



Munich Personal RePEc Archive

# **Aplicando un modelo bio-económico de control óptimo a la producción de carbón vegetal: el caso de las comunidades agrícolas de roza-tumba-quema en México**

Arrocha, Fernando and Villena, Mauricio G.

Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile.,  
Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile.

15 January 2011

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/36375/>

MPRA Paper No. 36375, posted 03 Feb 2012 10:03 UTC

1 **Applying a Bio-Economic Optimal Control Model to Charcoal Production: The**  
2 **Case of Slash and Burn Agriculture in Mexico**

3  
4 by

5  
6 **Fernando Arrocha<sup>†</sup> & Mauricio G. Villena<sup>‡</sup>**  
7

8  
9 <sup>†</sup> Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile. Casilla (Box) 1987,  
10 Concepción, Chile. E-mail: [farrocha@udec.cl](mailto:farrocha@udec.cl).

11  
12 <sup>‡</sup> Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile. Avenida Diagonal las Torres  
13 2640, Peñalolén. Santiago, Chile. E-mail: [mauricio.villena@uai.cl](mailto:mauricio.villena@uai.cl).

14  
15  
16  
17 **This version: February 2012**  
18

19 **Abstract**

20  
21 This paper analyzes the relationship between rural poverty and forestland management in the  
22 context of charcoal production under slash and burn. An optimal control model determines how a  
23 representative household makes decisions on the allocation of labor and forest areas to exploit,  
24 which in turn affects the renewable resource base available to the community. The proposed  
25 optimal control model for charcoal production is built upon the agricultural model of slash and burn  
26 of Pascual and Barbier (2007). This theoretical model is calibrated with data from the community of  
27 Chunkanán, Campeche, Mexico. The simulation and comparison of the traditional forestry slash  
28 and burn management with the Forest Management Program for the Exploitation of Timber  
29 Resources (FMPETR), put forward by the regulatory authority as a policy of use and conservation  
30 of forest resources, showed that the former, and not the latter, is sustainable from an ecological  
31 point of view and efficient from an economic point of view, implying that households allocate an  
32 optimal amount of labor and forest biomass. This result suggests that the FMPETR is a suboptimal  
33 policy, showing that there is room for improvement in terms of the design and implementation of  
34 policies aimed at providing economic and social incentives leading to the sustainable management  
35 of natural resources.

36  
37 **Key words:** Forest Management, Rural Poverty, Charcoal Production, Rural Households.  
38  
39  
40  
41

1 **Aplicando un Modelo Bio-Económico de Control Óptimo a la Producción de**  
2 **Carbón Vegetal: El Caso de las Comunidades Agrícolas de Roza-Tumba-Quema**  
3 **en México**

4  
5 Por

6  
7 **Fernando Arrocha<sup>†</sup> & Mauricio G. Villena<sup>‡</sup>**  
8

9  
10 <sup>†</sup> Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile. Casilla (Box) 1987,  
11 Concepción, Chile. E-mail: [farrocha@udec.cl](mailto:farrocha@udec.cl).

12  
13 <sup>‡</sup> Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile. Avenida Diagonal las Torres  
14 2640, Peñalolén. Santiago, Chile. E-mail: [mauricio.villena@uai.cl](mailto:mauricio.villena@uai.cl).

15  
16 **Esta versión: Febrero 2012**  
17

18  
19 **Resumen**  
20

21 Este trabajo analiza las relaciones entre pobreza rural y el manejo de las tierras forestales en el  
22 contexto de la producción de carbón vegetal bajo roza-tumba-quema. Un modelo de control óptimo  
23 determina cómo un hogar representativo toma decisiones sobre la asignación de trabajo y  
24 superficies forestales a utilizar, mismas que afectan la base de este recurso renovable del cual  
25 depende. El modelo de control óptimo propuesto para la producción de carbón vegetal, está basado  
26 en el modelo agrícola de roza-tumba-quema de Pascual and Barbier (2007). Este modelo teórico es  
27 calibrado con datos de la comunidad de Chunkanán, Campeche, México. La simulación y  
28 comparación del manejo forestal tradicional de roza-tumba-quema con respecto al programa de  
29 manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables (PMFARMF)  
30 propuesto como política de uso y conservación del recurso forestal por la autoridad regulatoria,  
31 demostró que el primero, y no el segundo, es sostenible desde el punto de vista ecológico y eficiente  
32 desde el punto de vista económico, donde los hogares asignan una cantidad óptima de trabajo y  
33 biomasa forestal. Este resultado sugiere que el PMFARMF es una política subóptima, existiendo  
34 espacio para mejorar en términos del diseño e implementación de políticas que apunten a proveer  
35 incentivos económicos y sociales para el manejo sostenible de recursos naturales.  
36  
37

38 **Palabra clave:** Manejo forestal, Pobreza Rural, Producción de Carbón Vegetal, Hogares Rurales.  
39  
40

## 1 **Introducción**

2

3 Las políticas de conservación de los recursos naturales se han concentrado en la elaboración y  
4 aplicación de planes de manejo y conservación en superficies forestales que albergan una gran  
5 cantidad de flora y fauna, los cuales contribuyen con servicios ambientales clave que mantienen un  
6 equilibrio ecológico local, regional y mundial.

7

8 En este contexto, la elaboración de los planes de manejo y conservación de los recursos forestales  
9 requiere de la utilización de métodos de análisis que permitan mejorar el entendimiento sobre los  
10 incentivos económicos y sociales que llevan a los seres humanos a propiciar un manejo, uso y  
11 conservación óptimo del recurso natural.

12

13 En particular en Latinoamérica, la subsistencia de diversas comunidades indígenas depende  
14 principalmente del uso de recursos forestales. Típicamente estas comunidades realizan un manejo  
15 forestal basado en la propiedad colectiva de la tierra, utilizando los factores trabajo, tierra y recurso  
16 forestal como insumos productivos para asegurar su estabilidad económica, social y ambiental.  
17 Específicamente, en México en la zona aledaña al Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera de  
18 Los Petenes (ANPRBLP), las economías locales se encuentran diversificadas en actividades de  
19 producción agrícola, pecuaria, forestales, actividades de traspato, artesanías y trabajo asalariado  
20 dentro y fuera de las localidades (Arrocha, 2007). El recurso forestal es particularmente importante  
21 para mantener los niveles de ingresos y bienestar para los hogares a nivel local.

22

23 En este sentido, los esfuerzos de los tomadores de decisión y hacedores de política pública en el  
24 ámbito de manejo y conservación de los recursos naturales, han dirigido sus esfuerzos en crear  
25 programas de manejo forestal comunitarios con la idea de mejorar el manejo, uso y conservación  
26 del recurso forestal, además de aumentar producción e ingresos monetarios de los hogares  
27 agrícolas-forestales. Actualmente, la producción de carbón vegetal se realiza bajo un sistema de  
28 *roza-tumba-quema* en pequeños parches que son utilizados posteriormente para la producción  
29 agrícola. La estrategia de tala implica un corte selectivo de especies forestales de la región como  
30 son: Ja'abin (*Piscidia Piscicula*), Chukum (*Pithecellobium Albicans*), Ts'its'ilche' (*Gymnopodium*  
31 *Floribundum*), Tsalam (*Lysiloma Latisiliquum*) y Katsin (*Acacia Gaumeri*), dejando troncos de 30  
32 cm de alto, para su posterior regeneración. La producción de carbón vegetal se realiza mediante el  
33 uso de hornos artesanales contruidos con la leña cortada y acomodada en pirámide, sellándolos con  
34 tierra y zacate.

1 La propuesta sugerida por el programa de manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos  
2 forestales maderables (PMFARMF) considera cambios importantes en la forma de manejo forestal  
3 comunitario. Específicamente el PMFARMF sugiere lo siguiente: (i) determinar un sólo polígono  
4 para la explotación forestal comunitaria, (ii) realizar cortes de las especies forestales de la región  
5 con clareo de superficies productivas, (iii) reforestar con estas mismas especies, (iv) determinar una  
6 zona de producción de carbón vegetal dentro del polígono y por último, (v) sugiere una rotación de  
7 15 a 20 años de los lotes productivos. La tabla 1 compara del manejo forestal tradicional de roza-  
8 tumba-quema con respecto a PMFARMF.

9  
10 **[INSERT TABLE 1 ABOUT HERE]**

11  
12 El presente estudio tiene como principal objetivo evaluar los efectos de la aplicación del  
13 PMFARMF en relación al uso de la biomasa y cantidad de trabajo forestal a través de un modelo  
14 bio-económico de control óptimo para la producción de carbón vegetal. En particular, los resultados  
15 del modelo bio-económico de control óptimo de la aplicación del PMFARMF se comparan con los  
16 resultados obtenidos con el modelo considerando el manejo forestal tradicional actual. Lo anterior,  
17 con el objeto de contrastar la hipótesis de trabajo que propone que el manejo forestal tradicional  
18 basado en *roza-tumba-quema* es eficiente en el largo plazo, y no así la aplicación del PMFARMF,  
19 en términos de la cantidad asignada de trabajo forestal y de los niveles de uso de la biomasa forestal  
20 utilizados por los hogares productores de carbón vegetal.

21  
22 La política forestal del Estado de Campeche, tiene como objetivo utilizar el tipo de manejo basado  
23 en polígonos de explotación forestal con la finalidad de mejorar el uso y conservación de las  
24 superficies forestales y aumentar la productividad de los hogares agrícolas-forestales. En la última  
25 década se ha financiado de manera importante la elaboración de planes de manejo forestal  
26 comunitarios con las características de manejo de plantaciones forestales bajo polígonos de  
27 explotación. De acuerdo a los resultados de este trabajo, se puede inferir que esta política es  
28 ineficiente en términos bio-económicos y que por tanto su aplicación debe ser revisada y  
29 reformulada tomando en cuenta los incentivos económicos generados, de forma de propiciar un  
30 manejo, uso y conservación óptimo del recurso natural.

## 1 **Materiales y Métodos**

2

3 *El modelo dinámico de control óptimo de Pascual y Barbier*. El trabajo de Pascual y Barbier (2007)  
4 formula un modelo teórico para analizar el uso de tierras forestales típicamente utilizadas para la  
5 agricultura en las comunidades rurales de México, proponiendo además una metodología para  
6 calibrar el modelo con datos reales (ver también Pascual y Martínez-Espiñeira, 2006). Utilizando la  
7 conceptualización teórica de Pascual y Barbier (2007), en el presente trabajo se propone un modelo  
8 teórico de producción de carbón vegetal, el cual es la base para la calibración empírica realizada.

9

10 Las modificaciones específicas al modelo original de Pascual y Barbier son las siguientes: a) La  
11 adecuación conceptual del parámetro biomasa forestal, denotado por  $Q(t)$ , que se define como la  
12 cantidad de leña extraída en una superficie determinada, considerando la densidad de especies  
13 forestales que son costadas. b) La función de utilidad que se define como función agregada del  
14 gasto en bienes de consumo que satisfacen las necesidades primarias, a partir de los ingresos  
15 monetarios totales del hogar. c) La restricción presupuestaria que depende de los ingresos  
16 monetarios derivados de la producción de carbón vegetal más los ingresos por otras actividades  
17 productivas y transferencias (familias y gobierno). d) La función de producción que depende de la  
18 cantidad de superficie forestal cortada, de la cantidad de trabajo utilizada en la producción de  
19 carbón vegetal y de la cantidad de biomasa utilizada.

20

21 Estos cambios permiten realizar la evaluación bio-económica del manejo forestal tradicional y de la  
22 aplicación del PMFARMF, formalizándose a través de un modelo autónomo dinámico usando un  
23 escenario de largo plazo y tasas de descuento positivas que maximizan el valor de la función de  
24 utilidad sujeta a las restricciones de producción, presupuesto y cantidad de biomasa utilizada de los  
25 hogares productores de carbón vegetal.

26

1 *El modelo dinámico de control óptimo para la producción de carbón vegetal bajo un sistema de*  
2 *roza-tumba-quema.* La función de utilidad del hogar productor representativo se asume como una  
3 función agregada del gasto en bienes de consumo que satisfacen las necesidades primarias, a partir  
4 de los ingresos monetarios totales del hogar ( $m$ ). La función de utilidad directa se define como  
5  $U = U(m)$ , la cual se asume continua  $U'(m) > 0$ , doblemente diferenciable, no decreciente y  
6 cóncava  $U''(m) < 0$ . El tiempo de ocio no se encuentra incluido en la función de utilidad de los  
7 hogares, dado que se considera como predeterminado en cada ciclo productivo y con una tasa de  
8 descuento  $r$  positiva.

9  
10 La producción anual de carbón vegetal  $CH_i(t)$  está determinada por el sistema de roza-tumba-  
11 quema y la tecnología utilizada de producción artesanal. Aquí la producción del  $i$ -ésimo hogar  
12 productor en un periodo ( $t$ ) está determinada por la cantidad de superficie forestal que es utilizada  
13 en la producción,  $g Li/bi$ , la cantidad de trabajo usado en la producción de carbón distinta al  
14 corte de biomasa,  $(1-g) Li(t)$ , esto es, la cantidad de trabajo para la construcción, cuidado y  
15 apagado del horno de carbón tradicional, así como el envasado del carbón vegetal y por último, en  
16 la cantidad de biomasa existente en la superficie a explotar forestalmente,  $Q_i(t)$ . Formalmente se  
17 tiene:

$$19 \quad (1) \quad CH_i(t) = f_i[g Li/bi, (1-g) Li(t), Q_i(t)]$$

20  
21 Específicamente, la producción es función de la superficie que se utiliza para producir carbón  
22 vegetal  $g Li/bi$ , término que se encuentra integrado a su vez, por el total de trabajo destinado a la  
23 producción de carbón vegetal,  $Li$ , la proporción de trabajo asignado al corte o clareo de la tierra  
24 forestal,  $g$ , y la medida de intensidad de la limpieza o corte de la tierra,  $bi$  (por ejemplo: cantidad  
25 de horas en cortar una hectárea de superficie para la producción de carbón vegetal). El segundo  
26 argumento de la ecuación  $(1-g) Li(t)$  representa la cantidad de trabajo realizado para la  
27 producción de carbón vegetal, que depende del trabajo productivo de otras tareas distintas al clareo  
28 o corte de la vegetación secundaria. Por último, el tercer término de la función de producción está  
29 determinado por la cantidad total de biomasa utilizada en la producción anual,  $Q_i(t)$ , donde la  
30 cantidad de biomasa puede ser modelada como un recurso renovable debido a que el manejo  
31 forestal tradicional realizado por los productores permite la recuperación por intervalos de tiempo

1 (8 a 12 años) por rotación de tierras. La recuperación del recurso forestal depende principalmente de  
2 la composición de especies maderables que se dejan en barbecho o descanso.

3  
4 La restricción presupuestaria con que cuentan los hogares productores de carbón vegetal se define  
5 por la cantidad producida, los ingresos derivados de una actividad distinta a la producción de carbón  
6 vegetal y las transferencias monetarias:

$$8 \quad (2) \quad m_i = CH_i(t) + c[T_i - L_i(t)] + E_i$$

9  
10 La función de presupuesto indica que el ingreso anual de un hogar productor está determinado por  
11 la cantidad producida  $CH_i(t)$  más el ingreso asalariado obtenido dentro y fuera de la comunidad,  
12  $c[T_i - L_i(t)]$ , donde  $c$  es la tasa de salario real ( $w/p$ ),  $T$  es el trabajo discrecional diversificado  
13 dentro y fuera del sector productivo,  $L_i(t)$  es el trabajo total empleado en el sistema productivo, y  
14 más el ingreso real exógeno que incluye las transferencias entre hogares, gobierno u otros ingresos,  
15  $E(t)$ . Se asume además que las derivadas parciales de la función de producción  
16 satisfacen:  $f_j \geq 0$ ,  $f_{jj} \leq 0$  y  $f_{jk} = f_{kj} \geq 0$  para  $k \neq j$ . Donde  $i$  identifica a los hogares y  $j$  los  
17 argumentos de la función de producción de carbón vegetal.

18  
19 *Dinámica de la biomasa forestal.* La dinámica de la biomasa forestal es fundamental en el análisis,  
20 dado que los hogares productores de carbón vegetal requieren de la utilización de tierras forestales  
21 para obtener este insumo base para la producción. Estas superficies se mantienen en descanso o  
22 barbecho como parte fundamental del sistema de manejo forestal tradicional utilizado en la roza-  
23 tumba-quema.

24  
25 La acumulación de biomasa viene dada por la tasa de crecimiento intrínseca de ecosistemas  
26 forestales, la recuperación de superficies perturbadas (quemadas) y las superficies agrícolas  
27 (recuperadas forestalmente) en rotación que son introducidas a la producción (Lucio, 2006), siendo  
28  $Q(t)$  la cantidad de biomasa existente en tierras con cobertura vegetal de especies adecuadas para  
29 esta actividad productiva.

30  
31 Específicamente, la cantidad de biomasa promedio anual está determinada por el índice de biomasa  
32 forestal, el cuál considera el peso relativo  $\rho$  de especies de árboles utilizados en el carbón vegetal,



1 por el promedio de biomasa forestal existente en la superficie utilizada,  $X(t)$ , como lo muestra la  
2 siguiente ecuación:

3

$$4 \quad (3) \quad Q(t) = \rho X(t)$$

5

6 Donde la cantidad de biomasa forestal sobre el terreno viene dada por:

7

$$8 \quad (4) \quad X(t) = \frac{(Vg(t) - \underline{Vg})}{(\overline{Vg} - \underline{Vg})}$$

9

10 Donde  $\underline{Vg}$  y  $\overline{Vg}$  son respectivamente los pesos mínimos y máximos de las especies arbóreas y  
11  $Vg(t)$  es el peso total del stock de biomasa dentro de una superficie determinada.

12

13 Suponiendo que en la superficie seleccionada por el productor no se encuentren las especies de  
14 árboles específicos utilizados en la producción de carbón vegetal, se tendría que  $\underline{Vg} = 0$  y que

15  $0 \leq X(t) = \frac{Vg(t)}{\overline{Vg}} \leq 1$ . Además  $\rho$ , el peso relativo adjunto al índice de cantidad de biomasa

16 forestal, tomaría un valor de 1 dado que está relacionado con la biomasa forestal.

17

18 La función stock de biomasa forestal  $Vg(t)$  está determinada por el parámetro  $\lambda$ , que no varía a  
19 través del tiempo, y de la variable  $Wo$ , que representa el promedio de biomasa existente en la  
20 superficie productiva utilizada:

21

$$22 \quad (4a) \quad Vg(t) = \lambda \ln[Wo]$$

23

24 La cantidad total de biomasa utilizada por la comunidad está determinada por el parámetro

25  $\lambda = \rho \overline{Vg(t)}$ , que es el porcentaje máximo de biomasa utilizable para la producción de carbón  
26 vegetal, multiplicado por el logaritmo (ln) del promedio de biomasa forestal existente en la  
27 superficie,  $Wo$ .

28

1 De aquí se tiene que la biomasa forestal existente en las tierras en barbecho o descanso que  
 2 cambian de un periodo a otro viene dada por:  $Q(t) = \frac{\dot{W}_0}{W_0}$ , donde  $\dot{W}_0$  es la cantidad de biomasa  
 3 utilizada de un periodo o ciclo productivo a otro (considerando un ciclo productivo de un año  
 4 cronológico), y por la cantidad de biomasa existente en las superficies en descanso o barbecho,  $W_0$ .  
 5  
 6 Esta ecuación muestra que si los hogares productores permiten el barbecho de la tierra forestal para  
 7 un periodo más largo de tiempo, se tendría un incremento de la biomasa existente en la superficie.  
 8 Bajo el manejo tradicional comunitario se asume que la biomasa sobre el terreno forestal depende  
 9 del total restante de tierra en barbecho disponible en la comunidad en su conjunto (López, 1997).

10  
 11 Entonces, la cantidad de tierra en barbecho aprovechada para la producción de carbón vegetal solo  
 12 estará determinada por el total de los hogares productores,  $n$ , de la comunidad que introducen la  
 13 tierra en descanso o barbecho al sistema productivo de carbón vegetal  $\dot{W}_0$ , donde este  
 14 aprovechamiento forestal está determinado por los parámetros  $a_i = b_i / g_i$ , que representan la  
 15 intensidad de producción de carbón vegetal por unidad de área (hectárea) que un hogar realiza bajo  
 16 manejo forestal tradicional, misma que está integrada por la intensidad en trabajo de corta  
 17 (promedio de horas por corte de una hectárea)  $b_i$  y por el porcentaje de trabajo de corte de biomasa  
 18 para la producción  $g_i$ ; el término del numerador  $L_i$  representa el total de horas de trabajo dedicado  
 19 a la corta de leña y por último, el parámetro  $A$  denota el área total de tierra en barbecho y  
 20 productiva bajo el control de la comunidad. El parámetro  $k$  mide el aumento o disminución de la  
 21 utilización de tierras por tipo de manejo forestal (tradicional  $k = 1$  y PMFARMF  $k \neq 1$ ) sobre el  
 22 equilibrio en el manejo de la biomasa forestal.

23 (5) 
$$\dot{W}_0 = \gamma - \frac{k \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{a_i}}{A} W_0$$

24 La ecuación 5 muestra que la tasa de crecimiento de la biomasa forestal sobre la superficie de tierra  
 25 está determinada por la constante de crecimiento intrínseco de vegetación secundaria,  $\gamma$  (Ibíd.),  
 26 menos la depreciación del stock de biomasa explotada forestalmente por el hogar productor dado  
 27 por el tipo manejo forestal.

28

1 Ahora, asumiendo que todos los hogares productores de carbón son idénticos tenemos que la  
 2 biomasa forestal existente en la comunidad bajo un acceso comunal cambia de un periodo a otro,  
 3 como sigue:

$$4 \quad (6) \quad \dot{Q} = \lambda \left( \gamma e^{-q} - k \Theta \frac{L_i}{a_i} \right)$$

5 La ecuación 6 muestra que la cantidad de biomasa forestal está en función de los cambios en la  
 6 tasa de crecimiento natural intrínseca,  $\gamma e^{-q}$ , de la vegetación secundaria y especies forestales  
 7 (considerando una depreciación del capital natural  $e^{-q}$ ) menos  $\Theta \equiv \frac{n}{A}$  que es la cantidad de  
 8 hogares (n) que están usando las superficies (A) dentro del ejido, por la intensidad de trabajo  $\frac{L_i}{a_i}$  en  
 9 la producción y el tipo de manejo forestal k utilizado para la producción de carbón vegetal.

10

11 *La asignación óptima de cantidad de trabajo y biomasa forestal realizada por los hogares*  
 12 *productores de carbón vegetal.* El problema del hogar productor de carbón vegetal, se establece de  
 13 manera formal como un modelo dinámico autónomo, considerando un escenario de largo plazo y  
 14 asumiendo una tasa de descuento positiva  $r$ .

15

16 De aquí se tiene que el problema del hogar es escoger cuánto trabajo se asigna a la producción de  
 17 carbón vegetal restringido por la función de producción, ingreso productivo y tiempo, que  
 18 maximice el bienestar de los hogares productores sobre un horizonte de tiempo. Considerando un  
 19 horizonte de tiempo infinito, el problema es continuo en el tiempo y se puede expresar de la  
 20 siguiente forma:

$$21 \quad (7) \quad V^* = \max_L \int_{t_0}^{t \rightarrow \infty} e^{-rt} U[m(t)] dt$$

22 Con el supuesto de las restricciones en las ecuaciones de la función de producción, restricción  
 23 presupuestaria y la cantidad de biomasa utilizada por el hogar representativo, esto es, las  
 24 ecuaciones (1), (2) y (6), se obtiene el siguiente Hamiltoniano de valor presente:

$$25 \quad (8) \quad \bar{H}[Q(t), L(t), \mu(t)] = U[m(t)] + \mu(t) \lambda \left[ \gamma e^{-q} - \Theta k \frac{L}{a} \right]$$

26 Donde la función objetivo es maximizar la función de utilidad del hogar productor sujeto a una  
 27 restricción presupuestaria (m) que está determinada principalmente por la función de producción,  
 28 teniendo como variable de control el trabajo, la variable de estado la biomasa forestal y la variable

1 de co estado,  $\mu(t)$ , la cual representa el valor sombra de la cantidad de biomasa utilizada en un  
2 periodo t.

3  
4 Por aproximación, usando tiempo continuo y asumiendo una solución interior, se aplica el  
5 *Principio del Máximo*, además de considerar un estado estacionario para las variables de control,  
6 estado y co estado:  $\dot{L} = \dot{Q} = \dot{\mu} = 0$ .

7  
8 Asumiendo las condiciones de primer orden para un sendero óptimo con las condiciones de límite y  
9 transversalidad se obtienen las siguientes ecuaciones:

10

11 (9a) 
$$U'(m) \left[ \frac{f_1}{a} + (1+g)f_2 - c \right] = \frac{\mu k \Theta \lambda}{a}$$

12 (9b) 
$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} + \frac{U'(m)f_3}{\mu} = r + \gamma e^{-q}$$

13 (9c) 
$$\dot{Q} = \lambda \left[ \gamma e^{(-q)} - \frac{k \Theta L}{a} \right]$$

14 (9d) 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) Q(t) = 0$$

15 (9e) 
$$Q(0) = Q_0$$

16

17 La ecuación condicionante (9a) indica que los hogares usan trabajo forestal hasta que consiguen  
18 utilidad por la tierra forestal adicional que introducen a su sistema productivo y utilizan el tiempo  
19 restante en actividades distintas a la producción de carbón vegetal como su costo de oportunidad de  
20 asignación de trabajo. El otro costo, consiste en el valor marginal del salario real más el valor de la  
21 depreciación de biomasa forestal en la que incurren, mismas que les significa una disminución del  
22 valor del capital natural comunitario, debido a las superficies introducidas a la producción.

23

24 La ecuación (9b) se conoce como la *regla de asignación óptima* para mantener la cantidad de  
25 biomasa forestal. La no ganancia de utilidad puede lograrse por el cambio de la cantidad de biomasa  
26 cuando la tasa de retorno marginal actual es igual a los costos. Esto incluye la tasa de descuento  $r$   
27 como valor económico de la biomasa, más el costo adicional por esperar el crecimiento de la  
28 biomasa forestal  $\gamma / W_0$ . La participación sobre los retornos de la cantidad de biomasa forestal

1 involucra una apreciación actual sobre este valor,  $\frac{\dot{\mu}}{\mu}$  más el incremento de la utilidad adicional por

2 la cantidad de biomasa forestal por la producción actual de carbón vegetal  $\frac{U'(m)f_3}{\mu}$ .

3

4 La ecuación de estado (9c) describe la evolución que sigue la biomasa forestal que es influida por el  
5 parámetro  $k$ , que implica un aumento o disminución de la cantidad promedio de superficie que  
6 utilizan anualmente los hogares de la comunidad.

7

8 Por último, la ecuación (9d) asegura que los hogares optimicen la cantidad de biomasa al final del  
9 tiempo, donde los retornos de la biomasa forestal tienden a cero y en el periodo del tiempo se  
10 aproximan a infinito.

11

12 En definitiva, el parámetro de manejo forestal  $k$  impacta de manera directa en la cantidad de  
13 biomasa forestal que es utilizada por lo hogares, pero estará limitada por el costo del trabajo forestal  
14 y los retornos del recurso forestal (biomasa) existente.

15 Lo anterior, condiciona que los hogares productores de carbón vegetal tienen que decidir entre dos  
16 alternativas, la primera es hacer uso inmediato de la cantidad de biomasa como insumo en la  
17 producción o dejar a estas tierras forestales en barbecho sin utilizar para acumular una mayor  
18 cantidad de biomasa en el futuro.

19

20 Resolvemos considerando los valores conocidos de  $\dot{L} = \dot{Q} = \dot{\mu} = 0$  donde se obtienen los valores  
21 de un estado estacionario de largo plazo como se indica a continuación:

22 (10)  $\dot{L} = 0: \quad \lambda \Theta k f_Q = a(r+i)(f_L - c)$

23 (11)  $\dot{Q} = 0: \quad \gamma \exp(-q) = k \Theta \frac{L^*}{a}$

24 (12)  $\dot{\mu} = 0: \quad \mu^* = \frac{U'(m)f_3}{r+i}$

25 Donde  $\frac{f_1}{a} + (1-g)f_2 \equiv \frac{f_1}{a} + (1-g)f_2$  representa el producto marginal de la cantidad de  
26 biomasa utilizada y la cantidad de trabajo aplicada a la producción de carbón vegetal, en la cual  $f_1$

1 es el producto marginal asociado al primer argumento de la función de producción, es decir el área  
2 cortada y  $f_2$  es el producto marginal asociado al trabajo forestal distinto a la corta.

3  
4 Dadas estas relaciones se puede formular un sistema de dos ecuaciones en  $(Q, L)$ . Representando  
5 los valores de estado estacionario con un asterisco, el valor sombra de la biomasa forestal a largo  
6 plazo es:

$$7 \quad (13) \quad \mu^* = \frac{U'(m)f_3}{r+i}$$

8 Sustituyendo (13) en (9a) se obtiene una función del equilibrio de largo plazo del hogar  
9 representativo. Sustituyendo  $\dot{Q}=0$  y  $\dot{\mu}$  derivamos la igualdad de (9a) y (9b), y obtenemos que el  
10 sendero óptimo para el trabajo forestal L viene dado por:

$$11 \quad (14) \quad \dot{L} = \frac{\lambda \Theta k f_Q - (r - e^{-q}) a f_L}{\theta a (f_L - c)^2 - f_{LL}}$$

12 Donde  $\theta$  es la elasticidad marginal de la producción de carbón vegetal y medida de concavidad  
13 global de la función de utilidad (Pascual y Barbier, 2007).

14  
15 *Análisis estático comparativo del efecto del manejo forestal sobre la asignación de trabajo y*  
16 *biomasa forestal del modelo propuesto.* La cantidad de trabajo y biomasa forestal óptima a largo  
17 plazo para los productores de carbón vegetal es sensible a los cambios de los parámetros del  
18 modelo. Para nuestro análisis consideramos que la cantidad de biomasa utilizada para el sistema  
19 productivo es influida por el parámetro  $k$  de manejo forestal que representa la presión sobre el  
20 recurso.

21  
22 La propuesta del PMFARMF sugiere realizar un manejo forestal más intensivo, agregando una  
23 mayor cantidad de trabajo y uso de biomasa para promover mayores niveles de producción para los  
24 hogares productores, así como regular el acceso a la zona de explotación forestal, dado por el  
25 polígono de explotación comunitaria.

26  
27 Siguiendo la lógica del modelo para la producción de carbón vegetal, se contempla que el trabajo y  
28 biomasa forestal de equilibrio están en función a la cantidad de hogares que se encuentran en el  
29 sistema productivo, así como por la utilidad marginal del trabajo y costo marginal por la unidad de  
30 superficie forestal introducido a la producción.

31

1 Considerando las ecuaciones de equilibrio del modelo se tiene que:

2 (15)  $\dot{L} = 0$ :  $\lambda\Theta kf_Q = a(r+i)(f_L - c)$

3 (16)  $\dot{Q} = 0$ :  $\gamma \exp(-q) = k\Theta \frac{L^*}{a}$

4 (17)  $\dot{\mu} = 0$ :  $\mu^* = \frac{U'(m)f_3}{r+i}$

5 Según esta especificación, el comportamiento de los hogares productores de carbón vegetal con  
6 respecto al manejo de la biomasa forestal puede explicarse de la siguiente forma. Si los hogares  
7 explotan sus selvas bajas caducifolias y sub caducifolias, con altos niveles de biomasa,  $Q_0 > Q^*$ ,  
8 éstos podrían asignar un mayor tiempo a las actividades forestales. Sin embargo, una mayor  
9 cantidad de trabajo forestal dedicada a la corta resultaría en una declinación de la biomasa existente  
10  $\dot{Q} < 0$ . Consistente con un sendero estable, tendríamos que a lo largo de este periodo la cantidad de  
11 biomasa y trabajo en actividades forestales podrían regenerarse en el equilibrio.

12

13 Por otro lado, si los hogares inicialmente tienen acceso a tierras forestales con baja biomasa de las  
14 especies maderables para la producción de carbón, es decir  $Q_0 < Q^*$ , entonces el hogar debe asignar  
15 menos tiempo a las actividades forestales. Dependiendo de la baja densidad de especies forestales  
16 utilizadas en la producción de carbón vegetal, los hogares disminuirían el uso de tierras forestales  
17 para la producción, debido a las cantidades marginales de biomasa, y esto repercutiría en un  
18 aumento de los niveles de cobertura forestal de la comunidad.

19

20 El proceso de manejo forestal productivo está determinado por el promedio de trabajo aplicado en  
21 la producción y la escala social de extracción de biomasa forestal que describe el grado de presión  
22 sobre las tierras forestales, representada por la tasa de área-población  $\Theta$ . Lo anterior, se da de  
23 manera endógena a la comunidad, considerando la internalización de los costos sociales de la  
24 disminución de la biomasa forestal y por ende, la disminución de las superficies en barbecho o  
25 descanso que están bajo el manejo comunitario.

26

27 Ahora procedemos a analizar los efectos que tendría sobre las decisiones de los hogares la  
28 aplicación del PMFARMF. En el presente modelo, el manejo forestal (uso de la superficie forestal  
29 para la producción) esta representado por el parámetro k, donde se asume que para un manejo  
30 tradicional de roza-tumba-quema el valor de k es igual 1; por otro lado un manejo de tierras

1 forestales consistente con el PMFARMF, el parámetro k tomaría un valor distinto a 1. Esto debido a  
 2 que el uso productivo de tierras forestales se encuentra en función al promedio de aumento del  
 3 esfuerzo de corta, dado por  $k\Theta \frac{L^*}{a}$ . Aquí se considera que el aumento de la producción propuesta  
 4 en el PMFARMF se logra cuando los hogares productores ajustan sus factores de producción  
 5 (superficie utilizada, trabajo forestal y cantidad de biomasa) sin cambiar la tecnología de  
 6 producción artesanal de hornos de carbón vegetal y con el sistema de la roza-tumba-quema.

7  
 8 Ahora, podemos estimar cuánto trabajo forestal puede realizar el hogar y a qué cantidad de  
 9 biomasa forestal están condicionados los hogares, asumiendo la internalización de los costos  
 10 sociales del uso de tierras forestales en descanso o reposo. Esto lo analizamos a través de la  
 11 aproximación del aumento de la presión de los hogares sobre las tierras forestales a largo plazo,  
 12 utilizando el parámetro k en el nivel óptimo de  $L^*$  y  $Q^*$ .

13  
 14  
 15 **Proposición 1.** *La condición necesaria para obtener un equilibrio único en el manejo forestal k,*  
 16 *viene dada por:*

17 (18)  $a(f_{LL} - c) \geq F$ , donde  $F = \left[ \frac{(r+i)f_Q - \lambda\Theta / f_{QQ}}{i} + \frac{f_Q}{L^*/a} \right] > 0$

18 *Esta implica que la tasa de retorno del trabajo forestal es mayor o igual al costo marginal de*  
 19 *utilizar la biomasa forestal en el presente y no mantenerla para el siguiente periodo.*

20  
 21 **Demostración:** *Derivando la función de trabajo forestal con respecto al parámetro de manejo*

22 *forestal k se obtiene lo siguiente:*  $\frac{\delta L^*}{\delta k} = L^* \Theta$  *donde*  $L^* \Theta \geq 0$ , *sujeto a que:*  $\frac{\delta L^*}{\delta k} \geq 0$ .

23 *Resolviendo se obtiene:*  $L^* \Theta \geq 0$  *y*  $\Theta \geq 0$ . *De aquí se cumple la desigualdad:*  $a(f_{LL} - c) \geq F$ ,

24 *donde*  $F = \left[ \frac{(r+i)f_Q - \lambda\Theta / f_{QQ}}{i} + \frac{f_Q}{L^*/a} \right] > 0$  **Q.E.D.**

25  
 26 La ecuación 18, muestra que en equilibrio el trabajo forestal para el hogar productor representativo  
 27 se incrementaría con el manejo forestal hasta cuando la tasa de retorno marginal de trabajo forestal,



1  $a(f_{LL} - c)$ , sea mayor o igual que el costo de explotación de la cantidad de biomasa introducida al  
 2 sistema productivo del carbón vegetal.

3

4 La valoración del costo marginal para los hogares incluye las externalidades reciprocas sobre el  
 5 resto de la comunidad, las cuales son completamente internalizadas. De este modo, si los hogares no  
 6 están sujetos a condición (9a), entonces es posible que los hogares apliquen menos trabajo forestal  
 7 bajo un aumento de la densidad de productores.

8

9 **Proposición 2.** *El manejo forestal óptimo se encuentra cuando la superficie total utilizada por los*  
 10 *productores es mayor o igual al umbral de disminución social de biomasa forestal, esto es:*

$$11 \quad (14) \quad \Theta \geq \Omega, \text{ donde } \Omega = \frac{(r+i)}{\lambda} \left( \frac{f_{LL}}{f_{LQ} - f_Q/L} \right)$$

12 **Demostración:** *El efecto que tendría el manejo forestal sobre la cantidad de biomasa forestal*  
 13 *utilizada se obtiene al derivar la ecuación de biomasa forestal,  $Q^* = Q^*(k\Theta)$ , con respecto al*

14 *parámetro  $k$ , i.e.  $\frac{\delta Q^*}{\delta k} \leq 0$  sujeto a  $Q^* \cdot \Theta \leq 0$ . De aquí se tiene que:  $Q^* \cdot \Theta \leq 0$  con  $\Theta \geq 0$ .*

15 *Por lo tanto,  $\Theta \geq \Omega$  con  $\Theta \geq 0$ , donde:  $\Theta \geq \max(\Omega, 0)$  con  $\Omega$  positivo. De aquí se demuestra*  
 16 *que  $\Theta \geq \Omega$  y que se cumple con la desigualdad inicial. **Q.E.D.***

17

18 Esto indica, que el aumento de la producción que los hogares están dispuestos a realizar se  
 19 encuentra en función del umbral de biomasa que el hogar espera disminuir de su dotación total,  
 20 siendo conscientes de ello y asumiendo los costos completamente. Este es un factor importante que  
 21 determina el valor de variación del parámetro  $k$  de manejo forestal.

22

23 Para la función de producción de carbón vegetal se asumen lo siguiente:  $f_{LL} < 0$ ,  $f_{LQ} > 0$  y  
 24  $f_Q > 0$ , de aquí se tiene que:

$$25 \quad (20) \quad L^* > \frac{f_L}{f_{LQ}} \Rightarrow \frac{\delta Q^*}{\delta k} < 0$$

$$26 \quad (21) \quad \varepsilon_L > \sigma_{LQ} \Rightarrow \frac{\delta Q^*}{\delta k} < 0$$

1 Donde  $\varepsilon_L$  es la elasticidad producto del  $L^*$  y  $\sigma_{LQ}$  es la elasticidad sustitución entre el nivel óptimo  
2 de  $L^*$  y  $Q^*$ , lo cual refleja que el manejo forestal toma en cuenta el nivel de tecnología empleado en  
3 la producción de carbón vegetal.

4  
5 De esto, se desprende que el manejo forestal ejerce una presión sobre el recurso forestal cuando la  
6 elasticidad producto del trabajo sobrepasa la elasticidad de sustitución entre el trabajo y cantidad de  
7 biomasa utilizada, una vez que los insumos se asignaron de manera óptima. El aumento de la  
8 cantidad de trabajo y biomasa dentro del sistema de manejo forestal, se rige en función de que la  
9 tasa de retorno marginal de trabajo forestal,  $a(f_{LL} - c)$  sea mayor que el costo de explotación de la  
10 cantidad de biomasa introducida al sistema productivo de carbón vegetal.

#### 11 12 *Aplicación del estudio de caso para Campeche*

13  
14 *Área del estudio.* La comunidad de Chunkanán se encuentra ubicada dentro del Municipio de  
15 Hecelchakán, Campeche y en las cercanías con la zona de amortiguamiento del Área Natural  
16 Protegida Reserva de la Biosfera Los Petenes, cuenta con un total de 168 hogares y una población  
17 de 871 personas (INEGI,2005). Este núcleo urbano, se encuentra asentado dentro de una superficie  
18 de 5,015 hectáreas de tierra de propiedad de uso colectivo, con un total de 86 ejidatarios o personas  
19 con derechos de explotación de la tierra. Los hogares productores de carbón vegetal fueron 45 para  
20 el año 2007, lo que representó cerca del 27% del total de los hogares de la comunidad.

21  
22 *Diseño del instrumento.* Por las características de información requerida para obtener los  
23 parámetros necesarios del modelo de control óptimo, fue necesario realizar una encuesta a cada uno  
24 de los 45 jefes de hogares productores de carbón vegetal, durante el 2007, donde se consideraron  
25 aspectos demográficos, económicos, sociales, ambientales y productivos. Siguiendo la metodología  
26 para la construcción de matrices de contabilidad social para pueblos (Yunez, A. y Taylor, E., 1999)

27  
28 En términos de las variables demográficas se obtuvo información sobre individuos en el hogar,  
29 edad, escolaridad y relación con el jefe. La sección económica las preguntas se centraron en las  
30 principales actividades que realizan los hogares como producción de carbón vegetal, trabajo  
31 asalariado dentro y fuera de la comunidad, subsidios (programas productivos y de asistencia) y  
32 remesas. La parte social se centró en indagar los diferentes apoyos que reciben de los servicios de  
33 salud, agua potable, alumbrado público y carreteras o caminos. Y por último, la parte ambiental se  
34 realizaron preguntas sobre el uso del recurso forestal, el promedio de biomasa utilizada como

1 insumo a la producción de carbón vegetal y las especies forestales más comunes existentes en la  
2 comunidad.

3  
4 *Estimación de los parámetros.* Con los datos obtenidos de los hogares se estimaron el ingreso anual  
5 de los hogares a partir de los ingresos derivados de la producción de carbón vegetal, ingresos por  
6 actividad asalariada dentro y fuera de la comunidad (migración), otros ingresos (subsidios,  
7 transferencias, etc.).

8  
9 Se obtuvo también por hogar la cantidad promedio producida de carbón vegetal (CH), trabajo total  
10 L (hrs/hombre anual), porcentaje de trabajo dedicado a la corta (g), horas promedio para cortar una  
11 hectárea (b), total de hectáreas en producción (L/a), porcentaje relativo del uso total de biomasa  
12 (Q%), precio promedio de venta al intermediario (P), se construyó las líneas de pobreza con el  
13 índice de FGT (ver Foster, Greer y Thorbecke, 1984).

14  
15 El parámetro de tasa de crecimiento natural de la biomasa ( $y$ ) fue obtenido del PMFARMF, el  
16 parámetro densidad de población fue estimado con datos de la superficie total del ejido (A)  
17 brindada por la autoridad de la comunidad, el número de hogares (n) se obtuvo del II conteo de  
18 población y vivienda 2005 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El salario  
19 mínimo fue obtenido de la Secretaria de Administración Tributaria (SAT). Por último, el parámetro  
20 k fue construido con el promedio de superficie que se utiliza con el manejo tradicional y con las  
21 superficies forestales propuesta a introducir a la producción de carbón vegetal anual por el  
22 programa de manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables  
23 (PMFARMF)

24  
25 *Consideraciones para la calibración del modelo empírico.* Para realizar la simulación y comparar el  
26 manejo forestal tradicional actual y el del PMFARMF, se asume que los hogares reaccionan a la  
27 política de manejo forestal ajustando su nivel de esfuerzo sobre la superficie forestal propuesta, es  
28 decir, ajustarán la variable trabajo L (t) para alcanzar las superficies programadas, siendo el  
29 parámetro k, el que registre la variación en el manejo forestal. Los parámetros soportan las  
30 restricciones del modelo, considerando la tasa de retorno marginal del trabajo forestal mayor o  
31 igual al costo de oportunidad de utilizar la biomasa en el periodo t que en t+1. Además se ajusta la  
32 superficie total utilizada por los hogares al nivel establecido como el umbral aceptable de  
33 utilización de biomasa forestal internalizando completamente todos los costos sociales.

1 Otro aspecto importante para efectuar la simulación y comparación del manejo tradicional actual  
2 con el del PMFARMF, fue la obtención de un promedio de las superficies productivas anualmente,  
3 dado que dicho programa de manejo no considera promedios estables, sino que entrega superficies  
4 que varían de mayores a menores cantidades año a año y por un total de 5 periodos. El promedio  
5 anual que se obtuvo fue de  $k=1.59$  y para el manejo tradicional  $k=1$ , donde se considera la  
6 superficie 64.35 hectáreas promedio que se utiliza anualmente por el total de productores de carbón  
7 vegetal. Con el objeto de observar los efectos sobre la cantidad de biomasa forestal utilizada,  
8 trabajo invertido y producción de carbón vegetal obtenido por tipo de manejo forestal se realiza la  
9 simulación del modelo bio-económico de control óptimo en un horizonte de planeación de 35 años.  
10 La tabla 2 muestra los parámetros de manejo forestal  $k$  utilizados en la calibración del modelo de  
11 control óptimo.

12 **[INSERT TABLE 2 ABOUT HERE]**

13

14 *Calibración del modelo.* Para el análisis del modelo se utilizó el programa *Vensim DSS 5*, el cual  
15 realiza la construcción del diagrama de flujo que permite el ingreso de los parámetros estimados y  
16 los periodos de inicio y termino para determinar los senderos de expansión óptimos para cada uno  
17 de los manejo forestales. La figura 1 muestra un diagrama de flujo que explica la estructura del  
18 modelo de control óptimo para la producción de carbón vegetal.

19

20 **[INSERT FIGURE 1 ABOUT HERE]**

21

22 Como se observa en la Figura 1, la presión social sobre las superficies forestales en la comunidad,  
23 está relacionada con el parámetro de manejo forestal  $k$ , el número total de hogares productores de  
24 carbón vegetal ( $n$ ), la dotación total de tierras de la comunidad ( $A$ ) y el promedio de superficies  
25 utilizadas. Dicha presión social impacta el cambio (variación) de la biomasa forestal en cada ciclo  
26 productivo.

27

28 La variación de la biomasa en cada ciclo, asociado al promedio de biomasa existente en las  
29 superficies y al índice de densidad arbórea impacta de manera efectiva a la utilización de biomasa  
30 total existente en la comunidad.

31

32 A su vez, la utilización de biomasa forestal, la función de producción (con la técnica de hornos  
33 artesanales) y la cantidad de trabajo forestal aplicado en la producción, repercuten en el nivel de  
34 producción de los hogares. Donde el nivel de producción se ve afectado por el precio de venta del

1 productor (establecido de manera exógena) fijado por los intermediarios comerciales, lo que  
2 determina el valor de la producción.

3  
4 El ingreso productivo se integra con los ingresos monetarios obtenidos del trabajo asalariado fuera  
5 de esta actividad dentro y fuera de la comunidad, así como por las transferencias recibidas  
6 (subsidios y apoyos productivos del gobierno). Donde este conjunto de ingresos forman parte del  
7 ingreso total del hogar, el cual integra el presupuesto de los hogares y que influye de manera directa  
8 en la función de la utilidad del hogar.

9  
10 Siguiendo esta lógica de flujo, el programa Vensim DSS 5 entrega una solución al modelo bio-  
11 económico de control óptimo.

### 12 13 **Resultados y Discusión**

14  
15 El análisis de los resultados indica que los hogares productores presentan una situación de pobreza.  
16 Los hogares con pobreza extrema, pobreza ajustada y no pobres (índice F-G-T), percibieron  
17 ingresos totales per cápita al mes de US\$40.51, US 65.33 y US\$93.80 lo que equivale a ingresos de  
18 1.35, 2.17 y 3.12 dólares per cápita diarios, respectivamente.

19  
20 La producción de carbón vegetal para estos hogares sólo representa el 33% del total de ingresos, el  
21 trabajo asalariado 46% y otros ingresos 21%, que en su conjunto les permiten a las familias  
22 satisfacer sus necesidades básicas de alimentación.

23  
24 Estimando un modelo linealizado de la función de producción tipo Coob-Douglas (García et al,  
25 2007) se obtuvieron los siguientes valores de los parámetros, donde  $\alpha = -0.8180$ ; los coeficientes  
26  $\beta_1 = 0.559$ ,  $\beta_2 = 0.482$  y  $\beta_3 = -0.206$ . La tecnología de producción artesanal muestra  
27 rendimientos decrecientes de la producción (0.835). Así el nivel de producción de los hogares se  
28 estableció con la siguiente ecuación:

29  
30 (22)  $CH_i = 6.158 * (L/a)_i^{.559} * ((1-g)L)_i^{.482} * (Q_0)_i^{-.206}$

31  
32 *Resultados del modelo con manejo forestal tradicional* Los cálculos realizados para obtener los  
33 parámetros del modelo con manejo forestal tradicional arrojaron que el hogar productor  
34 representativo tuvo una producción promedio anual,  $CH_i$ , de 10.10 toneladas, trabajo forestal de

1 994 (horas/año), el porcentaje de trabajo en el corte de biomasa,  $g$ , de 0.32, un promedio de  
2 266.60 (horas/ha.) para el corte de árboles, la superficie utilizada promedio anual por hogar,  $\frac{L_i}{a_i}$ , de  
3 1.43 hectáreas, la biomasa forestal promedio utilizada por hectáreas de 13.16 toneladas, una tasa de  
4 crecimiento intrínseca de la superficie comunitaria,  $\gamma$ , de 15% , la tasa de utilización de biomasa  
5 forestal de los hogares productores,  $Q(t)$ , del 4.5%, un precio promedio por kilogramo de carbón  
6 de \$1.20 , una dotación total horas de trabajo del hogar productor de 1,749, así como un ingreso  
7 promedio anual de \$36,638, derivado de los ingresos por producción de carbón vegetal de \$12,124,  
8 ingresos por trabajo fuera del sector forestal \$19,167.80 y otros ingresos de \$5,346.09. Estos datos  
9 se consideran como la línea base para la simulación dinámica.

10  
11 Si se pretende consolidar la producción de carbón vegetal como una actividad productiva principal  
12 para los hogares productores de la comunidad de Chunkanán y éstos deciden aumentar los esfuerzos  
13 para producir a mayor escala se tendría el siguiente panorama. Si los productores mantienen el  
14 manejo forestal tradicional actual de roza-tumba-quema con rotación de las tierras. El resultado en  
15 un periodo de 5 años sería que la cantidad de horas invertida de trabajo forestal se fijaría en 1,892  
16 horas/anuales, la utilización de biomasa aumentaría de 4.5 a 7.5%; la producción ascendería a  
17 11.89 toneladas y el ingreso a \$14,270 pesos, aumentando la superficie explotada por hogar de 1.44  
18 a 2.34 hectáreas anuales,. La tabla 3 presenta los parámetros usados en la calibración del modelo de  
19 control óptimo.

20  
21 **[INSERT TABLE 3 ABOUT HERE]**

22  
23 Es importante mencionar que este incremento de las superficies a introducir a la producción de  
24 carbón vegetal se verá determinada porque la tasa de retorno marginal del trabajo forestal sea mayor  
25 al costo de oportunidad de la biomasa utilizada en la producción. Además de la función de  
26 producción que muestra rendimientos decrecientes, dado por la tecnología de hornos artesanales de  
27 producción de carbón vegetal. La figura 2 presenta el porcentaje de biomasa utilizado por ambas  
28 estrategias de explotación, tradicional y *PMFARMF*, en un período de 35 años.

29  
30 **[INSERT FIGURE 2 ABOUT HERE]**

31  
32 *Resultados del modelo con el PMFARMF.* Si se aplica este programa de manejo forestal, la  
33 actividad del corte de árboles se realiza utilizando una mayor tecnificación (uso popular de moto

1 sierras), lo que representa una disminución de las horas de trabajo forestal; donde al término del  
2 periodo de aplicación de este programa (5 años) se contaría con una cantidad invertida de horas de  
3 trabajo forestal de 1,189 horas/anuales, una utilización de biomasa de 7.76 %, la producción  
4 ascendería a 10.90 toneladas y el ingreso a \$13,080 pesos, que en el primer año se utilizarían 2.14  
5 hectáreas y en último año sería de 2.42 hectáreas anuales por hogar. La figura 3 muestra el nivel de  
6 producción por hogar (medido en kilos) para cada estrategia de explotación, tradicional y  
7 *PMFARMF*, en un período de 35 años.

8  
9 **[INSERT FIGURE 3 ABOUT HERE]**

10  
11 *Resultados comparativos del manejo forestal tradicional y del PMFARMF.* La comparación de los  
12 niveles de utilización de biomasa y la cantidad producida para el manejo forestal tradicional y el del  
13 *PMFARMF*, da como resultado que el manejo tradicional mantiene una dinámica de utilización de  
14 biomasa creciente con respecto a la tasa de crecimiento intrínseca de biomasa que se igualarían en  
15 el año 18, con un porcentaje de utilización del 15.31%; punto en el cual tendría un nivel de  
16 producción de 15.96 toneladas equivalente a un ingreso aproximado de \$19,152 pesos. La tabla 4  
17 resume los resultados del modelo de control óptimo en términos de biomasa, producción e ingreso  
18 monetario.

19 **[INSERT TABLE 4 ABOUT HERE]**

20  
21 Con el *PMFARMF* el punto de partida de manejo forestal de  $k=1.59$  que equivale a un promedio de  
22 102.23 hectáreas de superficie total utilizada por los productores, situación que impacta sobre la  
23 sostenibilidad ecológica, debido a que alcanza a igualar la tasa de crecimiento intrínseca en un  
24 periodo más corto (16 años), con un porcentaje de utilización de biomasa de 14.94%, un nivel de  
25 producción 12.31 toneladas que equivale a \$14,772 pesos. El cambio de utilización de superficie se  
26 inicia el año uno con 2.14 y llega a 3.40 hectáreas por hogar en el año 16, lo que indica una  
27 presión mayor sobre el recurso forestal.

28  
29 A su vez, el aumento de la utilización de biomasa forestal en los primeros ciclos productivos  
30 propuesto por el *PMFARMF* impacta en las ecuaciones de  $Q(t)$ , la asignación de trabajo forestal y  
31 superficies utilizadas, factores que ponen en riesgo los ingresos futuros de los hogares, debido a que  
32 disminuye los niveles de producción y promueve la pérdida de calidad del suelo (por el corte  
33 completo de los árboles), en el corto, mediano y largo plazo comparado el comportamiento del  
34 manejo tradicional en la comunidad.

1 En conclusión, se puede señalar que de la comparación entre las dos alternativas de manejo forestal  
2 (tradicional y con el PMFARMF) queda patente que los hogares asignan una cantidad óptima de  
3 trabajo forestal, cuando la tasa de retorno marginal del trabajo forestal es mayor o igual al costo de  
4 oportunidad de usar biomasa en el periodo actual ( $t$ ) que el siguiente periodo ( $t+1$ ), mismo que está  
5 en función a la posibilidad de reutilizar la superficie para la agricultura en el mismo ciclo, dado que  
6 disminuye el costo de oportunidad de las horas invertidas en la corta de la superficie.

7  
8 Además se pudo constatar que los hogares productores de carbón vegetal internalizan los costos  
9 sociales del uso de la biomasa forestal, dado que a medida que se acerca la tasa de uso de biomasa  
10 forestal a la tasa de crecimiento intrínseco de la vegetación, éstos disminuyen la presión sobre el  
11 uso del recurso, a través de la disminución promedio de superficies explotadas para esta actividad.

12  
13 Cabe destacar que el PMFARMF no determina un cambio en la tecnología de producción de carbón  
14 vegetal utilizada, misma que actualmente muestra rendimientos decrecientes. Esto en cierta medida  
15 limita el análisis presentado de las dos estrategias de manejo forestal consideradas debido a que no  
16 se pudo realizar un análisis de sensibilidad considerando un cambio en las funciones de producción  
17 que pudiera cambiar las condiciones iniciales y finales dentro del modelo de control óptimo.

18  
19 De manera empírica se comprueba que las comunidades indígenas Mayas aledañas a la reserva de la  
20 biosfera Los Petenes en México, tienen un manejo sostenible de sus recursos forestales, dado que se  
21 encuentran con niveles de utilización de biomasa forestal por debajo de las tasas de crecimiento  
22 intrínsecas y obtienen ingresos monetarios positivos de la producción de carbón vegetal, además de  
23 utilizar estas superficies forestales para la producción agrícola, lo que permite una optimización del  
24 trabajo invertido como hogar.

25  
26 En consecuencia, la principal recomendación de política que puede desprenderse de este trabajo es  
27 que la Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México debería  
28 promover planes de manejo forestal que consideren las condiciones económicas, además de  
29 distinguir la complementariedad de las actividades forestales y agrícolas, las cuales determinan los  
30 incentivos económicos y sociales de utilización de las superficies forestales. En este caso en  
31 particular, nuestro análisis bio-económico sugiere que la política óptima sería mantener el manejo  
32 tradicional, sistema de roza-tumba-quema de pequeñas superficies, dado que permite a los  
33 productores mantener esta actividad forestal con la producción agrícola, disminuyendo la presión  
34 adicional para el recurso forestal y optimizando la cantidad de trabajo asignada a la corta de



1 biomasa a nivel local. Lo que se traduce en una mejora en la toma de decisión social, dado que no  
2 se presiona el umbral de utilización de biomasa esperado de cada familia. Así, los resultados de este  
3 trabajo muestran la necesidad de que los tomadores de decisiones en Latinoamérica ahonden en el  
4 análisis de los incentivos económicos y sociales que tienen las comunidades para hacer uso del  
5 recurso forestal, esto con la finalidad de definir con claridad cómo se podría aumentar la costo  
6 efectividad de las políticas de manejo y conservación ambiental en comunidades indígenas aledañas  
7 a las áreas naturales protegidas.  
8

## 1 **Referencias**

- 2
- 3 Arrocha, M. 2007. La contribución del recurso forestal hacia los hogares rurales de la zona aledaña  
4 al Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Los Petenes: Un cálculo del incentivo  
5 económico de conservación, San Francisco de Campeche, México. Indesol - Kairos, A.C.,  
6 1-80.
- 7 Chiang, A. y Wainwright K. 2006. Métodos fundamentales de economía matemática México D.F.  
8 Ed. Mc Graw Hill. 1-688.
- 9 Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2006. Plan de Conservación y  
10 Manejo de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, México, DF., págs. 198.
- 11 Foster, J., J. Greer y E. Thorbecke. 1984. A class of decomposable poverty measures. *Econometrica*  
12 81: 761–766.
- 13 García, A., N. Ceular, J.M. Caridad, R. Acero, J.M. Perea y M.E. Martín. 2007. Determinación de  
14 funciones de producción y análisis de eficiencia de la invernada pampeana Argentina.  
15 Córdoba, España. *Archivos de Zootecnia* 56 (213): 23-32.
- 16 Instituto nacional de Estadística, informática y geografía (INEGI). 2005. II Censo Nacional de  
17 Población y Vivienda, México, D.F.
- 18 Lucio, J. 2006. Programa de Manejo Forestal para el aprovechamiento de los Recursos Forestales  
19 Maderables, Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), San Francisco de Campeche,  
20 México. 1-110.
- 21 Lopez, R. 1997. Environmental externalities in traditional and the impact of trade liberalization: the  
22 case of Ghana. *Journal of Development Economics* 53 (1):17–39.
- 23 Pascual, U. y Barbier, E.B. 2007. On price liberalization, poverty and shifting cultivation: An  
24 example from Mexico, *Land Economics*, 83(2):192-216.
- 25 Pascual, U. y Martínez-Espiñeira, R. 2006. Second-best policy options against poverty and  
26 environmental degradation in forest based agricultural systems, *Economía Agraria y*  
27 *Recursos Naturales*, 12: 121-144.
- 28 Pat, F., Hernández, P. y Sánchez L., 2006. Villalobos G., Memoria del Taller Participativo El  
29 Contexto Demográfico, Económico y Social en las Comunidades Aledañas a la Reserva de  
30 la Reserva de Los Petenes (RBLP), Hecelchakán, Campeche, México. UAC, ECOSUR,  
31 EPOMEX Y RBLP, 1-95.
- 32 Yunez, A y Taylor, E.J. 1999. Manual para la construcción de matrices de contabilidad social para  
33 pueblos, México, D.F. Colegio de México, 1-104.

1

**Anexo**

2 **Table 1.** Characteristics of the Traditional Forestry Slash and Burn Management with the Forest  
3 Management Program for the Exploitation of Timber Resources (FMPETR)  
4

<b>Traditional Forest Management</b>	<b>Forest Management Program (FMPETR)</b>
Slash and burn.	Slash and burn.
Small areas (patches) for production.	Rotating polygon, bath management for production delimited.
Selective logging and low impact (keeping logs of 30 cm in height).	Semi thinning of the productive area (full cut trees).
Free access to the total strength of the community forest area.	Limited access to a single polygon community forestry.
Charcoal production site handcrafted oven.	Production of charcoal in the area within the polygon.
Land rotation period of 8 to 12 years.	Land rotation period of 15 to 20 years.

5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38

1  
2  
3  
  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

**Table 2.** Parameters of Forest Management Policies for the Calibration of the Optimal Control Model for the Chunkanan Community, Campeche, Mexico.

	Traditional Management	Forest Management Program (FMPETR)
	Value for periods K	Value for periods K**
Year 1	1	2.83
Year 2	1	2.06
Year 3	1	1.72
Year 4	1	1.28
Year 5	1	0.93

\*\*Theses values were obtained considering the annual average surface used in the traditional practice, 64.6 hectares for 2008.

Source: Authors` own calculations derived from the household survey of Chunkanan charcoal producers 2008 and the Forest Management Program for the Exploitation of Timber Resources (FMPETR), Conafor-Semarnat 2006.

1  
2  
3

**Table 3.** Parameters Used in the Model Calibration

PARAMETER	MEDIA	STANDARD DEVIATION	MIN	MAX
<b>Y (\$)</b> Average annual income	\$ 36,637.20	\$ 15,547.06	\$ 13,390.00	\$ 81,120.00
<b>CH (\$)</b> Charcoal income	\$ 12,124.00	\$ 8,852.79	\$ 1,296.00	\$ 46,656.00
<b>c(T-L) (\$)</b> Wage labor income	\$ 19,167.80	\$ 25,271.68	\$ -	\$ 153,270.00
<b>E (\$)</b> Other income	\$ 5,346.09	\$ 3,794.13	\$ -	\$ 14,104.00
<b>CH (kilos)</b> Amount of Charcoal produced	10,101.44	7,381.94	1,080.00	38,880.00
<b>L</b> (Total work hours/men annual)	994.00	469.22	264.00	2,256.00
<b>g</b> (Percentage of forest work dedicated to the cutting of trees)	0.32	0.07	0.18	0.45
<b>b</b> Average hours to cut a hectare	266.00	245.87	96.00	1,728.00
<b>L/a</b> Total hectare used in production	1.44	0.76	0.50	4.00
<b>Wo</b> Biomass of trees used in the production (Ton/Ha.)	11.42	7.05	1.79	44.64
<b>Q</b> % relative percentage of biomass using total household budget	4.500	0.884	0.310	6.100
<b>y</b> Intrinsic rate of natural increase of biomass	15.00	n/a	n/a	n/a
<b>P</b> Purchasing prices for the producer	1.20	n/a	n/a	n/a
<b>n/A</b> Population density (Home/Hectares)	0.0087	n/a	n/a	n/a
<b>K</b> Forest management parameter	1.00	n/a	n/a	n/a
<b>Ti</b> (Allocation of household total annual working hours)	1,749.00	n/a	n/a	n/a
<b>c</b> (Minimum wage)	47.60	n/a	n/a	n/a

4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14

1  
2

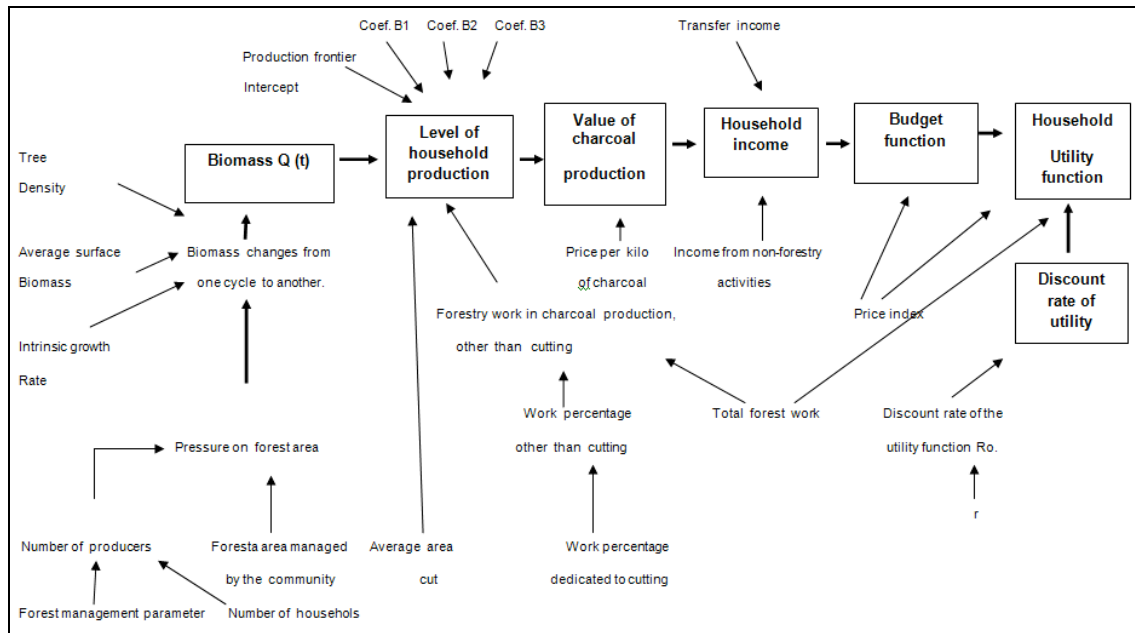
**Table 4.** Results of The Optimal Control Model for Biomass, Production and Household Income.

		<b>BIOMASS</b>				
		<b>PERCENTAGE</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	4.5	7.503	10.5	16.51	22.52	25.52
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	4.5	7.765	11.03	17.56	24.09	27.35
		<b>PRODUCTION</b>				
		<b>TONS</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	10.1	11.89	13.53	16.54	19.33	20.67
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	10.1	10.9	11.62	12.96	14.19	14.78
		<b>INCOME</b>				
		<b>MEXICAN PESOS (MX)</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	\$ 12,120.00	\$ 14,270.40	\$ 16,239.60	\$ 19,848.00	\$ 23,196.00	\$ 24,800.40
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	\$ 12,120.00	\$ 13,080.00	\$ 139,944.00	\$ 15,555.60	\$ 17,030.40	\$ 17,739.60

3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26

1  
2  
3

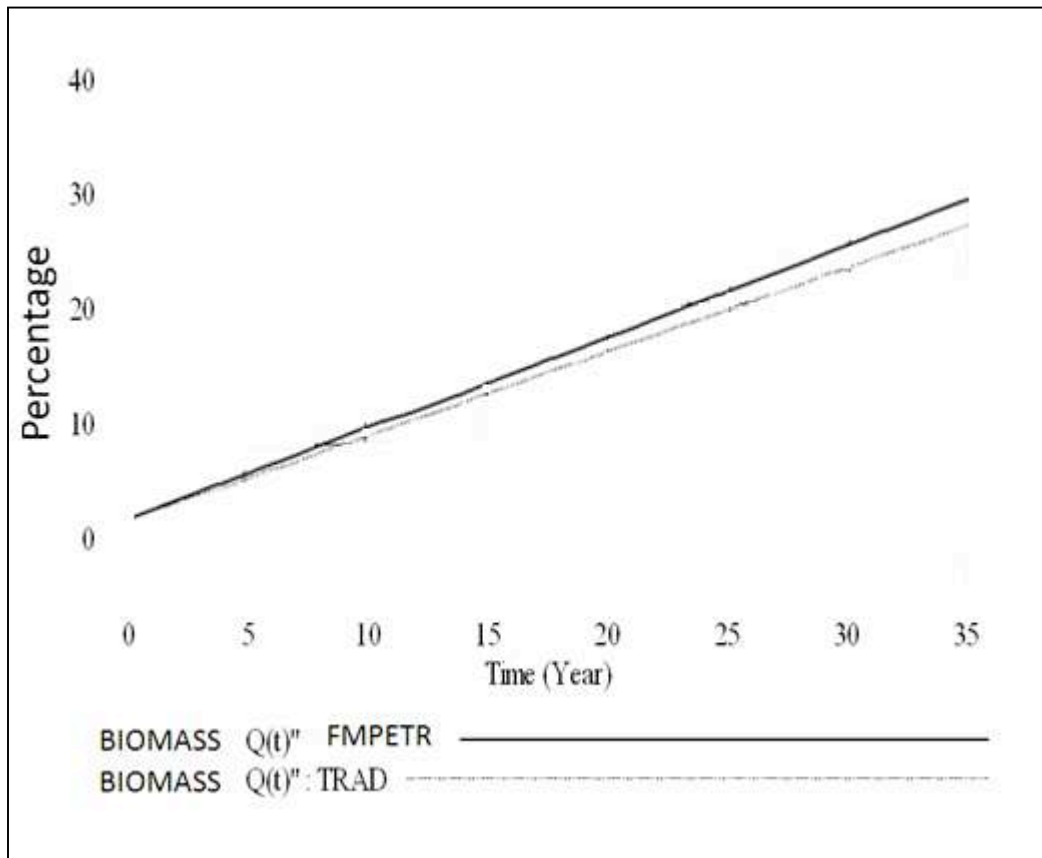
**Figure 1.** Flow Diagram Describing the Structure of the Optimal Control Model for Charcoal Production.



4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33

1  
2

Figure 2. Biomass.

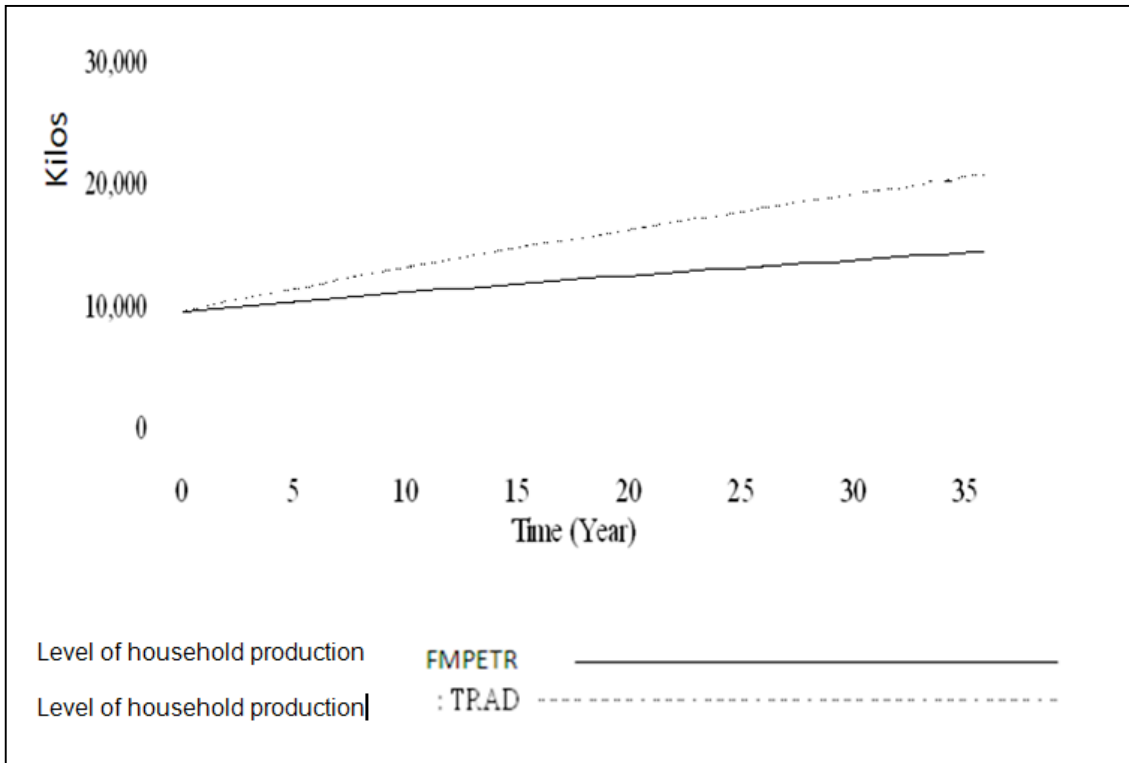


3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25



1  
2  
3  
4

**Figure 3.** Household Production.



5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27