

## Classificação de atributos topográficos para distinção de propriedades físico-hídricas e termodinâmicas do solo

Kenny Delmonte Oliveira<sup>1</sup>  
Allys Larissa Amiti Fagundes Kapiche<sup>2</sup>  
Tassia Alves Costa<sup>1</sup>  
Ieda Del'Arco Sanches<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{kenny.oliveira, tassia.costa, ieda.sanches}@inpe.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista - UNIP  
CEP 12240-420 - São José dos Campos - SP, Brasil  
allys\_larissa@hotmail.com

**Abstract.** The aim of this study was to perform a thematic classification of pedological classes with soil hydro-physical-thermodynamic properties for the south of the Espírito Santo state. The first stage of the research consisted of acquiring a Digital Elevation Model - MDE and products derived from it, as well as climatic variables related to pedogenesis. The dimensionality of the data was reduced with multivariate analysis techniques. The second stage was based on the unsupervised classification by IsoData and Maximum Likelihood. Products that characterize edaphic classes with distinct hydro-physical properties has been of great importance in the use of hydrological models, among other purposes. It should be emphasized that the design of the soil pedological landscape classes did not follow the usual soil classification. The idea was to delimit unnamed areas with similar hydro-physical-thermodynamic characteristics. This was certainly achieved since there was an intrinsic correlation of the final variables selected with these properties, linked to the following physical processes: lateral flow gradient and acceleration toward water bodies, local climatic gradient, water flow convergence and divergence, soil water content, energy potential, soil moisture spatial distribution, saturation zone prediction, and lateral flows subsurface acceleration by the relief slope gradient. By the proposed classification, it was obtained 7 landscapes classes representative of the soil properties concerning the hydraulic and thermal characteristics.

**Palavras-chave:** pedology, geotechnologies, unsupervised classification, pedologia, geotecnologias, classificação não supervisionada.

### 1. Introdução

A topografia está fortemente relacionada com outras variáveis pedogenéticas, como material de origem, clima, atividade biótica, idade dos solos (Jenny, 1980), fluxo lateral de superfície e subsuperfície, regime de temperatura e radiação solar incidente, dinâmica de vegetação, dinâmica temporal de umidade, entre outras. Esta se apresenta eficiente na avaliação da distribuição espacial e organização das propriedades pedológicas, já que a hidrologia e geomorfologia são processos motores na formação do solo. Portanto, as características do terreno são as variáveis ambientais mais comumente empregadas na complementação dos dados de solo, pois representam o comportamento hidráulico e as condições ambientais locais (Romano e Chirico, 2004).

Tricart (1968), após análise dos fatores morfológicos e pedogenéticos, afirma que apenas os estudos litológicos, de forma isolada, são insuficientes para explicar o processo de formação dos solos, sendo necessária a consideração dos elementos climáticos.

Demattê et al. (2004) comparam o método tradicional e técnicas espectrais por sensoriamento remoto para obtenção de mapas de solo, concluindo que dados espectrais podem ser utilizados como instrumento neste tipo de classificação. Abreu e Pena (2013) propuseram metodologias para definição de classes de solo com uso de classes de infiltração máxima e permeabilidade. Pineda (2008) utilizou o descritor de terreno HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – desnível acima da drenagem mais próxima), que se baseia apenas na

direção de fluxo (área de contribuição) e na rede de drenagem (distância euclidiana), para gerar mapas detalhados de classes de solo. Carvalho Junior et al. (2011) utilizaram algoritmos de classificação por máxima verossimilhança e redes neurais artificiais, para classificação de unidades pedológicas baseando-se em um conjunto de variáveis geomorfológicas.

Técnicas espectrais para obtenção de mapas de solo por sensoriamento remoto estão limitadas a áreas com ausência de cobertura do solo sendo, portanto, possíveis apenas em locais de solo exposto. Considerando a ausência de variáveis físico-hídricas nos relatórios técnicos de levantamento dos perfis dos solos, pela classificação tradicional (Otoni, 2005), e devido às numerosas restrições impostas à obtenção de informações edáficas, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a obtenção de um mapa temático representativo das propriedades físico-hídricas e termodinâmicas dos solos com uso de variáveis de fácil obtenção.

## 2. Metodologia de Trabalho

O local do estudo compreende o sul do Estado do Espírito Santo, situado entre as coordenadas de  $-19^{\circ}15'$  e  $-21^{\circ}17'$  de latitude e  $-41^{\circ}54'$  e  $-39^{\circ}38'$  de longitude (Figura 1).



Figura 1. Localização da área de estudo.

Para melhor compreensão, as etapas de preparação da representação matricial de pedopaisagens foram subdivididas da seguinte forma: (a) aquisição dos dados para obtenção dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos; (b) elaboração dos parâmetros topográficos e climáticos pedogenéticos; (c) análise de componentes principais; e (d) classificação das pedopaisagem por isodata e máxima verossimilhança.

Após uma análise prévia das alternativas de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) passíveis de uso, adotou-se o *Global Digital Elevation Model (GDEM2)*, oriundo do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*. Por meio do MDE, foram derivadas informações que apresentam forte significado na descrição de propriedades ambientais e processos ativos da paisagem. Os atributos primários e secundários para a classificação das pedopaisagens foram obtidos com base em Romano e Chirico (2004), Florinsky et al. (2002) e Wilson e Gallant (2000) (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos topográficos primários e secundários do relevo.

Atributo	Definição	Processo físico ou variável ao qual se encontra correlacionado
Altitude	Elevação acima o nível do mar.	Gradiente climático local, padrões vegetacionais, potencial energético.
Declividade	Ângulo entre o plano horizontal e um plano tangencial para a superfície do terreno.	Velocidade do fluxo superficial, subsuperficial e lateral, taxa de escoamento, precipitação, vegetação, geomorfologia, conteúdo de água no solo, classe de aptidão do solo.
Declive de Captação	Inclinação média ao longo da bacia hidrográfica.	Tempo de concentração.
Área de Captação	Área de drenagem para saída de captação.	Volume de escoamento superficial.
Comprimento do Caminho de Fluxo	Distância máxima de fluxo de água para um ponto na área de captação.	Taxa de erosão, produção de sedimento, tempo de concentração.
Curvatura do Perfil	Curvatura da superfície do terreno na direção identificada pelo ângulo do aspecto.	Aceleração dos fluxos laterais a jusante, taxa de erosão e deposição, geomorfologia.
Curvatura Plana	Contorno da curvatura.	Convergência/divergência do fluxo, conteúdo de água no solo, características do solo.
Curvatura Tangencial	Curvatura da superfície do terreno na direção ortogonal que é identificada pelo ângulo do aspecto	Fornecer medida alternativa de convergência e divergência do fluxo local lateral, taxa de acumulação lateral.
Aspecto	Ângulo horário do norte da projeção do vetor normal à superfície do terreno no plano horizontal.	Direção de fluxos laterais, intensidade relativa da radiação solar.
Índice Topográfico de Umidade	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right)$	Descrição da distribuição espacial do índice de umidade e extensão das zonas de saturação para geração de escoamento como uma função do declive da área de contribuição. Previsão de zonas de saturação tipicamente em segmentos convergentes da paisagem.
Radiação Solar	Proporção da incidência de radiação solar extraterrestre sobre uma superfície local inclinada em relação a uma superfície horizontal de uma determinada latitude e longitude.	Variabilidade relativa da taxa de evapotranspiração, exposição do terreno, disponibilidade de energia.
Índice de Energia do Fluxo	$\alpha \tan(\beta)$	Medida do poder erosivo da água que flui com base na suposição de que a descarga (q) é um índice proporcional à área de captação específica ( $\alpha$ ). Prevê erosão líquida em áreas de perfil que apresentam convexidade e concavidade tangencial (aceleração do fluxo e zonas de convergência) e deposição em áreas de perfil côncavo (zonas de diminuição da velocidade do fluxo).
Fator LS	$LS = 0,00984L^{0,63}D^{1,18}$ em que: L = Comprimento de rampa D = Declividade	Este índice de capacidade de transporte de sedimentos foi derivado da teoria de unidade "stream power" e é equivalente ao fator da EUPSR em determinadas circunstâncias. Utilizado também para prever os locais de erosão e áreas de deposição.
Fator LS	$LS = 0,00984L^{0,63}D^{1,18}$ em que: L = Comprimento de rampa D = Declividade	Este índice de capacidade de transporte de sedimentos foi derivado da teoria de unidade "stream power" e é equivalente ao fator da EUPSR em determinadas circunstâncias. Utilizado também para prever os locais de erosão e áreas de deposição.

Continua

Tabela 1 - Atributos topográficos primários e secundários do relevo.

Continua

Atributo	Definição	Processo físico ou variável ao qual se encontra correlacionado
Relevo Relativo	Característica de drenagem da paisagem.	A razão entre a diferença de altitudes em um determinado ponto na superfície do solo e o ponto mais baixo de um divisor de águas para a diferença de altitudes entre o mais alto e o mais baixo ponto de uma bacia hidrográfica.
Distância Euclidiana	Descreve a relação de cada célula do raster com uma fonte específica, a qual foi definida como a rede de drenagem.	Associado com outros atributos permite inferir a influência da proximidade desses à fonte selecionada. Como exemplo cita-se a ocorrência de regiões com maior deficiência de drenagem quando próximas a fonte (rede de drenagem) ou menor disponibilidade hídrica, quando distante da fonte.

Optou-se por suplementar os fatores de formação do solo com as variáveis climáticas pedogenéticas precipitação e temperatura. Porém, ressalta-se que como explicado por Böhner e Selige (2006), estes são parâmetros de uso casual, portanto busca-se por sua inclusão, considerar a possibilidade da promoção de um efeito positivo na identificação de padrões espaciais de parâmetros do solo quando submetidos a um critério de classificação, mesmo que sob pena de se ter uma representatividade apenas superficial do paleoclima regional. Os dados meteorológicos foram obtidos do trabalho desenvolvido por Castro (2008), que utilizou séries históricas de um período de 30 anos (1977 – 2006) de variáveis climáticas em escala anual de tempo.

## 2.1 Análise Multivariada para Redução da Dimensionalidade dos Dados

O elevado número de parâmetros envolvidos na predição das pedopaisagens, e as derivações oriundas, em sua grande maioria, diretamente do MDE, foram os fatores motivacionais para aplicação da Análise de Agrupamento (AA) e da Análise de Componentes Principais (ACP), objetivando a remoção dos atributos topográficos redundantes.

Considerou-se conveniente o controle das escalas pela padronização dos dados para média 0 e desvio padrão igual a 1, sendo dessa forma utilizada para a ACP a matriz de correlação (R). A remoção das variáveis menos explicativas foi realizada utilizando a AA, seguida pela ACP, para remoção da variável menos explicativa dentro de cada grupo formado pela primeira técnica.

Dos métodos propostos por Jolliffe (1972, 1973), para a redução do número de variáveis na ACP, decidiu-se pela escolha do método dinâmico baseado em componentes principais. Na AA, após a obtenção da matriz de distância euclidiana média entre as variáveis, aplicaram-se sete diferentes regras de amalgamação para AA, visando identificar a de melhor desempenho, sendo estas: *Single Linkage*, *Complete Linkage*, *Unweighted pair-group average*, *Weighted pair-group average*, *Unweighted pair-group centroid*, *Weighted pair-group centroid (median)* e *Ward's method*.

Para medir o grau de ajuste entre a matriz original de distância (matriz fenética) e as resultantes do processo de agrupamento (matriz cofenética) dos testes adotados, utilizou-se o Coeficiente de Correlação Cofenética (CCC), que avalia o grau de deformação provocado pela construção do dendograma. Um CCC inferior a 0,7 indica inadequação do método de agrupamento (Valentin, 2012).

A definição do número de grupos ideal na AA foi realizada com auxílio de um gráfico de distâncias das ligações da matriz de dissimilaridade, que identifica descontinuidades naturais em termos de distância (Vicini e Souza, 2005).

### 3. Resultados e Discussão

Uma das principais intensões na aplicação da metodológica de geração das classes de pedopaisagem consistiu na identificação e seleção de um número mínimo de produtos que se enquadrassem na descrição e cumprisse com os propósitos citados por Romano e Chirico (2004), uma vez que é visível o apelo para que estas propostas sejam continuadas e novas iniciativas nesta direção sejam tomadas.

Além do MDE, dificilmente encontra-se tão prontamente disponível um produto que reúna tantos requisitos necessários ao cumprimento do objetivo proposto, dos quais se citam: a facilidade de acesso, resolução espacial e precisão dos dados, diversidade em funcionalidade e usabilidade, e, sobretudo, derivação em níveis categóricos de subprodutos com propriedades distintas e descritivas do terreno. Entende-se, porém, que se por um âmbito o grande número de atributos que podem ser derivados do MDE constitui vantagem, por outro, a redundância quanto suas origens pode certamente implicar em desvantagem pelo seu uso conjunto na busca de variabilidade máxima de cada produto.

Para contornar o problema associado aos subprodutos derivados do MDE, a utilização da AA apresentou-se eficiente para separação de grupos com elevada redundância, seguida da seleção da variável mais explicativa, dentro de cada grupo, por meio da ACP.

O ponto de corte no dendrograma para a determinação do número de grupos, formados pelas 17 variáveis, foi embasado no gráfico de distância das ligações da matriz de dissimilaridade (Figura 2, A), sendo realizado no maior salto entre grupos. A escolha do primeiro ou do segundo maior salto contraria o objetivo de redução de massa, já que incluiriam muitas variáveis, formando 16 grupos no primeiro e 15 no segundo corte, de um total de 17 variáveis. Portanto, optou-se pela escolha do terceiro maior salto, com distância de ligação de 1,29, obtendo-se 7 grupos, o que resultou na remoção de 10 variáveis. A amplitude máxima na distância de ligação entre grupos, obtida pela matriz de dissimilaridade plotada no dendrograma (Figura 2, B) foi de 1,48, fazendo distinção entre os pares mais distantes, compreendidos pelas variáveis índice de energia do fluxo e área de captação modificada correspondentes aos segmentos do dendrograma 10 e 13 e fator *ls* e declividade correspondentes aos segmentos 6 e 7, sendo estas últimas as variáveis de maior redundância com uma variação de apenas 0,17 de distância de ligação, ou 11,55% de dissimilaridade.

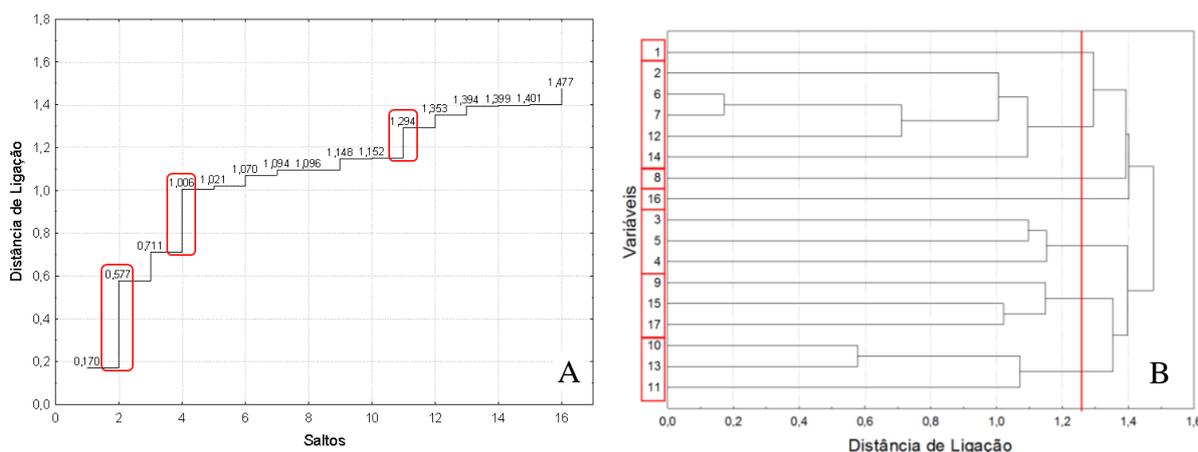


Figura 2: Distância das ligações da matriz de dissimilaridade (A) e dendrograma da análise de agrupamento dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos.

Segundo a ordem de remoção das variáveis (Tabela 2), foram selecionados o índice topográfico de umidade, aspecto, MDE, curvatura plana, precipitação, distância euclidiana e curvatura do perfil.

Tabela 2: Ordem de remoção dos atributos pedológicos.

Grupos da AA	Variáveis*	Descrição	Ordem de Remoção pela ACP
1	1	Distância Euclidiana	NR <sup>*1</sup>
	2	Relevo Relativo	8
	6	Fator LS	9
2	7	Declividade	7
	12	Declive de Captação Modificada	3
	14	Modelo Digital de Elevação	12 <sup>*k</sup>
3	8	Aspecto	6 <sup>*k</sup>
4	16	Curvatura Plana	11 <sup>*k</sup>
	3	Precipitação	15 <sup>*k</sup>
5	5	Radiação Solar	13
	4	Temperatura	14
6	9	Comprimento do Caminho de Fluxo	5
	15	Curvatura Tangencial	10
	17	Curvatura do Perfil	NR <sup>*2</sup>
7	10	Índice de Energia do Fluxo	1
	13	Área de Captação Modificada	2
	11	Índice Topográfico de Umidade	4 <sup>*k</sup>

\*Para melhor disposição, a ordenação das variáveis segue a sequência do dendrograma.

\*Última variável removida dentro do grupo e, portanto, selecionada para classificação do mapa de pedopaisagens.

<sup>1-2</sup> Variáveis mais explicativas pela ACP e “Não Removidas” por empate no método.

As sete variáveis selecionadas foram submetidas à classificação não supervisionada por *Iso Cluster* e Máxima Verossimilhança. Presenciou-se uma representação irrealista de classes pedológicas do solo por consequência do uso da variável Aspecto, acarretando em um elevado número de feições de dimensão diminuta quando comparado ao mapa temático de solos por análise das classes pedológicas quanto a sua alocação, distribuição, abrangência e padrões de ocorrência; portanto, essa variável foi removida do grupo inicialmente selecionado para classificação. Após nova simulação com exclusão da variável Aspecto, identificaram-se no, representações irrealistas provenientes de fortes tendências à geração de classes com padrões da variável Precipitação, justificando-se também sua remoção. Por fim, a simulação seguinte revelou-se estar em conformidade com os padrões naturais das classes edáficas, notando-se a presença de regiões com elevada propensão de representação de certas classes de solo definidas pelo método convencional de classificação dos solos (Figura 3).

Ressalta-se que a intensão na elaboração das classes de pedopaisagens do solo não foi a definição de classes pedológicas como usualmente tem sido feito, mas sim o delineamento de áreas inominadas com características físico-hídricas e termodinâmicas semelhantes, o que foi certamente alcançado pela intrínseca correlação da seleção final das variáveis com tais características, com base nos seguintes processos físicos: gradiente de fluxo lateral e aceleração em direção aos corpos d'água, gradiente climático local, convergência e divergência de fluxo d'água, conteúdo de água no solo, potencial energético, distribuição espacial da umidade, previsão de zonas de saturação, e aceleração dos fluxos laterais pelo gradiente natural do relevo.

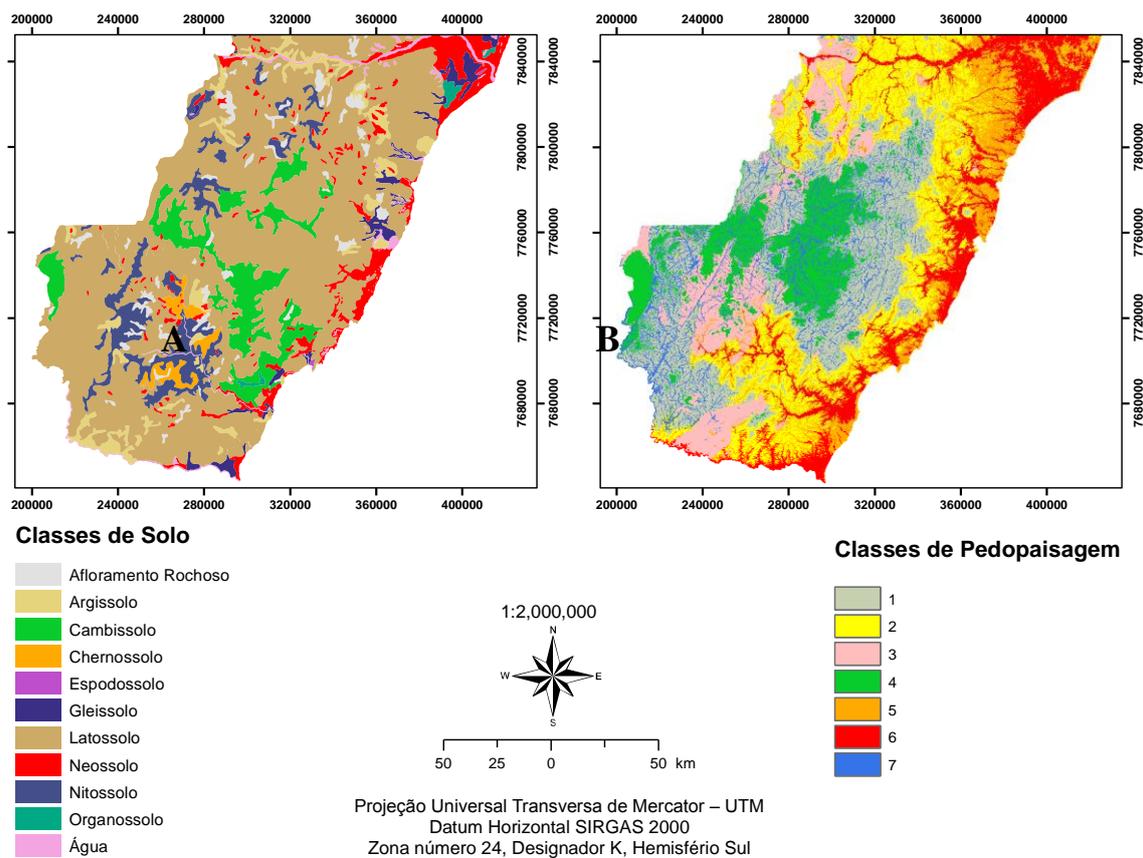


Figura 3: Mapa de classes de solo (A) e de pedopaisagem (B) do Sul do Espírito Santo.

#### 4. Conclusões

As camadas matriciais de caráter edáfico mostraram-se representativas da variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas e termodinâmicas para tematização de classes categóricas do mapa de pedopaisagem.

O uso de técnicas de análise de agrupamento associada a componentes principais mostrou-se eficiente para eliminação de variáveis redundantes.

Para o presente estudo a altitude mostrou-se como variável de maior importância devido ao grande número de variáveis que podem ser derivadas dessa e por ser um produto de fácil aquisição e sem ônus.

#### Referências Bibliográficas

BÖHNER, J.; SELIGE, T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, [S.L.], v. 15, p. 13-27, 2006.

CARVALHO JUNIOR, W. de; CHAGAS, C. da S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 68, n. 6, 691-696 p., nov./dec. 2011.

CASTRO, F. da S. **Zoneamento Agroclimático para a cultura do *Pinus* do Estado do Espírito Santo**. 2008. Dissertação (Mestre em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, 2008.

DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação de mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. *Revista Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 12, 1219-1229 p., dez. 2004.

FLORINSKY, I. V.; EILERS, R. G.; MANNING, G. R.; FULLER, L. G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modelling & Software*, v. 17, 295-311 p., 2002.

- JENNY, H. **The soil resource, origin and behaviour**. Springer-Verlag, New York, 1980.
- JOLLIFFE, I. T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 21, n. 2, 160-173 p, 1972.
- JOLLIFFE, I. T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. II: Artificial Data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 22, n. 1, 21-31 p, 1973.
- OLIVEIRA, M. M.; LOBO FERREIRA, J. P. C. **Proposta de uma metodologia para definição de áreas de infiltração máxima**. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 6., Porto: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. 2002.
- OTTONI, M. V. **Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo *in situ* a partir de testes de infiltração**. 141 p. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.
- PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- ROMANO, N.; CHIRICO, G. B. The role of Terrain Analysis in using and Developing Pedotransfer Functions. **Developments in Soil Science**, v. 30, 2004.
- TRICART, J. As relações entre a morfogênese e a pedogênese. **Notícia Geomorfológica**, Campinas-SP, 8 (15) : p.5-18, jun. 1968.
- VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.
- VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise multivariada da teoria à prática**. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Santa Maria. 2005.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc. jan./2000. ISBN 0-471-32188-5.