

Otro tipo de perfil frecuente es típico de las regiones sometidas a procesos de pediplanación, en la cual las inclusiones tienden a acumularse en los horizontes superiores. En el ejemplo (Figura 7B) se muestra un suelo Ferralítico Amarillento Lixiviado (*Acrisol Chromic-Ferric*), este comportamiento se ajusta a funciones sigmoideas.

Un caso común es el de los suelos eluviales desarrollados a partir de rocas degradables como las margas y otras calizas arcillosas; en ellos la pedregosidad se incrementa con la profundidad (Figura 7C), como se muestra en el ejemplo del suelo Húmico Calcimórfico (*Feozem Chernic*). La alta dispersión de valores comienza en el horizonte AC y depende mucho de las características físicas de la roca madre caliza. No obstante, esa dispersión afecta muy poco la exactitud del cálculo de las reservas de carbono, pues en esos horizontes el contenido de carbono orgánico es muy bajo.

Los suelos Pardos cálcicos (*Cambisol Calcic*) se desarrollan generalmente sobre rocas sedimentarias estratificadas, en las cuales hay estratos de desigual resistencia a la disolución e intemperización, por esa causa en ellos puede haber gravas y rocas desde la superficie.

En los suelos Ferralítico Rojo (*Cambisol Rhodic*), desarrollados sobre calizas cristalinas la situación es mejor, ya que el intemperismo de esa roca no produce gravas en grado considerable (Figura 7D).

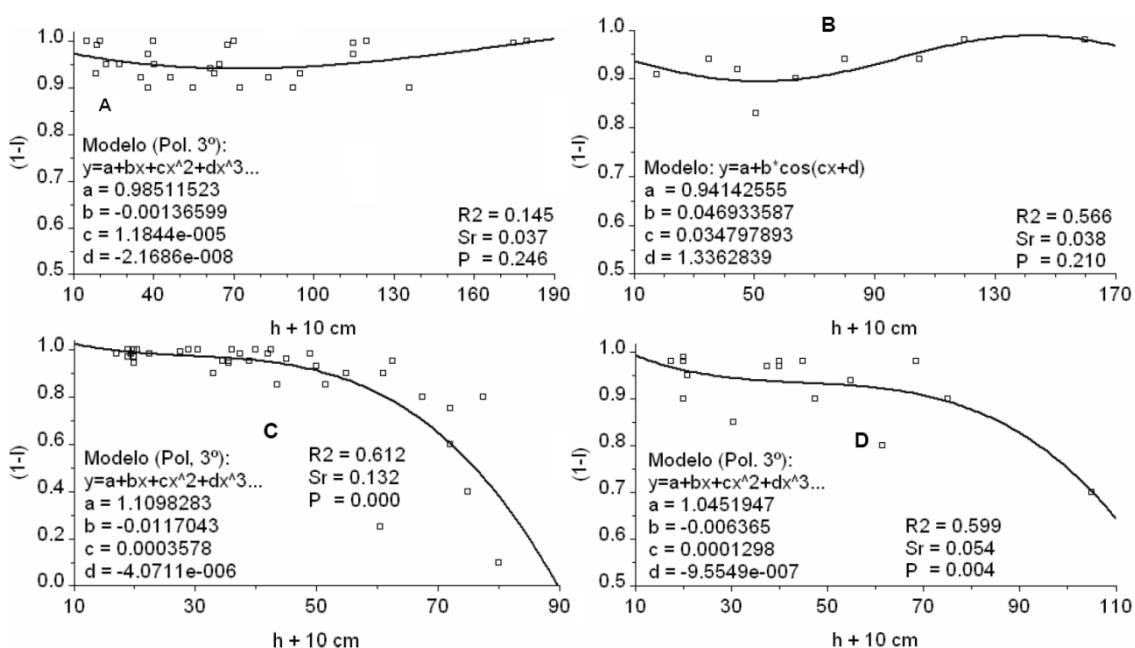


Figura 7. Relación  $(1-I)$  vs profundidad  $h$  en diferentes suelos; A - Ferralítico Rojo hidratado (*Ferralsol Rhodic-Endostagnic*), B - Ferralítico Amarillento lixiviado (*Acrisol Chromic-Ferric*), C - Húmico Calcimórfico (*Feozem Chernic*), D - Ferralítico Rojo (*Cambisol Rhodic*).

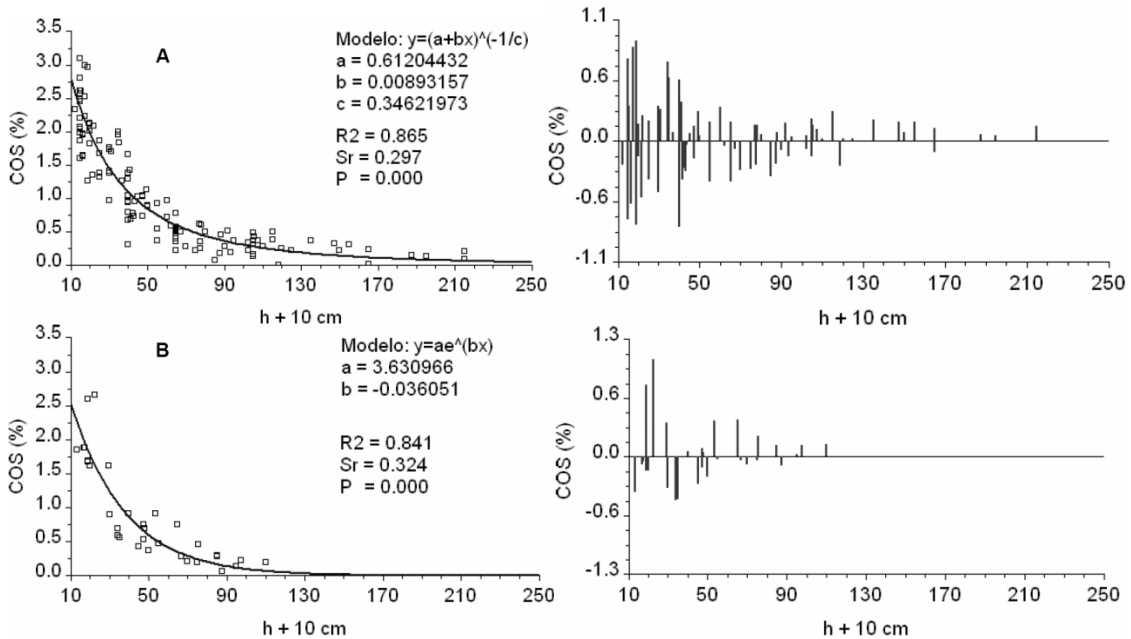
### Comportamiento de los residuos

La desigual disponibilidad de información y la relativa falta de homogeneidad en los espesores de los horizontes de suelos de un mismo tipo, condicionó una mayor dispersión y por ende bajos valores de  $R^2$  en algunos suelos, fundamentalmente en las variables de densidad  $D_s$  e inclusiones  $(1-I)$ , lo cual implica necesariamente un aumento de la incertidumbre en los valores estimados a partir de dichos modelos, no obstante ser significativa la regresión y no significativa la falta de ajuste, parámetros dependientes del número de observaciones.

El análisis de los residuos reportó en todos los casos la falta de homogeneidad de la varianza, debido a la diferenciación de los horizontes, resultado de los procesos de formación y el manejo, a partir de este hecho se caracterizan los errores para diferentes profundidades, según el tipo de suelo.

Suelos profundos sin inclusiones

Como ejemplo se presenta la curva del suelo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*) sobre caliza dura (Figura 8A). La ecuación de *Bleasdale* se ajusta adecuadamente a la nube de puntos. El análisis de los residuos reporta un valor medio de  $\pm 0.264$  ( $SeM = 0.003$ ).



**Figura 8. Residuos del ajuste de la función  $COS=c(h)$ ; A - suelo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*), B - Suelo con contacto lítico o paralítico (Pardo ócrico [*Cambisol Eutric*], con género sin carbonatos) sobre roca intermedia.**

Se puede apreciar que el error relativo inducido por la estimación del porcentaje del carbono en el horizonte superficial por el método propuesto, es similar al tradicional visto anteriormente, o sea alrededor del 10%, ya que ambos emplean directamente el dato del laboratorio y a que en los horizontes inferiores el error absoluto es poco importante.

Como se aprecia, a partir de  $50 + 10$  cm, los residuos son cercanos al valor de detección del método analítico empleado generalmente por los laboratorios de suelos. La mayor parte de la varianza pertenece a la capa superficial, esto puede ser explicado por la mayor participación de fracciones de humus lábil en los horizontes superficiales lo que se corrobora por la edad media del humus mucho más alta en los horizontes sub-superficiales (Guerasimov, 1972; Chichagova, 1985).

El problema está entonces en determinar el error de estimación en el horizonte subsuperficial, en el cual puede encontrarse del 30 al 40% del carbono acumulado en los suelos minerales. El contenido medio de carbono, de la capa 20-50 cm es 0.96%, o sea que el error relativo más probable que se cometería si se empleara el valor medio sería del 27%, pero al no usar este valor directamente, el error de la estimación de carbono en el horizonte sub-superficial no está lejano al error producto de los análisis de muestreo y laboratorio.

### Suelo erosionado con contacto lítico o paralítico

Para reafirmar lo planteado, se analizó la función correspondiente al suelo Pardo ócrico (*Cambisol Eutric*) sin carbonatos sobre roca intermedia (Figura 8B), suelo muy común en Cuba y que está generalmente erosionado, por ello se debe esperar falta de ajuste; sin embargo, se logra un buen ajuste exponencial del tipo  $y = ae^{bx}$ , con una desviación estándar residual ( $Sr$ ) igual a 0.324 y un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.841.

Debe tenerse en cuenta que estos suelos presentan contactos líticos o paralíticos con el horizonte C, por esta causa la función exponencial no podrá aplicarse en los suelos poco profundos. Para estos casos se ajustaron curvas diferentes para los suelos profundos y los casos de poco y medianamente profundos.

En el horizonte intermedio (20 - 35 cm) se encuentra alrededor del 20% de las reservas de carbono. El valor medio del residuo en esa capa es de  $\pm 0.241$  ( $SeM = 0.002$ ), para un error relativo del 40%, elevado, como era de esperar.

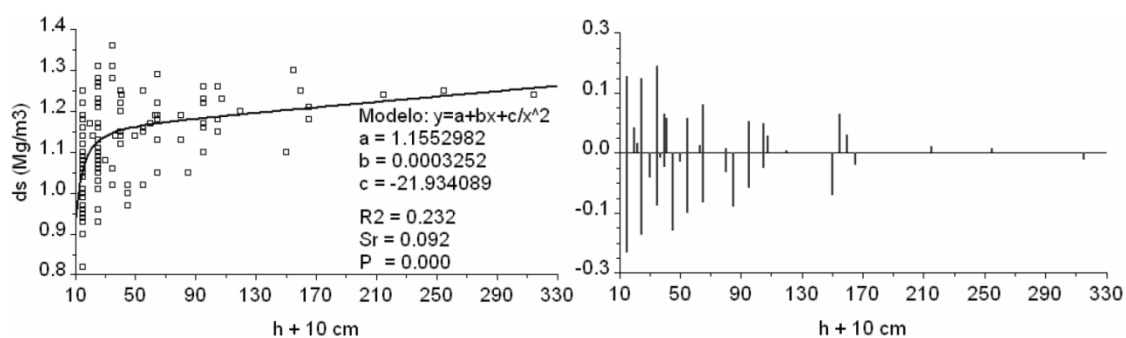
En un trabajo anterior, Ortega (1975) demostró la relación de esa variabilidad con la erosión en estos suelos. Aquí es especialmente efectivo el deslizar la curva por el eje de las abscisas para ajustar el valor superficial de carbono a la curva exponencial.

### Suelos compactados

En el análisis de los errores del método tradicional, se observó la alta variabilidad de la densidad en el suelo, como ejemplo se muestra en la Figura 9, la  $D_s$  por profundidad para el Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*) sobre caliza dura, que es sin dudas el suelo más estudiado de Cuba.

Esa variabilidad es especialmente alta en este suelo sobre explotado, compactado por la maquinaria agrícola, fertilizado de manera desmedida años atrás, laborado tan intensamente que inclusive están transformándose en suelos del subtipo compactado, que podrían fácilmente clasificarse como Nitosoles, según FAO (1988), debido al desarrollo de propiedades níticas.

Sin embargo, esa variación no introduce errores demasiado graves, puede apreciarse que en los residuos de la curva  $D_s = d(h)$ , aún para los puntos más alejados de la función, no alcanza el valor de  $0.25 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , el valor medio de los residuos está cercano a  $0.1 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , o sea el error medio inducido es alrededor del 8%, semejante, o inclusive inferior, al error de su determinación en campo.

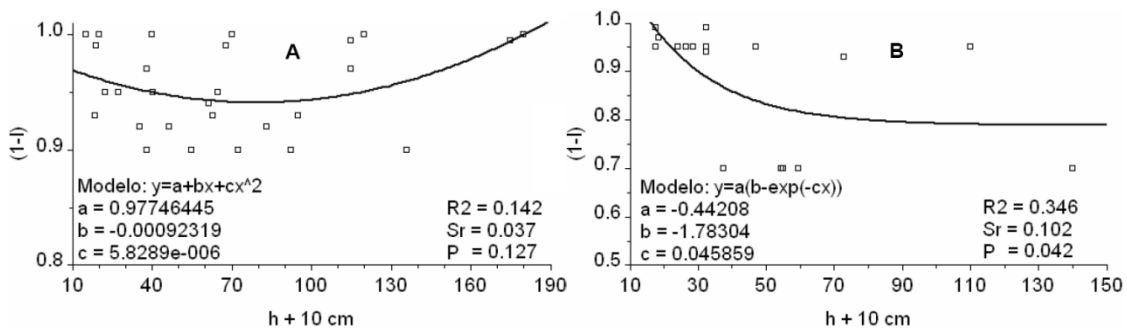


**Figura 9. Residuos de la función  $D_s = d(h)$ , ajustada a un suelo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*) afectado por compactación.**

En las fuentes analizadas se encontraron valores que fluctúan entre  $0.85$  y  $1.35 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el horizonte superficial. El error que se comete al asumir valores a partir del criterio de experto, sobre la base de la información analítica existente no suele ser exagerado, en relación con el error que introduce la propia determinación.

En un suelo como el Ferralítico Rojo hidratado (*Ferralsol Rhodic-Endostagnic*) se forma gran cantidad de concreciones (alrededor del 10%), preferentemente en la parte media del perfil (Figura 10A). Los valores deducidos sobre la base de las descripciones de campo están cargados de subjetivismo, a lo cual se ha de añadir la variabilidad de los perfiles, que difieren entre ellos por la profundidad y potencia del horizonte altamente concrecionario. Por esas causas, la función cuadrática  $(1-I) = a+bx+cx^2$  presenta un mal ajuste, el coeficiente  $R^2$  es el más bajo obtenido con un valor de 0.142, y que puede ser considerado significativo solo para un 85% de probabilidad, pero con una falta de ajuste no significativa ( $F = 1.524$ ,  $P = 0.413$ ). A pesar de ello, el valor de los residuos no supera a 0.8, y como el valor medio de  $(1-I)$  es aproximadamente igual a 0.95, se tiene un error relativo bastante bajo, con porcentajes entre el 6% y el 9%.

En los suelos con mayores contenidos de inclusiones como los pedregosos la situación es menos favorable. Por ejemplo, el suelo Pardo Grisáceo (*Cambisol Quartzic-Humic*; Figura 10B) puede presentar valores en los residuos de 0.15 para alcanzar errores relativos cercanos al 20%, lo que no es grave en este caso, ya que en la mayor parte de los suelos pedregosos, la acumulación de gravas aumenta hacia la base del perfil, donde la cantidad de materia orgánica es más baja. Por otra parte, se puede apreciar que en los primeros 20 cm, la variabilidad está muy limitada, y los errores se reducen a valores relativos menores del 1%.



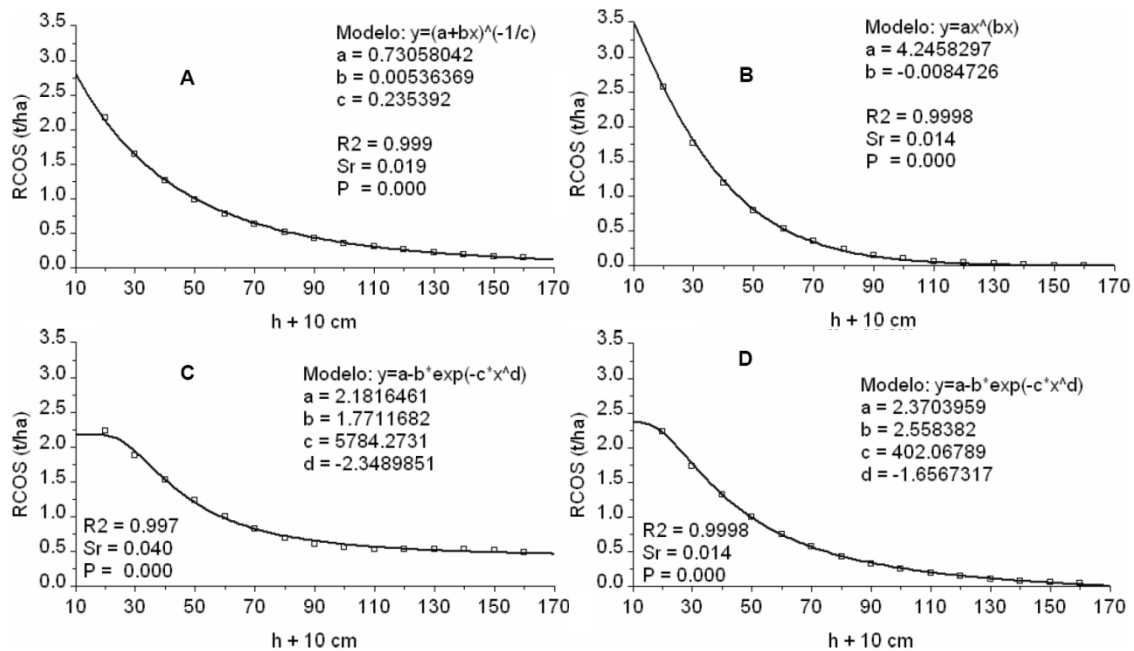
**Figura 10. Ejemplos de ajuste de la función  $(1-I) = f(h)$ , en suelos con inclusiones; A - Ferralítico Rojo hidratado (*Ferralsol Rhodic-Endostagnic*), B - Pardo Grisáceo (*Cambisol Quartzic-Humic*) sobre rocas ácidas.**

Cuando la capa rica en inclusiones está en los horizontes intermedios, como en los suelos con concreciones consolidadas (*plintitas*) y suelos con líneas de piedra (*stone line*). El error relativo del horizonte pedregoso puede llegar al 200%, esta fuente de error se precisa más adelante.

#### Ajuste de funciones teóricas

Las curvas teóricas, al ser construidas con los resultados del cálculo de la multiplicación de los valores generados en la evaluación de las funciones de distribución vertical, presentan coeficientes de determinación muy cercanos a uno. En la Figura 11 se exponen curvas de suelos representativos.

Las curvas representan el contenido medio de reserva de carbono para el suelo en cuestión y el cálculo del área bajo la curva proporciona la reserva de ese suelo para el espesor de un perfil específico, corregido en función del desplazamiento que hubiese tenido en la curva de distribución vertical del carbono, según el procedimiento explicado.



**Figura 11. Ejemplos de curvas patrones de RCOS de suelos representativos. A - suelo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*); B - suelo con contacto lítico o paralítico, Pardo ócrico (*Cambisol Eutric*) con género sin carbonatos; C - Vertisol Pélico típico (*Vertisol Pelic*); D - suelo con inclusiones, Ferralítico Rojo hidratado (*Ferralsol Rhodic-Endostagnic*).**

### Validación del Procedimiento

Las posibles fuentes de error de la utilización de modelos de distribución vertical del carbono y demás variables implicadas en el cálculo de la RCOS en un perfil, pueden resumirse en:

- error propio de la determinación de la materia orgánica;
- la posible diferencia en la distribución vertical del carbono, entre la real (desconocida) y la teórica;
- la posible diferencia de la densidad del suelo real y la media, cuando se utilizan estos valores;
- el contenido de inclusiones.

La validación del procedimiento a partir de la base de datos conformada al efecto por perfiles completamente caracterizados (53 perfiles de la provincia de La Habana), que permite el cálculo de la RCOS por el método tradicional (RCC) y la RCOS estimada por el procedimiento propuesto (RCE) para el primer horizonte de los perfiles, se presenta en la Tabla 3.

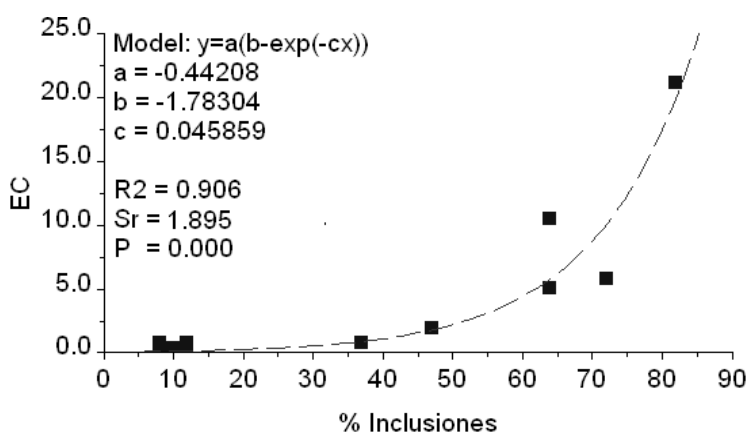
De los resultados que se muestran, se puede concluir que la extrapolación del valor del contenido de carbono para el cálculo de las reservas de carbono del perfil completo, sobre la base de funciones de distribución vertical, genera errores comparables por su magnitud a cuando se realiza el cálculo tradicional, haciéndolo posible a partir de la información escasa e incompleta de perfiles de suelo. El análisis de los suelos de manera global, reporta que el *ErRel* del método está cercano al 20%, con un *REMC* de  $0.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ .

**Tabla 3. Validación del procedimiento de determinación de la  $RCOS$  ( $kg \cdot m^{-2}$ ) en el primer horizonte de perfiles de suelos de la provincia La Habana.**

$I$ (%)	n	$S^2$	Med		$EM$	$ECM$	$RECM$	%Pob.
			RCC	RCE				
<b>Validación Global</b>								
<b>Todos</b>	47	1.62	3.62	3.89	0.16	0.48	0.70	90.4
<b>Estratificación por contenido de Inclusiones</b>								
<5	38	0.98	3.73	4.08	0.12	0.50	0.71	73.1
5-45	9	1.23	3.17	3.69	0.29	0.41	0.64	17.3
>45	5	0.09	1.13	4.85	2.78	8.91	2.99	9.6

$RCC$  –  $RCOS$  calculada;  $RCE$  –  $RCOS$  estimada;  $EM$  – error medio;  $ECM$  – error cuadrático medio;  $RECM$  – raíz del error cuadrático medio; %Pob. – porcentaje de la población.

Sin embargo, el error cuadrático producto de las diferencias entre el valor estimado y el tomado como real puede crecer de manera exponencial cuando el contenido de inclusiones sobrepasa el 30% (Figura 12); pero dado que a mayor contenido de inclusiones el contenido de carbono es menor, el error absoluto será de solo 1 ó 2  $kg \cdot m^{-2}$ , lo cual unido a la poca extensión que ocupan, no afectará significativamente el cálculo de las reservas en los suelos de un territorio.



**Figura 12. Aumento exponencial del error cuadrático ( $EC$ ) entre la  $RCOS$  ( $kg \cdot m^{-2}$ ) estimada y la  $RCOS$  calculada, para contenidos de inclusiones mayores de 5%.**

### ***La profundidad de los suelos***

La profundidad de los suelos es un factor importante en los trópicos y es a su vez determinante en la cuantía de la reserva de carbono. Kauffman *et al.* (1995), establecieron que de forma contraria a la “...expectación general...” el análisis de 176 perfiles de referencia de los principales suelos de los trópicos húmedos de todo el

mundo, reportó que el carbono se acumula en el subsuelo de dichos suelos, a pesar de los colores claros que presentaban (Hue 5 a 10YR y Value/Chroma 4/5 a 6/8) indicativos de un contenido de materia orgánica mucho más bajo que en suelos extra tropicales. Se destaca además, la importancia de dicha acumulación en la disponibilidad de agua para las plantas y la retención de nutrientes.

Sin embargo, Detweler (1986) considera que no hay efecto sobre el carbono por debajo de 60 cm en ningún Tipo de Utilización de la Tierra (TUT) y Kimble *et al.* (1990) toman como carbono activo hasta los 50 cm de profundidad, a partir de un estudio en el que compararon los valores medios de reservas calculadas para 30, 50 y 100 cm, en diferentes suelos del mundo.

A pesar de ello, la comisión de carbono terrestre del INQUA estima que los valores reportados de reserva de carbono del suelo y turberas por Eswaran *et al.* (1993) en los primeros 100 cm de profundidad, claramente subestiman el volumen del reservorio de suelos minerales y turberas (Histosoles).

Los valores de Reserva de Carbono calculados hasta las profundidades de 50 cm (*RCOS\_50*), 100 cm (*RCOS\_100*) y hasta la profundidad en que aparece el horizonte C (*RCOS\_C*), difieren significativamente de acuerdo a una prueba de Friedman para *k* muestras relacionadas (Tabla 4), lo que indica que no se puede menospreciar el aporte de los horizontes inferiores a la cuantía total de la reserva calculada. Estos resultados coinciden con los reportados por Moreno y Lara (2003) en ecosistemas forestales tropicales de Colombia.

**Tabla 4. Resultados de la prueba de Friedman para los valores de reserva de carbono (*RCOS*) calculados para diferentes rangos de profundidades.**

<i>RCOS</i>	Prof. (cm)	Rango medio (kg·m <sup>-2</sup> )			Prueba	
					N	681
<i>RCOS_50</i>	0 - 50	1.01			Chi-Cuadrada	1299.204
<i>RCOS_100</i>	0 - 100	2.04			<i>g.l.</i>	2
<i>RCOS_C</i>	0 - C	2.94			<i>Sig.</i>	0.000

#### **El contenido de Carbono y Reserva de Carbono en perfiles de suelos de Cuba**

La media global de carbono para el horizonte superficial de 1622 perfiles de Cuba (Tabla 5, Figura 13) es menor de dos (2.00%), con un valor modal de uno (1.00%), estos valores pueden considerarse medios, según los criterios del ISRIC (*International Soil Reference and Information Centre*) para la evaluación de características de los perfiles de referencia de suelos dominantes en el trópico húmedo (Brunt y Kauffman, 1995).

**Tabla 5. Estadígrafos de posición y dispersión calculados para el contenido y reserva de carbono en perfiles de suelos de Cuba.**

		<i>COS</i> (%)	<i>RCOS_50</i> (kg·m <sup>-2</sup> )	<i>RCOS_100</i> (kg·m <sup>-2</sup> )	<i>RCOS_C</i> (kg·m <sup>-2</sup> )
<b>Criterios de exclusión</b>		>5	>20	>22	>22
<b>N</b>	Válidos	1622	1226	686	1612
	Excluidos	25	6	3	13
<b>Media</b>		1.88	7.52	9.23	8.73
<b>Error Estándar</b>		2.28E-02	9.66E-02	0.157	0.106
<b>Moda</b>		1.00	3.94 <sup>a</sup>	8.84	5.00
<b>Desv. Estándar</b>		0.9190	3.3846	4.1035	4.2733
<b>Mínimo</b>		0.10	0.32	0.40	0.27
<b>Máximo</b>		4.99	19.21	21.71	21.93
<b>P</b>		0.000	0.007	0.323	0.000

Del análisis de las frecuencias (Figura 13; Tabla 6) se deduce que la mayor parte de los perfiles contienen entre 1.00% – 2.00% de *COS* en el primer horizonte, con un predominio de los valores medios y altos. Este comportamiento no se refleja en los valores de las reservas (Tabla 7). En efecto, predominan valores de *RCOS* considerados bajos, donde la mayor frecuencia de valores no superan los 10 kg·m<sup>-2</sup> (100 Mg·ha), incluso en la población de perfiles con profundidades mayores de un metro (Tabla 7, *RCOS\_100*), de acuerdo a las categorías expuestas, cercanas a aquellas propuestas por Grishina y Orlov (1978) para 100 cm de profundidad.



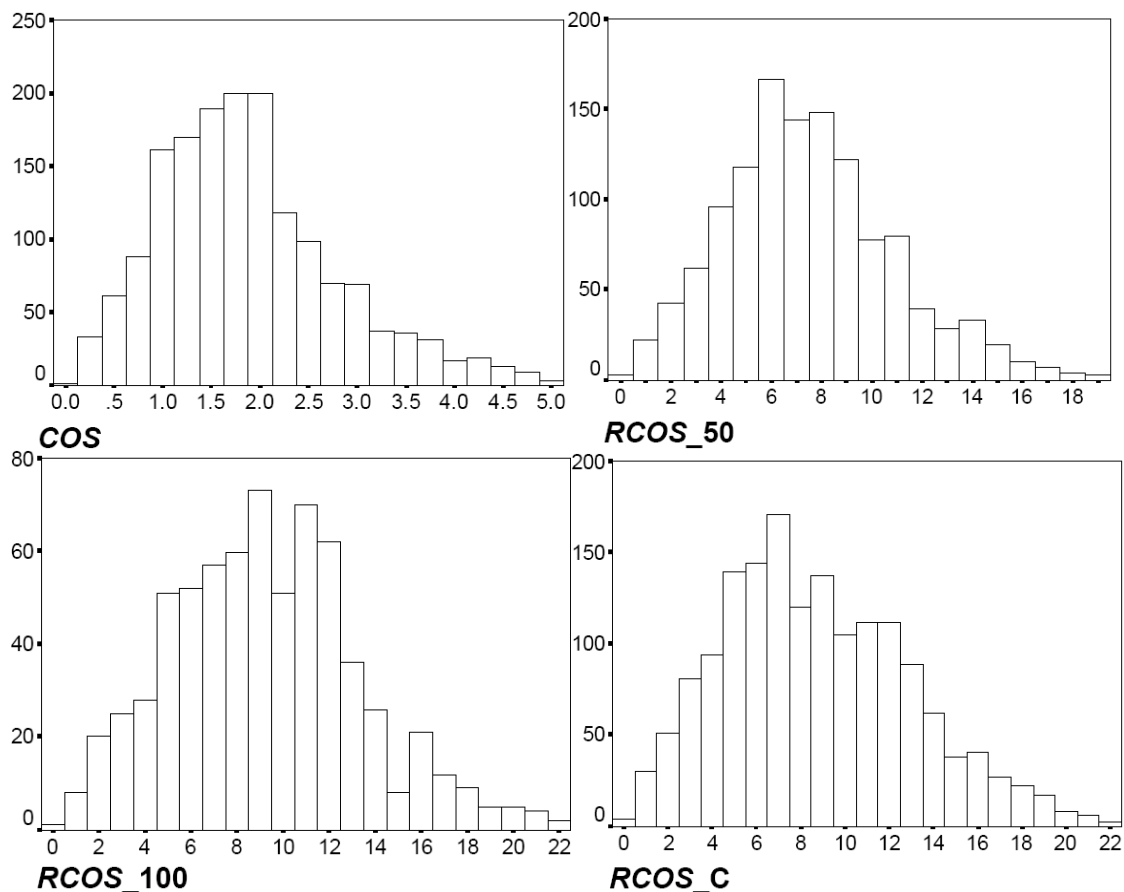


Figura 13. Histogramas de frecuencias de los valores de Carbono ( $COS$ , %) y reservas de carbono calculadas para diferentes profundidades ( $RCOS_n$ ,  $kg \cdot m^{-2}$ ).

Tabla 6. Niveles interpretativos por rango y frecuencia de valores del contenido de carbono del primer horizonte en perfiles de suelos de Cuba.

Nivel	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Rango (%)	<0.4	0.5 – 0.9	1.0 – 1.9	2.0 – 5.0	>5.0
Frecuencia	50	190	769	613	25*
Media (%)	0.31	0.76	1.51	2.81	8.69
Desv. Estándar (%)	0.10	0.14	0.30	0.70	5.73

\*Valores excluidos

Tabla 7. Niveles interpretativos de la reserva de carbono y frecuencias por rango de los valores de reserva.

Nivel	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Rango ( $kg \cdot m^{-2}$ )	<5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	>20	
Frecuencia	$RCOS_{50}$	288	674	230	34	6
	$RCOS_{100}$	105	294	223	58	9
	$RCOS_C$	317	708	450	125	25*

\*Valores excluidos.

Este comportamiento responde tanto al efecto de los procesos de degradación que han tenido lugar en la historia de la agricultura cubana, como a las características genéticas de los suelos. Se ha establecido que la deforestación y el excesivo laboreo han sido los elementos fundamentales en la pérdida de las reservas de carbono de los suelos en el mundo (Leemans, 1999). En la Tabla 8 se muestran los efectos del cambio de uso de la tierra en los principales suelos de Cuba.

La diferencia es notablemente mayor en los suelos expuestos a un sobre humedecimiento temporal que generen procesos de gleyzación ligeros (*e.g. Vertisol Pelic*), los cuales favorecen en condiciones idóneas la acumulación del humus, mientras que en condiciones de cultivo son los suelos de más difícil manejo.

Las rendzinas (*e.g. Feozem-Calcaric-Rhodic-Skeletal*) también muestran una gran diferencia entre los suelos cultivados y aquellos conservados bajo condiciones de vegetación forestal, esto puede deberse a que uno de los factores que contribuye de manera decisiva a la estabilización del humus es la abundancia de calcio activo y la presencia de hierro libre (Duchaufour, 1984), ambos elementos típicos en estos suelos, por otra parte son suelos afectados severamente por la erosión debido a la tala y al empleo de prácticas agrícolas poco conservacionistas, en condiciones de laderas.

**Tabla 8. Reservas de carbono de algunos de los principales suelos de Cuba para los usos de la tierra agrícola y forestal.**

Sistema Taxonómico		RCOS (kg·m <sup>-2</sup> )	
Subtipo CGSC*	Unidad WRB**	Agrícola	Forestal
Ferrítico Rojo oscuro típico	<i>Ferralsol Rhodic-Ferric</i>	13.5	17.4
Ferralítico Rojo típico	<i>Ferralsol Rhodic</i>	10.0	14.2
Ferralítico Rojo compactado	<i>Nitisol Rhodic</i>	4.4	7.5
Ferralítico Amarillento Lixiviado típico	<i>Acrisol Chromic-Ferric</i>	4.5	13.0
Pardo ócrico	<i>Cambisol Eutric</i>	7.5	12.1
Vertisol Pélico típico	<i>Vertisol Pelic</i>	12.9	41.9
Rendzina roja	<i>Feozem-Calcaric-Rhodic-Skeletal</i>	9.2	35
Pardo cálcico	<i>Cambisol Calcic</i>	7.2	15.7
Húmico Calcimórfico típico	<i>Feozem Chernic</i>	9.9	14.7
Húmico Calcimórfico gléyico	<i>Feozem Gleyic</i>	7.83	23.6

\* CGSC - Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández *et al.*, 1999);

\*\* WRB - *World Reference Base* (Deckers *et al.*, 1998).

Desde el punto de vista de las características intrínsecas de los suelos, se constata que de acuerdo a una prueba de Kruskal Wallis para *k* muestras independientes, las variables consideradas (*COS*, *RCOS\_50*, *RCOS\_100*, *RCOS\_C*) difieren significativamente de manera global (*P* = 0.000), cuando se consideró el Subtipo de Suelo o el Género de los perfiles, como variable de grupo.

Obviando consideraciones de manejo y el uso específico de los suelos, el drenaje es uno de los factores que tiene mayor influencia en que determinados suelos pertenezcan a la misma población, lo que se confirma por la manera en que se agrupan suelos gleyzados donde el horizonte gley alcance el horizonte superior, también la presencia de rocas

carbonatadas juega un papel importante, así como determinadas rocas formadoras como los depósitos silíceos.

Los suelos cuyas características intrínsecas favorecen la acumulación de humus son entonces, debido a sus pérdidas, los de mayor capacidad para el secuestro si se consideran cambios de usos de las tierras y prácticas que favorezcan el secuestro de carbono.

## CONCLUSIONES

Los procedimientos propuestos para la estimación puntual de la reserva de carbono en los suelos minerales de Cuba, permite y hace posible el cálculo de la reserva a partir de la información escasa e incompleta de los perfiles de suelo. La extrapolación del valor del contenido de carbono para el cálculo de las reservas de carbono del perfil completo, sobre la base de funciones de distribución vertical del carbono, genera errores comparables por su magnitud a los producidos cuando se realiza el cálculo tradicional, con un error relativo cercano al 20%. La validación global de la metodología de estimación puntual de la reserva de carbono para los horizontes superficiales indica un error relativo de 4.5% y para suelos sin inclusiones de solo 3.0%.

En los suelos con alto contenido de inclusiones, el error de las reservas del perfil completo podrá llegar a ser de hasta el 50%, 100% o mayor, con un aumento exponencial para contenidos de inclusiones mayores del 30%, pero dado su bajo contenido de carbono el error absoluto será bajo, la utilización del método propuesto en estos casos dependerá del peso que tengan dichos suelos en el área de estudio.

Las reservas de carbono de una muestra representativa de perfiles de suelos de Cuba se pueden catalogar como “bajas” con un valor medio de 8.73 kg·m<sup>-2</sup>, mostrándose diferencias notables entre los suelos cultivados y forestales, siendo los de mayor potencial para el secuestro, aquellos donde las características intrínsecas favorecen los procesos de humificación y que a la vez exhiben las mayores pérdidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bernoux M., Maria C. S. Carvalho, B. Volkoff, y C. C. Cerri, 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 888-896.
- Bernoux, M., C. C. Cerri, C. Neill, y J. de Moraes, 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, 82 (1-3. 43-58.
- Brunt, J., y J. H. Kauffman, 1995. Soilgraph. A soil, land, climatic data presentation and assessment programs. *International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Technical Paper 25*, Wageningen, The Netherlands, 26 pp.
- Chichagova, O. A. 1985. *Fechado radiocarbónico del humus del suelo* en ruso]. Nauka, Moscú, 142 pp.
- Deckers, J.A., F. O. Nachtgergale, y F. O. Spaargaren, 1998. *World Reference Base for Soil Resources. Introduction*. Leuven, Belgica, 165 pp.
- Detweler, R. P. 1986. Land use and global carbon cycle: The role of tropical soils. *Biogeo Chemistry*, 2: 67-93.
- Duchaufour, Ph. 1968. L'Évolution des sols [edn. Rusa], pp. 423.587. En *Bases de la edafología*. Progreso, Moscú, 1970.
- Duchaufour, Ph. 1984. *Edafología. 1. Edafogénesis y clasificación*. Masson. Barcelona, 493 pp.
- Eswaran H., E. Van den Berg, y P. Reich, 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am., J.* 57: 192-194.
- FAO, 1988. *FAO/UNESCO Soil Map of the World, Revised Legend*. World Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen,

- 1989, 138 pp.
- Grishina, L. A., y D. S. Orlov, 1978. Sistema de índices del estado húmico de los suelos en ruso. pp. 42-47. En *Problemi pochvovedeniya*, Nauka, Moscú.
- Guerasimov, I.P. 1972. La edad absoluta y relativa de los suelos, determinada por el isótopo radioactivo del carbono del humus [en ruso] pp. 269-283. En *Problemas genéticos, geográficos e históricos de la edafología*. Nauka, Moscú.
- Hernández A., J. M. Torres Font, J. Ruiz, A. Vantour, y A. Salazar, 1986. Los suelos Osuros Plásticos de la Empresa Cañera Cristino Naranjo. IV Propiedades físicas e hidrofísicas. *Cienc. Agr.*, 26: 88-92.
- Hernández, A., J. M. Pérez, D. Bosch, L. Rivero, et al. 1999. *Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*. Edit. AGRINFOR, Ciudad Habana, 64 pp.
- Instituto de Suelos, 1973. *Génesis y clasificación de los suelos de Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 315 pp.
- Instituto de Suelos, 1975. Segunda Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. *Rev. Agric.* 8 (1). 47-69.
- Jackson, M. L. 1970. *Análisis químico de suelos*. Edición Revolucionaria, La Habana. 301 pp.
- Jakus, P. 1983. Formaciones vulcanógenas sedimentarias de Cuba oriental, pp. 17-85. En: *Contribución a la geología de Cuba oriental*. Editorial Ciencia y Técnica, La Habana.
- Jenny, H., S. P. Gessel, y F. T. Bingham, 1949. Comparative study of decomposition rates or organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Sci.*, 68(4): 419-432.
- Johnson, M. G., y J. S. Kern, 2002. Quantifying the organic carbon held in forested soils of the United States and Puerto Rico, pp. 47-72. En Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey y R. Lal, eds., *The potential of U.S. Forest Soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*, Lewis Publishers, Boca Raton.
- Kauffman, J. H, S. Mantel, y O. C. Spaargaren, 1995. ISRIC Soil Information System. Soils of major eco-regions. A correlation of reference soil data and their assessment for agriculture and environment using the ISIS database. En J. H. Kauffman, N. H. Batjes y O. C. Spaargaren, eds., *Background document for international workshop on National Reference Collection and Databases (NASREC) [Draft]*. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen.
- Kern, J.S. 1994. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 439- 455.
- Kimble, J. M., H. Eswaran, y T. Cook, 1990. Organic carbon on a volume basis in tropical and temperate soils. *Transactions of 14<sup>th</sup> ICSS*. Kyoto, Vol. V. p. 248.
- Lakin, F. 1968. *Biometría* [en ruso]. Vishaya Shkola, Moscú, 278 pp.
- Leemans, R. 1999. Land - use change and the terrestrial carbon cycle. *Global Change*, 37: 24-26.
- Minasny B., A. B. McBratney, y K. L. Bristow, 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93: 225-253.
- Moreno, F. H., y W. Lara, 2003. Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios, pp. 189-213. En S. A. Orrego, J. I. del Valle y F. H. Moreno. eds., *Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia. Contribución para la mitigación del cambio climático*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Centro Andino

- para la Economía en el Medio Ambiente, Bogotá.
- Orlov, D. S., L.A. Grishina, N. L. Eroshicheva, 1969. *Practicum de bioquímica del humus* [en ruso]. Universidad de Moscú, Moscú, 157 pp.
- Ortega Sastriques, F. 1974. El humus de los suelos, pp. 85-90. En *Estudios edafológicos de la Isla de Pinos*. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana.
- Ortega Sastriques, F. 1975. El contenido de materia orgánica y la relación carbono /nitrógeno de los suelos Pardos Tropicales de Cuba. *Revista de Agricultura*, 8(1): 38-46.
- Ortega Sastriques, F. 1985. Simulación matemática del contenido y edad media del humus durante el cambio climático holocénico. *Cien. Agr.*, 25: 62-76.
- Ortega Sastriques, F., D. Ponce de León, y G. Hernández, 2002. *Reservas de carbono orgánico de los suelos de Cuba (Primera aproximación)*. Centro de Antropología, La Habana, s.p.
- Ortega Sastriques, F., G. Hernández, E. Jaimez Salgado, en prensa. Efecto del cambio climático hacia el Holoceno sobre el carácter de los suelos pardos de Cuba. *Rev. Jardín Bot. Nacional*.
- Ortega Sastriques, F., y O. Ascanio, 1985. El humus de los suelos de Cuba. III Rendzinas y Protorendzinas. *Ciencias de la Agricultura*, 22: 98-108.
- Ponvert, D. R. 2000. *Metodología para realizar la caracterización espectral y cromática de las coberturas terrestres en Cuba*. Resumen de Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Técnico Militar "José Martí", GeoCuba-IC, La Habana, 41 pp.
- Ricardo, N., L. Menéndez, y M. Tesarova, 1984. Desaparición de la hojarasca en dos tipos de bosque de la Sierra del Rosario. *Acta Botánica Cubana*, 20: 29-40.
- Rodríguez, M. I., R. A. Herrera, y E. González, 1990. Importance of decomposition processes for the functional classification of tropical forest ecosystems, proposed in Sierra del Rosario, Cuba. *Agrokemia es Talajtan*, 39(3/4). 525-530.
- Stepanov, I. S. 1974. Los suelos del Valle del Río Cauto (Cuba Oriental) y su utilización agrícola [en ruso]. *Agrojimia*, 6: 98-104.
- Tiurin, I. V. 1937. La materia orgánica de los suelos y su rol en la edafogénesis y la fertilidad [en ruso] pp. 11-189. En *La materia orgánica del suelo y su rol en la fertilidad*. Nauka, Moscú, 1968.
- Volobuev, V. P. 1963. *Ecología de los suelos* [en ruso]. Editorial de la Academia de Ciencias de Azerbaiján, Bakú, 254 pp.
- Voltz, M., P. Lagacherie, y X. Louchart, 1997. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *European J. Soil Science*. 48: 19- 30.



# ESTIMACIÓN DE RESERVAS DE CARBONO DE LOS SUELOS MINERALES DE CUBA.

## *Parte II. Estimación espacial y pérdidas de carbono por el uso agrícola*

### *Carbon stock estimation of Cuban mineral soils.*

#### *Part II. Spatial assessment and carbon losses by historical agricultural uses*

Daniel Ponce de León y Fernando Ortega Sastriques  
Universidad Agraria de La Habana (UNAH).  
Autopista Nacional y Carretera de Tapaste. San José de Las Lajas. La Habana,  
Cuba. Apdo. Postal 1819.  
E-mail: [dponcel@isch.edu.cu](mailto:dponcel@isch.edu.cu), [ortega@enet.cu](mailto:ortega@enet.cu)

#### **RESUMEN**

Se calculó la reserva de carbono para el total del área de suelos minerales de Cuba mediante un método de interpolación clasificatorio, a partir de valores medios por especies de suelos de reservas de carbono de 1625 perfiles representativos, sobre la base del mapa de suelos y el mapa topográfico, ambos a escala 1:250000, a una resolución de 1.25 minutos. Para la aplicación del método de interpolación clasificatorio, se comprobó previamente la ausencia de estructura espacial a la escala de estudio. Las reservas actuales (-15 a -25 años) de carbono de los suelos minerales de Cuba, hasta el horizonte C, son de 729 Tg de carbono ( $S_{RCOS} = 113$  Tg), con pérdidas de hasta 44% durante el periodo histórico (-3k años), relacionadas con la deforestación y el mal manejo de las tierras, ocurridos principalmente en los últimos 250 años. Las pérdidas principales han ocurrido en la Cuenca del Cauto y otras llanuras con suelos hidromórficos y zonas alomadas de las provincias centrales y occidentales.

**Palabras clave:** Reservas de carbono, estimación espacial, suelos, Cuba

#### **ABSTRACT**

The global carbon stock of Cuban mineral soils was estimated by a interpolating method, the primary data was a set of carbon stock from 1625 soils profiles classified up to the lower taxonomical level of Cuban classification; soil and vegetation maps 1:250 000 were employed rasterized into a screen with 1.25 minute cells. The interpolating classificatory method was applied only after proving that there was not spatial structure in the selected map scale. The amount of present carbon stock of Cuban mineral soils (-15 to -25 years) up to C horizon is 729 Tg ( $S_{RCOS} = 113$  Tg). The carbon stock of undisturbed pre-agriculture soils (-3 ky) was estimated too, 44% of the original stock was lost on account of deforestation and intensive soil management during the past 250 years. The greater losses have happened in the Cauto's basin in lowlands with hydromorphi soils and in the hilly lands of Central and Western Cuba.

**Key words:** Carbon stock, spatial assessment, soils, Cuba

## INTRODUCCIÓN

La materia orgánica es un componente de primordial importancia en los ecosistemas terrestres, que ejerce una influencia cardinal en los procesos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en ellos (Yadav y Malanson, 2007). Los suelos del mundo constituyen uno de los cinco reservorios de carbono más importantes, según datos de Pedersen *et al.* (2003), se estima que el carbono orgánico del suelo alcanza 1 580 Pg C, que constituye el 3.3% del total global, de alrededor de 47 000 Pg C (los océanos almacenan la mayor parte, 39 820 Pg C). Esta cantidad sumada a los 950 Pg de carbono inorgánico, es 3.3 veces lo que existe en la atmósfera (760 Pg C) y cuatro veces lo que almacena la biomasa terrestre (610 Pg C), según Lal (1999), por lo que generalmente los suelos almacenan más cantidad de carbono que la biomasa que sustentan.

La deforestación y el constante laboreo siguen siendo las principales fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> (Leemans, 1999). El mismo autor estima, que desde la década del 50 del pasado siglo, el 75 al 80% del incremento del carbono en la atmósfera se debe a la deforestación y los cambios en el uso de las tierras.

Estos estudios son posibles una vez que se establece una línea base, lo que permite realizar el balance de las reservas de carbono para diferentes escenarios de uso de la tierra, climáticos, y otros (Johnson y Kern, 2002).

Han sido realizadas evaluaciones del carbono en diferentes reservorios en ecosistemas terrestres y sus modificaciones a causa de cambios en el uso de las tierras (Kimble *et al.*, 2002), así como evaluaciones nacionales (Morisada *et al.*, 2004) que consideran tanto el carbono aéreo como subaéreo.

Kimble *et al.* (1990) y Eswaran *et al.* (1993), se destacan por el uso en la estimación de de bases de datos de suelos con perfiles representativos de todo el mundo. Batjes y Dijkshoorn (1999) determinaron la reserva de carbono para los suelos de la región amazónica utilizando la base de datos de Suelo y Terreno para Latinoamérica SOTER-LAC.

Posteriormente Batjes (2000) estudió el efecto de diferentes resoluciones espaciales sobre la determinación de la reserva de carbono para Suramérica utilizando varias fuentes de información a escala global, obteniendo notables diferencias entre los estimados derivados de cada fuente, haciendo ver la importancia que tiene el método de agregación seguido para reflejar la variación espacial de los suelos.

Con el procedimiento de asociación de la reserva calculada para perfiles de suelo con entidades cartográficas, Bernoux *et al.* (2002), determinaron la reserva de carbono en los primeros 30 cm de los suelos de Brasil, pero utilizando como mapa base los polígonos que resultaron del cruce del mapa de vegetación original con el mapa de suelos, a lo que denominaron mapa de asociación suelo – vegetación, además de una base de datos de perfiles de suelo de Brasil.

Una importante y completa contribución metodológica que resume las experiencias anteriores en la estimación de las reservas de carbono aéreo y subaéreo, biodiversidad y el estado de la degradación bajo diferentes usos de la tierra, basados en casos de estudio en México y Cuba, ha sido publicada por FAO (Ponce-Hernández, 2004).

En dicha aproximación se extraen ventajas del uso de las imágenes de satélite para la estratificación de las áreas investigadas, que son muestreadas posteriormente en cuadrantes anidados. Se modelan escenarios de cambios de uso de la tierra para identificar opciones de manejo que pudieran maximizar la producción de biomasa y alimentos, el secuestro de carbono en el suelo y la conservación de la biodiversidad, al mismo tiempo que se minimice la degradación de la tierra. Una aproximación similar ha sido aplicada a gran escala en China (Wang *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2007), haciendo



énfasis en el carácter esencial de este reservorio para una completa estimación y modelación del carbono en los diferentes ecosistemas.

En el presente trabajo se cuantifican las reservas de carbono para los suelos minerales de Cuba y se estiman las pérdidas de la reserva de carbono durante el período histórico, señalando dónde éstas han sido más importantes, lo que permite proponer los sitios más promisorios con mayor probabilidad de respuesta ecológica – económica para el establecimiento de políticas de preferencia de secuestro de carbono en los territorios más afectados.

## MÉTODOS

### Dominio geográfico e información cartográfica utilizada

El estudio abarca la totalidad de los suelos minerales de Cuba; excluyendo del territorio nacional emergido, los espacios ocupados por histosoles, depósitos de turba, los pueblos y los cayos, los cuales requieren aproximaciones metodológicas diferentes para su estimación.

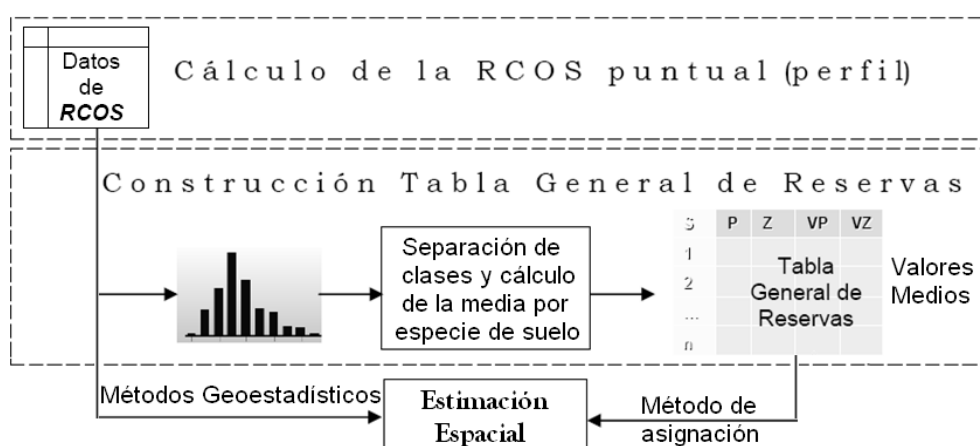
La fuente básica de información edafológica la constituyó el Mapa Genético de los Suelos de Cuba (Instituto de Suelos, 1974) y el Mapa Topográfico, ambos a la escala de 1:250000. El mapa de suelos fue enriquecido con nueva información de algunos suelos no considerados en la clasificación empleada en ese mapa (Instituto de Suelos, 1973).

El mapa de suelos se digitalizó a una resolución espacial de  $0^{\circ} 01' 15''$  ( $\approx 0.9$  cm en el mapa y 2250 m en el terreno, con área aproximada de la celda de 506.25 ha).

Del área de cada celda delimitada en el mapa se tomó la descripción de hasta cuatro componentes, expresados como porcentajes, para una mejor representación temática de la complejidad de la cobertura pedológica, dada por asociaciones de suelos que concurren en una misma unidad cartográfica.

### Creación de una base de datos de reservas

En la Figura 1 se muestra el flujo de información para la confección de la base de datos de reservas, la que se denomina como tabla general de reservas (TGR), que contiene valores medios calculados, a partir de la base de datos de perfiles de suelos (*RCubPer*, Ponce de León *et al.*, 2009), donde se almacena la información de reservas de carbono por perfil.



**Figura 1. Flujo de información para la confección de la Tabla General de Reservas, valores medios de RCOS por especies de suelos, estratificados para diferentes criterios de regiones bajo condiciones de cultivo y vegetación forestal natural o cultivada.**

Se establecieron valores medios para los principales suelos de Cuba, separando grupos dentro de una misma especie de suelos, según criterios de estratificación diferenciadores de la acumulación de humus, como tipos de vegetación, zonas y localización geográfica (provincias). Los criterios empleados se especifican a continuación:

1. Vegetación.

En los suelos bajo vegetación natural o plantaciones forestales (Ponvert, 2000), la cantidad de materia orgánica acumulada es mayor. De ahí que para cada una de las especies de suelo consideradas, se asignó adicionalmente el valor de su reserva de carbono bajo este tipo de vegetación. Los criterios de separación fueron:

- Dato explícito sobre el uso de la tierra en las fuentes analizadas.
- La segunda moda que en histogramas de frecuencia de la reserva de carbono o aquellos valores que su diferencia de la media fuera superior a  $t \times S$ , donde  $S$  es la desviación estándar y  $t$  es la corrección de Shovene (Lakin, 1968), para  $n$  número de casos, tal que:

$$t = 2 \left[ \frac{2n-1}{4n} \right] \quad [1]$$

2. Zonas diferenciadas por los criterios de:

- Zonalidad vertical. Se separaron los suelos de las zonas de los macizos montañosos de los de las llanuras (*e.g.* Zagua – Baracoa y Sierra Maestra en el este del país).
- Edad de los peniplanos. Se separaron los suelos que ocupan peniplanos jóvenes para diferenciarlos de los suelos que evolucionaron en superficies más antiguas.
- Régimen de humedad. Por este concepto se separaron la franja costera sur de las provincias orientales, así como los suelos de los humedales (*e.g.* Ciénaga de Zapata) y zonas cársicas (*e.g.* Península de Guanahacabibes).

3. Provincia.

Bajo esta denominación se separan los suelos de igual especie, que se diferencian según la región geográfica en que estén ubicados, para lo que el territorio de Cuba se separa en tres regiones, occidente, centro y oriente.

## **Estimación espacial de la *RCOS***

### Variografía

Se realizó el análisis de la estructura espacial de la *RCOS*, con el objetivo de comprobar la existencia de correlación espacial y el rango de esa correlación a la escala de estudio (Webster y Oliver, 2001). Para ello, se realizó una estratificación en la base de datos de perfiles con información de reservas de carbono (*RCubPer*), acorde a la división del territorio de Cuba en tres partes: Occidental, Central y Oriental, con el fin de disminuir el efecto que impone, en la distribución espacial de los puntos de observación, la forma alargada y estrecha de la Isla.

No se incluyó en la población de datos de la porción oriental, los pertenecientes al macizo montañoso Sagua-Baracoa, debido a que mostraba una mayor densidad de puntos formando un denso *cluster* con una marcada bi-modalidad, debido al predominio de bosques y plantaciones forestales.

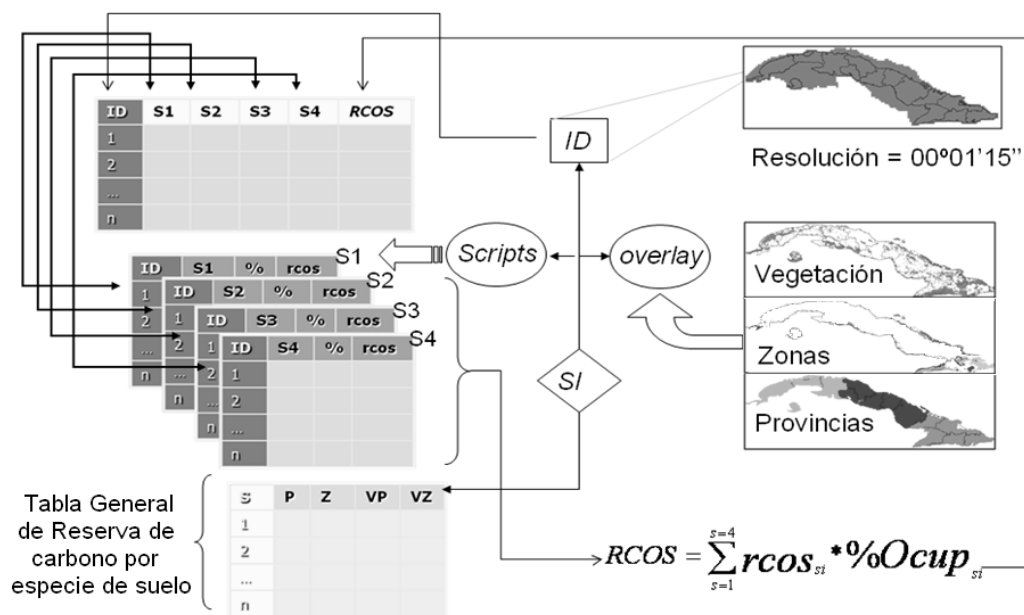
Los variogramas fueron ajustados a un modelo esférico y se generaron a partir del cálculo de las varianzas mediante la función (Journel y Huijbreg, 1978; Webster y Oliver, 2001):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [z(u_i) - z(u_i + h)]^2 \quad [2]$$

Donde:  $\gamma(h)$ , varianza;  $N(h)$ , número de pares en el paso  $h$  (*lag*);  $z(u_i)$ , valor del atributo en la localización  $u_i$ ;  $z(u_i + h)$ , valor del atributo a una distancia  $h$  del lugar  $u$ .

### Interpolación

La Figura 2 muestra el procedimiento seguido para la interpolación espacial de la reserva mediante un método de clasificación y asignación (Burrough y McDonnell, 1998), de los valores medios de *RCOS*, a áreas espacialmente delimitadas según los mismos criterios empleados en la construcción de la TGR y obtenidas por el cruce de los mapas: mapa de suelos 1:250000, usando la especie de suelo, como variable externa de predicción; mapa de vegetación natural y plantaciones forestales; mapa de zonas y mapa de provincias.



**Figura 2.** Cálculo de la *RCOS* (kg·m<sup>-2</sup>) a partir de la desagregación de la Tabla General de Reservas (TGR) según el porcentaje de ocupación de la especie de suelo en la celda ID. La asignación de los valores resultantes es condicionada (SI) a los mismos criterios de agrupación empleados en la construcción de la TGR, para las zonas obtenidas mediante operaciones de cruce de mapas (*overlay*).

Cada columna con información sobre suelos (S1, S2, S3 y S4) se desagregaron en tablas separadas de igual nombre, en las cuales:

- Se calcula el porcentaje de ocupación del área de la celda.
- Se identifica el valor medio de *RCOS* en kg·m<sup>-2</sup>, que le pertenece a cada celda de acuerdo al resultado de la operación de cruce de los mapas de suelo, vegetación, zonas y provincias, criterios de diferenciación de los valores medios de la reserva dentro de una misma especie de suelo.
- Se le asigna la reserva a partir de la Tabla General de Reserva.

El cálculo de la reserva total de la celda se obtiene por la sumatoria de las reservas de carbono parciales multiplicado por el porcentaje de ocupación del individuo en las cuatro tablas. La cuantificación de la reserva por suelos y total del territorio investigado, se obtiene a partir del histograma de frecuencias del mapa temático de reserva de carbono.

### Estimación de la *RCOS* anterior a la antropización (-3k años)

El cálculo de la reserva de carbono de -3k años se basa en considerar que todos los suelos estaban cubiertos por su correspondiente vegetación natural, de acuerdo al criterio de Borhidi (1991), asumiendo que la reserva de carbono en aquellas condiciones, es la que presentan las mismas especies de suelos que en la actualidad conservan la vegetación natural o que su uso actual es de bosque intervenido o forestal.

### Automatización y propagación de errores

La automatización de cálculos iterativos en el procesamiento de mapas y tablas se logró mediante *scripts* en el software ILWIS 3.2. Se calcula el error propagado (*S*) en las operaciones con mapas mediante el método analítico (Burrough y McDonnell, 1998).

## RESULTADOS

### Tabla General de Reservas por especie de suelo

La Tabla General de Reservas (TGR) resultante, contiene 462 individuos edáficos (especies) representativa de los suelos minerales de Cuba, con información de *RCOS* para las diferentes regiones bajo condiciones de cultivo y vegetación forestal natural o cultivada.

### Diferencias provinciales

En la Figura 3 se muestra la distribución de las provincias en la Isla de Cuba de acuerdo a la división política – administrativa vigente.

A pesar de los altos coeficientes de variación en algunas clases se detectaron diferencias provinciales o regionales. Por ejemplo, en el mismo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*), su valor medio para la provincia de La Habana fue de  $11.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $SeM = 0.4$ ) y en la vecina Matanzas es de sólo 9.4 ( $SeM = 0.5$ ), moviéndonos más al este encontramos 12.7 ( $SeM = 0.1$ ) en Cienfuegos y 13.0 ( $SeM = 0.7$ ) en Ciego de Ávila. Este hecho, resultado de diferentes factores, entre los que se encuentran condiciones particulares de formación relacionadas con el proceso de humificación y el uso histórico de la tierra, adelanta la necesidad de discriminar las diferentes regiones para la generalización espacial de los valores medios de la *RCOS*, para lo que se utilizó el mapa de división política administrativa de Cuba (provincias) agrupadas en tres regiones: Occidental, Central y Oriental, tal como ocurre con los cambios que experimentan iguales clases taxonómicas de suelo con la altura en zonas de relieve disectado.

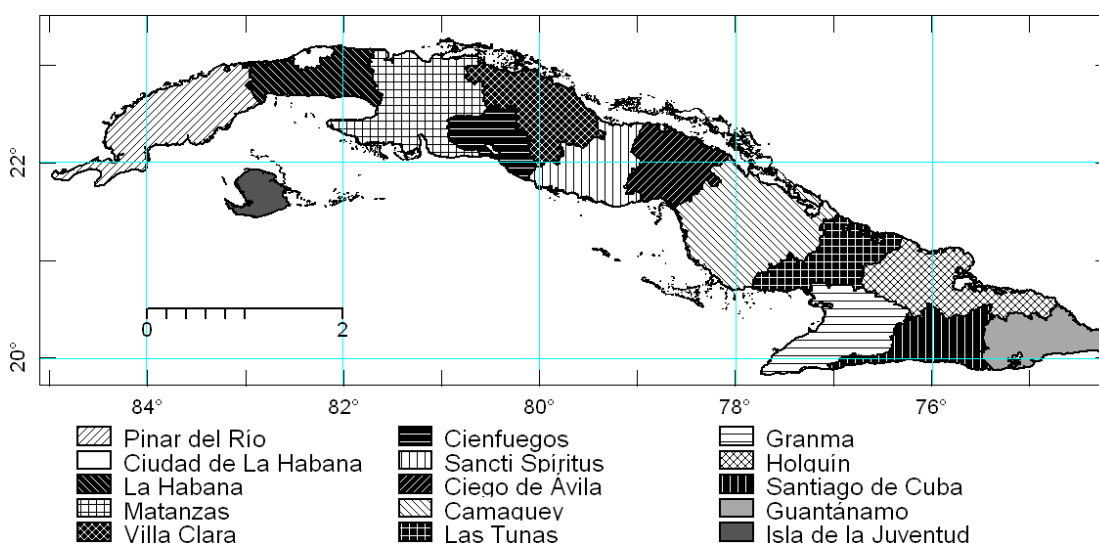
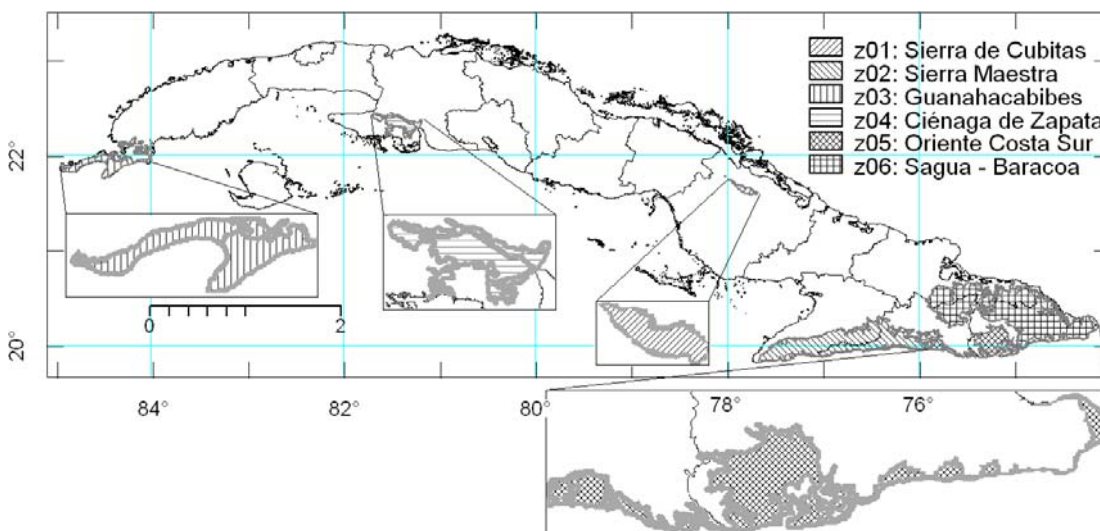


Figura 3. Ubicación geográfica y división político-administrativa (provincias) de la Isla de Cuba.

### Zonalidad vertical

La existencia de una zonalidad vertical que se expresa desde relativamente bajas alturas, al menos para las provincias orientales es un hecho (Hernández *et al.*, 1980), y en el caso de las reservas de carbono se manifestó con cierta claridad a pesar de la ocasional pobreza de datos. Así puede observarse, por ejemplo que los suelos Pardos Cálcidos (*Cambisol Calcic*) en la franja más alta y por tanto húmeda tienen como promedio  $8.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $SeM = 1.3$ ) de carbono, mientras que en la franja más baja alcanza apenas la mitad ( $4.5$ ;  $SeM = 0.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Para recoger estas variaciones se separó la zona montañosa oriental (z02, z06), y su franja costera sur (z05) como si fueran unidades sub-provinciales (Figura 4).



**Figura 4. Regiones diferenciadas por su ubicación geográfica y Zonas diferenciadas en los procesos de acumulación de humus en cuanto a criterios de edad de los peniplanos (z01), ley de distribución vertical (z02, z06) y régimen de humedad (z03, z04, z05).**

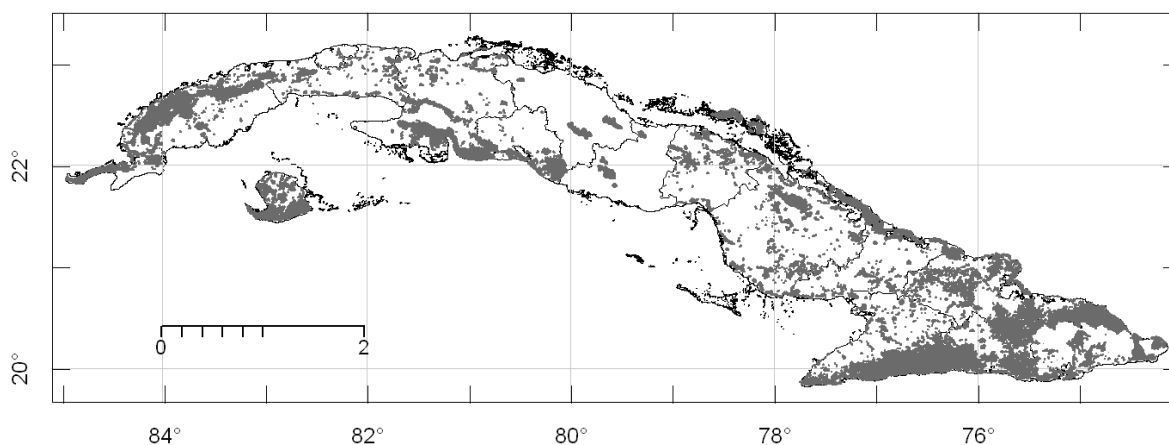
### Régimen hídrico

Los suelos Rendzina (*e.g. Feozem-Calcarics*) que se desarrollan en condiciones de alta humedad en las Penínsulas de Guanahacabibes y Zapata (Figura 4; z03, z04) se diferencian de los similares en sus respectivas provincias, esas zonas se separan como una región independiente.

Se separa la Sierra de Cubitas en Camagüey (z01), para diferenciar los suelos Ferríticos (*Ferralsol Rhodic-Ferric*) de antiguos peniplanos, de los más jóvenes que predominan en esa Sierra.

### Vegetación

La mayor parte de la información analizada se corresponde a suelos agrícolas, en los cuales su prolongado uso ha reducido sustancialmente el contenido de materia orgánica, por tanto, es ineludible separar las regiones con vegetación natural o de plantaciones forestales, lo que se realizó a partir del mapa topográfico 1:250000 (Figura 5).



**Figura 5. Criterio de diferenciación por el tipo de vegetación natural o de plantaciones forestales (sombreado) extraído del mapa topográfico 1:250000, de acuerdo a la clasificación de ocupación del suelo propuesta por Ponvert (2000).**

#### **Asignación de *RCOS* por especie de suelo**

Las diferentes combinaciones espaciales que pueden formar 16 tipos de suelos, 18 subtipos, 14 géneros solos o combinados, tres especies y cuatro subespecies (estas últimas añadidas, para poder asignar otros atributos a los suelos; *e.g.* humus forestal, suelo escabroso, etc.), rinden un total de 76 clases de individuos edáficos menos que en la TGR, debido al proceso de generalización espacial, acorde a la escala de trabajo.

La información recabada permitió generar valores medios bien establecidos para los principales suelos de Cuba. Como era de esperar, los coeficientes de variación (*CV*) son elevados; por ejemplo, en el suelo Ferralítico Rojo típico (*Ferralsol Rhodic*) alcanza un 27%, para un valor medio de  $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $SeM = 0.3$ ).

#### **Variografía**

El análisis de la variabilidad espacial de la reserva de carbono determinada hasta el horizonte C (*RCOS\_C*) para las tres porciones del territorio nacional, occidente, centro y oriente (Figura 6) brinda una descripción del patrón espacial del comportamiento de dicha variable.

La fortaleza de la estructura espacial de una propiedad puede evaluarse por la relación varianza residual ( $c_0$ ) / meseta ( $c_0+c$ ) (Kerry y Oliver, 2007). En la Tabla 1 se observan valores de la relación  $c_0:c_0+c$  cercanos a uno, los variogramas de los datos de los perfiles correspondientes a cada porción del territorio, muestran que el grado de continuidad en la variación espacial es bajo, para la variable *RCOS\_C* a una escala de 1:250000 ( $lag = 10000 \text{ m}$ ). Esto es más notable en la porción central del país (Figura 6-B2), donde se obtiene un efecto cercano a la varianza residual pura (*nugget* puro; McBratney y Webster, 1986) que denota un comportamiento completamente aleatorio de las variables a esa escala de medición y se reconoce por la fluctuación de los valores de varianza  $\gamma(h)$  alrededor de la varianza estadística general de la muestra de población.

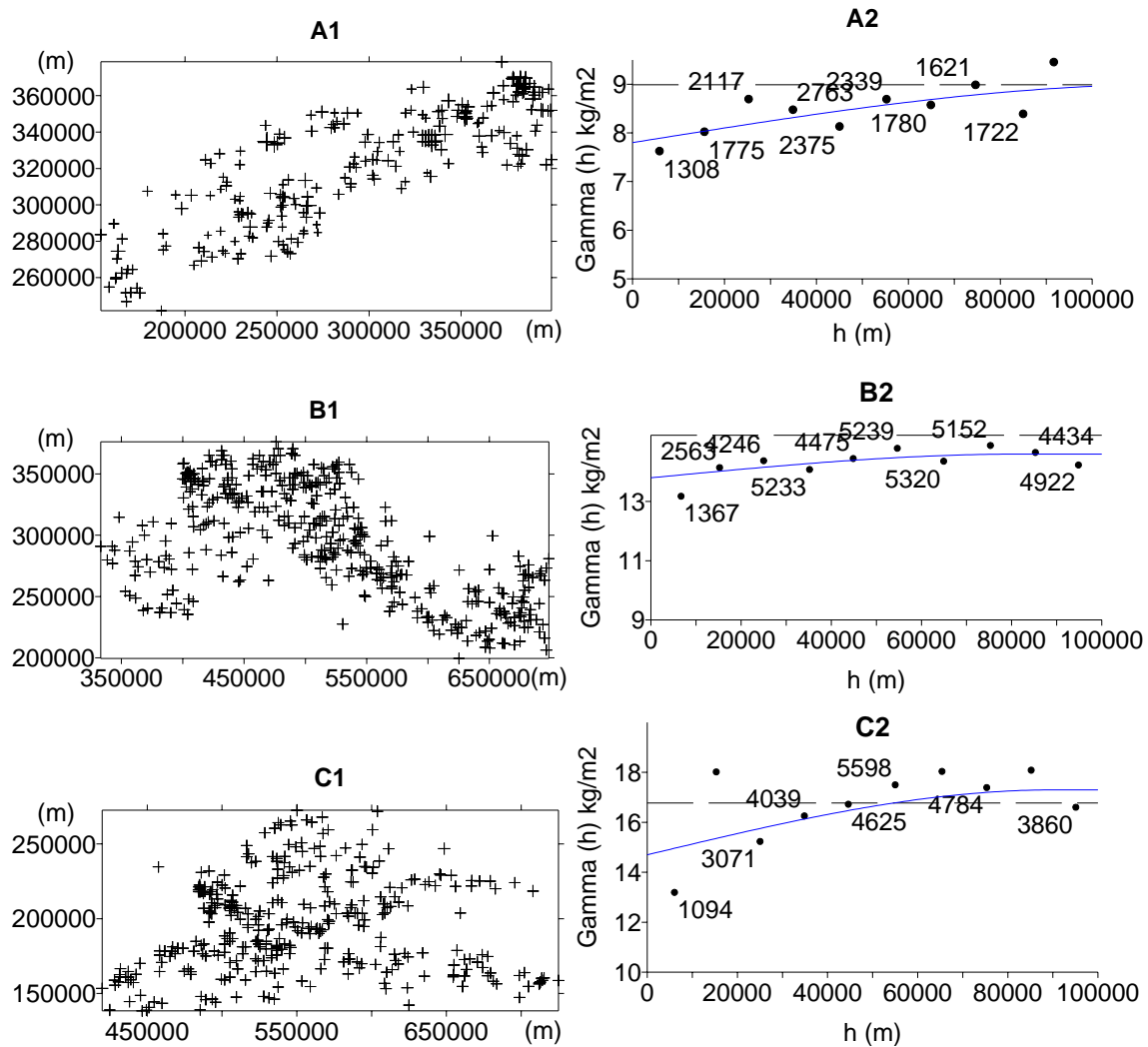


Figura 6. Distribución de los perfiles (1) y variogramas experimentales ajustados a un modelo esférico (2) de la *RCOS\_C* para las diferentes regiones del país. A. Occidente; B. Centro; C. Oriente. La línea discontinua representa la varianza general de la muestra de población.

Tabla 1. Estadígrafos descriptivos de *RCOS* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y relación meseta: varianza residual para los perfiles empleados en el análisis variográfico.

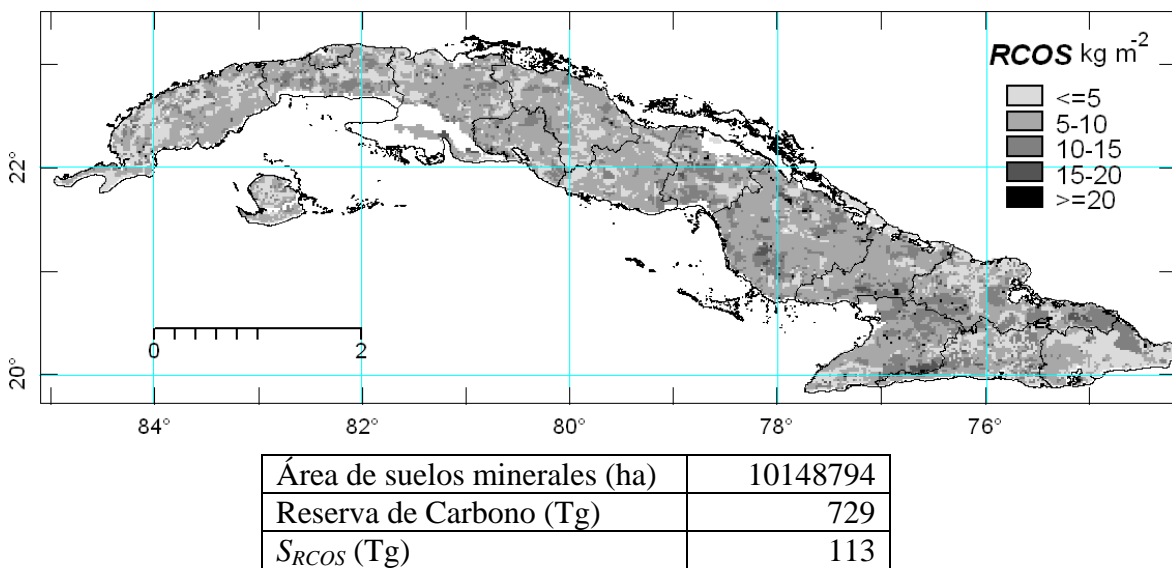
Estadígrafo	Occidente	Centro	Oriente
N	260	440	354
Excluidos ( $>20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ <i>RCOS</i> )	6	3	4
Media	7.09	8.30	8.43
Desv. Estándar	3.00	3.90	4.10
Coef. de Variación	0.42	0.47	0.48
Coef. de Simetría	0.24	0.18	0.22
$c_0:c_0+c$	0.87	0.94	0.85

No obstante, se puede observar cierta estructura, más pronunciada en la región oriental (Figura 6-A2) y occidental (Figura 6-C2), que sugiere mayor continuidad espacial a una escala menor de variación para distancias de 20000 – 30000 m (0.2 – 0.3 fracciones de grado), lo cual es consistente con resultados obtenidos en un estudio más detallado, publicado en este volumen (Ponce de León *et al.*, 2009).

El estudio variográfico valida el empleo de un método de interpolación no geoestadístico, basado en la media de las *RCOS* para diferentes especies de suelos concurrentes en el dominio geográfico para la escala de estudio, a nivel de todo el país, toda vez que puede asumirse que las observaciones no están correlacionadas a la escala de estudio.

**La reserva de carbono de los suelos de Cuba**

La Figura 7 muestra el mapa de la distribución de las 729 Tg de carbono actual ( $S_{RCOS} = 113$  Tg), estimadas para los suelos minerales de Cuba. Aún hoy ( $\approx -15$  a  $-25$  años) la mayor reserva se concentra en áreas llanas del sur de La Habana, la provincia de Matanzas, Ciego de Ávila, Camagüey y el Valle del Cauto, en contraste con aquella estimada para 3000 años atrás, antes de que se hiciera notoria la influencia antrópica y Cuba estaba literalmente cubierta de los bosques holocénicos (Figura 8). En estas condiciones los suelos minerales de Cuba podían haber almacenado más de 1309 Tg de carbono ( $S_{RCOS-3ky} = 202$  Tg).



**Figura 7. Mapa del estado actual ( $\approx -15$  a  $-25$  años) de la reserva de carbono de los suelos minerales de Cuba.**



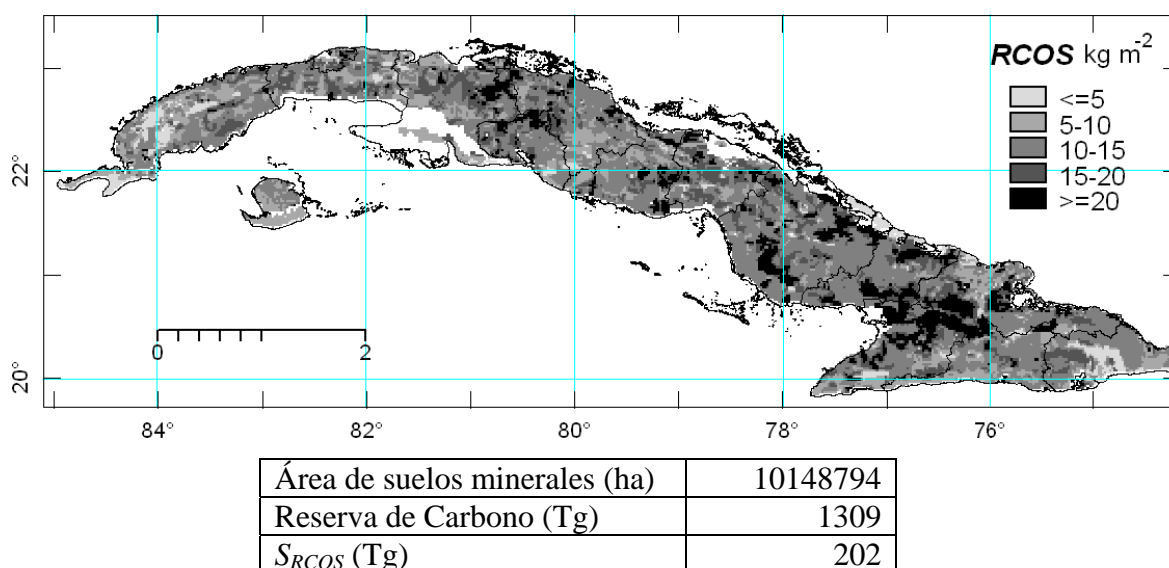


Figura 8. Mapa de reserva de carbono estimada para los suelos minerales de Cuba anterior al período histórico (-3k años), en que se consideran cubiertos por la vegetación holocénica.

## DISCUSIÓN

### Pérdidas del Carbono durante el período histórico (-3k años)

Nuestros aborígenes más avanzados (grupos agroalfareros), desarrollaron una agricultura neolítica poco destructiva, dado que empero de practicar un sistema del tipo roza, tumba y quema, abandonaban los conucos a los dos o tres años por causa de las malezas y no por el agotamiento de la fertilidad (Guarch, 1986), con evidencias de haber desarrollado sus actividades preferentemente en suelos Húmicos (*Feozems*) e Hidromórficos (*Gleysols*) (Jaimez y Hernández, 1994), en alturas entre 90 y 150 m (Guarch, 1986) donde los procesos erosivos debieron tener una menor manifestación. Esta agricultura fue más bien intensiva, pero en pequeñas áreas (<2%; Borhidi, 1991).

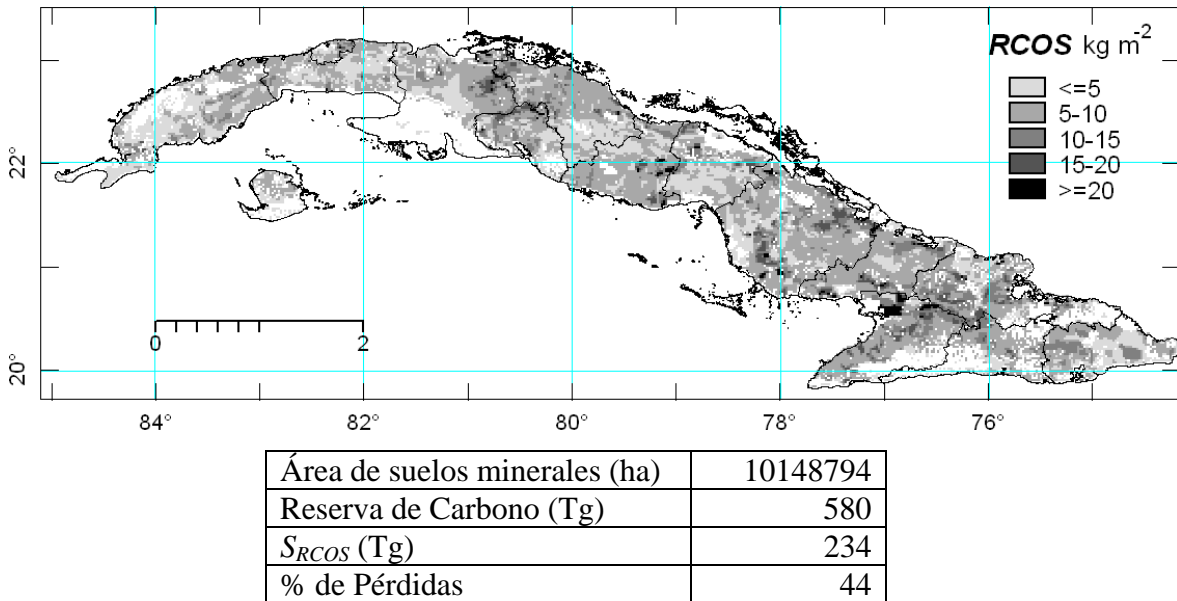
La agricultura intensiva en Cuba tiene alrededor de 250 años, así la degradación acelerada de los suelos en el país comienza desde el período colonial con la deforestación masiva de los bosques y los cambios de uso de las tierras vinculados fundamentalmente a la expansión del cultivo del café desde el siglo XVIII, en las zonas llanas de occidente sin sombra (Gutiérrez, 1992), y el posterior predominio del cultivo de la caña de azúcar.

El estado actual de la degradación de los suelos está también relacionado con la gestión agraria de las últimas décadas. Funes (2001) resume sus principales causas en: (i) alta especialización; (ii) monocultivo y excesiva intensificación; (iii) gran dependencia de insumos externos (fertilizantes, agrotóxicos, concentrados, mecanización); (iv) deforestación de grandes áreas; (v) ganadería vacuna, avícola y porcina basada en sistemas intensivo-industriales muy poco auto-sostenibles.

Las reservas actuales de carbono de los suelos de Cuba es un reflejo de los procesos de degradación, y a su vez su disminución ha contribuido a la manifestación acelerada de esos propios procesos.

Los suelos minerales de Cuba han perdido 580 Tg de carbono ( $S_{RCOS\_DIF} = 234$  Tg), debido a su uso agrícola. Las regiones con pérdidas absolutas mayores son la Cuenca del Cauto y otras llanuras con suelos gleyzados (*stagnics*) y zonas alomadas de las provincias centrales y occidentales (Figura 9), debido a diversos factores que actúan de

conjunto, entre los que se encuentran: (i) la disminución de la entrada de restos vegetales; (ii) los procesos erosivos; y (iii) la aceleración de la mineralización.



**Figura 9.** Mapa de pérdidas de reservas de carbono durante el período histórico (-3k años - actual).

La deforestación redujo los volúmenes de materia orgánica que llegan al suelo y favoreció el desarrollo acelerado de los procesos erosivos. Por otra parte, el mal uso del recurso tierra es un factor importante desde el comienzo de la agricultura intensiva, en específico se pueden resumir dos causas fundamentales que explican la magnitud de las pérdidas globales en dos épocas o momentos de desarrollo de la agricultura:

1. La aplicación sistemática de la cal apagada ( $\text{CaOH}_2$ ) en las plantaciones de café y caña de azúcar desde el siglo XVII al XIX (Martínez, 1957; Vigil y Ortega, 2000), que se extendió a épocas más recientes.
2. El excesivo laboreo mecánico de las tierras en la segunda mitad del siglo XX, en una agricultura con uno de los índices más altos de mecanización en el mundo, que alcanzó su punto álgido en la década del ochenta del pasado siglo.

A propósito, Pérez (1988) ha señalado que los efectos erosivos progresaron paralelamente con el desarrollo de la mecanización y el riego, ya que no se desarrollaron simultáneamente técnicas de laboreo apropiadas a los nuevos modelos de agricultura.

#### *Diferenciación de las pérdidas por subtipos de suelos*

El análisis de las pérdidas en los principales subtipos de suelos, indica que los suelos gleyzados (*gleyics*) y gleyzosos (*stagnics*) son los más afectados en general (pérdidas de hasta un 57%). En estos suelos el aumento de la aireación por la roturación continua, provocó el cambio abrupto del régimen hídrico y gaseoso del suelo, sumado a la reducción de la entrada de materia orgánica al ser retirada la vegetación forestal original. Los Vertisoles Pélicos típicos (*Vertisol Pelic*) los igualan o inclusive superan debido a la misma causa.

Los suelos Ferralíticos amarillos (*Acrisols*) desarrollados sobre materiales ricos en cuarzo exhiben los mayores porcentajes de pérdidas (75%). Ello se justifica debido a que estos suelos son afectados por procesos erosivos intensos y se caracterizan por pobres contenidos de arcilla y la baja estabilidad de los complejos arcillo-húmicos (Ortega, 1987).

Los suelos Pardos, carbonatados o no (*Cambisols*), han perdido entre el 40 y el 50% del carbono originario. A los factores generales se le debe añadir la severa erosión que se constata en esos suelos, que ocupan posiciones de laderas.

Un caso que merece consideración aparte son los suelos arenosos, las grandes pérdidas en estos suelos (hasta un 70%) es a costa de la capa de humus moder que logran acumular, clasificado según Wilde (1971) como “*sand moder*”, dicha capa desaparece rápidamente una vez comenzada su explotación.

Los suelos rojos (fundamentalmente *Ferralsols* y *Nitisols*) de la Llanura Habana-Matanzas han perdido entre el 40 y 45% del carbono, fundamentalmente por el aceleramiento de la oxidación del humus. Estos suelos también están presentes en las llanuras de Ciego de Ávila y Camagüey, en el centro este del país, pero la topografía más suave y el uso históricamente menos prolongado de la tierra hacen que las pérdidas de carbono hayan sido menores.

El calentamiento del clima acelera la mineralización de la materia orgánica de los suelos. Jones *et al.* (2005) obtuvieron un efecto positivo entre los cambios en el clima y el ciclo del carbono y pronostican una disminución rápida del carbono del suelo a finales del siglo 21, donde el balance entre las fuerzas dependerá de las reservas de partida. Wang *et al.*, (2007) señala el desfase entre la respuesta de la biota y el suelo por los efectos de los cambios de los usos de las tierras y otras fuentes perturbadoras.

Se ha confirmado el calentamiento de Cuba a partir de la segunda mitad del siglo XIX, coincidente con el fin de la Pequeña Edad Glacial europea (Celeiro, 1999).

Lo anterior podría explicar las grandes pérdidas existentes en las regiones llanas del Oriente de Cuba, en tierras que comenzaron a explotarse intensivamente solo en las primeras décadas del siglo XX y donde el régimen hídrico de sobre-humedecimiento temporal de los suelos de arcillas dilatables, como los predominantes en el Valle del Cauto, favorecía la humificación.

Estos argumentos indican que estas regiones son ecológicamente más frágiles, y reclaman la mayor atención, de acuerdo a los pronósticos del cambio climático.

## CONCLUSIONES

Los suelos minerales de Cuba contienen 729 Tg de carbono ( $S_{RCOS} = 113$  Tg). Anterior al período histórico, los suelos minerales pudieron almacenar 1 309 Tg ( $S_{RCOS-3ky} = 202$  Tg), lo que implica una pérdida de 580 Tg ( $S_{RCOS\_DIF} = 234$  Tg) de carbono equivalente a un 44% a causa fundamentalmente de la deforestación y prácticas inadecuadas en la utilización agrícola. Las pérdidas principales han ocurrido en la Cuenca del Cauto y otras llanuras con suelos hidromórficos y zonas alomadas de las provincias centrales y occidentales.

Los suelos más afectados y representativos han sido: los gleyzados y gleyzosos, los vérticos, los ferralíticos desarrollados sobre materiales ricos en cuarzo, los pardos, carbonatados o no y los rojos de la Llanura Habana-Matanzas.

La topografía más suave y el uso históricamente menos prolongado de la tierra condicionan pérdidas de carbono menores, en las Provincias de Ciego de Ávila y Camagüey. La disminución de la reserva de carbono en las regiones orientales puede estar vinculada también al calentamiento gradual producto del cambio climático, aspecto que se le debe prestar una especial atención.

## BIBLIOGRAFÍA

Batjes, N. H. (2000): Effects of mapped variation in soil conditions on estimates of soil carbon and nitrogen stocks for South America. *Geoderma*, 97(1-2): 135-144.

- Batjes, N. H. y J. A. Dijkshoorn (1999): Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma*, 89(3-4): 273-286.
- Bernoux M., Maria C.S. Carvalho, B. Volkoff, C.C. Cerri (2002): Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 888-896.
- Borhidi, A. (1991): *Phytogeographic and vegetation of Cuba*. Akademia Kyado, Budapest, 858 pp.
- Burrough, P. A. y Rachael McDonnell (1998): *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, 333 pp.
- Celeiro, Mayra. (1999): *Oscilaciones de las temperaturas del aire y las precipitaciones desde el período histórico en Cuba*. Resumen de Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Geográficas, Instituto de Geografía Tropical. La Habana, 40 pp.
- Chen, J.M., S.C. Thomas, Y. Yin, V. Maclaren, J. Liu, J. Pan, G. Liu, Q. Tian, Q. Zhu, J.J. Pan, X. Shi, J. Xue, E. Kang (2007): Enhancing forest carbon sequestration in China: Toward an integration of scientific and socio-economic perspectives. *Journal of Environmental Management* 85: 515-523
- Eswaran H., E. Van den Berg y P. Reich. (1993): Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- Funes, F. (2001): El movimiento cubano de agricultura orgánica. *Transformando el campo cubano. Avances de la agricultura sostenible*. ACTAF, La Habana, pp. 15-38.
- Guarch, J. M. (1986): Influencia de los factores del suelo y la vegetación sobre el desarrollo de la agricultura de los aborígenes de Cuba [en ruso]. *Arjeologua Kubi, Nauka*, Novosibirsk, pp. 57-65.
- Gutiérrez, P. J. (1992): La gente de la loma. *Bohemia*, 84(23): 8-11.
- Hernández, A., A. Obregón, F. Ortega, J. Ruíz, J.M. Torres Font, y C. Agüero (1980): *La regionalización geográfica de los suelos y su aplicación en Loma Santa María, Provincia Guantánamo*. En Memorias II Jornada Científica del Instituto Jorge Dimitrov, Bayamo, 4 pp.
- Instituto de Suelos (1974): *Mapa genético de los suelos de Cuba, escala 1:250 000*. Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, La Habana, 19 hojas.
- Instituto de Suelos. (1975): Segunda Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. *Rev. Agric.* 8 (1): 47-69.
- Jaimez, E. y A. Hernández. (1994): La nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba en el contexto interpretativo de la agricultura aborígen. *Casimba*, 5, ser.1 (6):21-27.
- Johnson, M.G. y J.S. Kern, (2002): Quantifying the organic carbon held in forested soils of the United States and Puerto Rico. in: Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey y R. Lal (Eds.), *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 47- 72.
- Jones, C., Claire McConnell, K. Coleman, P. Cox, P. Falloon, D. Jenkinson y D. Powlson. 2005. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology* 11, 154-166.
- Journel, A. G., Ch. J. Huijbregts (1978): *Mining geostatistics*. Sexta Impresión. Academic Press, Londres, 600 pp.
- Kerry, R., M.A. Oliver (2007): Determining the effect of asymmetric data on the variogram. I. Underlying asymmetry. *Computers & Geosciences*, 33: 1212-1232.

- Kimble, J. M., H. Eswaran y T. Cook. (1990): Organic carbon on a volume basis in tropical and temperate soils. *Transactions of 14<sup>th</sup> ICSS*. Kyoto, Vol. V. p. 248.
- Kimble, J.M., L.S. Heath, R.A. Birdsey y R. Lal (2002): *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Lakin, F. (1968): *Biometría* [en ruso]. Vishaya Shkola, Moscú, 278 pp.
- Lal, R. (1999): World soils and the greenhouse effect. *Global Change*, 37: 4-5.
- Leemans, R. (1999): Land - use change and the terrestrial carbon cycle. *Global Change*, 37: 24-26.
- Martínez, A. (1957): Café: historia de su cultivo y explotación en Cuba en: Fco. Pérez de la Riva. *Bibliográficas 2da Ser.*, 8(1): 213-216.
- McBratney, A. B. y R. Webster. (1986): Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. *J. Soil Sci.*, 37: 617-639.
- Morisada, K., K. Ono, y H. Kanomata (2004): Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma*, 119: 21–32.
- Ortega, F. (1987): *El humus de los suelos de Cuba*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Suelos, La Habana, 170 pp.
- Pedersen, T. F., R. François, L. François, K. Alverson y J. McManus (2003): The late quaternary history of biogeochemical cycling of carbon. En: *Paleoclimate global change and the future*. K. Alverson, R. S. Bradley y T. F. Pedersen (eds.). Springer. Berlin, pp. 63-79.
- Pérez, D.C. (1988): La erosión del suelo. Causas, efectos y control. CIDA, La Habana, 77 pp.
- Ponce-Hernandez, R. (2004): Assessing carbon stocks and modeling win–win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 156 pp.
- Ponvert, D. R. (2000): *Metodología para realizar la caracterización espectral y cromática de las coberturas terrestres en Cuba*. Resumen de Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Técnico Militar “José Martí”, GeoCuba IC, La Habana, 41 pp.
- Vigil, S., y F. Ortega (2000): *Papel de las causas naturales en la decadencia de la industria cafetalera en Cuba*. Resúmenes, Antropología 2000.
- Wang, S., C. Zhou, K. Li, S. Zhu, F. Huang (2001): Estimation of the soil organic carbon reservoir in China. *Journal of Geographical Sciences* 11 (1): 3–13.
- Wang, S., J.M. Chen, W.M. Ju, X. Feng, M. Chen, P. Chen, G. Yu (2007): Carbon sinks and sources in China’s forests during 1901–2001. *Journal of Environmental Management* 85: 524–537.
- Webster, R., Margaret Oliver (2001): *Geostatistics for environmental Scientists*. Statistics in practice, Ed. Vic Barnett. John Wiley and Sons. New York, 271 pp.
- Yadav V., G. Malanson (2007): Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration. *Progress in Physical Geography* 31(2): 131-154.



# USO DE INFORMACIÓN SECUNDARIA EN LA ESTIMACIÓN ESPACIAL DE LA RESERVA DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

## *Spatial assessing of soil organic carbon stocks by qualitative secondary information*

Daniel Ponce de León, Jorge Díaz y Fernando Ortega Sastriques  
Universidad Agraria de La Habana (UNAH).  
Autopista Nacional y Carretera de Tapaste. San José de Las Lajas.  
La Habana, Cuba. Apdo. Postal 1819.  
E-mail: [dponcel@isch.edu.cu](mailto:dponcel@isch.edu.cu)

### RESUMEN

Con el fin de establecer métodos para la mejora de la estimación espacial de la reserva de carbono orgánico en los suelos minerales (*RCOS*), a partir de la información disponible de levantamientos edafológicos, se estudió el comportamiento de tres métodos geoestadísticos de interpolación ante diferentes disponibilidades de datos (1560, 1000 y 500 perfiles) distribuidos en un área de 522 925 ha, perteneciente al territorio de la provincia La Habana, Cuba. Se utilizaron dos métodos de interpolación que incorporan variables externas en la estimación como son el kriging simple con media local (*KSml*) y el kriging con tendencia externa (*KTE*), comparando su desempeño con el kriging ordinario (*KO*) y un método clasificatorio no geoestadístico (*CLAS*). La variable externa utilizada en el *KSml* y *KTE* consistió en la media de los valores de *RCOS* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) calculada a partir de los perfiles incluidos en cada polígono definido en el mapa de suelos 1:250 000, sobre la base del valor de predicción del mapa al nivel taxonómico de especie. Se realizó una simulación *multiGausiana* para la estimación de la incertidumbre de la interpolación con la técnica de Monte Carlo para 500 realizaciones igualmente probables (*LGs*). Los diferentes métodos empleados se validan utilizando una población de datos independientes (53 perfiles) mediante el cálculo del sesgo, el error cuadrático medio y la raíz del error cuadrático medio. Los resultados indican que el *KO* es la mejor opción cuando existe suficiente información, pero ante escasez de información deja de ser un buen estimador. Los métodos que utilizan la especie de suelo como variable externa mejoran la estimación en la medida que la disponibilidad de datos es menor, resultando el *KSml* y el método no geoestadístico *CLAS* los de mejor desempeño.

**Palabras Claves:** Carbono Orgánico del Suelo (*COS*), Reserva de Carbono, Interpolación Espacial.

### ABSTRACT

For enhancing the spatial assessment of Organic Carbon Contains (*RCOS*) in mineral soils, using soil survey data (data mining), it was estimated the performance of three geostatistical interpolation methods with different data amount (1560, 1000 and 500 profiles) spread over 552925 ha in Havana Province, Cuba. The results of two interpolation methods that employ ancillary variables: simple kriging with local mean (*KSml*) and kriging with external drift (*KTE*) were contrasted with the ordinary kriging (*KO*) and with a classificatory non-geostatistical method (*CLAS*). The external variable

employed with the *KSml* and *KTE* methods was *RCOS* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) determined as the arithmetic mean of *RCOS* from all profiles included in each soil polygon defined at species level in the 1: 250000 Cuban soil map. Five hundred equal probability *multiGaussian* (*LGs*) simulations were carried out, with a Monte-Carlo technique, for assessing the uncertainty of the interpolation. The validation of the tested methods was done using an independent data set (53 profiles) by the estimate the mean error (*EM*), the mean square error (*ECM*) and the root mean square error (*RECM*). Our results show that *KO* is the best option when an adequate amount of information is available, but when it is scarce it becomes a non-good estimator. As the available data set diminishes, the methods that use the soil species as external variable improve the assessment, specially the *KSml* and the non-geostatistical *CLAS* methods.

**Key Words:** Soil Organic Carbon (SOC), Carbon Stock, Spatial Interpolation.

## INTRODUCCIÓN

La creación de superficies continuas discretizadas por interpolación es un procedimiento imprescindible cuando se requiere de un modelo de datos que refleje la continuidad espacial del atributo bajo estudio y cuando los datos no cubren todo el dominio espacial necesario (Burrough y McDonnell, 1998).

En la estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo (*RCOS*) en un territorio es necesaria la aplicación de alguna técnica de interpolación, toda vez que se realiza a partir de la información aportada por observaciones puntuales. Para ello se puede recurrir a métodos de interpolación determinísticos simples como polígonos de Voronoi y triangulaciones, hasta más complejos como superficies de tendencia y *splines*, todos los cuales presentan diversas fallas, y algo muy importante, no dan información alguna sobre el error de la predicción (Webster y Oliver, 2001).

Estos autores (op. cit. p. 42-47) reconocen a la predicción más común y convencional, la que se realiza a partir de mapas de suelos (u otro criterio clasificatorio, *e.g.* mapas de clases de vegetación) como el único método de los que se ha hecho referencia, que provee algún estimado del error, al combinar la estimación clásica, basada en el valor predictivo de la media, con la clasificación espacial. En lo adelante nos referiremos a este método como “método global no geoestadístico”.

Los errores del procedimiento estarán relacionados también con la calidad de los mapas, tanto la exactitud posicional como la temática, que en algunos casos puede ser alta, en dependencia del linaje del mapa y los errores introducidos en la digitalización (Balmaseda y Ponce de León, 2006; 2007). También influye la calidad de la clasificación empleada, que junto a que se ignora la varianza intra-clases y no estar resuelto el problema de la variación local, limitan la precisión del procedimiento (Webster y Oliver, 2001; p.47). Conant *et al.* (2003) confirman que la variabilidad espacial intrínseca del carbono del suelo limita la precisión de la medición del carbono lo que influye en la determinación de cambios en su contenido.

En este sentido, Hibbard *et al.* (2002) reconocen que un aspecto importante en el estudio de los reservorios de carbono, son los patrones y variabilidad de la distribución espacial, tal como ocurre para otros elementos, lo que significa cuantificar dicha variabilidad, tanto espacial como en la profundidad, con implicaciones en la determinación de la reserva de carbono (Don *et al.*, 2007).

Las técnicas geoestadísticas permiten caracterizar esta variabilidad, los métodos de estimación espacial basados en dichas técnicas, a diferencia de los determinísticos, minimizan la varianza de la estimación, de ahí que las técnicas de interpolación que siguen estos principios se conozcan por el acrónimo BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*), pero tienen el inconveniente de ser sensibles al número de observaciones



(Webster y Oliver, 1992). Este hecho es el principal inconveniente para su uso, debido a los costos de los muestreos intensivos, una solución plausible es cuando es posible caracterizar la variabilidad de la propiedad de interés mediante una variable auxiliar (e.g. la conductividad eléctrica, Utset *et al.*, 1998). La caracterización de la variabilidad del carbono orgánico del suelo en los horizontes superficiales puede estimarse a partir de la formulación difusa del variograma de reflectancia del suelo (Lark, 2000).

Una solución al problema de la estimación espacial en circunstancias de escasez de datos, puede lograrse mediante el uso de técnicas de interpolación híbridas, las cuales utilizan de manera combinada la interpolación geoestadística y los modelos determinísticos clásicos (Wackernagel, 1998; McBratney *et al.*, 2000). Así Powers y Schlesinger (2002) utilizaron variables biofísicas (bióticas y abióticas) para predecir la capacidad de almacenamiento de carbono en lugares no muestreados. Mueller y Pierce (2003) aplicaron diferentes técnicas de interpolación (kriging ordinario, kriging con un modelo de tendencia, co-kriging, kriging con tendencia externa, y regresión múltiple) para estudiar cómo la escala del muestreo y el uso de variables externas afectaban la calidad de la estimación espacial del carbono.

El presente estudio aborda a partir de un caso de estudio la efectividad de diferentes métodos de interpolación para diferentes densidades de datos de reserva de carbono.

## FUNDAMENTOS

### Método Global no geoestadístico (CLAS)

Burrough y McDonnell (1998), señalan como el modelo estadístico más simple para representar la predicción global mediante modelos clasificatorios es el modelo ANOVAR:

$$z(x_0) = \mu + \alpha_k + \varepsilon \quad [1]$$

Donde:  $z$  es el valor del atributo en la localización  $x_0$ ,  $\mu$  es la media general del atributo en el dominio espacial de interés,  $\alpha_k$  es la desviación entre y la media de la clase  $k$  y  $\varepsilon$  es el residuo.

La aplicación de este modelo conlleva una serie de asunciones, tales como: la variación de  $z$  dentro de cada unidad cartográfica es aleatoria y espacialmente independiente, la varianza es homogénea dentro de cada polígono y similar en todas las unidades cartográficas, todos los atributos son normalmente distribuidos y los cambios espaciales ocurren en los límites de las unidades y de manera abrupta.

Su aplicación por ende requiere del conocimiento de la estructura espacial de la variable en cuestión.

Si los cambios de una variable dada son sistemáticos (existe correlación espacial), no se cumple el supuesto de aleatoriedad de las observaciones y se estaría en presencia de una variable regionalizada, cuya razón de cambio medio puede ser estudiada con la función semivarianza (Journel y Huijbreg, 1978; Webster y Oliver, 2001) dada por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [z(u_i) - z(u_i + h)]^2 \quad [2]$$

Donde:  $\gamma(h)$ , semivarianza;  $N(h)$ , número de pares en el paso  $h$  (lag);  $z(u_i)$ , valor del atributo en la localización  $u_i$ ;  $z(u_i + h)$ , valor del atributo a una distancia  $h$  del lugar  $u$ .

En estas circunstancias dejan de cumplirse los supuestos que sustentan a la estadística clásica.

### Métodos geoestadísticos. Uso de una variable externa

McBratney *et al.* (2000) hacen ver que si se considera al vector de datos que describen a una propiedad del suelo, como una variable aleatoria  $Z$ , determinada en localizaciones en una región  $U = u_1, u_2, \dots, u_N$ , expresada en tres componentes:

$$Z(u) = m + Z_1(u) + \varepsilon(u) \quad [3]$$

Donde:  $m$  es la media local de la región;  $Z_1(u)$ , es el componente espacialmente dependiente y  $\varepsilon$  el término de error residual, la aplicación de una variable externa cobra sentido cuando  $m$  varía en la región condicionada por alguna causa externa, es decir existe tendencia.

No obstante, es cada vez más frecuente el uso de una o varias variables externas para mejorar la estimación, sin necesidad de que dicho efecto se observe en el variograma experimental, es decir se asume un modelo de tendencia subyacente al problema estudiado. Tal es el caso del carbono, cuando se presume que los procesos de acumulación de humus responden a tipos definidos de edafogénesis (Tiurin, 1937; Volobuev, 1963; Duchaufour, 1968) que en este caso actúan como factores determinísticos.

Los procedimientos más aceptados en la actualidad para la estimación usando una variable externa cualitativa como el subtipo de suelos, son el kriging simple con media local (*KSml*) y el kriging con tendencia externa (*KTE*), debido a que no necesitan caracterizar la estructura espacial de la variable secundaria (McBratney *et al.*, 2000).

#### Kriging simple con media local (KSml)

De acuerdo con Goovaerts (1997) el estimador del kriging simple es:

$$\hat{Z}_{KS}(u) - m = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{KS}(u) [Z(u_{\alpha}) - m] \quad [4]$$

Bajo el supuesto de estacionaridad asumida, la media  $m$  no depende de la posición  $u$ , representa una información global común a todas las localizaciones para las que queremos realizar la estimación.

El kriging simple con media local debe tener en cuenta la información brindada por la variable secundaria en cada localización  $u$ , para lo cual la media estacionaria y conocida  $m$ , debe ser remplazada por la media, también conocida pero variable  $\hat{m}_{KS}(u)$ , tal que:

$$\hat{Z}_{KSml} - \hat{m}_{KS}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{KS}(u) [Z(u_{\alpha}) - \hat{m}_{KS}(u_{\alpha})] \quad [5]$$

Para el caso de que la variable secundaria sea categórica y no sobrepuesta, por ejemplo un mapa de suelos, se determina la media de la variable a estimar en las  $k$  categorías de la variable externa, tal como polígonos de suelo que representan un determinado nivel taxonómico, y los pesos  $\lambda_{\alpha}^{KS}(u)$  de la expresión anterior se obtienen de la solución del sistema de ecuaciones del kriging simple, con la particularidad de que se utiliza la función covarianza CR de los residuos de la función aleatoria  $R(u) = Z(u) - m(u)$ , según:

$$\sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_{\beta}^{KS}(u) C_R(u_{\alpha} - u_{\beta}) = C_R(u_{\alpha} - u) \quad [6]$$

Donde:  $C_R(h) = C_0 - \gamma(h) \quad [7]$

Esto indica, que se debe estimar y ajustar el variograma experimental de los residuos.

#### Kriging con tendencia externa (KTE)

El método de tendencia externa (Wackernagel, 1998), consiste en integrar, dentro del sistema de ecuaciones del kriging, condiciones universales suplementarias acerca de una o más variables externas, medidas de manera exhaustiva en el dominio espacial, tal que

la función  $S_i(u)$  se conozca no solo en todos los puntos a estimar, sino también en todas las localizaciones  $u_\alpha$  de las muestras.

El calificativo de externo se debe a que las condiciones de la ecuación [8] son añadidas al sistema independientemente de la función covarianza.

$$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha s_i(u_\alpha) = s_i(u_0) \quad i = 1, \dots, N \quad [8]$$

El sistema de ecuaciones para múltiples variables de tendencia externa es (Wackernagel, 1998):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta^{KTE}(u) C_R(u_\alpha - u_\beta) + \mu_0^{KTE}(u) + \sum_{i=1}^N \mu_i^{KTE}(u) s_i(u_\alpha) = C_R(u_\alpha - u) \quad [9] \\ \text{para } \alpha = 1, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta^{KTE} = 1 \quad [10] \\ \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta^{KTE}(u) s_i(u_\beta) = s_i(u) \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad [11] \end{array} \right.$$

#### Diferencias entre el KSml y KTE

Las diferencias residen, de acuerdo con Goovaerts (1997), en la definición del componente de tendencia. El *KSml* define la relación entre la variable de estudio y la variable externa de una vez e independiente del sistema de ecuaciones kriging. El *KTE* ajusta los parámetros de dicha relación para cada vecindad al introducirlos en el sistema de ecuaciones Kriging.

#### **Incertidumbre de la estimación espacial**

La incertidumbre de la estimación depende de la calidad de la información disponible. La varianza kriging  $\sigma^2(u)$ , por ejemplo en el kriging ordinario (*KO*):

$$\sigma_{KO}^2(u) = \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta^{KO}(u) \gamma(u_\alpha - u_\beta) - \mu_{KO}(u) \quad [12]$$

ha sido usada erróneamente como modelador de la incertidumbre de la estimación en un sitio no muestreado (Goovaerts, 2001), esto es así ya que  $\sigma^2(u)$  depende del muestreo y no de la variable aleatoria que se pretende estimar (Myers, 1994). En otras palabras, sólo tiene en cuenta la localización de los puntos muestreados en la vecindad del punto a estimar y no sus valores.

Burrough y McDonnell (1998), señalan que la vía más simple pero más intensiva desde el punto de vista computacional para abordar el estudio de la incertidumbre en la estimación espacial, es considerar que cada atributo se distribuye acorde a una función de distribución de probabilidades (*fdp*) Gaussiana (curva Normal de probabilidades), con una  $\mu$  y  $\sigma^2$  conocida en cada entidad o celda, utilizando una sola función para todas las celdas (estacionaridad) o estimando funciones específicas para cada celda cuando se tiene información sobre la continuidad espacial (condicional).

La incertidumbre local es completamente modelada por la función de distribución acumulativa condicional (*fdac*, Goovaerts, 2001):

$$F(\mathbf{u}; z | (n)) = \text{Prob}\{Z(\mathbf{u}) \leq z | (n)\} \quad [13]$$

Donde:  $| (n)$ , expresa un condicionamiento a los  $n$  valores de la variable  $z(u_\alpha)$  de la vecindad.

La *fdac* modela la incertidumbre del valor desconocido en la localización  $\mathbf{u}$ , ya que da la probabilidad de que dicho valor no sea mayor que cierto umbral  $z$ . Las herramientas de

la geoestadística que permiten modelar la incertidumbre son: el kriging multiGausiano y el kriging disyuntivo, como métodos paramétricos y el kriging indicador, como no paramétrico. Si el variograma de la propiedad es conocido se puede simular una superficie (imagen estocástica) con similares características espaciales (Burrough y McDonnell, 1998), esto es, varianza residual (*nugget*), meseta (*sill*) y rango o alcance (*range*).

Una aproximación numérica a la simulación es el método de Monte Carlo (Burrough y McDonnell, 1998), por medio del cual, la *fdac* de  $z$  a  $\mathbf{u}$  muestreada  $n$  veces de forma aleatoria, proporciona un conjunto de valores  $\mathbf{z}$  simulados  $\{z^{(l)}(\mathbf{u}), l = 1, \dots, L\}$  (Goovaerts, 2001)

El número de realizaciones  $L$  debe ser mayor o igual a 100, el cálculo de la media y la varianza a partir de ellas, se logra por posprocesamiento de las  $L$  simulaciones Gaussianas (*sGs*), si se divide el mapa de desviación estándar por el mapa de la media de la variable investigada se obtiene un mapa del error relativo de la estimación.

## MÉTODOS

Se investiga una amplia región (522 925 ha) de suelos minerales de la provincia de La Habana, Cuba, entre las coordenadas 22° 33' 38'' N, 82° 58' 53'' W y 23° 11' 17'' N, 81° 35' 04'' W.

### Análisis exploratorio

Se comprobaron mediante herramientas de la estadística descriptiva, características de los datos, tales como:

- Asimetría de la distribución y existencia de valores extremos (*outliers* por valor).
- Presencia de *outliers* espaciales
- Posible existencia de relación entre la varianza local con la media local (efecto proporcional).

El efecto proporcional (Goovaerts, 1997) se comprobó mediante un método de ventanas móviles, en cada área de 13.8×6.9 km, resultado de la división del territorio investigado en 10×10 ventanas, se calcularon la media y la varianza, que luego fueron graficadas.

### Métodos Geoestadísticos

Los variogramas experimentales se determinaron por la ecuación [2], para todos los conjuntos de datos analizados. Se verificó la existencia de anisotropía en la distribución espacial de las variables analizadas, en las direcciones N, NE, E, SE, con una amplitud angular de 22.5°.

#### Métodos de interpolación y condiciones del estudio

Para probar el efecto del número de observaciones en los diferentes métodos de interpolación, se seleccionaron de manera aleatoria dos subconjuntos de datos de 1000 y 500 perfiles, respectivamente, a partir de la base de datos denominada *RCHabPer* (1560 perfiles). Como resultado, se trabajó sobre tres poblaciones:

- Serie A (1560 perfiles).
- Serie B (1000 perfiles).
- Serie C (500 perfiles).

Se aplicaron cuatro métodos de interpolación, tres geoestadísticos y uno no geoestadístico.

1. Kriging ordinario.
2. Kriging simple con media local (*KSml*, ecuaciones [6] y [7]). Para su realización se estimó el variograma experimental de los residuos de la variable externa y el valor individual de cada perfil.

3. Kriging con tendencia externa (*KTE*, ecuaciones [9], [10] y [11]), se le asignó la variable externa, en cada localización a estimar, así como a los puntos que participan en la interpolación.
4. Método de interpolación global no geoestadístico (Burrough y McDonnell, 1998), consiste en el procedimiento comúnmente usado de asignación de un valor medio de la variable de interés a una entidad espacial de referencia (polígonos del mapa de suelos de Cuba escala 1:250 000). El valor medio de *RCOS* generalizado por esta vía se obtuvo a partir de una base de datos independiente que contiene perfiles de toda Cuba (*RCubPer*), donde no intervienen los perfiles de suelo de la base de datos *RCHabPer*. Representa el valor medio de *RCOS* por tipo de suelo, zona, presencia de vegetación forestal natural o cultivada y ubicación geográfica (Ponce de León, 2003).

La variable externa utilizada en el *KSml* y *KTE*, consistió en la media de los valores de *RCOS* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) calculada a partir de los perfiles incluidos en cada polígono de suelo definido por el mapa de suelos 1:250 000, en la región de La Habana. Todas las estimaciones se realizaron para una resolución espacial de 250 m.

Se realizó una simulación *multiGausiana* para la estimación de la incertidumbre de la interpolación con la técnica de Monte Carlo, para 500 realizaciones igualmente probables, cuyo algoritmo general puede verse en (Burrough y McDonnell, 1998). Se calculan superficies para el valor medio y la desviación estándar con el conjunto de todas las realizaciones, así como el error relativo. El mapa de valores medio se considera también como una vía de interpolación de la *RCOS*, por lo que se incluye en la validación.

Se emplearon las plataformas de análisis geoestadístico *GSLib* (Deutsch y Journel, 1992) y *Gstat* (Pebesma y Wesseling, 1997; Pebesma, 2000).

#### Procedimiento de validación

Se realizó una validación mediante una población de datos independientes (*RCHabVal*), los cuales no intervinieron en la estimación espacial.

Los índices utilizados son: el error medio (*EM*), el error cuadrático medio (*ECM*) y la raíz del error cuadrático medio (*RECM*) (Voltz *et al.*, 1997; Minasny *et al.*, 1999), el primero aporta información sobre el sesgo, el segundo y el tercero dan información sobre la dispersión de las estimaciones, según las ecuaciones:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z_i(x_i) - \hat{z}_i(x_i)\} \quad [14]$$

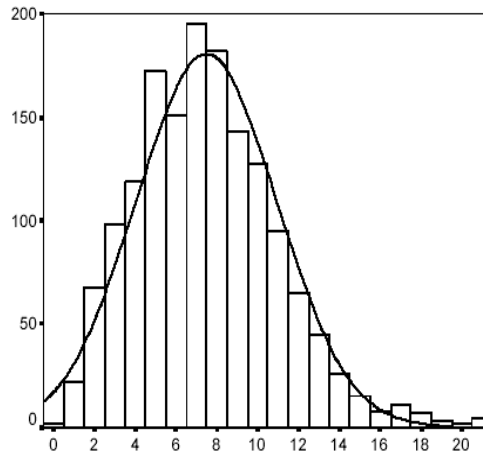
$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z_i(x_i) - \hat{z}_i(x_i)\}^2 \quad [15]$$

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z_i(x_i) - \hat{z}_i(x_i)\}^2} \quad [16]$$

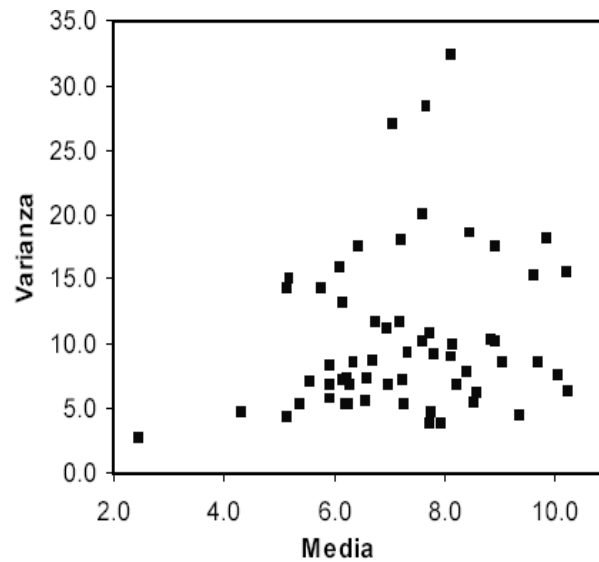
( $X_i$ ) es la localización cuando se trata de una estimación espacial.

## RESULTADOS

El variograma es sensible a la asimetría de las distribuciones y a la existencia del efecto proporcional (Goovaerts, 1997). El histograma de frecuencias de valores de la *RCOS* para los 1560 perfiles distribuidos en La Habana, se muestra en la Figura 1A, el cual se acerca a una distribución normal. La Figura 1B presenta la variación de la media con la varianza en la zona de estudio, calculada mediante un procedimiento de ventanas móviles, la dispersión de los datos indica la ausencia del efecto proporcional.

**A**

	N	Minimo	Máximo	Media	SeM	Varianza	Asimetría	Curtosis	P KS
<i>RCOS</i> (kg.m <sup>-2</sup> )	1 560	0.03	20.94	7.48	0.087	11.851	0.607	0.585	0.025

**B**

**Figura 1. Resultados del análisis exploratorio de los datos de *RCOS*. A. Histograma de frecuencia y estadígrafos de posición, B. Efecto proporcional.**

El variograma isotrópico de los valores de *RCOS* para 1560 perfiles en la región Habana y el modelo ajustado, se muestran en la Figura 2, el cual exhibe una buena estructura espacial. Ajustado a un modelo doble esférico, indica que los valores de *RCOS* pueden estar correlacionados hasta distancias de separación de 22-24 km.

Otros parámetros espaciales son: la varianza residual *C0* (*nugget*) de 5.8 y los componentes espacialmente dependientes *C* (*Sill*) de 3.7 y 3.5 para la primera y la segunda estructura respectivamente.

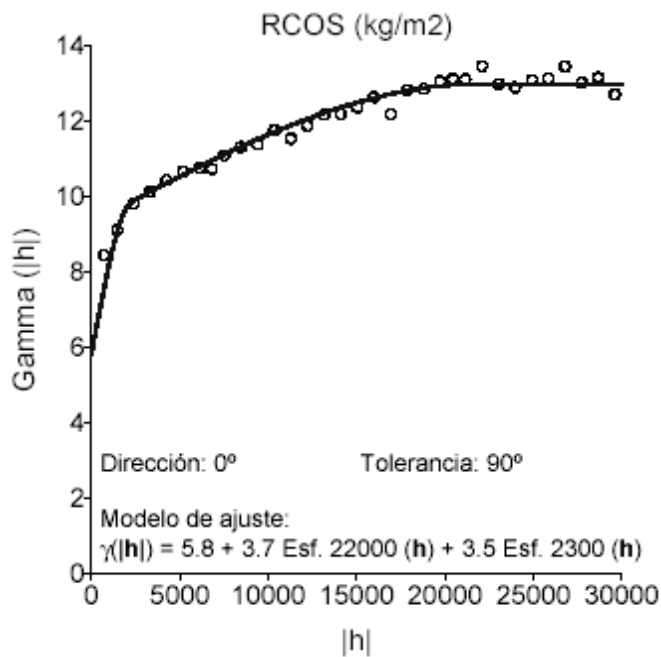


Figura 2. Variograma experimental de la *RCOS* (kg·m<sup>-2</sup>) de 1560 perfiles de la región La Habana, ajustado a un modelo doble esférico (Esf.).

## DISCUSIÓN

### Comparación y validación de métodos de interpolación

En la Tabla 1 se muestra la validación de los métodos de interpolación usados a “*priori*”.

Tabla 1. Resultados de la validación externa de diferentes métodos de interpolación usados en la estimación espacial de la *RCOS* (kg·m<sup>-2</sup>) para diferentes densidades de datos.

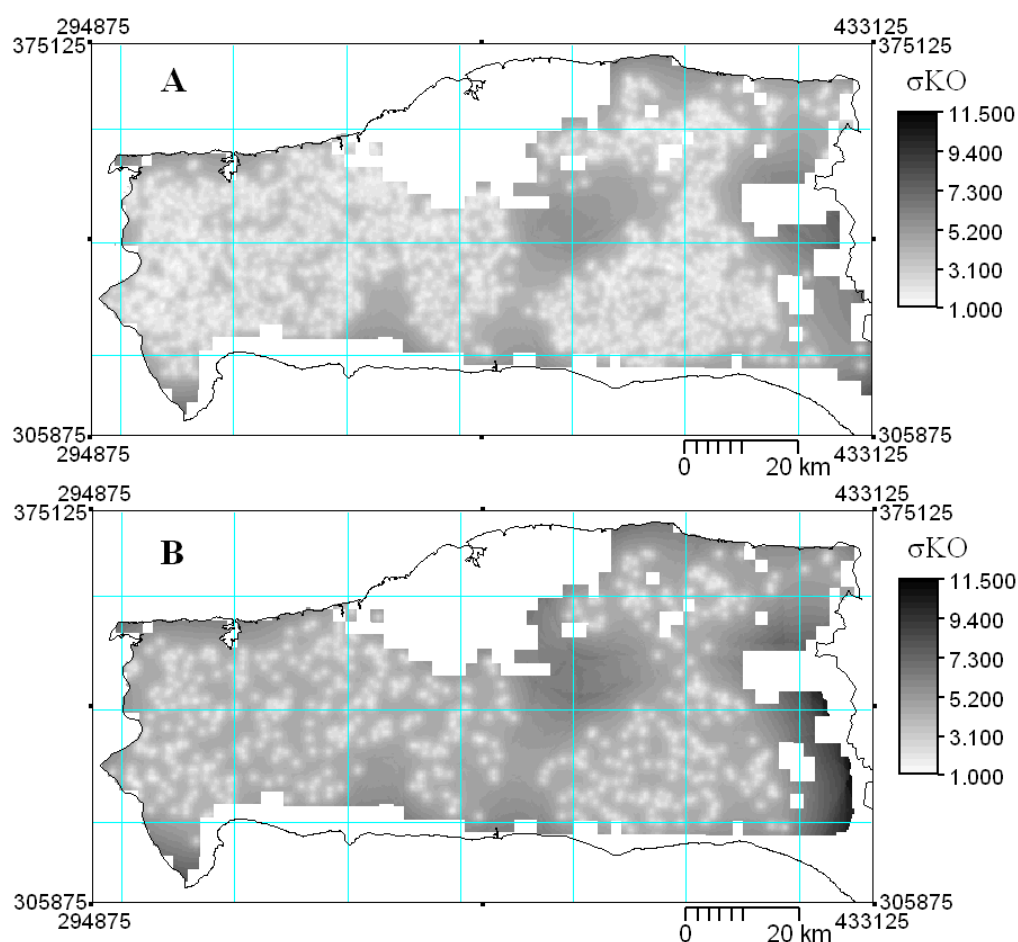
MÉTODO	<i>EM</i>	<i>ECM</i>	<i>RECM</i>
<b>1560 perfiles</b> Media=7.48 Varianza=11.85			
<i>KO</i>	-0.54	6.75	2.60
<i>KSml</i>	-1.36	7.21	2.68
<i>KTE</i>	-1.16	13.53	3.68
<i>SIMUL</i>	-0.58	7.81	2.79
<b>1000 perfiles</b> Media=7.52 Varianza=12.38			
<i>KO</i>	-4.87	30.69	5.54
<i>KSml</i>	-0.90	8.14	2.85
<i>KTE</i>	-1.32	15.31	3.91
<b>500 perfiles</b> Media=7.76 Varianza=11.86			
<i>KO</i>	-4.49	27.18	5.21
<i>KSml</i>	-1.01	7.93	2.82
<i>KTE</i>	-0.89	7.93	2.82
<b><i>RCubPer</i></b>			
<i>CLAS</i>	-0.46	8.06	2.84

La lógica de la inclusión del subtipo de suelo como variable externa, se basa en la capacidad de predicción de suelos con iguales procesos de edafogénesis, teniendo en cuenta además su localización. Isaaks y Srivastava (1989) apoyan la idea de utilizar un descriptor de la tendencia que se base en la "... génesis del fenómeno...".

La utilización de una o más variables externas con el objetivo de mejorar la predicción ha sido utilizada con éxito para la estimación del carbono (Powers y Schlesinger 2002; Mueller y Pierce, 2003).

La validación mediante la base de datos *RCHabVal* muestra que los resultados dependen del número de observaciones, y en todos los casos la estimación espacial produce un sesgo negativo reportado por el error medio (*EM*). El mejor estimador es el que logra minimizar la varianza, por lo que debe esperarse que el *ECM* sea menor que la varianza general de los valores muestreados (Cooper e Istok, 1998) y *RECM* sea cercano a cero.

El *KO* resulta el mejor estimador cuando se utilizan los 1560 puntos disponibles, en la medida que aumenta la escasez de información, modelada por la reducción aleatoria de los datos disponibles, deja de ser un buen estimador y cobran mayor importancia los métodos que utilizan una variable externa, debido a que el *KO* es sensible al número de casos que existan en la vecindad del punto a estimar. Esto puede observarse en los mapas de la varianza kriging para diferente número de datos (Figura 3A, 1560 perfiles y Figura 3B, 500 perfiles). Similares resultados obtuvieron Voltz *et al.* (1997).



**Figura 3. Mapas de varianza kriging para diferentes disponibilidades de información.  
A - 1560 perfiles, B - 500 perfiles.**



En este caso la variable externa está representada por la media de la  $RCOS$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de los perfiles incluidos en áreas de una misma especie de suelo, presentes en la región de La Habana, de acuerdo al mapa 1:250 000.

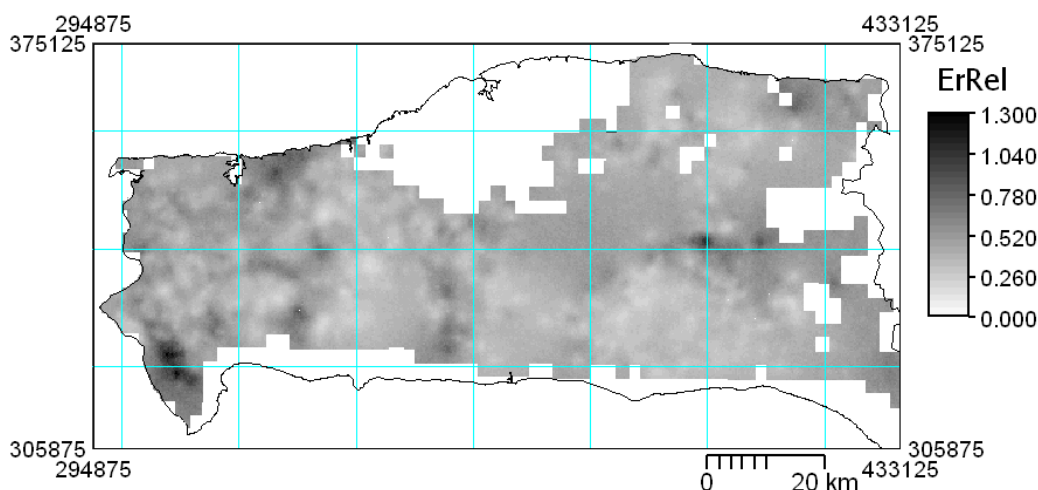
El  $KSml$  presenta la mayor estabilidad ante el cambio en el número de datos disponibles, debido a que con la ausencia de puntos en una vecindad específica para interpolar, toma más peso la variable externa. En este sentido, en la medida que se reduzca el número de datos, la estimación debe acercarse al valor de la media local (Goovaerts, 1997).

Con el  $KTE$  se obtienen resultados similares para el menor número de datos (500) pero resulta menos eficiente cuando la población de datos es mayor. Tal comportamiento se debe a que el  $KTE$  es sensible a cambios bruscos en la variable externa (Goovaerts, 1997) como es el caso de medias aritméticas calculadas por polígonos, en este caso los mejores resultados pueden obtenerse cuando se utiliza una variable externa continua, como es el caso del modelo digital de elevación (Bourennane *et al.*, 2000; Bishop y McBratney, 2001) o atributos de terreno derivados de éste (Herbst *et al.*, 2006).

### Incertidumbre de la estimación

La simulación condicional brinda muy buenos estimados del rango de valores posibles de un atributo en lugares no medidos (Burrough y McDonnell, 1998). Este tipo de estimado es necesario en la modelación.

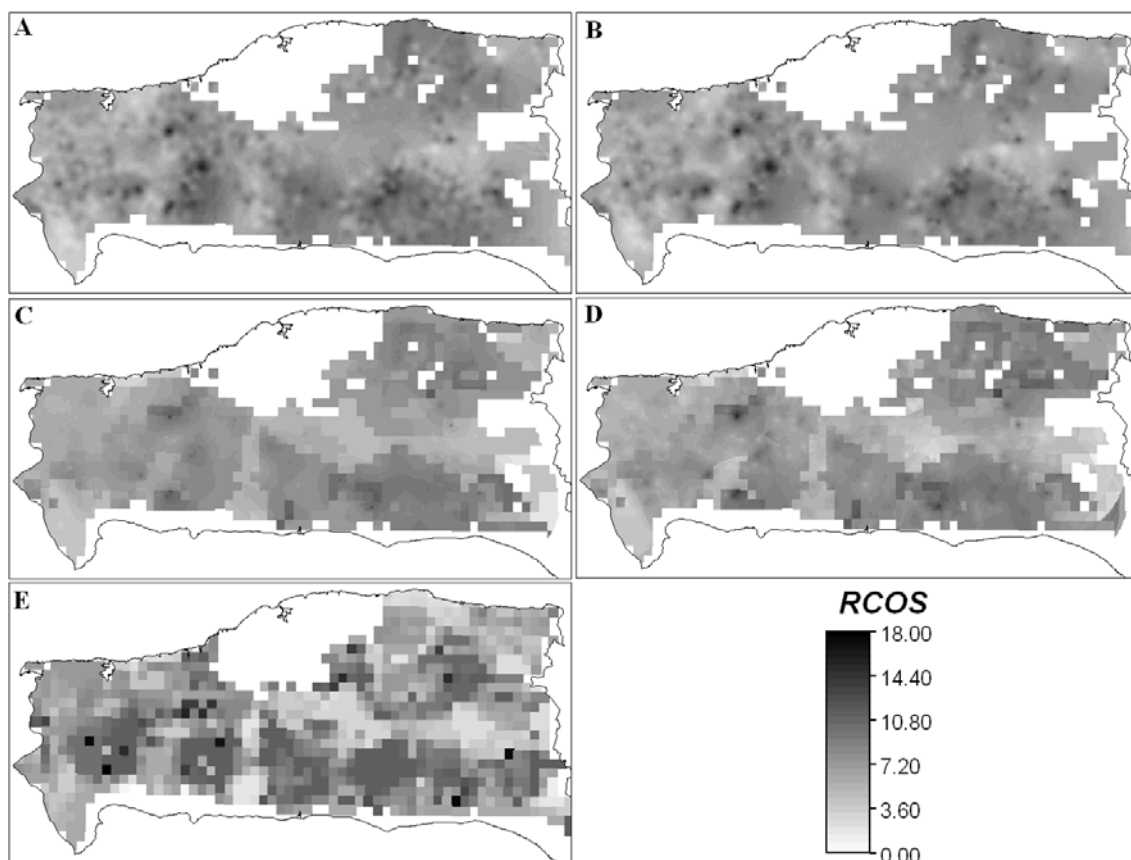
A partir del pos procesamiento de los  $L$  números de realizaciones podemos obtener el mapa del error relativo de la estimación (Figura 4) el cual no depende de la configuración espacial de los datos (muestreo) sino de la variable en sí misma. Puede compararse con el mapa de la varianza kriging, presentado en la Figura 3A, ya discutido, las zonas de más altos valores de errores se asocian a una región de inestabilidad con valores muy bajos de  $RCOS$  y no con la disponibilidad de información en esa área.



**Figura 4. Mapa de error relativo ( $ErRel$ ) de la estimación resultado del pos procesamiento de 500  $sGs$  (simulaciones Gaussianas) por el método de Monte Carlo, utilizando los datos de  $RCOS$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de 1560 perfiles de la región La Habana.**

Al igual que en el análisis de los errores en la estimación puntual, la coincidencia de los mayores valores de error relativo, en este caso con zonas de bajos valores de  $RCOS$ , significa que el error absoluto se minimiza y no afecta grandemente a la estimación total en el territorio. La simulación condicional, en este sentido, puede ser usada como estimador no exacto, rindiendo resultados similares al kriging ordinario ( $KO$ , Figura 5A) y al kriging simple con media local ( $KSml$ , Tabla 1, Figura 5C), para las zonas con

disponibilidad de información. No obstante el costo computacional es significativamente más alto y debe tenerse en cuenta.



**Figura 5. Resultados de la interpolación de  $RCOS$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) mediante: A. Kriging Ordinario (KO, 1560 perfiles), B. Simulación *multiGaussian* (SIMUL, 500 *sGs*, 1560 perfiles), C. Kriging simple con media local (KSml, 500 perfiles), D. Kriging con tendencia externa (KTE, 500 perfiles) y E. Método clasificatorio (CLAS).**

### Validación del método clasificatorio

El método de interpolación por asignación es una alternativa viable siempre que se asuman como aceptablemente ciertos los presupuestos de la estadística clásica.

Si se compara el resultado de la interpolación mediante el método clasificatorio no geostatístico (CLAS, Figura 5E) obtenido del análisis de la base de datos para toda Cuba con perfiles considerados espacialmente independientes, con el resto de los métodos de interpolación usados, se comprueba que funciona de manera adecuada, cuando la información disponible es pobre, con valores de  $RECM^{CLAS}$  igual a 2.84 por el  $RECM^{KSml}$  y el  $RECM^{KTE}$  de 2.82, que constituyen el mejor rendimiento en condiciones de escasa información. Por lo tanto, es razonablemente adecuado cuando por la misma causa de falta de información, no se pueden aplicar los métodos geostatísticos.

La aplicación de los métodos geostatísticos depende no solo del número de datos disponibles, sino de la existencia de estructura espacial a la escala de medición y la posibilidad de obtener un buen variograma, pues su calidad determina la calidad de la estimación (Isaaks y Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997; Webster y Oliver, 2001).

La incorporación de información auxiliar, representada en el estudio por el mapa de suelos como variable externa mejora la calidad de la predicción de los métodos geostatísticos, sobre todo en caso de que aunque se puedan aplicar dichos métodos, exista poca disponibilidad de información.

## CONCLUSIONES

Los métodos de interpolación geoestadísticos rinden los mejores resultados cuando existe suficiente disponibilidad de información, (e.g. kriging ordinario) y siempre que sea posible deben ser empleados para estudios regionales o locales a escalas más detalladas, pero ante la escasez de datos, simulada aquí por la reducción aleatoria de información puntual, la incorporación de variables externas mejora la calidad de la predicción de los métodos geoestadísticos en general y hace posible la estimación ante escasez de datos.

La aplicación de la simulación estocástica geoestadística, permite conocer los errores probables de la estimación espacial a partir de la información disponible, y puede emplearse como método de estimación.

El método de interpolación clasificatorio que use la media como estimador sobre la base de información externa, como el mapa de suelos, es adecuado para estudios regionales a medianas y pequeñas escalas cuando no existe estructura espacial a la escala de medición, y la media es un correcto estimador.

## BIBLIOGRAFÍA

- Balmaseda, C., D. Ponce de León, 2007. Documentación de la calidad de la información edafológica digital: Exactitud Posicional. *Cien. Téc. Agrop.*, 16 (3): 15-18.
- Balmaseda, C., D. Ponce de León. 2007. Documentación de la calidad de la información edafológica digital: Exactitud Temática. *Cien. Téc. Agrop.*, 16 (4): 79-83.
- Bishop, T. F. A. y A. B. McBratney, 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma*. 103: 149–160.
- Bourennane, H., D. King, A. Couturier, 2000. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma*, 97: 255–271.
- Burrough, P. A., y R. McDonnell, 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Oxford, 333 pp.
- Conant, R. T., G. R. Smith, y K. Paustian, 2003. Spatial Variability of Soil Carbon in Forested and Cultivated Sites. *Journal of Environmental Quality*, 32: 278-286.
- Cooper, R. M. y J. D. Istok, 1998. Geostatistics applied to groundwater contamination. I: methodology. *Journal of Environmental Engineering*, 114: 270–286.
- Deutsch, C. V. y A. G. Journel, 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, Nueva York, 340 pp.
- Don, A., J. Schumacher, M. Scherer-Lorenzen, T. Scholten, y E. D. Schulze, 2007. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites - Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141: 272–282.
- Duchaufour, P., 1968. L'Évolution des sols. En: *Bases de la edafología* [en ruso]. Progreso, Moscú, 1970, p. 423-587.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Applied Geostatistics Series, André G. Journel (Ed.). Oxford University Press, New York, 483 pp.
- Goovaerts, P. 2001. Geoestatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 103: 3-26.
- Herbst M., B. Diekkrüger, y H. Vereecken, 2006. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. *Geoderma*, 132: 206–221.
- Hibbard, K., M. Raupach, y J. Canadell, 2002. The Global Carbon Project: Linking the biophysical and human components of the carbon cycle. *Global Change*, 50: 39-41.
- Isaaks, E., y R. M. Srivastava, 1989. *Applied geostatistics*. Oxford University Press, Oxford, 561 pp.

- Journel, A. G., C. J. Huijbregts, 1978. *Mining geostatistics*. Sexta Impresión. Academic Press, Londres, 600 pp.
- Lark, R.M. 2000. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability, an approach based on the fuzzy kriging variance. *Geoderma*, 98: 35–59.
- McBratney, A. B., I. O. A. Odeh, T. F. A. Bishop, M. S. Dunbar, y T. M. Shatar, 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97: 293–327.
- Minasny B., A. B. McBratney, y K. L. Bristow, 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93: 225-253.
- Mueller, T. G., y F. J. Pierce, 2003. Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 258-267.
- Myers, D. E. 1994. Statistical methods for interpolating spatial data. *Journal for Applied Science & Computations*, 1(2). 283-318.
- Pebesma, E. J. 2000. *Gstat user's manual*. Utrecht University, The Netherlands, 100 pp.
- Pebesma, E. J., y C. G. Wesseling, 1997. Gstat a program for geostatistical modeling, prediction and simulation. *Computers and Geosciences*, 24: 17-31.
- Powers, J., y W. H. Schlesinger. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica. *Geoderma*, 109: 165-190.
- Tiurin, I.V. 1937. Leyes geográficas de la humificación [en ruso], pp. 254-268. En *La materia orgánica del suelo y su rol en la fertilidad*. Nauka, Moscú, 1968.
- Utset, A., M. E. Ruiz, J. Herrera, y D. Ponce de León, 1998. A geostatistical method for soil salinity sample site Spacing. *Geoderma*, 86: 143–151.
- Volobuev, V.P. 1963. Ecología de los suelos [en ruso]. Editorial de la Academia de Ciencias de Azerbaiján, Bakú, 254 pp.
- Voltz, M., P. Lagacherie, y X. Louchart, 1997. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *European Journal of Soil Science*, 48: 19-30.
- Wackernagel, H. 1998. *Multivariate geostatistics*. Second Edition. Springer. Berlín, 291 pp.
- Webster, R., Margaret Oliver (1992). Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *J. Soil Sci.* 43: 177–192.
- Webster, R., y M. Oliver, 2001. *Geostatistics for environmental Scientists*. Statistics in practice, Ed. Vic Barnett. John Wiley and Sons. New York, 271 pp.

# METODOLOGÍA PARA ESTABLECER LA LÍNEA BASE DE RETENCIÓN DE CARBONO EN LAS EMPRESAS FORESTALES INTEGRALES DE CUBA

## *Methodology for carbon base line determination in cuban forestry enterprises*

Alicia Mercadet Portillo y Arnaldo Álvarez Brito.  
Instituto de Investigaciones Forestales. Ciudad Habana. Cuba.  
E-mail: [mercadet@forestales.co.cu](mailto:mercadet@forestales.co.cu), [archie@minag.gov.cu](mailto:archie@minag.gov.cu)

### RESUMEN

Cuando a partir de 1993 el Instituto de Investigaciones Forestales (IIF) comenzó a desarrollar investigaciones vinculadas con el cambio climático, con la estimación de sus impactos y la formulación de estrategias de mitigación y adaptación al mismo, se hizo evidente la necesidad de elaborar una metodología propia para las condiciones de nuestro país, ya que se presentaban metodologías confeccionadas por países desarrollados, con coeficientes determinados en base a las características de sus bosques. Por tal razón, el IIF se dio a la tarea de confeccionar una metodología que respondiera a las características de las Empresas Forestales Integrales cubanas.

Como elemento principal a considerar se adoptó el criterio de que los estimados de carbono deben ser realizados a partir de las informaciones contenidas en el proyecto de ordenación forestal correspondiente a cada empresa y en particular, a partir de los datos referidos a las superficies y volúmenes de madera en pie existentes en sus plantaciones, por especie, o en sus bosques naturales, por formación forestal.

Con esta metodología es posible calcular el carbono retenido por los bosques naturales y plantaciones en las Empresas Forestales Integrales y establecer además la línea base de retención de carbono por un período de hasta 10 años, lo cual facilita a la entidad valorar anualmente el comportamiento de este parámetro.

**Palabras clave:** mitigación, retención, carbono, metodología

### SUMMARY

When in 1993 Forestry Research Institute (FRI) began to develop researches about climatic change, especially oriented to the evaluation of its impacts, the proposition of adaptation strategies and its mitigation, it was possible to identify a particular and important gap that affected the work: All available work methodologies were obtained by and also, in developed countries, and its coefficients were determined for their own forests. Because of that, FRI began to prepare a national methodology, adapted to the characteristics of Cuban Forestry Enterprises.

As a principal aspect to consider was adopted the point of view that carbon estimations must be carry out from data which should be included in the forestry project of each enterprise, especially such which were refered to surfaces and stand wood volumes, by species when they were plantations or by natural forest formation, when they were natural forests.

With that methodology it is possible to estimate for the base year, the amount of carbon which is retained by natural forests and plantations in Forestry Enterprises and also, it is possible to establish their carbon base line up to 10 year period of time. That theoretical result permits to the enterprise an annual real evaluation of that parameter.

**Key words:** Mitigation, carbon retention, methodology.

## **INTRODUCCIÓN**

Como parte de los servicios ambientales que prestan los bosques se encuentra su función como sumidero de carbono, proceso que es el resultado de la fijación de este elemento en la madera y corteza, por una parte y por otra, la acumulación de carbono en los suelos del bosque por la acción de los microorganismos, todo lo cual constituye una de las formas de mitigación del cambio climático y como consecuencia, de reducción de sus impactos negativos.

Sin embargo, la carencia de tecnologías y de definición de metodologías apropiadas en cada país para cuantificar la retención de carbono, no constituyó un problema exclusivo de Cuba ni de su Sector Forestal; por el contrario, en la medida que se generalizaba la preocupación mundial por el cambio climático, se hacía cada vez más evidente que los países del Tercer Mundo, muchos de los cuales son pequeños estados insulares semejantes a Cuba, tenían como factor común, entre otros, la falta de tecnologías apropiadas para abordar estas investigaciones.

Ante tal situación y como una alternativa que facilitara una solución a esta limitante, internacionalmente se comenzó a preparar y presentar metodologías de trabajo y coeficientes de la fracción de carbono en la madera, suelo y necromasa, que permitieran efectuar una primera estimación de las capacidades de retención de carbono.

Así, desde la segunda mitad de la década de los años 90 cuando se planteó la preparación de la Primera Comunicación Nacional de la República de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Centella, 2001), el Instituto de Investigaciones Forestales ha estado empeñado en un proceso continuo de análisis y perfeccionamiento de las metodologías y coeficientes a emplear en el Sector Forestal, tanto para estos propósitos, como para la estimación de la línea base de retención de carbono.

Luego de un proceso evaluativo que ha durado casi 10 años y de haber transitado desde el empleo de coeficientes mundiales propuestos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 1996), hasta otros similares estimados en las condiciones de los bosques centroamericanos y propuestos por el CATIE (Segura, 2001) para la región centroamericana y del Caribe, se ha formulado una primera metodología nacional para la estimación de los niveles de retención de carbono en las Empresas Forestales Integrales de Cuba.

No obstante, es preciso aclarar que esta primera propuesta aún dista de ser perfecta y en tal sentido, las investigaciones encaminadas a su mejoramiento, particularmente con relación a algunos coeficientes, se continuarán llevando a cabo y periódicamente se presentarán reportes sobre sus resultados, para facilitar su empleo práctico.

## **MÉTODO**

Como elemento principal a considerar se adoptó el criterio de que los estimados de carbono deben ser determinados a partir de las informaciones contenidas en el proyecto de ordenación forestal correspondiente a cada empresa y en particular, a partir de los datos referidos a las superficies y volúmenes de madera en pie existentes en sus plantaciones, por especie, o en sus bosques naturales, por formación forestal.

Adicionalmente, también son tomadas en consideración la superficie de áreas forestales aún no cubiertas de bosque y la superficie de áreas inforestales existentes, desglosada en ciénagas, pastizales, áreas agrícolas y otras. Son incluidos otros aspectos de importancia como:

- Superficie media anual reforestada.
- Logro promedio de las plantaciones al término de los tres años del establecimiento.

- Superficie media anual aprovechada.
- Superficie media anual afectada por incendios.

En general, la suma de estas áreas debe coincidir con la superficie total reportada para la empresa y a partir de esta caracterización, se inicia la estimación del contenido actual de carbono retenido en ella, de la siguiente forma:

### **1) Áreas boscosas**

En las áreas cubiertas de bosques el carbono es almacenado en:

#### La biomasa

- La biomasa aérea (madera de los fustes principales, ramas y follaje).
- La biomasa soterrada (raíces).

La necromasa (árboles muertos en pie y en el suelo; hojarasca).

#### La materia orgánica del suelo

Todos estos componentes han sido considerados en la metodología propuesta.

El procedimiento general seguido para el cálculo del carbono en las áreas boscosas consiste en:

- a. Convertir los volúmenes de madera en pie de los fustes principales en biomasa. Para ello, se emplea la base de datos sobre densidad de la madera facilitada con la metodología (Anexo 1, Álvarez\*, et al, inédito).
- b. A partir de la biomasa de los fustes principales, se estima la biomasa aérea, mediante el empleo del coeficiente de expansión (Segura, 2001), ajustado en base a la cantidad de biomasa de fustes por hectárea.
- c. A partir de la biomasa aérea, se estima la biomasa soterrada (Loguercio, 2002).
- d. Se calcula la biomasa del bosque como la suma de los puntos (2) y (3) antes explicados.
- e. A partir de la superficie cubierta se estima la necromasa (Harmon, et al, 2001).
- f. A partir de la biomasa del bosque, se calcula el contenido de carbono, empleando para ello la base de datos suministrada con la metodología (Anexo 2, Mercadet\*, inédito).
- g. El carbono contenido en los suelos se estima a partir de su superficie y del tipo de bosque existente, según los coeficientes ofrecidos por la metodología (Bolin y Sukumar, 2000).

### **2) Áreas por forestar y/o reforestar.**

En estas áreas el carbono queda retenido en su cobertura vegetal herbácea-arbustiva y en el suelo. Para ambos casos han sido establecidos los coeficientes correspondientes por unidad de superficie.

En ocasiones, la vegetación arbustiva presente está caracterizada por la presencia de Marabú (*D. sinerea*) o especies similares, aspecto que ha sido tomado en consideración para los cálculos (Herrero, 2004).

### **3) Áreas inforestales.**

Aunque estas áreas son inapropiadas o no están destinadas a ser cubiertas por bosques, una parte de ellas puede retener carbono en su cubierta vegetal y/o en sus suelos, razón por la cual es preciso desglosar su superficie en ciénagas, pastizales, áreas agrícolas y otras, estimándose su contenido de carbono a partir de los coeficientes brindados por la metodología para cada caso (Bolin y Sukumar, 2001; ICRAF-ASB, 2001).

\* Para acceder a los Anexos 1 y 2, valores promedio de fracción de carbono de la madera por formaciones naturales y coeficientes de carbono en los suelos, debe contactar con los autores.

La suma del contenido de carbono retenido por cada una de las partes (bosques, área no cubierta y área inforestal) permite estimar el total correspondiente a la empresa, valor que siempre será calculado por defecto con respecto al real, debido a que no son incluidas las áreas de bosque en desarrollo (brinzales) y de plantaciones menores de tres años de establecidas, porque no tributan volúmenes de fuste principal al proyecto de ordenación, aunque sí retienen carbono. De contarse con las superficies de estas áreas, puede reducirse el nivel de subestimación del total de carbono retenido, al dárseles igual tratamiento que el aplicado a las áreas por forestar y/o reforestar.

De esta forma, se alcanzará el valor inicial de la línea base de carbono de la empresa.

Sin embargo, es preciso tener presente que el nivel de cobertura boscosa de una empresa forestal no es una cifra constante en el tiempo, sino que varía de año en año y con él, su capacidad de retención de carbono y su línea base, lo cual también debe ser considerado por la metodología.

Así, se procede a estimar cómo será la dinámica de cambio de la superficie cubierta de bosques de la empresa por año, empleando para ello, entre otros, los datos de los incrementos medio anuales de sus bosques y los valores medios anuales de las áreas reforestada, aprovechada y quemada, para estimar con estos resultados la evolución temporal futura de la línea base de carbono de la empresa bajo su actual régimen de desarrollo, para un período máximo de 10 años.

La definición de estos elementos permite a la empresa poder evaluar cómo influiría en ellos la eventual ejecución de un proyecto de reforestación adicional a su plan anual, vinculado al Mecanismo de Desarrollo Limpio o por los impactos esperados asociados a la ocurrencia de un evento meteorológico de intensidad que afecte su territorio, aspectos que pueden ser abordados mediante la aplicación de técnicas de modelación.

## SECUENCIA METODOLÓGICA

### 1. Información a recopilar en la Empresa

- a) Nombre de la empresa.
- b) Localización y mapa.
- c) Superficie total [ha].
  - De ella, superficie para bosques [ha].
    - o Superficie por categoría de bosques [ha].
    - o Superficie con bosques naturales [ha].
      - Superficie por tipo de formación boscosa [ha].
    - o Superficie con plantaciones [ha].
      - Superficie por especie [ha].
    - o Superficie por forestar y/o reforestar [ha].
      - Superficie plantada anualmente [ha] y logro de las plantaciones (%).
  - De ella, superficie inforestal [ha].
    - o Superficie de pastizales [ha].
    - o Superficie de ciénagas [ha].
    - o Superficie agrícola [ha].
    - o Superficie de otras áreas [ha].
    - o Otras superficies de infraestructura [ha].
- d) Volumen total en pie [m<sup>3</sup>].
  - Volumen de los bosques naturales [m<sup>3</sup>].
    - o Volumen por formación boscosa en cada categoría de bosque [m<sup>3</sup>].
    - o IMA del volumen de los bosques naturales [m<sup>3</sup>].
  - Volumen de las plantaciones [m<sup>3</sup>].



- Volumen por especie [m<sup>3</sup>].
  - IMA del volumen de las plantaciones [m<sup>3</sup>].
  - De no contarse con los IMA particulares (bosques naturales y plantaciones), solicitar el IMA general de los bosques de la empresa.
- e) Otros datos.
- Superficie media anual talada (tala rasa) [ha].
  - Volumen medio anual extraído por otras talas (sanitaria, selectiva, etc.) [m<sup>3</sup>]
  - Superficie media anual de bosques perdida por incendios [ha].

## 2. Cálculo del carbono retenido en las plantaciones

### 2.1. Plantaciones establecidas (con 3 ó más años de iniciadas)

Para cada especie:

#### a) Cálculo del carbono retenido por la biomasa

- Verificar que el rendimiento medio de madera por hectárea (Volumen/Superficie) sea un valor lógico.
- Convertir el volumen de los fustes en biomasa (BM<sub>F</sub> [t]):

$$BM_F (t) = \text{Volumen [m}^3] \times \text{Densidad [kg.m}^{-3}] \times 1000^{-1}$$

- Para ello se utilizará la base de datos de densidad (Anexo 1, Álvarez, et al, inédito), considerando que:
  - En primera instancia se utilizará la Densidad Básica de la especie;
  - De no tenerse este valor, se empleará la Densidad Seca al Aire de la especie;
  - Si este valor tampoco está disponible, se utilizará la Densidad Básica del género (e.g.: *Pinus spp.*);
  - Si no está, se hará el cálculo con la Densidad Seca al Aire del género;
  - Si ninguno de estos valores está disponible, se tomará la Densidad Promedio de la madera de los Bosques Tropicales Americanos (D<sub>PBTA</sub> = 600 kg/m<sup>3</sup>).
- Calcular la biomasa aérea (fustes, ramas y follaje) (BM<sub>AFT</sub>), utilizando el Factor de Expansión de la Biomasa (FEB) (Segura, 2001):

$$BM_A = BM_F \times FEB \quad (FEB = e^{(3,213 - 0,506 \ln BM_F)})$$

El FEB tendrá como valor mínimo 1,74 y como valor máximo 3,00.

- Calcular la biomasa de las raíces (BM<sub>R</sub>) a partir de la biomasa aérea (Loguercio, 2002):

$$BM_R = BM_A \times 0,3$$

- Calcular la biomasa total (BM<sub>T</sub>):

$$BM_T = BM_A + BM_R$$

- Estimar el carbono retenido (CR<sub>BTPT</sub>) en la biomasa total de las plantaciones:

$$CR_{BTPT} = BM_T \times FCC_M$$

- Para ello, utilizar:

- En primera instancia, la Fracción de Contenido de Carbono en la Madera ( $FCC_M$ ) correspondiente a la especie (Anexo 2, Mercadet, inédito).
- De no tenerse ese valor, emplear la Fracción de Contenido Medio de Carbono ( $FCCM_M$ ) en la madera planteado al final del Anexo 2, según corresponda .

**b) Cálculo del carbono retenido en el suelo**

- Estimar el carbono retenido en el primer metro de profundidad del suelo ( $CR_{SPT}$ ), utilizando el valor promedio de carbono retenido por los bosques tropicales ( $CR_{SBT}$ ; (Bolin y Sukumar, 2000):

$$CR_{SPT} [t] = \text{Superficie [ha]} \times C_{SBT} [t.ha^{-1}] \quad (CR_{SBT} = 123 t.ha^{-1})$$

- Para el caso de los pinares,  $CR_{SBT} = 80 t.ha^{-1}$  (Bolin y Sukumar, 2000)

- c) Cálculo del total de carbono retenido por especie: Se sumarán los resultados alcanzado en los incisos (a) y (b).

$$CR_{PT} = CR_{BTPT} + CR_{SPT}$$

Para el total de carbono total retenido por las plantaciones establecidas ( $CR_{PT}$ ) se sumarán los resultados totales alcanzados para cada especie.

**2.2. Plantaciones en establecimiento (con menos de 3 años de iniciadas).**

- a) Cálculo del promedio de carbono retenido por hectárea anualmente, por la biomasa de las plantaciones establecidas ( $CRP_{BPT}$ ):

$$CRP_{BPT} [t.ha^{-1}.año^{-1}] = CR_{BPT} [t] / S_{PT} [ha] / TT [años]$$

Donde:

- $CR_{BPT}$ : carbono retenido por la biomasa de las plantaciones establecidas.
- $S_{PT}$ : superficie de las plantaciones establecidas.
- $TT$ : turno promedio de tala de las plantaciones.

- b) Cálculo del carbono retenido por la biomasa de las plantaciones en establecimiento ( $CR_{BPTE}$ ):

$$CR_{BPTE} [t] = 3 [años] \times CRP_{BPT} [t.ha^{-1}.año^{-1}] \times S_{PTE} [ha]$$

Donde:

- $S_{PTE}$ : superficie de las plantaciones en establecimiento.

- c) Cálculo del carbono retenido por el suelo de las plantaciones en establecimiento ( $CR_{SPTE}$ ):

- Estimar el carbono retenido en el primer metro de profundidad del suelo ( $CR_{SPTE}$ ), utilizando el valor de carbono retenido en el suelo de los bosques tropicales ( $C_{SBT}$ ; (Bolin y Sukumar, 2000):

$$CR_{SPTE} [t] = S_{PTE} [ha] \times C_{SBT} [t.ha^{-1}] \quad (C_{SBT} = 123 t.ha^{-1})$$

- Para el caso de los pinares,  $C_{SBT} = 80 t.ha^{-1}$  (Bolin y Sukumar, 2000)

- a) Cálculo del carbono total retenido por las plantaciones en establecimiento ( $CR_{PTE}$ ):

Será la resultante de sumar los valores obtenidos en los incisos (b) y (c).

$$CR_{PTE} = CR_{BPTE} + CR_{SPTE}$$

Para el total de carbono total retenido por las plantaciones en establecimiento ( $CR_{PTE}$ ) se sumarán los resultados totales alcanzados para cada especie.

### 3. Cálculo del carbono retenido en los bosques naturales.

Para cada formación forestal:

#### a) Cálculo del carbono retenido por la biomasa

- Verificar que el rendimiento medio de madera por hectárea (Volumen/Superficie) sea un valor lógico.
- Convertir el volumen de los fustes en toneladas de biomasa ( $BM_F$ ):

$$BM_F = \text{Volumen [m}^3] \times \text{Densidad [kg.m}^{-3}] \times 1000^{-1}$$

Para ello se utilizará la Densidad Básica Media de la formación, según los valores (en  $\text{kg.m}^{-3}$ ), estimados a partir de los valores correspondientes a las especies que la integran (Álvarez, et al, inédito)

- Calcular la biomasa aérea (fuste, ramas y follaje) ( $BM_A$ ), utilizando el Factor de Expansión de la Biomasa (FEB) (Segura, 2001):

$$BM_A = BM_F \times FEB \quad (FEB = e^{[3,213 - 0,506 \ln BM_F]})$$

El FEB tendrá como valor mínimo 1,74 y como valor máximo 3,00.

- Calcular la biomasa de las raíces ( $BM_R$ ) (Loguercio, 2002):

$$BM_R = BM_A \times 0,3$$

- Calcular la biomasa total ( $BM_T$ ):

$$BM_T = BM_A + BM_R$$

- Estimar el carbono retenido por la formación natural ( $CR_{BFN}$ ) en la biomasa total, utilizando la Fracción de Contenido Medio de Carbono en la madera ( $FCMC_M$ ):

$$CR_{BFN} = BM_T \times FCMC_M$$

Para ello utilizar el Anexo 2, según corresponda (Mercadet, inédito).

#### b) Cálculo del carbono retenido en el suelo

Estimar el contenido de carbono en el primer metro de profundidad del suelo:

$$CR_{SFN} [t] = S_{FN} [ha] \times CR_{SFN} [t.ha^{-1}]$$

Donde:

- $S_{FN}$  superficie de la formación.
- $CR_{SFN}$  carbono retenido en el suelo de la formación natural, según los valores reportados por (Bolin y Sukumar, 2000; Nabuurs y Mohren, 1993; ICRAF-ASB, 2001 y Adger y Brown, 1994).

- c) Cálculo del total de carbono retenido por la formación. Se sumarán los resultados alcanzado en los incisos (a) y (b).

$$CR_{FN}[t] = CR_{BFN} + CR_{SFN}$$

Para el total de carbono retenido por los bosques naturales ( $CR_{BN}$ ) se sumarán los resultados totales alcanzados para cada formación.

#### 4. Cálculo del carbono retenido en la necromasa.

- a) Calcular la necromasa (NM) existente en las plantaciones y bosques naturales, excepto para la formación manglar (Harmon, et al, 2001).

$$NM_{PT} [t] = S [ha] \times 18,2 [t.ha^{-1}]$$

$$NM_{FN} [t] = S [ha] \times 18,2 [t.ha^{-1}], \text{ donde } S: \text{superficie}$$

- b) Calcular el carbono contenido en la necromasa. ( $CR_{NM}$ )

Multiplicar la necromasa estimada por el carbono correspondiente a la especie o formación forestal correspondiente (Anexo 2).

$$CR_{NMPT}[t] = NM_{PT} \times FCMC_M$$

$$CR_{NMFN}[t] = NM_{FN} \times FCMC_M$$

Para el total de carbono retenido por la necromasa del total de las plantaciones establecidas ( $CR_{NMPT}$ ) se sumarán los resultados totales alcanzados para cada especie. Para el total de carbono retenido por la necromasa de los bosques naturales ( $CR_{NMFN}$ ) se sumarán los resultados totales alcanzados para cada formación.

#### 5. Cálculo del carbono retenido en las áreas por (re)forestar.

- a) Cálculo del carbono retenido por la biomasa ( $CR_{BAR}$ )

$$CR_{BAR} [t] = S [ha] \times 18,2 [t.ha^{-1}]$$

Estimar el contenido de carbono utilizando la superficie por cubrir y como coeficiente específico de carbono en la vegetación, el valor  $15 t.ha^{-1}$  (Adger y Brown, 1994). En caso que parte de esta área esté reportada como cubierta por Marabú o especies similares, utilizar el valor  $29,4 t.ha^{-1}$  (Herrero, 2004).

- b) Cálculo del carbono retenido en el suelo ( $CR_{SAR}$ )

Estimar el contenido de carbono en el primer metro de profundidad del suelo, utilizando la superficie por cubrir y como coeficiente específico de carbono en el suelo, el valor  $38 t.ha^{-1}$  (Adger y Brown, 1994).

$$CR_{SAR} [t] = S [ha] \times 38 [t.ha^{-1}]$$

- c) Cálculo del total de carbono retenido por las áreas por (re)forestar.

Se sumarán los resultados alcanzado en los incisos (a) y (b).

$$CR_{AR} = CR_{BAR} + CR_{SAR}$$

## 6. Cálculo del carbono retenido en las áreas inforestales.

Emplear, según el caso los coeficientes específicos de carbono ( $t \cdot ha^{-1}$ ) para la vegetación y el suelo (Bolin y Sukumar, 2000 y ICRAF-ASB, 2001).

$$CR_{BAI}[t] = S [ha] \times \text{coeficiente} [t \cdot ha^{-1}]$$
$$CR_{SAI}[t] = S [ha] \times \text{coeficiente} [t \cdot ha^{-1}]$$

Para calcular el total de carbono retenido, sumar los dos valores de cada condición.

$$CR_{AI} = CR_{BAI} + CR_{SAI}$$

## 7. Cálculo del total de carbono retenido ( $CR_0$ ) por la empresa en el año base.

Sumar los totales de carbono obtenidos para las plantaciones establecidas y en establecimiento, los bosques naturales, las áreas por (re)forestar y las áreas inforestales.

$$CR_0 = CR_{PT} + CR_{PTE} + CR_{BN} + CR_{NMPT} + CR_{NMBN} + CR_{AR} + CR_{AI}$$

## 8. Cálculo de los cambios anuales de la línea base de carbono de la empresa.

8.1. La variación media anual de la superficie cubierta ( $VMA_{SC}$ ) de la empresa se define por:

$$VMA_{SC} [ha \cdot \text{año}^{-1}] = (SM_{RF} [ha \cdot \text{año}^{-1}] \times CL) - (SM_{TR} [ha \cdot \text{año}^{-1}] + SM_Q [ha \cdot \text{año}^{-1}])$$

Donde:

- $SM_{RF}$ : superficie media anual (re)forestada.
- $CL$ : coeficiente promedio de logro de las plantaciones ( $0,00 \leq CL \leq 1,00$ ).
- $SM_{TR}$  superficie media anual de talas rasas.
- $SM_Q$ : superficie media anual quemada por incendios.

Si este valor es positivo, la superficie cubierta de la empresa aumenta anualmente; sin embargo, si es negativo, significa que la empresa irá reduciendo paulatinamente sus áreas boscosas.

De producirse este último caso será preciso reanalizar los indicadores básicos de la silvicultura en la empresa, antes de continuar la determinación de la línea base de carbono.

8.2. El tiempo ( $T$ ) requerido por la empresa para cubrir todo su patrimonio se define por:

$$T [\text{años}] = S_{PRF} [ha] / VMA_{SC} [ha \cdot \text{año}^{-1}]$$

Donde:

- $S_{PRF}$ : superficie total por (re)forestar de la empresa.
- $VMA_{SC}$  variación media anual de la superficie cubierta.

8.3. La variación de la línea base de carbono de la empresa en el tiempo queda definida por:

$$\Delta C_N [t] = CR_{(N-1)} + (C_{IMAFN} + C_{IMAPT} + \{N \times C_{ARFI} \times CL\}) - (C_{TR} + C_{OT} + C_{INC} + C_{ARF0})$$

Donde:

- $\Delta C_N$ : valor del acumulado de carbono para el año  $N$ .
- $CR_{(N-1)}$  carbono retenido el año  $(N - 1)$ .

- $C_{\text{IMAFN}}$ : carbono aportado por el incremento de la biomasa de los bosques naturales.
- $C_{\text{IMAPT}}$  carbono aportado por el incremento de la biomasa de las plantaciones existentes.
- $N$ : año para el que se precisa obtener el valor de  $\Delta C_N$  ( $1 \leq N \leq 10$ ).
- $C_{\text{ARFI}}$ : carbono anual que aporta el área (re)forestada.
- $CL$  coeficiente promedio de logro de las plantaciones ( $0,00 \geq CL \geq 1,00$ ).
- $C_{\text{TR}}$ : carbono retirado del bosque por las talas rasas.
- $C_{\text{OT}}$ : carbono retirado del bosque por otras talas.
- $C_{\text{INC}}$ : carbono liberado por los incendios forestales.
- $C_{\text{ARF0}}$ : carbono aportado antes de la plantación por el área (re)forestada al año  $(N-1)$ .

Para la obtención de cada una de las expresiones se procede de la forma siguiente:

a) Cálculo del carbono aportado por el incremento de la biomasa de los bosques naturales ( $C_{\text{IMABN}}$ ).

$$C_{\text{IMAFN}} [\text{t} \cdot \text{año}^{-1}] = \text{IMA}_{\text{FN}} [\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}] \times (\text{CR}_{\text{FN}} [\text{t}] / \text{V}_{\text{FN}} [\text{m}^3]) \times S_{\text{FN}} [\text{ha}]$$

Donde:

- $\text{IMA}_{\text{FN}}$ : incremento medio anual de los bosques naturales de la empresa.
- $\text{CR}_{\text{FN}}$ : carbono total retenido por la biomasa (aérea y soterrada) de los bosques naturales.
- $\text{V}_{\text{FN}}$ : volumen total en pie de los bosques naturales.
- $S_{\text{FN}}$ : superficie de bosques naturales.

b) Cálculo del carbono aportado por el incremento de la biomasa de las plantaciones ( $C_{\text{IMAPT}}$ ).

$$C_{\text{IMAPT}} [\text{t} / \text{año}] = \text{IMA}_{\text{PT}} [\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}] \times (\text{CR}_{\text{BP}} [\text{t}] / \text{V}_{\text{PT}} [\text{m}^3]) \times S_{\text{TPT}} [\text{ha}]$$

Donde :

- $\text{IMA}_{\text{PT}}$ : incremento medio anual de las plantaciones de la empresa.
- $\text{CR}_{\text{BP}}$ : carbono total retenido por la biomasa (aérea y soterrada) de las plantaciones (establecidas y en establecimiento).
- $\text{V}_{\text{PT}}$ : volumen total en pie de las plantaciones.
- $S_{\text{TPT}}$ : superficie total de plantaciones (establecidas y en establecimiento) en el año base.

c) Cálculo del carbono anual que aporta el área (re)forestada ( $C_{\text{ARFI}}$ ).

$$C_{\text{ARFI}} [\text{t} / \text{año}] = (\text{CR}_{\text{TP}} [\text{t}] / S_{\text{TP}} [\text{ha}] / \text{TT} [\text{años}]) \times (\text{SM}_{\text{RF}} [\text{ha}] \times \text{CL} [\text{s/u}])$$

Donde:

- $\text{CR}_{\text{TP}}$ : carbono total retenido (biomasa y suelo) por las plantaciones (establecidas).
- $S_{\text{TP}}$ : superficie total de plantaciones (establecidas) de la empresa.
- $\text{TT}$ : turno medio de tala de las plantaciones.
- $\text{SM}_{\text{RF}}$ : superficie media anual reforestada.
- $CL$ : coeficiente promedio de logro de las plantaciones ( $0,00 \leq CL \leq 1,00$ ).

d) Cálculo del carbono retirado del bosque por las talas rasas ( $C_{\text{TR}}$ ).

$$C_{\text{TR}} [\text{t}] = ((\text{CR}_{\text{BABN}} [\text{t}] + \text{CR}_{\text{BAP}} [\text{t}]) / \{S_{\text{BN}} [\text{ha}] + S_{\text{TP}} [\text{ha}]\}) \times \text{SM}_{\text{TR}} [\text{ha}]$$

Donde:

- $\text{CR}_{\text{BABN}}$ : carbono total retenido por la biomasa aérea de los bosques naturales.

- CR<sub>BAP</sub>: carbono total retenido por la biomasa aérea de las plantaciones.
- S<sub>BN</sub>: superficie total de bosques naturales de la empresa.
- S<sub>TP</sub>: superficie total de plantaciones (establecidas) de la empresa.
- SM<sub>TR</sub>: superficie promedio anual de talas rasas.

e) Cálculo del carbono retirado del bosque por otras talas (C<sub>OT</sub>).

$$C_{OT} [t] = V_{OT} [m^3] \times D_{PBTA} [kg.m^{-3}] \times FCMC_M [s/u] \times 10^{-3}$$

Donde:

- V<sub>OT</sub>: volumen de madera extraído del bosque por otras talas.
- D<sub>PBTA</sub>: densidad promedio de los bosques tropicales americanos (600 kg.m<sup>-3</sup>).
- FCMC<sub>M</sub>: fracción de contenido medio de carbono en la madera (FCMC<sub>M</sub>) (Anexo 2, final).

f) Cálculo del carbono liberado por los incendios forestales (C<sub>INC</sub>) ocurridos.

$$C_{INC} [t] = \{(CR_{BABN} [t] + CR_{BAP} [t]) / (S_{BN} [ha] + S_{TP} [ha])\} \times SM_Q [ha]$$

Donde:

- CR<sub>BABN</sub>: carbono total retenido por la biomasa aérea de los bosques naturales.
- CR<sub>BAP</sub>: carbono total retenido por la biomasa aérea de las plantaciones (establecidas y en establecimiento).
- S<sub>BN</sub>: superficie total de bosques naturales de la empresa.
- S<sub>TP</sub>: superficie total de plantaciones de la empresa (establecidas y en establecimiento).
- SM<sub>Q</sub>: superficie promedio de bosque quemado anualmente.

g) Cálculo del carbono aportado antes de la plantación, por el área (re)forestada el año base (C<sub>ARF0</sub>).

Partiendo de que esta área ya fue considerada como parte de la superficie por (re)forestar en la obtención del valor inicial de retención de carbono por la empresa, al ser ahora considerada como área ya (re)forestada por el inciso (c), es preciso reajustar su aporte de carbono removiendo el valor inicial. Para ello, se utilizará una de las siguientes expresiones:

Si no se consideró cubierta por Marabú o especies similares.

$$C_{ARF0} [t] = 15 [t \cdot ha^{-1}] \times SM_{RF} [ha]$$

Donde:

- SM<sub>RF</sub>: superficie media (re)forestada anualmente.
- Si se consideró cubierta por Marabú o especies similares.

$$C_{ARF0} [t] = 29,4 [t \cdot ha^{-1}] \times SM_{RF} [ha]$$

Donde:

- SM<sub>RF</sub>: superficie media (re)forestada anualmente.

## BIBLIOGRAFÍA

Adger y Brown (1994). En: M. Kanninen. 2001. Bosques tropicales y ciclo de Carbono. CATIE. Curso Internac. "Proyecto de Cambio Climático en los Sectores Forestal y Energético. Oportunidades de Desarrollo para los países Latinoamericanos".

- Álvarez, A.; Alicia Mercadet; L. Yero y J. L. Rodríguez. Inédito. Base de datos sobre densidad de la madera de especies forestales arbóreas. Instituto Investigaciones Forestales. 20p.
- Bolin y Sukumar. 2000. En: M. Kanninen. 2001. Bosques tropicales y ciclo de Carbono. CATIE. Curso Internac. "Proyecto de Cambio Climático en los Sectores Forestal y Energético. Oportunidades de Desarrollo para los países Latinoamericanos". CATIE-PNUD, C. Rica, 24-28 septiembre
- Centella, A.; Llanes, J. y Paz, L. 2001. Primera Comunicación Nacional de la República de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. 169 p
- Harmon, M.E.; O.N. Krankina; M. Yatskov, and E. Matthews. 2001. Predicting broad-scale carbon stores of woody detritus from plot-level data. P. 533-552. In: Lal, R.; J. Kimble; B.A. Stewart. Assessment Method for Soil Carbon, CRC Press, New York
- Herrero, J.A. *et al.* 2004. Apoyo a la potencialidad y manejo de las plantaciones forestales dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Proyecto preparado por la Dirección Forestal. MINAG. 22 p.
- ICRAF-ASB. En: M. Kanninen. 2001. Bosques tropicales y ciclo de Carbono. CATIE. Curso Internac. "Proyecto de Cambio Climático en los Sectores Forestal y Energético. Oportunidades de Desarrollo para los países Latinoamericanos". CATIE-PNUD, C. Rica, 24-28 septiembre
- IPCC. 1996. Revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Workbook. CATIE-PNUD, C. Rica, 24-28 septiembre Module 5: Land-Use Change & Forestry. 56 p
- Loguercio, G.A. 2002. Fijación de carbono: Un beneficio adicional para proyectos forestales en Patagonia. Patagonia Forestal 8 N° 2. 45p.
- Mercadet, Alicia *et al.* Inédito. Contenido de carbono y de nitrógeno en la madera y la corteza de especies forestales arbóreas existentes en Cuba. Primer reporte. Instituto Investigaciones Forestales. 5p.
- Nabuurs y Mohren. 1993. En: M. Kanninen. 2001. Bosques tropicales y ciclo de Carbono. CATIE. Curso Internac. "Proyecto de Cambio Climático en los Sectores Forestal y Energético. Oportunidades de Desarrollo para los países Latinoamericanos". CATIE-PNUD, C. Rica, 24-28 septiembre
- Segura, Milena. 2001. Estimación de Carbono en Ecosistemas Tropicales: Los aportes de modelos de biomasa. En: Curso Internacional "Proyecto de Cambio Climático en los Sectores Forestal y Energético: Oportunidades de Desarrollo para Países Latinoamericanos". CATIE-PNUD, C. Rica, 24-28 septiembre



# RESPUESTA ADAPTATIVA DE ESPECIES FORESTALES TROPICALES DE ZONAS MONTAÑOSAS AL EFECTO INVERNADERO

## *Adaptative response of tropical forest species of mountainous areas to the greenhouse warming*

Orlidia Hechavarría Kindelán y Arnaldo Álvarez Brito  
Instituto de Investigaciones Forestales. Ciudad Habana, Cuba.  
[orlidia@forestales.co.cu](mailto:orlidia@forestales.co.cu)

### RESUMEN

Durante el período 1989-1999 se evaluaron cuatro fenofases con sensibilidad ambiental creciente (permanencia foliar, brotación foliar, fructificación y floración) en tres especies forestales (*Magnolia cubensis* Urb. subsp. *acunae* Imch. [Mantequero], endémico local; *Juglans jamaicensis* subsp. *jamaicensis* C. DC. [Nogal del país], endémico de las Antillas Mayores, excepto Jamaica y *Laurocerasus occidentalis* (Sw.) Roem. [Cuajaní ó Almendro], que se distribuye por toda Cuba, Las Antillas y América Central), propias de Tope de Collantes, macizo de Guamuhaya, a unos 650 m snm. La comparación de los dendrofenogramas obtenidos para cada especie y fenofase en los años con temperatura mínima media anual igual o inferior a 16.0 °C o mayor que ese valor evidenció marcadas diferencias en el comportamiento de las fenofases en ambos grupos de años. Estos resultados indican que un aumento de 2 °C en la temperatura mínima media anual en esta zona montañosa puede inducir alteraciones en la respuesta adaptativa de los árboles al efecto invernadero producido por el cambio climático.

**Palabras claves:** cambio climático, efecto invernadero, impacto, adaptación, fenología.

### ABSTRACT

During the period 1989-1999 four phenofases with high environmental sensibility were evaluated (foliage sprouting, permanency of foliage, flowering and fructification) in three arboreal forest species with growing genetic adaptability (*Magnolia cubensis* Urb. subsp. *acunae* Imch. [Mantequero], local endemic; *Juglans jamaicensis* ssp. *jamaicensis* C. AD. [Nogal del país], endemic of the biggest Antilles, except Jamaica and *Laurocerasus occidentalis* (Sw.) Roem. [Cuajaní or Almendro] that is distributed by all Cuba, The Antilles and Central America), characteristic of Tope de Collantes place, in Guamuhaya mountain range, at the south area of the central region of Cuba, to about 650 m over sea level. It was made a comparison of the obtained graphics for each species and phenofase in two groups of years: the first one with same or inferior annual mean minimum temperature to 16.8 °C Results evidenced marked differences in the behaviour of phenofases in both groups of years, These results indicate that an increase of 2 °C in the annual mean minimum temperature can induce important alterations in the adaptative response of the trees to the greenhouse effect taken place by the climatic change and that alterations may even be superiors to the prospective ones.

**Key words:** climatic change, greenhouse effect, impact, adaptation, phenology.

## INTRODUCCION

Numerosos son los reportes internacionales que han alertado sobre los efectos ya registrados y los esperables, derivados del continuado aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Entre se destaca el Tercer Reporte del IPCC (2001) y también a nivel nacional se registran diversas informaciones relacionadas con las implicaciones de este tema en varios sectores económicos, siendo quizás la más completa hasta el momento, la presentada por Cuba (Centella *et al.*, 2001) a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

El Sector Forestal cubano ha sido uno de los pioneros en los trabajos nacionales desarrollados en este campo, tanto en lo que a la evaluación de vulnerabilidades, impactos y estrategias de adaptación se refiere, como en lo concerniente al inventario de su capacidad como reservorio o sumidero y a la formulación de estrategias de mitigación. Sin embargo, aun cuando se constatan avances sostenidos en los resultados alcanzados, continúan existiendo brechas en el conocimiento que es preciso salvar para poder alcanzar un mayor nivel de integración, reducir las incertidumbres que acompañan a los análisis que se formulan para los diversos escenarios esperados y perfeccionar las bases existentes con vistas a la adopción de decisiones.

Un aspecto especialmente sensible en lo concerniente a los impactos pronosticados ante el cambio climático es la capacidad adaptativa de la flora forestal para enfrentar el ya comprobado aumento de la temperatura del aire, así como la identificación de los impactos que ello podrá producir sobre el comportamiento habitual de este tipo de plantas. Una primera aproximación de estos elementos es abordada en el presente trabajo.

## MATERIALES Y METODOS

Entre los años 1989 y 1999 se evaluó la fenología de tres especies forestales, ubicadas en Tope de Collantes, macizo de Guamuhaya, en la zona sur de la región central de Cuba, a 650 m snm (Tabla 1). Las especies forestales evaluadas fueron:

- *Magnolia cubensis* Urb. subsp. *acunae* Imch. (Mantequero), endémico local (Montes, 1999).
- *Juglans jamaicensis* ssp. *jamaicensis* C. DC. (Nogal del país), especie endémica de las Antillas Mayores, excepto Jamaica (Schaarschmidt, 1983 y Del Risco y Vandama, 1989).
- *Laurocerasus occidentalis* (Sw.) Roem. (Cuajaní ó Almendro), que se distribuye por toda Cuba, Las Antillas y América Central (Bisse, 1988).

En este estudio se seleccionaron entre cinco y diez individuos de cada especie, sanos y con plena capacidad reproductiva, que demostraron a través del tiempo las fases de desarrollo utilizando la metodología desarrollada por Hechavarría (1998).

Para el análisis se tuvieron en cuenta dos tipos de registros fenológicos que describen el crecimiento y desarrollo de la planta:

Fenología vegetativa:

- Permanencia de hojas: cantidad de hojas en los árboles de manera permanente y que llegan a constituir las hojas adultas de la planta.
- Brotación: formación de hojas nuevas.

Fenología reproductiva:

- Floración: período desde la apertura de la flor hasta la caída de los pétalos.
- Maduración de los frutos: cambios externos que evidencian su madurez fisiológica.

Estas fenofases están caracterizadas por presentar una diferenciada sensibilidad ambiental (capacidad de generación de respuesta ante modificaciones ambientales), que

en orden ascendente comprenden: permanencia foliar, brotación foliar, fructificación y floración.

**Tabla 1. Características y ubicación de las especies estudiadas.**

Especie	Árboles		Lugar de monitoreo	Ubicación geográfica Coordenadas (x,y)	Altura s.n.m	Tipo de bosque	Tipo de Suelo
	Altura media (m)	Diámetro medio (cm)					
<i>M. cubensis</i> ssp. <i>acunae</i>	25	71.2	Represa	232-233 N 600-601W	650	Pluvisilva de montaña	Ferralítico Rojo Típico Eurítico.
<i>J. jamaicensis</i> ssp. <i>jamaicensis</i>	20	60,3	Represa	232-233 N 600-601W	623		Ferralítico Rojo Típico Eurítico.
<i>L. occidentalis</i>	25	50.8	Finca Cuba	320-330N 600- 601W	623		Ferralítico Rojo Lixiviado Típico Cuarácico

Nota: Las coordenadas se corresponden con la hoja cartográfica (1:50000) de Tope de Collantes.

Para evidenciar la influencia del calentamiento global sobre el comportamiento fenológico de las especies estudiadas, a partir de lo señalado por Centella (2001) sobre las variaciones del clima de Cuba, especialmente sobre la presencia de eventos extremos en los patrones de temperatura de invierno durante el período 1989-1999, con un calentamiento significativo en las décadas del 80 y 90 e incrementos de las temperaturas mínima y media, se clasificaron las observaciones de los años estudiados en dos grupos: aquellos cuya temperatura mínima fue mayor al valor medio reportado para esta variable durante el período 1967-1985 (16.8 °C; Ayala, 1989), identificados como “*años calientes*” y, aquellos en que esta variable fue igual o menor a ese valor promedio, identificados como “*años normales*”. Luego, para cada grupo se realizaron nuevamente los dendrofenogramas de cada fenofase, para comparar los valores de ambos grupos mediante la prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov, empleando una probabilidad de 0.05.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Durante el período de estudio la temperatura mínima media anual de la zona de trabajo fue 16.4 °C, ligeramente inferior (en 0.4 °C) al valor promedio reportado por Ayala (1989) para un período de 25 años. De los 11 años considerados en el análisis, seis presentaron temperatura mínima media anual igual o menor a 16.8 °C, en tanto que los restantes cinco años presentaron valores superiores incluso a 17 °C, según se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Agrupamiento de los años de observaciones fenológicas, según su temperatura mínima promedio anual.**

Años normales ( $T_{\text{mín}} \leq 16.8^{\circ}\text{C}$ )		Años calientes ( $T_{\text{mín}} > 16.8^{\circ}\text{C}$ )	
Año	$T_{\text{mín}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Año	$T_{\text{mín}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1989	16.80	1990	17.20
1991	16.20	1995	17.20
1992	13.68	1997	18.80
1993	14.09	1998	17.80
1994	14.80	1999	17.23
1996	16.80		
<b><math>T_{\text{mín}}</math> prom.</b>	<b>15,40</b>	<b><math>T_{\text{mín}}</math> prom.</b>	<b>17,65</b>

Para el cálculo de los dendrofenogramas por fases los datos fenológicos anuales se agruparon de acuerdo al tipo de año, normal o caliente, los resultados se compararon por parejas entre sí (Tabla 3).

**Tabla 3. Valores de probabilidad obtenidos para cada par de distribuciones comparadas.**

	Especie	Variables Fenológicas	Años Normales		$(T_{\text{Mín.}} \leq 16.8^{\circ}\text{C})$ $(T_{\text{Mín. Prom.}} = 15.4^{\circ}\text{C})$	
			Hojas Adultas	Brotación	Floración	Maduración de frutos
<b>Años Calientes</b> $(T_{\text{Mín.}} > 16.8^{\circ}\text{C})$ $(T_{\text{Mín. Prom.}} = 17,7^{\circ}\text{C})$	<i>Magnolia cubensis</i>	H. adultas	0.0000			
		Brotación		0.0000		
		Floración			0.0000	
		Maduración				0.0000
	<i>Juglans jamaicensis</i>	H. adultas	0.0002			
		Brotación		0.0002		
		Floración			0.0000	
		Maduración				0.0000
	<i>Laurocerasus occidentalis</i>	H. adultas	0.4145			
		Brotación		0.0000		
		Floración			0.0000	
		Maduración				0.0000

Los resultados demostraron que para las tres especies evaluadas, el patrón fenológico temporal obtenido para todas las variables analizadas (permanencia de las hojas adultas, brotación de las hojas nuevas, floración y maduración de los frutos) en los años en que la temperatura mínima media anual del aire fue igual o inferior a  $16.8^{\circ}\text{C}$ , fue completamente diferente al patrón presentado por esas mismas variables fenológicas en los años en que el valor de esta variable climática fue superior a esa temperatura, con la única excepción de la permanencia de las hojas adultas en *L. occidentalis*.

Estas respuestas ponen de relieve el impacto adaptativo que un aumento de  $2^{\circ}\text{C}$  en la temperatura mínima media anual (de  $15.4^{\circ}\text{C}$  a  $17.7^{\circ}\text{C}$ ) puede causar sobre los ciclos biológicos de estas especies:

- Si se toma en consideración que estas especies tienen tres niveles diferentes de adaptabilidad a la localidad y que las fenofases estudiadas presentan cuatro niveles de sensibilidad ambiental (en permanencia del follaje, es la menos sensible y en floración, la más sensible), entonces las posibles combinaciones (especie x fenofase) dan lugar a 12 diferentes niveles de adaptación al impacto del calentamiento, de forma tal que el nivel de adaptación mínimo estaría dado por la combinación (*M. cubensis* x floración), equivalente a la especie con máximo nivel de endemismo

mientras que el máximo nivel de adaptación estaría dado por la combinación (*L. occidentalis* x permanencia de follaje).

- Conjugando lo antes expuesto con los resultados de la prueba de Kolmogorov – Smirnov resultaría que, de las 12 posibles combinaciones (especie x fenofase) que pueden ser formadas, la única combinación que no presentó diferencias estadísticamente significativas entre ambos dendrofenogramas fue, precisamente, la combinación de máximo nivel de adaptación al impacto (*L. occidentalis* x permanencia de follaje), donde los dendrofenogramas fueron estadísticamente iguales entre *años normales* y *años calientes*.
- Sin embargo, las 11 combinaciones restantes (especie x fenofase) exhibieron alteraciones suficientemente importantes al aumentar la temperatura mínima promedio anual, lo que evidencia alteraciones en los patrones fenológicos de las especies y la capacidad potencial de adaptación al impacto del calentamiento.

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan los cambios producidos por el aumento de la temperatura mínima promedio anual sobre el comportamiento de estas especies. Además, la Tabla 4 muestra el resumen de la respuesta de las diferentes especies al efecto invernadero, por fenofase.

**Tabla 4. Resumen general de la respuesta de las especies al efecto invernadero.**

<b>Distribución</b>	<i>M. cubensis</i>	<i>J. jamaicensis</i>	<i>L. occidentalis</i>
	Exclusiva de Cuba Central	Antillas Mayores, excepto Jamaica	Cuba, Las Antillas y América Central
<b>Fenofases</b>	<b>Impactos del efecto invernadero</b>		
<b>Permanencia de hojas adultas</b>	Adelanto de la intensidad máxima en tres meses. Retraso de la intensidad mínima en ocho meses.	Retraso de la intensidad máxima en tres meses.	Retraso del inicio de la intensidad
<b>Brotación</b>	Retraso de la intensidad máxima en ocho meses Adelanto del inicio en dos meses Coincidencia entre la intensidad mínima de brotación y la de la intensidad mínima de permanencia de hojas adultas.	La vuelve irregular y sin intensidades máximas apreciables en el año.	Atraso de su inicio en tres meses. La intensidad máxima se duplica Atraso en la intensidad máxima en siete meses.
<b>Floración</b>	Adelanto del inicio en tres meses. Aumento de su duración en dos meses	Aumento de la intensidad entre 41 % y 77 %. Aumento de la duración del segundo período en cuatro meses.	Adelanto de la intensidad máxima en tres meses. Aumento de la intensidad máxima en 73,4 %.
<b>Maduración de frutos</b>	Adelanto del inicio en cuatro meses. Aumento de su intensidad máxima en 35 %.	División en dos períodos, con aumento de la duración total en un mes. Disminución de la intensidad máxima en 53 %.	Adelanto de su presencia en seis meses. Aumento de la duración total en seis meses La intensidad máxima se duplica.

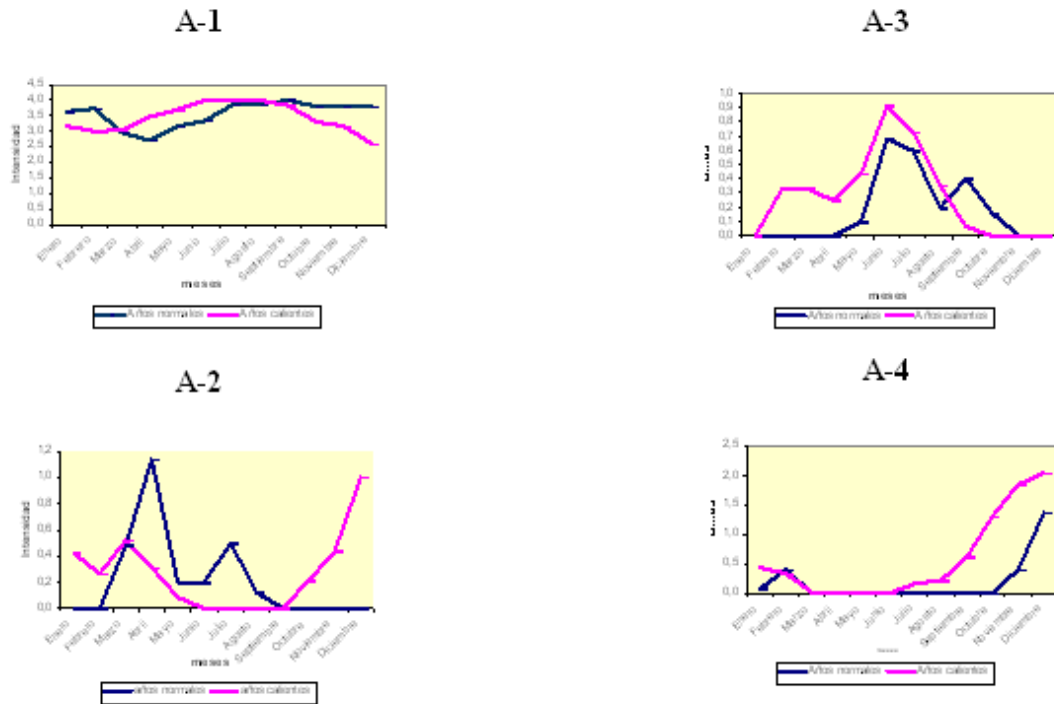


Figura 1. Comportamiento de las fenofases de *M. cubensis* en años normales y calientes (A-1 Permanencia de follaje; A-2 Brotación; A-3 Floración y A-4 Fructificación), desde enero a diciembre.

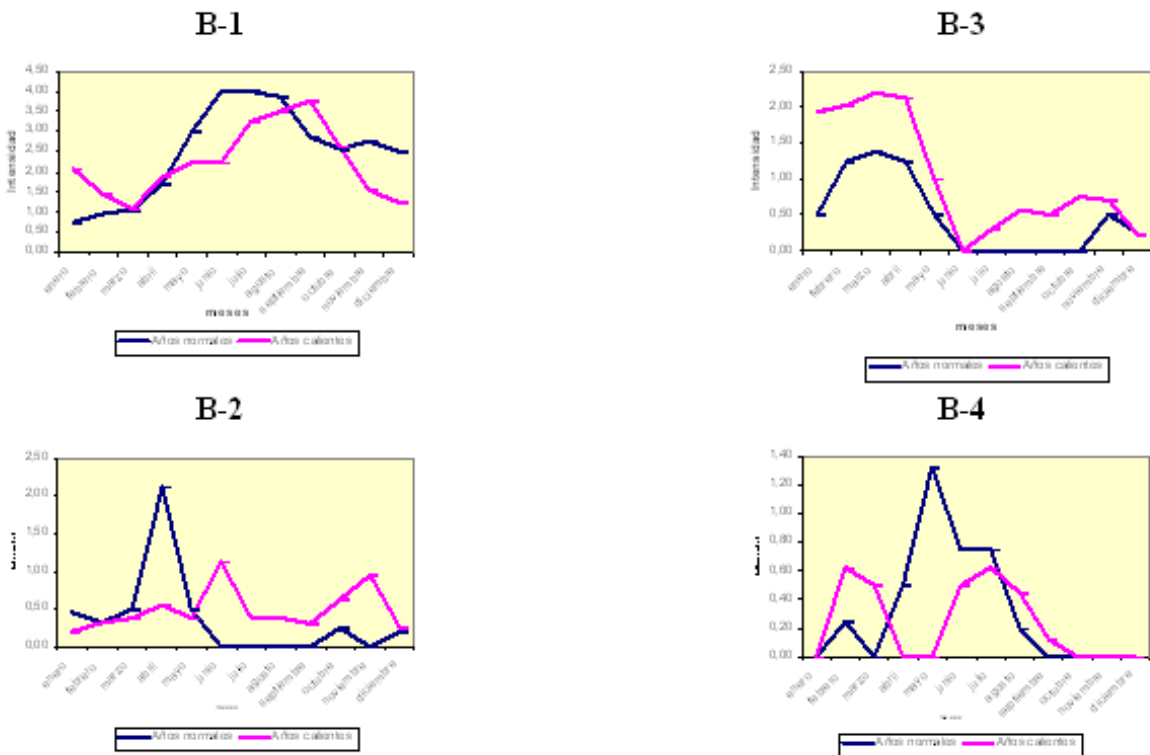
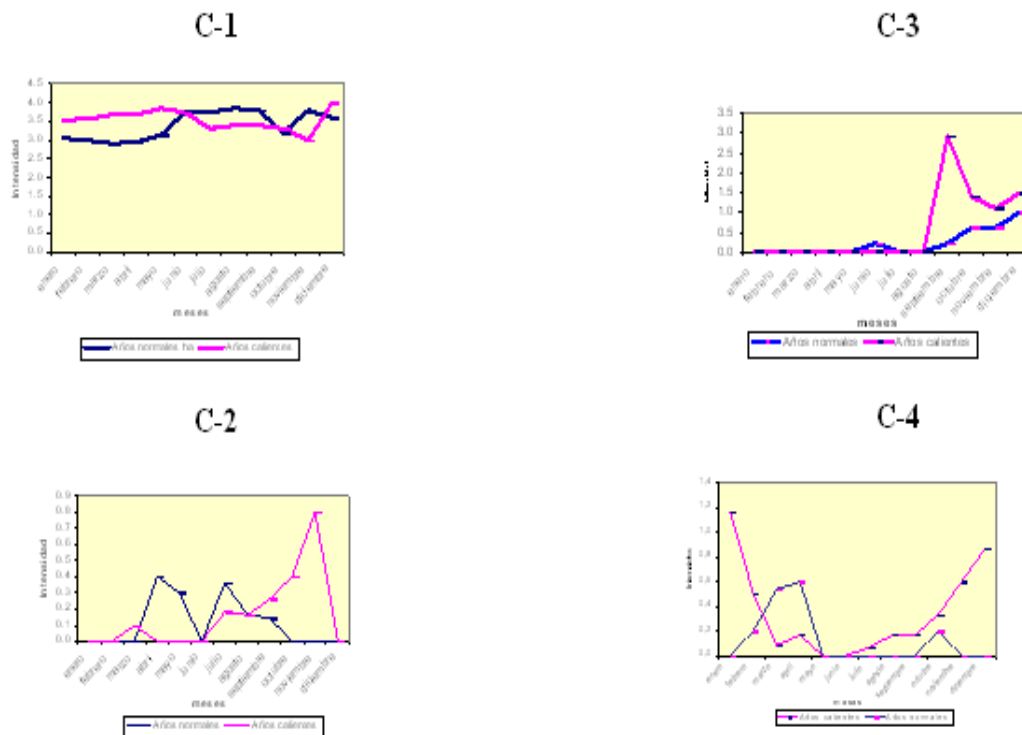


Figura 2. Comportamiento de las fenofases de *J. insularis* en años normales y calientes (B-1 Permanencia de follaje; B-2 Brotación; B-3 Floración y B-4 Fructificación), desde enero a diciembre.



**Figura 3. Comportamiento de las fenofases de *L. occidentalis* en años normales y calientes (C-1 Permanencia de follaje; C-2 Brotación; C-3 Floración y C-4 Fructificación), desde enero a diciembre**

## CONCLUSIONES

El aumento en 2 °C de la temperatura mínima media anual en el macizo de Guamuhaya (zona montañosa central del sur de Cuba) produjo respuestas en las especies forestales generando alteraciones fenológicas diferenciadas para los años calientes.

Las especies forestales *L. occidentalis* y *M. cubensis*, en respuesta al calentamiento, mostraron modificaciones de la actividad vegetativa que garantizaron una mayor eficiencia en la actividad reproductiva, mientras que la especie *J. jamaicensis* mostró cambios fisiológicos con incidencia en la maduración de los frutos, al dividir la fructificación en dos períodos y disminuir su intensidad, comportamiento que puede conducir a pérdidas de material reproductivo.

En términos generales, ante el aumento de la temperatura mínima, las fenofases vinculadas a la actividad vegetativa (permanencia del follaje y brotación) presentaron tendencias al retraso de su ocurrencia, en tanto que las fenofases relacionadas con la actividad reproductiva (floración y fructificación) presentaron tendencias al adelanto y al aumento de su intensidad.

## BIBLIOGRAFIA

- Ayala, N. 1989. Topes de Collantes. *Vida silvestre en el Escambray*, 113 pp.
- Bisse, J. 1988. *Árboles de Cuba*. Editorial Científico Técnica, 384 pp.
- Centella, A., L. Llanes, y L. Paz. 2001. *Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Instituto de Meteorología, La Habana, 166 pp.
- Del Risco, E., y D. Vandana. 1999. Regionalización florística de Cuba, X.2.4. II. En *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. La Habana, .s/p

- Hechavarría, O. 1998. Aspectos metodológicos sobre la fenología en especies forestales. *CATIE. Boletín de Mejoramiento Genético y Semillas Forestales*, 20: 15-18.
- IPCC. 2001. *Third Assessment Report - Climate Change, 2001: The Scientific Basis; Impacts, Adaptation and Vulnerability; Mitigation*. UNEP & WMO. 154pp.
- Montes, L. 1999. *Endemismos vegetales estrictos de las provincias comprendidas desde La Habana hasta Camagüey, Cuba*. Tesis en opción al título académico de Master en Ecología Aplicada. Instituto de Ecología y Sistemática Habana, 58 pp.
- Schaarschmidt. 1983. Die karebasche Juglans-Sippe-zwei Subspecies. *Wissenschaftliche Zeitschrift. Friedrich-Schiller-Univ Jena. Matcg-Naturwiiss*, 32 (6): 895-898.



# CAMBIO CLIMÁTICO Y EL SECTOR FORESTAL CUBANO: SEGUNDA APROXIMACIÓN

## *Climatic change and the Cuban forestry sector: Second approach*

Arnaldo Álvarez Brito<sup>1</sup>, Alicia Mercadet Portillo<sup>1</sup>, Elsa Cordero Miranda<sup>1</sup>, Osiris Ortiz Alvarez<sup>2</sup>, Andrés Hernández Riquelme<sup>3</sup>, Liliana Caballero Landin<sup>4</sup>, Leufrido Yero Valdés<sup>5</sup>, Arlety Ajete Hernández<sup>6</sup>, José Luis Rodríguez Sosa<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Forestales. Ciudad Habana. Cuba

<sup>2</sup>Estación Experimental Forestal Itabo. Matanzas, Cuba.

<sup>3</sup>Estación Experimental Forestal Placetas. Santa Clara, Cuba.

<sup>4</sup>Estación Experimental Forestal Placetas. Santa Clara, Cuba.

<sup>5</sup>Estación Experimental Forestal Guisa. Granma, Cuba.

<sup>6</sup>Estación Experimental Forestal Baracoa. Guantánamo, Cuba,

<sup>7</sup>Universidad de provincia Granma, Cuba.

E mail: [archie@minag.gov.cu](mailto:archie@minag.gov.cu)

### RESUMEN

En el período 2001- 2006 se ejecutó por el Instituto de Investigaciones Forestales el Proyecto Ramal de Investigación “Cambio climático y el Sector Forestal Cubano: Segunda aproximación”, con el cual se obtuvo, entre otros resultados, la valoración de los impactos en el sector forestal y el potencial de mitigación a través del secuestro de carbono por los bosques en siete Empresas Forestales Integrales (EFI). Los pronósticos indican que debido al aumento del nivel del mar, entre el 2050 y el 2100 el humedal de la Ciénaga de Zapata perderá 4520 km<sup>2</sup>, en tanto que la EFI Guanahacabibes perderá 47 km<sup>2</sup> de su territorio actual.

Por el aumento de riesgo de incendios forestales las provincias más vulnerables son: Matanzas (EMA “Victoria de Girón”); Las Tunas (EFI Tunas); Pinar del Río (EFIs Macurije y Minas de Matahambre) y Holguín (EFIs Mayarí y Moa).

Se define la cantidad de carbono retenido por siete Empresas Forestales Integrales en el año en que se realizó la evaluación, lo que permite trazar una estrategia para aumentar el potencial de mitigación de cada entidad.

**Palabras clave:** cambio climático, bosques, impacto, mitigación

### SUMMARY

In the period 2001 - 2006 were executed by Forest Research Institute a Branch Project referred to “The climatic change and the Cuban Forest Sector: Second approach”, obtaining among their results, the valuation of the impacts in the forest sector and the mitigation potential of seven forest enterprises (EFI) due to their forest carbon retentions. The used sceneries indicate that due to the increase of the sea level between 2050 and 2100, the Marsh of Zapata will lose 4 520 km<sup>2</sup>, as long as the EFI Guanahacabibes will lose 47 km<sup>2</sup> of its current territory.

The provinces most vulnerable for the increase of forest fires risk are: Matanzas (EMA “Victoria of Girón”); Las Tunas (EFI Tunas); Pinar del Río (EFIs Macurije and Mines of Matahambre) and Holguín (EFIs Mayarí and Moa).

It is defined the quantity of carbon retained by seven Forest Enterprises in the year in that the evaluation was carried out and that allows to trace a strategy to increase the potential of mitigation of each entity.

**Key words:** Climatic change, forests, impact, mitigation.

## INTRODUCCIÓN

El Sector Forestal cubano ha sido uno de los pioneros en los trabajos nacionales desarrollados en materia de implicaciones del cambio climático, tanto en lo que a la evaluación de vulnerabilidades, impactos y estrategias de adaptación se refiere (Álvarez et al., 1998 y 2006; Ortiz, 2007), como en lo concerniente al inventario de sus capacidades como sumidero y a la formulación de estrategias de mitigación (Mercadet et al., 2005). Sin embargo, aun cuando se constatan avances sostenidos en los resultados alcanzados, aún existen brechas en el conocimiento que es preciso salvar para poder alcanzar un mayor nivel de integración, reducir las incertidumbres que acompañan a los análisis que se formulan para los diversos escenarios esperables y perfeccionar las bases existentes con vistas a la adopción de decisiones.

Según FAO (2003), los bosques tienen cuatro funciones principales en el cambio climático: como fuente de dióxido de carbono cuando se destruyen o degradan; como indicador de un cambio climático; como fuente de biocombustible; y como sumidero de carbono cuando se explotan de forma sostenible. Por ello, la conservación y expansión de los bosques naturales adultos o de los bosques artificiales (plantaciones) son consideradas como una propuesta muy importante para la reducción del nivel de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, debido a su función como sumideros de gases de efecto invernadero. En este sentido el Panel Intergubernamental de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (IPCC, 2001) ha indicado que el secuestro de carbono por las plantas es una alternativa de bajo costo para reducir el contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico.

La determinación exacta de la cantidad de carbono que los bosques y suelos forestales son capaces de retener, resulta sumamente compleja en el caso de los bosques tropicales y subtropicales por la diversidad de formaciones boscosas naturales, de especies arbóreas y suelos. Independientemente de las incertidumbres que aún quedan en las precisiones de los cálculos, se plantea la necesidad de la valoración de los mismos en el Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y por esta razón se hacen evaluaciones destinadas a obtener aproximaciones sucesivas, con mayor calidad y con menor incertidumbre, sobre los impactos, medidas de adaptación y potencial de mitigación del cambio climático en el sector forestal cubano.

## MÉTODOS

Para los estudios de caso se seleccionó el escenario IS92-A (Centella, et al 1998), teniendo en cuenta que éste es el que prevé mayores valores de elevación del nivel del mar y en consecuencia, estos serían los límites mayores esperables (Tabla 1).

**Tabla 1: Elevación del nivel del mar (cm) con respecto a 1990, según los escenarios de emisión.**

<b>Año</b>	<b>IS92-A</b>	<b>KYOTO-A1</b>
2010	4.85	4.71
2030	12.63	11.91
2050	23.30	21.63
2100	55.20	50.82

Teniendo en cuenta los valores de elevación del mar planteados por el escenario IS92-A y las características de pendiente de las Empresas Forestales Integrales (EFI), se estimaron las distancias de penetración para cada tipo de pendiente en cada año, así

como las variaciones del nivel máximo de marea. Para el caso de Ciénaga de Zapata se tomó en consideración además los resultados de las mediciones realizadas por el Instituto de Oceanología (IDO, 2006), que reportó un aumento de 2 mm/año.

Las distancias de penetración del mar fueron calculadas como sigue:

$$P (\%) = H \cdot D^{-1} \cdot 100 \quad D_p (m) = NM \cdot P^{-1}$$

Donde:

P - pendiente (%)

H - altura de la cota superior más próxima (m)

D - distancia entre la cota y la línea del litoral (m)

D<sub>p</sub> - distancia de penetración del mar (m)

NM - nivel de aumento del mar, según año del escenario (cm)

En el caso de Guanahacabibes (Figura 1), la valoración se realizó a partir de las informaciones contenidas en el Proyecto de Ordenación 1986-1995 de la empresa; se calcularon a nivel de rodal los impactos que se producirían, teniendo en cuenta en cada rodal su pendiente y su composición de especies arbóreas.



**Figura 1. Empresa Forestal Integral Guanahacabibes, provincia de Pinar del Río.**

Los resultados obtenidos por rodales se consolidaron por lotes y éstos por unidades silvícolas, para integrarlos finalmente a nivel de empresa. Para la EFI Victoria de Girón (Figura 2) se realizó la valoración con las informaciones del 2002.

Para poder identificar cualitativamente los resultados del análisis realizado, los datos originales y los correspondientes a cada uno de los años del escenario considerado fueron transferidos a un mapa de la empresa a escala 1:50 000, donde se pudieron apreciar en detalle los impactos esperables.

Para el cálculo de la cantidad de carbono retenido por las Empresas Forestales Integrales se utilizó la información de superficie y volúmenes de madera en pie de los bosques naturales y plantaciones del año 2002 en cada entidad; procesándose la información con la metodología definida por el Instituto de Investigaciones Forestales (Mercadet y Álvarez, 2005).



Figura 2. Ubicación del municipio Ciénaga de Zapata, en la provincia Matanzas.

## RESULTADOS

### EFI Guanahacabibes

En la Tabla 2 se presenta el impacto que el aumento del nivel del mar producirá sobre los manglares de la EFI Guanahacabibes para cada uno de los años del escenario de emisión utilizado. Los resultados de esta evaluación indican que en el 2100 la mitad de la actual superficie de manglares de la Empresa será afectada negativamente por el impacto del cambio climático y casi la cuarta parte de forma irreversible.

El ecosistema Manglar se desarrolla hasta donde llega la influencia de las mareas, lo que define bien el límite del manglar y el comienzo de los bosques semicaducifolios, que es la formación que le sucede, designándose este límite como la línea de marea. Según lo mostrado en la Tabla 2, la penetración del mar en el 2100 variará entre 552 m y 276 m, fijando una nueva línea de marea. Esta franja, ocupada actualmente por bosques semicaducifolios en una superficie de 5 884.3 ha, quedará en el 2100 bajo la influencia del mar y en ella desaparecerán los bosques semicaducifolios, siendo colonizada paulatinamente por los manglares, lo que constituirá 52 % del área afectada de manglares con respecto a la superficie actual.

Tabla 2. Impacto del aumento del nivel del mar sobre los manglares en la EFI Guanahacabibes

Año	Área afectada (ha/%)*	Área recuperable (ha/%)**	Área no recuperable (ha/%)**
2010	1 220.5 / 5.6	722.5 / 59.2	498.0 / 40.8
2030	1 551.6 / 7.1	885.8 / 57.1	665.8 / 42.9
2050	3 631.2 / 16.6	2 674.0 / 73.6	957.2 / 26.4
2100	4 720.3 / 21.6	2 147.7 / 45.5	2 572.6 / 54.5
<b>Total</b>	<b>11 123.6 / 50.9</b>	<b>6 430.0 / 57.8</b>	<b>4 693.6 / 42.2</b>

\* Porcentajes referidos al área total de manglares

\*\* Porcentajes referidos al área afectada

### EFI Victoria de Girón.

El impacto que el aumento del nivel del mar producirá sobre la vegetación que conforma las áreas boscosas de la EMA “Victoria de Girón” para cada uno de los años del escenario IS92-A, se resume en la Tabla 3.

**Tabla 3. Áreas totalmente perdidas por la penetración del mar en la EFI Victoria de Girón (escenario IS92A).**

<b>Años</b>	<b>Área total afectada (ha)</b>	<b>Vol (m<sup>3</sup>)</b>
2015	1 947.50	20 939.13
2030	3 551.30	38 189.87
2050	4 904.60	52 733.28
2100	16 801.60	180 647.44

Para el 2100, tomando como referencia el escenario descrito por el Instituto de Oceanología de Cuba, la situación sería la referida en la Tabla 4.

**Tabla 4. Áreas totalmente perdidas (Escenario IDO) en la EFI Victoria de Girón.**

<b>Años</b>	<b>Área total afectada (ha)</b>	<b>Vol (m<sup>3</sup>)</b>
2015	1 445.42	15 540.87
2030	2 890.83	31 081.62
2050	4 818.05	51 802.71
2100	14 858.40	159 754.54

Atendiendo a la variación de la penetración del mar, para el año 2100 se fijará una nueva línea de marea. Esta área, ocupada actualmente por una vegetación temporalmente inundada conformada por herbazales de ciénaga, manglar, bosque de ciénaga (*Annona glabra* con *Chysobalanus icaco*; *Bucida buseras* con *Tabebuia angustata*) hacia el oeste y bosques semicaducifolios (*Metopium brownei* con *Swietenia mahagoni*), bosques subperennifolios mesófilos (*Talipariti elatus* con *Calophyllum antillanum* y *Prunus occidentalis*), bosques semicaducifolios mesófilos (*Lysiloma latisiliquum* con *Bursera simaruba*) hacia el este, quedarán bajo la influencia del mar, desapareciendo 1 347.70 hectáreas de bosques semicaducifolios, que serán colonizadas por la vegetación de manglar y herbazales de ciénaga. Muchas de estas especies son de interés florístico, tales como *Prunus occidentales*, *Albizzia cubana* (bacona), *Atkinsia cubensis* (majagua negra de Cuba) y *Copernicia brittonorum* (yarey de costa), entre otras.

En general, debido a los impactos originados por el aumento del nivel del mar, la entidad perderá 5 109.40 ha de su territorio actual.

Actualmente la empresa cuenta con 178 418.30 ha cenagosas, las cuales representan el 32.31 % de su superficie; sin embargo, para el 2100 se estima que estas áreas aumenten en otras 2 304.30 ha; en el caso del litoral, la diferencia entre el lugar que ocupa actualmente y el que ocupará en el 2100 representará una inundación de otras 1 457.40 ha.

En resumen, se pronostica que de 552 251.3 ha existentes en la empresa, en el 2100 se afectarán por el aumento del nivel del mar 27 205.0 ha, o sea, 4.93 %; en tanto que el cambio que se producirá en la línea de marea añadirá a esta cifra 3 652.0 ha de bosques semicaducifolios que serán paulatinamente convertidos en manglar, creciendo esta formación en 63 892.0 ha (11.57 %) con respecto al área actual.

### Intensificación de la aridez y la sequía

Por el aumento de la temperatura se producirá una intensificación de la aridez y la sequía, principalmente de la zona oriental del país (Figura 3). Debido a la intensificación de la sequía se incrementan los riesgos de ocurrencia de incendios forestales.

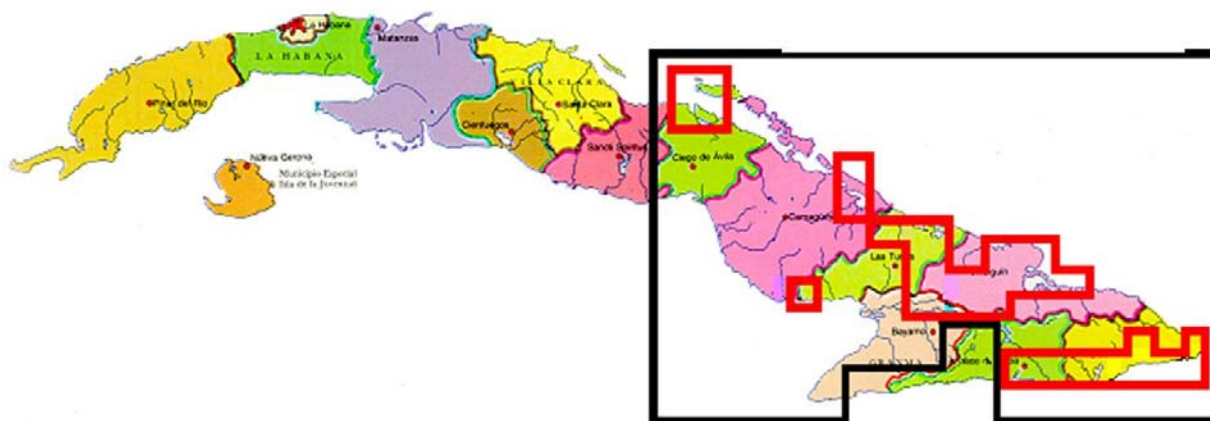


Figura 3. Regiones de mayores impactos por aumento de aridez y sequía.

Los fuegos forestales son originados por causas naturales o asociados con actividades humanas. Bajo condiciones normales, los fuegos en los bosques tropicales no se expanden sobre amplias áreas debido a la insuficiencia de materiales secos e inflamables. Sin embargo, con el aumento de la temperatura media del aire y la alteración del régimen de lluvias, la vulnerabilidad a los incendios podría aumentar en:

- las formaciones vegetales de condiciones habituales más secas, tales como manigua costera, monte costero, monte seco, cuabales, charrascales y mogotes;
- las formaciones donde abunden sustancias volátiles e inflamables en las resinas de los árboles, como es el caso de los pinares;
- las formaciones donde, como compensación al aumento de la aridez y la sequía, los árboles tiendan a reducir la evapotranspiración mediante una acentuada disminución de la cantidad de hojas, como puede suceder con las especies de las pluvisilvas, aumentando entonces anormalmente la disponibilidad de material combustible sobre el suelo.

Las provincias más vulnerables serían: Matanzas (EFI “Victoria de Girón”); Las Tunas (EFI Tunas); Pinar del Río (EFIs Macurije y Minas de Matahambre) y Holguín (EFIs Mayarí y Moa).

### Estudios de caso de mitigación

La posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la actividad forestal y su potencial para aumentar el secuestro de carbono aumenta la importancia del sector forestal y su participación en las medidas orientadas a mitigar los efectos del cambio climático, según lo estipulado por el Protocolo de Kyoto, pues la fijación de carbono mediante la actividad forestal está en función de la acumulación y el almacenamiento de biomasa, por lo que cualquier actividad práctica de ordenación que modifique la cuantía de la biomasa existente en una zona, influye en su capacidad de almacenar o fijar carbono.

Para conocer la cantidad de toneladas de carbono que se almacenan en los bosques de nuestro país, se han realizado siete estudios de caso en las Empresas Forestales

Integrales (EFI) La Palma, Mayabeque, Victoria de Girón, Villa Clara, Ciego de Avila, Gran Piedra y Baracoa, cuyos resultados se resumen en las Tablas 5,6,7,8,9,10 y 11.

**Tabla 5. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI La Palma.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	6 770,7	428 464,5	574 043,6	1 002 508,1	148,1
Bosques naturales	21 070,8	1 211 808,2	2 034 699,6	3 246 507,8	154,1
Por (re)forestar	1 231,3	18 469,5	46 789,4	65 258,9	53,0
Inforestal	847,7	830,1	25 224,7	26 054,8	30,7
<b>TOTAL</b>	<b>29 920,5</b>	<b>1 235 972,3</b>	<b>2 680 757,3</b>	<b>4 340329,6</b>	<b>145,1</b>

**Tabla 6. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Mayabeque.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en la necromasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	7 101,1	666 907,3	45 095,4	838 996,6	1 550 999,4	218,4
Bosques naturales	42 242,0	4 186 897,4	36 041,6	2 320 811,8	6 543 750,8	154,9
Por (re)forestar	4 287,4	64 306,5		162 921,2	227 227,7	53,0
Inforestal	20 639,4	886 042,8		13 251 204,0	14 137 246,8	685,0
<b>TOTAL</b>	<b>74 269,9</b>	<b>5 804 154,0</b>	<b>81 137,0</b>	<b>16 573 933,6</b>	<b>22 459 224,7</b>	<b>302,4</b>

**Tabla 7. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Victoria de Girón.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	150 691,3	7 443 998,8	18 535 029,9	25 979 028,7	172,4
Bosques naturales	210 556,8	4 154 647,4	11 243 859,8	15 398 507,2	73,1
Por (re)forestar	10 882,4	163 236,0	413 531,2	576 767,2	53,0
Inforestal	143 504,2	6 106 616,1	91 994 700,1	98 101 316,2	683,6
<b>TOTAL</b>	<b>515 634,7</b>	<b>17 868 498,3</b>	<b>122 187 121,0</b>	<b>140 055 619,3</b>	<b>271,6</b>

**Tabla 8. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Villa Clara.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	6 220,8	153 166,6	595 966,1	749 132,7	120,4
Bosques naturales	21 168,8	1 011 256,3	422 851,8	1 434 108,1	67,7
Por (re)forestar	10 801,0	162 015,0	410 438,0	572 453,0	53,0
Inforestal	1 365,7	34 243,7	521 484,1	555 727,8	406,9
<b>TOTAL</b>	<b>39 556,3</b>	<b>1 360 681,6</b>	<b>1 950 740,0</b>	<b>3 311 421,6</b>	<b>83,7</b>

**Tabla 9. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Ciego de Avila.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	5 610,7	170 748,4	641 465,9	812 214,3	144,8
Bosques naturales	43 598,9	2 241 940,5	1 357 314,4	3 599 254,9	82,6
Por (re)forestar	29 485,0	442 275,0	1 120 430,0	1 562 705,0	53,0
Inforestal	21 206,5	897 944,9	13 412 092,5	14 310 037,4	674,8
<b>TOTAL</b>	<b>99 901,1</b>	<b>3 752 908,8</b>	<b>16 531 302,8</b>	<b>20 284 211,6</b>	<b>203,0</b>

**Tabla 10. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Gran Piedra.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	2 007,5	189 285,3	246 922,5	436 207,8	217,3
Bosques naturales	10 866,7	221 632,1	707 792,6	929 424,7	85,5
Por (re)forestar	914,0	13 710,0	34 732,0	48 442,0	53,0
Inforestal	312,0	1 284,5	14 723,5	16 008,0	51,3
<b>TOTAL</b>	<b>14 100,2</b>	<b>425 911,9</b>	<b>1 004 170,6</b>	<b>1 430 082,5</b>	<b>101,4</b>

**Tabla11. Resumen del acumulado de carbono retenido por la EFI Baracoa.**

Área	Superficie (ha)	Carbono en la biomasa (t)	Carbono en el suelo (t)	Carbono total (t)	Carbono por hectárea (tC.ha <sup>-1</sup> )
Plantaciones	13 613,5	856 075,3	1 405 056,9	2 261 132,2	166,1
Bosques naturales	39 458,3	4 781 930,8	4 057 659,2	8 839 590,0	224,0
Por (re)forestar	282,2	4 233,0	10 723,6	14 956,6	53,0
Inforestal	35,0	1 505,0	22 505,0	24 010,0	686,0
<b>TOTAL</b>	<b>53 389,0</b>	<b>5 643 744,1</b>	<b>5 495 944,7</b>	<b>11 139 688,8</b>	<b>208,7</b>



## CONCLUSIONES

A semejanza de lo reportado para otros pequeños estados insulares alrededor del planeta y muy en particular, en la región comprendida entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio, también para Cuba y especialmente para las empresas forestales del país con patrimonios que incluyan la zona costera, la vulnerabilidad al aumento del nivel del mar constituye un tema de crucial importancia dada la magnitud de los impactos esperados. El análisis realizado a dos de estas empresas (Guanahacabibes y *Victoria de Girón*) indicó que a fines del presente siglo cabe esperar afectaciones físicas de sus bosques naturales superiores a las 47 mil hectáreas, de las que entre 40 % y 50 % serán invadidas por el mar, convertidas en ciénagas o en salitrales, a lo que habría que añadir los impactos que tales cambios producirán sobre la biodiversidad y los recursos genéticos existentes en esas zonas, gran parte de los cuales son endémicos y con muy escasas posibilidades de emigrar y adaptarse a nuevos hábitat en el período de tiempo en que tales modificaciones ambientales ocurrirán.

Los resultados mostrados en el presente trabajo evidencian la necesidad de incluir la consideración de estas vulnerabilidades en los proyectos de inventario y ordenación de las empresas forestales del país, de manera tal que con suficiente antelación se puedan plantear, analizar e implementar las estrategias de adaptación que permitan minimizar los impactos negativos esperables, tanto en lo que al establecimiento y manejo de los bosques se refiere, como en cuanto a su aprovechamiento y a la conservación de la biodiversidad y de los recursos genéticos que ellos albergan.

La cuantificación del carbono retenido por las Empresas Forestales Integrales en un período de tiempo permite valorar la contribución de la entidad a la mitigación del cambio climático y definir una estrategia de mitigación para aumentar los reservorios de carbono.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A.; C. Milián y Leyla Álvarez. 1998. Evaluación a fondo de los posibles impactos del cambio climático sobre los sectores socio-económicos y ambientales de Cuba. Sector Silvícola. Empresa Forestal Integral Guanahacabibes: Un estudio de caso. 21 p. En: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente: Programa para la Atmósfera. Subproyecto: "Estudios de casos nacionales para la evaluación de los impactos del cambio climático y las medidas de adaptación".
- Álvarez A., Ordilia Hechavarría, Osiris Ortiz, Andrés Hernández, Liliana Caballero y Leyla Álvarez. 2006. Informe final de Subproyecto 11.25.02. Estudios de caso sobre impactos y adaptación del cambio climático. IIF. 48p
- Centella, A. *et al.* 1998. Escenarios climáticos para la evaluación de impactos en Cuba. Inst. de Meteorología, Informe de Resultado Científico.
- FAO (2003). Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia. pp.25-30.
- IDO. 2006. Resultados de las mediciones del aumento anual del nivel del mar. Taller para la Preparación de la Segunda Comunicación Nacional de Cuba a la Conferencia de las Partes de la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. La Habana.
- IPCC. 2001. Third Assessment Report - Climate Change 2001: The Scientific Basis; Impacts, Adaptation and Vulnerability; Mitigation. UNEP & WMO.
- Mercadet, A.; Álvarez, A. 2005. Informe final de Subproyecto 11.25.03. Definición del ritmo anual de acumulación de Carbono por la parte aérea de las plantaciones y estimación del Carbono retenido por unidad de masa en la madera aserrada de las especies más utilizadas. IIF. 26p.

- Mercadet, A., Álvarez, A., Elsa Cordero, Osiris Ortiz, Andrés Hernández, Denia Parada, José L. Rodríguez, Leufrido Yero, Arlety Ajete. 2005. Informe final de Subproyecto 11.25.04. Reanálisis de la capacidad potencial de mitigación de los bosques cubanos. IIF. 47p.
- Ortiz, O. 2007. Inédito. Vulnerabilidad de la EMA "Victoria de Girón" (Matanzas) al aumento del nivel del mar inducible por el cambio climático. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad "Hermanos Saíz", P. Río.

# CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO CAPTURADO POR PLANTACIONES DE *Pinus* EN VIÑALES, PINAR DEL RÍO, CUBA.

*Carbon-fixation quantification by Pinus forestry in Viñales, Pinar del Río, Cuba*

Marta Bonilla Vichot, Marisela Frías Tamayo y Ángel Zaldívar Solís  
Universidad de Pinar del Río, Facultad Forestal y Agronomía, Pinar del Río, Cuba  
E-mail: mbon@af.upr.edu.cu

## RESUMEN

La presente investigación se realizó en diferentes lotes y rodales de la Unidad Silvícola de Los Jazmines, perteneciente a la Empresa Forestal Integral de Viñales, provincia de Pinar del Río, Cuba. Para cuantificar el carbono retenido en las plantaciones de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* con diferentes edades, se emplearon metodologías ya descritas por diferentes autores, así como los factores de conversión ya establecidos.

Para ello se utilizaron los datos de la última Ordenación Forestal realizada en dicha empresa (2007) y los obtenidos a partir del trabajo de campo en rodales de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis*. Para determinar el volumen, la biomasa del fuste y el carbono retenido en ambas especies se midió la altura y diámetro de los árboles. Los valores de carbono capturado por ambas especies fueron de 380.7 tC·ha<sup>-1</sup> para *Pinus caribaea* y 224.0 tC·ha<sup>-1</sup> para *Pinus tropicalis*. Para la obtención de los resultados del carbono retenido en las fuentes de hojarasca y suelo se levantaron parcelas de diferentes dimensiones según la fuente a muestrear, la hojarasca solo aporta 0,72 % de carbono y el suelo un 9,32%. Los incrementos medios anuales determinados para *P. caribaea* son de 3.48 tC·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> y 1.66 tC·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> para *P. tropicalis*. La absorción de carbono de la atmósfera por estas plantaciones resultó 658.1 t de CO<sub>2</sub>.

**Palabras claves:** fijación de carbono, plantaciones, biomasa, pinus

## ABSTRACT

This investigation has been carried out in several plots from Los Jazmines silvicultural unit belonging to the “Empresa Forestal Integral Viñales, in Pinar del Río, Cuba. The purpose of this study is to quantify the amount of carbon fixed in plantations of *Pinus caribaea* and *Pinus tropicalis* using methodologies already described by other authors and existing conversion factors. To reach this goal, data was obtained from the last forestry inventory (2007), such as diameters and height were taken to determine the volume and wood biomass of both species. The amount of fixed carbon were relatively high for both species: 380.7 and 223,0 tC·ha<sup>-1</sup> for *Pinus caribaea* and *P. tropicalis* respectively. Only 0, 72 % of the carbon stock in the plantations was fixed by the litter, while the soil organic matter stored about 9, 3 % of the total amount.

**Key words:** carbon fixation, forestry, biomass, Pinus

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de bosques se destacan por su gran capacidad para fijar carbono en sus estructuras y de manera particular en una forma estable en la parte leñosa debido a su larga permanencia en el tiempo, de acuerdo al uso que se aplique. Como se ha expresado antes (FAO, 2003), los bosques actúan como fuente de dióxido de carbono, sirven de indicador del cambio climático, son fuente de biocombustible y sumidero de carbono. Por ello la conservación y expansión de los bosques naturales adultos o de los bosques artificiales constituye una alternativa muy importante para la mitigación del efecto invernadero (Raev, 1996).

La posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la actividad forestal y el potencial para incrementar el secuestro de carbono aumenta la importancia del sector forestal y su participación en las medidas orientadas a mitigar los efectos de los GEIs según lo estipulado en el Protocolo de Kyoto; pues la fijación de carbono mediante la actividad forestal está en función de la acumulación y el almacenamiento de la biomasa, por lo que cualquier actividad práctica de ordenación que modifique la cuantía de la biomasa existente en una zona influye en su capacidad de almacenar o fijar carbono (Moura, 2001).

La empresa Forestal Viñales cuenta con un patrimonio de 20485.3 ha, de ellas 12609.9 ha ocupadas por plantaciones de pino con las especies *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* y *P. tropicalis* Morelet.

No obstante, en el patrimonio forestal existente, en la Empresa Forestal Integral (EFI) de Viñales no se contempla el carbono fijado en sus plantaciones como parte de los servicios ambientales que brinda. Por esta razón, el presente trabajo pretende cuantificar el carbono capturado por las plantaciones *P. caribaea* y *P. tropicalis* en las áreas de la Unidad Silvícola, lo cual le permitirá a la EFI de Viñales conocer el aporte de dichas plantaciones en la disminución del contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico.

### **Caracterización de las especies *Pinus tropicalis* y *Pinus caribaea***

Estos árboles son especies endémicas de importancia económica por los múltiples usos de la madera y otros productos no madereros que de ellas se pueden obtener.

En algunas regiones de Pinar del Río y de la Isla de la Juventud, *P. caribaea* var. *caribaea* aparece asociado con *P. tropicalis*. La primera de estas especies ocupa las áreas más fértiles, en la base de las colinas o en las partes bajas de las laderas, mientras que la segunda se desarrolla en los lugares más secos y de escasa fertilidad.

*P. caribaea* tiene bastante plasticidad ecológica en cuanto a suelos, presenta grandes posibilidades de vivir en los ambientes más disímiles, sobre todo con una capacidad evidente de poblar los suelos más diversos, lo que hace suponer que esta especie ha desarrollado mecanismos de adaptación a algunos factores edáficos. Esta especie se caracteriza por una gran variedad morfológica.

*Pinus tropicalis* tiene un crecimiento muy lento, en los primeros años mantiene un aspecto herbáceo con poco incremento de la biomasa aérea mientras desarrolla un sistema radical profundo aproximadamente 10 veces la altura de la planta, lo que le permite llegar a capas más húmedas del suelo. Esa característica la denomina Margalef (1995) “exploración” y la considera una adaptación de la especie a estos edátomos, donde la planta puede garantizar su suministro de agua aún en la estación de seca.

Ambas especies se asocian con ectomicorrizas, las cuales ayudan a suministrar nutrientes minerales, al aumentar la superficie de absorción de la planta y el poder de asimilación de los pocos nutrientes de esos suelos tan pobres. Además, presentan un conjunto de modificaciones anatómicas y fisiológicas que le permiten desarrollarse en áreas muy secas (sequía edáfica), como son: cutícula gruesa, estomas hundidos y área foliar reducida, todo lo cual impide el exceso de transpiración. También presentan un

sistema bien desarrollado de producción de resina, que hace a estos pinos muy resistentes a las infecciones y a los daños físicos (León y Suárez, 1998).

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Descripción general del área de estudio**

La Empresa Forestal Integral (EFI) Viñales está ubicado en el municipio del mismo nombre. Tiene una superficie de 41 523.4 ha, distribuidas en dos unidades silvícola: Viñales y San Vicente, las cuales responden a la necesaria organización del Patrimonio Forestal en el territorio. Se utilizaron los datos de la ordenación forestal de la EFI y datos obtenidos por los investigadores durante el trabajo de campo.

### **Características climáticas**

La temperatura promedio anual fluctúa entre 24.0 y 25.5 °C, el promedio diario del mes más frío (enero) se sitúa en los 21–23 °C y sube en los meses más calurosos Julio y agosto a 27–28 °C; las precipitaciones anuales fluctúan entre 1600 y 1700 mm (CITMA, 2006).

### **Características de los suelos**

Los suelos que predominan en los abruptos territorios de la EFI Viñales pueden ser clasificados de acuerdo a la última versión de la clasificación de suelos cubana (Hernández, Mesa *et al.*, 1999) como Lithosol dístico, los más esqueléticos y pobres en arcillas y nutrientes se desarrollan sobre eluvios de esquistos ácidos del Jurásico, los algo más profundos, de textura loamosa se desarrollan sobre proluvios-colvios provenientes de la erosión geológica de los lithosoles dísticos y esquistos (Hernández *et al.*, 1973), los más profundos pueden ser considerados suelos alíticos de baja actividad arcillosa.

Todos son suelos ácidos, desaturados, poco profundos, de textura muy ligera, con contenidos muy bajos en nutrientes y también en materia orgánica que se acumula sólo en los centímetros superficiales en forma predominante de humina heredada y ácidos fúlvicos (Ortega, 1983).

### **Métodos dasométricos**

Para obtener los parámetros dasométricos para la base de datos se utilizó el método de Bitterlich (Pardé y Bouchon, 1994), para lo cual se seleccionaron puntos al azar en los rodales 1 del lote 37, rodales 1 y 3 del lote 72 y rodal 4 del lote 42, en plantaciones de *Pinus caribaea*, mientras que en las plantaciones de *P. tropicalis* los puntos se seleccionaron en el rodal 7 del lote 34, rodal 8 y 1 del lote 58 y rodal 6 del lote 36. Se determinaron los valores promedios de los diferentes parámetros y el error de la media.

A partir de las parcelas permanentes y curvas de crecimiento en ambas especies se determinó el incremento medio anual para ambas especies, tomando como referencia el año 2007.

### **Características de los rodales seleccionados**

#### Rodales de *Pinus caribaea*

Lote 37: Rodal 1 (25 ha), edad 8 años, calidad de sitio II (regular)

Lote 42: Rodal 4 (7.8 ha), edad 24 años, calidad de sitio II (regular)

Lote 72: Rodal 2 (10.7 ha), edad 14 años, calidad de sitio II (regular); Rodal 3: (11.7 ha) edad 19 años, calidad de sitio I (bueno).

#### Rodales de *Pinus tropicalis*

Lote 34: Rodal 7 (27.3ha), edad 7 años, calidad de sitio III (malo)

Lote 58: Rodal 8 (14.8 ha), edad 13 años, calidad de sitio II (regular); Rodal 1 (8.6 ha), edad 16 años, calidad de sitio II (regular)

Lote 33: Rodal 6 (21.1 ha), edad 23 años, calidad de sitio II (regular)

En los rodales seleccionados se determinó el carbono retenido por la biomasa forestal (fuste), así como el contenido de carbono que se encontraba en la hojarasca y en el suelo. Para lo cual se realizó un muestreo sistemático aleatorio en los mismos rodales ya evaluados. Se levantaron un total de 10 parcelas con una dimensión de 1m<sup>2</sup>, se tomó en cuenta la metodología de la Fundación Solar (1999).

La densidad aparente del suelo se determinó por el método de cilindro (Mac Dicken, 1997).

#### **Forma de evaluación de los parámetros seleccionados**

Para el cálculo de la biomasa forestal (BMf) de las plantaciones de *Pinus caribaea* y *P. tropicalis*, se empleó la fórmula señalada por Álvarez (2005):

$$BMf = V.D \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot 1000]$$

Donde

V=volumen del fuste

D=densidad de la madera [kg·m<sup>-3</sup>]

Para el cálculo del volumen del fuste se utilizó la fórmula:

$$V = \pi /4. D^2. H.f$$

Donde:

D = diámetro (medido a 1,30 m)

H = Altura

f = Coeficiente mórfico

$\pi /4$ = Constante

Esta expresión no considera la totalidad del árbol, sino la biomasa forestal o comercial, por lo que la biomasa total (BMT) debe calcularse mediante la multiplicación por un factor de expansión de biomasa (FEB; según Brown, 1996).

#### **Carbono contenido en el suelo**

El cálculo del carbono retenido en el suelo se determinó por la fórmula señalada por Ponce de León (2006)

$$RCS = (1.724 \cdot MO (\%)).DA (\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}).P (\text{cm}).(1-\%I/100)$$

Donde:

RCS = Carbono retenido en el suelo (tC.ha<sup>-1</sup>)

DA = Densidad aparente (g·cm<sup>-3</sup>)

P = Profundidad (cm)

MO = Materia orgánica (%)

I= (inclusiones) %

En el presente trabajo se determinan además los aportes de biomasa a partir del mantillo de acículas, hojarasca y material leñoso.

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

### **Parámetros dasométricos**

El error de los valores medios de los parámetros dasométricos es elevado en ambas especies de pinos (Tabla 1) debido a la gran diversidad de calidad de los sitios donde se desarrollan.

**Tabla 1. Parámetros dasométricos correspondientes a plantaciones de *Pinus* de la Empresa Forestal Integral Viñales**

Lote	Rodal	D (cm)	H (m)	G (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> )
<i>Pinus caribaea var. caribaea</i>					
37	1	12.3 ± 0.4	9 ± 1.4	15 ± 2.5	69.1 ± 0.8
72	2	16.5 ± 4.0	12 ± 2.1	23 ± 5.1	130.6 ± 0.8
72	3	18.3 ± 4.8	16 ± 2.3	15 ± 2.1	
42	4	20.2 ± 7.0	13 ± 2.5	38 ± 7.6	250.5 ± 0.4
<i>Pinus tropicalis</i>					
34	7	7.1 ± 2.3	6 ± 1.0	4 ± 2.1	16.4 ± 0.8
58	8	12.6 ± 2.7	10 ± 1.7	7 ± 3.7	71.4 ± 1.7
58	1	15.8 ± 4.2	10 ± 2.4	90 ± 3.2	77.4 ± 0.8
33	6	20,1 ± 4.2	14 ± 2.2	16 ± 3.5	180.5 ± 0.6

D = diámetro del tronco; H = altura; G = área basal; V = volumen de madera del rodal

Existe una clara relación entre la edad de la plantación y la cantidad de carbono fijada; el valor máximo encontrado para *P. caribaea* fue de 168 tC·ha<sup>-1</sup> en un rodal de 24 años (Tabla 2), valor superior al reportado por Pérez (2007) de 149 tC·ha<sup>-1</sup> para esta misma especie. El rodal de 14 años mostró valores superiores al de 19 años, ya que este último se desarrolla en un suelo erosionado, muy pobre, con una calidad de sitio inferior con respecto a los restantes rodales, lo que se manifiesta en un número inferior de árboles por hectárea.

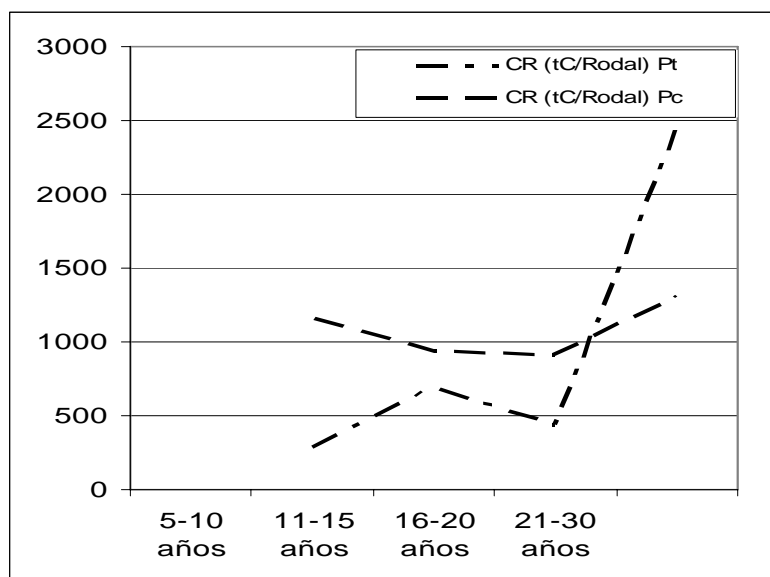
**Tabla 2 -Parámetros correspondientes al cálculo del carbono retenido en la biomasa forestal**

Lote	Rodal	Edad	BMf(t·ha <sup>-1</sup> )	BMt(t·ha <sup>-1</sup> )	CR (tC·ha <sup>-1</sup> )	CR (tC·Rodal)
<i>Pinus caribaea var. caribaea</i>						
37	1	8	53.2	93.2	46.6	1164,4
72	1	14	99.7	174.5	87.2	933,5
72	3	19	89.7	157.0	78.5	918,7
42	4	24	192.4	336.6	168.3	1312,9
<i>Pinus tropicalis</i>						
34	7	7	12.1	21.2	10.6	289.9
58	8	13	53.2	93.1	46.6	689.0
58	1	16	57.3	100.2	50.1	431.0
33	23	23	133.4	233.4	116.7	2461.9

BMf=biomasa del fuste, BMt= biomasa total, CR=carbono retenido

El valor más elevado de carbono retenido de *Pinus tropicalis* es de 116.7 tC·ha<sup>-1</sup> correspondiente a las plantaciones de 23 años de edad, que presentan los mayores valores en altura y diámetro, mientras que el menor valor lo muestran las plantaciones de 7 años con 10.62 tC·ha<sup>-1</sup>, muy superior al valor de 6 tC·ha<sup>-1</sup> obtenido por Rivero (2005) en una plantación de 5 años de edad correspondiente a la misma especie y en áreas de dicha empresa. Según Dauber (2000), las variaciones en estos valores están

determinadas por condiciones climáticas, de sitio y composición del bosque. En la Figura 1 se representa el carbono retenido por rodales de ambas especies de *Pinus* de acuerdo a la edad. La mayor cantidad de carbono retenido se encuentra en plantaciones *Pinus caribaea* de 24 años con  $168.3 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ .



**Figura 1. Carbono retenido por la biomasa forestal para *P. tropicalis* (Pt) y *P. caribaea* (Pc) en  $\text{tC}\cdot\text{Rodal}^{-1}$**

Las plantaciones de *P. caribaea* presentan mayor cantidad de carbono retenido en comparación con las plantaciones de *P. tropicalis* a medida que aumenta la edad en cada una de ellas. *P. caribaea* fija más carbono que *P. tropicalis* en los 3 ó 4 primeros lustros de desarrollo debido a su rápido crecimiento, mayor producción de biomasa y por tanto mayor fijación de  $\text{CO}_2$  por fotosíntesis, lo que se corrobora a partir de los resultados que muestran las Tablas 1 y 2.

#### **Hojarasca como reservorio de carbono**

Los aportes de biomasa de los diferentes componentes de la hojarasca mostraron diferencias ente rodales, a partir de la edad, número de árboles y vegetación asociada. En todos los casos las hojas representan entre un 50 y un 70% de la hojarasca, seguido de los frutos con 20 a 15% y con una menor incidencia las ramas. La acumulación de hojarasca fue de  $174$  a  $273 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  (González, 2007).

La cantidad de carbono retenido en la hojarasca es escaso:  $1.35$  y  $1.40 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  a pesar de estar constituido por detritos vegetales ricos en lignina, resinas y terpenos que hacen difícil la descomposición (Ortega, 1985) por lo que se debería haber esperado valores más elevados. Estas cifras tan bajas coinciden con las reportadas por Baptiste (2004), quien determinó sólo  $1.86 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  de carbono en la hojarasca en una plantación joven de *Pinus caribaea* en áreas de la misma Empresa; asimismo, Rivero (2005) obtuvo resultados de  $1.69 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$  de carbono en la hojarasca para la misma especie y lugar.

Ortega (1983) constató también la poca importancia del mantillo de hojarasca bajo los pinares de la Cordillera de Guaniguanico, consideró que los detritos vegetales no se acumulaban debido a lo abrupto del terreno. En contraste con esto, en los pinares que crecen en suelos derivados de este mismo tipo de roca, pero situados en terrenos de topografía menos accidentada, se han visto mantillos de hasta  $10 \text{ cm}$  de potencia (Ortega, 1983).



### Acumulación de carbono en el suelo

El valor obtenido de la acumulación de carbono en el suelo para los rodales evaluados en la áreas de plantación ocupados por la especie *Pinus caribaea* fue de 17.4 tC·ha<sup>-1</sup>, los valores de materia orgánica en estos suelos son medianamente bajos e inferiores al 3 %.

### Carbono almacenado en las diferentes fuentes

En la Tabla 3 se muestra la cantidad de carbono almacenado en los diferentes reservorios considerados en una plantación de *Pinus caribaea*, se constata la poca participación de la hojarasca en relación con el valor total del carbono retenido.

Se puede destacar que se ha absorbido de la atmósfera 824 toneladas de CO<sub>2</sub>·ha<sup>-1</sup> en los rodales de *Pinus caribaea* evaluados en la Empresa Forestal Viñales.

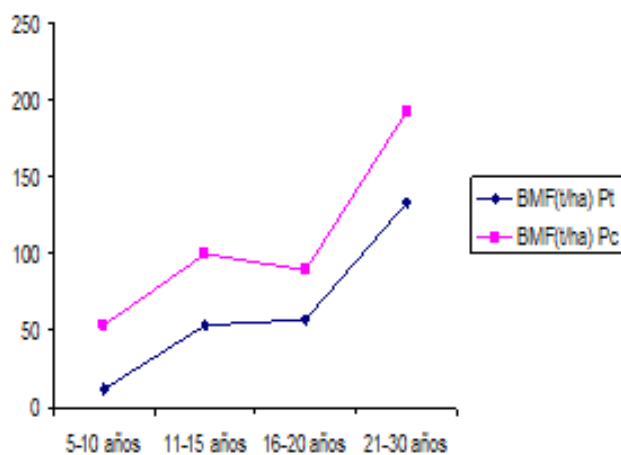
**Tabla. 3. Carbono almacenado en los diferentes reservorios en una plantación de *Pinus caribaea* .**

Unidades	Hojarasca	Fuste	Suelo	Total
tC·ha <sup>-1</sup>	1.35	192.42	17.4	244.3
tC total	74.52	9291.34	960,4	10 328.6

Área total=(55,2 ha)

### Comparación entre el carbono retenido por *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* en la biomasa forestal

En la Figura 2 se muestra la comparación entre *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* en cuanto al carbono retenido en tC·ha<sup>-1</sup> en la biomasa forestal.



**Figura 2. Comparación entre *Pinus caribaea* (Pc) y *Pinus tropicalis* (Pt) en cuanto al carbono retenido por la biomasa forestal en tC·ha<sup>-1</sup>.**

Inicialmente *P.tropicalis* presenta un crecimiento lento, que después de los 5 años se asemeja a *P. caribaea*.

*P. caribaea* presenta un crecimiento mucho más rápido para lo cual debe tener un metabolismo mucho más activo, el que se traduce en una

fotosíntesis más intensa, una mayor exigencia nutricional, así como necesidades hídricas mayores.

*P. tropicalis* es más tolerante a ecotopos pobres en nutrientes minerales y agua. Como es lógico todo ello influye sobre el crecimiento, que resulta más lento en esta especie.

A lo anterior se puede añadir que el *P. caribaea* posee 3 acículas por fascículo, mientras que *P. tropicalis* solo dos, las cuales presentan una cutícula sumamente gruesa con deposiciones de ceras. Esto hace que el aparato estomático se encuentre imbricado en la misma limitando la difusión de gases como el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub>, así como el vapor de agua por transpiración, lo que determina que su actividad fotosintética sea menos intensa que la de *P. caribaea*, haciendo que su crecimiento resulte más lento que este último.

García (2006) señala diferencias en los valores de fotosíntesis y transpiración estomática o cuticular así como potenciales hídricos entre ambas especies, a partir de características ya analizadas.

## CONCLUSIONES

La biomasa del fuste para los diferentes rodales se comporta entre los rangos 53 a 193 t·ha<sup>-1</sup> para *P. caribaea*, mientras que para *P. tropicalis* varía entre 12 y 134 t·ha<sup>-1</sup>.

El carbono total retenido por la biomasa forestal para *P. caribaea* es 4237884.9 tC, mientras que para *P. tropicalis* es de 330 863.3 tC.

Las plantaciones de *P. caribaea* muestran mayor retención de carbono con valores de 168 tC·ha<sup>-1</sup>

Los suelos correspondientes a los rodales de *P. caribaea* retienen 17.4 tC·ha<sup>-1</sup>

Las áreas ocupadas por *P. caribaea* y *P. tropicalis* muestran diferencia en cuanto al carbono capturado: 3.48 tC·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> y 1.66 tC·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran que las plantaciones de *P. caribaea* y *P. tropicalis* constituyen un importante sumidero de carbono por lo que representan una alternativa muy importante para la mitigación del efecto invernadero.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, B. A. 2005. *Base de dato sobre la densidad de la madera de especies arbóreas forestales*. Inf. Final del subproyecto 11.25.03. Programa Ramal de Medio Ambiente, MINAG, LA Habana, 27 pp.
- Andrade, H. J., 2001. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? <http://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6378s/x6378s00.00pdf>
- Baptiste, T., 2004. *Determinación del carbono capturado por una plantación joven de Pinus caribaea*. Trabajo de Diploma, Facultad de Forestal y Agronomía. Universidad de Pinar del Río. 70 pp.
- Betancourt, A., 1987. *Silvicultura especial de árboles maderables tropicales*. Editorial Científico Técnica. La Habana. 430 pp.
- Brown S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO. Forestry Paper 134 p.
- CITMA, 2006. Serie de datos Meteorológicos.
- Ciesla, W. M., 1996. Cambio climático, bosque y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Estudios FAO. Montes, Roma 146 pp.
- Dauber, E.; J. Teran, y R. Guzmán., 2002. Estimación de carbono y biomasa en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1: 1-10.
- Delaney, M.; Brown, S; Lugo, E; Torres A. y Bello Quintero, A. 1997. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five life zones of Venezuela. *J. tropical ecol.*, 13: 697-708.p.
- FAO, 2003. *Situación de los bosques del mundo*. FAO. Roma. ISSN 1020-5721.
- Fundación Solar, 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en el uso del suelo. 12-24 p.
- García Y., (2006). Estrategia para la conservación intraespecífica de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*, Barret y Golfari. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Ecológicas. Proyecto de cooperación doctoral Universidad de Alicante. Cuba/España. Pinar del Río. Cuba.
- Hernández, A., J. M. Pérez Jiménez *et al.*, 1973. Estudio genético y uso de los suelos del Plan Forestal Macurijes. *Acad. Cien. Cuba, ser. Suelos*, 17 p.

- Hernández A., A. Mesa, J. M. Pérez Jiménez, E. Fuentes Alfonso, *et al.*, 1999. *Nueva clasificación genética de los suelos de Cuba*. Instituto de Suelos, La Habana, 64 pp.
- León S. T., y A. Suárez, 1998. *Efecto de las plantaciones forestales sobre el suelo y agua*. CONIF, Santa Fe de Bogota, 143 p.
- Mac Dicken, K., 1997. *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock Internacional. Arlington, 87 p.
- Margalef, R., 1995. *Ecología*. Ediciones Omega SA. Barcelona. 981 p.
- Mercadet, A y A. Álvarez, 2005. *Metodología para el establecimiento de la línea de base de retención de carbono por las Empresas Forestales de Cuba*. Informe final de su proyecto 11/05/03. Programa Ramal de Medio ambiente. MINAGRI. 27 pp.
- Moura, C. P., 2001. La Convención sobre el clima y el mercado de la contra parte de las emisiones de carbono basada en las actividades forestales. *Unasyuva*, 52(206): 34-40.
- Ortega Sastriques, F., 1983. El humus de los suelos de Cuba. I Suelos derivados de esquistos ácidos. *Ciencias de la Agricultura*, 17: 63-90.
- Ortega Sastriques, F., 1985. *Composición fraccional del humus de los suelos de Cuba*. Tesis para optar por el grado de Dr. En Ciencias Agrícolas, Instituto de Suelos, La Habana, 170 pp.
- Pérez E., 2007. Implementación de una estrategia de mitigación para los Cambios Climáticos. Estudio de caso: Unidad Silvícola de Abreus. Trabajo de Diploma, Facultad de Forestal y Agronomía. Universidad de Pinar del Río. 87 p.
- Pardé J y J. Bouchon, 1994. *Dasimetría*. Editorial Paraninfo, 2da Edición Madrid, 375p.
- Raev, I., 1996. Acumulación de CO<sub>2</sub> de carbono en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria, en las últimas décadas, 13-22 p. En *Actas del XI Congreso Forestal Mundial*. Antalya, Turquía.
- Ramírez O., y R. Gómez, 1999. Estimación y valoración económica del almacenamiento de carbono, *Revista Forestal Centroamericana*, 27 (Julio–septiembre): 17-22 p.
- Rivero, A. Y., 2005. Determinación de captura de carbono en una plantación Joven de *Pinus caribaea*. Trabajo de Diploma .Facultad de Forestal y Agronomía. Universidad de Pinar del Río. 90p.