

DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA DE CARBONO EN SUELOS FORESTALES MEDIANTE UN MODELO DE RESERVORIOS

DESCRIPTION OF THE CARBON DYNAMICS IN FOREST SOILS USING A MODEL OF RESERVOIRS

Gustavo Orellana-Rivadeneira¹, María L. Sandoval-Solís², Gladys Linares-Fleites³, Norma E. García-Calderón⁴ y José V. Tamariz-Flores³

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, (1) Instituto de Ciencias, Posgrado en Ciencias Ambientales, (2) Facultad de Ciencias de la Computación, (3) Instituto de Ciencias, DICA, 14 Sur 6303, Ciudad Universitaria, Av. San Claudio y 14 sur, San Manuel, C.P. 72000 Puebla - México
(4) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Av. Universidad, Col. Fuentes del Pedregal, C.P. 01600 México, D.F. - México
(e-mail: tavoorellana@yahoo.com.mx)

Recibido: 28/12/2010 - Evaluado: 07/03/2011 - Aceptado: 05/05/2011

RESUMEN

Se propone una aproximación sobre variables medioambientales mediante funciones de distribución dependientes del tiempo para simplificar un modelo de la dinámica del carbono orgánico en el suelo. El modelo se basa en el concepto de reservorios, que supone que los diferentes estados de la materia orgánica del suelo constituyen masas homogéneas. Este modelo se enfoca en el intercambio de materia orgánica entre dichas masas, estableciendo relaciones de contacto. Usando el modelo simplificado se calculó la acumulación de materia orgánica en el suelo y la emisión de CO₂ desde un ecosistema de bosque de pino (*Pinus elliotii*) ubicado en Gainesville, Florida, EU. Se verificó la viabilidad de las aproximaciones en el modelo para estudiar la dinámica del carbono orgánico en suelos forestales. Se calculó la acumulación relativa de materia orgánica en el suelo. Con esto se obtuvo una estimación de la actividad del bosque de *P. elliotii* como secuestrador.

ABSTRACT

An approximation on environmental variables is proposed, by means of time-dependent distribution functions to simplify a model of the dynamics of soil organic carbon. The model is based on the concept of reservoirs, which means that the different states of soil organic matter are homogeneous mass. This model focuses on organic matter exchange between these bodies, and establishes contact relationships. Using the simplified model, we calculated the accumulation of soil organic matter and CO₂ emissions from soil in an ecosystem of pine forest (*Pinus elliotii*) in Gainesville, Florida, USA. We checked the feasibility of the approaches in the model to study the dynamics of organic carbon in forest soils. We calculated the relative accumulation of organic matter in soil. This gave to us an estimate of the activity of the forest of *P. elliotii* on carbon sequestration.

Palabras clave: secuestro de carbono; cambio climático; materia orgánica del suelo; silvicultura
Keywords: carbon sequestration; climate change; soil organic matter; forestry

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas que enfrenta la humanidad en la actualidad es el cambio climático. De acuerdo con los estudios realizados a partir de las iniciativas del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), hoy se sabe que el cambio climático ha sido acelerado por el actuar del hombre; y está afectando a la mayoría de los ecosistemas, además de la forma de vida, la salud y la economía en muchas regiones del planeta (IPCC, 2007). El problema es de gran complejidad debido a sus consecuencias sobre los aspectos concernientes al planeta, que incluyen a la humanidad. El cambio climático está determinado por muchos factores de orígenes diversos, naturales y antropogénicos. Por esta razón los métodos de estudio y los enfoques teóricos sobre el cambio climático también son complejos, pues involucran el actuar conjunto de muchos sectores sociales: científicos de todas las áreas, la comunidad médica, gobiernos y organizaciones políticas, empresarios y grupos productivos en todas las ramas, y pequeñas comunidades o comunidades indígenas (Martínez y Fernández 2004; OMS, 2003; PK, 1998).

El principal agente de cambio climático es el efecto invernadero ampliado producido por el aumento, en la atmósfera, de la cantidad de una serie de gases tales como CO₂, CH₄, NO_x y vapor de agua entre otros (Villalobos, 1999; SEMARNAT/PNUMA, 2006; Maser et al., 1995; De Jong, 1997). El más abundante, y que ha aumentado más rápidamente su presencia en la atmósfera debido a la actividad humana es el CO₂ (Acosta et al., 2001; PNUMA/ORPALC 2006).

Se piensa que en el corto plazo, las actividades relacionadas con el uso del suelo, el cambio de uso de la tierra, y las actividades agrícolas y forestales, pueden jugar un papel importante en la reducción del CO₂ atmosférico (FAO, 1999; Watson, 2001). Esto es porque bajo las condiciones adecuadas los bosques y suelos agrícolas pueden actuar como sumideros de CO₂ (FAO, 1999). La eficiencia de las actividades que se realicen con el objetivo de reducir el CO₂ atmosférico, relacionadas con el uso de la tierra, depende de nuestra capacidad para estimar las cantidades de carbono secuestradas por el suelo y la emisión de CO₂ hacia la atmósfera; lo que, a su vez, implica que la ejecución de cualquier actividad con mira a mantener un balance positivo de carbono (mayor absorción que emisión) requiere de la adquisición de la mayor cantidad de conocimiento posible sobre la dinámica del carbono.

Un poderoso método para analizar la dinámica de carbono y el balance de carbono en los ecosistemas es el desarrollo de modelos matemáticos y su aplicación a los datos obtenidos en campo. En particular, modelos que consideren la importancia del ciclo de descomposición de la materia orgánica (Schulze et al., 2000; Yadav y Malanson 2007).

La formulación de modelos se ha dirigido, básicamente, en dos direcciones diferentes. Un tipo de modelos considera una aproximación en la que se determina mayormente los pasos en el proceso de transformación de la materia orgánica del suelo (MOS) y la energía; estos son los modelos de proceso (Nakane, 2001). El segundo tipo de modelos se enfocan a cuantificar el movimiento del C mediante un conteo explícito de los agentes responsables de la descomposición de la MOS depositada (Yadav y Malanson, 2007).

Sin importar que tipo de modelos se estén considerando, todos son importantes por numerosas razones: primero, representan la mejor aproximación a un entendimiento científico de la dinámica en cuestión; segundo, nos permiten estudiar una amplia gama de ecosistemas diferentes; finalmente, nos permiten hacer proyecciones respecto de los cambios de manejo de la tierra y del clima (Elliott et al., 1996). Esto último, convierte a los modelos en el único método que nos permite hacer predicciones sobre la concentración de MOS, el secuestro de carbono por el suelo o la emisión de CO₂ a la atmósfera. Claro está que todos los modelos tienen limitaciones que es preciso entender antes de emplearlos para realizar una tarea específica.

En el presente trabajo se quiere mostrar que los factores medioambientales de mayor relevancia para la modelación de procesos, la predicción y para generalizar los análisis de la dinámica del carbono, son aquellos que caracterizan aspectos generales del clima, tales como temperatura media o precipitación anual, y no los particulares de una región o un tiempo determinados.

Se propone entonces, un conjunto de aproximaciones que simplifican el modelo de reservorios de Kaneyuki Nakane y su grupo, para la descripción de la dinámica de MOS (Nakane et al., 1987).

El modelo de reservorios supone que los diferentes estados de la MOS constituyen masas homogéneas. Este modelo se enfoca en el intercambio de materia orgánica entre dichas masas. El modelo propone relaciones de contacto bien definidas; esto es, la transformación de materia orgánica en humus y la transferencia de CO_2 a la atmósfera se deben, primero, a la acumulación de materia orgánica fresca en la superficie (primer reservorio) y la acumulación de detritos vegetales en el subsuelo (segundo reservorio); posteriormente, a la descomposición de la materia orgánica fresca y su flujo hacia un reservorio de humus (tercer reservorio), que constituye con el tiempo la reserva de carbono en suelo mineral.

Para construir el modelo matemático se parte de la estructura dinámica del ciclo de carbono. En lo que resta de esta sección introductoria, se describirá el ciclo de carbono y el esquema del modelo de reservorios asociado con la fracción del ciclo correspondiente a la MOS.

Ciclo de carbono

Considérese que el ciclo del carbono comienza con la fijación del dióxido de carbono atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el dióxido de carbono y el agua reaccionan para formar carbohidratos y simultáneamente liberar oxígeno, que pasa a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico, así formado, se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también liberan dióxido de carbono en sus procesos metabólicos. Las plantas y los animales muertos son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera. El proceso se esquematiza en la Figura 1.

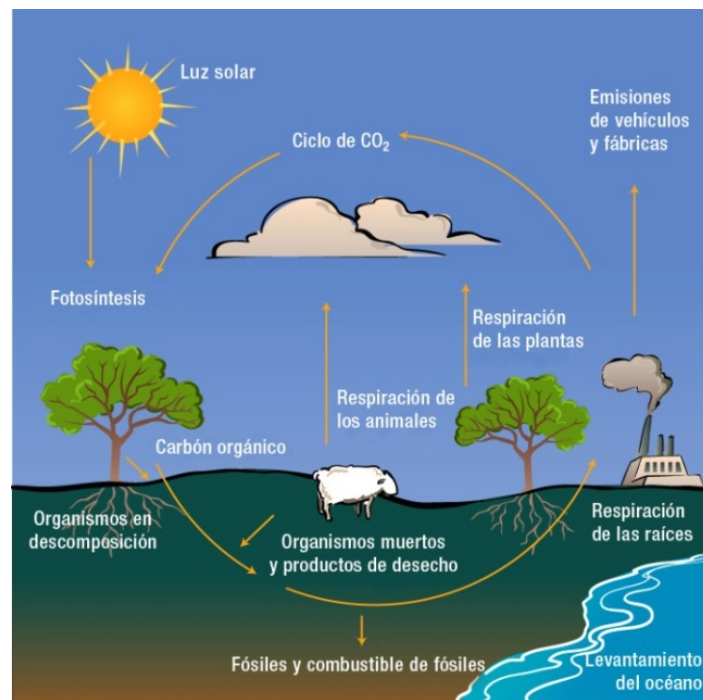


Fig. 1: Ciclo del carbono (fuente: windows2universe.org)

Modelo de reservorios

A partir de la descripción hecha para el ciclo de carbono (Figura 1) se puede construir un modelo de reservorios que represente la dinámica del carbono en el suelo. El esquema del modelo se muestra en la Figura 2. En el esquema (Figura 2) se incluye el aporte de materia orgánica fresca al suelo (L) constituido principalmente por la hojarasca que producen los árboles y demás vegetación caduca, pero que también contiene desechos animales y organismos muertos; al acumularse esta materia orgánica fresca en la superficie del suelo (M_0) forma el mantillo (primer reservorio). Cuando la materia orgánica del mantillo se descompone, parte de esta compone CO_2 y vuelve a la atmósfera, mientras otra parte es transformada en materia húmica (M); es a tal transformación a la que se considera una transferencia al "reservorio de humus" ($\kappa_A M_0$). Otro aporte de materia orgánica al reservorio de materia húmica proviene de la materia orgánica generada en el subsuelo (M_r). Esta se compone de detritos, en su mayor parte raíces finas muertas. El constante suministro de raíces finas muertas se debe al recambio de raíces, de manera que está directamente relacionada con la densidad y el tipo vegetal de la zona de interés. Igual que en el reservorio de M_0 , en los reservorios de M y M_r la materia orgánica está en continua transformación, por esa razón existe una emisión de CO_2 a la atmósfera que se suma a la respiración de las raíces para conjuntar la respiración total del suelo.

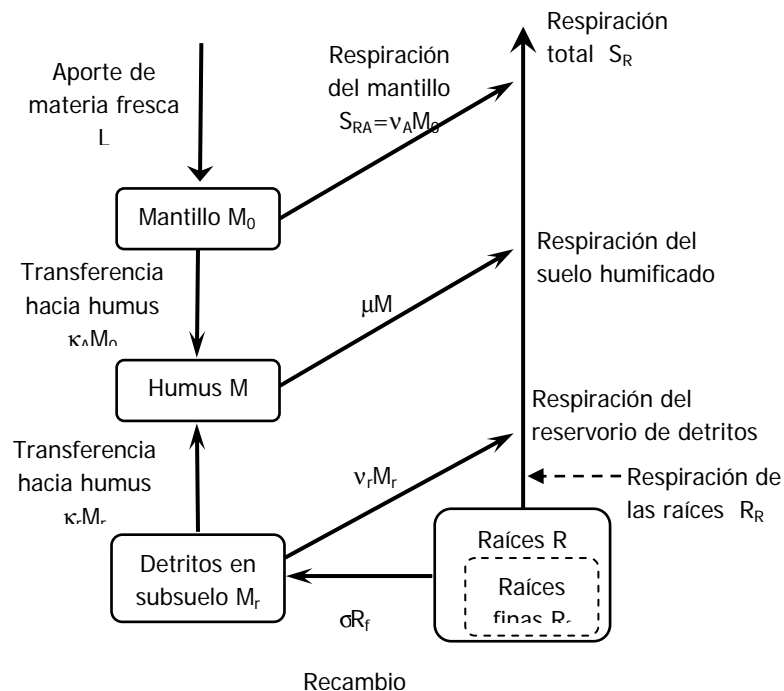


Fig. 2. Esquema del modelo de reservorios representativo de la dinámica del carbono en el suelo (Nakane et al., 1987).

Parte fundamental del objetivo que se persigue es examinar y discutir la efectividad del modelo de reservorios de Nakane, con las simplificaciones aquí propuestas, para describir la dinámica del carbono en suelos forestales; además de discutir su utilidad en la toma de decisiones en materia de uso de suelos forestales.

METODOLOGÍA

Se hace un análisis de la dinámica del carbono en el suelo mediante un modelo de reservorios. Específicamente, se emplea el modelo propuesto por Nakane et al. (1987). Aquí se plantea y resuelve el sistema de ecuaciones que permite describir el secuestro de carbono y la respiración del suelo (Nakane et al., 1987; Shuto y Nakane, 2007).

Representación matemática del modelo

A partir del modelo de reservorios (Figura 2) se puede construir un sistema de ecuaciones de flujo que describa la dinámica del carbono orgánico en el suelo, esto es, el cambio simultáneo en las cantidades de M_0 , M y M_r en razón del tiempo. Siguiendo la idea original de Kaneyuki Nakane, se considera que el flujo es lineal (Nakane et al., 1987; Shuto y Nakane, 2007).

Es preciso aclarar que las transformaciones biológicas no suelen ser procesos lineales; pero puede proponerse una reducción en la complejidad basada en la teoría clásica de perturbaciones no lineales (Tabor, 1989). Esta consiste en considerar al flujo como una serie de orden n sobre un parámetro escalar infinitesimal ε , que en una aproximación de primer orden sea lineal. Esto es, en general el sistema se representa por un flujo de la forma;

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = f(\mathbf{M}, \boldsymbol{\alpha}; t) \quad (1)$$

donde \mathbf{M} denota a una matriz cuyas entradas pueden ser combinaciones de la terna (M_0 , M , M_r), $\boldsymbol{\alpha}$ denota un vector formado por funciones dependientes del tiempo pero independientes de \mathbf{M} , y t denota al tiempo. Si \mathbf{M} se desarrolla en serie respecto de una potencia de un parámetro escalar ε considerando que ε es infinitesimal, el flujo para ε^0 (primera aproximación) será un sistema de ecuaciones lineales.

Para el sistema particular que aquí se estudia, el flujo en la aproximación lineal está dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dM_0}{dt} &= L - v_A \left(1 + \frac{1}{\delta_A}\right) M_0 \\ \frac{dM_r}{dt} &= \sigma R_f - v_r \left(1 + \frac{1}{\delta_r}\right) M_r \\ \frac{dM}{dt} &= \left(\frac{v_A}{\delta_A}\right) M_0 + \left(\frac{v_r}{\delta_r}\right) M_r - \mu M \end{aligned} \quad (2)$$

Los coeficientes v_A y v_r describen las tasas de descomposición de la materia orgánica del mantillo y de los detritos del subsuelo, respectivamente; σ describe la tasa de recambio de raíces. δ_A y δ_r ($\delta_A = v_A/\kappa_A$, $\delta_r = v_r/\kappa_r$) describen las razones de transporte de materia orgánica, es decir, la razón entre la tasa de descomposición y la tasa de transferencia (κ). δ_A corresponde al transporte del reservorio de M_0 a M , y δ_r al transporte del reservorio de M_r a M . Finalmente, μ simboliza la tasa de descomposición del humus.

Datos y relaciones funcionales

Como se mencionó en la introducción, aquí se analiza la viabilidad de un modelo de reservorios generalizado, en el que se introduce el efecto del medio ambiente como funciones de distribución. Estas funciones se discutirán más adelante.

Aquí se aplicó el modelo generalizado a la dinámica de carbono del suelo del ecosistema de bosque de pino (*Pinus elliotii*) de Gainesville, Florida, EU. Los datos empleados son de un bosque establecido a 29°44'N, 82°09'O. La temperatura media diaria se ubica en un rango que va de 12° a 29.9° C durante el año, con una media anual aproximada de 22° C. Las temperaturas más alta se reportan en el mes de Agosto y las más bajas en los meses de Enero y Febrero. La precipitación media anual es de 1342 mm, siendo la precipitación diaria cero o cercana a cero en los meses de Diciembre y Enero, y de hasta 72 mm en el mes de Julio. El suelo es arenoso y con poca cantidad de materia orgánica y nutrientes. La densidad arbórea del bosque estaba en un rango de 1100 a 1300 árboles ha⁻¹ en los 20 años de edad para el año de 1991 (Gholz et al., 1991).

Los coeficientes de las ecuaciones correspondientes a condiciones medioambientales, y las condiciones iniciales se obtuvieron de Gholz et al. (1991). Por esta razón, se usó en este trabajo datos de temperatura y precipitación reportados para la zona en ese año.

Las tasas de descomposición y las razones de transporte dependen implícitamente de las condiciones medioambientales (temperatura y precipitación). Esto es así porque son funciones de la temperatura y la humedad del suelo: $v_A(T_0, V_0)$, $v_r(T_0)$, $\mu(T_0, V_m)$; donde V_0 y T_0 son la humedad de M_0 y la temperatura del suelo respectivamente, y V_m es la humedad de M . Las funciones v_A , v_r , μ están dadas como (Nakane et al., 1987):

$$\begin{aligned} v_A &= e^{\lambda T_0} \left[1 - \left(1 - \frac{V_0}{V_0^*} \right)^2 \right] \\ v_r &= e^{\xi T_0} \\ \mu &= e^{\omega T_0} \left[1 - \left(1 - \frac{V_m}{V_m^*} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Otro factor importante es la biomasa del bosque, pues tiene impacto directo sobre la temperatura del suelo y la humedad. Esto es, $T_0 = T_0(T_a, Y_L)$, $V_0 = V_0(P, T_0, Y_L)$ y $V_m = V_m(P, T_0, Y_L)$, donde T_a es la temperatura atmosférica media mensual, P representa la precipitación pluvial media mensual y Y_L denota la biomasa aérea. Aquí se ha considerado que las funciones de T_0 , V_0 y V_m dependen linealmente de T_a , P y Y_L . Por su parte la biomasa aérea depende de la madurez del bosque. Y_L está dada como:

$$Y_L = \frac{Y_L^*}{(1 + \alpha e^{-\beta t})} \quad (4)$$

donde Y_L^* es la biomasa de un ecosistema que ha alcanzado su clímax. La biomasa de raíces finas también se considera una función lineal de Y_L .

Tal como Y_L tiene una dependencia temporal, debido a su relación con la dinámica del ecosistema, la temperatura atmosférica y la precipitación también dependen del tiempo, principalmente por los cambios estacionales.

Igual que con Y_L , aquí se plantean funciones de distribución que describan de manera aproximada T_a y P . En la siguiente subsección se ahondará sobre las razones de las aproximaciones.

Aproximaciones

Se ha considerado que T_a cambia a lo largo de un año de manera que su comportamiento se ajusta a una función de distribución poissoniana dependiente del tiempo, mientras que P se ajusta más adecuadamente a una función de distribución normal.

Esta manera de aproximar las características medioambientales elementales (temperatura y precipitación) que influyen en la dinámica de la materia orgánica en los suelos responde a varias necesidades:

- 1) Minimizar la necesidad de información medioambiental diaria; lo que permite extender las investigaciones más allá del ámbito local. El empleo de datos reales diarios permite hacer una evaluación local particularizada eficiente; pero tal evaluación no es generalizable, no puede extrapolarse fuera de la región de recolección de datos, ni en espacio ni en tiempo, y en la predicción, su empleo es solamente de referente para hacer conjeturas cualitativas.
- 2) Para extrapolar y generalizar una técnica de evaluación, así como para emplear el modelaje como método de predicción es preferible contar con mecanismos que requieran mayormente de valores estadísticos básicos y

de tendencia central, tal como valores extremos y cantidades estadística que nos lleven a la comprensión sobre las regularidades existentes en el comportamiento global del sistema.

- 3) Se desea disminuir la cantidad de recursos tecnológicos y computacionales. Tal reducción favorece el empleo de la técnica en una mayor diversidad de condiciones diferentes de estudio; lo que es deseable para la investigación realizada en países en desarrollo.

Como se mencionó en la introducción, se quiere mostrar que los factores medioambientales de mayor relevancia para generalizar los análisis de la dinámica del carbono, son aquellos que caracterizan aspectos globales del clima, tales como temperatura media o precipitación anual.

No debe minimizarse la importancia del empleo de información particularizada, pues su utilidad en la realización de mediciones de secuestro de carbono en sitios específicos y como sustento de los modelos estadísticos actuales es indiscutible (Ponce-Hernández, 2004; Phachomphon et al., 2010; Kurbatova et al., 2008). Para las dos tareas expuestas, los valores estadísticos básicos y de tendencia central son información insuficiente.

Al elegir la función de distribución que aproxima T_a se consideró el hecho de que la variación de temperatura ha seguido el mismo patrón anual durante las últimas décadas, tal, como se afirma en Gholz et al. (1991) y Nakane (1994). Esta información se verificó mediante una exploración de archivos históricos de *The Old Farmer's Almanac* y *Weather Underground* (almanac, <http://www.almanac.com/getweatherhistory/32601>; Wunderground <http://www.wunderground.com/US/FL/Gainesville.html>)

El patrón queda descrito por una función de distribución poissoniana;

$$T_a = \frac{A \exp(-\chi) \chi^t}{t!} \quad (5)$$

El coeficiente A y el parámetro χ de la función se eligieron de tal manera que su valor medio fuera 22° C, su valor máximo esté en el mes de Agosto y sea mínima, sin grandes cambios, entre los meses de Enero y Febrero (almanac, <http://www.almanac.com/getweatherhistory/32601>; Wunderground <http://www.wunderground.com/US/FL/Gainesville.html>)

Por su parte, la precipitación es una cantidad menos regular. Si bien, la precipitación anual ha mantenido la media de 1342 mm durante las últimas cuatro décadas, la precipitación diaria o mensual cambia visiblemente de un año a otro (Gholz et al., 1991; Nakane 1994 y archivos históricos de almanac, wunderground). Sin embargo, lo más frecuente es que la precipitación sea escasa o nula en Enero y Diciembre, ocasional en Abril y frecuente entre Junio y Agosto. Este tipo de comportamiento sugiere como un mejor ajuste una función de distribución normal;

$$P = B \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{\eta}\right] \quad (6)$$

En 1991 se registraron precipitaciones por día de hasta 33 mm en Julio; así que los coeficientes de la función de distribución se eligieron de forma que su integral fuera 1342 mm (precipitación media anual) y alcanzara su valor máximo en Julio (almanac, <http://www.almanac.com/getweatherhistory/32601>; Wunderground <http://www.wunderground.com/US/FL/Gainesville.html>)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Empleando el modelo con las aproximaciones hechas en este trabajo (Ecuaciones 4-6), se calculó la acumulación de carbono orgánico en el suelo y la emisión de CO₂ desde el suelo. Aquí se estudió también la acumulación relativa de materia orgánica en el suelo; esto es, la relación entre la acumulación en un año respecto al anterior. Esta última cantidad es de utilidad en la toma de decisiones para la explotación forestal.

Acumulación de carbono orgánico

Las gráficas en las Figuras 3a y 3c describen la acumulación de carbono orgánico para un bosque maduro de *P. elliotii* en el transcurso de un año, mes por mes (M_0 en la grafica de 3a y la cantidad total de carbono orgánico en la gráfica de 3c). La acumulación total de carbono orgánico incluye el carbono contenido en la biomasa de árboles y sus raíces, Y_m . El modelo predice que las mayores variaciones en la acumulación de carbono en el suelo se presentan en M_0 , que es el reservorio que recibe mayor suministro de materia orgánica fresca, el más expuesto al medioambiente y a la biota. En el reservorio de humus, la cantidad de carbono orgánico aumenta sólo 1 g m^{-2} a lo largo de un año; mientras que la cantidad de carbono orgánico en el reservorio de raíces muertas disminuye poco menos de 2 g m^{-2} en el mismo período. Tal situación se refleja en la cantidad total de carbono acumulado en el año. Su evolución es cualitativamente similar a la de M_0 .

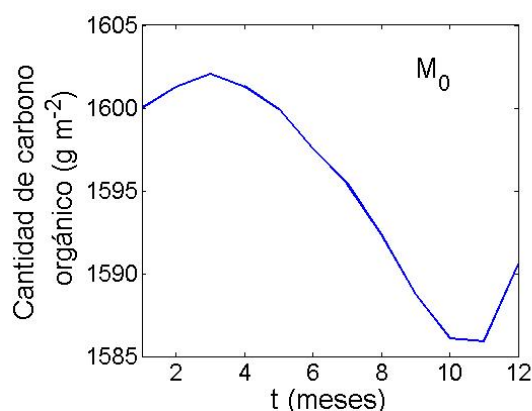


Fig. 3a: Variación anual en la cantidad de carbono en el mantillo.

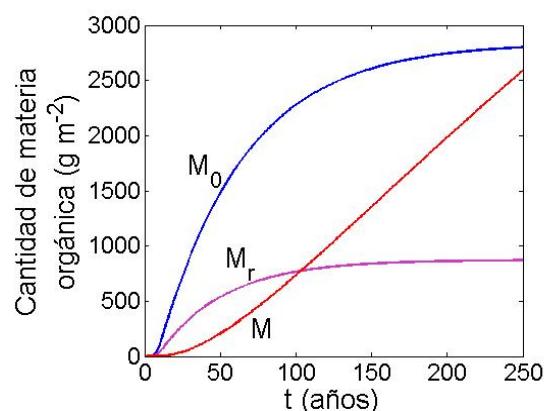


Fig. 3b: Acumulación de carbono en los tres reservorios en un periodo de 250 años.

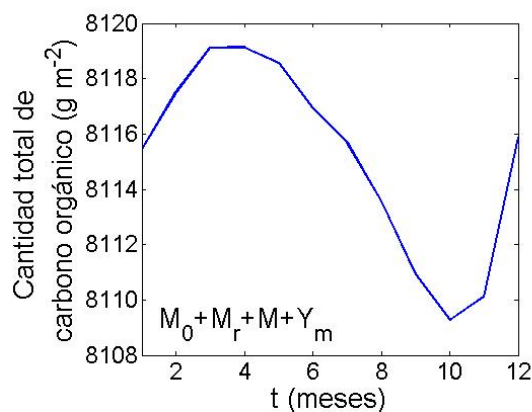


Fig. 3c: Variación anual en la cantidad de carbono total.

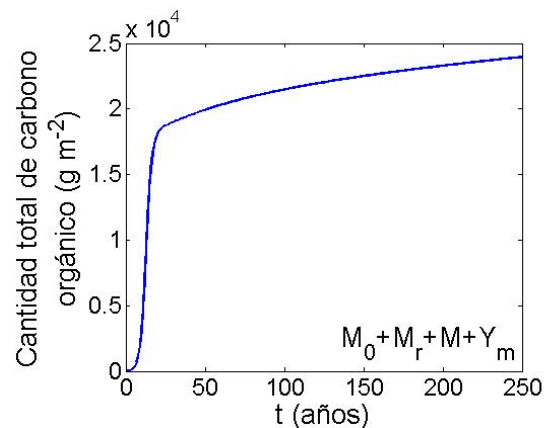


Fig. 3d: Acumulación total de carbono en un periodo de 250 años.

Las graficas en las Figuras 3b y 3d muestran la situación en que un bosque de *P. elliotii* crece sobre una zona inicialmente deforestada, esto es, sobre una zona que inicialmente no tiene biomasa arbórea. En tal caso, el modelo sugiere que la acumulación de carbono aumenta en los reservorios de M_0 , y de M_r (Figura 3b) acercándose a su valor máximo, asintóticamente, a partir de los 150 años. A partir del modelo se predice que en M_0 la cantidad de carbono alcanzaría la mitad de su valor máximo antes de los 50 años, pero la cantidad de

carbono en el reservorio de materia húmica, M, aún estaría en la etapa de crecimiento rápido al llegar a los 250 años. Este comportamiento es coherente con las tendencias evidenciadas en los trabajos de Ewel et al. (1987a; 1987b) y Gholz et al. (1985; 1986; 1991), y predichas con el modelo no aproximado basado en datos de monitoreo constantes de Nakane (1994). Como se puede deducir a partir de la gráfica en la Figura 3d, la principal contribución a la cantidad de carbono orgánico acumulada para el bosque correspondería a la biomasa de árboles, Y_m . La contribución de los reservorios de suelo a la cantidad de carbono orgánico acumulada, predicha para 250 años, será de $6 \times 10^3 \text{ g m}^{-2}$; mientras que la contribución de la biomasa arbórea será de $1.5 \times 10^4 \text{ g m}^{-2}$, esto es, un orden de magnitud mayor.

Emisión de dióxido de carbono

Existe una respiración del suelo como resultado de los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, además de los procesos metabólicos de la microbiota del suelo. La respiración es resultado de la descomposición de la MOS. En el proceso de descomposición, la MOS se separa en sus compuestos minerales liberando la mayor parte del carbono a la atmósfera en forma de CO_2 , tal como se evidencia en el análisis edafológico de Ticante-Roldán (2000). Se define entonces la respiración como la tasas de descomposición de la materia orgánica por la cantidad de MOS. En la Tabla 1 se muestra la definición de la respiración de cada reservorio.

Tabla 1: Respiración de los reservorios

Cantidad	Definición	Dimensiones
$S_{RA} = \nu_A M_0$	Respiración del mantillo	Masa de CO_2 por unidad de área por unidad de tiempo.
$S_{RD} = \nu_r M_r$	Respiración del reservorio de detritos del subsuelo	Masa de CO_2 por unidad de área por unidad de tiempo.
$S_{RH} = \mu M$	Respiración del reservorio de humus	Masa de CO_2 por unidad de área por unidad de tiempo.
$R_R = \gamma Y_m$	Respiración de las raíces*	Masa de CO_2 por unidad de área por unidad de tiempo.

* el coeficiente γ describe la tasa de crecimiento de raíces de la biomasa arbórea específica (*Pinus Elliottii*). Se obtiene a partir de datos de campo específicos (Ewel et al., 1987a, 1987b; Gholz et al., 1985, 1986, 1991)

Los cálculos sobre respiración del suelo, basados en el modelo, se muestran en las gráficas de las Figuras 4a y 4b. Estos indica que la respiración del suelo, calculada para un año (Figura. 4a) muestra un aumento considerable hacia finales de Agosto y en el mes de Septiembre, respecto de su valor en los meses de Enero y Febrero. El comportamiento cualitativo es similar tanto en la respiración total, S_R , como en la respiración de los reservorios. Nótese que el máximo en la emisión de CO_2 del suelo coincide con el mes más caluroso del año y es posterior al tiempo de mayor precipitación pluvial. El mínimo sucede a los meses más secos y frios (ver sección de aproximaciones).

En la gráfica de la Figura 4b se muestra la predicción del comportamiento de la respiración del bosque para el lapso de 250 años. Puede verse que la respiración, cualitativamente similar para todos los reservorios, aumenta rápidamente los primeros 15 años y después se aproxima asintóticamente a un valor máximo. Como se discutirá a continuación, los primeros 15 años en la vida de un bosque de *P. elliotii* tienen gran relevancia en su crecimiento.

Acumulación relativa

Finalmente se calculó la acumulación relativa de carbono orgánico en el bosque, esto es, la diferencia entre la acumulación de carbono en un año menos la acumulación de carbono del año anterior, en gramos por metro

cuadrado. En la gráfica de la Figura 5 se muestra el cálculo de acumulación relativa de carbono para un período de 250 años. Se puede ver en la gráfica (Figura 5) que la mayor acumulación relativa ocurre en los primeros 30 años. Después de este lapso la acumulación relativa tiende asintóticamente a cero. La acumulación es creciente durante los primeros quince años, pero decreciente entre los 15 y 30 años aproximadamente.

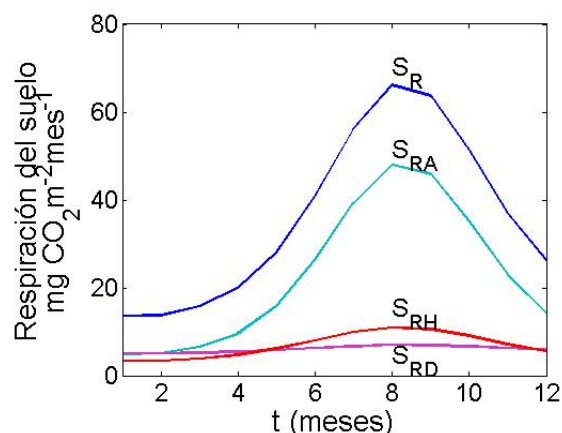


Fig. 4a: Variación en la respiración total del suelo y por reservorios, a lo largo de un año.

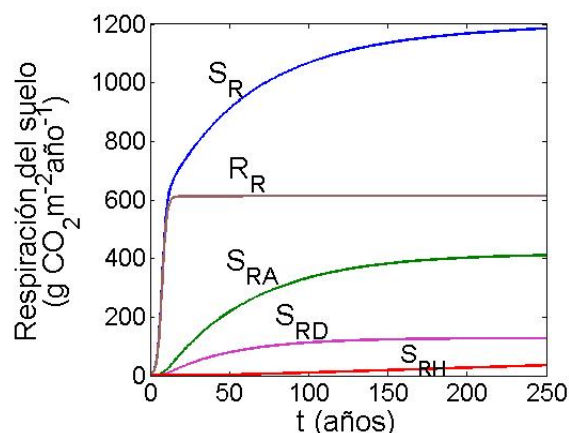


Fig. 4b: Emisión de CO₂ en el periodo de crecimiento del bosque.

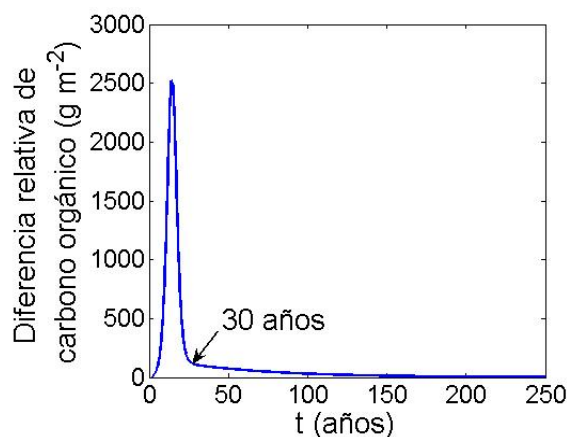


Fig. 5: Acumulación relativa de carbono orgánico en el bosque.

Comparando la acumulación de carbono y la respiración del suelo calculadas con el modelo, usando las aproximaciones aquí propuestas, con las obtenidas por Nakane (1994) a partir de datos de monitoreo constantes, se verificó que las cantidades y comportamientos que se muestran (Figuras 3a – 4b) son consistentes cualitativa y cuantitativamente. Las predicciones también son coherentes con las tendencias evidenciadas en los trabajos de Ewel et al. (1987a; 1987b) y Gholz et al. (1985; 1986; 1991). Esto indica que el modelo simplificado es viable para la descripción de la dinámica de la MOS.

En este estudio se calculó la acumulación relativa de carbono orgánico en el suelo y la biomasa del bosque de *Pinus elliotii*. Resultados como este pueden ser usados en la toma de decisiones sobre el manejo productivo sustentable de bosques de pino. El gráfico (Figura 5) nos muestra que es el bosque de menos de 30 años el que tiene una actividad importante en cuanto a retención de carbono, actividad creciente durante los primeros 15 años de vida del bosque; y que después de ese intervalo de tiempo de 30 años, la captura de carbono del suelo

se vuelve invariante de un año al siguiente. Entonces, si la reforestación tiene como objeto la producción de madera para venta y consumo, una de las consideraciones de sustentabilidad que se pueden tomar es permitir que el bosque sobrepase su tiempo de máxima actividad en el secuestro de carbono, antes de talarlo. En el caso del bosque de *Pinus elliottii* este tiempo es de al menos 15 años, e idealmente, de 30 años.

CONCLUSIONES

Aquí se ha presentado una propuesta de funciones de distribución dependiente del tiempo para aproximar variables medioambientales: temperatura y precipitación pluvial anuales, y la maduración de la biomasa (Ecuaciones 4-6). Con estas aproximaciones se simplifica el modelo de reservorios de Nakane et al. (1987), al reducir las necesidades de un monitoreo continuo del suelo para estimar la captura y emisión de carbono futuros.

El modelo simplificado es una herramienta que puede ser empleada para el análisis de la dinámica del carbono orgánico en el suelo. Su eficiencia dependerá de la elección de las funciones de distribución que describan la variación de la temperatura atmosférica, la precipitación y la maduración del bosque respecto del tiempo. Las funciones de distribución usadas en este estudio son aceptables para caso del cálculo de la acumulación de materia orgánica en el suelo y la emisión de CO₂ desde el ecosistema de bosque de pino (*P. elliottii*) ubicado en Gainesville, Florida, EU.

Esta propuesta de aproximaciones es un avance hacia hacer más eficiente y simple el modelo; también proyecta al modelo de reservorios que aquí se discute como una poderosa herramienta de predicción y análisis de la dinámica del carbono en el suelo, pues facilita su generalización y aplicación a otros ecosistemas forestales.

Con el cálculo de la acumulación relativa de materia orgánica en el suelo se obtuvo una estimación de la actividad del bosque de *P. elliottii* como secuestrador. Se encontró que la diferencia en acumulación de carbono de un año respecto del anterior es creciente durante los primeros 15 años de vida del bosque, decreciente los 15 años posteriores, y finalmente cero indicando que el bosque ha alcanzado su punto de equilibrio estable.

AGRADECIMIENTOS

Al posgrado en ciencias ambientales del ICUAP, BUAP, y al proyecto de investigación financiado por la VIEP-BUAP 124. G. Orellana-Rivadeneira agradece a M.A. Valera-Pérez y a J.A. Ticante-Roldán por sus comentarios y observaciones.

REFERENCIAS

1. Acosta, M.; Etchevers, J.D.; Monreal, C.; Quednow, K.; Hidalgo, C. (2001); Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
2. De Jong, B.H.J.; Tipper, R.; Taylor, J. (1997); *A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, México*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change: 2, 231-246.
3. Elliott, E.T.; Paustian, K.; Frey, S.D. (1996); Modeling the measurable or measuring the modelable: a hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.), Evaluation of Soil Organic Matter Models. NATO ASI Series. SpringerVerlag, pp. 161-179
4. Ewel, K.C.; Crooper, W.P. Jr.; Gholz, H.L. (1987a); *Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time*. Can. J. For. Res.: 17, 325-329.

5. Ewel, K.C.; Crooper, W.P. Jr.; Gholz, H.L. (1987b); *Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration*. Can. J. For. Res.: 17, 330-333.
6. FAO (1999); Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia (<http://www.fao.org/docrep/011/i0350s/i0350s00.htm>)
7. Gholz, H.L.; Perry, C.S.; Crooper, W.P. Jr.; Hendry, L.C. (1985). *Litterfall, Decomposition and N and P immobilization in a chronosequence of slash pine (Pinus eliottii) plantation*. For. Sci.: 31, 463-478.
8. Gholz, H.L.; Hendry, L.C.; Crooper, W.P. Jr. (1986); *Organic matter dynamics of fine roots in a plantation of slash pine (Pinus eliottii) in North Florida*. Can. J. For. Res.: 16, 529-538.
9. Gholz, H.L.; Vogel, S.A.; Crooper, W.P. Jr.; McKelvey, K.; Ewel, K.C.; Teskey, R.O.; Curran, P.J. (1991); *Dynamics of canopy structure and light interceptions in Pinus eliottii stands, North Florida*. Ecol. Monogr.: 61, 33-51.
10. IPCC, 2007 Cambio climático (2007); informe de síntesis. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf,ultimo. Último acceso en 6 de Abril de 2011.
11. Kurbatova, J.; Varlagin, C. Li.; Xiao, X.; Vygodskaya, N. (2008); *Modeling Carbon Dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia*. Biogeosciences Discuss.: 5, 271-296.
12. Martínez, J.; Fernández Bremauntz, A. (2004); Cambio Climático: una visión desde México, editado por el Instituto de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, ISBN 968-817-704-0.
13. Maser, R.O.; Bello, M.R.; Segura, G. (1995); *Forest management options for sequestering carbon in México*. Biomass and Bioenergy: 8(5), 357-367
14. Nakane, K; Tsubota, H.; Yamamoto, M. (1987); *Simulation of soil carbon cycling following clear cutting in a Japanese red pine forest*. Journal of Japanese Forest Society: 69, 417-426.
15. Nakane, K. (1994); *Modelling de soil carbon cycle of pine ecosystems*. Ecological Bulletins: 43, 161-172.
16. Nakane, K. (2001); *Quantitative evaluation of atmospheric CO₂ sink into forest soils from the tropics to the boreal zone during the past three decades*. Ecological Research: 16, 671-685.
17. OMS (2003); Cambio climático y salud humana: riesgos y respuestas: Resumen, ISBN 92 4 359081 2 (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/es/index.html>)
18. Phachomphon, K.; Dlamini, P.; Chaplot, V. (2010); *Estimating carbon stocks at a regional level using soil information and easily accessible auxiliary variables*. Geoderma: 155, 372-380.
19. PK (1998); Protocolo de Kyoto de la convención Marco de las naciones unidas sobre el Cambio climático (<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>)
20. PNUMA/ORPALC (2006); SEMARNAT, CITMA, Universidad de Sao Paulo, Brasil, Unidad de Cambio Climático, Ministerio de Salud y Medio Ambiente de Argentina, 2006 El Cambio Climático en América Latina y el Caribe.
21. Ponce-Hernández, Raul (2004); *Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes*, FAO Rome, Italy.

22. Schulze, E.D; Wirth, Ch.; Heimman, M. (2000); *Managing forest after Kyoto*. Science: 289(5487), 2058-2059.
23. SEMARNAT/PNUMA (2006); *El Cambio Climático en América Latina y el Caribe*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ISBN 968-817-677-X.
24. Shuto, K; Nakane, K (2007); *Model simulation of soil carbon dynamics with stand development in Japanese cedar (Cryptomeria japonica) plantations*. Ecol. Res.: 22, 515-526.
25. Tabor, M. (1989); *Chaos and Integrability in Nonlinear Dynamics: an introduction*. Publication by Wiley-Interscience.
26. Ticante-Roldán, J.A. (2000); *Investigaciones edafológicas sobre el estado de degradación de agrosistemas cafetaleros y otros agrosistemas en la Sierra Norte de Puebla*. Tesis de Maestría. UNAM, México D.F.
27. Villalobos, S.F. (1999); *Estimación del Costo Marginal de los Servicios de Fijación de Carbono en Costa Rica*, CEN 704. <http://www.incae.edu/es/clacds/publicaciones/pdf/cen704.pdf>. Última consulta 9 abril 2011.
28. Yadav, V.; Malanson, G. (2007); *Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modeling, monitoring and sequestration*. Progress in Physical Geography: 31(2), 131-154.
29. Watson, R.T. (2001); *The Carbon Cycle: Policy Nexus*, Bonn, Presentation by the Chair of the Intergovernmental Panel on Climate Change at the Conference of the Parties to the UNFCCC, 17 juillet.

