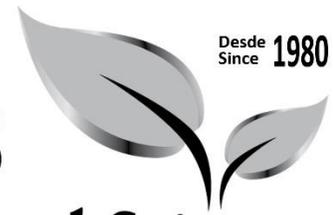




Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Rastrojos, materia orgánica y nitrógeno en un arrozal inundado

Stover, Organic Matter and Nitrogen in a Flooded Ricefield

Rodolfo Quirós^a y Carlos Ramírez^b

^a El autor ingeniero forestal y especialista en economía y manejo en recursos naturales, es investigador en la Universidad Nacional, Costa Rica. ^b El autor es microbiólogo especialista en suelos, es investigador retirado de la Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Marielos Alfaro, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Los artículos publicados se distribuyen bajo una Creative Commons Reconocimiento al autor-No comercial-Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY NC SA 4.0 Internacional) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada (*post print*) del artículo, siempre y cuando se realice sin fines comerciales y se mencione la fuente y autoría de la obra.

RASTROJOS, MATERIA ORGÁNICA Y NITRÓGENO EN UN ARROZAL INUNDANDO

RESUMEN

por RODOLFO QUIRÓS Y
CARLOS RAMÍREZ

Durante cuatro ciclos consecutivos de cultivo de arroz inundado se evaluó cambios en el contenido de materia orgánica del suelo (*mos*) y del nitrógeno (N) disponible para las plantas en forma de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-), a fin de contrastar los sistemas de siembra directa sobre rastrojos (*sdr*) y de labranza mecanizada convencional (*lmc*). El ensayo fue realizado en la Hacienda el Pelón de la Bajura (Pacífico norte costarricense), en un agroecosistema representativo de la zona de vida bosque húmedo premontano transición a basal tropical. Se utilizó un arreglo de parcelas contiguas con cinco repeticiones. Durante cada ciclo de cultivo evaluado, antes de transcurridos los primeros 10 días después de la siembra del arroz y previo a la fertilización nitrogenada, se efectuó un muestreo aleatorio del suelo a tres distintas profundidades: 0 a 5, 5 a 20 y 20 a 40 cm. Mediante análisis de laboratorio se determinó el contenido de *mos* y las fracciones de NH_4^+ y NO_3^- como indicadores del N disponible. Se concluyó que los rastrojos del arroz en *sdr* permitieron una mayor concentración de *mos* entre 0 y 5 cm de profundidad, con diferencias altamente significativas en más de 2,6 ton/ha de *mos*, 1,5 ton/ha de C orgánico y 150 kg/ha de N total con respecto a *lmc*, que en el último medio siglo se han propuesto para esa ciudad, criticándolos.

Changes in soil organic matter (som) and available nitrogen for plants in the form of ammonium (NH_4^+) and nitrate (NO_3^-) were evaluated during four consecutive cycles of flooded rice, in order to compare the systems direct seeding into stubble (dss) and conventional mechanized tillage (cmt). The experiment was established in the Pelón de la Bajura Farm, in the North Pacific region of Costa Rica. A contiguous-plot settlement with five repetitions was used to compare the effects of cmt versus dss. Soil samples from three different depths (0 to 5, 5 to 20 and 20 to 40 cm) were randomly obtained during the first 10 days after rice seeding and before any nitrogen fertilizer application. som content was determined through laboratory analysis. Also NH_4^+ and NO_3^- content were measured in order to determine the amount of available nitrogen for the plants. It was concluded that major effects of stubble in dss take place between 0 and 5 cm of depth, with more of 2,6 ton/ha som, 1,5 ton/ha organic C and 150 kg/ha of whole N than cmt.

La mayoría de los terrenos utilizados para el cultivo de arroz en Costa Rica son preparados para la siembra mediante labranza intensiva del suelo. Con las operaciones de labranza los rastrojos vegetales se incorporan dentro del perfil del suelo e impactan en forma súbita sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas. Los rastrojos están compuestos por material vegetal fresco y en descomposición que proviene de la paja y soca del cultivo previo, así como de malezas controladas, e incluyen tanto los tallos y follaje como el sistema radicular. Este material vegetal es la mayor fuente de energía y nutrimentos para los organismos heterotróficos del suelo.

Entre las razones que alegan los productores para realizar labranzas intensivas del suelo e incorporar los rastrojos están: evitar que éstos alberguen plagas o enfermedades y facilitar las labores de siembra. Además, se considera que mediante la labranza se logra un control efectivo de malezas, se favorece la aireación del suelo y, a la vez, se mejora las condiciones para el crecimiento radicular del cultivo (Hayes 1982). Durante muchas generaciones de productores estos argumentos han servido de justificación para mullir los terrenos hasta el extremo de dejarlos pulverizados y altamente vulnerables a la erosión o con total destrucción de su estructura natural (Crovetto 1992). Adicionalmente, a muchos agricultores les impresionan las violentas transformaciones que en poco tiempo realizan potentes equipos para labranza, lo cual ha sido aprovechado por los vendedores de maquinaria agrícola para mantener vigente la preparación física del terreno. Aún en la actualidad muchos productores subestiman los impactos negativos de labrar el terreno y dejarlo desprovisto de la cobertura protectora que proporcionan los rastrojos. La influencia de la tradición de preparar en forma mecanizada los terrenos es tan fuerte que ésta se

Rodolfo Quirós, ingeniero forestal y especialista en economía y manejo en recursos naturales, es investigador en la Universidad Nacional. Carlos Ramírez, microbiólogo especialista en suelos, es investigador retirado de la Universidad de Costa Rica.

realiza sin considerar los aspectos desfavorables que la alteración física y microbiológica del suelo ocasiona en los rendimientos y la producción agrícola.

Los rastrojos y residuos vegetales en descomposición forman una cobertura protectora sobre la superficie del suelo, moderan los cambios de temperaturas en éste, facilitan la infiltración del agua y limitan la evaporación (Pecorari 1998, Bull 1993). También evitan la erosión hídrica o eólica, amortiguan el impacto de las gotas de lluvia, reducen la formación de superficies endurecidas (encostamiento) y mitigan el agrietamiento del suelo por la rápida pérdida de humedad (Rimolo 1998, Smith *et al.* 2000). Bajo las condiciones creadas por los rastrojos de la superficie, la masa de raíces se descompone y se transforma. Los residuos descompuestos que han penetrado en el suelo reaccionan con sus partículas minerales y junto con exudados de las raíces forman agregados. También se reduce la densidad aparente e incrementa la capacidad de retención de humedad del suelo (Michelena 2004, Shelton *et al.* 2000).

Aun cuando los rastrojos cumplen una función protectora y favorecen la acumulación de materia orgánica en el suelo (*mos*), en la agricultura convencional son considerados como desperdicios y a menudo son removidos o eliminados, mediante su incorporación al suelo, quema, enfarde, extracción o una combinación de estos procedimientos. Con la incorporación de los rastrojos, a corto plazo ocurre un rápido crecimiento de la biomasa microbiana que consume los nutrientes disponibles en el suelo y los inmoviliza. El exceso de rastrojos incorporados conduce a un incremento en la demanda de nitrógeno (N) por parte de los microorganismos del suelo y a su inmovilización, lo cual es incon-

veniente para el cultivo especialmente durante el período de máxima absorción (Carefoot *et al.* 1994).

Aunque la quema de rastrojos es usada para reducir restos vegetales que dificultan la siembra en el sistema de labranza mecanizada convencional (*Imc*), el fuego y las alteraciones que ocurren por las altas temperaturas de la combustión eliminan muchos organismos que habitan la rizosfera y afectan diversas propiedades edáficas. Además, con la extracción de los rastrojos superficiales se elimina gran parte del principal insumo vegetal para el suministro de carbono (C) y N, dos elementos determinantes de la relación C:N, la cual contribuye a mantener el apropiado balance en los procesos bioquímicos de los organismos del suelo. Los rastrojos constituyen una fuente de C para mantener los contenidos de *mos* y a la vez sirven como sustrato para la actividad de los microorganismos.

A diferencia de la *Imc*, en la siembra directa sobre rastrojos (*sdr*) todos los residuos vegetales del ciclo previo son conservados formando una cobertura protectora sobre la superficie del terreno. Para evitar el rebrote de la soca del cultivo anterior y controlar el crecimiento de las malezas se realiza aplicaciones totales con herbicidas postemergentes no selectivos de acción sistémica. En este sistema es innecesaria la preparación física del terreno para la siembra.

La cantidad de rastrojos remanentes en el campo depende del tipo de cultivo anterior. En arroz esta cantidad es directamente proporcional al rendimiento en granza. En general, mientras más altos sean los rendimientos del cultivo mayor será la cantidad de rastrojos producidos. Por cada tonelada de grano cosechada se produce una cantidad equivalente de rastrojos (Cordero 1993), con proporciones de entre 0,8 a 1 y de 1,2



R. Quirós

a 1; lo cual puede variar de 2 a más de 8 ton/ha dependiendo de la variedad, productividad y método de la cosecha. Cuando una cobertura de esta magnitud queda sobre el terreno, se requiere de dispositivos especiales para cortar los tallos, asegurar que la semilla del cultivo sea depositada a la profundidad adecuada y quede en contacto con el suelo.

El sistema *sdr* permite mayor estabilidad para que los procesos bioquímicos de los organismos descomponedores de la *mos* ocurran gradualmente. Debido a que las alteraciones del suelo son mínimas, los procesos para el ciclaje de nutrientes ocurren en forma continua y de manera similar a como sucede en ecosistemas naturales imperturbados (Doran 1980). En *sdr* la ausencia de labranza y la progresiva acumulación de rastrojos pueden incrementar la cantidad y calidad de la *mos* y ésta a su vez mejora propiedades físicas como la estructura, densidad, agregación, infiltración, conductividad de agua o aire y la capacidad de retención de humedad (Kay 1990). Al aplicar continuamente la *sdr* al manejo del arroz inundado es probable que se produzcan cambios en los procesos de mineralización de la *mos* y en el ciclaje de nutrientes como el C y el N (Crovetto 1992), los cuales podrían favorecer la nutrición del arroz en vez de inducir impactos adversos al ambiente por lixiviación o emanación de gases con efecto invernadero. Las altas temperaturas y la abundante humedad junto con el suministro continuo de rastrojos crearían las condiciones para la mineralización gradual de la *mos*, con lo que se produciría un progresivo incremento en el aporte de C y N orgánico al agroecosistema. Además, la disponibilidad adecuada de N aumentaría en forma balanceada la demanda de otros nutrientes claves en el crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas (Ramírez 2001). Es posible que la interacción de la *mos* con los componentes minerales del suelo transforme paulatinamente las condiciones físicas y químicas del suelo tornándolas favorables al crecimiento radicular del arroz.

Aunque solo la mitad de los campos arroceros del mundo son inundados, ellos suplen el 75 por ciento de la demanda mundial de arroz. En campos inundados la descomposición de la *mos* es metanogénica e involucra diversos grupos funcionales de microorganismos, entre

los que tienen mayor importancia las bacterias hidrolíticas, fermentativas y homacetogénicas (Liesack *et al.* 2000, Conrad y Frenzel 2002, Zinder 1993). A medida que ocurre la degradación de los rastrojos son producidos compuestos orgánicos solubles en agua y nutrientes que son aprovechados por el cultivo o en su defecto lixiviados. Desde el punto de vista económico y ambiental, los campos arroceros bajo inundación revisten mayor importancia que los de secano porque permiten obtener mayores rendimientos. Cuando se aplica *sdr* al manejo de estos agroecosistemas se mitiga las emisiones gaseosas de metano y CO₂, con lo que se reduce el potencial de causar impactos negativos al ambiente, en especial evitando el efecto invernadero (Watson *et al.* 1992).

En Costa Rica el arroz inundado se siembra principalmente en monocultivo dos a tres veces al año. Los suelos más utilizados son vertisoles con contenidos de materia orgánica de entre 2 y 3 por ciento y generalmente deficitarios en N (Henríquez *et al.* 1998). Para alcanzar niveles de rendimiento rentables en cada ciclo de cultivo es preciso aplicar entre 100 y 250 kg/ha de N (Cordero 1993), lo que representa una fracción importante en los costos de producción. A pesar de que los fertilizantes químicos permiten incrementar los rendimientos, existe preocupación por su creciente costo y los impactos que impiden lograr una productividad económica y ambientalmente sostenible. Además, el consumo energético requerido en la síntesis industrial del N agudiza el problema global del efecto invernadero.

Desde la perspectiva ambiental, una manera de lograr sistemas de producción agrícola más sostenibles consiste en validar prácticas de cultivo que permitan una disponibilidad más estable y constante de N en el agroecosistema; aprovechando su ciclaje natural a fin de reducir los niveles de fertilización química. Herrera (2002) estimó contenidos de N total de 0,65 por ciento y 0,26 por ciento en rastrojos de malezas y arroz respectivamente. Según Cordero (1993), variedades de arroz como CR1821 tienen capacidad de producir hasta 10 ton/ha/ciclo de paja (rastrojos), con contenidos de 0,68 por ciento, 0,09 por ciento y 2,22 por ciento respectivamente de N, fósforo (P) y potasio (K). Con estos valores, al término de cada ciclo de cultivo los rastrojos

de arroz podrían aportar en forma respectiva 68, 9 y 222 kg/ha de N, P y K.

Aunque el contenido de nutrimentos en estos rastrojos y la tasa de descomposición de los mismos no son suficientes para satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo, sí pueden complementar la fertilización mineral y disminuir costos o riesgos de impactos desfavorables al ambiente. De este modo, con *sdr* se podría mantener o incrementar la capacidad productiva del suelo, elevar los rendimientos del cultivo y lograr mayor rentabilidad en la agricultura del arroz.

Comprender la forma como ocurre la descomposición de los rastrojos es importante para determinar el efecto de su manejo en el suelo (Dormaar y Carefoot 1996). Durante los últimos años se ha realizado investigación que demuestra las ventajas de efectuar rotaciones con cultivos leguminosos con capacidad para la fijación biológica de N. Sin embargo, por las características particulares de la infraestructura requerida en el manejo de arroz inundado, existen limitaciones para efectuar rotaciones con otros cultivos. Debido a que en Costa Rica el arroz se produce principalmente en monocultivo, es importante conocer el aporte de los rastrojos de arroz en la nutrición del mismo cultivo.

El objetivo del estudio cuyos resultados aquí se presentan fue determinar la contribución de los rastrojos de arroz en un agroecosistema inundado, luego de cuatro ciclos consecutivos de arroz en monocultivo mediante *sdr*, y su contraste con el sistema *lmc*. En forma particular se evaluó la existencia de diferencias entre ambos sistemas con respecto al contenido de *mos* y las formas de N disponible en el suelo.

Materiales y métodos

Características del sitio en estudio

La etapa experimental del estudio se desarrolló entre diciembre de 2001 y mayo de 2004, en un agroecosistema arrocero de la Hacienda El Pelón de la Bajura, en el Pacífico norte de Costa Rica, lugar ubicado en la zona de vida bosque húmedo premontano transición a basal tropical (según la conocida clasificación de L. Holdridge). El sitio presentó topografía plana, con elevaciones medias de entre 10 y 20 msnm, ubicado entre las coordenadas verticales 381-384 y 267-274 horizontales de

la hoja Tempisque. Según datos de la estación hidrometeorológica local (ubicada en la misma Hacienda), la temperatura media anual presentó pequeñas fluctuaciones, con una media de 27,6 °C, con valores mínimos y máximos respectivos de 22,9 y 34,7 °C; la precipitación media fue de 1.722 mm/año, con el 66 por ciento de las lluvias concentradas en junio, septiembre y octubre; la humedad relativa varió entre 61 y 90 por ciento. La textura del suelo en el área del experimento fue francoarcillosa (33 por ciento arena, 29 por ciento limo, 38 por ciento arcilla), con color entre gris oscuro y negro en el perfil estudiado. El pH del suelo fue de 6,5 y la capacidad de intercambio catiónico de 22,2 cmol(+) (análisis realizados en el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica).

Arreglo experimental

El experimento se realizó en cuatro lotes arroceros cultivados a escala comercial con arroz bajo inundación con lámina de agua constante, identificados como Playitas, Bribri, Cabuyo y José Joaquín. En cada lote se instaló un par de parcelas permanentes cuadradas con 4.900 m² de superficie cada una, separadas entre sí por bordes de 10 m de ancho. El arreglo experimental consistió en parcelas contiguas asignando los sistemas *sdr* y *lmc* a cada parcela, con cinco repeticiones por lote. Las parcelas fueron divididas en 49 subparcelas cuadradas con 100 m² de área efectiva cada una, y en forma aleatoria se seleccionó cinco subparcelas por sistema de siembra para efectuar los respectivos muestreos de suelos.

Prácticas culturales

En la cosecha del arroz correspondiente a cada ciclo de cultivo se usó una cosechadora con secciones articuladas, capaces de desprender los granos del arroz sin cortar los tallos, de tal modo que dejaban casi intactas las cañas en pie y la mayor parte del follaje. Solo la granza y pequeños trozos de hojas o tallos fueron retirados del sitio por la cosechadora. Mediante muestreo y determinación de pesos de biomasa seca aérea se estimó la cantidad de rastrojos de malezas y de arroz que quedaron sobre el terreno al final de cada ciclo de cultivo. Según el método de línea transepto (Shelton *et al.* 2000), la cobertura del suelo lograda por los rastrojos en todos los

casos evaluados fue mayor al 60 por ciento. La biomasa de raíces (rastrosjos subsuperficiales) no fue considerada en este estudio debido a la dificultad para manipular suelos de textura pesada.

En las parcelas bajo *sdr* se efectuó un control químico total de la vegetación en crecimiento, cinco días antes de la siembra. Para controlar el crecimiento de las malezas y los rastrosjos del cultivo se aplicó 3 kg/ha de glifosato 68 SG en 200 l/ha de solución herbicida. El cultivo fue sembrado manteniendo el total de rastrosjos de arroz remanentes de la cosecha previa junto con las malezas desecadas por el tratamiento herbicida. En sitios tratados con *lmc* el suelo fue preparado mediante una pasada de rastra rompedora, una de rastra afinadora y, finalmente, un pase de rodillo compactador. Para incorporar completamente los rastrosjos se empleó una rastra con 40 discos de 98 cm de diámetro. En la superficie del terreno no quedó en forma visible restos de rastrosjos ni malezas.

En todos los ciclos evaluados se utilizó una sembradora Semeato TDNG 420, calibrada para sembrar 180 kg/ha de semilla certificada de arroz. Para activar la germinación se aplicó riego intermitente durante 3-4 semanas después de la siembra.

Al inicio del ensayo los terrenos fueron micronivelados para asegurar uniformidad en la cobertura con una lámina de agua de 10 cm de altura, la cual se mantuvo en forma continua una vez que las plántulas alcanzaron el estado de cuatro hojas. De acuerdo al programa de fertilización de la finca, para asegurar un adecuado suministro de fósforo, potasio y magnesio, al momento de cada siembra se fertilizó con 50,

125 y 8 kg/ha de triple superfosfato, sulfato de potasio y óxido de magnesio respectivamente.

Muestreo del suelo

Al inicio de cada ciclo de cultivo se tomó muestras compuestas de suelo distribuidas horizontalmente al azar, en cinco puntos de muestreo por subparcela. Se cavó calicatas para tomar muestras de manera sistemática en tres capas de profundidad: 0 a 5, 5 a 20 y 20 a 40 cm respectivamente. Este ámbito de profundidades corresponde a la sección del perfil donde la densidad de raíces efectivas del arroz es máxima y coincide con la capa de suelo que es afectada por las labores de labranza. Las profundidades de muestreo fueron de diferente amplitud porque se tuvo como premisa que los efectos esperados serían más acentuados en una sección estrecha del suelo superficial. Cada muestra compuesta con un peso aproximado de 500 g se empacó en bolsas plásticas debidamente identificadas y se envió al laboratorio para los respectivos análisis.



R. Quirós

Características evaluadas

Se evaluó el contenido de *mos*, el N y las dos formas de nitrógeno disponibles más importantes para los cultivos, a saber: la fracción de amonio (NH_4^+) y el nitrógeno en forma de nitratos (NO_3^-). A partir del porcentaje de *mos* se derivó el contenido relativo de carbono orgánico (CO%), para lo cual se usó la fórmula $\text{CO}\% = \text{mos}\%/1,724$ (Kass 1998). Las determinaciones en laboratorio fueron efectuadas en el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Con los datos obtenidos se efectuó pruebas de comparación de medias entre sistemas de siembra y análisis de varianza para contrastar entre ciclos de cultivo y profundidades.

Resultados y discusión

Los resultados de esta investigación fueron divididos en cuatro secciones correspondientes a las principales variables consideradas. Primero se describe los cambios observados en el contenido de *mos* y su contraste entre los sistemas de siembra *sdr* y *lmc*. Luego se analiza el aporte de los rastrojos de arroz en el suministro de C y N orgánico al agroecosistema después de cuatro ciclos consecutivos en monocultivo de arroz bajo inundación. Finalmente se contrasta los cambios observados durante el tiempo de la evaluación, en las dos formas de N disponibles para el cultivo, a saber, amonio y nitrato.

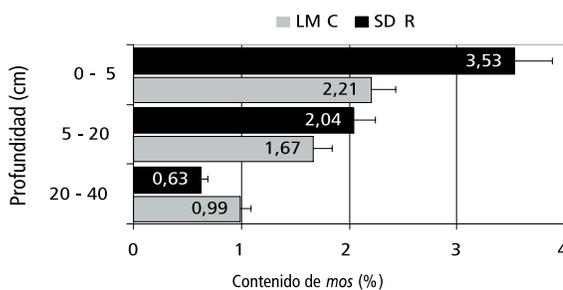
Materia orgánica del suelo

Luego de cuatro ciclos consecutivos de cultivo con arroz en los cuatro lotes en estudio, el contenido de *mos* presentó diferencias significativas entre las distintas profundidades de suelo examinadas, con valores comprendidos en un ámbito entre 0,6 y 3,5 por ciento (figura 1). En todos los casos esta variable disminuyó con la profundidad, pero en forma más acentuada en *sdr*, en la cual la fracción orgánica de los cinco primeros centímetros fue casi cuatro veces superior a lo observado en la mayor profundidad evaluada (20 a 40 cm), con diferencias altamente significativas entre profundidades ($p < 0,01$). (Aunque los datos de la figura 1 corresponden al lote Playitas, en los otros tres lotes del experimento la situación observada fue similar.)

En los sistemas de producción agrícola y forestal el manejo de la *mos* es indispensable para utilizar en forma sostenible el recurso suelo (Henríquez y Cabalceta 1999). Para conservar la fertilidad del suelo se debe mantener o mejorar el contenido de *mos* a manera de reservorio que aporte en el tiempo parte del N que es requerido por los cultivos (Ramírez 2001). A diferencia de los rastrojos que están constituidos por residuos vegetales en descomposición y pueden ser reconocidos sobre o cerca de la superficie del suelo, la fracción de *mos* corresponde a residuos de plantas y animales completamente degradados e incorporados al suelo, junto con los microorganismos que interactúan en procesos de descomposición de residuos y en la formación del mismo suelo. La *mos* constituye un reservorio de nutrientes que luego de ser convertidos a formas asimilables mediante el proceso de mine-

ralización, pueden ser absorbidos por las plantas del cultivo.

Figura 1. Contenido de *mos* en tres diferentes profundidades luego de cuatro ciclos de cultivo con arroz (2002 a 2004) según *sdr* y *lmc* en lote Playitas.



Si bien los rastrojos afectan el contenido de *mos*, la serie de procesos que intervienen en la descomposición de los mismos y en la formación de *mos* es muy compleja. La descomposición de rastrojos y los materiales relacionados con este proceso forman un continuo de formas intermedias que dificultan medir la acumulación *mos*. En terrenos bajo *lmc* la mezcla periódica de la capa superficial del suelo provoca una distribución uniforme de *mos* en todo el perfil afectado por la labranza. Según Angers *et al.* (1992), consecutivas labranzas con arado ocasionaron reducciones de hasta la mitad del contenido de *mos* en los primeros 6 cm de suelo, con respecto a terrenos sin labrar.

En el presente estudio, posiblemente como consecuencia de la gradual acumulación de los rastrojos de arroz, en *sdr* se observó una marcada estratificación de *mos*, especialmente en la sección superficial entre 0 y 5 cm de profundidad. En esta capa el contenido relativo de *mos* en las parcelas bajo *sdr* fue significativamente superior ($p < 0,05$) a las tratadas mediante *lmc* a partir del tercer ciclo (figura 2). En el resto del perfil del suelo evaluado no se determinó diferencias significativas entre ambos sistemas de labranza. De acuerdo con Michelena (2004), los rastrojos de arroz en *sdr*, al afectar el contenido de *mos*, modifican su estructura, porosidad y retención de humedad, y con esto establecen un nuevo comportamiento físico hídrico del suelo.

Los resultados de la presente investigación confirman lo observado en otros estudios similares. En un experimento con 17 años de duración Falleiro *et al.* (2003) determinaron que el manejo

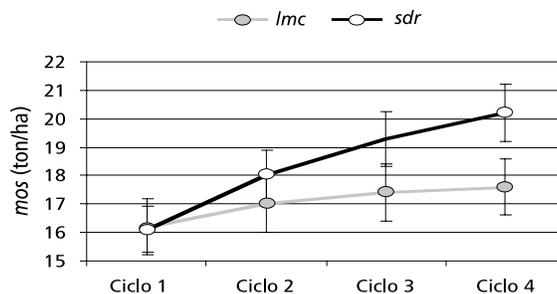
de los rastrojos afecta de manera diferenciada las propiedades edáficas. Se presume que por efecto de los rastrojos y la ausencia de laboreo, en *sdr* la densidad del suelo fue superior en las tres profundidades evaluadas (0 a 5, 5 a 10 y 10 a 20 cm). La micro y macro porosidad del suelo también fueron afectadas por los diferentes tratamientos, influyendo en la forma y distribución de los poros en el perfil del suelo. En *sdr* el contenido de *mos* fue superior en la capa de 0 a 5 cm posiblemente porque la ausencia de labranza permitió la acumulación de residuos.

En otro estudio, Doran (1980) encontró que los agroecosistemas bajo *sdr* se parecen a los ecosistemas naturales con suelos imperturbados en los que los niveles de C, N y agua son superiores en el horizonte superficial a los de tierras labradas. A través del tiempo, en *sdr* los rastrojos dejados sobre la superficie del suelo permiten la formación de un horizonte orgánico en la capa del perfil más cercana a la superficie. Las raíces de las plantas tienden a proliferar en este horizonte superficial, segregan una variedad de compuestos orgánicos e incrementan la aireación del suelo, con lo cual se afecta la fracción mineral de éste y la población microbiana de la rizosfera. Debido a que en *sdr* la *mos* se concentra cerca de la superficie, en los primeros 5 a 15 cm de suelo incrementa el C, N orgánico, y posiblemente otros nutrientes en comparación con métodos de labranza convencional, e implica cambios en la disponibilidad de éstos nutrientes para el cultivo.

En estudios a largo plazo los efectos más significativos de distintos sistemas de labranza fueron observados en la capa de suelo comprendida entre 3 y 6 cm de profundidad. Después de 10 años de cultivo en *sdr* esta capa tiende a tener mayor conductividad hidráulica y menor densidad aparente en comparación con terrenos con laboreo. Al contrario, la *lmc* aplicada en forma consecutiva causa la ruptura física de los agregados, la exposición de sustratos orgánicos e intensifica los ciclos de humedecimiento o secado del suelo, de ese modo incrementan los procesos de desagregación y degradación. La *mos* se pierde rápidamente, muchas veces en forma exponencial, con una pronta declinación durante los primeros 10-20 años, seguida de pequeñas pérdidas anuales hasta que por último se alcanza un nuevo equilibrio a los 50 o 60 años (Campbell et al. 1986).

Diferencias entre ambos sistemas de labranza -como las de la figura 1- se atribuyen al aporte de los rastrojos de arroz al balance total de nutrientes en el agroecosistema. Con la acumulación de rastrojos indirectamente se puede producir además un favorable efecto ambiental. Se estima que el 58 por ciento de la *mos* del suelo es C orgánico (Kass 1998), el cual constituye un factor determinante de la capacidad productiva de los suelos (Iglesias 2004). En el presente estudio, después de cuatro ciclos consecutivos de arroz en monocultivo inundado, en la capa de suelo más cercana a la superficie se determinó contenidos de 10,2 y 11,7 ton/ha de C orgánico en *lmc* y *sdr* respectivamente. Mantener los rastrojos de arroz sobre el terreno sin incorporarlos le permitió al suelo en *sdr* conservar 1,5 ton/ha más de C orgánico que en *lmc*. Esto constituye un beneficio ambiental adicional, porque en *sdr* el suelo actúa como sumidero de C y de ese modo se mitigan las emanaciones de CO₂, uno de los gases con efecto invernadero. En consecuencia, si la productividad del arroz se incrementa y sus rastrojos se conservan en el sitio, sin incorporarlos ni incinerarlos, es probable que aumente el efecto sumidero de C.

Figura 2. Contenido de *mos* en los primeros 5 cm del perfil durante cuatro ciclos de cultivo de arroz con *sdr* y *lmc* en temporadas seca y lluviosa en Playitas, 2002-2004.



Si en condiciones estables la relación C:N en el suelo es de 10:1, entonces con los datos anteriores un terreno en *sdr* tendría 1,17 ton/ha de N orgánico, con 150 kg/ha de N más que en *lmc*. Esa cifra es equivalente a la cantidad que aporta la fertilización nitrógena en cada ciclo de cultivo. Puesto que del N total del suelo anualmente se mineraliza entre 1 y 2 por ciento (Bertsh 1998) y solo una pequeña fracción queda disponible para el crecimiento de las plantas, las estimaciones anteriores sugieren que si bien los rastrojos de arroz no alcanzan para satisfacer plenamente los

requerimientos nutricionales de N del cultivo subsiguiente, al menos permitirían complementar su fertilización nitrogenada en forma parcial. Conforme transcurran más años es probable que las diferencias entre ambos sistemas de labranza, detectadas en este estudio únicamente en los primeros 5 cm del perfil, se vayan acentuando a mayor profundidad, a medida que haya mayor acumulación de rastrojos de diferentes ciclos, cultivos y grados de descomposición.

Amonio (NH_4^+)

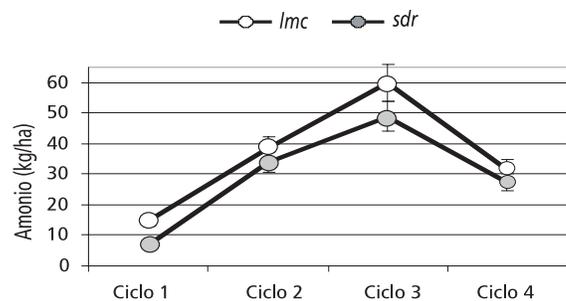
La *mos* es el mayor reservorio de N en los suelos y a través de su mineralización el N orgánico es transformado en amonio (NH_4^+), una forma de N disponible para ser absorbida por las plantas (Ramírez 2001) y la más importante en los cultivos de arroz inundado (Carreras 2004, Cordero 1993). En los arrozales bajo inundación casi permanente la zona que rodea al sistema radicular por lo general se encuentra sin oxígeno. Las plantas de arroz están adaptadas para crecer y desarrollarse en condición inundada porque poseen un tejido especial llamado aerénquima, distribuido por la hoja, vaina, tallo y raíces, el cual transporta oxígeno hacia las últimas y les permite respirar. Bajo las condiciones reductoras de los suelos inundados, se esperaría que el proceso de mineralización del N de la *mos* se detenga en la forma de NH_4^+ y, consecuentemente, que ocurra una gradual acumulación de esta forma de N en la solución del suelo. Esto posiblemente incrementaría la disponibilidad de N para el cultivo y favorecería así el crecimiento del arroz.

En esta investigación, a través de muestreos efectuados a 10 días después de la siembra, se obtuvo una estimación instantánea de la concentración de NH_4^+ en el suelo al arranque del arrozal, durante cuatro ciclos de cultivo consecutivos. Aunque esta forma de N disponible en el suelo mostró cambios en el tiempo (figura 3), durante el lapso evaluado no se observó diferencias significativas por efecto del sistema de labranza aplicado. En general, mientras que en *sdr* la concentración de NH_4^+ disminuyó ligeramente con la profundidad, en *lmc* fue relativamente uniforme en las tres capas del perfil consideradas (0 a 40 cm).

Se presume que mientras se mantenga la lámina de agua sobre el terreno y persista la con-

dición de suelo inundado, el NH_4^+ derivado de la mineralización de la *mos* o de la fertilización nitrogenada puede permanecer predominantemente disuelto en la solución del suelo, o ser adsorbido por las arcillas o el humus, en formas muy favorables para su absorción por el cultivo. En estas circunstancias, la cantidad de NH_4^+ absorbido por las plantas de arroz así como su remanente en el suelo probablemente variará de acuerdo al estado de desarrollo fenológico del cultivo. La eficiente absorción de N durante las fases de formación de macollas, máximo crecimiento vegetativo, formación de panícula y floración, es determinante del rendimiento en grano y del volumen de rastrojos producidos por el arroz (Cordero 1993, Pulver 2003).

Figura 3. Cambios en el contenido de amonio (NH_4^+) del suelo en los primeros 40 cm de profundidad durante cuatro ciclos de cultivo de arroz inundado con *sdr* y *lmc*.



Quando el arrozal alcanza el punto de madurez para cosecha, el terreno debe ser drenado y con esto se provoca la salida del agroecosistema de gran parte del NH_4^+ acumulado a lo largo del ciclo de cultivo precedente. Desde la cosecha hasta la siembra del arroz en el ciclo siguiente, generalmente el terreno permanece sin riego artificial y la humedad del suelo dependerá de la caída de lluvias. En estos lapsos la disponibilidad de N en el suelo posiblemente dependa de factores ambientales como la temperatura y el régimen de humedad. Bajo condiciones aeróbicas, la mineralización del N inorgánico puede avanzar hasta la fase de nitrificación y el NH_4^+ ser transformado a NO_3^- . Esta última forma de N disponible es altamente soluble en agua y por su gran movilidad es muy susceptible a pérdidas por escorrentía y lixiviación, especialmente cuando después de un lapso propicio para la nitrificación se producen lluvias intensas en el sitio. Se puede

suponer que a esto se deba las notables diferencias en el contenido de NH_4^+ detectado durante muestreos realizados en épocas secas con respecto a temporadas lluviosas.

Aunque no se detectó diferencias en el contenido de NH_4^+ entre los sistemas de labranza comparados, la alta variabilidad entre épocas de muestreo y elevados valores determinados (en algunos casos hasta 60 kg/ha de esta forma de N disponible antes de realizar la fertilización nitrogenada), sugieren que existe un potencial considerable para manejar los procesos de mineralización del N derivado de la *mos*, controlando entre otros aspectos la lámina de agua y el régimen de humedad en el terreno. Promover el ciclaje de nutrimentos presentes en los rastrojos puede ser una forma de limitar la aplicación de fertilizantes químicos al suelo y mitigar la contaminación del ambiente.

Nitrato (NO_3^-)

En arrozales inundados el NO_3^- principalmente se encuentra en la zona que rodea las raíces o rizosfera y en los dos primeros centímetros de suelo (Carreras 2004). En estos agroecosistemas en la superficie del suelo se forma una capa de oxidación y una zona de reducción debajo de ésta. Por tener alta movilidad, el NO_3^- en el agua está sujeto a pérdidas por escorrentía en la superficie o por lixiviación hacia la zona de reducción. En esta zona puede ser reducido a nitritos y luego a óxido nitroso o a N elemental, formas gaseosas que por volatilización también pueden salir del agroecosistema sin ser aprovechadas en la nutrición del cultivo (Cordero 1993).

De manera concordante con estudios previos sobre el comportamiento del N en suelos arroceros, el contenido de NO_3^- presentó alta variabilidad tanto entre lotes como entre ciclos de cultivo. Aunque estas variaciones fueron muy altas y no hubo evidencia estadística de diferencias entre los sistemas de labranza en comparación, se determinó contenidos de hasta 90 kg/ha en los primeros 40 cm del perfil, antes de realizar la fertilización nitrogenada. Estas existencias iniciales de N disponible junto con las del NH_4^+ posiblemente son producto de la mineralización de la *mos* y revelan la importancia de mantener o mejorar la fracción orgánica del suelo para que funcione como reservorio y supla en el tiempo parte de las necesidades de N que requiere el cultivo.

Estudios sobre este tema en áreas tropicales han encontrado que existen grandes fluctuaciones estacionales del NO_3^- a lo largo del año. Generalmente, ocurre una acumulación de NO_3^- en la capa arable del suelo durante la estación seca, incrementos repentinos al inicio de las lluvias y una pronta disminución durante el resto de la estación lluviosa (Bertsh 1998). Sin embargo, las condiciones ambientales particulares de los agroecosistemas inundados, junto con la adaptabilidad del arroz para prosperar en ese ambiente, son propicias para que a través del manejo de la lámina de agua y el control de los periodos de humectación y secado se pueda incrementar la formación y conservación de ambas formas de N disponible. Esto permitiría establecer alternativas más naturales de nutrición nitrogenada del cultivo y mitigar los impactos negativos debidos a la aplicación de fertilizantes químicos.

Conclusiones

Luego de cuatro ciclos consecutivos de arroz en monocultivo inundado, los rastrojos de arroz dejados como cobertura protectora del suelo en el sistema *sdr* permitieron una marcada estratificación del contenido de *mos*, especialmente concentrada en la capa del perfil del suelo comprendida entre 0 y 5 cm de profundidad, con diferencias altamente significativas en más de 2,6 ton/ha de *mos* con respecto a suelos tratados mediante *lmc*. La acumulación de rastrojos en distinto grado de descomposición, junto con la ausencia de operaciones de labranza del suelo en *sdr*, produjeron un aporte diferencial estimado en 1,5 ton/ha de C orgánico y 150 kg/ha de N total, por encima de las estimaciones correspondientes a terrenos bajo *lmc*. El aporte de N total de los rastrojos es equivalente a la cantidad que se aplica por fertilización nitrógena normal en cada ciclo de cultivo.

Aunque en ninguna de las formas de N disponible en el suelo se detectó diferencias significativas entre ambos sistemas de labranza, la alta variabilidad entre épocas de muestreo y elevados valores en algunos casos (hasta 60 y 90 kg/ha de NH_4^+ y NO_3^- respectivamente, antes de realizar la fertilización nitrogenada), sugieren que existe un potencial considerable para manejar los procesos de mineralización del N derivado de la *mos* y controlar, entre otros

aspectos, la lámina de agua y el régimen de humedad en el terreno.

Referencias bibliográficas

Angers, D. A., A. Pesant y J. Vigneux. "Early Cropping-Induced Changes in Soil Aggregation, Organic Matter, and Microbial Biomass", en *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1992.

Bertsh, F. 1998. *La fertilidad de los suelos y su manejo*. Centro de Investigaciones agronómicas, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica.

Bull, L. 1993. *Residue and Tillage Systems for Field Crops*. USDA Economic Research Service. Staff Report No. AGES 9310.

Campbell, C. A. et al. "Influence of fertilizer and straw baling on soil organic matter in a thin Black Chernozem in western Canada", en *Soil Biol. Biochem.* 23, 1991.

Campbell, C. A. et al. "Land quality, trends and wheat production in western Canadá", en Slinkard, E. y D. B. Fowler (eds.). 1986. *Wheat production in Canada*.

Carefoot, J. M., H. H. Janzen y C. W. Lindwall. "Crop residue management for irrigated cereals on the semi-arid Canadian prairies", en *Soil Tillage Res.* 32, 1994. Canadá.

Carreras, R. "Disponibilidad del nitrógeno en suelos inundados", en *Agricultura Vergel* 267, 2004. España.

Conrad, R. y P. Frenzel. "Flooded soils", en G. Bitton (ed.). 2002. *The Encyclopedia of Environmental Microbiology*. New York.

Cordero, A. 1993. *Fertilización y nutrición mineral del arroz*. EUCR. San José.

Crovetto, L. C. 1992. *Rastrojos sobre el suelo, una introducción a la cero labranza*. Editorial Universitaria. Santiago.

Doran, J. W. "Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage", en *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1980. EU.

Dormaar, J. F. y J. M. Carefoot. "Implications of crop residue management and conservation tillage on soil organic matter", en *Can. J. Plant Sci.* 76, 1996. Canadá.

Falleiro, R. M. et al. "Influencia dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo", en *R. Bras. Ci. Solo* 27, 2003. Brasil.

Hayes, W.A. 1982. *Minimum tillage farming*. No-Till Farmer, Inc. Wisconsin.

Henríquez, C., F. Bertsh y R. Salas. 1998. *La fertilidad de suelos, manual de laboratorio*. Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR. San José.

Henríquez, C. y G. Cabalceta. 1999. *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. EUCR, San José.

Herrera, F. 2002. *Manejo de rastrojos, las malezas y el arroz voluntario en un sistema de rotación frijol-arroz*. Tesis doctoral, UCR. San José.

Hooker, M. L., G. M. Herron y P. Peñas. 1982. "Effects of residue burning, removal and incorporation on irrigated cereal crop yields and soil chemical properties", en *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 1982. EU.

Iglesias, D. "Uso de indicadores para la evaluación de la gestión ambiental", en *Seminario Sustentabilidad de la Producción Agrícola 2004. Argentina*.

Kay, B. D. "Rates of change of soil structure under different cropping systems", en *Adv. Soil Sci.* 12, 1990. EU.

Kass, D. 1998. *Fertilidad de suelos*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José.

Liesack, W., S. Schnell y N. P. Revsbech. 2000. "Microbiology of flooded rice paddies", en *FEMS Microbiol. Rev.* 24, 2000. EU.

Michelena, R. "Estructura del suelo y dinámica de nutrientes en el sistema de siembra directa", en *Seminario Sustentabilidad de la Producción Agrícola, 2004, Argentina*.

Pecorari, C. "Guía conceptual para elaborar metodologías de evaluaciones físicas de suelos", en Panigatti et al. (eds). 1998. *Siembra Directa*. Editorial Hemisferio Sur. Argentina.

Pulver, E. L. 2003. *Strategy for sustainable rice production in Latin America and Caribbean*. Fao. Roma.

Rímolo, M. M. "Procesos microbiológicos del suelo", en Panigatti et al. (eds.) 1998. *Siembra Directa*. Editorial Hemisferio Sur. Argentina.

Ramírez, C. "Capítulo VI, Nutrición nitrogenada", en Villalobos, E. (ed.). 2001. *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Fascículo I*. Editorial Universidad de Costa Rica. San José.

Rhoton, F. E. "Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices", en *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2000.

Shelton, D., J. Smith y P. Jasa. 2000. "Estimating Residue Cover", en *Conservation Tillage Systems and Management* 45. EU.

Smith, J., V. Hoffman y R. Taylor. 2000. "Residue Management at harvest", en *Conservation Tillage Systems and Management* 45. EU.

Watson, R. T. et al. 1992. "Greenhouse gases: sources and sinks", en *Climate Change 1992*. Cambridge University Press. EU.

Zinder, S. H. 1993. "Physiological ecology of methanogens", en *Methanogenesis: Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics*. Chapman and Hall. New York.

Tus fotos sobre ambiente

fauna, flora; ecosistemas naturales, rurales y urbanos; contaminación de aire, agua y suelo; deforestación y problemática del bosque; explotación agropecuaria y minera; producción energética; pesquería; etcétera!

mandánolas a ambientico@una.ac.cr
para incorporarlas a la

GALERÍA AMBIENTALISTA

de próxima aparición en: www.ambientico.una.ac.cr
(Los autores y autoras de las mejores fotos obtendrán gratuitamente una suscripción anual de AMBIENTICO o de AMBIENTALES)