



XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo

Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas
31 de julho à 05 de agosto - Center Convention - Uberlândia/Minas Gerais

ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

Sandra Furlan Nogueira⁽¹⁾, Célia Regina Grego⁽¹⁾, Carlos Fernando Quartaroli⁽¹⁾, Ricardo Guimarães Andrade⁽¹⁾, Carlos Cesar Ronquim⁽¹⁾, Wilson Anderson Holler⁽²⁾

⁽¹⁾ Pesquisadores da Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM. Av. Soldado Passarinho, 303, Campinas, SP, CEP 13070-115. E-mail: sandra@cnpm.embrapa.br; ⁽²⁾ Analista da Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM.

Resumo – Os estoques de carbono orgânico no solo (COS) por hectare em áreas com cana-de-açúcar em 2003 e 2007 foram estimados em região produtora do Estado de São Paulo. A região caracteriza-se pela crescente mecanização da colheita, evitando a queima da palhada e contribuindo para o aumento dos estoques de COS. Para a estimativa do COS foram utilizados mapas digitais de solo, de biomas e das áreas produtoras em 2003 e 2007. As áreas produtoras foram divididas em unidades cartográficas segundo a combinação de solos, biomas e forma de colheita. Os valores de COS foram estimados para cada unidade cartográfica pela aplicação de fatores publicados em literatura que correlacionavam o estoque de COS aos solos, biomas e forma de colheita da cana. Posteriormente, para cada município da região, obteve-se o estoque médio de COS por hectare nas áreas produtoras em 2003 e 2007. Mapas coropléticos com os valores de COS por município foram elaborados. O estoque médio de COS por ha em áreas colhidas com cana-de-açúcar era de 29,66 Mg ha⁻¹ em 2007 e 27,80 Mg ha⁻¹ em 2003. Esses valores correspondem a um incremento de 1,86 Mg ha⁻¹ ou 6,69% no período 2003-2007. A introdução da colheita da cana-de-açúcar sem a queima foi a principal responsável pelo aumento dos estoques de COS.

Palavras-Chave: solo; biomas; mapas digitais, geoprocessamento; cana crua; cana queima.

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais da expansão e da intensificação da canavieira ainda não estão suficientemente estudados, principalmente em relação à sua sustentabilidade agrônoma, sob a perspectiva da manutenção dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. As alterações regionais na cobertura e uso das terras geradas por essa expansão implicam em alterações nos ciclos biogeoquímicos, incluindo mudanças nos estoques de carbono e nitrogênio dos solos, além das emissões de gases de efeito estufa (Defries et al., 2002; Luizão et al., 1989; Galdos, 2007).

A cultura da cana-de-açúcar não é considerada anual e nem perene, é uma lavoura temporária que, após o plantio, é colhida anualmente por 4 a 5 anos. A cultura contribui para reduzir as emissões de gases do

efeito estufa (GEE), já que sua produção é, em grande parte, destinada à produção de etanol, que substitui os combustíveis fósseis. Todavia, é preciso que a produção de etanol seja acompanhada do emprego de tecnologias que reduzam as emissões dos GEE gerados na produção da cana-de-açúcar no campo e no seu beneficiamento na usina. Adicionalmente, os benefícios ambientais serão otimizados caso práticas de manejo conservacionistas (como por exemplo: colheita da cana-de-açúcar sem queima, aplicação racional de fertilizantes e resíduos da agroindústria, plantio direto, etc.) consigam incorporar o carbono presente na atmosfera em formas mais estáveis ligadas a matéria orgânica do solo (Galdos, 2007).

Historicamente a cana-de-açúcar é colhida manualmente após a queima do canavieiro. Esse procedimento é adotado porque a ausência das folhas (palhada) aumenta o rendimento da mão-de-obra no corte dos colmos. A queima da palha normalmente é evitada quando a colheita é mecanizada. Estudos de Cerri et al. (2010) com solos brasileiros mostram que a taxa média de acúmulo de carbono no solo entre a superfície e a profundidade de 30 cm é de 1,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (0,73 e 2,04 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para solos arenosos e argilosos, respectivamente) quando se substitui o sistema de colheita da cana queimada pelo de cana crua.

As mudanças de uso das terras ou das formas de utilização do solo são transformações que ocorrem em grandes áreas e de forma simultânea, sendo que os condicionantes dessas mudanças e os seus efeitos também atuam nessa escala. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) constituem uma importante ferramenta para monitorar grandes extensões geográficas, pela facilidade de armazenar, espacializar e analisar grandes quantidades de dados referentes aos recursos naturais e as atividades antrópicas; e avaliar ou simular as consequências dessas atividades sobre a superfície terrestre (Morton et al., 2006). Essa ferramenta foi usada neste trabalho para analisar dados sobre o cultivo da cana-de-açúcar e caracterizar a evolução dessa cultura em municípios selecionados do Estado de São Paulo. Com isso, este trabalho teve o objetivo de avaliar estimativas de estoque de COS sob a cultura da cana-de-açúcar e dos estoques médios de COS por município, feitas a partir dos mapeamentos das áreas cultivadas segundo a forma de colheita praticada; além do uso de informações de literatura sobre o comportamento dos estoques de COS em diferentes tipos de solo, biomas e formas de colheita da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo compreende a totalidade das microrregiões de Novo Horizonte, Nhandeara, São José do Rio Preto, Catanduva, Araraquara, Jaboticabal, Ribeirão Preto, Barretos, São Joaquim da Barra e Ituverava (IBGE, 2009b). As classes de solos predominantes na área de estudo são os Argissolos Vermelho amarelo e os Latossolos Vermelho (Oliveira et al., 1999). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como tropical (Aw), com a estação seca no inverno. A temperatura média anual oscila entre 18°C e 20°C, e a pluviosidade, entre 1.250mm e 2.000mm. A vegetação nativa original era composta por Savana (Cerrado) e Floresta Estacional (IBGE, 2009a).

Cálculo do estoque de carbono no solo

Para a estimativa do estoque de COS por hectare em áreas com cana-de-açúcar em 2003 e 2007 foram utilizados mapas digitais vetoriais em formato *shapefile* dos seguintes temas: pedologia (Oliveira et al., 1999), delimitação dos biomas brasileiros (IBGE, 2009a), limite político-administrativos dos municípios brasileiros (IBGE, 2009b) e delimitação das áreas colhidas com cana-de-açúcar em 2003 e 2007 no Estado de São Paulo (Aguiar et al., 2009).

Foi realizada a intersecção entre os mapas digitais de pedologia, de biomas, dos limites municipais e das áreas de cana crua e queimada em 2007 (safra 2007/2008). Os mapas digitais foram representados no software ArcGIS em formato vetorial em arquivos do tipo *shapefile*. Da intersecção dos *shapefiles* resultou um novo *shapefile*, com novas unidades cartográficas e seus respectivos registros. Esses registros herdaram os atributos dos *shapefiles* originais, portanto, cada unidade cartográfica passou a contar com dados sobre tipo de solo, bioma, município a qual pertence, presença ou ausência de cana colhida em 2007 e tipo de colheita em 2007 (cana crua ou queimada). A área de cada unidade também foi calculada pelo *software* e inserida no respectivo registro. Os mapas foram reprojatados para o Sistema de Projeção Cônica Equivalente de Albers, um sistema que preserva as áreas.

Ao registro de cada unidade cartográfica foi acrescentado um campo com os valores estimados de estoque original de carbono do solo por hectare, conforme Fidalgo et al (2007). Esses valores foram calculados em função do bioma e da classe de solo da unidade cartográfica e representa o estoque de carbono presente no solo por hectare em condições naturais, anterior à sua ocupação antrópica.

Outro campo foi adicionado aos registros com a finalidade de armazenar os valores estimados de estoque de carbono no solo por hectare para o ano de 2007 em cada unidade cartográfica. Esses valores foram estimados por meio dos fatores de mudança ou incremento observados por Galdos (2007) e Czyzka et al. (2009). Fatores diferentes foram utilizados segundo o tipo de solo e tipo de manejo da colheita: cana crua ou cana queimada. Como o objetivo do trabalho é estimar o COS apenas em áreas com canavicultura,

atribui-se o valor zero aos registros que não apontavam a presença de cana em 2007. O COS por hectare de cada unidade cartográfica foi calculado pela Equação 1:

$$C_i = p_i * C_{1i} * fc^{(1-j)} * fq^j \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

C_i é o estoque de carbono orgânico no solo por hectare em áreas colhidas com cana-de-açúcar para a unidade cartográfica i ;

p_i representa a ausência ou presença de cana-de-açúcar colhida em 2007 na unidade cartográfica i . O termo assume o valor “zero” quando a cana-de-açúcar está ausente e o valor “um” quando está presente;

C_{1i} representa o estoque original de carbono do solo por hectare da unidade cartográfica i estabelecido a partir de seu tipo de solo e bioma, conforme Fidalgo et al (2007);

fc são os fatores de mudança para a cana colhida crua segundo o tipo de solo (Galdos, 2007; Czyzka, 2009); fq são os fatores de mudança para a cana colhida queimada segundo Galdos (2007) e Czyzka (2009);

j representa o tipo de colheita da cana. Assume o valor “um” quando a cana da unidade cartográfica foi colhida queimada e o valor “zero” quando ela foi colhida crua.

Para cada unidade cartográfica, foi calculada a estimativa do estoque total de COS em áreas colhidas com cana-de-açúcar em 2007 pela multiplicação da área da unidade de mapeamento pelo valor estimado de carbono por hectare para a mesma unidade, obtido pela Equação 1. Os valores resultantes também foram armazenados no registro das respectivas unidades.

Todos os registros foram agrupados por município. Para cada município, foram calculados a área total colhida com cana-de-açúcar em hectares e o estoque total estimado de COS na mesma área para o ano de 2007. Da divisão do estoque total de COS em 2007 pela área total com cana-de-açúcar do município, obteve-se a estimativa do estoque de COS por hectare de cana colhida para cada município (Equação 2).

$$EC_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * A_i * p_i}{\sum_{i=1}^n A_i * p_i} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

EC_m é o estoque total estimado de carbono orgânico no solo por hectare nas áreas colhidas com cana-de-açúcar para o município m ;

n representa a quantidade de unidades cartográficas presentes dentro da área do município m ;

C_i representa o estoque de carbono orgânico no solo por hectare em áreas colhidas com cana-de-açúcar para a unidade cartográfica i do município m ;

A_i representa a área em hectares da unidade cartográfica i do município m ;

p_i representa a ausência ou presença de cana-de-açúcar colhida em 2007 na unidade cartográfica i . O termo assume o valor “zero” quando a cana-de-açúcar está ausente e o valor “um” quando está presente.

Todas as etapas anteriores foram repetidas com o mapa de áreas colhidas com cana-de-açúcar em 2003, entretanto, pela indisponibilidade de dados sobre o tipo de colheita praticado, considerou-se que toda a cana-de-açúcar colhida

em 2003 era queimada.

Em um arquivo do tipo *shapefile*, os limites dos municípios foram representados por polígonos e associados a registros de uma tabela contendo os valores estimados de COS por hectare de cana colhida em 2003 e 2007.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores estimados de estoque médio de COS por ha em áreas colhidas com cana-de-açúcar por município são apresentados na Figura 1. Os valores para 2007 foram calculados em função da forma de colheita da cana, do tipo de solo e do bioma das áreas de colheita de cada município e variavam de 21,2 Mg ha⁻¹ a 34,1 Mg ha⁻¹; já os valores para 2003 variavam de 21,4 Mg ha⁻¹ a 31,8 Mg ha⁻¹.

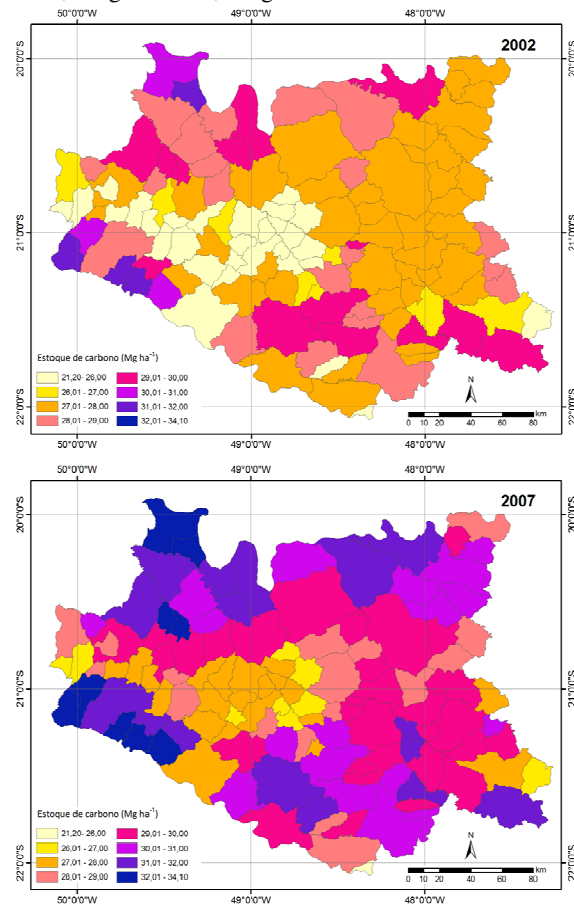


Figura 1. Estoque médio de carbono por hectare em áreas colhidas com cana-de-açúcar nos anos de 2003 e 2007. Dados estimados por município.

Considerando toda a área de estudo, o estoque médio de COS por hectare em áreas colhidas com cana-de-açúcar era de 29,66 Mg ha⁻¹ em 2007 e 27,80 Mg ha⁻¹ em 2003. Esses valores correspondem a um incremento de 1,86 Mg ha⁻¹ ou 6,69% no período 2003-2007. Há municípios com aumentos de até 3,6 Mg ha⁻¹ e de até 13% (Figura 2). Em apenas dois municípios não foram observados aumento do COS por hectare.

A principal razão dos incrementos de COS por hectare é o aumento significativo da colheita de cana crua nesse pólo produtivo. Os incrementos ocorrem em

função do carbono incorporado ao solo a partir da palha depositada sobre o solo nas áreas que deixaram de ser queimadas em 2007. Em diversos experimentos, uma correlação entre a manutenção da palhada de cana-de-açúcar e o aumento dos teores de carbono total no solo tem sido observada, com influência de variáveis como tempo de adoção do sistema sem queima, textura do solo e grau de revolvimento do solo na reforma do canal (Cerri et al., 2004; Graham et al., 2002; Robertson, 2003).

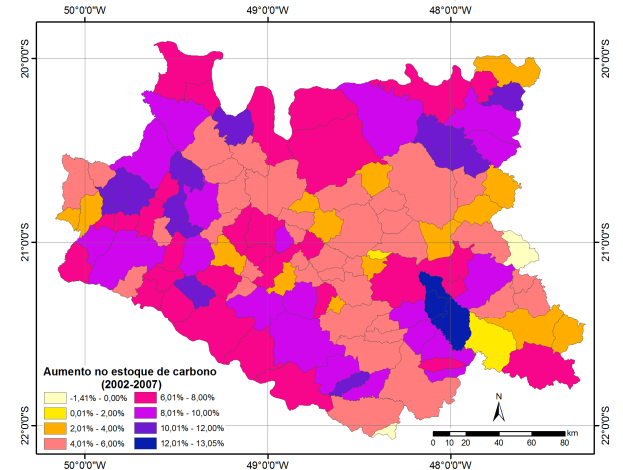


Figura 2. Aumento percentual no estoque médio de carbono por hectare em áreas colhidas com cana-de-açúcar no período 2003-2007 em relação ao valor estimado para 2003. Dados estimados por município.

A observação simultânea dos valores de COS por município em 2003 com o mapa de biomas e solos indica que, nos municípios com os menores valores de estoque de COS, as áreas colhidas com cana normalmente apresentavam solos da classe PVA em áreas do Bioma Mata Atlântica, situação que ocorria na maior parte das porções central e oeste da área de estudo. Os maiores valores de estoque de COS também foram encontrados em municípios com áreas no Bioma Mata Atlântica, porém com predominância de Latossolos, situação observada em poucos municípios, situados próximos aos rios Grande e Tietê, na porção oeste da área de estudo.

Valores intermediários de COS ocorriam em municípios situados em áreas do Bioma Cerrado. Esse bioma domina amplamente a porção leste da área de estudo, onde também predominam áreas com Latossolos. Os valores de COS em municípios do Bioma Cerrado são ligeiramente maiores quando há predominância dos Argissolos, situação observada em alguns municípios situados nas porções oeste e central da área de estudo. Em geral, o estoque de COS em áreas com cana colhida queimada decresce em relação aos valores que as mesmas áreas apresentavam com vegetação original, porém a ordenação das combinações de solos/biomas quanto aos estoques de COS permanece a mesma.

Outro fator que pode ter influenciado as alterações de COS observados, embora em menor intensidade, é a alteração na distribuição espacial das áreas produtoras em relação aos tipos de solo e biomas. A expansão ou retração da cultura em determinado município pode alterar a proporção de cana plantada em cada tipo de solo e bioma. Como o estoque de COS estimado depende da classe do

solo e do bioma, o estoque de COS por hectare no respectivo município também será alterado. Esse fato pode explicar, por exemplo, o decréscimo do COS por hectare em dois municípios: Brodowski e Trabiçu.

Um fator a ser investigado no processo de aumento dos estoques de carbono em áreas com canavieira é a possibilidade de mecanização nas áreas produtoras. A colheita da cana crua promove o aumento do estoque de COS, entretanto, ela é viável tecnicamente apenas se mecanizada. Condições naturais das áreas produtoras, principalmente a declividade do terreno, podem impedir a mecanização e essas áreas continuariam a usar o processo de queima para a colheita até que algum impedimento legal à queimada ou a inviabilidade econômica da colheita manual force a substituição da canavieira por outra cultura. Dessa forma, a investigação das áreas potencialmente mecanizáveis para a canavieira podem apontar o potencial para o aumento da colheita de cana crua e consequentemente o potencial para o aumento de COS.

CONCLUSÕES

A área de estudo, considerada pólo da produção de cana-de-açúcar, apresenta diferenças na distribuição espacial quanto ao estoque de COS nas áreas produtoras de cana, em virtude dos diferentes tipos de solo distribuídos nos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

A introdução da colheita da cana-de-açúcar sem a queima da palha foi a principal responsável pelo aumento dos estoques de COS por hectare em áreas produtoras de cana-de-açúcar, quando se compara os dados por município em 2007 e 2003. Municípios com predominância de solos da classe LV, a maioria localizados na porção leste da área de estudo, apresentaram os maiores índices de ocupação de seus territórios pela lavoura canavieira. Em sua recente expansão, a canavieira avançou fortemente também em áreas de solo LV e, de forma menos intensiva, sobre áreas de Argissolos, predominantes nas porções oeste e central da área de estudo.

O melhor entendimento do comportamento do COS frente a seus atributos por meio de mapeamentos do uso e cobertura do solo, das práticas de manejo e da colheita de forma detalhada, pode fornecer estimativas mais acuradas dos estoques de COS.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Dr. Bernardo Rudorff e Daniel Aguiar, pela colaboração com os *shapes* das áreas de cana-de-açúcar (Projeto CANASAT).

REFERÊNCIAS

AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T.; SILVA, W.F.; CARVALHO, M.A.; AULICINO, T.L.I.N.; BRANDÃO, D.; GOLTZ, E.; ADAMI, M.; SUGAWARA, L.M. Mapeamento da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo ano safra 2007/2008. São José dos Campos: INPE, 2009. 63 p. (INPE-15724-RPQ/821). Disponível em: <[\[m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18%4080/2009/05.18.13.12/doc/paginadeacesso.html\]\(http://m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18%4080/2009/05.18.13.12/doc/paginadeacesso.html\)>. Acesso em 27 out. 2010.](http://mtc-</p></div><div data-bbox=)

- CERRI C.C.; GALDOS, M.V.; MAIA, S.M.F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; POWLSON, D.; CERRI, C.E.P. . Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil. Eur. J. Soil Sci., February 2011, **62**, 23–28.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; FELLER, C.; CAMPOS, D.C.; DE LUCA, E.F. & ESCHENBRENNER, V. Canne à sucre et sequestration du carbone. Paris: Académie d'Agriculture de France, Séance du 17 mars, 2004. 15 p.
- CZYCZA, R.V.; SIGNOR, D. & CERRI, C.E.P. Estoques de carbono e nitrogênio do solo e biomassa microbiana em sistema de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32, Fortaleza, 2009. Anais. Fortaleza, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.
- DEFRIES, R.S.; HOUGHTON, R.A.; HANSEN, M. C.; FIELD, C.B.; SKOLE, D. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 99(22):14256-14261, 2002.
- FIDALGO, E.C.C.; BENITES, V. DE M.; MACHADO, P. L.O. DE A.; MADARI, B.E.; COELHO, M.R.; MOURA, I. B. DE; LIMA, C. X. DE. Estoque de carbono nos solos do Brasil. 2007. 27 p. (Boletim Embrapa de Pesquisa e Desenvolvimento, 121.)
- GALDOS, M.V. Dinâmica do carbono no agrossistema cana-de-açúcar. 101 f. 2007. (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J. & MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. Eur. J. Soil Sci., 53:589-598, 2002.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas Interativos. Mapa de vegetação. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/vegetacao/viewer.htm>>. Acesso em 06 fev. 2009a.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas Interativos. Malhas digitais. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/>. Acesso em 06 fev. 2009b.
- LUIZÃO, F.; MATSON, P.; LIVINGSTON, G.; LUIZÃO, R.E. & VITOUSEK, P. Nitrous oxide flux following tropical land clearing, Glob. Biogeochem. Cy., 3(3):281–285, 1989.
- MORTON, D.C.; DEFRIES, R.S.; SHIMABUKURO, Y.E.; ANDERSON, L.O.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO, F. DEL, B.; FREITAS, R. & MORISSETTE, J. Cropland expansions changes dynamics in the southern Brazilian Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103:14637-14641, 2006.
- OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. & CALDERANO FILHO, B. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64 p. Acompanha mapa color, escala 1:500.000. (04 folhas) MP 99.00148.
- ROBERTSON, F. Sugarcane trash management: consequences for soil carbon and nitrogen. Final report of the project Nutrient Cycling in Relation to Trash Management. Townville: CRC for Sustainable Sugar Production, 2003. 39p.