

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM
DIFERENTES FORMAS DO RELEVO**

Vicente Sanchez Neto

Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM
DIFERENTES FORMAS DO RELEVO**

Vicente Sanchez Neto

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2015

Sanchez Neto, Vicente
S211p Produção e qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas
do relevo / Vicente Sanchez Neto. -- Jaboticabal, 2015
xi, 41 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015

Orientador: José Marques Júnior

Coorientador: Diego Silva Siqueira

Banca examinadora: Zigomar Menezes de Souza, Odair
Aparecido Fernandes

Bibliografia

1. Geomorfologia. 2. Mapeamento detalhado. 3. Suscetibilidade
magnética. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.4:528.7

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: PRODUÇÃO E QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES FORMAS DO RELEVO

AUTOR: VICENTE SANCHEZ NETO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO) , pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ODAIR APARECIDO FERNANDES

Departamento de Fitossanidade / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP

Data da realização: 26 de junho de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

VICENTE SANCHEZ NETO – Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade de São Paulo (1997). Atualmente é Engenheiro Agrônomo na Usina São Domingos atuando na área de planejamento e otimização da lavoura. Tem experiência na área de produção de cana-de-açúcar, laranja e café, atuando principalmente nos seguintes temas: gerenciamento, custo, otimização e modelagem.

“Seja qual for seu sonho, comece.
Ousadia tem genialidade, poder e magia”.

(Johann Goethe)

DEDICO

A toda minha família em especial aos meus pais e irmãos, por sempre me apoiarem: Evandro, Eduarda, Rodrigo, Gabriela, Flavia e Tiago.

OFEREÇO

A minha esposa e filhas, Natália, Maria Beatriz e Maria Teresa.

AGRADECIMENTOS

A todos os amigos dentro e fora da universidade, especialmente aos amigos do Grupo de Pesquisa CSME.

Ao Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior e ao Ms. Vinicius Vasconcelos da Universidade de Brasília (UNB), ao Prof. Dr. Éder de Souza da Embrapa Cerrados pelo apoio na análise da assinatura geomorfométrica e interpretação dos resultados.

Ao Prof. Dr. José Marques Júnior pela orientação e inspiração.

Ao Dr. Diego Silva Siqueira pela participação ativa nas discussões sobre os itens aqui debatidos e pelo trabalho de coorientação.

Aos funcionários da Usina São Domingos, Marcelo e Eder pelo suporte.

À Usina São Domingos pela concessão da área de estudos.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|---------------|
| RESUMO | x |
| ABSTRACT | xi |
| CAPÍTULO 1 – Considerações gerais | 1 |
| 1.1 Introdução..... | 1 |
| 1.2 Revisão de Literatura | 2 |
| 1.2.1 Relevância econômica e científica do Planalto Ocidental Paulista e a nova nomenclatura da Bacia Bauru | 2 |
| 1.2.2 A evolução de ferramentas para a caracterização das formas do relevo e sua influência no levantamento de solos e caracterização da variabilidade de seus atributos | 7 |
| 1.3 Referências | 14 |
| CAPÍTULO 2 – Produção e qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas do relevo | 20 |
| 2.1 Introdução..... | 20 |
| 2.2 Material e Métodos | 22 |
| 2.2.1 Localização da área e planejamento amostral | 22 |
| 2.2.2 Caracterização das formas do relevo | 25 |
| 2.2.3 Caracterização do solo | 25 |
| 2.2.4 Caracterização da planta | 26 |
| 2.2.5 Análise dos dados | 26 |
| 2.3 Resultados e Discussão | 27 |
| 2.4 Conclusão..... | 36 |
| 2.5 Referências | 36 |

PRODUÇÃO E QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES FORMAS DO RELEVO

RESUMO – A falta de informações detalhadas sobre os recursos do solo é um dos fatores limitantes para o crescimento de diferentes áreas do conhecimento e de setores produtivos. As formas do relevo, quando caracterizadas corretamente, podem ser indicadores dos processos pedogenéticos que influenciam a variabilidade dos atributos do solo e a resposta das culturas agrícolas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo identificar áreas com diferentes potenciais produtivos e de qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas do relevo, caracterizadas por assinatura geomorfométrica, suscetibilidade magnética e espessura dos horizontes A+E em Argissolos originados de Arenito com baixo teor de ferro total (<4% Fe₂O₃). Com base na caracterização de uma área-piloto de 200 ha, sendo 100 ha na forma convexa e 100 ha na forma côncava, foi definida ao seu redor quadrícula de 100.000 ha. Foram escolhidas aleatoriamente nesta quadrícula 15 formas côncavas e 15 convexas, com geologia, solo e geomorfologia similares à área-controle. Foram coletadas 121 amostras, na profundidade de 0,0-0,2 m nas formas côncava e convexa da área-piloto e 3 amostras em cada forma, na profundidade de 0,0-0,2 m nas formas da quadrícula. Foram determinadas a suscetibilidade magnética (SM) em baixa frequência e a espessura dos horizontes A+E. Também foi avaliado o histórico de 7 anos (2008 a 2014) da produção de cana-de-açúcar, expresso em toneladas de colmos ha⁻¹ (TCH) e qualidade da matéria-prima, expresso em Pol. Foram calculados médias e desvio-padrão para os atributos do solo e histórico de produtividade e de qualidade da cana-de-açúcar. Foram realizados o Teste de Tukey (5%) e a análise de dispersão, comparando os valores de SM da área-piloto com os valores de SM dos 100.000 hectares. Os resultados mostram que a SM e a assinatura geomorfométrica foram eficazes na identificação de áreas com potencial para o cultivo da cana-de-açúcar e podem auxiliar no gerenciamento da cultura, visando à obtenção de áreas mais homogêneas para uma padronização da qualidade da matéria-prima. Mesmo com interferência de outras fontes de variação, como ataques de pragas e de plantas daninhas, por exemplo, o modelo de resposta da cana-de-açúcar em função das formas do relevo apresentou, em média, exatidão de 55% para produtividade (TCH) e 64% para Pol em relação ao controle da área-piloto em Argissolo do Planalto Ocidental Paulista.

Palavras-chave: geomorfologia, mapeamento detalhado, suscetibilidade magnética

PRODUCTION AND QUALITY OF SUGARCANE IN DIFFERENT LANDFORMS

ABSTRACT – The lack of detailed information on soil resources is a limiting factor for the growth of different areas of knowledge and productive sectors. The landforms when properly characterized may be indicators of pedogenetic processes that influence the variability of soil properties and the response of agricultural crops. In this context, this work aims to identify areas with different production potential and quality of sugarcane in different landforms characterized by morphometric signature, magnetic susceptibility and thickness of horizons A+E in Hapludalf originated Sandstone. Based on the characterization of a pilot area of 200 ha, 100 ha convex shape and 100 ha in the summons form, was set greater area of 100,000 ha. Were randomly chosen on this greater area 15 concave and convex forms, with same geology, geomorphology and soil the control area. Were determined magnetic susceptibility (MS) in low frequency and thickness of horizons A+E. We also assessed the history of seven years (2008 to 2014) the production of sugarcane in tonnes of stems ha⁻¹ (TCH) and quality of raw material, expressed in Pol. The results show that MS and morphometric signature were effective in identifying areas with potential for cultivation of sugarcane and may help manage the a more homogeneous areas for standardization of quality of raw material. Even with interference from other sources of variability such as attack by pests and weeds, for example, the response model of sugarcane as a function of landforms has accuracy of 55% for yield (TCH) and 64% Pol in compared the pilot area.

Keywords: morphometry, detailed mapping, magnetic susceptibility

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

O trabalho trata de um problema relacionado à carência de protocolos para identificação de áreas com diferentes potenciais de uso e de ocupação do solo em nível detalhado. Em outros países, informações detalhadas do solo são utilizadas para balizar o desenvolvimento urbano e direcionar o planejamento estratégico, tático e operacional das atividades agrícolas. Desde a década de 1990, vários trabalhos têm sido feitos no Planalto Ocidental Paulista, demonstrando a viabilidade da utilização de conceitos da geomorfologia na identificação de áreas com diferentes potenciais agrícolas para culturas como cana-de-açúcar, café e laranja. Estas informações são úteis tanto para o mapeamento convencional de solos, quanto para o mapeamento digital de solos e agricultura de precisão, pois todas estas áreas são influenciadas pela variabilidade espacial dos atributos do solo.

Fundamentado em experiências anteriores da relação de causa e efeito entre geologia, geomorfologia, solo e resposta de culturas agrícolas, a hipótese do trabalho é que as formas côncavas e convexas podem ser consideradas como unidade de mapeamento do solo com controle da variabilidade no compartimento geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista, que representa aproximadamente 9,5 milhões de hectares (38% da área total do Estado de São Paulo).

O resultado deste trabalho consiste na proposta de um protocolo de mapeamento de uso e de ocupação do solo para o setor sucroenergético baseado na pré-identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualitativos da cana-de-açúcar em Argissolos desenvolvidos de Arenito. Os resultados poderão ser utilizados por outras áreas para balizar o planejamento sustentável de uso e de ocupação do solo, como, por exemplo, pré-identificação de locais com diferentes capacidades de suporte de descarte de vinhaça, potencial de perda do solo por erosão hídrica, manejo da palha da cana-de-açúcar em locais mais suscetíveis à erosão, ecofisiologia de paisagem no manejo integrado de pragas, dentre outras aplicações.

O desafio científico do trabalho está relacionado à adaptação e aplicação de ferramenta em mapeamento detalhado do solo, inicialmente desenvolvida para geomorfologia, demonstrando que as formas côncavas e convexas podem ser utilizadas para auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento com controle da variabilidade. O desafio tecnológico da proposta está relacionado com a aplicação do método de identificação da assinatura geomorfométrica e da suscetibilidade magnética do solo para viabilizar o delineamento destas áreas com diferentes potenciais agrícolas em áreas comerciais.

O objetivo foi identificar áreas com diferentes potenciais produtivos e de qualidade da cana-de-açúcar, utilizando de forma integrada diferentes formas do relevo caracterizadas por assinatura geomorfométrica, suscetibilidade magnética e espessura dos horizontes A+E em Argissolos originados de arenitos com baixo teor de ferro total ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 40 \text{ g kg}^{-1}$).

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Relevância econômica e científica do Planalto Ocidental Paulista e a nova nomenclatura da Bacia Bauru

O Planalto Ocidental Paulista inclui os planaltos das regiões de Marília, Catanduva e Monte Alto. Caracteriza-se como importante área de ocupação econômica do Estado de São Paulo. É uma das principais áreas de cultivo de citros do País, responsável por grande parte da produção nacional, além de participar com destaque na produção de álcool e açúcar do Estado. Ocupa aproximadamente metade da extensão territorial do Estado de São Paulo (aproximadamente 9,5 milhões de hectares) e abrange grande parte do Aquífero Guarani. O compartimento geológico mais expressivo é o Arenito do Grupo Bauru. No Planalto Ocidental Paulista, o fator geológico condicionou a forma da paisagem atual (QUEIROZ NETO, 2001) e coordena as alterações futuras.

A importância científica do Planalto Ocidental está relacionada com os estudos de causa e efeito entre substratos geológicos e a homogeneidade dos solos,

como de Lepsch et al. (1977) e Marques Júnior e Lepsch (2001). Estes trabalhos foram pioneiros no Brasil, seguindo a proposta de Daniels, Gamble e Cady (1971), que sugeria interpretar a geometria das vertentes da paisagem como uma sucessão de segmentos, cada qual apresentando solo específico, cujos recortes indicariam uma sucessão cronológica de fases de evolução dos solos. Os resultados de Lepsch et al. (1977) e Marques Júnior e Lepsch (2001) balizaram os primeiros trabalhos no Planalto Ocidental, relacionando variabilidade espacial dos atributos do solo, reposta das culturas agrícolas e formas do relevo, utilizando o modelo de Troeh (1965), descritos em Barbieri et al. (2009), Sanchez et al. (2009, 2012) e Camargo et al. (2010, 2013). A experiência adquirida nestes trabalhos e em outros projetos do Grupo CSME em auxílios e bolsas financiados pela FAPESP <<http://bv.fapesp.br/pt/pesquisador/3532/jose-marques-junior/>> indica que, para cada parte do Estado, é necessária uma abordagem diferente quanto ao tipo de modelo de paisagem utilizado para a caracterização da variabilidade em escalas detalhadas (Figura 1).

Este tipo de abordagem Estadual é inédito no Brasil e já vem sendo utilizado em outros países para delinear macrorregiões com base na geomorfologia (JASIEWICZ; STEPINSKI, 2013). A comparação das formas do terreno e suas intensidades com a diversidade geológica é de suma importância para se compreender as relações de causa e efeito em diferentes escalas de trabalho.

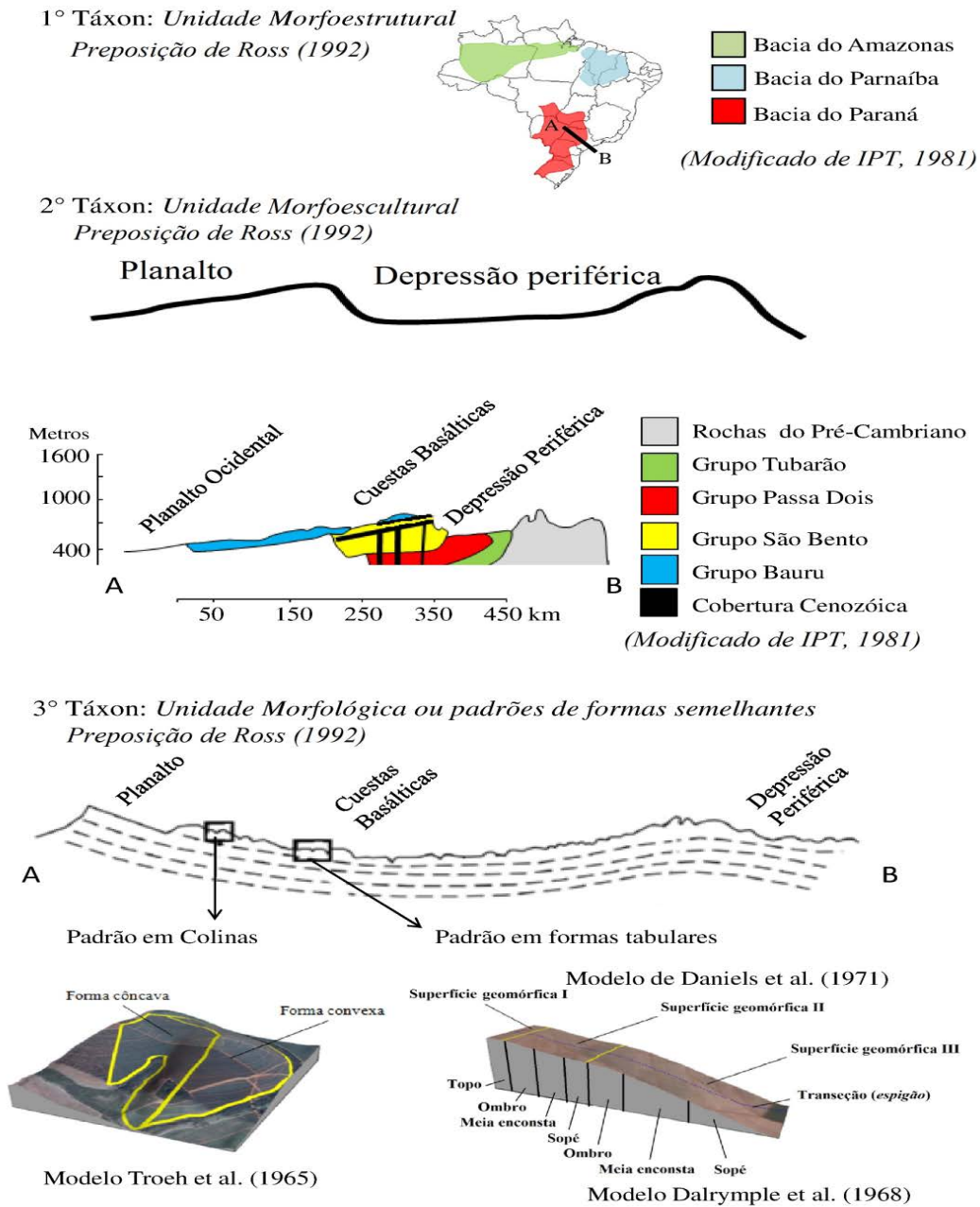


Figura 1. Comparação de diferentes modelos de paisagem que podem ser utilizados como ferramenta de campo para auxiliar no delineamento de unidades com diferentes padrões de variabilidade (Extraído de SIQUEIRA, 2013).

Comparando-se o corte do mapa geológico (2° Táxon na Figura 1) com o mapa de unidade morfológica (3° Táxon na Figura 1), nota-se que as formas do relevo seguem um padrão imposto pelo controle estrutural do material de origem (*upscale*). Portanto, pode-se inferir que o processo de dissecação das formas do relevo, responsável por moldar a paisagem e por influência na variabilidade dos atributos do solo, está diretamente associado ao controle litoestrutural. Assim, a

variabilidade dos atributos do solo, e por consequência das culturas agrícolas, está diretamente relacionada com a maneira que estes compartimentos interagem.

Com o intuito de aumentar o entendimento da interação destes compartimentos, nos últimos 20 anos, tem-se intensificado o detalhamento geológico no domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista. A proposta de nomenclatura da Bacia Bauru, datada de 1998, apresenta características únicas de formação. Compreender essa evolução é de suma importância para a elaboração dos mapas de variabilidade e delineamento de áreas com maior controle da variabilidade (mais homogêneas), pois grande parte da variabilidade dos atributos dos solos da Bacia Bauru foi herdada da variabilidade de deposição das rochas sedimentares.

A formação da Bacia Bauru ocorreu em duas grandes fases principais. A primeira em condições essencialmente desérticas, e a segunda com maior presença de água, ainda que em clima semiárido. Formada no Cretáceo Superior (88 a 65 milhões anos) por uma supersequência arenosa com aproximadamente 480 metros de espessura sob clima semiárido a desértico, a formação da Bacia Bauru pode ser explicada em 5 etapas (Figura 2). Na primeira etapa, os sedimentos das bordas norte e leste foram carreados para o interior da Bacia, inicialmente pelo vento, formando extensa manta de lençóis de areia e loesse (sedimento fértil de coloração amarela). A segunda etapa é caracterizada pela elevação das bordas leste e norte, provocando o avanço de leques aluviais para o interior da Bacia e a instalação de sistemas fluviais entrelaçados. Na terceira etapa, os fluxos fluviais da parte nordeste alcançaram o interior da bacia em sistemas entrelaçados arenosos. À medida que adentravam a Bacia, a paisagem ia tornando-se cada vez mais plana, e os sedimentos transportados, cada vez mais finos. Estes rios serpenteavam em extensas planícies aluviais e lagoas residuais formadas. Todos esses processos de transporte altamente seletivos originaram diferentes tipos de áreas deposicionais (Etapas 4a e 4b). Devido às características dos sedimentos depositados, estas áreas possuíam diferentes potenciais de resistência ao intemperismo. As áreas menos resistentes foram então erodidas, promovendo a inversão do relevo e o encaixe do sistema fluvial atual (Etapa 5) (FERNANDES; COIMBRA, 1994, 2000; FERNANDES, 1998).

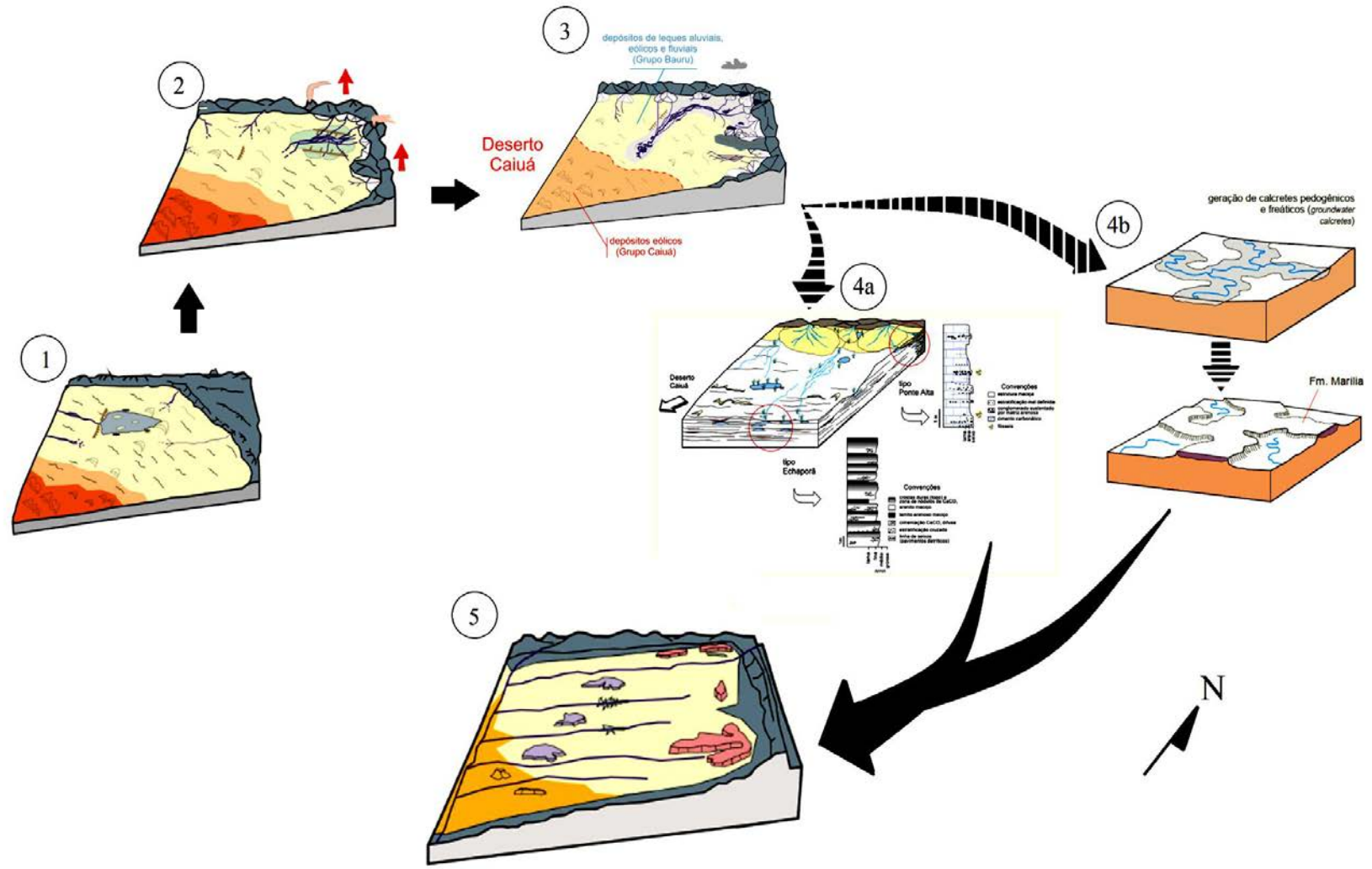


Figura 2. Evolução da Bacia Bauru (Modificado de FERNANDES, 1998).

A quantificação morfológica da superfície terrestre é essencial ao conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na paisagem. A forma do terreno influencia o fluxo d'água, o transporte de sedimentos e poluentes, a natureza e a distribuição de habitats de plantas e animais, além de ser uma expressão dos processos geológicos e do intemperismo (BLASZCZYNSKI, 1997).

1.2.2 A evolução de ferramentas para a caracterização das formas do relevo e sua influência no levantamento de solos e na caracterização da variabilidade de seus atributos

O foco de muitos trabalhos em ciência do solo tem sido compreender a associação dos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo com covariáveis ambientais, como a vegetação, o material de origem e a topografia (MOORE et al., 1993; BURROUGH, 1993; WILDING et al., 1994; COOK; CORNER, 1996; ZHU et al., 1997; McBRATNEY et al., 2000). Esta abordagem, frequentemente citada como relação solo-paisagem, foi iniciada pela demanda por informações mais precisas sobre a distribuição espacial de solos para modelagem ambiental detalhada e definição de áreas específicas de manejo (McBRATNEY et al., 2000). Na abordagem da relação solo-paisagem, é o corpo natural solo que varia com a expressão do relevo (HUDSON, 1992).

Segundo USDA/NRCS (2002), o que é mapeado no campo é o corpo natural solo. O USDA-NRCS recomenda que, nos trabalhos de mapeamento, os corpos naturais de solo devem ser delineados no campo, sem preocupação imediata com classes taxonômicas (Ordem, Subordem, Grande Grupo, Subgrupo, Família e Série). Portanto, podemos inferir que, para o USDA-NRCS, a prioridade é dividir corpos naturais (classes de variabilidade dos atributos do solo) e, posteriormente, associar ou dar um nome à área identificada. Odeh, Chittleborough e McBratney (1991) destacaram a importância do delineamento de unidades de paisagem para a projeção dos padrões de amostragem nos levantamentos de solos, com o objetivo de diminuir o erro por extrapolação e, portanto, a classificação errada dos solos.

Para associar solos no campo com o mesmo padrão de características, os mapeadores norte-americanos utilizam o relevo como chave de mapeamento, onde os limites traçados pela análise da paisagem permitem boa previsibilidade dos solos de uma unidade de mapeamento (ZINCK, 1992). Entende-se por unidades de mapeamento o esboço de um limite que separa locais no campo com diferentes características, como teor de argila, saturação por base e outros atributos do solo e potências agrícolas. O uso de modelos de paisagem como técnica auxiliar em levantamento de solo constitui uma evolução no entendimento das relações solo-geomorfologia e, conseqüentemente, uma ferramenta importante para identificar e mapear áreas de solos homogêneos (CAMPOS et al., 2006).

No Brasil, muitos mapeadores ainda utilizam análise estereoscópica de fotografias aéreas para o delineamento manual das unidades de solo-paisagem que, posteriormente, são constatadas no campo. Fundamentados em conceitos da geomorfologia propostos por Daniels, Gamble e Cady (1971), alguns dos primeiros trabalhos de relação solo-paisagem tiveram início no Brasil no começo da década de 1990 (LEPSCH et al., 1977; MARQUES JÚNIOR; LEPSCH, 2001).

Os geomorfólogos baseiam-se na expressão do relevo para auxiliar no estabelecimento de fitofisionomias (característica da vegetação que se encontra em determinado lugar) (NEWBERY; PROCTOR, 1984; CLARK, 2002), compreender a evolução da paisagem (VASCONCELOS et al., 2012) e a evolução pedogeomorfológica (VASCONCELOS et al., 2013), além de induzir a formação de diferentes habitats ecológicos, proporcionando o desenvolvimento de um mosaico de fisionomias vegetais (SERRANO et al., 2000; HOERSCH et al., 2002; USTIN et al., 2004). A variação das fisionomias vegetais naturais ou agrícolas é consequência da variação dos atributos do solo em escala detalhada (*dowscale*).

Os modelos conceituais mais utilizados em ciências agrárias para auxiliar na compartimentação da paisagem e no delineamento das unidades de mapeamento de solos são: os de superfícies geomórficas (DANIELS; GAMBLE; CADY, 1971), de segmentos de vertente (DALRYMPLE; BLONG; CONACHER, 1968) e de curvaturas do relevo (TROEH, 1965; MARQUES JÚNIOR et al., 2014a). Estes modelos são fundamentados na matematização de atributos topográficos, como elevação, declividade, aspecto, plano de curvatura e índice topográfico.

O avanço computacional em Ciências do Solo (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2001; McBRATNEY; SANTOS; MINASNY, 2003) permitiu uma abordagem tridimensional das paisagens com os Modelos de Elevação Digital (MED), propiciando a interpretação das relações entre a evolução pedogenética e a evolução do relevo (CAMPOS et al., 2006). A análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação dessas unidades, como rapidez e economia, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem. Em geral, os métodos que organizam a superfície de acordo com um modelo morfológico mostram potencial para melhorar a predição de ocorrência dos tipos de solos, visto que a posição na paisagem influencia os processos de formação e os atributos pedológicos (IPPOLITI et al., 2005).

A evolução dessas ferramentas e de análises foi concomitante à evolução da ideia de se estudar o solo em um *continuum* na paisagem, com um propósito cartográfico que deveria ser representado mediante uma espacialização (ESPÍNDOLA, 2008). Este tipo de abordagem tem sido utilizado com êxito na caracterização de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (SOUZA et al., 2004; CAMARGO et al., 2008); na otimização amostral (MONTANARI et al., 2005; MONTANARI et al., 2012); no planejamento agrícola e na implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2006); na aplicação de insumos em taxa variada (BARBIERI et al., 2009); no estudo da emissão de CO₂ (PANOSSO et al., 2008); na adsorção de fósforo (BARBIERI et al., 2009); na perda de solo e de nutrientes por erosão (IZIDORIO et al., 2005; SANCHEZ et al., 2009); na produção de café (SANCHEZ et al., 2012) e no cultivo de citros (SIQUEIRA et al., 2010). Dessa maneira, esses e outros trabalhos deste tipo poderiam ser utilizados para nortear a identificação de limites entre áreas com diferentes padrões de variabilidade no campo e, assim, serem tomados como referência para o mapeamento das séries de solos.

Atualmente existem vários grupos nacionais e internacionais trabalhando com inúmeros métodos de caracterização da variabilidade dos atributos do solo, diagnósticos ou não, e em diferentes níveis de detalhe para diferentes fins: agricultura de precisão, levantamento de solos detalhado ao ultradetalhado,

mapeamento digital de solos e mapa de atributos do solo. Todos estes métodos são influenciados pela variabilidade dos atributos do solo (atributos diagnósticos ou não). Esta variabilidade é influenciada de modo resumido em duas escalas: alta escala ou baixa escala (*upscale* ou *downscale*). Três trabalhos exemplificam bem a relação entre *upscale* ou *downscale* no Planalto Ocidental Paulista. Os trabalhos de Sanchez (2007), Siqueira et al. (2010) e Pollo (2013) estudaram a variabilidade espacial de atributos do solo e a resposta de culturas agrícolas, utilizando modelo associado à geomorfologia. Estes trabalhos foram realizados em Argissolo desenvolvido de Arenito do Grupo Bauru, domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista, em formas do relevo côncava e convexa. Consideraram pouca influência geológica (*downscale*) e grande influência na forma da paisagem (*upscale*) (Figura 3).



Figura 3. Localização de projetos para caracterização ultradetalhada do solo e definição do padrão de variabilidade de atributos do solo.

Nestes três estudos de ultradetalhe, independentemente do "*input*" de variabilidade (aumento) provocado pelas diferentes práticas de manejo, o parâmetro alcance do variograma variou de 350-400 metros para atributos físicos, químicos, mineralógicos, suscetibilidade magnética e resposta das culturas agrícolas em

diferentes anos. O parâmetro alcance do variograma pode ser interpretado como a distância na qual duas amostras de solo estão relacionadas, e podem ser consideradas similares (teoria das variáveis regionalizadas).

Na prática, pode-se inferir que, para agricultura de precisão, poder representar uma unidade mínima de manejo, ou um pedólogo planejar abertura de trincheira pedológica ou coleta de amostras de trado para aferir limites da unidade de mapeamento, ou então, definir a resolução do pixel para a realização do mapeamento digital de solo (MDS), deve-se considerar que, neste tipo de compartimento geomorfológico, as amostras de solo até 400 metros são similares. Assim, pode-se inferir que, em Argissolo do Planalto Ocidental Paulista, é esperada uma área mínima mapeável com controle de variabilidade da ordem de até 16 ha (400 x 400 m). Quando estas informações são associadas a uma proposta de compartimentação da paisagem, podem-se extrapolar as interpretações, sejam elas com foco em pedologia, sejam atividades agrícolas (TEN CATEN et al., 2011; MARQUES JÚNIOR et al., 2014a). Portanto, a evolução das ferramentas para a caracterização das formas do relevo (análise estereoscópica, modelos de paisagem baseados em conceitos da geomorfologia, MDE, dentre outros) tem influenciado no levantamento de solos que seguem princípios da relação solo-paisagem, e na caracterização detalhada e ultradetalhada da variabilidade de seus atributos. Admitindo-se a influência dos compartimentos da paisagem em pequena escala (*dowscale*), o foco das pesquisas aplicadas em geomorfologia, o levantamento de solos e a quantificação da variabilidade, tem sido a busca por ferramentas capazes de qualificar e quantificar os compartimentos da paisagem em áreas maiores e com menor subjetividade possível. Na Europa, existe a proposta de identificação de macrorregiões com similaridade dos compartimentos da paisagem, baseada na proposta de Jasiewicz e Stepinski (2013). No Brasil, várias abordagens têm sido utilizadas, sendo a proposta de Vasconcelos uma das mais precisas no quesito quali-quantitativo dos elementos do terreno (EVANS, 1979) e das formas do terreno (WOOD, 1996). Vasconcelos percebeu que a interação dos elementos do terreno (curvatura vertical e horizontal) com as formas do terreno a partir dos pares de curvatura longitudinal e transversal, e mínima e máxima, pode ser utilizada como assinatura geomorfológica para compartimentalizar o relevo (Figura 4).

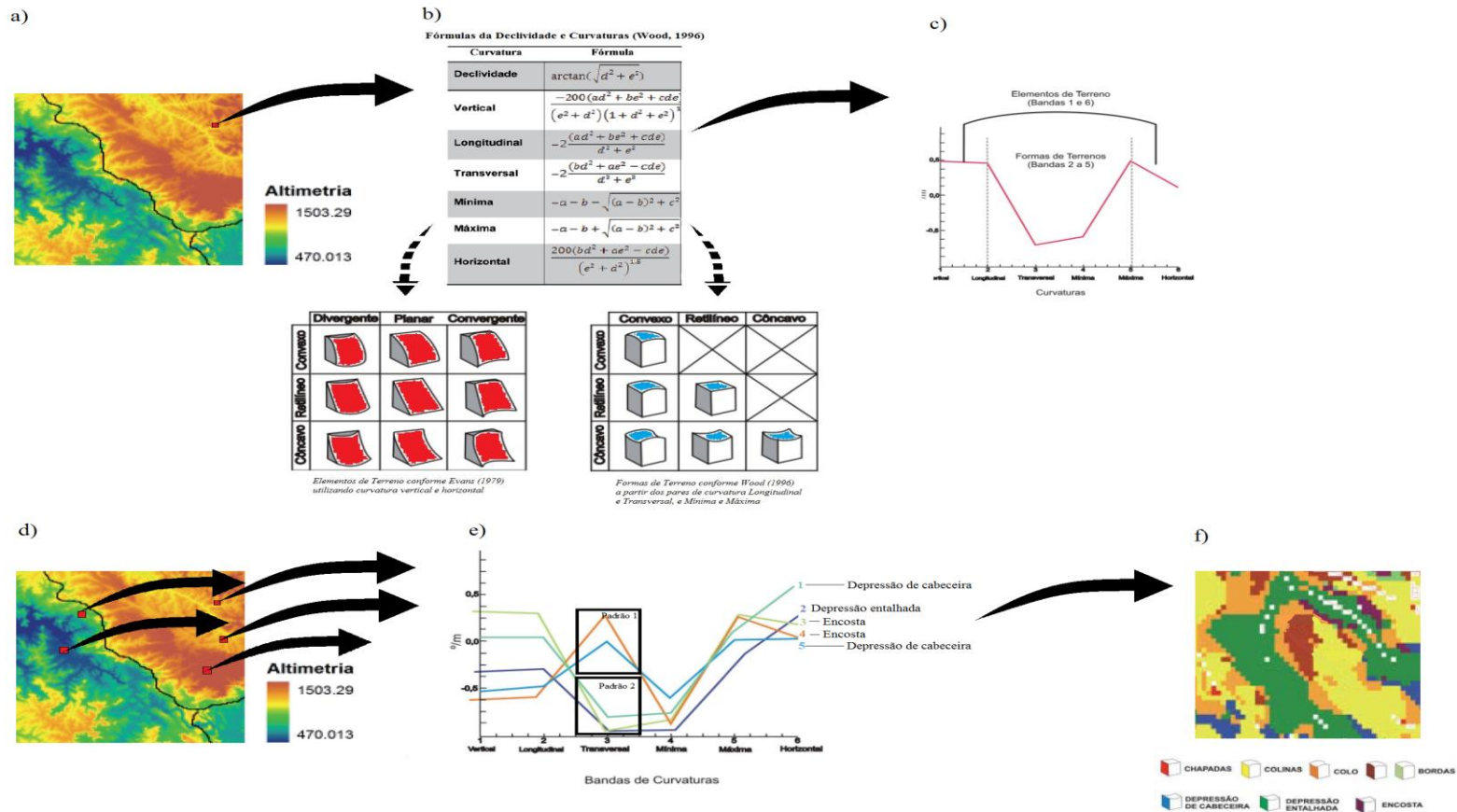


Figura 4. Diagrama de parte das etapas para a obtenção da assinatura morfométrica: (a) a partir das informações SRTM (Shuttle Radar Topography Mission); (b) são calculados os valores dos atributos do terreno para o pixel, (c) a partir destes valores calculados e construída a assinatura geomorfométrica da relação dos elementos e formas do terreno; (d) o processo repete-se para diferentes pixels da imagem; (e) permitindo a construção de várias assinaturas, sendo que o padrão de assinatura expressa uma classificação do relevo; (f) mapa de classificação do relevo com base nas assinaturas geomorfométricas (Modificado de VASCONCELOS et al., 2012).

Concomitantemente à evolução das ferramentas computacionais para análise quali-quantitativa do relevo, outras análises de campo e laboratório têm sido testadas para a representação do solo, dentre elas a suscetibilidade magnética e a espessura do horizonte A+E. Estas análises são covariativas dos fatores e dos processos de formação do solo, logo possuem potencial representativo destas mudanças, tanto em caracterizações detalhadas da variação horizontal e vertical dos atributos do solo (*dowyscale*), quanto em semidetalhadas e exploratórias (*upscale*).

A suscetibilidade magnética (SM) e a espessura do *solun* (horizonte A+E) têm sido utilizadas no estudo da relação solo-paisagem em Argissolos originados de Arenito, cujo teor de ferro total é menor do que 4% (SIQUEIRA et al., 2010; MARQUER JÚNIOR et al., 2014b). Estas duas técnicas de análise, SM e espessura do horizonte, podem ser utilizadas como pedoindicadoras do potencial produtivo do solo, conforme descrito por Sanchez et al. (2012) e Pollo (2013), em café, e Marques Júnior et al. (2014b), em cana-de-açúcar.

Por ser sensível às variações mineralógicas, a SM pode ser interpretada como indicador da pedodiversidade nos solos tropicais, onde os óxidos de ferro são os principais causadores da variabilidade físico-química dos solos. A avaliação da SM é uma alternativa para reduzir o número de análises laboratoriais convencionais, otimizando tempo de coleta, análise, reagente, e diminuindo o impacto ambiental. O horizonte A+E é resultado do processo de formação do solo. A variação de sua espessura está relacionada com a taxa de pedogênese (formação do solo) e de geomorfogênese (formação do relevo). Trabalhos como os de Sanchez et al. (2009) indicam que, no Planalto Ocidental Paulista, em Argissolos provenientes de Arenito e com mesmo manejo, a forma do relevo é responsável pelo padrão de perda de solo, risco de erosão, potencial natural de erosão e resposta das culturas agrícolas, conforme apresentado por Sanchez (2007). Autores relatam que a espessura do horizonte A+E também foi eficaz na identificação de áreas com diferentes repostas do cafeeiro em outros compartimentos geomorfológicos fora do Planalto Ocidental Paulista (SANCHEZ et al., 2012).

1.3 Referências

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.

BLASZCZYNSKI, J. S. Landform characterization with Geographic Information Systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 63, n. 2, p.183-191, 1997.

BURROUGH, P. Soil variability: A late 20th century view. **Soils and Fertilizers**, Oxford, v. 56, n. 5, p. 529–562, 1993.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, Amsterdam, v. 100, p. 100-106, 2013.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2.269-2.277, 2008.

CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 104-114, 2006.

CLARK, D. B. Los fatores edáficos y la distribución de las plantas. In: GUARIGUATA, M. R.; KATTAN, G. H. (Ed.). **Ecología y conservación de bosques neotropicales**. Cartago: Ediciones LUR, 2002. p. 193-221.

COOK, S. E.; CORNER, R. J. A rule-based system to map soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 6, p. 1.893-1.900, 1996.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. Z. **Geomorphology**, Berlin, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances Agronomy**, San Diego, v. 23, n. 1, p. 51-87, 1971.

ESPÍNDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia: um repasse bibliográfico**. 1. ed. Campinas: Unicamp, 2008. 397 p.

EVANS, I. S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. **Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband**, Stuttgart, v. 36, p. 274-295, 1979.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FERNANDES, L. A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. 1998. 216 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 723-734, 2000.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**. New York: Springer-Verlag, 2001. 758 p.

HOERSCH, B.; BRAUNB, G.; SCHMID, U. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. **Computers, Environment and Urban Systems**, Oxford, v. 26, n. 2-3, p. 113–139, 2002.

HUDSON, B. D. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 836-841, 1992.

IPPOLITI, G. A.; COSTA, L. M. da; SCHAEFER, C. E. G. R.; FILHO, E. I. F.; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de "Mar de Morros" (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 269-276, 2005.

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 660-670, 2005.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 182, p. 147–156, 2013.

LEPSCH, I. F.; BUOL, S. W.; DANIELS, R. B. Soil-landscape relationships in the Occidental Plateau of São Paulo State, Brazil. I. Geomorphic surfaces and soil mapping units. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 1, p. 104-109, 1977.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenoicos, superfícies geomórficas e solos de Monte Alto, SP. **Geociências**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 90-106, 2001.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; BAHIA, A. S. R. S. Subsídios para estabelecimento das Séries de solos do Brasil a partir de delineamento de áreas com dominância de pedons homogêneos em levantamentos pedológicos detalhados efetuados com base em modelos conceituais solo-paisagem. In: RIBEIRO, B. T.; WENDLING, B. (Org.). **Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas**. 1 ed. Uberlândia: Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 2014a. p. 0-338.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014b.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293–327, 2000.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 5, p. 542-552, 2012.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.

MOORE, I. D.; GESSELER, P.E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 2, p. 443–452, 1993.

NEWBERY, D. M.; PROCTOR, J. Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawak. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 71, n. 1, p. 475-493, 1984.

ODEH, I. O. A.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; McBRATNEY, A. B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 1-32, 1991.

PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 227-236, 2008.

POLLO, G. Z. **Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo específico na cultura do café**. 2013. 58 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

QUEIROZ NETO, J. P. de. O estudo de formações superficiais no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 22, n. 1-2, p. 65-78, 2001.

SANCHEZ, M. G. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; PEREIRA, G. T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, n. 2, p. 201-214, 2012.

SANCHEZ, R. B. **Agricultura de precisão em Argissolos com variações nas formas do relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2007. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 873-884, 2009.

SERRANO, L.; USTIN, S. L.; ROBERTS, D. A.; GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J. Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 74, n. 3, p. 570–581, 2000.

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento detalhado e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética e cor no contexto da relação solo-paisagem**. 2013. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil, Use and Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1.763-1.771, 2004.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 5, p. 812-816, 2011.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 263, n. 7, p. 616-627, 1965.

USDA-NRCS. Field indicators of hydric soils in the United States. In: HURT, G. W.; WHITED, P. M.; PRINGLE, R. F. (Eds.). **USDA-NRCS in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 2002. p. 1-34.

USTIN, S. L.; ROBERTS, D. A.; GAMON, J. A.; ASNER, G. P.; GREEN, R. O. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. **BioScience**, Cary, v. 54, n. 6, p. 523-534, 2004.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JR., O. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JR., A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelo de Evolução Pedogeomorfológica da Serra da Canastra-MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo v. 14, n. 2, p. 197-212, 2013.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

WILDING, L. P.; BOUMAN, J.; GOSS, D. W. Impact of spatial variability on interpretative modeling. In: BRYANT, R. B.; ARNOLD, R. W. (Ed.). **Quantitative modeling of soil forming processes**. Madison: SSSA, 1994. p. 61–75.

WOOD, J. **The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models**. 1996. 184 f. Thesis (PhD in Science Information) – Science Information Department, University of Leicester, Leicester, 1996.

ZHU, A. X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, Amsterdam, v. 77, n. 2-4, p. 217–242, 1997.

ZINCK, J. A. **Soil Survey: Perspectives and Strategies for the 21st Century**. 1992. Disponível em: < http://books.google.com.br/books?id=tXWm_PBOE_cC&lpg=PA77&ots=mQiJKdPyc1&dq=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&hl=ptBR&pg=P1#v=onepage&q=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&f=false>. Acesso em: 24 abr. 2015.

CAPÍTULO 2 – Produção e qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas do relevo

2.1 Introdução

A demanda por mapas detalhados de uso e de ocupação do solo, capazes de fornecer informações de modo simples e dinâmico, para o planejamento estratégico, tático e operacional, tem aumentado. As pesquisas têm focado a caracterização dos solos e seus atributos antes de gerar recomendações adequadas de manejo (SHEPHERD; WALSH, 2007) para desenvolver indicadores de impactos globais do uso e da ocupação do solo (ROCKSTROM et al., 2009). Nesse contexto, novas metodologias de análise de solo e de relevo, estão sendo propostas para a caracterização do potencial dos solos da região tropical, aumentando a sustentabilidade das lavouras.

O relevo é um dos cinco fatores de formação do solo (JENNY, 1941). Pesquisas têm sugerido que sua compartimentação pode auxiliar no planejamento estratégico em ciências agrárias como: identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo (BARBIERI et al., 2009), emissão de CO₂ (BARRIOS et al., 2012), planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012), potencial de erosão (SANCHEZ et al., 2009) e resposta de culturas agrícolas, como citros (SIQUEIRA et al., 2010a), cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2008; MARQUES JÚNIOR et al., 2014b) e café (SANCHEZ et al., 2012).

A compartimentação do relevo é muito utilizada pelos geomorfólogos para auxiliar no estabelecimento de fitofisionomias (VASCONCELOS et al., 2012) e evolução pedogeomorfológica (VASCONCELOS et al., 2013), além de induzir a formação de diferentes habitats ecológicos, proporcionando o desenvolvimento de um mosaico de fisionomias vegetais (SERRANO et al., 2000; HOERSCH et al., 2002; USTIN et al., 2004). A variação do relevo influencia na variabilidade horizontal e vertical de atributos do solo. A variação das fisionomias vegetais naturais ou agrícolas é consequência da variação dos atributos do solo em escala detalhada (*dowyscale*).

Nos Estados Unidos e no Canadá, a compartimentação do relevo é utilizada como chave de mapeamento dos solos no campo, onde os limites traçados pela análise da paisagem permitem boa previsibilidade dos solos de uma unidade de mapeamento (ZINCK, 1992). No Brasil, os modelos conceituais mais utilizados em ciências agrárias para auxiliar na compartimentação do relevo e do delineamento das unidades de mapeamento de solos são: o de superfícies geomórficas (DANIELS et al., 1987), o de segmentos de vertente (DALRYMPLE et al., 1968) e o de curvaturas do relevo (TROEH, 1965).

A subjetividade dos modelos conceituais de compartimentação do relevo, bem como a definição dos limites para sua aplicação dentro das unidades morfológicas, pode ser diminuída com a utilização de ferramentas do Sistema de Informações Globais (SIG), como o modelo digital de elevação (MDE) e assinatura geomorfométrica (VASCONCELOS et al., 2012). Outras vantagens do método proposto por Vasconcelos et al. (2012) são a praticidade para compartimentação do relevo em grandes áreas sem o viés da subjetividade e o caráter quali-quantitativo, pois além de identificar com precisão o limite entre uma forma côncava e uma convexa, por exemplo, quantifica a intensidade das formas.

Mais recentemente, a suscetibilidade magnética (SM) e a espessura do *solun* (horizonte A+E) têm sido utilizadas no estudo da relação solo-paisagem em Argissolos originados de Arenito, cujo teor de ferro total é menor do que 4% (SIQUEIRA et al., 2010a; MARQUES JÚNIOR et al., 2014b). Estas duas técnicas de análise, SM e espessura do horizonte, podem ser utilizadas como pedoindicadores do potencial produtivo do solo, conforme descrito por Pollo (2013) e Sanchez et al. (2012) em café e Marques Júnior et al. (2014a) em cana-de-açúcar.

Por ser sensível às variações mineralógicas, a SM pode ser interpretada como indicador da pedodiversidade nos solos tropicais, onde os óxidos de ferro são os principais causadores da variabilidade físico-química dos solos. A avaliação da SM é uma alternativa para reduzir o número de análises laboratoriais convencionais, otimizando tempo de coleta, análise, reagente, e diminuindo o impacto ambiental. O horizonte A+E é o resultado do processo de formação do solo e da ação simultânea e integrada do clima de uma região. A variação de sua espessura está relacionada com a taxa de pedogênese (formação do solo) e com a perda (erosão). Trabalhos

como os de Sanchez (2007) e Sanchez et al. (2009) indicam que, no Planalto Ocidental Paulista, em Argissolos provenientes de Arenito e com mesmo manejo, a forma do relevo é responsável pelo padrão de perda de solo, pelo risco de erosão, pelo potencial natural de erosão e pela resposta das culturas agrícolas. Mais recentemente, outros autores relatam que a espessura do horizonte A+E também foi eficaz na identificação de áreas com diferentes repostas do cafeeiro fora do Planalto Ocidental Paulista (SANCHEZ et al., 2012).

Isoladamente, estes conhecimentos têm sido úteis para auxiliar no planejamento estratégico de uso e de ocupação do solo em áreas que variam de 1 ha (BARBIERI et al., 2009; MARQUES JÚNIOR et al., 2014b) a 530 ha (CAMPOS et al., 2008). Este trabalho tem como objetivo identificar áreas com diferentes potenciais produtivos e de qualidade da cana-de-açúcar, utilizando de forma integrada diferentes formas do relevo caracterizadas por assinatura geomorfométrica, suscetibilidade magnética e espessura dos horizontes A+E em Argissolos originados de Arenitos com baixo teor de ferro total ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 40 \text{ g kg}^{-1}$).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localização da área e planejamento amostral

A área de estudo está localizada no Planalto Ocidental Paulista. O clima da região foi classificado pelo método de Koeppen, como tropical, quente e úmido, tipo Aw, seco no inverno, com precipitação média de 1.350 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação primária da região foi classificada como floresta pluvial estacional e cerrado. O material de origem dos solos foi identificado como rocha arenítica sedimentar do Grupo Bauru (IPT, 1981).

O solo de maior ocorrência foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico/Typic Hapludalf (SOIL SURVEY STAFF, 1975), com teor de ferro total (Fe_2O_3) menor do que 40 g kg^{-1} (< 4%).

Os modelos de causa e efeito entre solo e planta desenvolvidos para uma área-piloto de 200 ha (Tabela 1) foram extrapolados para quadrícula de 100.000 ha

(Figura 5). Com o intuito de validar o modelo de forma do relevo para quadrícula, foram escolhidas aleatoriamente, 15 formas côncavas e 15 convexas, com geologia, solo, geomorfologia e ocupação do solo similar à área-piloto (área-controle). Foram coletadas 3 amostras de solo em cada uma das 15 formas escolhidas. As amostras de solo coletadas na quadrícula foram comparadas com as 121 amostras coletadas na área-piloto. Foram coletadas amostras na profundidade de 0,0-0,2 m (Figura 5).

Tabela 1. Modelo de causa e efeito para Argissolo desenvolvido na área piloto (200 ha) localizada no Planalto Ocidental Paulista.

| Característica do solo | Unidade | Forma Côncava (CC) | Forma Convexa (CX) | Citação |
|------------------------|--|--------------------|--------------------|----------------------------|
| Argila | g kg ⁻¹ | 171 | 190 | Sanchez et al. (2009) |
| Espessura A+E | Cm | 39,0 | 30,0 | Sanchez et al. (2009) |
| PNE | t ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 140,8 | 172,2 | Sanchez et al. (2009) |
| Teor de goethita | g kg ⁻¹ | 10,5 | 13,2 | Silva Júnior et al. (2012) |
| Teor de hematita | g kg ⁻¹ | 12,3 | 23,2 | Silva Júnior et al. (2012) |
| Relação Gb / (Gb + Ct) | Adimensional | 0,06 | 0,12 | Barbieri et al. (2009) |
| SM | 10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹ | 1,5 | 3,5 | Siqueira et al. (2010b) |
| Alcance | M | 159,1 | 409,6 | Sanchez et al. (2009) |
| TCH | t ha ⁻¹ | 149,4 | 125,9 | Sanchez (2007) |
| Pol | % | 13,94 | 14,03 | Sanchez (2007) |

PNE - Potencial natural de erosão; Gb - gibbsita; Ct - caulinita; Alcance - variabilidade dos atributos físicos e químicos do solo avaliada pelo alcance médio do variograma; TCH - tonelada de cana-de-açúcar por hectare; Pol - porcentagem de sacarose aparente.

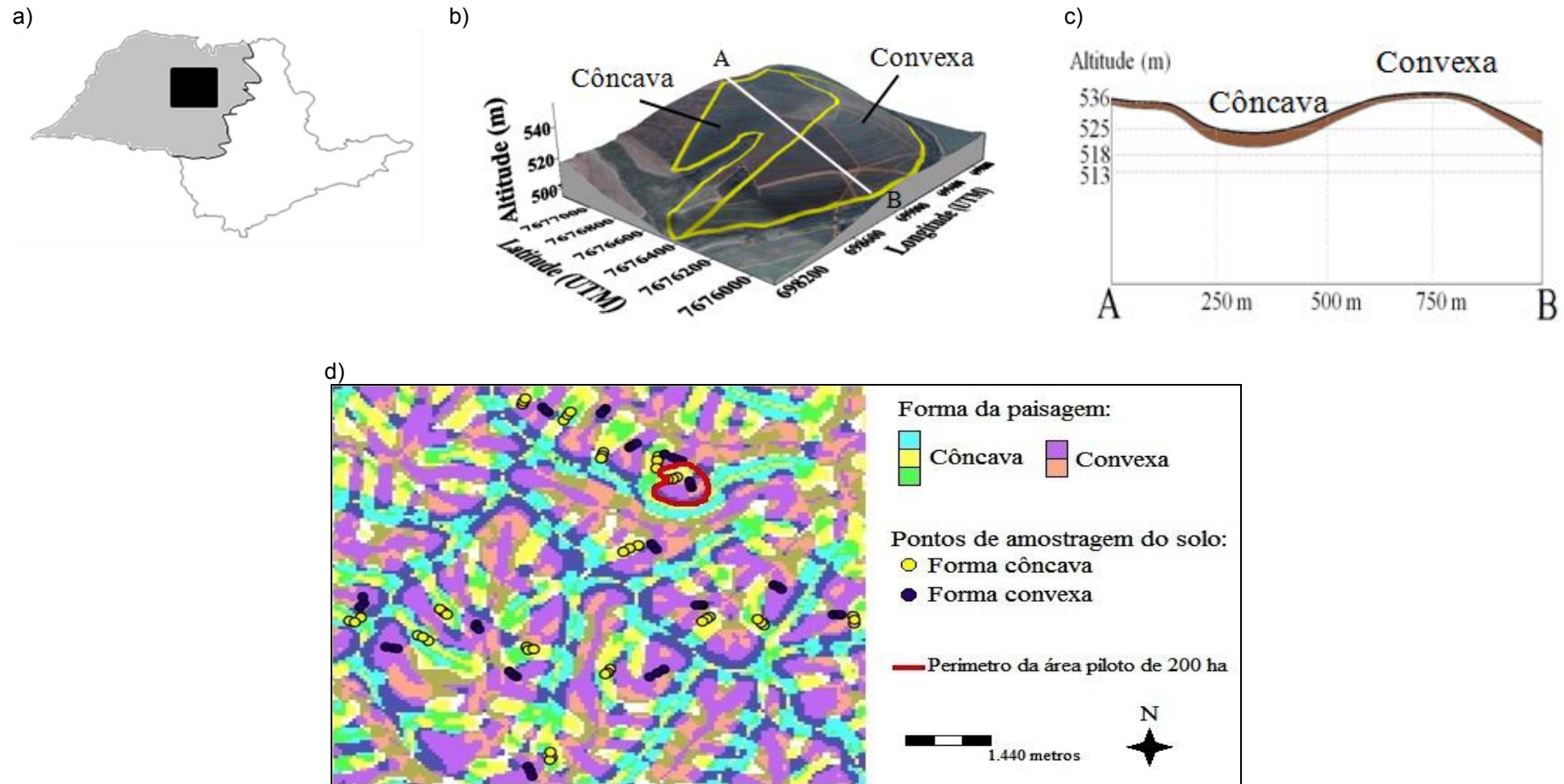


Figura 5. (a) Localização da área no Planalto Ocidental Paulista e quadrícula de 100.000 ha (■); (b) área-piloto com 200 ha, sendo 100 na forma convexa e 100 na forma côncava; (c) corte na área-piloto demonstrando o modelo de evolução do Argissolo no Planalto Ocidental e espessura dos horizontes nas diferentes formas do relevo; (d) planejamento amostral na quadrícula de 100.000 ha. As cores indicam mudanças graduais das formas do relevo: ■ côncava de baixa intensidade; ■ côncava de alta intensidade; ■ convexa de alta intensidade; ■ convexa de baixa intensidade.

2.2.2 Caracterização das formas do relevo

O mapa de formas do relevo foi elaborado segundo método proposto por Vasconcelos et al. (2012), baseado na assinatura geomorfométrica. Este método tem por objetivo diminuir a subjetividade da identificação de compartimentos pelos modelos conceituais de paisagem, podendo ser aplicado em diversas escalas. Para a elaboração das assinaturas geomorfométricas, foram utilizadas informações da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que adquiriu dados topográficos de 80% da superfície terrestre (entre as latitudes 60°N e 57°Sul), no período de 11 dias, no ano 2000, utilizando dois radares de abertura sintética relativos à banda C (5,6cm; C-RADAR) e à banda X (3,1cm; X-RADAR). O Modelo Digital de Elevação (MDE) da SRTM é uma grade regular com resolução espacial de 3 arcsec (~90 metros) e precisão horizontal e vertical de 5 metros (SMITH; SANDWELL, 2003).

Neste trabalho, foi utilizado o produto do Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS), desenvolvido pelo programa de ciência da conservação do Fundo Mundial da Vida Selvagem (WWF - Sigla em inglês), em conjunto com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e de outras instituições. Esse produto apresenta um tratamento a partir de correção das drenagens e filtragens (LEHNER; VERDIN; JARVIS, 2006). A partir da imagem SRTM, foram geradas quatro imagens relativas às seguintes curvaturas de perfil: vertical, longitudinal, transversal, mínima e máxima. As formulações para a obtenção das curvaturas podem ser encontradas no trabalho de Vasconcelos et al. (2012). As 4 imagens de curvatura do terreno foram unidas, estabelecendo-se para cada célula uma assinatura geomorfométrica, que permitiu classificar as formas do relevo, assim como identificar as mudanças graduais dessas formas. Na Figura 1d, a cor verde-clara representa formas côncavas mais intensas do que a cor azul-clara, e a cor rosa, formas convexas mais intensas (região do topo) do que a cor roxa.

2.2.3 Caracterização do solo

A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar), no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A

avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínios simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos, é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013).

2.2.4 Caracterização da planta

O mapa de formas do relevo foi utilizado para classificar talhões de cana-de-açúcar que totalizam uma área aproximada de 20.000 ha dentro da quadrícula de 100.000 ha. Foi avaliado o histórico de 7 anos (2008 a 2014) da produção de cana-de-açúcar, expresso em toneladas de colmos ha^{-1} (TCH) e qualidade da matéria-prima, expresso em Pol (porcentagem de sacarose aparente). Estes atributos da cana-de-açúcar têm grande importância no controle industrial da fabricação de açúcar e de álcool, principalmente no que se refere à melhoria da eficiência do processo industrial, ao pagamento da cana-de-açúcar em função do teor de sacarose e à avaliação do estado de maturação da cana. Os resultados de TCH e Pol analisados são uma média geral de mais de 15 variedades sujeitas à variação do clima, do ataque de pragas, à plantas daninhas e à outros fatores durante o período avaliado.

2.2.5 Análise dos dados

Para comparar a variação e a amplitude dos valores de SM nas formas côncava e convexa da área-piloto ($n = 242$) em relação à quadrícula ($n = 90$), foi construído gráfico de dispersão. O objetivo foi analisar se a dispersão das formas côncava e convexa da área-piloto é similar à dispersão das formas côncavas e convexas da quadrícula.

Foram calculadas médias e desvio-padrão para os atributos do solo e histórico de produtividade e de qualidade da cana-de-açúcar. Foi realizado o teste de Tukey (5%) para comparar as médias da SM e espessura do horizonte A+E das

amostras coletadas na área-piloto com as amostras coletadas na quadrícula, nas formas côncava e convexa. Para avaliar a eficácia do modelo proposto por Sanchez (2007), na explicação da resposta da cana-de-açúcar em função das formas do relevo, foi construída tabela da porcentagem de acertos, considerando 280 comparações na forma convexa e 280 comparações na forma côncava. Foram contabilizadas as observações que satisfazem às especificações de TCH e Pol apresentadas na Tabela 1 (TCH: CC > CX; Pol: CX > CC).

2.3 Resultados e Discussão

Analisando-se a Figura 5, nota-se que existem colinas em duas escalas de observação. As colinas são as regiões circundadas pela forma côncava de alta intensidade (cor azul escura). Em escala detalhada, as colinas utilizadas nas análises conjuntas com os solos da área-piloto podem ser consideradas unidades mínimas. Em escala menos detalhada, na região sudoeste, por exemplo, existe colina formada por conjunto organizado de porções convexas e côncavas.

A identificação destes dois níveis de organização de colinas pode auxiliar no desenvolvimento de métricas para duas aplicações. A primeira delas está relacionada com o equilíbrio de formas convexas e côncavas, indicando, efetivamente, onde a taxa de dissecação está mais elevada que a pedogênese (maior proporção de formas côncavas), maior pedogênese (mais convexo), ou equilíbrio (proporções idênticas entre as formas). A segunda seria determinar o nível de representatividade de áreas-piloto; assim, para cada conjunto de evolução de colinas, ter-se-ia um modelo de paisagem.

Os valores de SM da forma côncava na área-piloto de 200 ha variaram de 1 a $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; e na quadrícula, de 100.000 há, de 1 a $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Na forma convexa da área-piloto, a SM variou de 2 a $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; e na quadrícula, de 1 a $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (Figura 6). A maior amplitude da SM na forma convexa, tanto na área de 200 ha quanto na área de 100.000 ha é um indicativo da maior variabilidade espacial dos atributos do solo nessa forma.

Apesar de a forma convexa ser naturalmente erosional, os solos são mais gibbsíticos que a forma côncava. A maior proporção de gibbsita indica maior taxa de intemperismo químico. A forma convexa apresenta maior suscetibilidade à erosão que a forma côncava. Porém, a mineralogia indica que o intemperismo químico relativo é maior na forma convexa. As formas convexas, que se localizam nas porções mais elevadas da paisagem das colinas, tendem a ser mais antigas e intemperizadas que as formas côncavas.

O próprio processo de formação das colinas pressupõe a dissecação de uma forma plana inicial, com a preservação das porções mais antigas nas formas convexas. Neste contexto, a área relativa de formas convexas e côncavas passa a ser uma métrica importante para a compreensão da evolução da paisagem. Em relevos colinosos em equilíbrio, espera-se proporções similares. Esta discussão leva ao processo de formação do horizonte Bt nos relevos colinosos.

Segundo Sanchez et al. (2009), o potencial natural de erosão e o risco de erosão é maior na forma convexa, indicando ser esta forma de paisagem mais suscetível à perda de solo, quando comparada à forma côncava. Assim, a evolução geomorfológica das colinas está influenciando na evolução dos solos e, conseqüentemente, na variabilidade espacial dos atributos do solo, conforme proposto por Vasconcelos et al. (2013). Trabalhos realizados em Argissolo desenvolvido de Arenito do Grupo Bauru, no domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista (SANCHEZ, 2007; SIQUEIRA et al., 2010a; POLLO, 2013), também encontraram padrão de variabilidade similar nas formas do relevo estudadas. Nestes três estudos de ultradetalhe, independentemente do aumento de variabilidade provocado pelas diferentes práticas de manejo (laranja, cana-de-açúcar e café) e variações da malha de amostragem, o padrão de variabilidade foi o mesmo para atributos físicos, químicos, mineralógicos, suscetibilidade magnética e resposta das culturas agrícolas em diferentes anos.

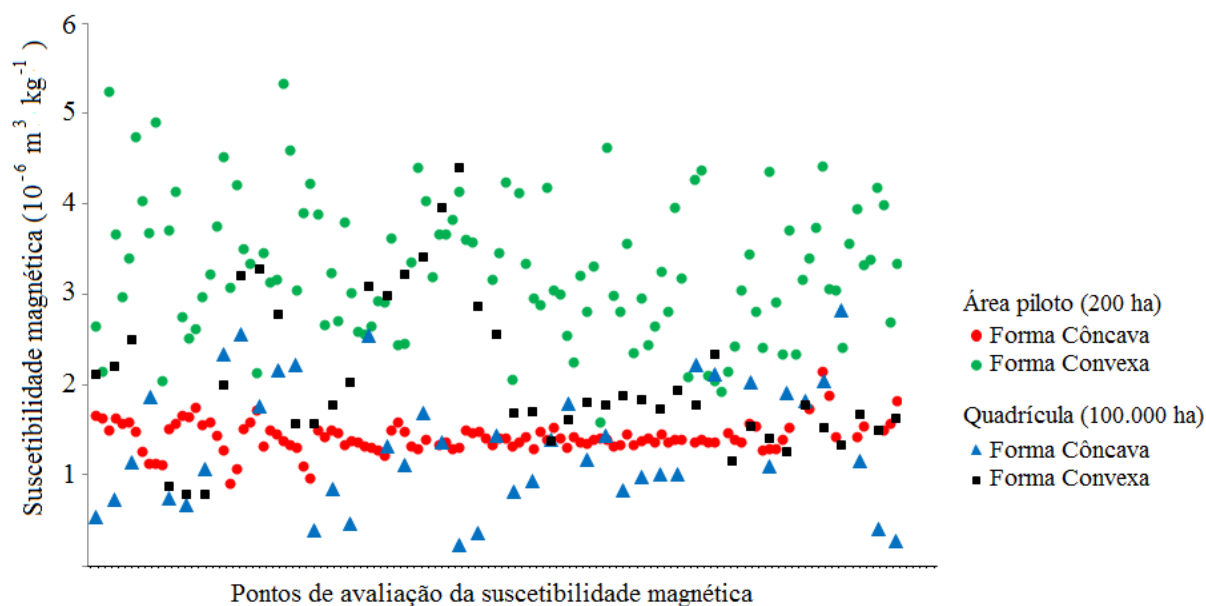


Figura 6. Comparação dos valores de SM da área piloto de 200 ha (n = 242) com as amostras coletadas na quadrícula de 100.000 ha (n = 90).

Observa-se que os valores de SM da forma côncava na quadrícula apresentaram padrão de dispersão similar aos valores da forma côncava na área-piloto. O mesmo ocorreu para a forma convexa. A SM é um atributo covariativo de outros atributos do solo e já foi utilizada em Argissolos do Planalto Ocidental Paulista para a quantificação indireta do teor de argila ($r = 0,68$), capacidade de retenção de cátion ($r = 0,62$), adsorção de fósforo ($r = 0,76$), teor de hematita ($r = 0,82$) (SIQUEIRA et al., 2010b), dados espectrais na faixa do visível e infravermelho ($0,38 \leq r \leq 0,48$), e Pol da cana-de-açúcar ($r = -0,26$) (MARQUES JÚNIOR et al., 2014b). Com base nos resultados da literatura e na similaridade dos valores de SM entre área-piloto e quadrícula, pode-se inferir que o potencial agrônomo das formas côncava e convexa, previamente identificado na área-piloto, possa ser extrapolado para as formas do relevo identificadas na quadrícula. A extrapolação de potenciais agrônômicos com base na relação solo-paisagem também é sugerida por Ten Caten et al. (2011). Utilizando os valores de SM na extrapolação dos resultados, podem-se diminuir erros, pois a SM é considerada pedoindicador sensível aos fatores e aos processos de formação do solo (TORRENT; BARRÓN, 1993; MAHER; THOMPSON, 1999) e com representatividade de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (VEROSUB; ROBERTS, 1995; TORRENT et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2010b).

Os maiores valores de SM na forma convexa são explicados pela menor espessura do horizonte A+E e pela proximidade com o horizonte diagnóstico do Argissolo com maior concentração da fração argila (Figura 2, Tabela 2). Nesta fração, é encontrado a maghemita, mineral pedogenético com expressão magnética e que se forma em ambientes de caráter oxidico ou com a presença de fogo. Segundo Schwertmann (1988) e Hanesch et al. (2006), altas temperaturas e matéria orgânica favorecem a transformação do Fe pedogenético, causando a neoformação de minerais com característica magnética, como a maghemita.

Apesar de as médias da espessura do horizonte A+E na quadrícula serem condizentes com o modelo de evolução de Argissolos desenvolvidos de Arenito proposto por Sanchez et al. (2009), a espessura do horizonte A+E nas formas côncavas maiores do que nas formas convexas, não se diferiram pelo teste de Tukey. Os valores de desvio-padrão (DP) sugerem que esse resultado pode ser consequência do alto valor da variância das avaliações da espessura do horizonte A+E. Apesar de prática e eficiente, a avaliação da espessura do horizonte é um critério auxiliar de campo menos sensível à taxa de formação do solo (pedogênese/erosão) do que a SM. Observa-se que os valores de SM da quadrícula (Tabela 2) são condizentes com os valores de SM da área-piloto para as formas côncavas ($1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) e convexas ($3,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (Tabela 1).

Tabela 2. Média e desvio-padrão da SM e espessura do horizonte A+E do solo nas formas côncavas e convexas em 100.000 há, na profundidade de 0,0-0,2 m.

| Forma | SM ($10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)* | | Horizonte A+E (cm)* | |
|---------|---|------|---------------------|-------|
| | Média | DP | Média | DP |
| Côncava | 1,31b | 6,92 | 39,34a | 19,19 |
| Convexa | 2,07a | 8,21 | 38,32a | 16,69 |

*côncava n - 45; convexa n - 45. DP – desvio-padrão. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem pelo teste de Tukey (5%).

Os valores da resposta da planta em tonelada de colmos de cana-de-açúcar por hectare (TCH) na quadrícula foram condizentes com o modelo da área-piloto (TCH da forma côncava > TCH da forma convexa) (Tabela 3).

Tabela 3. Média da tonelada de cana por hectare (TCH) e Pol entre 2008 e 2014 em 20.000 ha.

| Corte | Meses | | | | | | | | Média | DP |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|----------|--------|-------|
| | Abril | Maio | Junho | Julho | Agosto | Setembro | Outubro | Novembro | | |
| Pol na forma côncava | | | | | | | | | | |
| 1 | 12,10 | 12,80 | 12,90 | 13,90 | 15,10 | 15,40 | 15,00 | 13,90 | 13,89 | 1,14 |
| 2 | 11,40 | 12,70 | 13,20 | 14,10 | 15,30 | 15,70 | 14,70 | 14,00 | 13,89 | 1,33 |
| 3 | 12,10 | 13,40 | 13,20 | 13,80 | 15,20 | 15,40 | 14,70 | 13,20 | 13,88 | 1,06 |
| 4 | 12,80 | 13,20 | 13,50 | 14,60 | 15,40 | 15,70 | 14,90 | 13,10 | 14,15 | 1,06 |
| 5 | 12,00 | 13,20 | 12,30 | 14,60 | 15,90 | 15,90 | 14,40 | 13,80 | 14,01 | 1,38 |
| Média | 12,08 | 13,06 | 13,02 | 14,20 | 15,38 | 15,62 | 14,74 | 13,60 | - | - |
| DP | 0,50 | 0,30 | 0,45 | 0,38 | 0,31 | 0,22 | 0,23 | 0,42 | - | - |
| Pol na forma convexa | | | | | | | | | | |
| 1 | 12,19 | 12,8 | 13,7 | 14,25 | 15,25 | 16,02 | 15,4 | 14,95 | 14,32 | 1,25 |
| 2 | 12,22 | 12,23 | 13,43 | 14,41 | 14,87 | 15,45 | 14,53 | 13,82 | 13,87 | 1,11 |
| 3 | 11,98 | 12,96 | 13,3 | 14,07 | 15,09 | 15,96 | 14,69 | 14,01 | 14,01 | 1,18 |
| 4 | 12,84 | 13,21 | 13,91 | 14,92 | 15,05 | 15,88 | 14,97 | 13,44 | 14,28 | 1,01 |
| 5 | 13,18 | 13,1 | 14,35 | 15,33 | 15,88 | 14,5 | 12,99 | 14,2 | 14,19 | 1,00 |
| Média | 12,48 | 12,86 | 13,74 | 14,6 | 15,23 | 15,56 | 14,52 | 14,08 | - | - |
| DP | 0,51 | 0,38 | 0,42 | 0,52 | 0,39 | 0,63 | 0,91 | 0,56 | - | - |
| TCH na forma côncava | | | | | | | | | | |
| 1 | 121,78 | 119,06 | 141,85 | 147,54 | 126,71 | 130,13 | 133,18 | 108,90 | 128,64 | 11,66 |
| 2 | 105,24 | 103,64 | 108,80 | 105,23 | 97,26 | 100,03 | 96,97 | 100,22 | 102,17 | 3,94 |
| 3 | 89,61 | 101,82 | 90,49 | 100,35 | 93,40 | 83,83 | 84,85 | 79,32 | 90,46 | 7,38 |
| 4 | 81,50 | 84,68 | 76,68 | 83,13 | 79,91 | 75,21 | 74,90 | 68,05 | 78,01 | 5,06 |
| 5 | 93,16 | 87,59 | 89,84 | 70,74 | 74,27 | 68,63 | 66,14 | 58,11 | 76,06 | 11,85 |
| Média | 98,26 | 99,36 | 101,53 | 101,40 | 94,31 | 91,57 | 91,21 | 82,92 | - | - |
| DP | 14,03 | 12,38 | 22,60 | 26,15 | 18,27 | 21,96 | 23,37 | 19,10 | - | - |
| TCH na forma convexa | | | | | | | | | | |
| 1 | 120,42 | 123,92 | 125,76 | 132,28 | 130,02 | 124,65 | 129,22 | 128,70 | 126,87 | 3,86 |
| 2 | 96,41 | 109,43 | 110,36 | 107,65 | 97,44 | 98,41 | 93,94 | 97,48 | 101,39 | 6,59 |
| 3 | 91,90 | 97,55 | 95,90 | 107,21 | 86,57 | 81,83 | 80,34 | 71,10 | 89,05 | 11,42 |
| 4 | 93,92 | 89,40 | 81,25 | 82,74 | 82,55 | 80,13 | 82,07 | 69,97 | 82,75 | 6,99 |
| 5 | 85,16 | 66,67 | 64,09 | 78,56 | 74,43 | 63,36 | 62,52 | 78,91 | 71,71 | 8,66 |
| Média | 97,56 | 97,39 | 95,47 | 101,69 | 94,20 | 89,68 | 89,62 | 89,23 | - | - |
| DP | 13,44 | 21,54 | 24,12 | 21,77 | 21,67 | 23,16 | 24,82 | 24,66 | - | - |

Forma côncava n - 280 observações; Forma convexa n - 280 observações; DP – desvio-padrão.

No mês de abril, a forma côncava foi 0,72% superior em TCH à forma convexa, 2,02% superior em maio, 6,35% em junho, 0,12% em agosto e 2,11% em setembro. Considerando-se o número de cortes, a cana-de-açúcar de 1° corte na forma côncava foi 1,77% superior à cana de 1° na forma convexa, 0,78% superior no 2° corte, 1,41% superior no 3° corte e 4,35% no 5° corte. Considerando todos os meses e o número de cortes, o TCH da forma côncava (95,07) foi 0,71% superior em relação à forma convexa (94,36).

Para Pol, os resultados da quadrícula também foram condizentes com o modelo da área-piloto (Pol da forma côncava < Pol da forma convexa). No mês de abril, a forma convexa foi 3,3% superior em Pol à forma côncava, 5,5% superior em junho, 2,8% em julho e 3,5% em novembro. Considerando o número de cortes, a cana-de-açúcar de 1° corte na forma convexa foi 3,1% superior à cana de 1° na forma côncava, 0,9% superior no 3° e 4° cortes, e 1,3% superior no 5° corte. Considerando todos os meses e o número de cortes, o Pol da forma convexa (14,13) foi 1,2% superior em relação à forma côncava (13,96).

Para os meses mais secos do ano (maio, junho e julho), a área côncava (100,76 ton ha⁻¹) apresentou valores de TCH 2,6% superiores aos da área convexa (98,18 ton ha⁻¹). Isso é devido à área côncava apresentar maior capacidade de armazenamento de água no perfil do solo. Para os meses mais secos do ano (maio, junho e julho), a área convexa (13,73) apresentou valores de Pol 2,2% superiores aos da área côncava (13,43). Conforme a hipótese de extrapolação, nem sempre os locais de maior produtividade são, necessariamente, os locais com melhores características industriais como Pol.

A identificação de macrorregiões na quadrícula com maior presença de formas convexas, caracterizadas por melhor índice industrial, pode balizar o planejamento logístico das frentes de colheita, por exemplo. Siqueira et al. (2010a), trabalhando com produtividade e índices industriais da laranja, e Pollo (2013), trabalhando com produtividade e índices qualitativos da bebida de café, também encontraram melhores resultados de produtividade na forma côncava.

O modelo de resposta da cana-de-açúcar para Pol e produtividade, com base nas formas do relevo, apresentou, em média, acerto de 55% para produtividade (TCH) e 64% para Pol (Tabela 4 e Figura 7).

Tabela 4. Porcentagem de acerto do modelo proposto por Sanchez (2007) (Pol: CX> CC; Produtividade CC > CC), considerando observações de produtividade e Pol da cana-de-açúcar em 20.000 há, entre o período de 2008 e 2014 (n = 280 comparações em cada forma da paisagem).

| Corte | Meses | | | | | | | |
|---|-------|------|-------|-------|--------|----------|---------|----------|
| | Abril | Maio | Junho | Julho | Agosto | Setembro | Outubro | Novembro |
| Porcentagem de acerto do modelo proposto para Pol (CX> CC) | | | | | | | | |
| 1 | 50 | 57 | 100 | 100 | 75 | 75 | 100 | 100 |
| 2 | 75 | 43 | 71 | 50 | 60 | 33 | 60 | 100 |
| 3 | 60 | 43 | 43 | 50 | 60 | 60 | 40 | 100 |
| 4 | 33 | 50 | 67 | 50 | 100 | 75 | 83 | 67 |
| 5 | 67 | 80 | 75 | 40 | 20 | 25 | 50 | 75 |
| Porcentagem de acerto do modelo proposto para Produtividade (CC > CX) | | | | | | | | |
| 1 | 100 | 43 | 100 | 75 | 50 | 75 | 67 | 67 |
| 2 | 100 | 43 | 57 | 33 | 40 | 67 | 60 | 40 |
| 3 | 40 | 71 | 29 | 50 | 60 | 40 | 60 | 20 |
| 4 | 33 | 33 | 33 | 50 | 20 | 50 | 33 | 83 |
| 5 | 100 | 60 | 50 | 100 | 20 | 25 | 50 | 75 |

CC - forma côncava; CX - forma convexa.

Os maiores percentuais de acerto foram no 1° corte, tanto para TCH (72%) quanto para Pol (82%). Muitos estudos mostram que a qualidade industrial da matéria-prima cana-de-açúcar é superior em períodos mais secos. A diminuição da umidade no solo, ou uma seca moderada, ocasiona estresse fisiológico na planta, que por sua vez está relacionado com o processo de maturação da cana e favorece o acúmulo de açúcares nos colmos, elevando o teor de sacarose, principalmente na parte basal do colmo (SANTOS; CARLESSO, 1998).

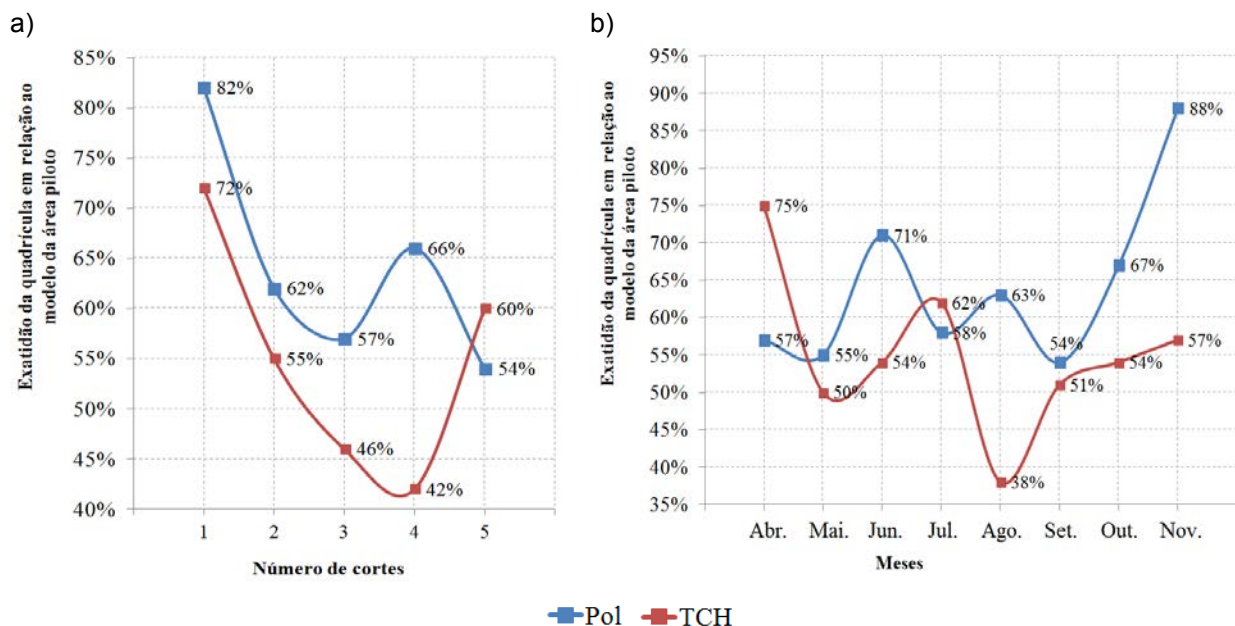


Figura 7. Média da porcentagem de acerto do modelo de produtividade e qualidade da cana-de-açúcar em função das formas do relevo, considerando número de cortes (a) e meses do ano (b).

Análise comparativa considerando a utilização da forma da paisagem para o planejamento das atividades agrícolas, indica ganho de até 27,0% em tonelada de açúcar por hectare (TAH), em relação à média regional (Tabela 5).

Tabela 5. Análise comparativa, considerando diferentes estratégias de planejamento agrícola, para uso e ocupação do solo.

| Estratégia de planejamento agrícola para uso e ocupação do solo ^a | TAH | Custos com adubação (US\$ ha ⁻¹) ^b | Comparativo da média de TAH da Usina São Domingos em relação à média regional ^c |
|--|------|---|--|
| 1 | 13,9 | 219,5 | 5,0% |
| 2 | 13,3 | 191,3 | 16,0% |
| 3 | 14,6 | 131,0 | 27,0% |

a - cenários calculados a partir de dados reais da Usina São Domingos entre o período de 2003 e 2007, e 2008 e 2012; b - dados retrabalhados de Sanchez (2007); c - *benchmarking* interno; TAH - tonelada de açúcar por hectare; 1 - planejamento convencional; 2 - planejamento considerando modelagem matemática, conforme proposto por Sanchez (2007); 3 - planejamento considerando a forma do relevo.

O planejamento agrícola, baseado nas formas do relevo, promoveu aumento de 0,7 TAH e economia em adubação de US\$ 88 ha⁻¹. O mapeamento de curvaturas,

formas do relevo para caracterizar regiões com diferentes potenciais de produtividade (TCH) e qualidade (Pol), pode auxiliar no gerenciamento localizado da cultura e nas tomadas de decisões, proporcionando entre, outras vantagens, a redução do custo por unidade produzida (RIPOLI; RIPOLI, 2004). A localização das áreas onde os valores de Pol e TCH estão abaixo do ideal, possibilita a identificação de fatores ambientais que estão atuando nos resultados destes índices e podem definir o manejo mais adequado a essas áreas. Com maior homogeneização dos valores de Pol da área, poder-se-á obter maior rendimento industrial e agrícola da matéria-prima.

Os resultados de TCH e Pol encontrados para áreas côncavas e convexas mostram que a segmentação da paisagem pode auxiliar nas principais operações agrícolas do setor sucroenergético, com destaque para os modelos de planejamento de plantio, colheita e arrendamento da terra. No caso do planejamento de plantio e colheita, com base nos resultados, melhores ganhos econômicos são esperados para plantio de variedades precoces, seguido de colheita antecipada na forma convexa, e plantio de variedades médias e/ou tardias, seguido de colheita tardia na forma côncava.

No Estado de São Paulo, o arrendamento da terra tem sido o principal motivo do aumento de áreas ocupadas por cana-de-açúcar. No arrendamento, o proprietário da terra cede a área para produção de cana-de-açúcar por tempo determinado e valor estipulado em contrato (FICARELLI; RIBEIRO, 2010). A segmentação da paisagem pode auxiliar na definição de contratos de arrendamento e planejamento estratégico de regiões com maior valor de arrendamento. Áreas localizadas na forma convexa teriam maior valor da terra do que áreas localizadas na forma côncava, em relação à qualidade da matéria-prima (maior Pol), por exemplo.

2.4 Conclusão

A assinatura geomorfométrica foi eficaz na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e de qualidade da cana-de-açúcar. A suscetibilidade magnética pode ser utilizada como ferramenta alternativa no campo para auxiliar na identificação dessas áreas com diferentes potenciais agronômicos para cana-de-açúcar.

2.5 Referências

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.

BARRIOS, M. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JÚNIOR, N. Magnetic susceptibility to identify landscape segment on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1.073-1.082, 2012.

BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System**. 2013. Disponível em: <<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>>. Acesso em: 22 de abr. 2015.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. de, BARBIERI, D. M. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana-planta utilizando técnicas geoestatísticas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 974-980, 2008.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clays Minerals**, Aurora, v. 47, n. 4, p. 466-473, 1999.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. Z. **Geomorphology**, Berlin, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DANIELS, R. B.; GILLIAN, J. W.; CASSEL, D. K.; NELSON, L. A. Quantifying the effected of past soil erosion on present soil productivity. **Journal Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 42, n. 3, p.183-187, 1987.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**: Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994. 104 p.

FICARELLI, T. R. A., RIBEIRO, H. Dinâmica do arrendamento de terras para o setor sucroalcooleiro: estudo de casos no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 40, p. n. 1, p. 44-54, 2010.

HANESCH, M.; STANJEK, H.; PETERSEN, N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: The role of organic carbon. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 165, n. 1, p. 53–61, 2006.

HOERSCH, B.; BRAUNB, G.; SCHMID, U. Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. **Computers, Environment and Urban Systems**, Oxford, v. 26, n. 2-3, p. 113–139, 2002.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**, São Paulo: IPT, 1981. 94 p.

JENNY, H. **Factors of Soil Formation**: a System of Quantitative Pedology. New York: Dover Publications, 1941. 288 p.

LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **HydroSHEDS Technical Documentation**. Washington: U.S. Geological Survey, 2006. 26 p.

MAHER, B. A.; THOMPSON, R. Palaeomonsoons I: the magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences. In: _____. (Ed.). **Quaternary climates, environments and magnetism**. Cambridge: University Press, 1999. p. 81–125.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014a.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014b.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 5, p. 542-552, 2012.

POLLO, G. Z. **Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo específico na cultura do café**. 2013. 58 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Qualidade da cana-de-açúcar e seu impacto na indústria. In: _____. (Ed.). **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Ed. Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2004. p. 185–193.

ROCKSTROM, J. A.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN, S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S. V. D.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. Safe operating space for humanity. **Nature**, London, v. 461, p. 472-475, 2009.

SANCHEZ, M. G. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; PEREIRA, G. T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, n. 2, p. 201-214, 2012.

SANCHEZ, R. B. **Agricultura de precisão em argissolos com variações nas formas do relevo sob o cultivo de cana-de-açúcar**. 2007. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 873-884, 2009.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e Fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J. W.; GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Eds.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1988. p. 267–308.

SERRANO, L.; USTIN, S. L.; ROBERTS, D. A.; GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J. Deriving Water Content of Chaparral Vegetation from AVIRIS Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 74, n. 3, p. 570–581, 2000.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Infrared spectroscopy – enabling an evidence based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 15, n. 1, p. 1-19, 2007.

SILVA JÚNIOR, J. F.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. T.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro em diferentes pedoformas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1.690-1.703, 2012.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 1-2, p. 55-66, 2010a.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Chichester, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010b.

SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. **Geophysical Research Letters**, Hoboken, v. 30, n. 9, p. 1.467, 2003.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**: a basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys. 1^a ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 1975. 869 p.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, M. L. M. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 5, p. 812-816, 2011.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurements of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). **Soil color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 21-33.

TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BLOEMENDAL, J.; BARRÓN, V. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess – paleosol sequence, Chinese Loess Plateau. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 5, p. 1570-1578, 2007.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 263, n. 7, p. 616-627, 1965.

USTIN, S. L.; ROBERTS, D. A.; GAMON, J. A.; ASNER, G. P.; GREEN, R. O. Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. **BioScience**, Cary, v. 54, n. 6, p. 523-534, 2004.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JR, O. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelo de Evolução Pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 197-212, 2013.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 100, n. B-2, p. 2175–2192, 1995.

ZINCK, J. A. **Soil Survey**: Perspectives and Strategies for the 21st Century. 1992. Disponível em: < http://books.google.com.br/books?id=tXWm_PBOE_cC&lpg=PA77&ots=mQiJKdPyc1&dq=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&hl=ptBR&pg=P1#v=onepage&q=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&f=false>. Acesso em: 24 abr. 2015.