

## CARBONIZADOS DE ORIGEN VEGETAL (COV) PARA LA GENERACIÓN DE ANTROPOSOLES. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA

### CHARS OF VEGETABLE ORIGIN (COV) FOR ANTHROPOSOILS GENERATION. OBTENTION AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION

Luisa F. Jiménez<sup>1</sup>, María C. Baquero<sup>1</sup>, José de J. Díaz<sup>1</sup>

Recibido: 16/12/05 – Aceptado: 15/11/06

#### RESUMEN

Se obtuvieron carbonizados de origen vegetal a escala de laboratorio a partir de madera de *Eucalyptus globulus*, con diferentes condiciones de carbonización. Los carbonizados se caracterizaron fisicoquímicamente mediante análisis próximo, elemental, índice de yodo, capacidad de intercambio catiónico, adsorción de fosfato y pH. Los resultados muestran que los carbonizados obtenidos a 450 °C, con una velocidad de calentamiento de 1,0 °C/min, y con 60 min como tiempo de residencia, presentan un mejor comportamiento en cuanto a la capacidad de intercambio catiónico y adsorción de sales, propiedades importantes para la generación de antroposoles.

**Palabras clave:** carbonización, carbón de madera, antroposoles.

#### ABSTRACT

Chars of vegetable origin were obtained at laboratory scale starting from *Eucalyptus globulus* wood, with different carboniza-

tion conditions. The chars were characterized physicochemically by proximate and ultimate analysis and determination of iodine index, capacity of cationic exchange, phosphate adsorption and pH. The results show that the chars obtained at 450 °C, with a rate of heating of 1.0 °C/min and with a residence time of 60 min, present better behavior in terms of cationic exchange capacity and adsorption of salts capacity, important properties for the generation of anthroposols.

**Key words:** Carbonization, wood chars, anthroposols.

#### INTRODUCCIÓN

Colombia posee un gran porcentaje de sus suelos en regiones tropicales húmedas, con un régimen de lluvias alto, características ácidas y con deficiencia en materia orgánica; cuyo efecto es una baja disponibilidad de nutrientes, rápida descomposición de la materia orgánica y condiciones extremas del suelo que ge-

<sup>1</sup> Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Bogotá., Colombia. jddiazv@unal.edu.co

neran problemas en el desarrollo de la planta, agravados por la tala indiscriminada de selva y la destrucción de reservas naturales no aptas para la agricultura intensiva. Por esta razón surge la necesidad de usar un material que garantice fertilidad, almacenamiento de nutrientes, retención de humedad, versatilidad y facilidad de manejo. La incorporación de carbón de origen vegetal al suelo puede suplir estas carencias, como lo muestran investigaciones antropológicas en zonas tropicales en las cuales se encontró un alto contenido de carbono, que con el transcurso del tiempo ha mantenido suelos más fértiles (1).

El carbón vegetal se obtiene por diferentes métodos, casi todos artesanales, en los cuales no se controlan las condiciones de proceso. El material producido se ajusta a las condiciones del medio, como consecuencia de factores sociales como la tradición y la experiencia (2). Por consiguiente, es importante la investigación y el mejoramiento de dichos procesos artesanales de fabricación de carbón vegetal mediante la manipulación de diversas variables para alcanzar el máximo de productividad y eficiencia en el proceso.

En este trabajo se investigaron las mejores condiciones de carbonización de madera de *Eucalyptus globulus* a nivel de laboratorio, modificando la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia. Para la evaluación de los carbonizados obtenidos se realizaron pruebas fisicoquímicas con el fin de determinar la influencia de las condiciones operativas en el proceso de degradación térmica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Consecución y preparación de muestras.** Las muestras de madera fueron seleccionadas de árboles plantados en la Sabana de Bogotá, de la especie *Eucalyptus globulus*. Fueron secadas al aire, cortadas y molidas para luego tamizarlas hasta obtener un tamaño de 250  $\mu$ m para los ensayos de caracterización preliminares. Para las carbonizaciones, la madera se cortó en trozos de 0,03 x 0,01 x 0,01 m.

**Caracterización de la madera.** La caracterización de la madera (aserrín) comprendió los análisis próximo y elemental según las normas ASTM D3172 y ASTM D3176, análisis termogravimétrico (ATG) y oxidación con temperatura programada (OTP). Los análisis ATG y OTP para el aserrín se realizaron en un equipo Perkin-Elmer TGA 7, tanto en atmósfera de nitrógeno como de aire, con temperaturas entre 25 y 600 °C, velocidades de calentamiento de 10, 15 y 20 °C/min, y con flujos de 0,020 L/min.

**Carbonización.** Para este proceso se carbonizaron 25 g de madera bajo las condiciones mostradas en la Tabla 1. El equipo consistió de un horno tubular horizontal de *mullita* con sistema de calentamiento mediante resistencias eléctricas, termocupla tipo K y controlador de temperatura marca *Watlow*. El reactor dispone de una entrada para el gas inerte, y un sistema para recoger los alquitranes y desechar los gases producidos. El seguimiento de la carbonización se realizó calculando el porcentaje de quemado (%Q), definido como el porcentaje del sólido removido según la siguiente ecuación:

$$\%Q = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100$$

donde  $m_i$  corresponde a la masa inicial y  $m_f$  a la masa después del tratamiento térmico.

**Caracterización de los carbonizados de origen vegetal (COV).** La caracterización fisicoquímica de los carbonizados comprendió los análisis próximo mediante la determinación de los contenidos de humedad (h), materia volátil (MV), ceniza (Cz) y carbono fijo (Cf), análisis elemental con contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y oxígeno (O) por diferencia según las normas ASTM D3172 y ASTM D3176 (3). También se realizaron determinaciones del índice de

yodo, norma ASTM D1510 (4); capacidad de intercambio catiónico (CIC) de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5167 (5); pH según norma ASTM D1512 (4), y adsorción de fosfatos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de la madera

Los resultados de la caracterización de la madera se muestran en la Tabla 2. El material de partida, *Eucalyptus globulus*, tiene contenidos de humedad y cenizas relativamente bajos, en tanto que presenta un alto porcentaje de materia volátil. Su composición elemental muestra que la madera está compuesta en gran parte por carbono y oxígeno, tiene un contenido bajo de hidrógeno (6,6% en peso) y un porcentaje mínimo de nitrógeno. Los datos de nitrógeno indican que su concentración es tan baja en la madera que el instrumento no la detecta.

La Figura 1 muestra el termograma TG y su primera derivada, DTG, para la madera de *Eucalyptus globulus* en función del tiempo con una temperatura final de 600 °C. En este termograma la ordenada de la izquierda corresponde a la relación de  $m/m_0$ , en la cual  $m_0$  es la masa inicial y  $m$  la masa remanente a medida que se presenta la degradación térmica, y el eje Y de la derecha corresponde a la primera derivada o velocidad de pérdida de peso. La pérdida de masa en la carbonización ocurre en tres zonas de temperatura. La primera zona de temperatura (zona AA en la gráfica) inicia aproximadamente a 80 °C y termina alrededor de 150 °C, esta pérdida de masa inicial se debe a la eliminación del agua adsorbida físicamente. La ma-

**Tabla 1.** Condiciones de carbonización

| Muestra | TC (°C) | VC (°C/h) | TR (min) | Quemado (%) |
|---------|---------|-----------|----------|-------------|
| COV1    | 350     | 1,0       | 60       | 55,30       |
| COV2    | 400     | 1,0       | 60       | 54,70       |
| COV3    | 450     | 1,0       | 60       | 55,63       |
| COV4    | 500     | 1,0       | 60       | 57,64       |
| COV5    | 550     | 1,0       | 60       | 60,48       |
| COV6    | 350     | 1,0       | 120      | 59,40       |
| COV7    | 400     | 1,0       | 120      | 59,47       |
| COV8    | 450     | 1,0       | 120      | 61,99       |
| COV9    | 500     | 1,0       | 120      | 64,57       |
| COV10   | 550     | 1,0       | 120      | 65,54       |
| COV11   | 350     | 3,5       | 60       | 59,37       |
| COV12   | 400     | 3,5       | 60       | 59,90       |
| COV13   | 450     | 3,5       | 60       | 61,31       |
| COV14   | 500     | 3,5       | 60       | 62,42       |
| COV15   | 550     | 3,5       | 60       | 62,65       |
| COV16   | 350     | 3,5       | 120      | 61,51       |
| COV17   | 400     | 3,5       | 120      | 61,80       |
| COV18   | 450     | 3,5       | 120      | 63,20       |
| COV19   | 500     | 3,5       | 120      | 66,51       |
| COV20   | 550     | 3,5       | 120      | 68,63       |

TC: temperatura de carbonización; VC: velocidad de calentamiento; TR: tiempo de residencia.

yor pérdida de masa se presenta entre 250 °C y 400 °C asociada con la remoción de materia volátil proveniente en su mayor parte de la descomposición térmica de las hemicelulosas y la celulosa. Como rasgos importantes de este proceso pueden observarse en el termograma las temperaturas de la depolimerización inicial de las hemicelulosas (DH), la descomposición de las hemicelulosas (DHCL) y el comienzo de la degradación de celulosa y lignina (DCL). Por último, en la zona entre 400 y 600 °C el cambio de masa corresponde al proceso de carbonización de la madera en el cual se descompone la lignina restante, cerca de los 400 °C (DL) y se produce la carbonización final.

Los resultados de los termogramas obtenidos concuerdan con los estudios realizados por Kastanaki y cols. (6) en madera, Grimm y cols. (7) y Byrne y cols. (8) con residuos lignocelulósicos, Williams y cols. (9) en cascarilla de arroz, y Shafizadeh y cols. (10) en algodón.

Para observar el efecto de la temperatura final en el proceso de pirólisis de la madera se realizaron una serie de termogramas variando la temperatura de carbonización entre 250 y 600 °C con el mismo programa de calentamiento, flujo de nitrógeno y masa de la muestra. Los termogramas fueron similares, pero a medida que aumenta la temperatura final de car-

**Tabla 2.** Caracterización del material de partida y sus carbonizados

| Muestra | Análisis próximo |        |        |        | Análisis elemental |       |       |       | I. de yodo    | CIC         | pH  |
|---------|------------------|--------|--------|--------|--------------------|-------|-------|-------|---------------|-------------|-----|
|         | h (%)            | MV (%) | Cf (%) | Cz (%) | C (%)              | H (%) | N (%) | O (%) | (mg/g carbón) | (Meq/100 g) |     |
| Aserrín | 3,70             | 81,30  | 14,70  | 0,30   | 48,90              | 6,60  | ND    | 44,50 |               |             |     |
| COV1    | 2,62             | 43,57  | 53,18  | 0,33   | 75,89              | 4,96  | ND    | 19,15 | 65,4          | 13,59       | 5,8 |
| COV2    | 2,65             | 39,12  | 57,97  | 0,26   | 72,24              | 4,85  | 0,02  | 22,89 | 75,1          | 3,47        | 6,1 |
| COV3    | 2,00             | 29,10  | 68,63  | 0,27   | 71,40              | 4,73  | ND    | 23,87 | 120,4         | 8,68        | 6,8 |
| COV4    | 1,70             | 24,88  | 73,17  | 0,25   | 70,63              | 4,88  | ND    | 24,49 | 141,7         | 3,47        | 6,8 |
| COV5    | 1,80             | 21,01  | 76,24  | 0,35   | 74,28              | 4,17  | ND    | 21,55 | 153,7         | 5,16        | 7,4 |
| COV6    | 2,68             | 45,01  | 51,80  | 0,31   | 76,15              | 4,69  | 0,01  | 19,15 | 69,1          | 6,95        | 5,9 |
| COV7    | 2,14             | 41,07  | 56,55  | 0,24   | 72,74              | 4,63  | 0,11  | 22,52 | 72,8          | 10,40       | 5,6 |
| COV8    | 1,97             | 38,00  | 59,78  | 0,25   | 74,28              | 4,46  | 0,04  | 21,22 | 168,7         | 13,89       | 6,9 |
| COV9    | 1,81             | 31,45  | 66,51  | 0,23   | 79,68              | 4,35  | 0,06  | 15,91 | 187,6         | 5,19        | 7,0 |
| COV10   | 1,75             | 25,04  | 72,48  | 0,23   | 79,87              | 4,55  | ND    | 15,58 | 190,1         | 3,41        | 7,5 |
| COV11   | 2,69             | 43,34  | 53,57  | 0,30   | 80,14              | 4,86  | 0,27  | 14,73 | 69,3          | 5,28        | 6,1 |
| COV12   | 2,26             | 40,46  | 57,07  | 0,21   | 74,37              | 4,73  | 0,04  | 20,86 | 94,0          | 5,13        | 6,6 |
| COV13   | 1,82             | 36,56  | 61,34  | 0,28   | 80,51              | 4,15  | ND    | 15,34 | 153,9         | 9,11        | 6,8 |
| COV14   | 1,60             | 29,94  | 68,10  | 0,36   | 81,32              | 3,91  | ND    | 14,77 | 184,3         | 4,78        | 7,3 |
| COV15   | 1,82             | 19,47  | 77,85  | 0,36   | 81,64              | 3,84  | ND    | 14,52 | 184,3         | 5,07        | 7,5 |
| COV16   | 2,63             | 44,04  | 52,98  | 0,35   | 82,48              | 3,90  | ND    | 13,62 | 97,9          | 13,69       | 6,8 |
| COV17   | 1,72             | 39,99  | 60,03  | 0,26   | 81,76              | 3,87  | ND    | 14,37 | 149,1         | 17,33       | 6,4 |
| COV18   | 1,91             | 33,23  | 64,63  | 0,23   | 82,37              | 3,97  | 0,01  | 13,65 | 265,5         | 46,94       | 7,0 |
| COV19   | 1,82             | 24,05  | 73,86  | 0,27   | 81,98              | 3,51  | 0,03  | 14,48 | 300,0         | 5,19        | 7,2 |
| COV20   | 1,64             | 20,97  | 76,85  | 0,24   | 82,14              | 3,10  | ND    | 14,76 | 301,9         | 15,72       | 7,4 |

H: humedad; MV: materia volátil; Cf: carbono fijo; Cz: ceniza; C: carbono; H: hidrógeno; N: nitrógeno; O: oxígeno. ND: No detectable. Los porcentajes están reportados en base como se analiza. I. de yodo = índice de yodo; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

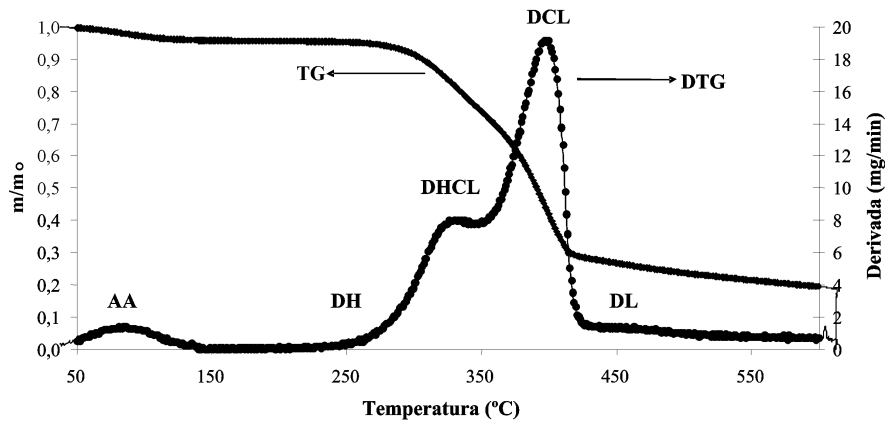


Figura 1. Termograma para madera de *Eucalyptus globulus*.

bonización, se tiene mayor porcentaje de quemado. Este comportamiento se muestra en la Figura 2. Desde 250 y hasta 350 °C se observa un aumento grande en el porcentaje de quemado; entre 350 y 550 °C las pérdidas de peso se mantienen en un porcentaje entre 78 y 88% y por encima de esta temperatura el porcentaje de quemado se incrementa nuevamente.

Cuando la madera se somete a calentamiento se inicia una serie de rompimientos de enlaces en la estructura molecular de

sus componentes; a medida que se llega a cierta temperatura se tiene la energía necesaria para romper determinados enlaces, liberando o degradando parte de la estructura inicial (8). Por tal razón, al llevar el material a la máxima temperatura de carbonización (600 °C) usada en este trabajo, se obtiene el mayor porcentaje de quemado. De acuerdo con los anteriores ensayos se determinó como intervalo de temperatura para realizar las carbonizaciones 350-550 °C. Este intervalo de temperatura

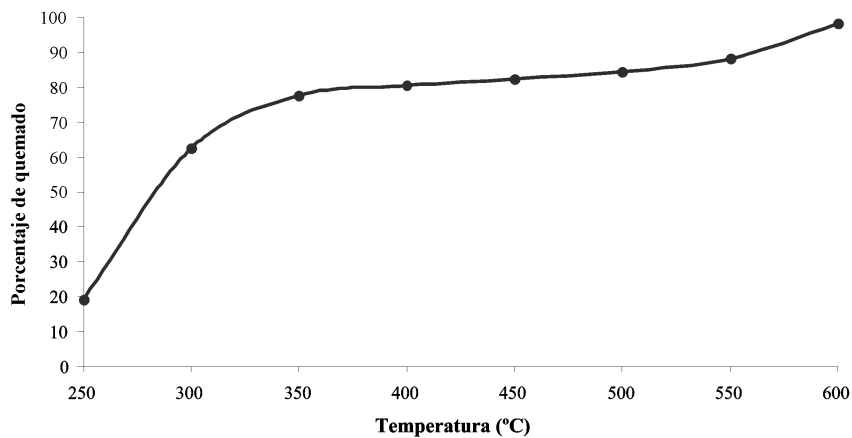


Figura 2. Porcentaje de quemado en función de la temperatura final de carbonización.

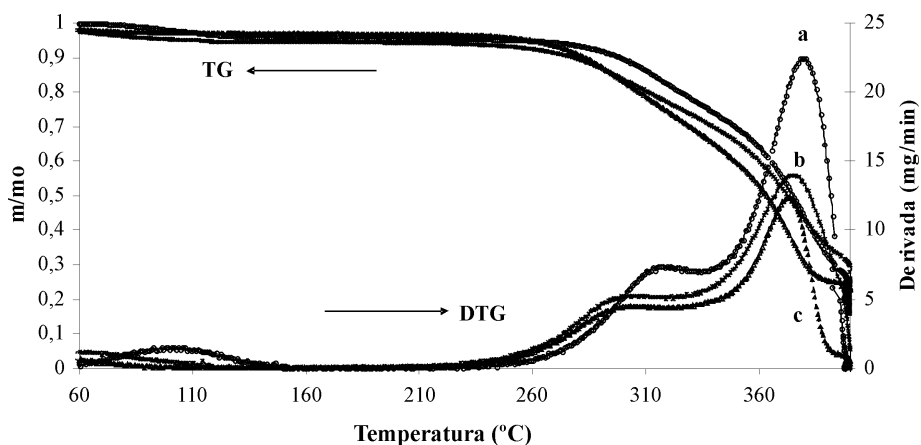
corresponde a la zona donde el porcentaje de quemado es relativamente constante y las temperaturas de los picos principales no varían de manera apreciable.

Para observar el efecto de la velocidad de calentamiento se realizaron ensayos desde la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 400 °C con tres velocidades de calentamiento 10, 15 y 20 °C/min, manteniendo las mismas condiciones de flujo, masa y programa de calentamiento. Los resultados se muestran en la Figura 3.

La velocidad de calentamiento influye en cada una de las etapas de la descomposición térmica de la madera, así como en la sensibilidad y resolución de los perfiles de carbonización. En los termogramas DTG se observa que la zona de mayor pérdida de masa (segunda zona) para una velocidad de calentamiento de 10 °C/min está en el intervalo de temperatura entre 270-397 °C; para 15 °C/min se encuentra entre 252-399 °C y a 20 °C/min en un intervalo entre 206 y 399 °C. Esto muestra que el límite inferior de temperatura para

el intervalo disminuye drásticamente a medida que la velocidad de calentamiento aumenta, mientras que el límite superior se mantiene constante. Cuando la velocidad de calentamiento se incrementa, la reacción de desvolatilización es mayor dado que no se permite que los volátiles desprendidos reaccionen entre sí (11), y la temperatura del pico principal se desplaza hacia valores mayores (373, 376 y 380 °C respectivamente) aumentando las pérdidas de masa.

El ensayo de oxidación con temperatura programada, OTP, se muestra en la Figura 4. Esta prueba se realizó entre 25-480 °C. La descomposición térmica de la madera también presenta pérdidas de peso en tres zonas de temperatura como en los ensayos TG. La primera zona se encuentra a temperaturas entre 25-200 °C, que corresponde a la pérdida de agua (Ta). La segunda zona se presenta en el intervalo de temperaturas entre 200 y 325 °C; alrededor de 250 °C se registra la primera pérdida significativa de peso correspondiente a la liberación inicial de volátiles (TIMV); cerca de 280 °C



**Figura 3.** Efecto de la velocidad de calentamiento en análisis térmico, a: 20 °C/min; b: 15 °C/min y c: 10 °C/min.

se presenta un cambio de pendiente mucho más apreciable, dando lugar a la aparición del pico más grande en DTG ( $T_p$ ), que registra la velocidad máxima de reacción ( $296\text{ }^\circ\text{C}$  con 50% de quemado). Este intervalo de temperatura representa la combustión simultánea de volátiles y del carbonizado. La tercera zona se encuentra en el intervalo de temperatura entre  $325\text{--}480\text{ }^\circ\text{C}$ . Aparece un pico que corresponde a la combustión del residuo carbonoso a  $418\text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_c$ ). La temperatura de combustión total de la madera ( $T_q$ ) se alcanza a los  $444\text{ }^\circ\text{C}$ . Los resultados obtenidos en el presente estudio para madera de *Eucalyptus globulus* concuerdan muy bien con los resultados mostrados por Liou (12) para cascarilla de arroz, y Grim y cols. (7) con residuos de álamo.

De acuerdo con las condiciones de flujo, masa de muestra y velocidad de calentamiento, la biomasa presenta una temperatura a la cual empieza su ignición y, para ensayos de pirólisis por combustión parcial, es muy importante definirla. Bajo las condiciones de experimentación del presente estudio se encontró que la temperatura en el máximo del pico principal

fue de  $296\text{ }^\circ\text{C}$ , que podría tomarse como la temperatura de ignición de la madera o temperatura en la cual la velocidad de pérdida de masa es máxima. Este valor está de acuerdo con estudios realizados por Grotkjaer y cols. (13) con diferentes tipos de biomasa.

### Pirólisis

La pirólisis de la madera, bajo las condiciones del presente estudio, rindió tres clases de productos: un residuo sólido, una fracción líquida que se recogió a la salida del reactor, y la fracción gaseosa que se descargó al ambiente. La proporción aproximada de cada uno ellos en porcentaje en peso es de 39, 40 y 21% para los gases, la cual se obtuvo por diferencia. El sólido obtenido conserva la misma forma de los cubos de madera de partida. La fracción líquida consiste de dos fases principales, una fase acuosa en mayor proporción (ácidos piroleñosos), la cual contiene una gran variedad de compuestos oxigenados de bajo peso molecular (14), y una fase insoluble (alquitranes) que contiene los compuestos orgánicos en

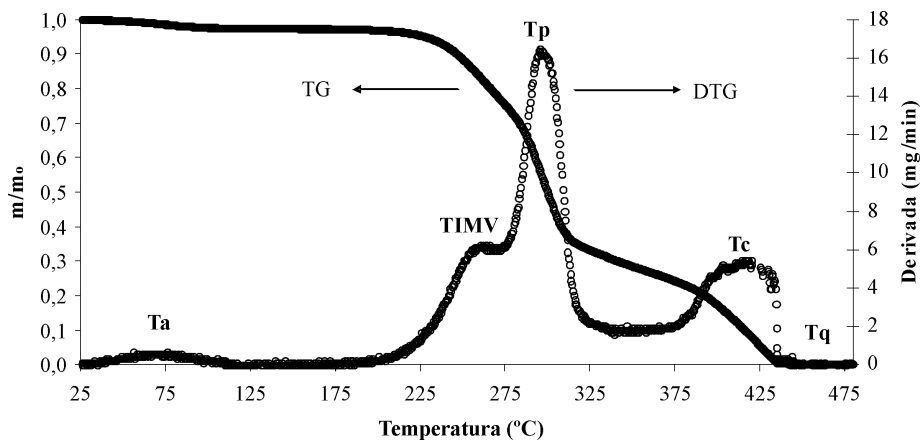


Figura 4. TPO para madera de *Eucalyptus globulus*.

su mayoría aromáticos de alto peso molecular (14). Los alquitranes obtenidos son líquidos viscosos y oscuros. Los gases en este estudio no fueron recogidos para su análisis. De acuerdo con las publicaciones realizadas por Williams y Besler en biomasa (9), cuando se carboniza con un régimen de bajas temperaturas (200-400 °C), los productos gaseosos desprendidos corresponden en su mayoría a dióxido, monóxido de carbono y vapor de agua; mientras que a temperaturas superiores (mayor a 400 °C), la concentración de estos gases disminuye.

El comportamiento durante la carbonización del *Eucalyptus globulus* puede observarse en la Figura 5, en la cual se tiene el porcentaje de quemado en función de las diferentes variables. Al aumentar la temperatura en la carbonización, el porcentaje de quemado aumenta. A 350 °C se obtiene el menor porcentaje de quemado de la madera; esto sugiere que a esta temperatura la madera experimenta menos reacciones comparada con las made-

ras carbonizadas a temperaturas superiores donde los porcentajes de quemado son mayores. Al incrementar la temperatura final de carbonización la masa del sólido disminuye debido a la degradación térmica de los componentes volátiles e hidrocarburos de alto peso molecular dentro del material original. Con sus estudios en madera de Pino Williams y Besler (9) muestran la masa del carbón decrece con el incremento de la temperatura en los procesos de pirólisis.

Al aumentar la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia en la carbonización se incrementa el porcentaje de quemado, pero el tiempo muestra mayor influencia. Al aumentar el tiempo de contacto en la carbonización existe más oportunidad para que se presenten reacciones de desvolatilización generando un mayor porcentaje de quemado. A bajas velocidades de calentamiento, los fragmentos altamente reactivos producto del craqueo y la desvolatilización en el proceso de carbonización antes de abandonar el sólido

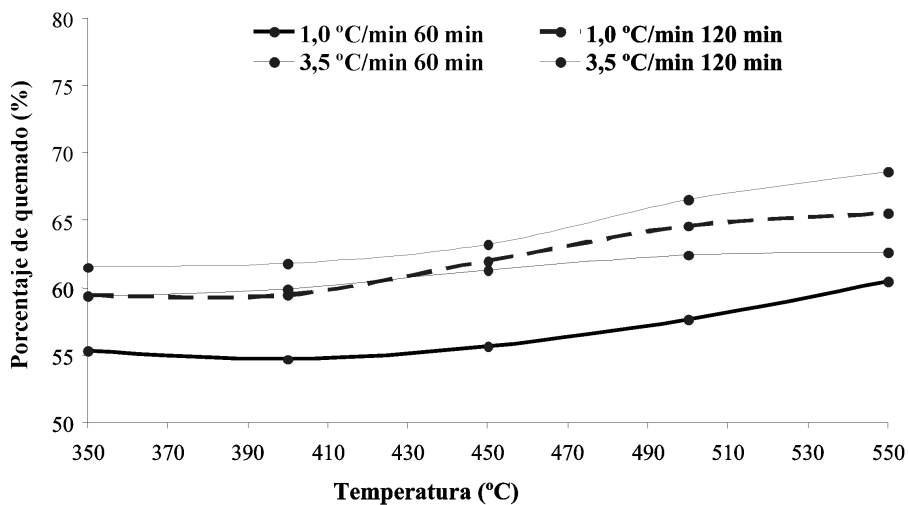


Figura 5. Porcentaje de quemado en función de la temperatura de carbonización, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.



pueden presentar reacciones de repolimerización, ayudados por la baja velocidad de evacuación de los productos (9); por tanto, a medida que aumenta la velocidad de calentamiento son menos las reacciones secundarias en el proceso de carbonización. Los productos de la degradación térmica a velocidades de calentamiento altas se desprenden rápidamente como volátiles obteniendo menos carbonizado.

En la Figura 6 se grafica el contenido de materia volátil de los carbonizados en función de las diferentes variables del proceso. Se observa una relación inversa entre la temperatura de carbonización y la materia volátil residual. Cuando la carbonización se realiza a temperaturas altas (550 °C), gran parte de la materia volátil que conforma la madera se volatiliza y remueve del sólido, mientras que a temperaturas bajas (350 °C), una gran parte aún permanece. En esta figura también se observa que a medida que el tiempo es más prolongado (120 min) y la velocidad de calentamiento es mayor (3,5 °C/min), se encuentra menor porcentaje de materia

volátil. El porcentaje de materia volátil residual está influenciado en mayor proporción por el tiempo que por la velocidad de calentamiento. Con un mayor tiempo de residencia, el carbonizado sigue perdiendo materia volátil durante la carbonización y, por esto, en el análisis próximo este valor disminuye (Tabla 2).

Los contenidos de ceniza en los carbonizados varían entre 0,21 y 0,36% (Tabla 2). La temperatura puede influir considerablemente en el contenido de ceniza cuando la carbonización se realiza entre 750-1400 °C, donde se encuentra el punto de fusión de algunos componentes de las cenizas en biomasa; en las temperaturas de carbonización de este estudio no se presenta ninguna influencia.

Después del tratamiento térmico, los carbonizados de la madera presentan un contenido entre 50 y 78% de carbono fijo, dependiendo de las condiciones de carbonización. En la Figura 7 se observa que a medida que la temperatura se incrementa el carbono fijo crece. Al aumentar la tem-

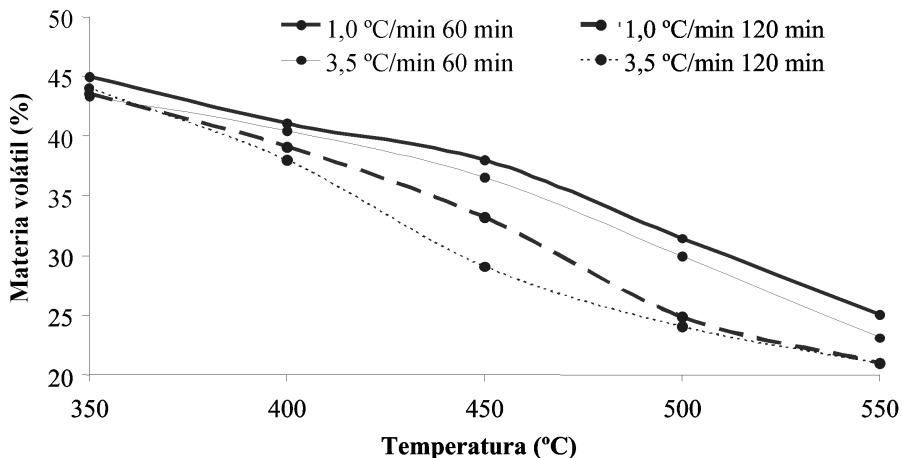


Figura 6. Materia volátil en función de la temperatura de carbonización, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.

peratura en la degradación térmica se volatilizan diferentes tipos de compuestos oxigenados a través de reacciones de depolimerización, descarboxilación, deshidroxilación y descarbonilación, entre otras, dejando la estructura principalmente compuesta por carbono. A medida que la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia aumentan hay un aumento en el contenido de carbono fijo en el carbonizado.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis elemental para los diferentes carbonizados. Se observa que el porcentaje de carbono es el más alto, mientras que el contenido de nitrógeno es el más bajo. Los contenidos de oxígeno e hidrógeno son menores que los porcentajes iniciales en la madera; esta disminución puede atribuirse a la formación de vapor de agua, dióxido de carbono, ácido fórmico y acético durante la carbonización, de acuerdo con estudios realizados por Hamad en cascarilla de arroz (16). El mayor porcentaje de carbono (entre

81-83%) se obtiene cuando se carboniza a una velocidad de calentamiento de 3,5 °C/min, con un *tiempo* de residencia de 120 min; a medida que se aumenta el tiempo de residencia se aumenta el porcentaje de carbono elemental.

El mayor contenido de oxígeno se presenta cuando se carboniza a velocidades de calentamiento bajas (1,0 °C/min) y tiempo de residencia cortos (60 min), lo cual confirma que éstos no son las condiciones apropiadas para que los volátiles ricos en oxígeno se desprendan de la matriz de la madera. La carbonización con velocidades de calentamiento altas y tiempos de contacto largos muestra menor concentración de oxígeno y gran porcentaje de carbono.

En la Tabla 2 se presenta el índice de yodo para cada uno de los carbonizados. Al aumentar la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, el índice de yodo aumenta como se muestra en la Figura 8. La temperatura de

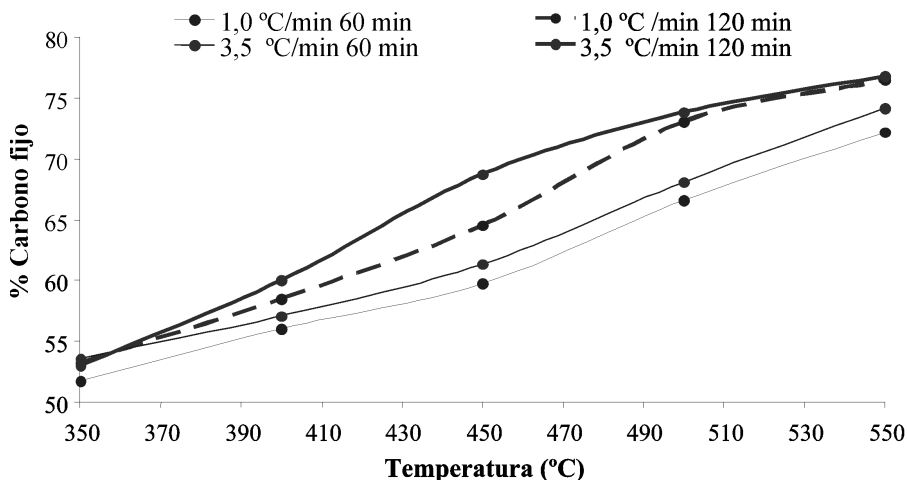


Figura 7. Porcentaje de carbono fijo en función de la temperatura de carbonización, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.

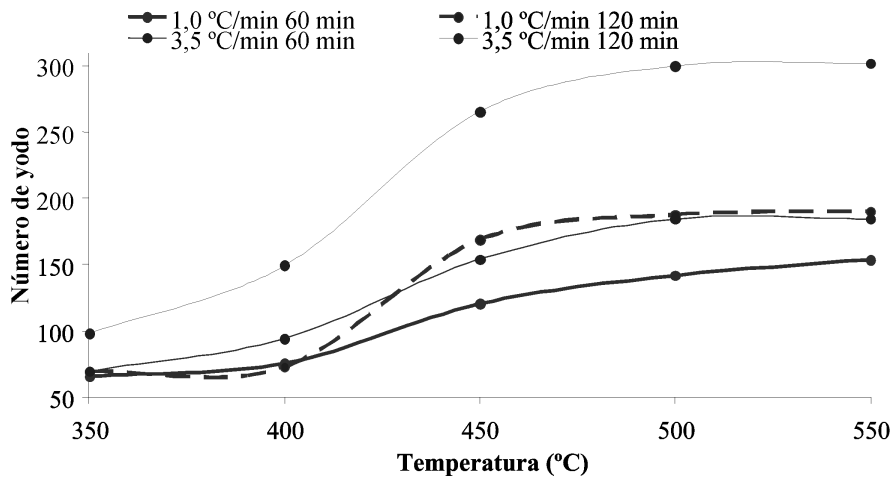


Figura 8. Número de yodo en función de la temperatura de carbonización, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia.

los procesos de pirólisis afecta la biomasa al nivel de partículas, cumpliendo dos procesos importantes: remover la humedad presente y proporcionar las condiciones para la degradación térmica. Según las condiciones de la pirólisis, los grupos más lábiles se retiran generando una estructura porosa (17); a medida que se aumenta la temperatura, pueden retirarse mayor proporción de grupos, generando mayor desvolatilización y, por ende, una mayor porosidad. El índice de yodo es un indicador del desarrollo de porosidad. La porosidad determinada con el índice de yodo corresponde a microporosidad, dado que la molécula de yodo tiene un diámetro de poro de 10 Å. Según los datos de la Tabla 2, los carbonizados generaron baja microporosidad. Para su aplicación como antroposoles, éstos deben presentar poros donde puedan entrar moléculas de agua, nutrientes y microorganismos. De estos resultados puede inferirse que los carbonizados obtenidos generan porosidad sin ningún proceso de

activación, lo cual es importante para su aplicación en suelos.

Los carbonizados obtenidos presentan en general una capacidad de intercambio catiónico entre 3 y 47 meq/100 g (Tabla 2), que permite intercambiar iones positivos en diferente proporción según las condiciones de carbonización. El carbonizado obtenido con una velocidad de calentamiento de 3,5 °C/min, y con un tiempo de residencia de 120 min, presenta a 450 °C un punto máximo en su capacidad de intercambio catiónico (46,94 meq/100 g). Los otros carbonizados también muestran el máximo a esta misma temperatura pero más desarrollados. Esta temperatura coincide con el punto en el cual el número de yodo se estabiliza en el valor más alto, lo cual puede estar asociado con el desarrollo de porosidad. Para su aplicación en suelos sería conveniente trabajar con carbonizados obtenidos a esta condición.

El pH de un carbonizado está determinado por los grupos superficiales presen-

tes después de los procesos térmicos. En la Tabla 2 se observa que a medida que aumenta la temperatura de carbonización, los carbonizados aumentan su pH hacia valores básicos. Los grupos oxigenados en la superficie de los carbonizados son los más importantes ya que determinan el carácter ácido-base del material; la acidez se incrementa generalmente con el aumento de oxígeno, y a su vez con los grupos superficiales con características ácidas como ácidos carboxílicos, fenoles y quinonas (18). A bajas temperaturas de carbonización, donde el carbonizado producido es mayor, se encuentran alquitranes con compuestos como pirocatecol, fenol, guayacol, cresol, creosol, tolueno, xileno, naftaleno; a esas temperaturas no se han degradado y se presentan características ácidas (17). Al aumentar la temperatura de carbonización hay una concentración de los grupos oxigenados menos ácidos y, por consiguiente, aumento del pH. Por estas características, los carbonizados obtenidos pueden presentar poder regulador en suelo. Los gru-

pos funcionales se forman durante el proceso de carbonización por la interacción de los radicales libres de la superficie con átomos como nitrógeno y oxígeno procedentes del precursor o de la atmósfera utilizada, lo cual indica que las propiedades del carbonizado principalmente se ven influenciadas por los métodos de degradación térmica y por las propiedades del material de partida (19).

Como los carbonizados de origen vegetal se aplican en el suelo es importante conocer el contenido de nutrientes y para este trabajo se determinó la cantidad de fósforo presente por el método de Bray II (20).

La determinación de fósforo y la adsorción de sales se realizó con el carbonizado que presentó mayor capacidad de intercambio catiónico, el COV 18 (Figura 9). Se determinó inicialmente la cantidad de fósforo total presente en el carbonizado. Este contenido de fósforo fue de 49,47 mg/kg, que comparado con el contenido de fósforo en los suelos es alto, lo

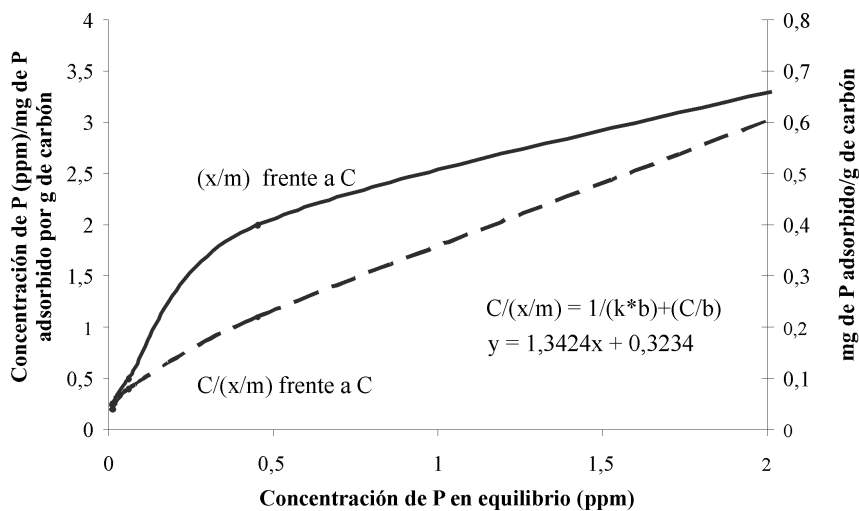


Figura 9. Adsorción de fósforo en el carbonizado COV.

cual es beneficioso para su aplicación como antroposol. El contenido alto de fósforo en estos carbonizados se debe a que el material precursor tiene un contenido alto de fosfatos. La isoterma de adsorción describe la relación en equilibrio existente entre la cantidad de la especie química disuelta y la adsorbida sobre la superficie del carbonizado a una determinada temperatura. En los procesos de adsorción interesan tanto la estructura porosa como la naturaleza química del carbón donde se encuentran átomos de carbono con valencia insaturada, grupos funcionales superficiales (con elementos como nitrógeno y oxígeno) y componentes inorgánicos (19), los cuales están determinados por la madera utilizada y por los procesos de carbonización.

### CONCLUSIONES

Los carbonizados obtenidos pueden comportarse como enmienda orgánica en el suelo de acuerdo con las características presentadas de pH, capacidad de intercambio catiónico, porosidad y capacidad de adsorción de sales como fosfato. Los valores más altos de estos parámetros se presentan en los carbonizados obtenidos entre 450 °C y 550 °C.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la División de Investigaciones de la sede de Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia (DIB) por su financiación a través del proyecto DIB-803984 "Obtención de carbonizados de origen vegetal para la generación de antroposoles".

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rondón, M.; Ramírez, J. A. CIAT Annual Report 2002. Confronting Global Climate Change. The use of charcoal in soils: Agronomic and environmental implications. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), Colombia. 2003;
2. Schenkel, Y.; Bertaux, P.; Vanwunbserghe, S.; Carre, J. An evolution of the mound kiln carbonization technique. *Biomass and Bioenergy* 1998; **14**:505-16.
3. American Society for Testing and Materials. 1982 Annual Book of ASTM Standards. 26. Philadelphia, PA, USA. 1982.
4. American Society for Testing and Materials. 1982 Annual Book of ASTM Standards. 1982; 37 Philadelphia, PA, USA.
5. Instituto Colombiano de Normas Técnicas Productos químicos industriales. Métodos de ensayo, Capacidad de intercambio catiónico Bogotá: Icontec 1998.
6. Kastanaki, E.; Vamvuka, D.; Grammelis, P.; Kakaras, E. Thermogravimetric studies of the behavior of lignite-biomass blends during devolatilization. *Fuel Processing Technology* 2002 77-78:159-66.
7. Grimm, A. E.; Bonelli, P. R.; Cukierman, A. L. Degradación térmica de mezclas de residuos plásticos y lignocelulósicos: caracterización cinética. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 2001; **5**:17-20

8. Byrne, C. E.; Nagle, D. C. Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon* 1997; **35**:259-66.
9. Williams, P.; Besler, S. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy* 1996; **7**:233-50.
10. Shafizadeh, F.; McGinnis, G. Chemical composition and thermal analysis of cottonwood. *Carbohydrate Research* 2001; **16**:273-77.
11. Liang, X. H.; Kozinski, J. A. Numerical modeling of combustion and pyrolysis of cellulosic biomass in thermogravimetric systems. *Fuel* 2000; **79**:1477-86.
12. Liou, T. H. Evolution of chemistry and morphology during the carbonization and combustion of rice husk. *Carbon* 2004; **42**:785-94.
13. Grotkjaer, T.; Dam-Jojansen, K.; Jensen, A.; Glarborg, P. An experimental study of biomass ignition. *Fuel* 2003; **82**:825-33.
14. Demirbas, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management* 2001; **42**:1357-78.
15. Di Blasi, C.; Buonanno, F.; Branca, C. Reactivities of some biomass chars in air. *Carbon* 1999; **37**:1227-38.
16. Hamad, M. Thermal characteristics of rice hulls. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 1981; **31**:624-26.
17. Demirbas, A. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis* 2004; **71**:803-15.
18. Marsh, H.; Heintz, E.; Rodríguez, R. F. Introduction to carbon technologies. Spain University of Alicante. 1997; pp. 35-99.
19. Marsh, H.; Heintz, E.; Rodríguez, R. F. Activated Carbon: Structure, characterization, preparation and applications. Publicaciones Spain: University of Alicante 1997.
20. Olarte, L. I.; Muñoz, B. M.; Benavides, G. E. D.; Garavito, F.; Luna, C.; Mejía, L., et al. Métodos Analíticos de Laboratorios de Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 4a. ed. Bogotá, Colombia; Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1979.