

Planificación del Manejo a Nivel de Rodal

Clutter JL, Fortson JC, Pienaar LV, Brister GH & RL Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. Chapter 8 – Stand-level management planning: 210:237. John Wiley & Sons, New York. La presente traducción tiene fines exclusivamente didácticos. Pablo Yapura.

Todas las situaciones en la planificación del manejo forestal pueden ser subdivididas en dos categorías distintas:

1. Aquellas situaciones en las que la planificación puede ser hecha independientemente para cada rodal.
2. Aquellas situaciones en las que la planificación debe ser coordinada para todos los rodales del bosque que se está considerando.

La primera situación será referida como *planificación del manejo a nivel de rodal*, mientras que la segunda será identificada como *planificación del manejo a nivel de bosque*. Alguna literatura del manejo forestal parece asumir que los forestales deberían practicar siempre la planificación del manejo a nivel de bosque. Nosotros creemos que tal postulado es contrario tanto a la lógica de la situación como a los hechos empíricos vinculados con el manejo real.

En el manejo a nivel de rodal, cada rodal individual es tratado en la manera que mejor realice los objetivos del propietario del bosque. De este modo, si el objetivo del propietario es maximizar el beneficio, cada rodal sería probablemente manejado para maximizar el valor actual del flujo de fondos futuros producidos por el rodal. Si todos los rodales del bosque pueden ser manejados de esta manera, los beneficios económicos para el propietario serán mayores que los posibles bajo cualquier otro plan que pueda ser diseñado. Sin embargo, algunos bosques no pueden ser operados con el manejo a nivel de rodal debido a que los resultados del plan para todo el bosque no son factibles, independientemente de sus aparentes ventajas económicas. Por ejemplo, si el bosque involucrado ha sido adquirido o establecido para proveer materias primas para determinados complejos de procesamiento, variaciones significativas año a año en los volúmenes de cosecha serán simplemente inaceptables. Similarmente, un propietario de tierras forestales sin líneas de procesamiento pero cuyo ingreso total se deriva de las cosechas de madera, también estará incapacitado para operar con un plan de manejo en el cual los ingresos producidos por el bosque fluctúan drásticamente de año en año. También debería notarse que extensos bosques compactos, que mantienen su propia fuerza de trabajo, demandan estabilidad operacional. En tal situación, una cosecha pequeña en un año produce una reducción en la mano de obra para el aprovechamiento frente a cualquier expansión de las cosechas en el año siguiente. Para cualquiera de los casos mencionados arriba, la planificación del manejo a nivel de rodal rara vez será aceptable dado que este procedimiento típicamente produce planes para todo el bosque con grandes fluctuaciones en las cosechas e ingresos anuales. De este modo, en situaciones donde un patrón estable de cosechas, ingresos, área de regeneración y demás son importantes, se deben

usar los métodos de la planificación del manejo basada en bosques. Los detalles de esta planificación son presentados en los capítulos 9 y 10, mientras que el resto del presente capítulo está orientado al manejo a nivel de rodal. Antes de realizar nuevas consideraciones acerca de los detalles del manejo a nivel de rodal, deberían destacarse dos aspectos importantes referidos a la planificación a nivel de rodal y de bosque.

1. Se requiere la planificación a nivel de bosque cuando es necesario algún tipo de "estabilización" de las operaciones en el bosque¹. La inmensa mayoría de empresas forestales privadas, al menos en EE.UU., pueden ser manejadas bastante efectivamente sin ningún tipo de tal estabilización. Puede ser que una fascinación profesional con el concepto de *rendimiento sostenida* haya producido un malentendido con el mismo. Nosotros alegraríamos firmemente que los bosques australes de pino del sudeste de EE.UU. constituyen un patrimonio inmensamente valioso y que el mismo debe producir un rendimiento sostenido razonablemente estable de productos forestales. Sin embargo, cualquier afirmación acerca de que esto debe o debería llevarse a cabo estabilizando la producción anual de cada propiedad forestal individual nos parece bastante irracional.
2. Cualquier tipo de estabilización cuesta dinero. Cada bosque tiene un plan de manejo económicamente óptimo que es simplemente la consolidación de los planes óptimos a nivel de rodal para todos los rodales que integran el bosque. Cualquier cambio en el plan consolidado para estabilizar el rendimiento o los ingresos anuales significa que algunos rodales ya no serán manejados de acuerdo con sus estrategias económicamente más efectivas, y que el total de beneficios económicos para el propietario del bosque decrecerán consecuentemente. La estabilización a veces debe hacerse, particularmente en el caso de las industrias forestales y de las tierras públicas, pero hacerlo solo por gusto constituye un pasatiempo oneroso.

8.1 EL CRECIMIENTO DE RODALES COETÁNEOS - CONSIDERACIONES VOLUMÉTRICAS.

Los rodales coetáneos tienen un principio y un final definidos en el tiempo. El establecimiento del mismo o su regeneración marcan el principio y con la corta final el rodal deja de existir. En cualquier momento de su vida, el rodal tiene una edad conocida o que puede ser determinada y la duración total del período de crecimiento, desde el establecimiento hasta la corta final, se denomina *rotación*. Las plantaciones se ajustan exactamente a esta descripción, mientras que algunos rodales regenerados naturalmente, que quedan establecidos en un período de tiempo de pocos años, carecen de un principio exacto en el tiempo pero que aún son útilmente concebidos como coetáneos.

¹ Ocasionalmente, circunstancias inusuales que afectan al propietario del bosque requieren una revisión de la estrategia de optimización del rodal hacia una solución que implique mayores fluctuaciones en las cosechas e ingresos que las producidas por la estrategia de optimización del rodal. Tales situaciones son relativamente poco comunes y la mayoría de las situaciones reales en la planificación a nivel de bosque implican la imposición de restricciones destinadas a estabilizar las cosechas y los flujos de fondos. Sin embargo, los procedimientos de planificación a nivel de bosque descritos en el capítulo 10 pueden ser usados para abordar ambas situaciones.

La gráfica del volumen por acre en función de la edad para cualquier rodal coetáneo es un típica curva de crecimiento sigmoide. Durante los años tempranos de desarrollo del rodal, la producción en volumen se incrementa lentamente. Con la edad, la tasa de crecimiento se incrementa hasta un máximo y luego declina. Si el rodal se deja lo suficiente sin recibir la cosecha, la tasa de crecimiento neto eventualmente caerá hasta cero y se convertirá en negativa cuando la mortalidad exceda al crecimiento. La figura 8.1 muestra una típica, aunque hipotética, curva de desarrollo del volumen de un rodal. Esta curva particular se define por la función

$$Y_t = 100(1 - e^{(-0.05t)})^{2.0} \quad (8.1)$$

donde

t = edad del rodal en años

Y_t = volumen comercial a la edad t en cunits por acre (N. del T.: el cunit es una unidad de volumen estéreo definida como equivalente a 100 pies cúbicos de madera sólida)

La curva se muestra solamente para edades entre 10 y 40 años dado que se asume que el volumen comercial es escaso o nulo antes de los 10 años y que rotaciones que excedan los 40 años no son de interés. Esta relación particular volumen/edad se asume aplicable a plantaciones de una especie particular, creciendo en tierras con un índice de sitio dado y con una combinación especificada de densidad inicial de plantación y tratamientos de preparación del sitio.

La tabla 8.1 se elaboró a partir de la función de rendimiento definida en la ecuación (8.1). Los valores mostrados en la columna (1) de la tabla se obtienen por solución de la ecuación (8.1) para edades entre 10 y 40 años. La columna (2) contiene los valores del incremento corriente anual, los cuales son simplemente la diferencia entre pares de valores sucesivos del rendimiento. Los valores mostrados en la columna (3) son las tasas de crecimiento promedio anual correspondientes a cada edad del rodal. Estas se obtienen dividiendo el valor del rendimiento por su correspondiente edad y sus valores se denominan *incremento medio anual*. El incremento medio anual de 2.00 cunits asociado con la edad de 20 años significa que entre el establecimiento y los 20 años de edad, el rodal creció a una tasa promedio de 2.00 cunits por acre y por año.

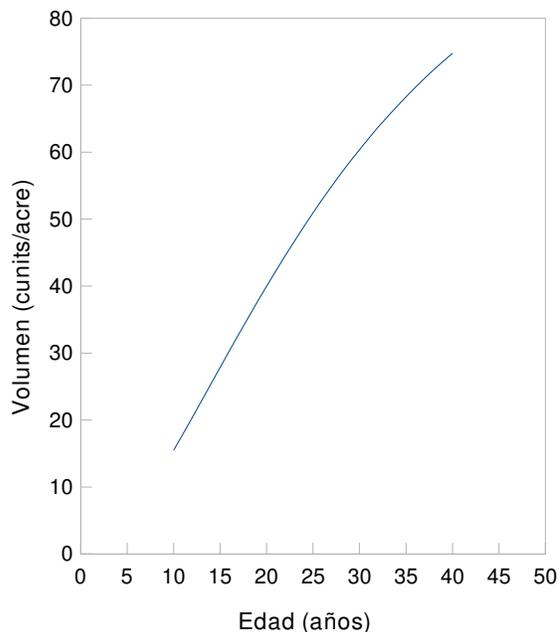


Figura 8.1: Desarrollo del volumen de un rodal coetáneo típico.

Tabla 8.1. Desarrollo del volumen de un rodal coetáneo típico aunque hipotético.

Edad (años)	Rendimiento (cunits/acre)	Incremento Corriente Anual (cunits/acre/año)	Incremento Medio Anual (cunits/acre/año)	
10	15.48	2.42	1.55	
11	17.90	2.46	1.63	
12	20.36	2.49	1.70	
13	22.84	2.50	1.76	
14	25.34	2.50	1.81	
15	27.84	2.48	1.86	
16	30.32	2.46	1.90	
17	32.79	2.43	1.93	
18	35.22	2.39	1.96	
19	37.61	2.35	1.98	
20	39.96	2.30	2.00	
21	42.26	2.25	2.01	
22	44.51	2.19	2.02	
23	46.70	2.13	2.03	
24	48.83	2.07	2.03	
25	50.91	2.01	2.04	(2.0363)
26	52.92	1.95	2.04	(2.0354)
27	54.87	1.89	2.03	
28	56.76	1.83	2.03	
29	58.59	1.76	2.02	
30	60.35	1.70	2.01	
31	62.06	1.64	2.00	
32	63.70	1.58	1.99	
33	65.28	1.52	1.98	
34	66.80	1.46	1.96	
35	68.26	1.41	1.95	
36	69.67	1.35	1.94	
37	71.02	1.30	1.92	
38	72.32	1.25	1.90	
39	73.57	1.20	1.89	
40	74.76		1.87	

Los valores del rendimiento, incremento corriente anual e incremento medio anual de la tabla 8.1 han sido graficados en la figura 8.2. Varios hechos notables y significativos aparecen en esta gráfica. La curva del incremento corriente anual (ICA) alcanza un máximo relativamente temprano en la vida del rodal y luego declina. El valor máximo se presenta a la edad en la que la

pendiente de la curva de rendimiento es más empinada. La curva del incremento medio anual (*IMA*) alcanza su máximo a una edad más tardía e intercepta a la curva del incremento corriente anual en su valor máximo. Esta relación debería ser evidente puesto que si el *ICA* es mayor que el *IMA*, el *IMA* debería estar incrementándose, mientras que si el *ICA* es menor que el *IMA*, el *IMA* debería estar decreciendo.

La edad en la cual el incremento medio anual alcanza un máximo es conocida como *edad del máximo incremento medio anual*. Este parámetro tiene una considerable significación en el manejo. La tabla 8.1 muestra que el valor máximo del *IMA* de 2.0363 cunits por acre por año ocurre a una edad de 25 años. Si rotaciones sucesivas de un rodal del tipo aquí considerado se dejaran crecer usando una edad de rotación de 25 años, la producción promedio sería de 2.0363 cunits por acre por año. El uso de cualquier otra edad de rotación en series continuas de plantaciones resultaría en tasas de producción anual promedio inferiores. De este modo, para un propietario de bosques cuyo objetivo es una producción volumétrica máxima, la edad de la rotación a emplear debería ser la del máximo incremento medio anual.

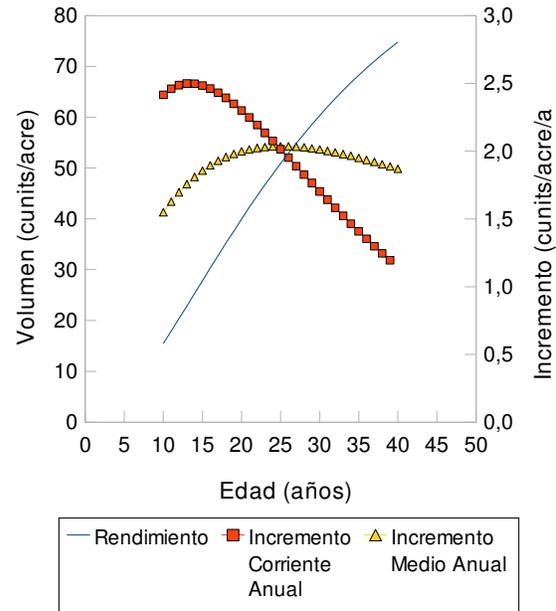


Figura 8.2: Algunos aspectos del crecimiento en un rodal coetáneo típico.

8.2 EL CRECIMIENTO DE RODALES COETÁNEOS - CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Pocos planificadores son capaces de conseguir los objetivos del propietario forestal si limitan su atención a las consideraciones volumétricas puesto que los objetivos de la mayoría de los propietarios son de naturaleza económica. Otra forma de expresar el problema es notando que constituye una situación inusual aquella en que la estrategia óptima puede seleccionarse desconociendo los costos e ingresos asociados con las distintas estrategias. Por lo tanto, es importante dedicar cierta atención a los aspectos económicos del desarrollo del rodal.

Como un ejemplo inicial consideremos un caso sencillo de un rodal plantado y sus retornos (antes de impuestos), en el cual el precio de la madera en pie es constante (en vez de incrementarse con la edad). Si tal rodal se planta y se corta al final de t años, el retorno neto para el propietario al tiempo de la cosecha sería

$$N_t = SY_t - R(1+i)^t - T[(1+i)^t - 1]/i \quad (8.2)$$

donde

N_t = retorno neto por acre en la cosecha

S = precio en pie por cunit

t = duración de la rotación

R = costo de regeneración por acre

i = tasa de interés (libre de inflación)

T = costo anual administrativo e impositivo por acre

Y_t = rendimiento por acre en cunit al final de la rotación

Para ilustrar esta relación se asumirá que Y_t viene definido por la ecuación (8.1) y que

$S = \$35.00$

$R = \$100.00$

$i = 0.04$

$T = \$1.50$

En la tabla 8.2 se muestran las soluciones a la ecuación (8.2) con los valores indicados arriba, para edades de rotación entre 10 y 40 años. Para cada edad de la rotación, la columna (1) muestra el rendimiento por acre en cunits (Y_t) y la columna (2) muestra el retorno neto por acre en la cosecha (N_t). El valor actual del retorno neto por acre en la cosecha se muestra en la columna (3) y se calcula mediante $N_t/(1+i)^t$. La columna (4) de la tabla 8.2 contiene valores identificados como valor de la tierra desnuda. El concepto se entiende fácilmente considerando una serie continua de rotaciones del tipo de las usadas en los cálculos de la tabla 8.2. El valor de la tierra desnuda asociado a una edad de rotación dada es el valor actual de los retornos netos de todas las rotaciones de la serie continua. Para edades de rotación t , el valor de la tierra desnuda se denota como BLV_t y se calcula mediante²

$$BLV_t = \frac{N_t}{(1+i)^t - 1} = \frac{SY_t - R(1+i)^t - T[(1+i)^t - 1]/i}{(1+i)^t - 1} \quad (8.3)$$

Conceptualmente, simplemente es el valor actual de todos los flujos de fondos producidos por una serie infinita de rotaciones usando una edad de rotación de t años. Por lo tanto, si se usa una edad de rotación de 20 años en tal emprendimiento continuo, los flujos de fondos anticipados

2 En la literatura de la economía forestal, al valor actual del flujo de fondos generado por una serie continua de rotaciones se lo refiere generalmente como *valor esperado del suelo* o *valor esperado de la tierra*, mientras que el término *valor de la tierra desnuda* se usa para denotar una estimación del valor de la tierra obtenido a partir del análisis de ventas comparables en el mercado. Sin embargo, es nuestra impresión que la mayoría de los responsables del manejo forestal usan los tres términos de manera intercambiable; en consecuencia, nuestro uso en este texto considera que el *valor esperado del suelo*, el *valor esperado de la tierra* y el *valor de la tierra desnuda* son equivalentes en significado (N. del T.: en la literatura en castellano, la designación más usada es probablemente *valor potencial del suelo* y será la empleada en esta traducción en adelante).

tienen un valor actual de \$952.73. En comparación, si la edad de rotación usada fuera de 30 años, el valor actual para todos los flujos de fondos futuros sería de \$759.47.

Tabla 8.2. Desarrollo económico de un rodal coetáneo típico aunque hipotético.

Edad (años)	Rendimiento (cunits/acre)	Retorno Neto en la Cosecha (\$/acre)	Valor Actual del Retorno Neto (\$/acre)	Valor Potencial del Suelo (\$/acre)
10	15.48	375.83	253.90	782.58
11	17.90	452.23	293.76	838.30
12	20.36	529.86	330.95	881.58
13	22.84	608.09	365.21	914.32
14	25.34	686.39	396.37	938.10
15	27.84	764.26	424.37	954.20
16	30.32	841.30	449.18	963.71
17	32.79	917.15	470.84	967.56
18	35.22	991.51	489.44	966.56
19	37.61	1064.11	505.07	961.39
20	39.96	1134.74	517.88	952.66
21	42.26	1203.20	528.01	940.91
22	44.51	1269.35	535.61	926.59
23	46.70	1333.05	540.85	910.11
24	48.83	1394.20	543.91	891.83
25	50.91	1452.71	544.94	872.06
26	52.92	1508.52	544.11	851.08
27	54.87	1561.57	541.58	829.14
28	56.76	1611.83	537.51	806.44
29	58.59	1659.27	532.05	783.17
30	60.35	1703.88	525.34	759.51
31	62.06	1745.63	517.51	735.58
32	63.70	1784.53	508.70	711.52
33	65.28	1820.59	499.01	687.43
34	66.80	1853.80	488.57	663.42
35	68.26	1884.19	477.48	639.56
36	69.67	1911.75	465.83	615.91
37	71.02	1936.51	453.72	592.55
38	72.32	1958.48	441.22	569.52
39	73.57	1977.68	428.41	546.87
40	74.76	1994.12	415.35	524.63

Es muy importante notar que la fórmula básica del valor potencial del suelo puede ser escrita de varias maneras, todas las cuales son algebraicamente equivalentes. Las formas más comunes para

la sencilla situación de una plantación y tala rasa descripta son

$$BLV_t = -R + \frac{SY_t - R}{(1+i)^t - 1} - \frac{T}{i} \quad (8.4)$$

y

$$BLV_t = \frac{SY_t - R(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} - \frac{T}{i} \quad (8.5)$$

Cuando se emplean los mismos valores de entrada, las ecuaciones (8.3), (8.4) y (8.5) producen valores idénticos de BLV_t .

A veces es necesario calcular el valor potencial del suelo para regímenes de manejo que son mucho más complejos que el caso considerado arriba. Tales regímenes pueden incluir erogaciones en varios momentos en el tiempo para fertilización, raleos precomerciales, control de la vegetación competidora y demás. Además, las cortas intermedias pueden producir ingresos que se suman a los que se reciben en la edad de rotación. Para cualquiera de tales regímenes, los costos y los ingresos totales pueden sintetizarse en una tabla de la siguiente manera.

Año	Ingreso	Costo
0	I_0	C_0
1	I_1	C_1
2	I_2	C_2
⋮	⋮	⋮
t	I_t	C_t

El valor potencial del suelo se puede calcular entonces como

$$BLV = \frac{\sum_{j=0}^t (I_j - C_j)(1+i)^{t-j}}{(1+i)^t - 1} \quad (8.6)$$

Debe notarse que este abordaje simplemente calcula los ingresos netos para cada año, los capitaliza al final de la rotación y suma los valores resultantes para obtener el retorno neto en la cosecha. La división por $[(1+i)^t - 1]$ provee la suma descontada de la serie continua. El uso de la ecuación (8.6) puede ilustrarse considerando una variación de los cálculos empleados para producir los resultados de la tabla 8.2. Los cálculos previos asumieron que se incurrieron los costos iniciales de regeneración inmediatamente y que los costos de regeneración subsecuentes ocurrían el mismo año en que el rodal se cosechaba. A la vez, esto implica que la edad de cosecha de los rodales era de t años si la duración de la rotación era de t años. En la práctica forestal real, a menudo existe un retraso entre la cosecha de un rodal y la regeneración del siguiente. Los efectos económicos de estos retrasos pueden expresarse y evaluarse a través del

uso apropiado de la ecuación (8.6).

De nuevo, supóngase que $S = \$35.00$ por cunit, $R = \$100.00$ por acre, $i = 0.04$ y $T = \$1.5$ por acre y por año. El costo total de regeneración de $\$100.00$ por acre se compone de $\$75$ por acre para la preparación del sitio más $\$25$ por acre para la plantación. En promedio, la preparación del sitio se realiza 1 año después de la cosecha y la plantación ocurre 2 años después de la cosecha. Si la edad de la rotación es de 25 años, la duración de la rotación debe ser ahora de 27 años. El valor potencial del suelo para esta secuencia de plantaciones es

$$BLV = \frac{-\$75(1.04)^{26} - \$25(1.04)^{25} + \$35(50.91)}{(1.04)^{27} - 1} - \frac{\$1.50}{0.04} = \$800.30 - \$37.50 = \$762.80$$

donde el rendimiento por acre en la cosecha es de 50.91 cunits por acre. El valor con regeneración inmediata correspondiente (de la tabla 8.2) es $\$872.11$, de manera que, en este caso la reducción por acre del valor actual neto que surge del retraso en la regeneración es de $\$872.11 - \$762.80 = \$109.31$.

8.3 SELECCION DE LA EDAD DE LA ROTACION OPTIMA

El problema de la selección de una edad de rotación óptima ofrece la oportunidad de aplicar las técnicas de decisión previamente descritas en el capítulo 7. Para la realización de esta selección, el planificador debe definir los regímenes de manejo (estrategias) que serán consideradas y especificar los criterios de decisión que se emplearan. Una vez que estas etapas se realizaron, el criterio de decisión puede ser evaluado para cada régimen de manejo y el óptimo de entre ellos puede ser seleccionado.

Ya se indicó que el incremento medio anual es el criterio de decisión apropiado para seleccionar la edad de la rotación si el objetivo es la máxima producción total en volumen. Si sólo hay un tipo de rodal (*i.e.* una curva de rendimiento) que considerar en el proceso de selección, entonces el procedimiento es simplemente un problema de calcular el incremento medio anual para cada edad de rotación candidata. Este proceso puede definirse según la siguiente notación

$$\max_t [IMA_t] = \max_t [Y_t/t]$$

donde la notación

$$\max_t [\]$$

significa encontrar el valor de t que maximice la cantidad entre corchetes. En la práctica, el proceso rara vez es tan simple puesto que será necesario considerar varios tipos de rodal. La existencia de varios tipos de rodal proviene de diferencias en factores tales como especie, tipo e

intensidad de preparación del sitio y espaciamentos iniciales. En situaciones que involucren k tipos de rodales, el proceso de decisión es

$$\max_k \left[\max_{t_k} [Y_{t_k} / t_k] \right]$$

donde Y_{t_k} es el rendimiento por acre del tipo de rodal k a la edad t_k . El segundo operador de maximización se define para operar en un rango de edades " t_k " e indicar que el rango considerado puede ser distinto para cada tipo de rodal. El proceso simplemente implica identificar el máximo *IMA* para cada tipo de rodal y luego seleccionar el mayor de estos valores. Como un ejemplo simple, considérese la situación en que cualquiera de dos tipos de rodales pueden establecerse

1. La curva de rendimiento para el rodal del tipo 1 es

$$Y_t = 100(1 - e^{-0.05t})^{2.0}$$

2. La curva de rendimiento para el rodal del tipo 2 es

$$Y_t = 90(1 - e^{-0.08t})^{2.0}$$

Los valores del *IMA* para la curva de crecimiento del rodal del tipo 1 ya fueron calculados y tabulados en la tabla 8.1. El valor máximo del *IMA* de 2.0363 cunit por acre y por año ocurre a una edad de la rotación de 25 años. Un conjunto similar de valores calculados con la curva de crecimiento del rodal del tipo 2 muestra que el valor máximo del *IMA* es de 2.9319 cunits por acre y por año para una rotación de 16 años. Entonces, la productividad física se maximizaría estableciendo el rodal del tipo 2 con una edad de la rotación de 16 años.

Como se señaló previamente, pocos administradores pueden ignorar las consideraciones económicas cuando toman decisiones. En consecuencia, rara vez se elige la edad de rotación sobre la base de una maximización volumétrica. A pesar de que se pueden proponer varios criterios económicos posibles para optimizar la edad de la rotación, el más popular por lejos es maximizar el valor actual neto. El empleo de este criterio significa que la rotación óptima es aquella de edad de cosecha que produce un flujo de fondos con el máximo valor actual neto. Puesto que tiene poco sentido comparar las rotaciones simples contemplando alternativas con diferentes duraciones de la rotación, el procedimiento estándar es comparar flujos de fondos para series continuas de plantación. El valor actual de los flujos de fondos para una serie continua de rotaciones (iniciada con el establecimiento inmediato de la primer rotación) ya fue definido en la sección previa y se lo denominó como valor potencial del suelo.

La maximización del valor actual se lleva a cabo seleccionando la edad de rotación con el máximo valor potencial del suelo. Esta rotación es comúnmente conocida como la *rotación*

económicamente óptima. Si se analiza un único tipo de rodal, el proceso de decisión es

$$\max_t [BLV_t]$$

El procedimiento puede ser ilustrado refiriéndose a la tabla 8.2 en la que los valores de la tierra desnuda fueron calculados para edades de la rotación entre 10 y 40 años empleando la función de rendimiento especificada en la ecuación (8.1). El análisis de los valores de la tierra desnuda muestra que el valor máximo de \$967.73 ocurre a una edad de 17 años. Así, 17 años es la rotación económicamente óptima para este tipo de rodal. Este valor también implica que, en las condiciones económicas especificadas, una firma podría pagar \$967.73 por acre por una tierra que produzca los rendimientos implicados por la curva de rendimiento, estableciendo plantaciones con una rotación de 17 años con los valores de costos e ingresos especificados y devengar una tasa de retorno libre de inflación del 4 por ciento. Si la tierra pudiera ser adquirida por menos de \$967.73, la tasa de retorno sería mayor al 4 por ciento. Para este mismo tipo de rodal, la rotación del máximo incremento medio anual es de 25 años. Esto ilustra la regla general que expresa que la rotación económicamente óptima es usualmente más breve que la rotación del máximo incremento medio anual³. La diferencia entre estas dos rotaciones se hace mayor cuando crece la tasa de interés.

Al determinar la rotación económicamente óptima, los administradores usualmente querrán considerar varios tipos de rodal. Si se consideran k tipos de rodal, el proceso de decisión es

$$\max_k \left[\max_{t_k} [BLV_{t_k}] \right]$$

donde

BLV_{t_k} = valor potencial del suelo para el rodal del tipo k con una edad de la rotación de t_k años.

Esto equivale a encontrar la rotación económicamente óptima para cada tipo de rodal y, a partir de ellos, elegir el tipo de rodal cuyo valor potencial del suelo sea el mayor.

Ocasionalmente existen situaciones en las que la decisión sobre las edades de rotación no deberían estar basadas en comparaciones de una serie continua de plantaciones. El mejor ejemplo de tal situación es un arrendamiento de duración fija. Bajo tal acuerdo, el arrendatario (usualmente una firma de productos forestales) adquiere los derechos para establecer, crecer y cosechar un rodal durante el período del arrendamiento. Al final de dicho período, el propietario de la tierra (arrendador) reasume la responsabilidad del manejo de la propiedad. En un caso como este, la decisión sobre la edad de la rotación bajo arrendamiento claramente no debería

3 Esta regla se sostiene solamente si los precios en pie no se incrementan con la edad. Si los precios en pie aumentan con la edad del rodal, la rotación económicamente óptima puede no ser más breve que la rotación del máximo incremento medio anual.

basarse en comparaciones de flujos de fondos de series continuas, sino que deberían considerarse comparaciones de los flujos de fondos solamente para el período de arrendamiento.

8.4 DECISIONES SOBRE LAS CORTAS INTERMEDIAS

Los responsables del manejo forestal a veces se involucran en análisis para determinar la conveniencia de las cortas intermedias. Sus efectos últimos son función del tipo, oportunidad e intensidad y se requiere un considerable cuerpo de información dasométrica y económica para analizar estos efectos apropiadamente. Aunque los detalles del análisis pueden ser bastante complejos, el procedimiento conceptual es semejante al discutido en la sección previa. Para cada combinación de tipo de rodal, régimen de raleo y edad de corta final se calcula el valor potencial del suelo. La mejor alternativa es aquella con el máximo valor potencial del suelo.

Clutter *et al.* (1981) han realizado análisis económicos de las operaciones de raleo en plantaciones de *Pinus elliottii* en campos abandonados y sus datos (con algunos agregados) puede usarse para ilustrar el proceso de decisión sobre las cortas intermedias. Consideremos dos alternativas.

1. Régimen de manejo sin raleos con una edad de la rotación de 30 años. Se asume que el rodal tiene 400 árboles por acre a los 20 años.
2. Un régimen de manejo con un raleo a los 20 años y la corte final a los 30 años. Se asume que el rodal tiene 400 árboles por acre antes del raleo, el cual se aplica por lo bajo y remueve 30 por ciento del volumen comercial.

Las predicciones dasométricas se basan en la metodología desarrollada por Clutter & Jones (1980) y, para el ejemplo que aquí se presenta, se asume un índice de sitio de 70 pies (edad índice de 25 años). Algunos valores económicos pertinentes son

i = tasa de interés libre de inflación = 0.03

TC = costos de transportes por cuerda = \$4.00

R = costos de regeneración por acre = \$100

T = costo anual administrativo e impositivo por acre = \$1.50

El costo de aprovechamiento de la corta final y los precios (puestos en el camión) por clases diamétricas se muestran en la tabla 8.3. En la tabla 8.4 se muestran los rendimientos predichos por clase diamétrica para los dos regímenes considerados. Donde es necesario se emplea un factor de conversión de 92 pies cúbicos por cuerda. Los costos de aprovechamiento por clase diamétrica en el raleo se asumen como 25 por ciento superiores a los de la corta final que se mostraron en la tabla 8.3. Aquí se presentan los resúmenes del retorno neto por acre a partir de las cortas en los regímenes con raleo y no raleado.

Tabla 8.3. Precios por cuerda (puestos en el camión) y costos de aprovechamiento por pie cúbico y por clases de diámetro. Fuente: de Clutter *et al.*, 1981.

Clase de dap (pulgadas)	Precio (puesto en el camión) (\$/cuerda)	Costo de Aprovechamiento de la
		Cosecha (\$/pie cúbico)
5	40.00	0.515
6	40.00	0.328
7	40.00	0.249
8	40.00	0.208
9	40.00	0.182
10	50.00	0.166
11	50.00	0.155
12	60.00	0.148
13	60.00	0.142
14	70.00	0.138

1. Régimen sin raleo

Ingresos totales	\$ 2829.63
Menos costos de aprovechamiento	- 964.56
Menos costos de transporte	- 263.29
Retorno neto de la corta final	\$ 1628.78

2. Régimen con raleo

a) Raleo

Ingresos totales	\$ 446.21
Menos costos de aprovechamiento	- 353.75
Menos costos de transporte	- 44.82
Retorno neto de la corta final	\$ 47.84

b) Corta final

Ingresos totales	\$ 2360.14
Menos costos de aprovechamiento	- 660.84
Menos costos de transporte	- 180.88
Retorno neto de la corta final	\$ 1518.42

El valor potencial del suelo para los dos regímenes se calcula mediante

1. Régimen sin raleo

$$BLV_1 = \frac{\$ 1628.78 - \$ 100(1.03)^{30}}{(1.03)^{30} - 1} - \$ \frac{1.50}{0.03} = \$ 921.13$$

2. Régimen con raleo

$$BLV_2 = \frac{\$ 1518.42 + \$ 47.84(1.03)^{10} - \$ 100(1.03)^{30}}{(1.03)^{30} - 1} - \$ \frac{1.50}{0.03} = \$ 888.85$$

Tabla 8.4. Predicciones del volumen de cosecha por clase de diámetro para regímenes con raleo y sin raleo para plantaciones de *Pinus elliottii* en campos abandonados; índice de sitio = 70 pies, 400 árboles por acre a los 20 años de edad.

Clase de dap (pulgadas)	Raleo a los 20 Años (pies cúbicos/acre)	Corta Final a los 30	Corta Final a los 30
		Años de Rodales Raleados (pies cúbicos/acre)	Años de Rodales No Raleados (pies cúbicos/acre)
5	68.82	10.46	25.25
6	231.61		95.07
7	502.80		313.84
8	223.06		645.38
9		437.45	1000.70
10		1041.57	1235.77
11		1344.18	1178.97
12		1057.38	759.17
13		235.96	180.49
14		33.26	
Totales	1026.29	4160.26	5434.64

Estos resultados muestran que para las condiciones dasométricas y económicas planteadas, el régimen sin raleo sería preferible al que contempla raleo. El análisis ilustra bien algunas de las ventajas y desventajas que comúnmente existen en el raleo cuando se lo compara contra el no raleo.

1. El raleo genera ingresos tempranamente en la rotación. Sin embargo, el volumen removido en el raleo tiene un bajo precio de mercado y un alto costo de aprovechamiento.
2. El rendimiento total en regímenes con raleo a menudo no es mayor que en regímenes sin raleo. Sin embargo, el volumen removido en la corta final en rodales raleados tiene mayor precio de mercado promedio por cuerda y un costo de aprovechamiento promedio por pie cúbico menor.

También debería señalarse que la decisión de ralear a veces implica considerar riesgos que no se

abordan en análisis similares al presentado. En algunos rodales con altos niveles de densidad, una decisión de no ralear puede aumentar significativamente la probabilidad de daños severos por ataque de plagas y enfermedades. Por otra parte, rodales recientemente raleados serán más susceptibles al daño por viento y nieve que rodales comparables no raleados. Además, las operaciones de raleo pueden crear condiciones favorables al ataque de insectos o enfermedades como el escarabajo de la corteza o el hongo *Fomes annosus*. Con todo lo considerado, quizás no sea sorprendente que para muchas especies la conveniencia del raleo es un problema en el cual silvicultores razonables a menudo discrepan.

8.5 DECISIONES SOBRE RODALES EXISTENTES

En las secciones previas se discutieron los procedimientos para seleccionar un régimen de manejo óptimo consistente en una serie continua de rotaciones iguales. Una vez que tal serie progresa, todas las actividades futuras del manejo quedan planificadas hasta que cambios en los datos dasométricos o económicos determinen que una serie continua diferente es óptima. Sin embargo, si el rodal existente en un sitio particular difiere de aquel de la serie continua óptima, existe un problema de decisión ¿Cuánto tiempo debería dejarse el rodal existente hasta su cosecha y luego establecer el primer rodal de la serie continua óptima? A pesar de que los detalles del análisis apropiado pueden ser complejos, el concepto involucrado es familiar y directo. La duración óptima del período que debe mantenerse el rodal existente es aquel que maximice el valor actual de todos los flujos de fondos futuros.

Por ejemplo, consideremos una tierra para la cual la estrategia del valor de la tierra desnuda óptimo consiste en plantaciones cuyo crecimiento se define por la ecuación (8.1). Los valores económicos apropiados a la situación son aquellos usados previamente en la sección 8.2.

S = precio por cunit de la madera en pie = \$35.00

R = costo de regeneración por acre = \$100.00

i = tasa de interés libre de inflación = 0.04

T = costos administrativos e impositivos anuales = \$1.50

Para estas condiciones, ya se estableció que la rotación económicamente óptima es 17 años y su VPS es 967.73. El rodal que actualmente existe en la tierra en considerada tiene existencias actuales de 10.1 cunits/acre. En la tabla 8.5 se proyectan los volúmenes futuros para los próximos 10 años. Si el rodal actual se cosecha dentro de 5 años, la serie continua de plantaciones empezaría en ese momento y el valor actual de todos los flujos de caja subsecuentes serían de \$967.73. El flujo de fondos que sintetiza la estrategia de mantener el rodal actual durante 5 años se muestra en la tabla 8.6. Con una tasa de interés del 4 por ciento, este flujo de fondos tiene un valor actual de \$1309.42. Una fórmula general para el valor actual de una estrategia que implique la cosecha dentro de n años es

$$V_n = \frac{\$ 35.00 Y_n}{(1.04)^n} + \frac{\$ 967.73}{(1.04)^n} - \$ 1.50 \frac{(1.04)^n - 1}{0.04 (1.04)^n} \quad (8.7)$$

donde

V_n = valor actual de la estrategia que implica la cosecha del rodal actual dentro de n años

Y_n = rendimiento en cunits por acre de la cosecha del rodal actual dentro de n años

Tabla 8.5. Volúmenes futuros proyectados para un rodal existente actualmente.

Tiempo restante (años)	Volumen (cunits/acre)
1	11.8
2	13.7
3	15.2
4	16.7
5	18.1
6	19.3
7	20.3
8	21.1
9	21.8
10	22.5

El significado de los tres términos a la derecha de la ecuación (8.7) deberían entenderse claramente. El primero de ellos es simplemente el valor actual de los ingresos que se reciben de la cosecha del rodal actual, mientras el segundo contiene el valor actual de todos los flujos de fondos generados por la serie continua de plantaciones subsecuentes. El tercer término incluye el valor actual de los costos administrativos e impositivos hasta el año de cosecha del rodal actual. Todos los costos administrativos e impositivos a partir de ese año quedan incluidos en el valor de la tierra desnuda. La tabla 8.7 resume soluciones de la ecuación (8.7) para períodos entre 0 (corte inmediato) y 10 años. Los valores para cada uno de los tres términos se expresan por separado. El análisis de la tabla 8.7 muestra que el valor actual máximo para los flujos de fondos es de \$1335.22 ocurre cuando el rodal actual se corta dentro de 2 años. De este modo, la estrategia óptima es cosechar el rodal actual dentro de dos años e iniciar la serie continua de rotaciones de plantaciones.

Tabla 8.6. Flujo de fondos sintético de una estrategia que implica la cosecha del rodal existente dentro de 5 años.

Año	Flujo de fondos
1	\$ -1.50
2	-1.50
3	-1.50
4	-1.50
5	18.1(35.00) + 967.73 - 1.50 = 1599.73

No es raro que los responsables de la decisión simplifiquen en exceso la situación descrita y que realicen juicios inapropiados en consecuencia. Por ejemplo, podría esperarse que el rodal existente incremente su volumen desde los 13.7 cunits por acre hasta los 15.2 cunits por acre durante el tercer año. Alguien podría argumentar que, puesto que esto constituye una tasa de incremento de aproximadamente 10 por ciento y que la tasa de interés es solamente de 4 por ciento, se debería permitir que el rodal crezca. Sin embargo, tal argumento podría ser falaz puesto que equivale a considerar solamente el primer término de la ecuación (8.7). Para la situación que se acaba de describir, mantener el rodal por otro año en vez de cosecharlo luego del año 2 incrementaría el primer término de la ecuación (8.7) de \$443.32 a \$472.95. No obstante, la suma del segundo y tercer término decrece de \$891.89 a \$858.44. En consecuencia, el incremento del valor del rodal existente que resulta de un año más de crecimiento no es suficiente para justificar el retraso de todos los flujos de fondos subsecuentes por 1 año.

Tabla 8.7. Valores actuales para estrategias con diferentes tiempos hasta la cosecha inicial.

Tiempo Hasta la Cosecha Inicial (n en años)	Volumen de la Cosecha Inicial (Y_n en cunits/acre)	Valor Actual de la Cosecha Inicial ($\\$35.00Y_n/1.04^n$)	Valor Actual de la Serie Continua de Flujo de Fondos ($\\$967.73/1.04^n$)	Valor Actual de los Costos Administrativos e Impositivos $-\\$1.50\{(1.04^n - 1) / [0.04(1.04^n)]\}$	Valor Actual Total (V_n)
0	10.1	353.50	967.73	0.00	1321.23
1	11.8	397.12	930.51	-1.44	1326.18
2	13.7	443.32	894.72	-2.83	1335.22
3	15.2	472.95	860.31	-4.16	1329.09
4	16.7	499.63	827.22	-5.44	1321.41
5	18.1	520.69	795.40	-6.68	1309.42
6	19.3	533.86	764.81	-7.86	1290.81
7	20.3	539.92	735.40	-9.00	1266.31
8	21.1	539.61	707.11	-10.10	1236.63
9	21.8	536.07	679.91	-11.15	1204.83
10	22.5	532.01	653.76	-12.17	1173.60

El ejemplo presentado también puede usarse para ilustrar la determinación de los componentes del valor entre un acre de tierra y su vuelo. Con la estrategia óptima de cosechar dentro de 2 años, el valor actual de la tierra y su vuelo es de \$1335.22 por acre ¿Qué porción de este valor total se puede asignar apropiadamente a la tierra y qué parte debería considerarse valor del vuelo? Independientemente de las características del rodal, el valor de la tierra generalmente viene dado por el valor potencial del suelo que, en este caso, es de \$967.73 por acre. El valor total del vuelo por lo tanto debe ser igual a \$1335.22 - \$967.73, o sea \$367.49 por acre. Si las existencias comerciales del rodal existente fuesen cosechadas inmediatamente, el ingreso sería 10.1 cunits a un precio de \$35 por cunit o sea \$353.50. Este valor de la parte comercial del vuelo es un componente del valor total del vuelo. Los restantes \$13.99 (\$367.49 - \$353.50) constituyen el *valor incremental de las existencias* y el hecho de que sea positivo confirma la conclusión de

que la corta inmediata no es la estrategia óptima.

8.6 EL COSTO DE LAS EXISTENCIAS

Un parámetro de considerable significación en algunas situaciones del manejo forestal es el costo por unidad de volumen de la producción maderera. Este costo incluye desembolsos de caja más los costos de oportunidad. La fórmula de este costo por unidad de volumen para cualquier régimen de manejo especificado se obtiene más fácilmente igualando el valor actual de todos los costos involucrados en el crecimiento del rodal (PVC_1) con el valor actual de una serie de compras, en el mercado, de madera en pie que genere el mismo patrón de flujo de madera (PVC_2). Aquí se brinda una ilustración de este abordaje para una serie continua de plantaciones sin cortas intermedias. Sea

t = edad de la rotación en años
 Y_t = rendimiento por acre a la edad t
 R = costo de regeneración por acre
 i = tasa de interés libre de inflación
 T = costo anual administrativo e impositivo por acre
 L = costo de la tierra por acre

El valor actual por acre de todos los costos implicados en el crecimiento de tal serie de plantaciones es

$$PVC_1 = L + \frac{R(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} + \frac{T}{i} \quad (8.8)$$

El flujo de madera por acre producido por este régimen implicaría la cosecha de Y_t unidades de volumen cada t años, con la primera cosecha ocurriendo dentro de t años. Si este mismo flujo de madera se obtuviera adquiriendo Y_t unidades de volumen de madera en pie cada t años a un costo de C dólares por unidad de volumen, el valor actual de estas compras en pie sería

$$PVC_2 = \frac{CY_t}{(1+i)^t - 1} \quad (8.9)$$

Si se igualan PVC_1 y PVC_2 y se despeja C , la fórmula resultante es

$$C = \frac{[(1+i)^t - 1] \left(L + \frac{T}{i} \right) + R(1+i)^t}{Y_t} \quad (8.10)$$

y C se interpreta como el costo del crecimiento por unidad de volumen. Igualando PVC_1 y PVC_2 y

resolviendo para C , se obtiene el precio de la madera en pie ante el cual el usuario sería indiferente entre hacer crecer sus rodales o comprarla en pie en otro lado. Puesto que el usuario de la madera sería indiferente ante estas dos alternativas, C también debe ser el costo de la producción por unidad de volumen. La tabla 8.8 muestra valores del costo del crecimiento por unidad de volumen para rotaciones entre 10 y 40 años para la curva de rendimiento definida por la ecuación (8.1) y para los siguientes valores económicos

$R = \$100.00$ por acre

$T = \$1.50$ por acre y por año

$i = 0.04$

$L = \$800.00$ por acre

El valor mínimo del costo de crecimiento es de \$30.14 por cunit y se consigue con una duración de la rotación de 18 años. El costo del crecimiento puede emplearse como un criterio de decisión para fijar la duración de la rotación, pero solamente es aplicable en ciertas situaciones poco comunes. En particular, la selección de la rotación basada solamente en el costo de crecimiento ignora parcialmente la consideración de que, con diferentes rotaciones, se producirán diferentes cantidades anuales de madera por acre. De este modo, las únicas situaciones en las que este criterio es plenamente apropiado son aquellas en las que una cantidad fija de madera debe ser comercializada o empleada cada año. Alguna discusión de tales situaciones se brindan en el capítulo 9.

8.7 CONSIDERACIONES IMPOSITIVAS

Todos los análisis económicos previamente presentados en este capítulo han sido desarrollados sobre una base preimpositiva; en otras palabras, todas las consideraciones sobre impuestos a los ingresos han sido ignoradas. Este abordaje es pedagógicamente útil puesto que los conceptos básicos involucrados son más fácilmente comprendidos prescindiendo de las complejidades que introducen los cálculos impositivos. Sin embargo, los aspectos desagradables de la realidad sólo pueden soslayarse momentáneamente. En este momento, algunas formulaciones previamente desarrolladas serán revisadas para su uso por individuos o firmas que operan en un ambiente de contribución impositiva.

Varios parámetros económicos adicionales se necesitan para un análisis posimpositivo. Estos son

OIR = tasa de imposición a los ingresos ordinarios

CGR = tasa de imposición a las ganancias de capital

D_t = tasa de agotamiento por unidad de volumen en el año

Se asumirá en adelante que todos los ingresos provenientes de las ventas de madera se clasifican para su tratamiento como ganancias de capital y que cantidades suficientes de ingresos ordinarios están disponibles para la deducción completa de los gastos ordinarios.

Tabla 8.8. Costo del crecimiento por cunit para varias duraciones de la rotación.

Duración de la Rotación (años)	Rendimiento (cunits/acre)	Costo del Crecimiento (\$/cunit)
10	15.48	35.54
11	17.90	33.85
12	20.36	32.59
13	22.84	31.67
14	25.34	31.01
15	27.84	30.56
16	30.32	30.29
17	32.79	30.16
18	35.22	30.15
19	37.61	30.25
20	39.96	30.45
21	42.26	30.74
22	44.51	31.10
23	46.70	31.55
24	48.83	32.06
25	50.91	32.64
26	52.92	33.29
27	54.87	34.00
28	56.76	34.77
29	58.59	35.61
30	60.35	36.51
31	62.06	37.46
32	63.70	38.48
33	65.28	39.57
34	66.80	40.71
35	68.26	41.92
36	69.67	43.20
37	71.02	44.55
38	72.32	45.96
39	73.57	47.44
40	74.76	49.00

La sección 8.2 contiene varias ecuaciones importantes que a menudo se necesitan en análisis con base posimpositiva. Las versiones posimpositivas se dan inmediatamente, siguiendo los números de ecuación de la versión preimpositiva. Así, la ecuación (8.11) es el equivalente posimpositivo de la ecuación (8.2)

Ecuación (8.2)

$$N_t = SY_t - CGR(S - D_t)Y_t - R(1+i)^t - (1 - OIR)T[(1+i)^t - 1]/i \quad (8.11)$$

Ecuación (8.3)

$$BLV_t = \frac{SY_t - CGR(S - D_t)Y_t - R(1+i)^t - (1 - OIR)T[(1+i)^t - 1]/i}{(1+i)^t - 1} \quad (8.12)$$

Ecuación (8.4)

$$BLV_t = -R + \frac{SY_t - CGR(S - D_t)Y_t - R}{(1+i)^t - 1} - \frac{(1 - OIR)T}{i} \quad (8.13)$$

Ecuación (8.5)

$$BLV_t = \frac{SY_t - CGR(S - D_t)Y_t - R(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} - (1 - OIR)\frac{T}{i} \quad (8.14)$$

Los cálculos del valor potencial del suelo para regímenes de manejo más complejos sobre una base preimpositiva se llevan a cabo mediante el uso de la ecuación (8.6). Esta ecuación no puede modificarse fácilmente para situaciones posimpositivas puesto que los componentes básicos del flujo de fondos debe identificarse con más detalle. Los siguientes componentes del flujo de fondos son definidos para los cálculos posimpositivos

I_j = ingresos por ventas de madera recibidos en el año j

CE_j = gastos capitalizados incurridos en el año j

OE_j = gastos ordinarios incurridos en el año j

D_j = erogación de agotamiento incurrido en el año j

El valor potencial del suelo se calcula mediante

$$BLV_t = \frac{\sum_{j=0}^t [I_j - CGR(I_j - D_j) - CE_j - (1 - OIR)OE_j](1+i)^{t-j}}{(1+i)^t - 1} \quad (8.15)$$

Cuando se calculan las rotaciones económicamente óptimas para individuos u organizaciones que tributan impuestos, el valor potencial del suelo involucrado en el análisis debería calcularse sobre una base posimpositiva. Los procedimientos discutidos en las secciones 8.4 y 8.5 para decisiones sobre cortas intermedias y rodales existentes no se modifican conceptualmente por la inclusión de las consideraciones impositivas. Sin embargo, los flujos de fondos analizados deben

ser posimpositivos en vez de ser flujos de fondos preimpositivos.

Las fórmulas que se presentaron en la sección 8.6 para el costo del crecimiento también son afectadas por las consideraciones impositivas. Empleando la notación definida en la sección 8.6, y asumiendo que los costos de agotamiento por acre serán iguales a los costos de regeneración por acre, el valor actual de todos los costos del crecimiento del rodal es

$$PVC_1 = L + \frac{(SY_t - R)CGR + R(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} + \frac{T(1-OIR)}{i} \quad (8.16)$$

donde S es el precio de la madera en pie por unidad de volumen. El valor actual de los costos de adquisición de un flujo de madera equivalente viene dado por la ecuación

$$PVC_2 = \frac{CY_t(1-OIR)}{(1+i)^t - 1} \quad (8.17)$$

Igualando PVC_1 con PVC_2 y resolviendo para C , se obtiene

$$C = \frac{[(1+i)^t - 1] \left(L + \frac{T(1-OIR)}{i} \right) + (SY_t - R)CGR + R(1+i)^t}{Y_t(1-OIR)} \quad (8.18)$$

que es la ecuación posimpositiva del costo del crecimiento por unidad de volumen⁴.

8.8 ALGUNAS CONCLUSIONES ANALITICAS IMPORTANTES

Varios de los tópicos presentados en las secciones previas de este capítulo pueden ser desarrollados más completamente mediante el empleo del cálculo diferencial elemental. Quizás el mejor ejemplo implica las definiciones del incremento corriente anual (ICA) y del incremento medio anual (IMA) y la relación entre ambos. La curva del desarrollo volumétrico del rodal, o curva de rendimiento, fue definida por

$$Y_t = f(t) \quad (8.19)$$

La derivada primera de esta función es

4 Esta fórmula no es correcta para firmas de productos forestales que procesan madera de tierras de su propiedad en sus propias plantas industriales. En tales situaciones, la Sección 631a del *Internal Revenue Code* (N. del T.: Código de los Réditos Internos) provee ahorros impositivos adicionales que no son considerados en la ecuación (8.18).

$$\frac{dY_t}{dt} = f'(t) \quad (8.20)$$

la que por definición de dY_t/dt es la expresión funcional de la tasa de crecimiento instantáneo. Dado que la tasa de incremento y el incremento corriente anual son esencialmente sinónimos, la ecuación (8.20) es la ecuación del incremento corriente anual.

El incremento medio anual se define por

$$IMA = Y_t/t \quad (8.21)$$

El valor de t en el cual el IMA es máximo debe ocurrir cuando

$$\frac{d(IMA)}{dt} = 0 \quad (8.22)$$

La anulación de la derivada de la ecuación (8.21) da

$$f'(t)/t - f(t)/t^2 = 0$$

que es equivalente a

$$f'(t) = f(t)/t \quad (8.23)$$

Esto prueba que el máximo valor del IMA ocurre cuando el ICA y el IMA son iguales.

Para ilustrar este punto, considérese la curva hipotética de rendimiento

$$Y_t = 21.850 e^{-41.006t^{-1}} \quad (8.24)$$

donde Y_t es el volumen comercial en pies cúbicos hasta una punta fina de 4 pulgadas por acre (con corteza). La ecuación del incremento corriente anual es

$$ICA = dY_t/dt = 895.981 e^{-41.006t^{-1}} t^{-2} \quad (8.25)$$

El incremento medio anual se define por

$$IMA = 21.850 e^{-41.006t^{-1}} / t \quad (8.26)$$

de modo que

$$\frac{d(IMA)}{dt} = -21.850 e^{-41.006t^{-1}} t^{-2} + t^{-3} 895.981 e^{-41.006t^{-1}} \quad (8.27)$$

Igualando esta derivada a cero y despejando t , se obtiene $t = 41.006$ años, lo que significa que el máximo IMA ocurre a los 41.006 años, oportunidad en que el valor asociado del IMA es

$$IMA = 21.850 e^{-41.006(41.006)^{-1}} / 41.006 = 196.0 \text{ pies cúbicos por acre por año}$$

A una edad de 41.006 años, el valor del ICA es

$$ICA = 895.981 e^{-41.006(41.006)^{-1}} (41.006)^{-2} = 196.0 \text{ pies cúbicos por acre por año}$$

El hecho de que la rotación del máximo IMA sea igual a -1 por el coeficiente de t en la función de rendimiento (ecuación (8.24)) no es coincidencia. Es fácil demostrar que, para cualquier función de rendimiento de la forma

$$Y_t = \alpha e^{-\beta t^{-1}}$$

la edad de la rotación que maximiza el IMA es igual a β .

Otro importante problema de maximización implica la determinación de la edad de rotación que maximiza el valor potencial del suelo (rotación económicamente óptima). El valor potencial del suelo puede definirse empleando la notación continua del interés

$$BLV = \frac{SY_t - R e^{it}}{e^{it} - 1} - \frac{T}{e^i - 1} \quad (8.28)$$

o

$$BLV = PV_1 - PV_2$$

donde PV_1 es el valor actual de todos los ingresos futuros y costos de regeneración del rodal, PV_2 es el valor actual de todos los costos administrativos e impositivos futuros, e i es la tasa de interés continuo. Puesto que PV_2 no es afectado por la edad de la rotación, la edad de la rotación que maximice PV_1 también maximizará el valor potencial del suelo. De este modo, la rotación económicamente óptima debe ocurrir en el valor de t donde

$$\frac{d(PV_1)}{dt} = 0$$

La ecuación resultante no puede resolverse directamente para el valor óptimo de t , pero se puede reducir a

$$S \left(\frac{dY_t}{dt} \right) = i (SY_t + PV_1) \quad (8.29)$$

Este resultado expresa que la rotación económicamente óptima ocurre en aquella edad donde la tasa de crecimiento instantáneo es igual al costo de oportunidad instantáneo en que se incurre al retrasar la cosecha.