida Bosque seco transición a Bosque húmedo tropical. Según Beard (1946) es una selva veranera semidecidual hasta selva veranera siempreverde. El bosque es un mosaico compuesto de unidades florísticas diferentes, en su estructura vertical se distinguen hasta tres estratos y el sotobosque, los estratos superior y el medio más bien ralos y comparativamente pobres en

especies, el piso inferior y el sotobosque son mucho más densos y con mayor número de especies (Lamprecht, 1964).

Historia

En los años 1940 y 1951, el bosque fue explotado selectivamente, aprovechándose los mejores individuos de las especies de mayor valor comercial (cedro y caoba). Por otro lado, el bosque experimental, aparentemente es un bosque secundario establecido sobre terrenos anteriormente agrícolas, lo cual se evidencia por la abundancia de plantas de café (Finol, 1964).

A partir del año 1956, el Instituto de Silvicultura estableció una serie de parcelas permanentes en los principales tipos de bosque, abarcando nueve zonas de vida y bosques de distintos grados de intervención. A partir de su instalación se hicieron mediciones periódicas sobre los árboles, topografía, suelos, clima e intervención humana, específicamente se tomaron datos anuales de la circunferencia a la altura del pecho, agotamiento de los árboles (por mortandad, caídos o explotados en el curso de los últimos años), los ingresos (árboles no medidos anteriormente y que alcanzaron la circunferencia mínima preñada). En el bosque experimental "El Calmital", se establecieron seis de las parcelas mencionadas, las que cuentan con registros de datos por un período de 32 años.

CAPITULO IV

METODOLOGIA

El proceso metodológico se muestra en la Figura 6. En ella se contemplan seis etapas, las mismas que fueron utilizadas por Fernández (1995) y Ramírez (1995). No se consideran los procesos previos de la selección del sitio y la selección del modelo de simulación.

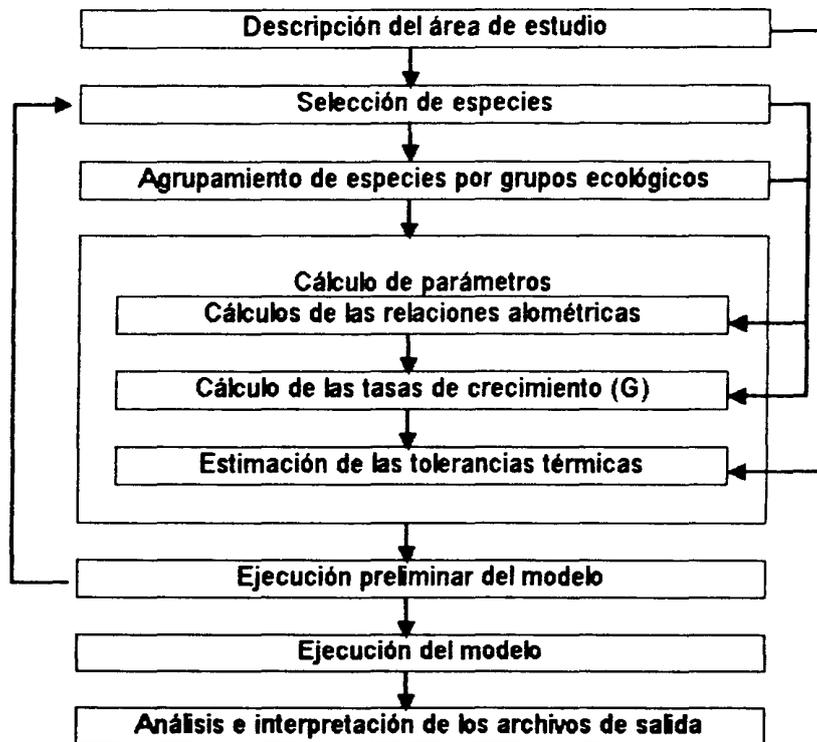


Figura 6. Diagrama de las etapas seguidas durante el proceso de simulación

Descripción del área de estudio

En esta etapa se procedió a recopilar toda la información existente del área de estudio, las características físico-ambientales y la información biológica de las especies.

La información físico-ambiental comprendió la ubicación geográfica, latitud y longitud, elevación, información climática (con detalles de las características de la precipitación mensual; temperatura máxima, mínima y promedio; y radiación solar), características de los suelos (como tipo, clase textural, profundidad, capas del suelo, niveles de fertilidad, capacidad de campo y punto de marchitez para cada nivel).

La información biológica de las especies comprendió el nombre científico, familia, abundancia, forma de crecimiento, tasas de crecimiento máximo, diámetro máximo, altura total y altura máxima que alcanza, edad máxima, requerimientos de luz, patrones de reproducción

Selección de especies

Debido a la dificultad de ejecutar el modelo con un número elevado de especies, se procedió a seleccionar 20 de ellas, utilizando el criterio de importancia en función al indicador denominado Índice de valor (IV), el cual fue calculado para cada especie por Ramírez (1995); el IV de cada una de ellas se muestra en el Apéndice A.

De esa manera, se seleccionaron las primeras 14 especies de manera que el IV acumulado fuera lo más cercano al 80%, valor que se considera representativo de la variabilidad del bosque. Las demás especies no seleccionadas fueron agrupadas de acuerdo a sus características resaltantes desde el punto de vista ecológico.

Agrupamiento de especies en grupos ecológicos

Las 54 especies individuales que no fueron seleccionadas se agruparon de acuerdo a los criterios descritos por Ramírez (1995). Dichos criterios fueron modificados de la propuesta de Acevedo *et al.* (1995) considerando las definiciones de los grupos realizados por Shugart (1984, 1987) y Swaine y Whitmore (1988), detalles de la definición de estos grupos se encuentran en el Apéndice B.

Los criterios de selección empleados fueron: los requerimientos de luz y el crecimiento reflejado en la altura máxima que pueden alcanzar los individuos. En cuanto al requerimiento de luz se tomaron tres clases: 1) alto (especies fuertemente demandantes de luz, al que corresponden las especies heliófitas); 2) medio (especies que toleran medianamente las condiciones de sombra); y 3) bajo (especies que tienen una tolerancia alta a la sombra) y las clases de alturas consideradas fueron: 1) altura máxima menor de 15 m; 2) altura máxima entre 15 y 30 m de altura; y 3) altura máxima mayor de 30 m, los grupos identificados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Grupos ecológicos identificados en el Bosque experimental "El Calmital"

Tolerancia a la sombra	h max <15m	h max = 15-30 m	h max >30m
Alta (tolerantes)	Tolerantes pequeñas	Tolerantes medianas	
Media (nómadas)		Nómadas medianas	Nómadas grandes
Baja (pioneras)	Pioneras pequeñas	Pioneras medianas	

Fuente: Ramírez (1995)

Estimación de valores de los parámetros

Para la elaboración de los archivos de entrada del modelo es necesario previamente calcular una serie de índices y parámetros como los coeficientes alométricos, tasas de crecimiento y tolerancias térmicas, los que se obtienen fuera del modelo ZELIG.

Cálculo de la relación alométrica altura-diámetro

Para cada una de las 14 especies dominantes y grupos de especies se tomaron los valores de los coeficientes alométricos calculados por Ramírez (1995).

Los coeficientes alométricos b_0 y b_1 fueron estimados por regresión a partir de los datos de altura y diámetro para el conjunto de árboles de la misma especie o grupo de especies.

Los datos de altura y diámetro se obtuvieron de los registros de evaluación realizadas en las parcelas permanentes del Bosque Experimental "El Calmital" y de datos provenientes de otros inventarios realizados en la zona.

Los parámetros b_0 y b_1 obtenidos, se ingresaron en el archivo ESPECIES para las 14 especies individuales y los seis grupos ecológicos mencionados.

Cálculo de las tasas de crecimiento

En la versión ZELIG.2 (Urban, 1993) se dispone de un programa de soporte llamado GROW el cual se usa para calibrar las tasas de crecimiento de las diferentes especies de acuerdo a las condiciones de crecimiento especificadas por el usuario.

GROW ofrece la opción de variar interactivamente algunos de los parámetros de las especies, entre ellos edad máxima (Amax), diámetro máximo (Dmax), altura, forma (F), y tasa de crecimiento (G). Estos se pueden modificar para calibrar la ecuación de crecimiento con datos empíricos.

Para ejecutar GROW se requiere del mismo archivo ESPECIES, preparado para el modelo ZELIG, luego de mostrar todos los nombres de las especies incluidas en dicho archivo, solicita escoger la o las especies que se quiere simular; así mismo, permite operar con dos opciones 1) sin restricciones ambientales y 2) con restricciones ambientales. Los resultados se pueden guardar como un archivo nuevo de ESPECIES, con diferente extensión .

Cuando se realiza la simulación con la opción "sin restricciones ambientales", en los resultados se observa que los valores de la altura de fuste (HC) siempre adopta el valor de 1.00 y no representa el valor de la altura del fuste aunque el encabezado en el archivo DAT dice lo contrario. Simplemente la altura hasta la base de la copa no se calcula en este caso.

Para estimar G con el programa GROW, se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Los valores de diámetro máximo (Dmax), edad máxima (Amax) y forma de vida (lf), se mantuvieron constantes (tal como se encuentra en el archivo ESPECIES preparado para ZELIG), y las restricciones ambientales no fueron incluidas. Con dichos datos se realizó una corrida inicial que permitió obtener el valor de G en forma preliminar.
2. Con el parámetro incremento diamétrico (Dinc) se determinó el año al cual la especie alcanzaba un diámetro (DBH) aproximado de 10 cm, a partir de ese año se contaron aproximadamente 30 años más y se comparó el valor del incremento diamétrico (Dinc) a ese momento con los valores de incremento diamétrico que mostraban las planillas de registro del Bosque "El Calmital", tanto para las 14 especies individuales como para los seis grupos de especies (Apéndice C)
3. Si el valor experimental era lo suficientemente cercano al valor simulado, el valor de "G" se consideraba adecuado, de otra manera se continuaba ejecutando GROW hasta ajustar "G" adecuadamente.
4. Este procedimiento se repitió para cada especie y grupo de especies, hasta obtener los valores de "G" más apropiados, los que finalmente eran almacenados en archivos PRI y DAT.

Estimación de los límites de tolerancia térmica

Los valores calibrados de las tolerancias térmicas y de la variación de humedad del suelo se tomaron de Ramírez (1995), los cuales fueron obtenidos al ejecutar el programa de soporte llamado WEATHER.

WEATHER usa el mismo archivo SITIO preparado para ZELIG y una vez ejecutado produce un archivo de salida con las temperaturas y balance de humedad del suelo. El programa requiere de un valor estimado a nivel del rodal del índice de área foliar activa (a_{f}/l), definido como radiación solar a cada nivel del dosel, el cual se usa para dividir la evapotranspiración potencial en evaporación y transpiración, y también requiere de un valor estimado del índice de área foliar efectiva, definido como el agua que llega al suelo por intercepción (e_{f}/l). El programa además pide un coeficiente de extinción de luz que por defecto es 0,4 .

Ejecución preliminar del modelo

Esta etapa se realizó con la finalidad de ajustar algunos parámetros o coeficientes que afectaban la simulación. Esto nos permitió descartar el criterio "comercial" para la selección de las especies, debido a los valores muy pequeños que mostraba la simulación con respecto al crecimiento del área basal. A pesar de las distintas modificaciones realizadas en los parámetros de tolerancia de las especies no se pudo mejorar los niveles del área basal en los registros de salida del modelo.

La alternativa siguiente fue utilizar los archivos generados por Ramírez (1995) que mostraron mejores resultados en crecimiento del área basal. Una vez verificados los parámetros de salida se procedió a elaborar los diferentes archivos de entrada, considerando los distintos tratamientos diseñados para evaluar el efecto del aprovechamiento.

Preparación de los tratamientos o escenarios de aprovechamiento

Para la simulación de los diferentes escenarios de aprovechamiento forestal, se basó en un sistema silvicultural policíclico, que plantea la ejecución de varias cortas dentro de un turno natural de madurez del bosque, y con diferentes grados de explotación que fue fijada a través del diámetro mínimo de corta. Los factores considerados y los escenarios resultantes, fueron los siguientes:

a) Ciclos de corta

- a.1. Manejo policíclico cuando el aprovechamiento se realiza en un ciclo de corta de 30 años.

- a.2. Manejo policíclico cuando el aprovechamiento se realiza en un ciclo de corta de 60 años.
- a.3. Manejo policíclico cuando el aprovechamiento se realiza en un ciclo de corta de 100 años.

b) Diámetro mínimo de corta

- b.1. Aprovechamiento de árboles con 30 cm de diámetro mínimo de corta
- b.2. Aprovechamiento de árboles con 60 cm de diámetro mínimo de corta
- b.3. Aprovechamiento de árboles con 80 cm de diámetro mínimo de corta

Los escenarios o tratamientos a simular fueron los siguientes:

- ESCENARIO 1 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 30 cm de diámetro, con ciclo de corta de 30 años.
- ESCENARIO 2 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 30 cm de diámetro, con ciclo de corta de 60 años.
- ESCENARIO 3 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 30 cm de diámetro, con ciclo de corta de 100 años.
- ESCENARIO 4 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 60 cm de diámetro, con ciclo de corta de 30 años.
- ESCENARIO 5 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 60 cm de diámetro, con ciclo de corta de 60 años.
- ESCENARIO 6 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 60 cm de diámetro, con ciclo de corta de 100 años.
- ESCENARIO 7 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 80 cm de diámetro, con ciclo de corta de 30 años.
- ESCENARIO 8 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 80 cm de diámetro, con ciclo de corta de 60 años.
- ESCENARIO 9 : Aprovechamiento de todos los árboles mayores de 80 cm de diámetro, con ciclo de corta de 100 años.

Elección del modelo

En esta etapa se consideraron los siguientes pasos:

Elaboración de los archivos de entrada

Para ejecutar el modelo se requieren tres archivos de entrada, donde se encuentran los datos y la información necesaria para culminar las simulaciones exitosamente.

Archivo de entrada CONTROL

Este archivo contiene las condiciones de simulación que especifica el usuario. En la condición MODE, permite seleccionar la interacción entre las parcelas, la opción 0 realiza la simulación considerando las parcelas independientes y la opción 1 considera el modo interactivo; es decir, considera la interacción de las parcelas contiguas, esta última opción es la que se optó para las simulaciones del presente trabajo.

La segunda condición que solicita el archivo control se denomina INDATA, que tiene tres opciones, 0 cuando se inicia la simulación con el suelo desnudo, 1 cuando se inicia de acuerdo a las condiciones iniciales especificadas por el usuario y 2, que comienza con el suelo desnudo y al final de la simulación genera adicionalmente un archivo de salida Z.DUMP que se puede usar con la opción 1.

En la ejecución del presente trabajo se optó por tres tipos de archivos CONTROL, la opción 0 se ejecutó preliminarmente para simular las condiciones del bosque "El Calmital" para 200 años, luego de las verificaciones realizadas se optó por la opción 2 para un periodo de 230 años generando el archivo Z.DUMP el cual se usó para los diferentes escenarios de aprovechamiento forestal.

Las opciones NROWS y NCOLS permiten definir el número de filas y columnas o las dimensiones de la matriz o rejilla espacial donde se realizará el modelamiento, la matriz optada fue de 20x20 m.

La opción NYRS permite escoger el número de años de la simulación, para el presente trabajo se colocaron en ella los diferentes periodos; por ejemplo 230 años para el bosque natural actual, luego para los distintos escenarios se optó por periodos de 30, 60 y 100 años correspondientes a los ciclos de corta.

Las otras opciones IPRT, IPCH, ITRX, ILAI y ILOG, permiten escoger los intervalos de años para los cuales se generará los archivos de salida PRINT, PUNCH, TRACER, PROFILE y LOG.

Archivo SITIO

Para la simulación se generó un archivo denominado SITIO.CAI, donde se detalló la información necesaria, como nombre de la localidad, latitud y longitud en

grados, la altitud sobre el nivel del mar expresadas en metros, parámetros de ángulo de incidencia solar expresados en radianes, fracción de incidencia de la luz directa y difusa y coeficiente de extinción de la luz.

Se complementa con los parámetros de altura máxima del árbol y el área máxima de cobertura de copa. Seguidamente se indican los parámetros del suelo, detallando la cantidad de tipos de suelos y las características de cada una de ellos. Para este caso, a pesar de contar con tres tipos de suelos (franco arcilloso limoso, arcillo limoso y arcilloso) se generalizó para toda el área de simulación con un solo tipo, seleccionándose el tipo arcilloso, por ser el más representativo. La descripción del suelo comprende la profundidad del suelo disgregado en 10 niveles del perfil, en cada uno se indica la capacidad de campo (expresado en cm) y el punto de marchitez permanente (también en cm). La fertilidad del suelo se mide como la máxima producción anual de madera (Mg C/ha/año) y toma valores desde < 5 a 25 (fertilidad ilimitada).

La información climática contiene información de los promedios mensuales de temperatura y la desviación estándar interanual, temperatura mínima y máxima del mes más cálido, promedios mensuales de la precipitación y su desviación estándar, y valores promedios de radiación solar.

Finalmente se complementa el archivo con el mosaico de los suelos existentes en la matriz. Para este caso, el suelo es homogéneo del tipo arcilloso caracterizado por el número 3.

Archivo ESPECIES

Se denominó ESPECIES. CAI y contiene valores de los parámetros estimados para las 14 especies seleccionadas y 6 grupos de especies. Dicho archivo se inicia con el título, donde se indica el número de especies parametrizadas y la ubicación o nombre del bosque en estudio. Seguidamente cada especie es identificada por su nombre científico y un código de cuatro letras, las dos primeras corresponden al género y las restantes a la especie, por ejemplo, el código *Alco* identifica a la especie *Albizia colombiana*.

Los parámetros iniciales correspondieron a la edad máxima que alcanza la especie, expresada en años (Amax), diámetro a la altura del pecho máximo expresada en cm (Dmax), altura máxima de la especie expresada en metros (hmax), valores que se adoptaron de acuerdo a las observaciones realizadas en "El Calmital" y referencias bibliográficas de cada una de las especies.

Los parámetros de tolerancias ambientales son referidos a la tolerancia a la sombra, que puede adoptar valores de 1 a 5, correspondiendo el valor 1 a las especies muy intolerantes a la sombra y el valor 5 para las especies muy tolerantes a



la sombra. La tolerancia a la sequía también cuenta con una escala de valores de 1 a 5, correspondiendo el valor 1 a las especies muy intolerantes a la sequía y 5 para las especies muy tolerantes a la sequía. Las clases de respuesta a los nutrientes pueden adoptar valores de 0 para las especies fijadoras de nitrógeno, 1 para especies sensibles y 3 para especies no sensibles y tolerantes al estrés.

Los límites de temperatura fueron estimados como grados-día mínimo (ddmin) y máximo (ddmax) de crecimiento, que calcula el programa externo WEATHER; para este caso se adoptó el rango de tolerancia entre 5000 y 10000 grados-día, para garantizar que las especies no sufran un estrés térmico.

Contiene adicionalmente los valores de tasa de crecimiento (G) para las 14 especies individuales y 6 grupos de especies y los valores de los coeficientes b_0 y b_1 que se obtuvieron por regresión de las alometrías altura-diámetro. Para efectos de la edición del archivo ESPECIES.CAI, los valores de b_0 se modificaron de signo (se hacen negativos) y los valores de b_1 no deben tener más de un dígito entero por las dificultades que genera durante la elaboración del archivo.

Otras relaciones alométricas que usa ZELIG.2 son definidas por la forma del árbol, estas alometrías (ALEF y WOOD) en el modelo están determinadas específicamente para algunos géneros de los bosques templados, la forma 1 corresponde al género Abies, 2 = Pinus, 3 = Pseudotsuga, 4 = Thuja, 5 = Picea, 6 = Acer, 7 = Alnus, 8 = Quercus y 9 = otras especies latifoliadas. Para el presente estudio se adoptó la forma de árbol = 9 para todas las especies, a pesar de existir muchas diferencias en la arquitectura de las especies en estudio.

El archivo, finalmente se completó con los valores de la tasa de establecimiento de plántulas (seed), el que varía de acuerdo a un rango relativo entre las especies de 1 a 5; por ejemplo, se asigna el valor 5 a la especie que tiene mayor capacidad de establecimiento de plántulas, contrariamente el valor 1 se le asigna a la especie que no tienen esa capacidad. Con respecto a los valores de la capacidad de rebrote y brote, los que deben ser especificados por el número de brotes que sobrevivan y lleguen a ser árboles grandes (nprt) y por el diámetro máximo para el cual se podrían esperar brotes (sdmax), en la simulación se asumieron como valores cero (0) por no contarse con información suficiente.