

Simulación del funcionamiento y la dinámica del carbono de un pastizal *

Ana MARTELL GARCÍA**, Hermen FERRÁS ÁLVAREZ** y Avelino G. SUÁREZ RODRÍGUEZ**

ABSTRACT. A microcomputer model to simulate the functioning of tropical pasture ground was elaborated, based on modifications of tropical forest production models. As result of the modeling we obtained that the tropical pasture ground takes rapidly the optimal value of biomass (approximately 200 days), keeping after that around it. On the other hand, the augmentation of the CO₂ concentration produces the increase of the ecosystem's primary production and the growth of it's total biomass.

KEY WORDS. Carbon dynamics, dry-matter production, microcomputer model, pasture ground.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de pastizales y sabanas tropicales se caracterizan por presentar un ciclo metabólico muy intenso: La mortalidad diaria de los componentes de la planta es alrededor del 0.5% de la biomasa total (Oikawa, 1993). Esto determina otra diferencia entre este modelo y el de bosque. En este último la unidad de tiempo utilizada para el estudio de la dinámica de la biomasa es el año, en el caso del pastizal la unidad usada es el día.

El objetivo del presente trabajo es el establecimiento de un modelo dinámico de funcionamiento de un ecosistema de pastizal, basado en los procesos de producción de materia seca. Para ello se realizó la modificación del modelo propuesto por Ferrás *et al.* (1999) para bosques siempreverdes de Cuba (Sierra del Rosario).

Las propiedades dinámicas del ecosistema se reconstruyen usando modelos de producción basados en las características fisiológicas (fotosíntesis, respiración) de los individuos que lo forman. La modificación de algunas variables externas incluidas en el modelo nos posibilitará la predicción de su efecto sobre el ecosistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo simula las propiedades dinámicas de un pastizal y se basa en la Teoría de Dinámica de Sistemas de Forrester, modificada por Aracil (1986) y Martínez y Requena (1986).

Se utiliza como base el modelo conceptual propuesto por Shinozaki (1968). La biomasa viva está contenida en tres compartimentos: F, el follaje activo asimilador de CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis; U, la parte subterránea (raíces y rizomas); M, la biomasa muerta en el suelo. La biomasa animal y su actividad consumidora se consideran insignificantes en este modelo. Estos compartimentos se pueden asumir como un sistema cerrado en su conjunto.

La entrada del ecosistema es la fijación fotosintética del CO₂ atmosférico como producción primaria bruta P_g, que es la fuerza motriz del sistema. Se puede calcular el valor diario de P_g (ton/ha/día) usando la fórmula de Kuroiwa (1966), ya que las regiones tropicales tienen pequeñas variaciones en las condiciones ambientales como la luz y la temperatura:

$$P_g(A) = \frac{2Dp_{max}K}{K} \left[\ln \left(1 + \frac{K\beta I_{0,max}}{p_{max}} \right) - \ln \left(1 + \frac{K\beta I_{0,max} e^{-KA}}{p_{max}} \right) \right] \quad (1)$$

donde A es el índice de área foliar, D es la duración del día en horas, I_{0,max} es la intensidad de luz máxima (klux), p_{max} es la tasa de fotosíntesis saturada para la luz por unidad de área (mg CO₂/dm²/h), β es la pendiente inicial de la relación luz-fotosíntesis (mg CO₂/dm²/h/klux), K es el coeficiente de atenuación de la luz por el follaje, y κ es la constante de conversión de CO₂ asimilado por la fotosíntesis a materia seca sintetizada (κ=0.6). El valor de p_{max} aumenta en proporción a la concentración de CO₂ en el aire (C_a) de la forma:

$$p_{max} = (C_a/300) \cdot p_0 \quad (2)$$

donde p₀ es la tasa fotosintética de saturación para C_a=300 μl/l.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado se obtuvo un modelo para la simulación de la dinámica de la biomasa en un pastizal, cuyo esquema dinámico aparece en la Fig. 1.

A diferencia del modelo de bosque propuesto por Ferrás *et al.* (1999), éste está formado por tres compartimentos funcionales o variables de estado: el follaje o biomasa fotosintetizadora, las partes subterráneas y la necromasa del suelo.

*Manuscrito aprobado en septiembre de 1999.

**Instituto de Ecología y Sistemática, A.P. 8029, C.P. 10800, La Habana, Cuba.

En el presente trabajo no aparece la parte leñosa aérea presente en el modelo de bosque y se considera una parte subterránea compuesta no sólo de las raíces, sino de los tallos subterráneos (rizomas). Estos componentes están relacionados funcionalmente con los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición de la hojarasca. La producción neta de la vegetación P_n se calcula mediante la fórmula:

$$P_n(A) = P_g(A) - R_U(U) - R_F(F) \quad (3)$$

Los símbolos R representan los flujos de carbono por respiración desde los compartimentos F, U y M que se calculan por las fórmulas:

$$R_F(A) = 0.001 \cdot 24 \cdot \kappa \cdot r_A \cdot A \quad (4)$$

$$R_U(U) = 0.001 \cdot 24 \cdot \kappa \cdot r_U \cdot U \quad (5)$$

$$R_M(M) = 0.001 \cdot 24 \cdot \kappa \cdot r_M \cdot M \quad (6)$$

donde cada r representa las tasas de respiración por unidad de masa por hora para cada compartimento, r_A se representa en $\text{mg CO}_2/\text{dm}^2/\text{h}$ y el resto en $\text{mg CO}_2/\text{g}/\text{h}$. La multiplicación por 0.001 y 24 convierte estos valores a $\text{ton}/\text{ha}/\text{día}$. U y M son la biomasa subterránea y la necromasa, respectivamente. Otras variables significativas son la respiración total de la planta R_p y la respiración del suelo R_s que se definen como:

$$R_p = R_F(A) + R_U(U) \quad (7)$$

$$R_s = R_U(U) + R_M(M) \quad (8)$$

Los incrementos de nuevo follaje N_F y nuevas raíces N_U como resultado de la repartición de la producción primaria neta P_n se pueden expresar como:

$$N_F = \alpha_F \cdot P_n(A) \quad (9)$$

$$N_U = \alpha_U \cdot P_n(A) \quad (10)$$

donde α representa la proporción de materia orgánica que se distribuye en los diferentes compartimentos ($\alpha_F + \alpha_U = 1$). Asumiendo que el área foliar es proporcional a su peso, el incremento del índice de área foliar N_A se puede calcular mediante:

$$N_A = 0.01 \cdot \sigma \cdot N_F \quad (11)$$

donde σ representa el área foliar específica en cm^2/g .

El decremento del follaje L_F y de las raíces L_U debido a la caída (muerte) de parte de la biomasa se expresa como:

$$L_F = W_{Fn} \quad (12)$$

$$L_U = \lambda_U \cdot U \quad (13)$$

donde W_{Fn} representa la cantidad de hojas que funcionan durante "n" días, es decir que tienen una longevidad de "n" días y λ_U representa la mortalidad diaria de las partes subterráneas respectivamente. La suma de estas dos muertes es igual a la entrada del compartimento de suelo.

La dinámica del carbono del ecosistema se reprodujo exitosamente en este modelo. Para obtener dicha dinámica se ejecutó 1000 veces el ciclo (aproximadamente 3 años). Los parámetros utilizados en la simulación fueron tomados de Oikawa, 1993 y Bijele *et al.*, 1980 (Anexo I).

En la Fig. 2, se representa la variación de la fitomasa de cada compartimento y los flujos de carbono entre estos. El compartimento subterráneo se incrementa monótonamente con el tiempo y alcanzan un nivel de equilibrio después de 250 días. La biomasa foliar, en cambio, crece rápidamente hasta su máximo en 200 días, para después disminuir hasta un valor asintótico. Esta oscilación de la biomasa del follaje provoca a su vez la variación periódica de la iluminación relativa bajo el follaje y de los flujos de carbono como P_g , P_n y L_F .

No solo las tendencias cualitativas, sino los resultados cuantitativos se han reproducido con bastante fidelidad en la presente simulación. Como resultado de la simulación se obtuvieron los siguientes valores para los compartimentos funcionales (Tabla 1). Estos datos concuerdan con los obtenidos por otros autores. Por ejemplo, Oikawa (1993), presenta valores para la biomasa foliar de entre 5,8 y 7,6 ton/ha .

Se obtuvo la simulación de la dinámica de la biomasa viva total, para diferentes valores de concentración de CO_2 atmosférico (Fig. 3). Esta simulación se realizó con el objetivo de observar la influencia del aumento del CO_2 atmosférico en la fijación de Carbono por el ecosistema y en la biomasa del mismo. Un aumento al doble de la concentración lleva a un aumento de la biomasa total del ecosistema de 23,06 a 27,18 ton/ha . Un triple aumento de la concentración eleva el valor de la biomasa total a 29,01 ton/ha . Esto representa un aumento de 17.8 y 25.8%, respectivamente. Estos incrementos son menores que los obtenidos por Ferrás *et al.* (1999) y Oikawa (1985), para los ecosistemas de bosque.

Al comparar los resultados de este modelo con la dinámica de la producción primaria y la biomasa en un bosque tropical (Ferrás *et al.*, 1999, Oikawa, 1985, 1993), observamos una disminución significativa del tiempo en que se alcanzan los valores máximos, de 25 años para el caso de un bosque a 250 días para un pastizal.

Cuantitativamente, la simulación se corresponde con los resultados de otros autores, (Oikawa, 1993) aunque carecemos de datos de campo que corroboren la validez del mismo para Cuba.

CONCLUSIONES

◆ Este modelo simula cualitativamente con bastante fidelidad el comportamiento dinámico de las principales variables funcionales estudiadas.

- ◆ El aumento de la concentración de CO_2 en el aire, lleva a un incremento de la producción primaria y por consiguiente, de la biomasa total del ecosistema.
- ◆ La dinámica del crecimiento de la biomasa en un ecosistema de pastizal es más rápida que en los ecosistemas de bosque.

RECOMENDACIONES

El modelo realizado no tiene en cuenta la estacionalidad del clima, que constituye un factor importante en la dinámica de los ecosistemas tropicales con predominio de la vegetación herbácea (pastizales y sabanas). Una adaptación del modelo, que tenga en cuenta los factores climáticos, así como la influencia de herbívoros, contribuiría al perfeccionamiento del mismo.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto de Investigación nº XII.5. subvencionado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

REFERENCIAS

- Aracil, J. 1986. *Introducción a la dinámica de sistemas*. Alianza Editorial, Madrid. 354 pp.
- Bijele, Z. N., J. A. Moldau, y J. K. Ross. 1980. *Modelación matemática de la transpiración y la fotosíntesis de las plantas bajo estrés hídrico*. Guidrometeoizdat. Leningrado. 223 pp. [En ruso].
- Ferrás, H., F. López, F. Acosta, A. Martell, y A. G. Suárez. 1999. Simulación del funcionamiento de un bosque siempreverde y de la dinámica del carbono basado en un modelo de producción de materia seca. *Acta Botánica Cubana*, 137:1- 12.
- Kuroiwa, S. 1966. Dry matter production of plants. En: A series of Modern Biology Vol. 9, Ecology and Evolution. 71-100. Iwanami Shoten, Tokyo [citado por Oikawa, 1985].
- Martínez, S., y A. Requena. 1986. *Dinámica de sistemas. 2. Modelos*. Alianza Editorial, Madrid. 295 pp.
- Oikawa, T. 1985. Simulation of forest carbon dynamics based on a dry matter production model: I: Fundamental model structure of a tropical rainforest ecosystem. *Bot. Mag. Tokyo*. 98: 225- 238.
- 1993. Comparison of ecological characteristics between forest and grassland ecosystems based on a dry-matter production model. *J. Environ. Sci.* 7: 67-78
- Shinozaki, K. 1968. A model of matter cycling in a soil vegetation system. *JIBP- PT- F 41*: 85- 89. [En Oikawa, 1985].

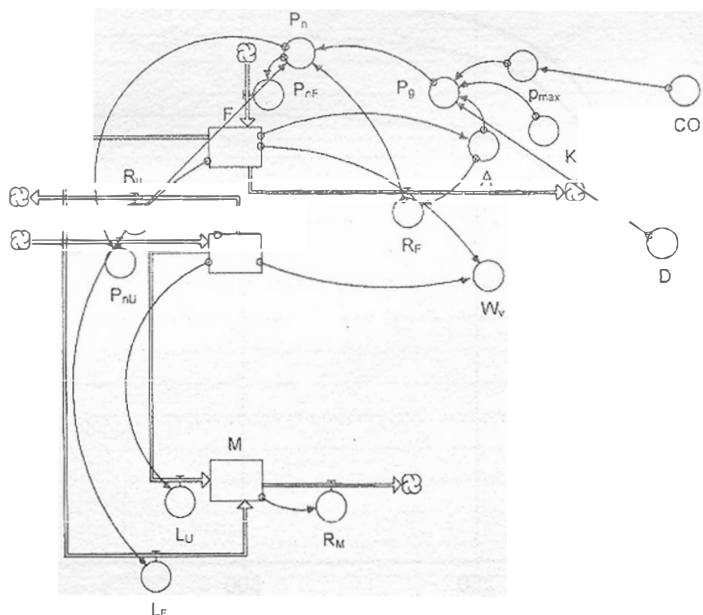


Fig. 1. Esquema dinámico del modelo utilizado. F- Biomasa fotosintetizadora, U- Biomasa subterránea, M- Necromasa, CO- Concentración de CO_2 en el aire, p_{\max} - Tasa de fotosíntesis de una hoja bajo saturación de luz, K- Coeficiente de atenuación de la luz, A- Índice de área foliar, D- Duración del día, P_g - Producción primaria bruta, P_n - Producción primaria neta, P_{nF} - Incremento del follaje, P_{nU} - Incremento de la biomasa subterránea. R_f - Respiración del follaje, R_U - Respiración de las partes subterráneas, R_M - Descomposición de la necromasa, L_f - Muerte de follaje, L_U - Muerte de raíces y rizomas, W_v - Biomasa viva total.

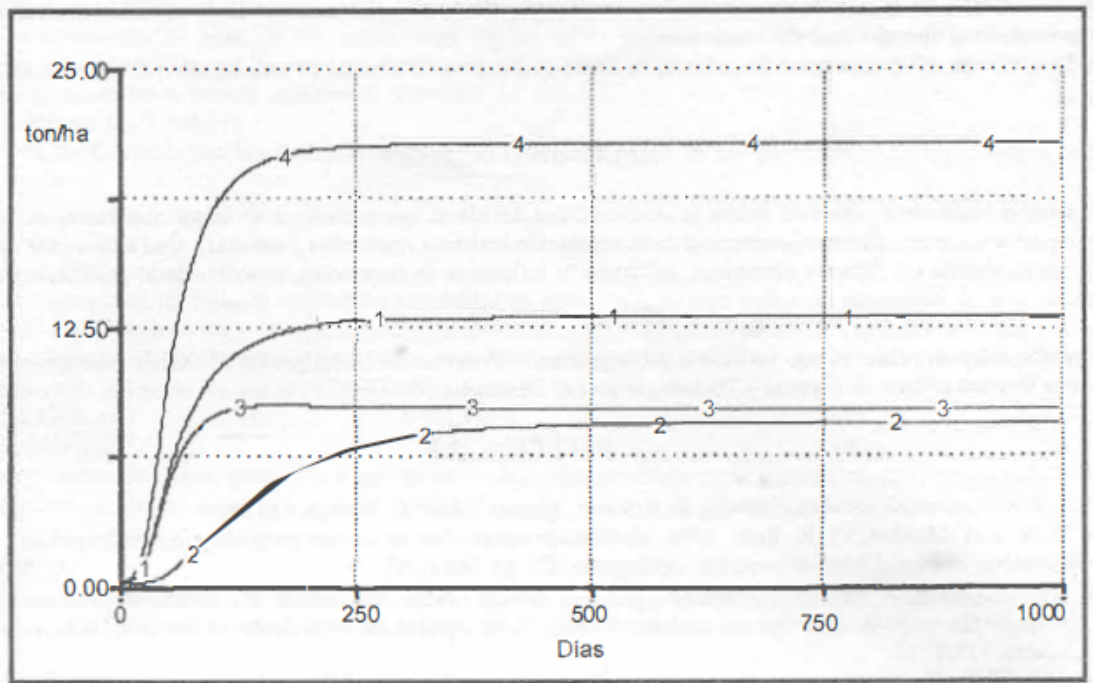


Fig. 2. Dinámica de los diferentes componentes de la biomasa del sistema. 1- Biomasa de partes subterráneas (U), 2- Necromasa (M), 3- Biomasa del follaje (F), 4- Biomasa viva total ($W_v = U + F$).

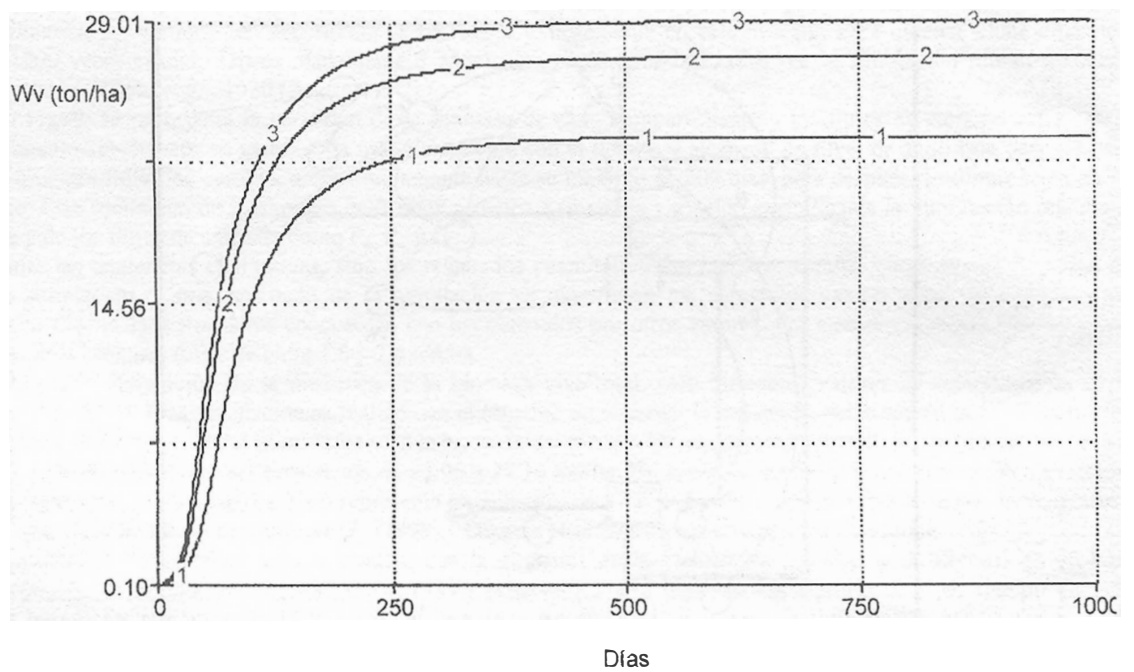


Fig. 3. Dinámica temporal de la biomasa viva total W_v para diferentes valores de concentración de CO_2 . Como se puede observar, al aumentar al doble la concentración se alcanza un incremento de la biomasa, producto de la actividad fotosintética. 1: $[CO_2] = 330 \mu l/l$, 2: $[CO_2] = 660 \mu l/l$, 3: $[CO_2] = 990 \mu l/l$.

Tabla 1. Resultados de la simulación obtenidos para el pastizal.

F (Biomasa foliar) (ton/ha)	M (Necromasa) (ton/ha)	U (Biomasa subterránea) (ton/ha)	Wv (Biomasa viva) (ton/ha)
6.72	6.11	10.22	16.95

Anexo 1. Valores de los parámetros utilizados en la simulación. σ - área foliar específica, α_F - porcentaje de la producción primaria para la biomasa foliar, α_U , r_A - tasa de respiración de una hoja, D- duración del día, p_0 - tasa de fotosíntesis de una hoja con luz saturada (para Ca= 300 microl/l), K- coeficiente de atenuación de la luz, β - pendiente inicial de la relación fotosíntesis/ luz, $I_{0,max}$ - intensidad máxima de luz sobre el follaje al mediodía.

σ (cm ² /g)	α_F	α_U	r_A (mgCO ₂ /dm ² /h)	D (h)	p_0 (mgCO ₂ /dm ² /h)	K	β	$I_{0,max}$ (klux)
167	0.5	0.5	2	12	100	0.8	0.6	100

Anexo 2. Lista de símbolos, su definición y unidades.

Símbolo	Definición	Unidad
$I_{0,max}$	Intensidad máxima de luz sobre el follaje al mediodía	klux
	Duración del día	h
C_2	Concentración de CO ₂ en el aire	microl/l
K	Coefficiente de atenuación de la luz	-
k	Factor de conversión de CO ₂ a carbohidrato	g peso/g CO ₂
p_{max}	Tasa de fotosíntesis de una hoja con luz saturada (para cualquier concentración de CO ₂)	mg CO ₂ /dm ² /h
p_0	Tasa de fotosíntesis de una hoja con luz saturada (para Ca= 300 microl/l)	mg CO ₂ /dm ² /h
β	Pendiente inicial de la relación fotosíntesis/ luz	mg CO ₂ /dm ² /h/klux
r_A	Tasa de respiración de una hoja	mg CO ₂ /dm ² /h
r_U	Tasa de respiración de las partes subterráneas	mgCO ₂ /dm ² /h
r_M	Tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo	mgCO ₂ /dm ² /h
λ_U	Mortalidad anual de las partes subterráneas	1/días
σ	Area foliar específica	cm ² /g
α_F	Porcentaje de la producción primaria para la biomasa foliar	%
α_U	Porcentaje de la producción primaria para las raíces	%
F	Fitomasa del follaje	ton/ha
W_{Fn}	Biomasa de las hojas que funcionan durante n días	ton/ha
U	Fitomasa subterránea	ton/ha
W_V	Biomasa viva total (F+U)	ton/ha
Λ	Índice de Área Foliar	ha/ha
P_g	Producción primaria bruta	ton/ha/día
P_n	Producción neta	ton/ha/día
P_{nF}	Incremento del follaje	ton/ha/día
P_{nU}	Incremento de la biomasa subterránea	ton/ha/día
N_F	Tasa de crecimiento del follaje	ton/ha/día
N_U	Tasa de crecimiento de las raíces	ton/ha/día
N_A	Tasa de crecimiento del Índice de Área Foliar	ha/ha/día
R_F	Flujo respiratorio del follaje	ton/ha/día
R_U	Flujo respiratorio de las raíces	ton/ha/día
R_M	Flujo de descomposición de la materia orgánica	ton/ha/día
R_P	Flujo respiratorio total de las plantas ($R_F + R_U$)	ton/ha/día
R_S	Flujo respiratorio del suelo ($R_U + R_M$)	ton/ha/día
L_F	Tasa de hojarasca foliar	ton/ha/día
L_U	Tasa de hojarasca de raíces	ton/ha/día
M	Necromasa	ton/ha