

Horizontes diagnósticos superficiais de Cambissolos e uso de $\delta^{13}\text{C}$ como atributo complementar na classificação de solos

Denilson Dortzbach⁽¹⁾, Marcos Gervasio Pereira⁽²⁾, Luiz Fernando Novaes Vianna⁽¹⁾ e Antônio Paz González⁽³⁾

⁽¹⁾Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Rodovia Admar Gonzaga, nº 1.347, Itacorubi, CEP 88034-901 Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: denilson@epagri.sc.gov.br, vianna@epagri.sc.gov.br ⁽²⁾Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rodovia BR 465, Km 7, Campus Universitário, CEP 23851-970 Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: mgervasiopereira@gmail.com ⁽³⁾Universidade da Coruña, Campus da Zapateira, nº 15.071 A Coruña, GA, Espanha. E-mail: tucho@udc.es

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar os horizontes diagnósticos superficiais e quantificar os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em perfis de Cambissolos localizados em regiões de elevada altitude, em Santa Catarina, bem como propor a utilização complementar desse atributo no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Foram realizadas coletas de amostras de horizontes superficiais de 24 perfis modais para a caracterização de atributos físicos e químicos. Para a determinação do $\delta^{13}\text{C}$, as coletas foram feitas nas camadas de 0,0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30, 0,30–0,40, 0,40–0,50, 0,50–0,60, 0,60–0,80 e 0,80–1,00 m. Predominaram os Cambissolos Háplicos com horizonte diagnóstico superficial A moderado e elevados teores de carbono orgânico total (COT). Os elevados valores de COT, no entanto, frequentemente não foram suficientes para classificação dos horizontes superficiais como A húmico, em razão de sua pequena espessura. Nos solos classificados como A húmico, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ revelaram pequena alteração na assinatura isotópica, indício de manutenção da vegetação; enquanto nos solos com A moderado observaram-se alterações decorrentes do cultivo. Sugere-se o uso de $\delta^{13}\text{C}$ como atributo complementar para o SiBCS, e que o atributo profundidade seja desconsiderado, para fins de classificação, no caso de: alterações no uso do solo em áreas com declividade superior a 8%, solos rasos e pouco profundos, textura argilosa a muito argilosa e teores de COT superiores a 3%.

Termos para indexação: análise isotópica, atributo diagnóstico, horizonte A húmico, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, solos subtropicais de altitude.

Inceptisol surface diagnostic horizons and use of $\delta^{13}\text{C}$ as an additional attribute in the soil classification

Abstract – The objective of this work was to evaluate superficial diagnostic horizons and to quantify $\delta^{13}\text{C}$ in Inceptisol profiles on the highlands of the state of Santa Catarina, Brazil, as well as to propose the complementary use of this attribute in the Brazilian System of Soil Classification (SiBCS). Samples of superficial horizons were collected to characterize physical and chemical attributes of 24 modal profiles. For the evaluation of $\delta^{13}\text{C}$, the samples were taken at the layers of 0.0–0.10, 0.10–0.20, 0.20–0.30, 0.30–0.40, 0.40–0.50, 0.50–0.60, 0.60–0.80, and 0.80–1.00 m. Haplic Inceptisols with moderate A superficial diagnostic horizon and high total organic carbon (TOC) content predominated. The high TOC values, however, were often not enough to classify the superficial horizon as humic A, due to its small thickness. In soils with humic A, $\delta^{13}\text{C}$ values revealed little alteration in the isotopic signature, which indicates vegetation maintenance; whereas in the soils with moderate A, alterations occurred due to cultivation. The use of $\delta^{13}\text{C}$ to complement the SiBCS is suggested, and depth should be disregarded for classification in the case of: changes in land use in areas with slopes above 8%, shallow or small-depth soils, clayey to very clayey texture, and TOC contents above 3%.

Index terms: isotopic analysis, diagnostic attribute, humic A horizon, Brazilian System of Soil Classification, highland subtropical soils.

Introdução

As regiões do Meio Oeste e Planalto Sul de Santa Catarina estão localizadas em áreas de altitudes elevadas, caracterizadas pela presença de clima frio e

úmido que favorecem o acentuado acúmulo de matéria orgânica (MO) até o topo do horizonte B dos solos (Silva et al., 2008).

Entretanto, a substituição da vegetação natural por outros usos leva a importantes mudanças no estoque

de carbono do solo – o qual varia de acordo com as condições de clima, espécie vegetal e solo –, e a ação antrópica é capaz de modificar rapidamente certas características naturais do solo que foram adquiridas ao longo de milhares de anos (Hillel & Rosenzweig, 2011). Essas mudanças podem fazer com que 25–30% do carbono orgânico total (COT) do solo seja perdido (Murty et al., 2002), com resultados ainda mais drásticos em áreas de relevo acidentado, como o que ocorre na maior parte do estado de Santa Catarina. Essa característica dos solos altomontanos do estado condicionam uma pequena profundidade efetiva destes, com predominância absoluta de solos com um baixo grau de desenvolvimento pedogenético, como os Cambissolos.

Os teores de COT são utilizados como um dos principais critérios de diferenciação nos sistemas de classificação de solos, como Soil Taxonomy (USDA, 2014) e World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2015), bem como na maioria dos sistemas nacionais, como o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2013a). Neste sistema, os teores de COT são determinantes especialmente para a classificação do horizonte A húmico, entre os horizontes de constituição mineral. Perfis com maior expressão desse horizonte diagnóstico tendem a ocorrer em ambientes altomontanos, e em especial na região Sul do Brasil (Santos et al., 2013a).

Adicionalmente aos teores de COT, o emprego de traçadores isotópicos de carbono pode ser utilizado para uma melhor compreensão das transformações da paisagem, ao indicar a natureza do C perdido e o tempo provável para acumulação. Essas informações permitem verificar se determinado perfil de solo foi submetido à alteração antrópica e dão uma noção temporal dessa interferência (Trumbore & Camargo, 2009). Dortzbach et al. (2015), ao avaliarem áreas de floresta e pastagem com diferentes tempos de uso, em diferentes profundidades de solo em área de Mata Atlântica de Santa Catarina, observaram alterações em $\delta^{13}\text{C}$, as quais resultaram em assinaturas isotópicas distintas. Os autores verificaram, por exemplo, que, em pastagens com 50 anos de uso, na camada de 0,00–0,10 m, 66% do COT do solo era derivado da floresta original.

Os sistemas taxonômicos comumente são submetidos a atualizações e adequações, como as buscadas para o SiBCS nos trabalhos de Valadares (2007) e Fontana

et al. (2011). Nesse sentido, é possível que informações quanto à análise isotópica do $\delta^{13}\text{C}$ possam vir a ser utilizadas em estudos pedológicos, como atributo complementar com o intuito de contribuir para a contínua evolução do Sistema.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os horizontes diagnósticos superficiais e quantificar os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em perfis de Cambissolos localizados em regiões de elevada altitude em Santa Catarina, bem como propor a utilização complementar desse atributo no SiBCS.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido nas regiões do Meio Oeste e Planalto Sul Catarinense, em altitudes que variaram de 864 a 1.330 metros (Tabela 1), onde se localizam os produtores dos vinhos finos de altitude no estado de Santa Catarina. A maior parte da área de estudo compreende a Formação Serra Geral; entretanto, observa-se em algumas áreas a presença de rochas sedimentares gonduânicas paleozoicas, correspondentes à Bacia do Paraná.

De acordo com a classificação climática de Köppen, em razão da altitude, o subtipo é o Cfb (clima subtropical com verões brandos). A precipitação média anual está em torno de 1.700 mm (Santa Catarina, 1986). As vegetações predominantes são as de florestas de clima subtropical, com destaque para a floresta de Araucária (Floresta Ombrófila Mista). Duas unidades geomorfológicas ocorrem nas regiões de estudo: a Unidade Geomorfológica Planalto dos Campos Gerais e a Unidade Geomorfológica Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai (Santa Catarina, 1986), em que a primeira apresenta-se distribuída em blocos de relevos isolados pela segunda.

Trincheiras foram abertas para avaliação de 24 perfis modais de Cambissolos (Tabela 1), descritos morfologicamente conforme Santos et al. (2013b). As amostras coletadas foram analisadas em laboratório, para posterior classificação dos solos segundo o SiBCS (Santos et al., 2013a). Para determinação de atributos físicos e químicos, foram coletadas amostras nos horizontes superficiais, inclusive o AB, enquanto, para a determinação de $\delta^{13}\text{C}$, as amostras foram coletadas nas camadas de 0,0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30, 0,30–0,40, 0,40–0,50, 0,50–0,60, 0,60–0,80 e 0,80–1,00 m, compostas de três amostras simples. Após a coleta, as

amostras foram secadas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm de malha, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), utilizada nas análises.

Foram avaliados os seguintes atributos químicos e físicos (Claessen, 1997): pH em água, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} , COT, granulometria (areia, silte e argila) e CTC a pH 7,0. As análises foram realizadas no laboratório de solos da Epagri, em Chapecó, SC.

O fracionamento das substâncias húmicas (SHs) foi realizado em triplicata, nas 52 amostras dos horizontes A diagnósticos. Foram determinados os teores de COT das frações húmica (HM), ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF), segundo a técnica de solubilidade diferencial estabelecida por Benites et al. (2003).

A abundância natural de ^{13}C foi avaliada por meio de um espectrômetro de massa isotópica de fluxo contínuo (espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus acoplado em um autoanalisador de C total

Carlo Erba EA 1108 – internacional PDB), em que aproximadamente 300 mg de cada amostra de TFSA foram finamente moídos e passados por malha de 100 mesh, com precisão de quatro casas decimais. A análise de abundância isotópica de ^{13}C foi realizada no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura.

Os resultados foram expressos pela unidade relativa “ δ ”, determinada em relação ao padrão internacional PDB (rocha calcária da formação Pee Dee), de acordo com a seguinte expressão: $\delta^{13}\text{C}\text{‰} = 10^3 \times (R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}) / R_{\text{padrão}}$, em que R_{amostra} é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra, e $R_{\text{padrão}}$ a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão.

A partir da matriz de correlação entre os atributos, foi realizada a análise de similaridade entre os perfis de solos, a qual foi avaliada por meio de análise multivariada, e apresentada em dendrograma. Foram

Tabela 1. Coordenadas geográficas, altitude, município, geologia, clima, relevo regional, uso do solo e horizonte diagnóstico superficial de Cambissolos localizados nas regiões de altitude avaliadas em Santa Catarina.

Perfil	Atitude (m)	Município	Geologia	Declividade (%)	Relevo regional	Uso do solo	Horizonte A
Cambissolo Húmico alítico típico							
1	1.141	Urubici	Arenito, pelito e folhelho	11	Forte ondulado	Floresta	Húmico
2	1.325	Vargem Bonita	Riolito, andes. e riolacito	5	Ondulado	Floresta	Húmico
3	1.330	Água Doce	Rochas vulcânicas ácidas	12	Ondulado	Floresta	Húmico
4	1.022	Urubici	Arenito, pelito e folhelho	11	Forte ondulado	Floresta	Húmico
5	1.294	São Joaquim	Riolacito	15	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Húmico
Cambissolo Háptico alítico típico							
6	902	Bom Retiro	Sedimentos siltico-argilos	20	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
7	1.281	São Joaquim	Riolacito	25	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Proeminente
8	1.294	São Joaquim	Riolacito	21	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
9	1.217	São Joaquim	Riolacito	6	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Proeminente
10	989	Cerro Negro	Basalto básico vesiculado	6	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Proeminente
11	1.252	Água Doce	Rochas vulcânicas ácidas	6	Ondulado	Pastagem	Moderado
12	1.277	Água Doce	Rochas vulcânicas ácidas	12	Ondulado	Floresta	Moderado
Cambissolo Háptico Ta distrófico							
13	865	Bom Retiro	Sedimentos siltico-argilos	12	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Proeminente
14	1.279	São Joaquim	Riolacito	12	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Proeminente
15	1.128	Tangará	Basalto e diabásio	13	Ondulado a forte ondulado	Floresta	Moderado
Cambissolo Háptico Tb distrófico							
16	1.279	São Joaquim	Riolacito	25	Forte ondulado	Pastagem	Moderado
17	1.239	São Joaquim	Riolacito	13	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
18	1.229	São Joaquim	Riolacito	22	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
19	1.306	São Joaquim	Riolacito	5	Ondulado a forte ondulado	Reflorestamento <i>Pinus sp.</i>	Moderado
20	1.122	São Joaquim	Riolacito	8	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
21	1.325	São Joaquim	Riolacito e andesito	18	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
22	1.142	São Joaquim	Riolacito	25	Ondulado a forte ondulado	Pastagem	Moderado
23	1.112	Urupema	Riolacito	6	Ondulado a forte ondulado	Reflorestamento <i>Pinus sp.</i>	Moderado
24	918	C. Novos	Basalto e diabásio	12	Suave ondulado a ondulado	Cultura anual	Moderado

utilizados dados físicos e químicos na primeira análise multivariada e, posteriormente, apenas os atributos úteis para a classificação do horizonte A húmico, como cor, espessura, teor de argila e teor de COT.

As análises estatísticas foram realizadas com os programas SPSS 20.0 (Statistical Package for Social Sciences) e Microsoft Excel. Os dados foram ajustados por regressões lineares a 1% de probabilidade, conforme o coeficiente de determinação (R^2).

Resultados e Discussão

Os horizontes superficiais dos Cambissolos avaliados apresentaram espessura entre 17 e 60 cm; a menor espessura foi observada em área com reflorestamento de pinus, e a maior em área de floresta (Tabela 2). Os teores de argila variaram de 200 (P5) a 556 g kg⁻¹ (P11), e os menores valores foram observados nos perfis desenvolvidos a partir de rochas sedimentares, que, de maneira geral, condicionaram granulometria mais grosseira.

Em contrapartida, os maiores teores de argila ocorreram nos solos formados por rochas ígneas extrusivas (basalto), que correspondem a sequência inferior dos derrames no estado de SC, caracterizadas por conteúdo mais baixo de sílica e, conseqüentemente, menor resistência ao intemperismo, o que refletiu em elevada correlação ($R^2 = 0,90$) entre altitude e teores de argila (Figura 1 A).

Os teores de argila correlacionaram-se significativamente com os de COT ($R^2 = 0,82$), como observado na Figura 1 B. O conteúdo de argila exerce um controle importante sobre a quantidade de carbono de ciclagem lenta e, portanto, influencia o estoque e a dinâmica do carbono do solo. Na Figura 1 C, observa-se que a variável COT explicou 76% da variação da CTC.

Verificou-se, ainda, correlação entre altitude e teores de COT ($R^2 = 0,85$). Silva et al. (2008) constataram que o teor de COT apresenta relação direta com a altitude (900 a 1.200 m) e com o teor de Al⁺³ trocável, em estudo com amostras de camadas superficiais de oito solos da região, sob campo nativo.

Os teores de COT na camada superficial variaram de 8 a 72 g kg⁻¹ (incluindo A2 e AB), com maior frequência de observações no intervalo de 20 a 30 g kg⁻¹. Mesmo com esses elevados teores de COT, aliados às condições climáticas da região que favorecem o acúmulo de C,

foram observados apenas cinco perfis com horizonte diagnóstico A húmico, entre os perfis analisados. Além desses, foram constatados ainda cinco perfis com A proeminente e dez com A moderado.

Esses resultados contrastam com os presentes na publicação: Solos do Estado de Santa Catarina (Potter et al., 2004), na qual foram descritos 73 perfis de solos minerais em todo o estado, tendo-se verificado que 32% apresentavam horizonte A húmico. Nessa publicação, foram descritos 19 perfis classificados como Cambissolos, avaliados em diferentes regiões do estado de SC, entre os quais seis apresentaram A húmico, quatro A proeminente, dois A chernozêmico e sete A moderado. Porém, entre esses Cambissolos, nove perfis encontravam-se abaixo de 500 m, em que há pouca possibilidade de formação do A húmico, e apenas oito perfis acima de 900 m, em condições climáticas mais similares a deste estudo. Portanto, a publicação demonstra grande número de perfis de solos com a presença de A húmico no estado de SC, em altitudes acima de 900 m (Potter et al., 2004), o que não foi observado no presente trabalho.

Essas diferenças podem estar relacionadas tanto à mudança nos critérios de classificação dos solos, no que se refere aos valores de COT e espessura de horizontes para classificação do horizonte A húmico; como às alterações no uso dos solos, que podem ter refletido nos teores de COT e na espessura do horizonte A. O estudo realizado por Potter et al. (2004) considerou como horizonte A húmico segmentos do perfil mais espessos e com maiores teores de MO, correspondentes ao “umbric epipedon” estabelecido pela Soil Taxonomy (USDA, 2014). O SiBCS (Santos et al., 2013a), no entanto, considera cor, espessura e teores de argila – além dos teores de COT – na determinação do horizonte diagnóstico superficial A húmico, conforme as alterações e critérios propostos por Carvalho et al. (2003). Essa maior exigência, em termos de critérios, pode ter dificultado o enquadramento como A húmico de alguns horizontes, nos perfis estudados.

Além disso, a substituição de ambientes de floresta por ambientes com outros usos, aliada às elevadas declividades e taxas de pluviosidade observadas nas áreas de estudo, remete à possibilidade de a redução na espessura do horizonte superficial ter sido decorrente do processo erosivo. Segundo Roose et al. (2006), as perdas de COT são maiores com o aumento da declividade. Os autores reportaram valores máximos

Tabela 2. Dados de cor, profundidade, teor de argila, COT, pH, Al, CTC e substâncias húmicas (HM, AF e AH) de Cambissolos localizados nas regiões de altitude de SC.

Perfil	Horizonte	Cor	Profundidade (cm) ⁽¹⁾	Argila ----- (g kg^{-1}) -----	COT	pH	Al ---- $(\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3})$ ----	CTC	Substâncias húmicas (g kg^{-1})		
									HM	AH	AF
1	A1	10YR 3/2	26/120+	296	20	4,2	7,0	28	9,91	7,61	6,96
	A2	10YR 3/2	19/120+	306	15	4,4	6,2	20	6,92	3,79	3,35
	AB	10YR 3/2	15/120+	385	11	4,6	5,1	17	6,26	1,76	2,34
2	A1	10YR 2/2	10/98+	468	72	4,8	3,7	21	33,25	12,53	12,21
	A2	10YR 2/2	25/98+	428	55	4,5	4,5	24	26,94	9,98	9,66
	AB	10YR 3/2	14/98+	436	48	4,7	4,1	16	25,44	9,28	8,96
3	A	10YR 3/3	19/100+	484	38	4,9	5,1	15	13,78	7,83	7,50
	AB	10YR 3/3	20/100+	439	28	4,7	5,3	17	12,55	6,60	5,90
4	A	7,5YR 3/2	18/64	200	22	4,4	2,2	12	8,79	4,12	7,12
	AB	10YR 3/3	30/64	250	17	4,7	5,6	22	7,25	3,11	5,58
5	A	7,5YR 3/3	20/101+	439	39	5,0	1,8	9	18,95	7,78	7,45
	AB	7,5YR 4/4	11/101+	473	35	5,0	4,3	7	16,72	7,66	7,00
6	A	10YR 3/4	20/117+	360	24	4,7	3,2	18	11,87	6,79	6,65
	AB	10YR 4/3	15/117+	450	14	4,5	4,1	33	7,11	3,78	3,31
7	A1	7,5YR 3/4	17/126+	453	11	5,1	1,6	15	4,02	2,55	2,72
	A2	7,5YR 3/4	17/126+	452	8	5,3	4,0	12	4,02	1,55	2,22
	AB	7,5YR 3/4	13/126+	475	10	5,2	4,3	22	5,23	1,52	2,32
8	A	10YR 2/2	7/76+	318	39	5,5	0,9	20	19,82	5,15	5,36
	AB	10YR 3/3	11/76+	401	24	5,0	1,3	15	14,02	5,95	5,71
9	A	10YR 2/2	19/117+	330	24	4,5	2,5	18	13,46	5,90	7,21
	AB	10YR 3/3	15/117+	360	28	4,7	2,9	16	13,08	6,15	5,71
10	A	10YR 2/2	17/115+	320	24	6,8	0,0	17	9,35	6,46	7,87
	AB	10YR 3/2	21/115+	390	23	4,8	4,1	14	9,35	4,12	4,89
11	A	10YR 3/4	13/112+	556	29	4,6	2,8	18	15,62	6,60	5,90
	AB	10YR 3/6	20/112+	543	25	4,9	3,6	10	11,41	5,88	5,18
12	A	10YR 3/4	10/130+	316	27	4,3	5,5	19	12,43	8,50	7,85
	AB	10YR 3/6	10/130+	414	23	4,5	6,3	13	14,02	5,27	5,00
13	A	10YR 2/2	12/65	310	22	4,1	1,4	34	11,59	6,77	7,28
	AB	10YR 3/2	10/65	380	16	4,5	1,8	40	8,23	4,58	3,72
14	A	7,5YR 3/4	12/51	323	33	5,3	2,6	19	17,20	5,36	5,15
	AB	7,5YR 3/4	8/51	378	28	5,4	3,3	13	20,19	5,15	4,89
15	A	7,5YR 3/4	10/107+	427	24	5,0	0,6	17	10,35	5,70	5,38
	AB	7,5YR 4/4	13/107+	480	20	5,1	0,5	19	9,74	5,78	5,45
16	A	10YR 3/4	11/77	470	27	5,4	0,9	23	14,96	9,20	8,55
	AB	7,5YR 3/4	9/77	538	27	5,3	1,3	17	10,47	8,57	7,94
17	A1	10YR 3/2	10/90	303	30	5,1	0,6	15	13,18	8,50	7,85
	A2	7,5YR 4/3	21/90	390	20	5,0	2,5	10	10,35	3,78	5,89
	AB	7,5YR 3/2	11/90	480	22	4,8	3,0	10	9,43	6,15	7,12
18	A	7,5YR 3/2	10/90+	400	28	5,5	0,0	10	8,41	8,90	8,24
	AB	7,5YR 3/3	11/90+	400	29	5,1	1,6	9	10,63	5,82	7,93
19	A	10YR 2/2	12/118+	230	25	6,5	0,0	10	10,47	8,57	7,94
	AB	10YR 3/4	22/118+	320	19	5,1	0,5	11	8,08	5,55	5,65
20	A	10YR 3/3	10/103+	457	21	5,2	0,3	22	14,02	5,27	7,62
	AB	10YR 3/4	21/103+	475	22	5,0	1,6	16	8,79	4,12	7,12
21	A	10YR 3/3	13/110+	417	24	5,1	1,2	17	11,22	6,46	6,23
	AB	10YR 3/4	16/110+	458	23	5,1	2,1	13	10,00	5,53	7,14
22	A1	10YR 2/2	14/90+	451	35	5,5	0,6	14	18,97	5,93	7,49
	A2	10YR 3/4	18/90+	498	29	5,9	0,4	15	9,35	9,32	8,67
23	A1	10YR 3/2	7/97+	543	31	5,5	1,7	19	23,09	5,13	4,12
	A2	10YR 3/3	10/97+	514	27	5,4	1,9	14	18,32	6,46	6,74
24	A	5YR 4/4	12/75+	422	27	4,5	0,6	17	11,06	6,30	5,98
	AB	5YR 4/6	13/75+	528	14	4,4	0,3	13	5,79	4,35	4,03

⁽¹⁾Profundidade horizonte/profundidade do perfil

de perda de 360, 2.000, 2.300 e 3.000 kg ha⁻¹ por ano de C, para as declividades 0–5, 5–15, 15–30 e 30–65%, respectivamente. Dessa forma, entre os perfis avaliados, seis (perfis 8, 12, 15, 16, 18, 23) não atenderam à condição de espessura do horizonte superficial, estabelecida pelo SiBCS, para seu enquadramento como A húmico, com espessuras inferiores a 25 cm em perfis com profundidade superior a 75 cm.

No estado de SC, as formas acidentadas de relevo prevalecem sobre as demais, e desempenham, portanto, papel decisivo na formação dos solos, com forte ocorrência de solos rasos a medianamente profundos. Assim, o horizonte superficial normalmente não possui espessura suficiente para ser classificado como A húmico. Dessa forma, constata-se que as alterações antrópicas

muitas vezes podem influenciar a classificação dos horizontes superficiais. Hartemink et al. (2014) afirmam que a diminuição nos teores de COT em solos agrícolas degradados muitas vezes dificulta a classificação dos horizontes diagnósticos superficiais. Segundo os autores, muitos solos com horizonte diagnóstico “mollic”, após a redução nos teores de COT, satisfariam apenas aos critérios para “epipedon ochric”. Os autores reforçam, ainda, a necessidade de critérios mais rígidos para a classificação dos horizontes “mollic”, como a inclusão do horizonte transicional, para solos agrícolas. Essas alterações podem fornecer informações mais úteis para levantamentos de carbono regional e global.

Quando os atributos do solo foram submetidos à estatística multivariada de similaridade (Figura 2),

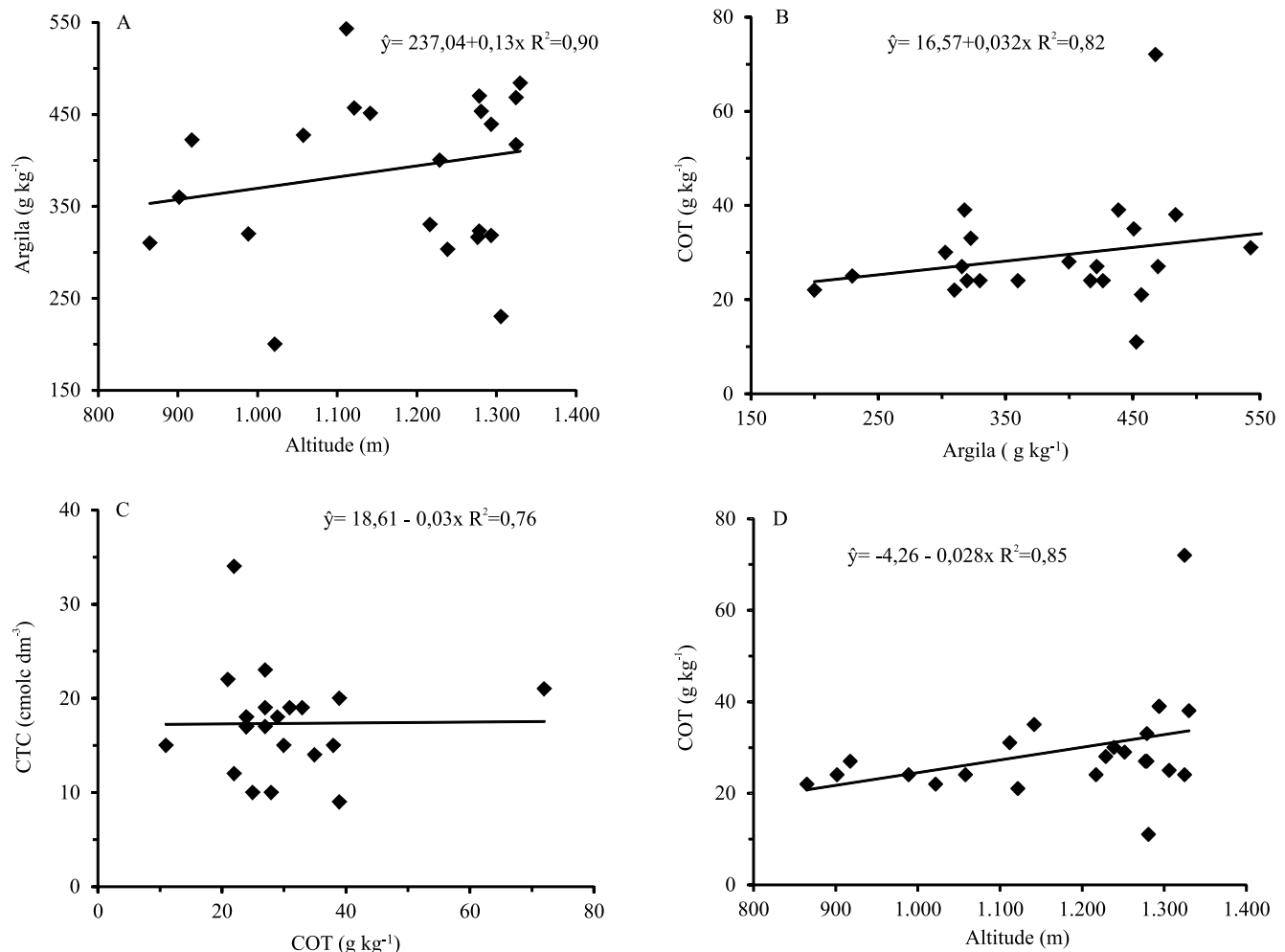


Figura 1. Relações entre: A, altitude e teor de argila do solo; B, COT e teor de argila; C, COT e CTC; e D, altitude e COT, em horizontes superficiais de 24 Cambissolos de regiões altomontanas do estado de Santa Catarina.

e avaliados na distância euclidiana 5, verificou-se a formação de cinco grupos. Os perfis 2, 3 e 5, com A húmico, foram similares entre si, mas apresentaram menor grau de similaridade com o perfil 1 e uma grande distância do perfil 4, que também possuía A húmico. O perfil 1 apresentou maior similaridade com os perfis 19, 18, 17, 9, 8, 14, 12, nessa ordem, e formou, juntamente com eles, o primeiro grupo. Os perfis 2, 3 e 5, em conjunto com os perfis 7, 16, 21 e 11, formaram o segundo grupo. O perfil 4 ficou individualizado, tendo-se distinguido dos demais na distância euclidiana 5. Esse resultado se deveu, principalmente, aos seus baixos teores de argila.

Conforme os resultados da análise multivariada, muitos solos classificados com A moderado apresentaram similaridade com A húmico, e vice-versa. Em estudo com horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais, Fontana et al. (2010)

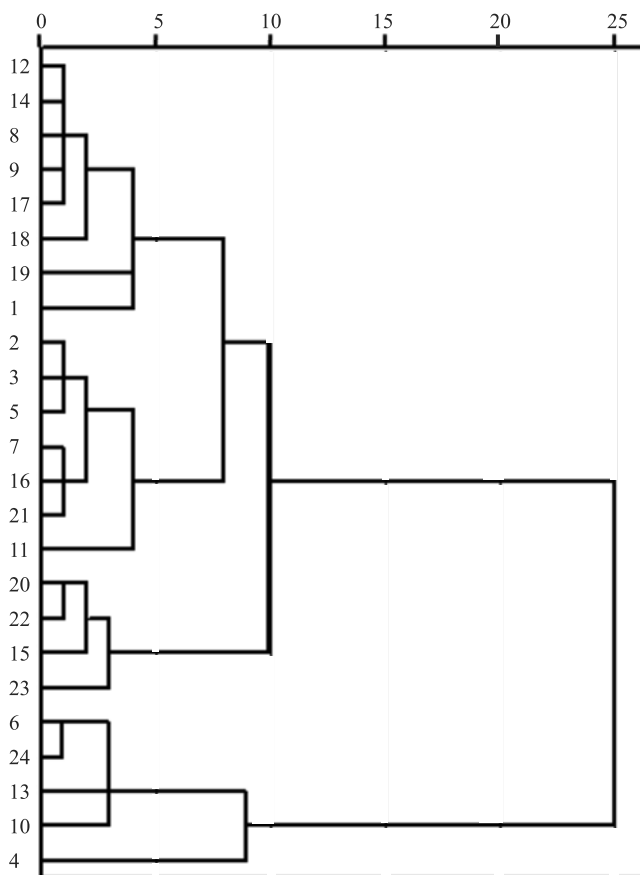


Figura 2. Dendrograma formado com base na altitude, profundidade, cor, teor de argila, COT, pH, Al, CTC, SHs dos horizontes diagnósticos superficiais de Cambissolos de regiões altomontanas do estado de Santa Catarina.

observaram predomínio da HM nos horizontes A húmico. No presente estudo, a HM também teve a maior proporção entre as SHs (Tabela 2), o que reforça a possibilidade de que, nesses solos, muitos horizontes classificados como A moderado possuam características de A húmico.

Quando apenas atributos utilizados para a classificação de A húmico foram considerados, tais como cor, espessura, teor de argila e teor de COT, as similaridades entre os horizontes classificados como este foram muito pequenas. Foram formados quatro grupos na distância 5. No grupo 1, encontraram-se os perfis 1 e 4, que apresentaram, porém, pouca similaridade. O perfil 1 possui maior similaridade com os perfis 10 e 9, e o perfil 4 com o 18 e 17, nessa ordem. No grupo 2, encontrou-se o perfil 5, que apresentou similaridade com perfil 19. No terceiro grupo, ocorre o perfil 3, similar aos perfis 7 e 22, e, por último, o perfil 2, que se diferenciou dos demais, apresentando similaridade somente na distância 25.

A análise multivariada revelou que os perfis classificados como A húmico, em muitos casos, são similares, no conjunto de atributos físicos e químicos, a outros horizontes diagnósticos classificados como A proeminente e A moderado. Esse padrão também foi verificado para perfis classificados como A húmico que algumas vezes não apresentaram similaridade entre si.

Assim, uma das maneiras de minimizar o problema de classificação desses Cambissolos seria a utilização de traçadores isotópicos de carbono, que no Brasil tem sido utilizada nos estudos de ciclagem da MOS em médio prazo, em que florestas (ciclo fotossintético C_3) têm sido substituídas por culturas com ciclo fotossintético C_4 (Jantalia et al., 2007; Pinheiro et al., 2010; Costa Junior et al., 2011). O uso dessa técnica permite verificar se determinado perfil de solo foi submetido à alteração antrópica, além de dar uma noção temporal dessa interferência (Trumbore & Camargo, 2009).

Na análise isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ dos Cambissolos Húmicos (perfis 1, 2, 3, 4 e 5), apresentada na Figura 3, verifica-se uma pequena variação na assinatura isotópica, indício de que houve pequena interferência de ações antrópicas nesses ambientes, o que pode ter favorecido o acúmulo de COT e, conseqüentemente, a maior espessura desses horizontes superficiais. Nos perfis 1 a 4, observou-se predominância de carbono

proveniente de plantas C_3 , enquanto no perfil 5 houve enriquecimento de carbono oriundo de gramíneas, inclusive em profundidade, o que demonstra que o uso contínuo pode ter favorecido a estabilidade da MO.

Já nos perfis 8, 12, 15, 16, 18, 23, classificados como de A moderado e com menor espessura, observou-se um padrão diferente do verificado nos perfis com A húmico (Figura 4). Nos perfis 12, 15 e 23, constatou-se enriquecimento de carbono oriundo de plantas C_3 em superfície, o que está de acordo com uso atual sob floresta; entretanto, em profundidade, observou-se uma mistura de carbono de plantas C_3 e C_4 , com predomínio de C_3 , indício ainda de que as mudanças de uso ocorreram em mais de um momento. Os perfis 8, 16 e 18 apresentaram uma mistura de carbono oriundo de plantas C_3 e C_4 já na camada superficial, com predomínio do C proveniente de gramíneas, o que foi intensificado na profundidade de 50 cm, na qual quase totalidade do C foi proveniente de C_4 . Nas camadas mais profundas, observou-se, novamente, a origem

diferenciada do carbono (C_3 e C_4), com prevalência do C proveniente de gramíneas.

Porém, para alguns perfis (9, 10, 17, 19 e 22), a distância para classificá-los como A húmico foi pequena, por exemplo: para o perfil 17, o aumento em 1 cm de espessura do horizonte A o incluiria como húmico. Nesse grupo de perfis, também foram observadas alterações de uso do solo em função do tempo, e a composição isotópica constituiu-se de uma mistura de carbono de plantas C_3 e C_4 , em que as C_4 prevaleceram (Figura 5).

Os sistemas de classificação de solo não são estáticos, e exigem mudanças à medida que o conhecimento se expande e surjam novos fatos, tecnologias, métodos e equipamentos. Dessa forma, as informações obtidas pela abundância isotópica de ^{13}C podem ser utilizadas em estudos pedológicos como atributo complementar, no sentido de contribuir para a evolução do SiBCS. Os resultados do presente trabalho destacam as limitações da classificação dos horizontes desses solos com os critérios atualmente utilizados pelo SiBCS, o que

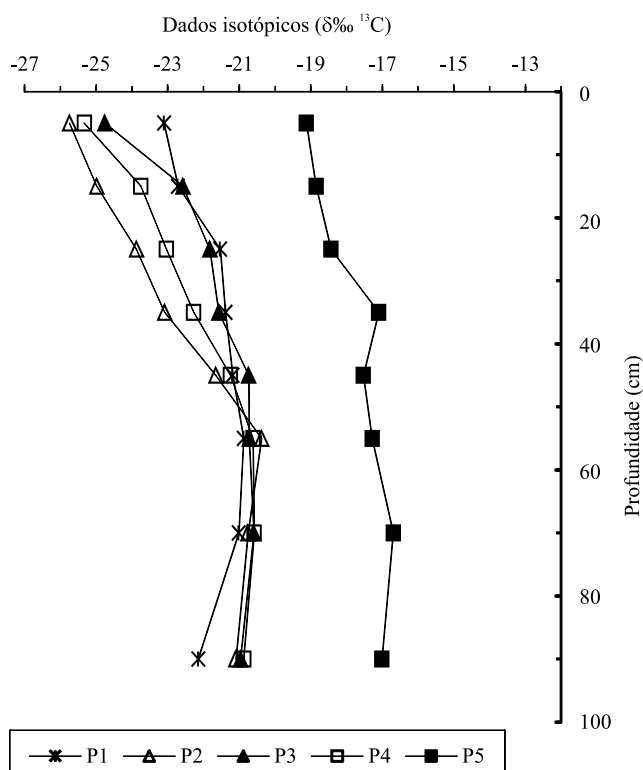


Figura 3. Abundância natural de ^{13}C no solo em perfis de Cambissolo com A húmico (perfis 1, 2, 3, 4 e 5), em regiões altomontanas do estado de Santa Catarina.

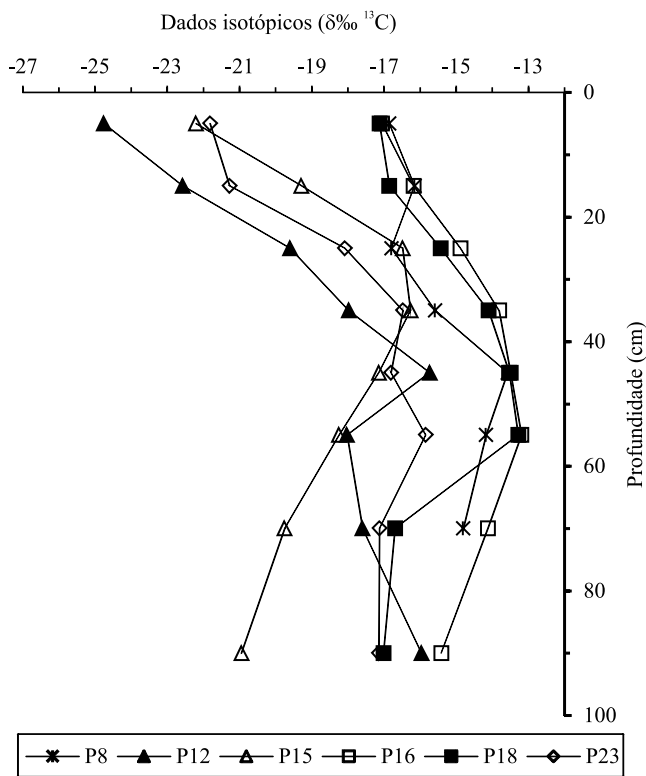


Figura 4. Abundância natural de ^{13}C no solo em perfis de Cambissolo com A moderado (perfis 8, 12, 15, 16, 18 e 23), em regiões altomontanas do estado de Santa Catarina.

pode ser verificado nos perfis que foram submetidos a alterações antrópicas, identificadas pela análise de $\delta^{13}\text{C}$. Dessa forma, a constatação de ação antrópica, com o uso dessa técnica, indica a necessidade de uma atenção especial na avaliação da possibilidade de flexibilização do critério espessura do solo.

Quando há alteração no uso do solo, detectada por meio de $\delta^{13}\text{C}$, sugere-se que o atributo profundidade seja desconsiderado para fins de classificação de solos que apresentem: textura argilosa a muito argilosa, declividade superior a 8% – em que o relevo promove grande remoção de material, com intenso rejuvenescimento que resulta em solos rasos e pouco profundos –, e com tores de COT superiores a 3%, definidos como altos pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (Manual..., 2004). Esse procedimento poderia minimizar problemas na classificação, especialmente no caso de solos com tores de COT superiores a 3%. Por exemplo, os perfis 8, 14, 17, 22 e 23 foram classificados como de Cambissolos Háplicos; entretanto, essa classificação não fornece informações essenciais para o manejo e uso agrícola dos solos dos quais seriam representativos,

assim como não está relacionada a características que melhor expressem a sua gênese.

Conclusões

1. Os elevados tores COT do solo não foram suficientes para enquadrar os horizontes superficiais como A húmico, principalmente em razão de sua pequena espessura.

2. A análise de agrupamentos por similaridade não distingue os horizontes A húmico dos demais.

3. Solos classificados como A húmico mostram pouca alteração na assinatura isotópica, o que indica manutenção da vegetação; enquanto os classificados como A moderado revelam alternância entre cultivos de plantas C_3 e C_4 .

4. A abundância natural de ^{13}C , por ser pertinente para avaliação das alterações de uso ocorridas no solo, pode contribuir como atributo complementar na classificação de Cambissolos localizados em ambientes altomontanos de Santa Catarina.

Referências

BENITES, V.M.; MADARI, B.; MACHADO, P.L.O. de A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 7p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16).

CARVALHO, A.P.; SANTOS, H.G. dos; BOGNOLA, I.A.; COELHO, M.R.; OLIVEIRA, J.B. de; LUMBRERAS, J.F.; ANJOS, L.H.C. dos; JACOMINE, P.K.T.; NAIME, U.J.; OLIVEIRA, V.A. de. **Proposta de definição e identificação de horizonte A húmico**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 3p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 18).

CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M. de C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P.B. de; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1241-1252, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000400017.

DORTZBACH, D.; PEREIRA, M.G.; BLAINSKI, E.; GONZÁLEZ, A.P. Estoque de C e abundância natural de ^{13}C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1643-1660, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140531.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World reference base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for**

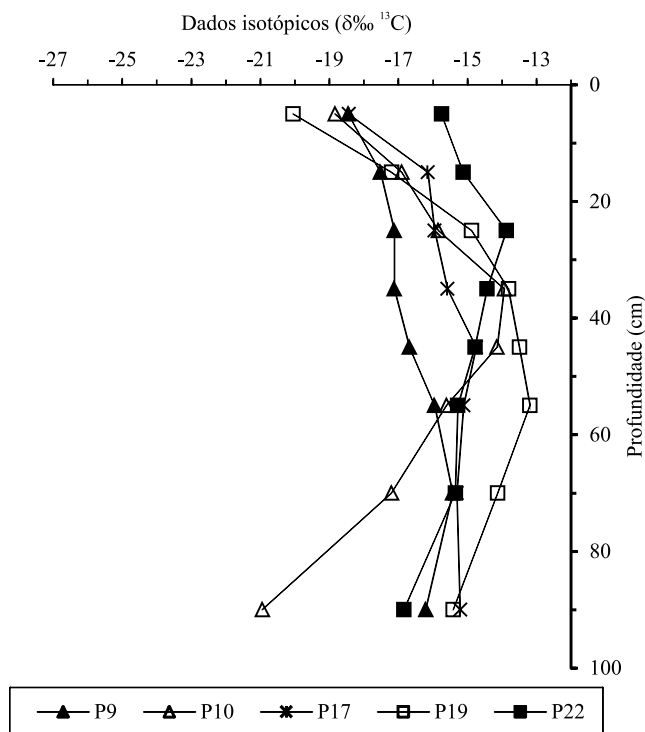


Figura 5. Abundância natural de ^{13}C no solo em Cambissolos (perfis 9, 10, 17, 19 e 22), em regiões altomontanas do estado de Santa Catarina.

- soil maps: update 2015. Rome: FAO, 2015. 182p. (FAO. World Soil Resources Report 106).
- FONTANA, A.; BRITO, R.J. de; PEREIRA, M.G.; LOSS, A.; BENITES, V. de M. Caracterização de substâncias húmicas da camada superficial do solo sob diferentes coberturas vegetais. *Magistra*, v.22, p.49-56, 2010.
- FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. dos; BENITES, V. de M. Classificação de horizontes diagnósticos em níveis hierárquicos inferiores com base nas frações húmicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.313-324, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200003.
- HARTEMINK, A.E.; GERZABEK, M.H.; LAL, R.; MCSWEENEY, K. Soil carbon research priorities. In: HARTEMINK, A.E.; MCSWEENEY, K. (Ed.). *Soil Carbon*. Dordrecht: Springer, 2014. p.483-490. DOI: 10.1007/978-3-319-04084-4_48.
- HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. Climate change and agroecosystems: Key issues. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. (Ed.). *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: impacts, adaptation, and mitigation*. London: Imperial College Press, 2011. p.1-5. (ICP Series on Climate change impacts, adaptation, and mitigation, v.1).
- JANTALIA, C.P.; RESCK, D.V.S.; ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Tillage effect on C stocks of a clayey oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, v.95, p.97-109, 2007. DOI: 10.1016/j.still.2006.11.005.
- MANUAL de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400p.
- MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M.U.F.; MCMURTRIE, R.E.; MCGILVRAY, H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, v.8, p.105-123, 2002. DOI: 10.1046/j.1354-1013.2001.00459.x.
- PINHEIRO, E.F.M.; LIMA, E.; CEDDIA, M.B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant and Soil*, v.333, p.71-80, 2010. DOI: 10.1007/s11104-010-0320-7.
- POTTER, R.O.; CARVALHO, A.P. de; FLORES, C.A.; BOGNOLO, I. *Solos do Estado de Santa Catarina*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 726p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 46).
- ROOSE, E.J.; LAL, R.; FELLER, C.; BARTHÈS, B.; STEWART, B.A. (Ed.). *Soil erosion and carbon dynamics*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 378p.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística. *Atlas de Santa Catarina*. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173p.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013a. 353p.
- SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos; SHIMIZU, S.H. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6.ed. rev. e ampl. Viçosa: SBCS, 2013b. 100p.
- SILVA, L.B. da; DICK, D.P.; INDA JUNIOR, A.V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. *Ciência Rural*, v.38, p.1167-1171, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000400044.
- TRUMBORE, S.; CAMARGO, P.B. de. Soil carbon dynamics. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P.S. (Ed.). *Amazonia and Global Change*. Washington: American Geophysical Union, 2009. p.451-462. DOI: 10.1029/2009GM000882.
- USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. Washington: USDA, 2014. 360p.
- VALLADARES, G.S. Proposta para classificação de solos com horizonte b textural ou nítico da região do Vale dos Vinhedos. *Revista Científica Rural*, v.12, p.27-35, 2007.

Recebido em 7 de agosto de 2015 e aprovado em 25 de abril de 2016