

Funciones de producción en la actividad forestal y maderera en Costa Rica* _____ JUAN MANUEL VILLASUSO**

ABSTRACT

The paper analyzes, from the theory of production point of view, both forest exploitation and wood processing (saw mills) activities. Using cross section data from a survey conducted in 1976, several linear and Cobb-Douglas production functions are estimated.

The model used to explain forest exploitation activities defines the amount of timber extracted as a function of the number of working hours per month (labor) and the value of capital (machinery and equipment). The figure obtained for the production-elasticity of labor is 1.96 and 0.99 for the production-elasticity of capital. Thus, it is concluded that forest exploitation in Costa Rica is in the increasing returns stage since the sum of both elasticities is greater than one.

In the case of wood processing, the model considered includes three explanatory variables: number of workers, value of capital (machinery and equipment) and value of constructions. The elasticities of production computed were 0.72 for labor and 0.21 for capital. This means that diminishing returns are present in the wood processing activity

Introducción

LOS recursos forestales constituyen una de las riquezas naturales más importantes de Costa Rica. Su importancia reside tanto en su valor ecológico como en su pertinencia económica y social.

El presente trabajo tiene como objetivo el contribuir en alguna medida a un mejor conocimiento de los aspectos económicos relacionado con esta actividad. Se analiza, desde el punto de vista de la teoría de la producción, la actividad de extracción y de procesamiento (aserrío) de madera. Se estiman funciones de producción lineales y del tipo Cobb-Douglas y se llegan a algunas conclusiones en cuanto a las elasticidades de producción.

Aspectos conceptuales

La teoría de la función de producción ha sido uno de los temas del análisis económico que mayor aten-

ción ha recibido por parte de los economistas, especialmente a nivel microeconómico en que se ha visto expuesta a diversas contrastaciones empíricas, con resultados bastante favorables.

La utilización de las funciones de producción empezó con los trabajos de Edgeworth, (5) con los análisis de las isocuantas de Johnson, (7) y posteriormente los de Frish (6) y Carlson (1). Estos autores refirieron sus análisis al equilibrio de la empresa y de la industria. También se utilizó la función de producción en el campo de la distribución de la renta donde jugaron papel importante los trabajos de Wicksteed, (11) Wicksell (10) y Johnson (7). Posteriormente Douglas (4) realizó las primeras investigaciones a nivel macroeconómico, ligadas a la teoría de la macrodistribución de la renta.

La función de producción se define como una relación técnica entre las cantidades aplicadas de factores y la cantidad de producto que de ello resulta. Es decir, esta función relaciona las cantidades de insumos que son empleadas con la cantidad de producto que se obtiene, suponiendo que se utiliza una determinada técnica, la cual es constante. Mientras no varíen las leyes naturales de la técnica, tampoco cambia la función de producción.

* Recibido para la publicación el 8 de marzo de 1979

** Director del Instituto de Investigaciones en Ciencias Económicas de la Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria. San José, Costa Rica

En términos generales, la función de producción se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = f(N, K, I)$$

donde Q es la cantidad de producto, N es el factor trabajo (mano de obra), K es el capital (maquinaria, equipo e instalaciones) e I representa el recurso tierra (insumos naturales o materia prima empleados en el proceso productivo).

Esta función puede especificarse de diferentes maneras, desde la forma más simple en que se supone una relación lineal entre los factores empleados y el producto obtenido, o sea,

$$Q = C_0 + C_1 N + C_2 K + C_3 I$$

hasta relaciones más complejas en las que se incluyen valores exponenciales y logarítmicos de las variables y se suponen diferentes tipos de elasticidades de sustitución (CES, VES, Función de Leontieff, etc.). El modelo más conocido y utilizado de estimación de funciones de producción es el elaborado por Cobb y Douglas (2), el cual se define de la siguiente manera:

$$Q = CN^\alpha K^\beta$$

o lo que es lo mismo,

$$\log Q = \log C + \alpha \log N + \beta \log K$$

A esta función se le suele llamar función de Cobb-Douglas y la misma reúne una serie de condiciones y características que la hacen sumamente atractiva. Entre las características de la Cobb-Douglas merecen destacarse las siguientes:

- (i) Las elasticidades de la cantidad producida con respecto a los factores son constantes e iguales a los parámetros α y β (elasticidades de producción).
- (ii) No existe en esta función ningún valor asintótico o tope de la producción más allá del cual no se pueda aumentar la cantidad elaborada, pero la tasa de aumento desciende a medida que se aumenta la cantidad aplicada de un factor.
- (iii) La suma de los parámetros α y β permite encontrar el tipo de rendimiento que se da en la producción. Así, si

$$\alpha + \beta < 1 \text{ Rendimientos decrecientes}$$

$$\alpha + \beta = 1 \text{ Rendimientos constantes}$$

$$\alpha + \beta > 1 \text{ Rendimientos crecientes}$$

- (iv) La productividad media y marginal son proporcionales entre sí, siendo el factor de proporcionalidad el exponente que los acompaña:

$$\text{Productividad Marginal del Trabajo} = \alpha \left(\frac{\text{Producto}}{\text{Factor Trabajo}} \right)$$

$$\text{Productividad Marginal del Capital} = \beta \left(\frac{\text{Producto}}{\text{Factor Capital}} \right)$$

- (v) La elasticidad de sustitución entre los factores es igual a uno

En el análisis que se presenta a continuación se estiman funciones de producción de tipo lineal y de Cobb-Douglas para los dos procesos productivos más importantes del sector forestal y maderero: la extracción y el procesamiento (aserrío) de maderas

Metodología empleada

Las cifras para las diferentes variables que se usaron en la estimación de las funciones provienen de una encuesta realizada por el autor (9) a los extractores de madera y a los aserraderos.

En el caso de los extractores, las entrevistas se llevaron a cabo en tres zonas geográficas del país: la zona de San Carlos-Sarapiquí; la zona Atlántica; y la región de Guanacaste-Puntarenas. Estos extractores fueron seleccionados en forma aleatoria con base en la lista de permisos de explotación vigentes, obtenida de la Dirección General Forestal. Primero se dividió la lista por regiones y luego se hizo la selección al azar. La encuesta a los aserraderos incluyó 23 entrevistas seleccionadas aleatoriamente con base en el Censo de 1974 elaborado por la Dirección General Forestal. Para la selección de la muestra se tomaron en cuenta dos criterios de estratificación: tamaño (volumen de producción) y localización geográfica.

Las cifras empleadas, por provenir de una encuesta, son de corte transversal, es decir, todas las observaciones provienen de un mismo instante en el tiempo

El análisis empleado para estimar los parámetros fue el de regresión múltiple y el método fue el de Cuadrados Mínimos Ordinarios. Este método consiste en minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores observados de la variable dependiente con respecto a los valores correspondientes computados a partir de la línea de regresión (3, 8).

Modelos considerados

En el estudio se emplearon dos modelos para estimar las funciones de producción de los extractores y de los procesadores de madera respectivamente.

Extractores de Madera

El modelo general utilizado para este proceso productivo hace depender la cantidad extraída de madera (QE) de varias medidas del *factor trabajo*: número de trabajadores (TR), número de horas laboradas por mes (HM) y salarios pagados (SAL); y del *factor capital*: tamaño de la explotación (TEX), valor de la maquinaria (VM) y valor del equipo (VEQ)

$$QE = f (TR, HM, SAL, TEX, VM, VEQ)$$

Posteriormente, dos de estas variables fueron consideradas en forma conjunta, sea, KK (valor del capital) = VM + VEQ.

Las dos especificaciones de este modelo fueron, una de tipo lineal,

$$QE = c_0 + c_1 TR + c_2 HM + c_3 SAL + c_4 TEX + c_5 VM + c_6 VEQ$$

y otra en términos exponenciales que se transformaba en logaritmos para efectos estimativos:

$$\log QE = c_0 + c_1 \log TR + c_2 \log HM + c_3 \log SAL + c_4 \log TEX + c_5 \log VM + c_6 \log VEQ$$

Debe hacerse notar que aunque se emplearon diversas medidas de trabajo y capital estas eran excluyentes, de tal suerte que en cada estimación solo se empleaba una de ellas, vg. si se usaba el número de trabajadores (TR), no se incluían ni las horas trabajadas (HM) ni los salarios pagados (SAL), ya que la correlación entre estas variables es sumamente alta y podría causar problemas de multicolinealidad en las regresiones.

Procesadores de Madera

Al igual que en el caso de los extractores, para las procesadoras de madera se definió un modelo general que luego fue especificado en términos lineales y logarítmicos.

El modelo general indica que la cantidad procesada (QP) es función del número de trabajadores (TR), del número de horas trabajadas al mes (HM),

de los salarios pagados (SAL), del área edificada (EDI), del área de patios para almacenamiento (PATY), del valor de las instalaciones (VI), del valor de la maquinaria (VM), del valor del equipo y herramientas (VEQ) y de la cantidad comprada de madera (QBUY). De donde,

$$QP = f (TR, HM, SAL, EDI, PATY, VI, VM, VEQ, QBUY)$$

La ecuación lineal que se especificó a partir de este planteamiento, es la siguiente:

$$QP = c_0 + c_1 TR + c_2 HM + c_3 SAL + c_4 EDI + c_5 PATY + c_6 VI + c_7 VM + c_8 VEQ + c_9 QBUY$$

La ecuación logarítmica se expresa de la siguiente manera:

$$\log QP = \log C_0 + c_1 \log TR + c_2 \log HM + c_3 \log SAL + c_4 \log EDI + c_5 \log PATY + c_6 \log VI + c_7 \log VM + c_8 \log VEQ + c_9 \log QBUY$$

También en el caso de las procesadoras de madera se juntaron algunas variables. Así,

$$\text{Area Total (ATOT)} = \text{EDI} + \text{PATY}$$

$$\text{Valor del Capital (KK)} = \text{VM} + \text{VEQ}$$

En las regresiones no se utilizaron simultáneamente medidas de un mismo factor sea, TR, HM y SAL para medir el trabajo, ni tampoco medidas globales en conjunto con alguno de sus componentes, vg., ATOT y EDI ó KK y VM.

Como puede observarse, las ecuaciones logarítmicas son del tipo Cobb-Douglas (2). Debido a limitaciones de programación y computación, no fue posible estimar funciones del tipo CES (Elasticidad Constante de Sustitución) como era nuestra intención.

Definición y cuantificación de las variables utilizadas

Como se señaló anteriormente, las cifras para las variables que conforman los modelos provienen de la encuesta realizada con los extractores y con los procesadores (aserraderos) de madera (9). Se considera que estas cifras son bastante confiables por la forma en que se llevó a cabo la recopilación de las mismas.

A continuación se detallan cada una de las variables utilizadas:

- (TR) *Número de trabajadores*: Personas que laboran en el aserradero o en la extracción de madera en el momento en que se llevó a cabo la encuesta. Incluye tanto empleados administrativos como operarios, ayudantes y personal de otro tipo.
- (HM) *Número de horas trabajadas*: Promedio de horas trabajadas al mes en el aserradero o en la zona de extracción.
- (SAL) *Salarios pagados*: Total de salarios mensuales pagados por la empresa procesadora o extractora.
- (TEX) *Tamaño de la explotación*: Está expresado en términos de manzanas e incluye tan solo aquellas que están en explotación y no en el total de la finca.
- (EDI) *Área edificada*: Se cuantifica en metros cuadrados y constituye una medida de la disponibilidad de almacenamiento del aserradero.
- (PATY) *Área de patios*: Se mide también en metros cuadrados y constituye una medida de la disponibilidad de almacenamiento del aserradero.
- (VI) *Valor de las instalaciones*: Constituye una medida de parte del capital del aserradero. Está expresado en colones y la información representa una estimación hecha por el informante del valor actual de las instalaciones (edificios y terrenos).

- (VM) *Valor de la maquinaria*: Estimación del valor actual de la maquinaria, ya sea el aserradero o el extractor. Está medido en colones
- (VEQ) *Valor del equipo*. Al igual que las dos variables anteriores, constituye una estimación hecha por el informante. Incluye equipo y herramientas. Está medida en colones
- (QBUY) *Cantidad comprada de madera*: Promedio de pulgadas madereras que el aserradero compra mensualmente de los diversos tipos de madera
- (QE)/(QP) *Cantidad extraída / procesada*: Esta es la variable dependiente tanto en el caso de los extractores como en el de los aserraderos. Se mide en pulgadas mensuales (extraídas / procesadas)

Resultados

Funciones de Producción Estimadas para los Extractores de Madera

Después de probar diferentes combinaciones de variables a fin de obtener el mejor ajuste y la mayor significancia en los parámetros estimados, las dos ecuaciones obtenidas para los extractores, son las siguientes:

$$(E 1) \quad QE = -169363,28 + 823,947 \text{ HM} + 0,333 \text{ KK}$$

(1,96) (2,50)

$$R^2 = 0,624$$

$$DW = 1,593$$

$$(E 2) \quad \log QE = -11,594 + 1,9619 \log \text{ HM} +$$

$$0,9866 \log \text{ KK} \quad (2,62)$$

(3,51)

$$R^2 = 0,802$$

$$DW = 1,476$$

Si se analiza la ecuación (E 1) y (E 2) desde el punto de vista de interpretación estadística, se observa que los coeficientes de ambas regresiones resultan significativos a un nivel del cinco por ciento*. Los coeficientes de determinación con valores de 0,624 y 0,802 resultan también altamente significativos; y las pruebas de Durbin-Watson para ambas estimaciones indican que no existe autocorrelación entre los errores.

Interpretando los resultados obtenidos en la ecuación (E 1), se observa que tanto el signo de la variable "horas trabajadas" (HM), como el de la variable "capital" (KK) son positivos, indicando que existe una relación directa entre la cantidad extraída de madera y estos dos argumentos.

Adicionalmente, en base al valor de los coeficientes, puede afirmarse que un incremento de una unidad

en el número de horas trabajadas mensualmente, incrementaría en 823,9 unidades el número de pulgadas extraídas mensualmente. De igual forma, un incremento de una unidad en el valor del capital empleado, aumentaría la extracción de madera en 0,33 unidades

En cuanto a la ecuación (E 2), los parámetros estimados representan la elasticidad de producción de los factores, es decir, indican en cuanto se incrementará la producción (porcentualmente) ante un determinado aumento en la utilización del factor (también en términos porcentuales). Así, si el número de horas trabajadas mensualmente se incrementa en un uno por ciento, el número de pulgadas extraídas por mes aumentará en un 1,96 por ciento. Similarmente, un incremento de un uno por ciento en el valor del capital empleado, redundará en una elevación de un 0,99 por ciento en la extracción de madera

También se puede observar que los rendimientos en la extracción de madera son crecientes, ya que si se suman los coeficientes, se obtiene un valor de 2,9485, lo cual, obviamente, es mayor a uno. Esto significa que aumentos en las cantidades empleadas de factores producen incrementos más que proporcionales en la cantidad de madera extraída y viceversa.

A su vez, conociendo los valores de los parámetros, es posible estimar la productividad físico marginal de los factores para cualquier nivel de empleo de factores que se desee ya que, como se comentó antes:

$$PFM_t = 1,9616 \times \text{Producto Promedio de Trabajo}$$

$$PFM_k = 0,9866 \times \text{Producto Promedio del Capital}$$

Por último, vale la pena señalar que el ajuste de regresión que se logró en la ecuación (E 2) resultó mejor que el de la (E 1). Esto parece indicar que el proceso productivo de la extracción de madera no es lineal, sino más bien de tipo exponencial.

Funciones de Producción Estimadas para las Procesadoras (Aserraderos) de Madera

Las ecuaciones seleccionadas para explicar el comportamiento del proceso productivo del procesamiento (aserrío) de madera con las siguientes:

$$(P1) \quad QP = 46881,78 + 7496,668 \text{ TR} + 14,324 \text{ VI}$$

(6,09) (2,14)

$$R^2 = 0,742$$

$$DW = 2,169$$

$$(P2) \quad \log QP = 8,539 + 0,731 \log \text{ TR} + 0,216 \log \text{ VI}$$

(3,68) (2,48)

$$R^2 = 0,617$$

$$DW = 2,300$$

* Los números en paréntesis son los valores "t" calculados para los coeficientes de regresión

$$= 55992,75 + 7209,635 \text{ TR} + 0,362 \text{ KK}$$

(3,48) (1,98)

$R^2 = 0,706$
DW = 2,285

$$P = 11,437 + 0,698 \log \text{ TR} + 0,194 \log \text{ KK}$$

(2,91) (1,96)

$R^2 = 0,608$
DW = 2,043

$$= 39805,63 + 6134,802 \text{ TR} + 15,163 \text{ VI}$$

0,094 KK (2,98) (2,01)

1,86)

$R^2 = 0,737$
DW = 1,974

$$QP = 8,450 + 0,721 \log \text{ TR} + 0,216 \log$$

0,009 log KK (2,15) (1,84)

73)

$R^2 = 0,592$
DW = 2,295

el punto de vista estadístico, estas seis ecuaciones características similares a las de los ex-ces decir, los coeficientes resultan significati-
vamente de regresión también lo es, y la prueba
de White indica que no hay autocorrelación
de errores

consideran las tres ecuaciones lineales (P1,
en conjunto, se pueden derivar algunas con-
clusiones interesantes:

aumentar en uno el número de trabajadores
(P2), la cantidad procesada de madera se incre-
ta aproximadamente 7200 pulgadas mensua-

una variación de un colón en el valor de las ins-
tancias (VI), hace que la cantidad producida
aumente en alrededor de 15 pulgadas.

una variación en el valor de la maquinaria y el
tipo de un colón implican aumentos de aproxi-
madamente 1,5 pulgadas mensuales procesadas

en el caso de las funciones del tipo Cobb-Douglas
(P3 y P6), una primera conclusión que se detec-
ta es que los rendimientos son decrecientes, ya que en
ambos casos la suma de los coeficientes tienen valores
menores a la unidad.

$$= 0,947$$

$$= 0,892$$

$$= 0,946$$

en este sentido, merece enfatizarse la diferencia exis-
tente entre estos resultados y los obtenidos para los
países desarrollados, para los cuales se determinó que los rendi-
mientos eran claramente crecientes.

concerniente a las elasticidades de producción,
el coeficiente del factor trabajo ésta resultó ser de alrededor de
0,72 mientras que para el factor capital asume valores

cercanos a 0,21. Es decir, la elasticidad de sustitución
del trabajo es de 3/4 aproximadamente y de 1/4
para el capital

Estas cifras, no se alejan mucho de los resultados
obtenidos por Douglas "cuando este no elimina la ten-
dencia de las series cronológicas norteamericanas" y
son bastantes similares a las obtenidas en Australia para
los estados de Victoria y Nueva Gales del Sur (4) En
el caso de las empresas procesadoras es también posible
determinar la productividad físico marginal de los facto-
res de producción, expresando ésta como el pro-
ducto del coeficiente multiplicado por el producto pro-
medio del factor.

Resumen

El trabajo analiza, desde el punto de vista de la teo-
ría de la producción, la actividad de extracción y de
procesamiento (aserrío) de madera Utilizando infor-
mación de corte transversal proveniente de una en-
cuesta realizada en 1976, se estiman funciones de pro-
ducción lineales y del tipo Cobb-Douglas

El modelo empleado para explicar la extracción de
madera hace depender la cantidad extraída del número
de horas laboradas por mes (trabajo) y del valor del ca-
pital (maquinaria y equipo). La cifra estimada para
la elasticidad-producción del trabajo fue de 1,96, mien-
tras que para el capital fue de 0,99. Consecuentemen-
te, se concluye que la extracción maderera en Costa
Rica se encuentra en la etapa de rendimiento crecien-
tes ya que la suma de ambas elasticidades es mayor que
uno.

En el caso del procesamiento maderero, el modelo
para explicar la cantidad aserrada se plantea en fun-
ción del número de trabajadores, del valor del capital
(maquinaria y equipo) y del valor de las instalaciones.
La estimación de las elasticidades-producción fue de
0,72 para el trabajo y de 0,21 para el factor capital, lo
cual indica rendimientos decrecientes para esta acti-
vidad productiva.

Literatura citada

1. CARLSON, SUNE. A study on the pure theory of pro-
duction. London, King and Staples, 1939. (Stockholm
Economic Studies N° 9).
2. COBB, C.W. y DOUGLAS, P.H. A theory of produc-
tion. American Economic Review, Spp 18 (128): 139-
165. 1928.
3. CRAMER, J.S. Econometria empírica México, Fondo de
Cultura Económica, 1973.
4. DOUGLAS, P.H. Are there laws of production? Ame-
rican Economic Review 38: 1-141 1948.
5. EDGEWORTH, F.Y. Mathematical physics London,
Kegan Paul, 1881.

- 6 FRISCH, RAGNAR Las leyes técnicas y económicas de la producción. Barcelona, Sagitario, 1963.
- 7 JOHNSON, W.E. The pure theory of utility curves Economic Journal 23:118-135 1913
- 8 KLEIN, L.R. Introducción a la econometría Madrid, Aguilar, 1966
- 9 VILLASUSO, J.M. *et al.* El sector forestal y maderero en Costa Rica. San José, OFIPLAN, ACM, Fundación Interlogos, 1978
- 10 WICKSELL, KNUT Vorlesungen über Nationalökonomie Jena, 1913 pp 158-264.
- 11 WICKSIEED, P.H. An essay in the coordination of the laws of distribution London, Routledge Kegan Paul, 1894

Notas y Comentarios

Una tercera ruta en la fotosíntesis

Hasta ahora se había probado que el ciclo de la fotosíntesis seguía dos rutas separadas. Cuando la ruta del dióxido de carbono dentro de la planta fue estudiada, se descubrieron distintos procesos que resultaban de ciertas actividades fisiológicas y anatómicas. La mayor parte de las plantas, aquellas que viven en un ambiente balanceado sin tensiones excepcionales, toman el dióxido de carbono durante el día a través de los estomas foliares. De allí es transferido rápidamente a los cloroplastos en las células, donde es usado inmediatamente en la fotosíntesis. Esta ruta usa el "Ciclo Calvin" estándar, así llamado en homenaje a su descubridor y ganador del premio Nobel 1961, Melvin Calvin, y ha llegado a ser conocida como la "Ruta C₃", por ser un compuesto de tres carbonos, el ácido 3-fosfoglicérico (PGA), el primero detectable en la fotosíntesis.

Las plantas con una resistencia particularmente fuerte en condiciones áridas se encontró que no encajaban en este marco normal de C₃. En estas plantas hay una demora en la transferencia del dióxido de carbono porque es almacenado en cambio en ácidos orgánicos presentes en las plantas, tales como el ácido málico y el ácido oxaloacético, que tienen cuatro carbonos y que no figuran en el ciclo Calvin (Cf, *Turrialba* 21:4). Además, se encontró que los estomas actuaban al revés del modelo normal, y de esta manera las plantas eran capaces de evitar fuertes pérdidas por transpiración durante el día, y absorbían el dióxido de carbono durante la noche. A esta ruta se la denominó "Hatch-Slack" en honor a los dos científicos australianos que dilucidaron este proceso, y a las plantas se les llama ahora "plantas C₄" por el número de carbonos de los compuestos en los que se atrapa el CO₂ (Cf *Turrialba* 21:4).

Subsecuentemente, se encontró que algunas plantas podían seleccionar las rutas, ya sea la C₃ o la C₄, según las condiciones prevalentes (R. Adams *et al.* *The desert environment*, Architectural Press 1978, p. 39). Se ha visto que la opción escogida estaba estrechamente relacionada a la escasez de agua, alta temperatura o alta salinidad. Los que están realizando investigaciones en zonas áridas han dado más importancia a la capacidad de algunas plantas que hacen un uso más eficiente de la humedad disponible. La mayor eficiencia de las plantas C₄ (como maíz, sorgo y caña de azúcar) en el uso del agua está estrictamente relacionada a las funciones fisiológicas y químicas de la planta. El dióxido de carbono, atrapado de noche provoca una reacción de carboxilasa en la planta y es convertido en ácidos orgánicos. Al día siguiente, cuando los estomas están cerrados, el CO₂ es transferido a la ruta normal C₃ para ser usado en el resto de la planta. Esta capacidad de funcionar en respuesta directa al ambiente y así seleccionar la manera más apropiada de evitar los daños de un ambiente hostil ha recibido el nombre de "Metabolismo Ácido Crassuláceo" (en inglés CAM), debido a su descubrimiento inicial en la familia Crassulaceae (Briggs, W.R. Annual Reports of the Directors of the Department of Plant Biology Carnegie Institute, Stanford, Cal. 1973-1977).

Después de este trabajo inicial, realizado principalmente en la Universidad de California en Riverside, S.R. Szarek e I.P. Ting han publicado una revisión de la literatura que da cuenta de la ocurrencia del SAM en plantas (*The occurrence of CAM among plants, a review*. University of California Riverside, 1977). Hasta ahora, el CAM ha sido encontrado en una gimnosperma (*Welwitschia* del desierto de Namib), dos helechos y un número de familias de angiospermas: Agavaceae, Aizoaceae, Asclepiadaceae, Asteraceae, Bromeliaceae, Cactaceae, Crassulaceae, Cucurbitaceae, Labiatae, Liliaceae, Orchidaceae, Piperaceae, Portulacaceae y Vitaceae.

La evolución de las plantas C₄ y CAM está ahora recibiendo más atención ya que indica la jerarquía de las plantas en el ambiente árido. La mayor atención la están recibiendo las especies *Atriplex* y *Euphorbia*. Varios estudios parecen indicar que las plantas C₄ son las más primitivas, pues ellas no tienen especiales cualidades de resistencia a la sequía. El desarrollo de la ruta C₄ es el primer paso en el aislamiento de las funciones químicas de una planta de su habitat. Sin embargo, una vez que una planta ha evolucionado con una ruta C₄, queda restringida al ambiente árido particular. La evolución del proceso CAM, que da a la planta dos alternativas de ambiente, es por consiguiente el más reciente y más sofisticado desde el punto de vista evolucionario.

Un método simple para identificar plantas C₄ es el examen de la estructura celular de la hoja. Para reducir la transpiración y mejorar el aislamiento de las células internas húmedas de la atmósfera ardiente, las plantas C₄ han desarrollado la "anatomía Kranz" de células envainadas clorocuímatosa, en vez de las capas normales en palizada.

Todo esto tiene relevancia en relación con la competencia vegetal. Donde las condiciones son normales, y en particular donde hay un marco regular de lluvia que sostiene una población de plantas perennes, las plantas C₃ son las más comunes. Con un tipo cada vez más irregular de lluvia, las plantas C₄ gradualmente disminuyen, perdiendo su potencial de formar un dosel continuo que cubra sus raíces y ramas, y las plantas C₄ se apoderan de los espacios abiertos. Las plantas CAM aparecen cuando ocurre una aridez aumentada y el agua comienza a escasear. Aun cuando los mecanismos de las plantas C₄ y CAM son mucho más sofisticados, ellas tienen sólo un valor especial y restringido en las tierras áridas: cuando la humedad se incrementa, las plantas C₄ regresan gradualmente.

En la práctica, cualquier actividad, tal como el sobrepastoreo, que precipita la eliminación de las plantas C₄ de zonas áridas, deberá en su debido curso promover el establecimiento de plantas C₄ y eventualmente los CAM. Hablando en general (y excluyendo unas pocas suculentas y cactus) las plantas CAM no tienen ningún valor desde el punto de vista forrajero. Sin embargo son importantes en el sentido de que, una vez establecidos, pueden mejorar la estructura y estabilidad del suelo mediante la acción ligadora de sus raíces, y se suman al contenido de materia orgánica del suelo, ayudando así el retorno de las plantas C₄ y C₃. Esto podría facilitar la tarea de seleccionar las plantas para la restauración de tierras en zonas áridas, una vez que se provean condiciones razonablemente fértiles. El uso de la secuencia CAM → C₄ → C₃ resultaría en un más eficiente uso de recursos, y conduciría eventualmente al restablecimiento de la flora indígena de un territorio, sin las costosas técnicas involucradas en los procedimientos usuales de restauración de tierras.