

# ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE ISOHÚMICO DE RESIDUOS DE MAÍZ EN INCEPTISOLES DE PAIRUMANI, VINTO, COCHABAMBA

Karen Guzmán M.<sup>1</sup>, Mauricio Azero A.<sup>1</sup>, José Sánchez P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Católica Boliviana San Pablo, Carrera de Ingeniería Ambiental, Cochabamba

<sup>2</sup> Granja Modelo Pairumani, Fundación Simón I. Patiño

Dirección de referencia: mzero@ucbca.edu.bo

## RESUMEN

En los valles mesotérmicos de Bolivia existen problemas de degradación de suelos y desertificación debido a la vigencia de diversas prácticas de sobreexplotación de biomasa que resultan en una desprotección del suelo y en una pérdida de materia orgánica edáfica. Dicha pérdida de materia orgánica redundante por diversos procesos en una pérdida integral de las capacidades del suelo. En suelos agrícolas de aprovechamiento intensivo, como ocurre en los valles mesotérmicos, el ritmo de disminución del contenido de materia orgánica del suelo es presumiblemente mayor, debido a la mayor presión de explotación de biomasa. En este contexto es urgente generar una tecnología y acciones precisas para frenar el proceso y recuperar el contenido de materia orgánica del suelo. Para ello, conceptualmente, es necesario actuar sobre el balance de carbono del suelo. En el balance, según el modelo de Hénin-Dupuis, los ingresos de materia orgánica, dependen del aporte de biomasa anual y la tasa de humificación de la misma. Los egresos dependen del contenido total de materia orgánica del suelo y la tasa de mineralización.

En el presente estudio se calculó la tasa de humificación o coeficiente isohúmico y se estimó el aporte anual de humus de un cultivo de maíz (Compuesto 20), en la Granja Modelo Pairumani (GMP), ubicada en Pairumani, Vinto, Provincia de Quillacollo, durante el ciclo 2006/07. Se midió la producción de biomasa aérea, radicular y de grano. Posteriormente, se estimó el coeficiente isohúmico de los rastrojos de maíz aplicados al suelo (10.000 kg m.s. ha<sup>-1</sup>) utilizando el método de las bolsas de descomposición (*Litter bags*) para conocer las aportaciones de carbono en forma de humus al suelo. Se instalaron 96 bolsas de descomposición en dos parcelas de la GMP y se registró la descomposición mes a mes durante un año (julio 2006 a julio 2007). El estudio contempló dos tratamientos de picado del rastrojo: fino (<5cm) y grueso (>10cm).

La descomposición de ambos, fino y grueso, siguió un modelo exponencial negativo en todos los casos ( $r^2$ : 0,73-0,93). Se evidenció también que el rastrojo grueso tardó de 2 a 3 meses más en estabilizarse; no obstante, transcurrido un año se estimó un rango para el coeficiente isohúmico de 0,10-0,20 para ambos tratamientos. La producción de humus luego de un año de aportado el rastrojo fue de 1.091-1.678 kg m.s. ha<sup>-1</sup> en las dos parcelas de estudio, suponiendo que todo el rastrojo permanece en el terreno. Hace falta aún calcular la pérdida anual de materia orgánica edáfica, a través del coeficiente de mineralización, para cuantificar el requerimiento de rastrojo que neutralice las pérdidas naturales por descomposición. Palabras clave: Descomposición, humificación, manejo de rastrojos en superficie, coeficiente isohúmico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hacia mediados de los años 90, Bolivia presentaba 41 % de su territorio con problemas de desertificación (MDSMA, 1996; MDS, 2000). Esta región en desertificación comprendía en esos años alrededor del 45,8 % del departamento de Cochabamba (MDS, 2000). Considerando que los esfuerzos realizados para frenar los procesos de desertificación en el país fueron muy escasos, muy posiblemente estos niveles de degradación se han incrementado hasta el presente. En Bolivia, la explotación de ecosistemas altamente frágiles con inadecuadas prácticas agrícolas y la sistemática sobreexplotación de la cobertura vegetal y boscosa, son los mayores causantes del proceso de desertificación de las tierras (MDSMA, 1996; BBC, 2001). Todas estas prácticas conducen, de una manera u otra, a un desbalance del contenido de materia orgánica del suelo, resultando en una degradación integral de las propiedades del suelo. En este sentido, para recuperar la productividad de

los suelos en desertificación, una medida importante es la recuperación de la materia orgánica del suelo (MOS), debido a sus múltiples funciones en el ecosistema edáfico (Labrador, 2001; Bot y Benites, 2005). La MOS incide de manera muy importante en el mantenimiento de las propiedades físicas, principalmente los procesos de difusión y convención de gases, la retención de humedad y la formación de una estructura estable que permita una mayor resistencia ante los procesos erosivos. Participa también en las propiedades químicas, tales como el almacenamiento de nutrientes, ya sea como constituyentes estructurales o como elementos adsorbidos. Finalmente, es vital para el mantenimiento de la actividad biológica.

En suelos agrícolas, por otro lado, el contenido de MOS tiene una relación directa con la productividad económica del suelo: se ha estimado que un incremento de 1 t de carbono orgánico del suelo (COS) por hectárea puede incrementar el rendimiento de maíz en 10 a 20 kg ha<sup>-1</sup> y en el trigo, de 20 – 40 kg ha<sup>-1</sup> (Lal, 2004). El incremento del contenido de MOS, o su constituyente principal, el carbono orgánico del suelo, requiere incidir sobre el balance de aportes y pérdidas que se registran de manera estacional en el ecosistema natural. Los flujos de carbono en el suelo están sujetos a un balance dinámico de entradas periódicas de material, generalmente de manera estacional, por la humificación de residuos vegetales y enmiendas orgánicas, y pérdidas por la mineralización de la materia orgánica del suelo (Paustian *et al.*, 1997). Debido a esta dinámica es importante no sólo conocer la cantidad total de materia orgánica existente en un suelo sino la velocidad con la que ésta evoluciona y el equilibrio entre las entradas y las salidas de carbono en los suelos agrícolas (Herrero, 2004).

Para poder cuantificar los flujos de entrada y salida, es importante conocer la tasa de formación de humus a partir de los residuos incorporados anualmente y la tasa de mineralización de la materia orgánica existente en el suelo. En el balance, el suelo puede ser emisor de carbono en caso de que la tasa de mineralización sea mayor a la tasa de humificación o, en caso contrario, secuestrador de carbono (Labrador, 2001; FAO, 2002). Un suelo secuestrador de carbono, además de brindar este servicio ambiental, que reduce la concentración atmosférica de ese gas de efecto invernadero, se encuentra en proceso de acumulación de materia orgánica, lo que en general conduce a una mejora integral de las propiedades de ese ecosistema. Las velocidades de humificación y mineralización pueden ser estimadas por modelos simples, a partir de dos coeficientes (Hénin y Dupuis, 1945; Andriulo *et al.*, 1999). Por un lado, el coeficiente de humificación o isohúmico mide la fracción de los rastrojos que permanecen en el suelo después de un año (Wolf y Janssen, 1991), constituyéndose así en una estimación de la proporción de los residuos que se transforma en humus. Por otro lado, el coeficiente de mineralización mide la fracción de humus del suelo mineralizada en un año. Las principales formas de obtener un incremento del carbono orgánico en el suelo están asociadas a la agricultura de conservación e incluyen la labranza mínima o cero y el uso de una cobertura vegetal continua y protectora formada por materiales vegetales vivos o muertos sobre la superficie del suelo (FAO, 2002; Lal, 2006).

En la región del Valle Central de Cochabamba, la GMP enfrenta también problemas de degradación del suelo que la forzaron a replantear su sistema productivo. Desde el año 1998 utiliza un modelo agrobiológico en toda su producción. Éste es un modelo integral de producción agropecuario que privilegia, entre otras cosas, mejorar el balance energético de la producción y disminuir los impactos ambientales negativos sobre los recursos naturales que el sistema agrícola convencional ocasiona. Como parte esencial del sistema, utiliza la práctica del reciclaje de sus residuos orgánicos, particularmente las deyecciones de animales. Desarrolla técnicas agrobiológicas en torno a los ejes principales de la agricultura y la ganadería (Fundación Simón I. Patiño, 2002). El modelo integral de producción agrobiológica contempla la restauración de la estructura de los suelos y la gestión de la materia orgánica a fin de recuperar y mantener la fertilidad de los suelos (Fundación Simón I. Patiño, 2002). El presente estudio se desarrolló en el sector agrícola de la GMP, donde el principal cultivo generador de biomasa, tanto para forraje como para compostaje, es el maíz. Este cultivo, además, es el principal cultivo de la región del Valle Central de Cochabamba. Por esta razón, y por su elevado potencial de producción de biomasa, se consideró importante evaluar el potencial de los residuos de maíz de aportar humus al suelo, luego de su descomposición. En este contexto, el objetivo de esta investigación es estimar el coeficiente isohúmico de los residuos de maíz (híbrido forrajero Compuesto

20) en suelos de la Granja Modelo Pairumani y estimar la producción de biomasa aérea, radicular y de grano total.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología incluye cuatro fases: caracterización inicial de las parcelas, estimación de la producción de biomasa, seguimiento durante el ciclo de descomposición de los rastrojos y estimación del coeficiente isohúmico.

### 1) *Caracterización inicial de las parcelas de estudio*

Se realizó un estudio completo de los perfiles de suelo de las parcelas en estudio. Se tomaron muestras de los dos primeros horizontes de cada perfil para su posterior análisis físico-químico en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Mayor de San Simón.

### 2) *Estimación de la producción de biomasa*

Durante la etapa de crecimiento del cultivo (ciclo 2005/06) se realizó un seguimiento y registro del manejo agrícola y las condiciones de temperatura y humedad, a las que los cultivos estuvieron expuestos. Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica de Villa Albina, Fundación Simón I. Patiño. En la época de la cosecha se determinó la producción total de biomasa aérea, radicular y de grano de las dos parcelas en las que se instalarían los ensayos de descomposición: 4E Norte Valenzuela (4ENV) y 17B Pairumani (17BP). En cada parcela se realizó un muestreo de 4 repeticiones de una superficie de muestreo de 2 m lineales sobre hilera por 2,3 m lineales entre surcos. Para la ubicación de las superficies de muestreo se dividió la parcela en cuatro cuadrantes y se muestreó la parte central de cada cuadrante. Se separó la biomasa aérea del maíz y el grano producido. Asimismo, se colectaron las raíces presentes en los primeros 60 cm. En el laboratorio se pesó cada una de las muestras de biomasa aérea, subterránea y las bolsas que las contenían, para calcular el peso seco correspondiente. Asimismo, se determinó el contenido de carbono y nitrógeno de las muestras, para caracterizar su relación C/N inicial. Para el cálculo del factor de cosecha se pesaron las muestras de grano y se llevó los datos a peso seco asumiendo un factor de 0,12 de humedad. Con la cantidad de grano calculada y la cantidad de biomasa se determinó el factor de cosecha en unidades de  $\text{kg grano kg}^{-1} \text{ biomasa}^{-1}$ .

### 3) *Seguimiento de la descomposición de los rastrojos*

Para el estudio de la descomposición de los rastrojos de maíz se utilizó el método de las bolsas de descomposición (OECD, 2006). Previo al seguimiento de la descomposición se realizó un periodo de prueba para adecuar el método a las condiciones de campo de la GMP. Posteriormente, se estudió la descomposición de los rastrojos por el periodo de un año después de la cosecha (2006/07). Una vez transcurrido el año del seguimiento de la descomposición de los rastrojos se calculó el coeficiente isohúmico.

Secuencialmente, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

#### *Armado de las unidades muestrales*

Previo al seguimiento de la descomposición de los rastrojos de maíz se realizó una prueba inicial del método de las bolsas de descomposición siguiendo todas sus especificaciones. Para esta prueba se utilizó bolsas de polietileno y malla milimétrica de plástico de 2 mm. Considerando los resultados obtenidos en una prueba inicial se vio conveniente utilizar, por un lado, un material de menor porosidad que la malla milimétrica, para disminuir la pérdida de materia orgánica de las bolsas. Por otro lado, se descartó el uso de las bolsas de polietileno por su baja permeabilidad. En consecuencia, se eligió una tela sintética de semisombra de 10 % de porosidad. Con este tipo de bolsa se utilizó dos tratamientos de picado de rastrojo: fino (menor a 5 cm) y grueso (mayor a 10 cm). El picado fino se lo realizó con una picadora mecánica y el picado grueso manualmente con un machete, simulando una práctica adecuada a la realidad de la mayoría de los agricultores. Se elaboraron 96 bolsas de descomposición (48 de rastrojo fino y 48 de rastrojo grueso) para cada una de las dos parcelas. Las bolsas de descomposición se construyeron de un tamaño de 20 x 20 cm y con una cantidad de muestra de 40 g de rastrojo de maíz, equivalente a  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $1 \text{ Mg} = 1.000.000 \text{ g} = 1 \text{ t}$ ).

Posteriormente, las bolsas se dejaron sobre la superficie del suelo de las áreas de estudio y se cubrieron con una capa de rastrojo, de forma que quedaran completamente cubiertas.

#### *Diseño experimental*

Se habilitó un área de 10 x 18 m (subparcelas) para el estudio de la descomposición de los rastrojos de maíz en las dos parcelas de la GMP mencionadas, 17BP y 4ENV. Para cada subparcela se tuvo el cuidado de dejar un borde de 6 m para obtener la representatividad deseada. Dentro de cada una las subparcelas de estudio (180 m<sup>2</sup> cada una) se delimitaron dos áreas de 48 m<sup>2</sup> cada una, ubicadas lado a lado. Dichas áreas se ubicaron en el centro de la subparcela, dejando un mínimo de un metro alrededor para evitar el efecto de borde. Una de las áreas fue utilizada para el estudio del seguimiento de la descomposición de los rastrojos de maíz picados mecánicamente (picado fino) y la otra fue utilizada para el estudio de la descomposición de los rastrojos de maíz picados manualmente (picado grueso). En las áreas de estudio se dejó sobre la superficie el 100 % del rastrojo producido por el cultivo de maíz Compuesto 20. Cada área fue dividida en cuatro cuadrantes para facilitar el muestreo. Debido a la pendiente predominante norte-sur que tienen las parcelas de estudio, las superficies utilizadas se delimitaron en el mismo sentido.

#### *Colecta y procesamiento de las unidades muestrales*

Cada mes se recogieron de manera aleatoria cuatro bolsas con picado fino y cuatro bolsas con picado grueso, una en cada cuadrante, tomando en cuenta el sentido de la pendiente norte-sur. Todos los meses se determinó el peso seco de cada una de las muestras y cada dos meses se realizó la determinación de carbono orgánico y nitrógeno total de las muestras, esto último para evaluar el avance en el proceso de descomposición. Durante el estudio de la descomposición de los rastrojos de maíz se realizó un registro de los parámetros climáticos de temperatura y precipitación y, en las parcelas, parámetros edafoclimáticos. Los datos fueron recabados de los registros de la estación meteorológica de Villa Albina. Durante los primeros seis meses de la descomposición, en los días de colecta de las unidades muestrales se midió cada hora la temperatura a 3 cm de profundidad del suelo, registrando las temperaturas mínima, máxima e intermedias del día. Asimismo, se colectaron muestras de suelo debajo de cada bolsa recogida para determinar en laboratorio el contenido de humedad del suelo.

#### *4) Estimación del coeficiente isohúmico*

Los resultados de la descomposición de los rastrojos se analizaron estadísticamente mediante un ajuste de regresión y un análisis de dispersión de puntos. El tiempo de exposición de los rastrojos de maíz en la superficie del suelo fue relacionado con la cantidad de dicho residuo en cada una de las épocas de colecta de las muestras. A los pares de datos obtenidos se ajustó una regresión lineal y una regresión exponencial negativa. Se determinó la curva que mejor se ajustaba a los puntos con el análisis de los coeficientes de determinación obtenidos.

El modelo matemático lineal que se ajustó fue el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

donde:

$Y_i$  = Cantidad de biomasa remanente registrada (g)

$X_i$  = Mes después de la cosecha de la  $i$ -ésima evaluación

$\beta_0, \beta_1$  = Coeficientes de regresión

$\varepsilon_i$  = Término de error aleatorio

Cuando la correlación fue débil se ajustaron los puntos a un modelo de regresión exponencial negativa (Bertol *et al.*, 2004), como indica la siguiente función:

$$Y = ae^{-bx}$$

Este modelo probabilístico se convirtió en lineal, realizando la siguiente transformación:

$$X' = \log X ,$$

teniendo como ecuación final:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i .$$

Según OECD (2006) el método de las bolsas de descomposición es válido si el 60 % del peso inicial de cada bolsa es perdido durante la descomposición. Por tanto se tomó este criterio para considerar si la descomposición fue significativa o no.

### 3. RESULTADOS

#### *Caracterización inicial de las parcelas de estudio*

La parcela 17BP, de 1,2 ha de superficie, está rodeada por hileras de árboles en los lados norte, sur y oeste. Además, por los linderos norte y oeste bordea un canal de riego de uso frecuente. Estas características imprimen un microclima particularmente húmedo, y una temperatura media inferior y de menor variabilidad que en la parcela 4 ENV. El suelo (Dystrustept Húmico) de la parcela 17BP es relativamente joven, poco profundo y moderadamente pedregoso. El perfil presenta un horizonte B relativamente bien marcado. El suelo presenta un proceso de erosión leve que se explica por la pendiente de 6 % y la escasa cobertura vegetal. La calicata mostró una profundidad total de 76 cm. El perfil presentó seis horizontes: A<sub>p</sub>, A<sub>m</sub>, B<sub>w1</sub>, B<sub>w2</sub>, B<sub>w3</sub> y C. El horizonte A<sub>p</sub> mostró una moderada actividad biológica. En el segundo horizonte, a una profundidad de 16 cm, se observó un piso de arado que dificulta la exploración de raíces a capas más profundas. El análisis físico y químico de la parcela 17BP mostró los resultados que se muestran en las tablas 1 y 2. La parcela 4ENV ocupa 1,62 ha y está rodeada por hileras de arbustos y algunos árboles en los lados norte y oeste. Por el norte presenta un canal de riego utilizado casi exclusivamente para el riego de presiembra y eventualmente durante épocas muy secas. El suelo (Dystrustept Húmico) de la parcela 4ENV presenta un desarrollo moderado, es medianamente profundo y ligeramente pedregoso. Al igual que la parcela 17B Pairumani, presenta un horizonte B relativamente bien marcado. El suelo sufre un proceso ligero de erosión laminar debido a la escasa cobertura y la pendiente de 4 %.

La calicata mostró una profundidad total de 80cm. El perfil presentó cinco horizontes: A<sub>p</sub>, A<sub>b</sub>, B<sub>w</sub>, grava y C. En los primeros tres horizontes se observó una actividad biológica moderada. La cuarta capa estaba formada completamente por piedra y grava.

Los resultados del análisis físico y químico de la parcela 4ENV se muestran en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Resultados del análisis físico de los primeros dos horizontes de las parcelas 17BP y 4 ENV.

Parc.	Hzt.	Prof.	Y	L	A	Text.	D <sub>a</sub>	D <sub>p</sub>	Poros.	CC	PMP
		<i>cm</i>	----- % -----				-- <i>g cm<sup>-3</sup></i> --		----- % -----		
17BP	A <sub>p</sub>	0-16	29	41	31	FY	1,39	2,63	47,2	25,65	13,29
17BP	A <sub>m</sub>	0-30	37	35	29	FY	1,52	2,63	42,4	28,33	14,48
4ENV	A <sub>p</sub>	0-16	32	45	23	FY	1,39	2,63	47,2	28,15	16,18
4ENV	A <sub>b</sub>	16-28	32	45	23	FY	1,35	2,63	48,6	28,83	16,84

**Tabla 2.** Resultados del análisis químico de los primeros dos horizontes de las parcelas 17BP y 4 ENV.

Parc.	Hzt.	Prof.	pH	C.E.	Cationes Cambiables				CIC	SB	MO	N <sub>t</sub>	P <sub>disp</sub>
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>					
		<i>cm</i>		<i>dS m<sup>-1</sup></i>	----- <i>cmol kg<sup>-1</sup></i> -----					----- % -----		<i>ppm</i>	
17BP	A <sub>p</sub>	0-16	6,9	0,143	10,00	1,00	0,30	0,44	11,6	100,0	2,81	0,144	36,7
17BP	A <sub>m</sub>	0-30	6,6	0,078	11,00	1,00	0,14	0,36	13,2	94,7	1,90	0,084	41,1
4ENV	A <sub>p</sub>	0-16	6,9	0,089	7,50	2,50	0,14	0,15	11,0	93,5	2,71	0,161	1,9
4ENV	A <sub>b</sub>	16-28	6,9	0,120	7,50	2,50	0,14	0,22	10,2	100,0	1,91	0,102	3,8

#### *Producción de biomasa del cultivo de maíz Compuesto 20 en el ciclo vegetativo 2005/06*

Se aplicó un riego de presiembra en noviembre 2005. La cama de siembra se preparó con arado de disco, seguido de arado actisol. Desde la siembra (16 y 18 de noviembre para 4ENV y 17BP, respectivamente) hasta abril las condiciones climáticas se caracterizaron como húmedas (con

periodos hiperhúmedos en los meses de diciembre, enero y marzo). Estas condiciones permitieron el crecimiento óptimo de los cultivos desde su germinación hasta la producción de grano. En los últimos meses (abril - julio) los cultivos estuvieron expuestos a condiciones áridas las cuales ayudaron a la maduración adecuada del grano. El control de malezas se realizó manualmente en las subparcelas de estudio.

En estas condiciones las parcelas produjeron una cantidad de biomasa (aérea, subterránea y grano) presentada en la tabla 3. La diferenciación por tipo de biomasa se realizó para determinar la contribución de raíces, tallos y hojas a la acumulación total de biomasa.

La producción promedio de biomasa por hectárea, en términos de materia fresca, para las parcelas de estudio se presenta en el tabla 3. La biomasa aérea de la planta de maíz (tallos y hojas) corresponde al mayor porcentaje de biomasa producida, aproximadamente 76% y 81% para 17BP y 4ENV, respectivamente. El grano no se contempló como parte de la biomasa.

**Tabla 3.** Resultados del rendimiento promedio de los cultivos de maíz Compuesto 20

Parcela	Biomasa radicular	Biomasa aérea	Biomasa total	Grano
----- kg M.F. ha <sup>-1</sup> -----				
17BP	2.675	8.511	11.186	5.598
4ENV	1.357	5.915	7.272	6.630

Los factores de cosecha de las parcelas se muestran en el tabla 4. El factor de cosecha se calculó para poder conocer la producción de biomasa en función de la producción de grano.

**Tabla 4.** Resultados del factor de cosecha de los cultivos de maíz Compuesto 20

Parcela	Factor de cosecha
17BP	0,45
4ENV	0,85

Según Satorre (2002), el factor de cosecha de maíz en ausencia de limitaciones hídricas varía generalmente entre 0,4 a 0,5. En la GMP el factor 0,5 es un valor usual. La parcela 17BP presentó un factor de cosecha cercano al valor común de la GMP mientras que la parcela 4ENV tuvo un valor mucho más elevado en comparación al promedio.

La relación C/N inicial de los residuos fue de 61 para la parcela 17BP y de 41 para la parcela 4ENV. Estos niveles se encuentran dentro del rango de valores normales reportados en la literatura para los residuos de maíz (Morón, s/a; Silva y Acevedo, 2005; Martínez *et al.*, 2006).

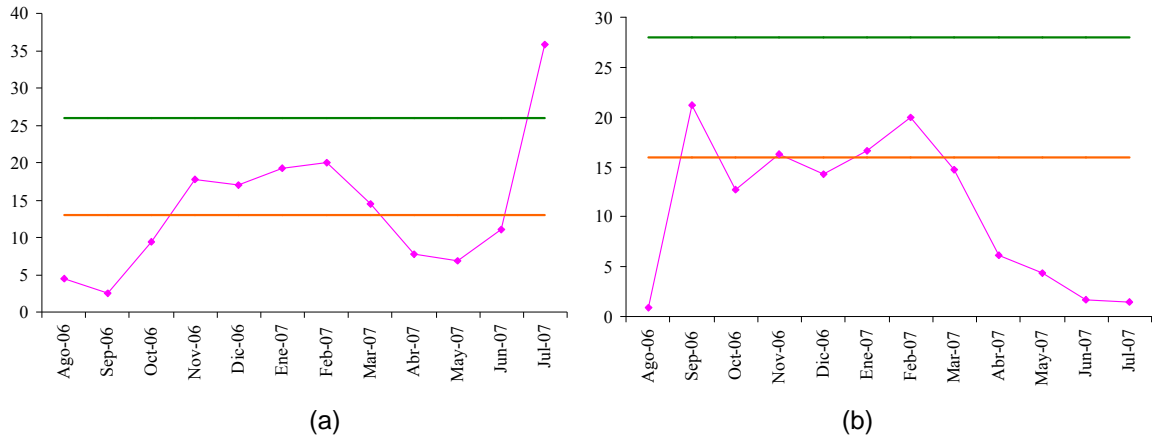
#### *Análisis de las condiciones de descomposición de los rastrojos*

Durante la descomposición, las condiciones de precipitación pluvial y temperatura atmosférica registradas fueron próximas a los valores promedio para la zona, según datos del Centro Meteorológico de Villa Albina en Pairumani.

Ambas parcelas estuvieron sujetas a condiciones áridas durante los primeros tres meses posteriores a la cosecha y el picado del rastrojo (agosto-octubre). Entre los meses de octubre y abril estuvieron sujetas a condiciones húmedas e hiperhúmedas y finalmente entre abril y julio sufrieron condiciones áridas. Los riegos en 17BP se concentraron en el segundo semestre de descomposición, mejorando las condiciones durante unos días. En 4ENV los riegos se concentraron en el primer semestre de descomposición.

Según Aulakh *et al.* (1991), el régimen de humedad es importante al inicio del proceso de descomposición. Asimismo, Stoot *et al.* (1989) mencionan que la humedad influye de una forma importante sobre la descomposición de los compuestos fácilmente degradables y que luego de la desaparición de éstos pierde importancia. Según Allison (1973), la humedad óptima para la descomposición es de 50-100 % de la capacidad de campo del suelo. Según este autor (Allison, 1973) la humedad es más crítica por un exceso que por un déficit, debido a la gran importancia de la aireación en el proceso de descomposición de la materia orgánica. En la figura 1 se muestra como la

humedad edáfica en la parcela 17BP estuvo por debajo del punto de marchitez permanente durante seis meses; la parcela 4ENV, en cambio, presentó durante diez meses humedad edáfica por debajo del punto de marchitez permanente.



**Figura 1.** Evolución de la humedad edáfica durante el periodo de estudio de descomposición de los residuos de maíz (agosto 2006- julio 2007). La línea horizontal superior de cada gráfico corresponde al coeficiente de Capacidad de Campo del horizonte superior de la parcela respectiva; la línea inferior marca el Punto de Marchitez Permanente. Entre ambas líneas se tiene el espacio de la humedad disponible. (a) 17BP, (b) 4ENV.

Las temperaturas a los tres centímetros de profundidad estuvieron dentro de los límites normales y oscilaron dentro del rango de 18-25 °C. La temperatura es uno de los factores que más afectan al crecimiento microbiano. Según Alexander (1980), las máximas tasas de descomposición se reportan entre el rango de temperatura de 30 a 40 °C. Sin embargo, la máxima actividad microbiana de descomposición tiene lugar en un rango de temperatura comprendida entre 26,5 y 32 °C (Alexander, 1980). Asimismo, Worthen y Aldrich (1980) afirman que los organismos que intervienen en la descomposición de la materia orgánica permanecen en un estado atenuado cuando la temperatura es inferior a 4,5 °C. Entre los 4,5 °C hasta los 26,5 °C su actividad se duplica por cada 10 grados de aumento en la temperatura (Worthen y Aldrich, 1980). En general, las temperaturas edáficas registradas en las parcelas de estudio estuvieron por debajo del rango óptimo de desarrollo de los microorganismos, pero por encima del umbral de 4,5 °C. No se registraron amplitudes mensuales importantes en ninguna parcela.

#### *Evaluación de la descomposición del rastrojo en las bolsas de descomposición*

##### *1) Rastrojo fino*

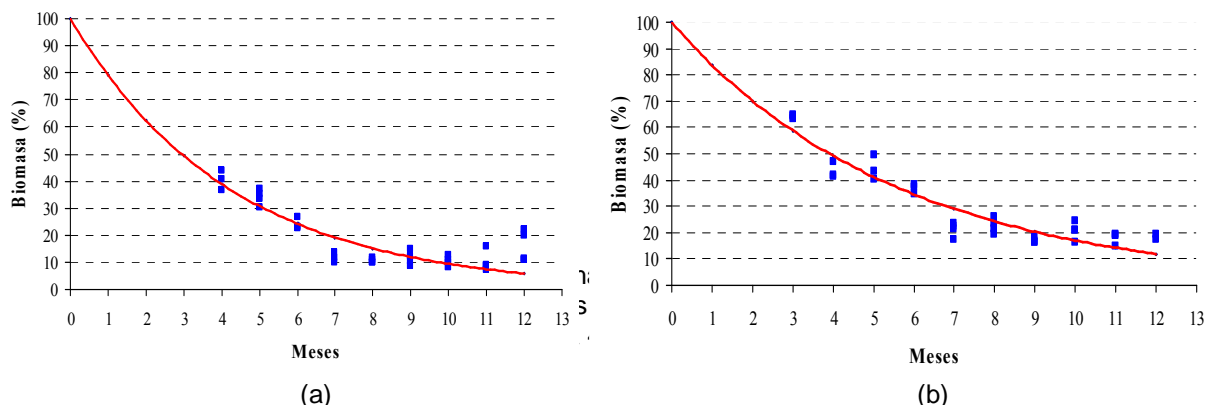
Con los datos de las variaciones de la cantidad de rastrojo de maíz contenido en las bolsas, se realizó una regresión y un análisis de dispersión para conocer la tendencia de los puntos obtenidos y la evolución de la descomposición. Se ajustó el modelo lineal propuesto por Enst *et al.* (2002) y el modelo exponencial negativo obtenido por Bertol *et al.* (2004) para rastrojos de maíz. Con el modelo exponencial negativo se obtuvieron mayores coeficientes de determinación para ambas parcelas ( $r^2=0,86$  para 17BP y  $r^2=0,93$  para 4ENV, contra los coeficientes del modelo lineal  $r^2=0,73$  y  $r^2=0,85$ , respectivamente). Para el ajuste de la curva, se eliminaron los primeros 2-3 meses de datos, tal como se sugiere en OECD (2006) pues presentan una dispersión muy alta que dificulta el análisis.

A continuación, se muestran los modelos matemáticos que describen las curvas de descomposición del rastrojo picado fino en ambas parcelas.

$$17BP: Y_{17EP} = 100 e^{-0,236 x}$$

$$4ENV: Y_{4ENV} = 99,3 e^{-0,177 x}$$

Los gráficos de dispersión y los modelos matemáticos planteados para la descomposición del rastrojo fino se muestran en la figura 2 para las parcelas 17BP y 4ENV.



**Figura 2.** Cantidad de rastrojos de maíz picado fino en función al tiempo de descomposición en bolsas de descomposición (julio 2006- julio 2007). (a) Parcela 17BP; (b) Parcela 4ENV.

Aunque la regresión exponencial negativa presenta una correlación fuerte para ambas parcelas se observa en los gráficos que las curvas tienden a sobreestimar la pérdida de peso con relación al tiempo en el último tramo. La curva no refleja la tendencia de estabilización que existe a partir del séptimo mes y por ello proporciona un menor valor final (coeficiente isohúmico) al final del mes 12. Las gráficas de dispersión muestran que la descomposición tuvo dos etapas. Durante los primeros seis meses se observa una fase de descomposición rápida en la cual aproximadamente se perdió por descomposición un 75% del residuo. A partir del séptimo mes se observa una segunda fase de descomposición en la que la velocidad de descomposición es más lenta. Se observa que en la segunda fase existe una tendencia a la estabilización del peso contenido en las bolsas en aproximadamente 10 % para la parcela 17BP y 20% para la parcela 4ENV.

Douglas y Rickman (1992) también describieron el proceso de descomposición de rastrojos en dos fases. Durante la Fase I desaparecen las fracciones solubles en agua, tales como azúcares, almidón, ácidos orgánicos, pectinas, taninos y una variedad de compuestos nitrogenados que están rápidamente disponibles para los microorganismos. En la Fase II, la tasa de descomposición se reduce y se manifiesta poca diferencia entre rastrojos que inicialmente tuvieron concentraciones de N diferentes en las anteriores etapas.

#### b) Rastrojo grueso

Para conocer la tendencia de los puntos, se ajustó a los datos el modelo lineal y el modelo exponencial negativo. Al igual que los resultados obtenidos para rastrojo fino los puntos registrados tuvieron una tendencia exponencial negativa marcada. El ajuste del modelo exponencial negativo presentó un mayor coeficiente de determinación en comparación al modelo lineal ( $r^2=0,87$  para 17BP y  $r^2=0,93$  para 4ENV, contra  $r^2=0,80$  y  $r^2=0,88$  para el modelo lineal, respectivamente).

A continuación, se muestran los modelos matemáticos que describen las curvas de descomposición del rastrojo picado grueso en ambas parcelas.

$$17BP: y_{17EP} = 100 e^{-0,148 x}$$

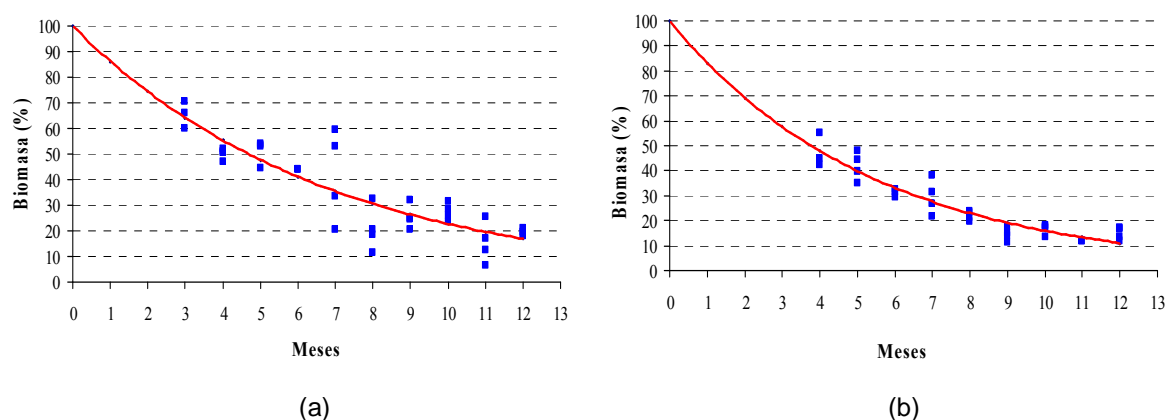
$$4ENV: y_{4ENV} = 100 e^{-0,184 x}$$

Los gráficos de dispersión y los modelos matemáticos planteados para la descomposición del rastrojo fino se muestran en la figura 3 para las parcelas 17BP y 4ENV.

El análisis de dispersión muestra que la pérdida de peso de los rastrojos gruesos evaluados tuvo una descomposición rápida durante los primeros siete meses en los cuales se perdió aproximadamente un 70 % del material orgánico. Posteriormente, a partir del octavo mes se presentó una fase de descomposición lenta. Al igual que el rastrojo fino, durante la segunda fase de descomposición el peso



de los rastrojos contenidos en las bolsas se estabilizó en aproximadamente 20% para la parcela 17BP y 15% para la parcela 4ENV.



**Figura 3.** Cantidad de rastrojos de maíz picado grueso en función al tiempo de descomposición en bolsas de descomposición (julio 2006- julio 2007). (a) Parcela 17BP; (b) Parcela 4ENV.

Ambos tratamientos registran un coeficiente isohúmico dentro del rango de 0,15-0,20. Los resultados obtenidos son similares a los registrados por Saffih-Hdadi y Mary (2007). Estos autores determinaron mediante el método de radioisótopos  $C^{13}$  un coeficiente isohúmico para rastrojos de maíz sin picar de 0,21 (Mary y Wylleman, 2001).

#### Evolución de la relación C/N

La evolución de la relación C/N del rastrojo de maíz para ambos tratamientos se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Evolución de la relación C/N de los rastrojos de maíz durante su descomposición

Mes	Relación C/N			
	17BP		4ENV	
	Fino	Grueso	Fino	Grueso
0 (jul/06)	61,0	61,0	41,5	41,5
2 (sep/06)	51,3	69,8	13,0	12,3
4 (nov/06)	41,4	32,2	15,2	22,4
6 (ene/07)	29,1	41,7	13,2	12,1
8 (mar/07)	24,6	33,7	15,3	14,1

En la parcela 17BP, en la que no se adicionó nitrógeno, se observó que la evolución de la relación C/N tiene una tendencia a disminuir con el tiempo. En la parcela 4ENV se incorporó en el mes de septiembre purín de cerdo con un elevado contenido de nitrógeno. La aplicación de esta enmienda influyó notoriamente en la evolución de la relación C/N de los residuos en comparación con la parcela 17BP. Aunque la estabilidad que se observa en los datos subsecuentes parece sugerir una estabilización mucho más acelerada, es también posible que las mediciones del aporte de C y N del purín estén afectando de manera directa. Se observa en ambas parcelas que existe una tendencia natural de la relación C/N a disminuir, hasta estabilizarse, en el caso de 4ENV, alrededor de 12-15. La evolución del contenido de carbono determinada es similar a la reportada por Bertol *et al.* (2004) para la descomposición de rastrojos de maíz en un año. Por el contrario, los resultados del contenido de nitrógeno y por ende la relación C/N presentaron una disminución más rápida que los resultados reportados por Bertol *et al.* (2004).

#### Aporte de humus al suelo por los residuos de maíz

Utilizando los valores de biomasa aérea total producida en cada parcela durante el ciclo de crecimiento 2005/06 y el coeficiente isohúmico calculado, es posible estimar el aporte de humus que

se logró debido al aporte de la totalidad de los residuos de cosecha. En la tabla 6 se muestran estos cálculos, considerando el valor medio de 0,15 para el coeficiente isohúmico.

**Tabla 6.** Estimación del aporte de humus al suelo obtenido como resultado de la aplicación de la totalidad de la biomasa de residuos a las parcelas 17BP y 4ENV.

Parcela	Biomasa total <i>kg ha<sup>-1</sup></i>	Coefficiente isohúmico	Aporte de humus <i>kg ha<sup>-1</sup></i>
17BP	11.186	0,15	1.678
4ENV	7.272	0,15	1.091

#### 4. CONCLUSIONES

Los análisis de suelos en las parcelas de estudio mostraron que sus propiedades físicas y químicas se encuentran dentro de los rangos normales de fertilidad. Asimismo, los suelos mostraron estar expuestos a una ligera erosión laminar causada especialmente por la topografía y la escasa cobertura vegetal. Los niveles de materia orgánica registrados fueron moderadamente bajos para las parcelas del estudio, debido posiblemente a la escasa aportación de enmiendas orgánicas registrada en los historiales y la pérdida causada por la erosión y el manejo agrícola.

La producción de biomasa durante el ciclo agrícola 2005-2006 en las parcelas 17BP (11.186 kg ha<sup>-1</sup>) y 4ENV (7.272 kg ha<sup>-1</sup>) se encontraron dentro de los rangos normales de producción de la GMP. La relación entre biomasa área y biomasa total, esta última incluyendo la biomasa radicular, fue de 76% y 81% para 17BP y 4ENV, respectivamente, mostrando el claro predominio de la biomasa aérea.

En lo referente a la descomposición del rastrojo, se observó que el grado de trituración implicó una descomposición diferenciada. El rastrojo picado grueso demoró de uno a dos meses más en estabilizarse en comparación al rastrojo picado fino. Se vio también que la adición de purín de cerdo durante la descomposición aumentó la velocidad de descomposición, probablemente por la adición de N. Sin embargo, al cabo de un año, la cantidad de humus formado en cualquiera de los tratamientos fue similar: la producción de material humificado es de 10 a 20 % de la masa inicial de rastrojo.

Considerando la biomasa aérea producida en el ciclo vegetativo 2005/06 y el coeficiente de humificación promedio (0,15), se puede concluir que la práctica de manejo consistente en aplicar la totalidad de los residuos de cosecha a las parcelas dará un aporte bruto de humus estimado en 1.1678 kg ha<sup>-1</sup> y 1.091 kg ha<sup>-1</sup> para las parcelas 17BP y 4ENV, respectivamente.

Sugerimos utilizar el coeficiente isohúmico obtenido para tener una estimación inicial del aporte de carbono proveniente de los cultivos de maíz, al suelo en la zona del Valle Central de Cochabamba. La estimación del coeficiente de mineralización del suelo permitirá en el futuro estimar el balance neto de carbono en diferentes escenarios de aporte de residuos de maíz.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Constantino Soto por su aporte en la clasificación de los suelos y a la Univ. Fabiola Escobar Lobo por su valiosa contribución y apoyo durante la etapa experimental.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, M. 1980. Introduction to soil microbiology. 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Allison, F.E. 1973. Soil organic matter and its role in crop production. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.
- Andriulo, A.; Mary, B. y Guerif, J. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. Agronomie, Vol. 19, Nº 5, 365-377.

- Aulakh M.S., Doran J.W., Walters D.T., Mosler A.R., and Francis D.D. 1991. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 55:1020-1025.
- BBC. 2001. *Bolivia casi la mitad del suelo desertificado*. BBC. Artículo de prensa. 13 de Junio de 2001. En <http://news.bbc.co.uk>, (12/12/05)
- Bertol, I.; Leite, D.; y Zoldan, W. 2004. *Descomposição do residuo de milho e variáveis relacionadas*. Revista Brasileira de la Ciencia del Suelo, Vol. 28, Nº 2, Marzo-Abril 2004, Río de Janeiro.
- Bot, A. y J. Benites. 2005. The importance of soil organic matter. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAO Soils Bulletin* 80. Rome.
- Douglas, C.L. y Rickman, R.W. 1992. Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content, and residue placement. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 272-278.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Informe sobre recursos mundiales de suelos, Nº 96. Roma.
- Fundación Simón I. Patiño. 2002. *La hacienda de Pairumani*. Ginebra.
- Henin, S. y Dupuis, M. 1945. Essai de bilan de la matière organique des sols. *Annales Agronomiques*, 15: 161-172.
- Herrero, M. 2004. *Balance de macronutrientes y materia orgánica en el suelo de agrosistemas hortícolas con manejo integrado ecológico*. Universidad de Valencia. Departamento de Recursos Naturales. Tesis doctoral. Valencia.
- Labrador, J. 2001. *La materia orgánica en los agrosistemas*. 2ª ed. Editorial Mundi-Prensa. España
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, Vol. 304, 1623-1627.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation and Development*, 17, 197-209.
- Martínez, F.; Cordone, G. y Gudelj, V. 2006. *Fertilización en soja. Situación actual y perspectivas en Argentina*. Memorias del tercer congreso de soja del Mercosur. En <http://www.acsoja.org.ar>, (1/012/07)
- MDS (Ministerio de Desarrollo Sostenible). Viceministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente. Programa Nacional de Cambios Climáticos. 2003. *Aplicación del modelo Markal Macro en Bolivia*. Informe técnico. La Paz - Bolivia. En <http://www.pncc.gov.bo>, (10/06/06)
- MDSMA (Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente). 1996. Mapa preliminar de erosión de suelos: región árida, semiárida y subhúmeda de Bolivia. Centro de Información para el Desarrollo, CID. La Paz - Bolivia
- Morón, A. s/a. *El rol de los rastrojos en la fertilidad el suelo*. Uruguay. En <http://www.inia.org.uy>, (16/11/05)
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2006. *Guidance document on the breakdown of organic matter in litter bags*. Publicación de seguridad y salud ambiental. Serie de prueba y valoración, Nº 56. Paris. En <http://www.oecd.com>, (18/06/07)
- Paustian, K.; Andrén, O.; Janzen, H.H.; Lal, R.; Smith, P.; Tian, G.; Tiessen, H.; Van Noordwijk, M.; y Wooster, P. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management*, 13, 230-244.
- Saffih-Hdadi, K. y Mary B. 2007. *Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon*. *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 22.
- Satorre, E. 2002. *Generación del Rendimiento en el Cultivo de Maíz: Efectos de la Nutrición Nitrogenada*. Memorias de la Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2002". International Plant Nutrition Institute. En <http://www.ipni.net>, (2/12/07)
- Silva, P. y Acevedo, E. 2005. *Adopción de la cero labranza en los principales cultivos anuales. Identificación de problemas y posibles soluciones*. Informe para SAG e INDAP. En <http://www.sap.uchile.cl>, (10/02/06)
- Wolf, J. y Janssen, H.J.M. 1991. Effects of changing land use in the Netherlands on net carbon fixation. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 39, 237-246
- Worthen, E. y Aldrich S. 1980. *Suelos agrícolas su conservación y fertilización*. 2ª ed. Editorial Hispano-Americana. DF México.