

DOI: 10.33947/1981-741X-v21n2-5015

PREDIÇÃO DE SOLOS MOLES NO BRASIL: ELABORAÇÃO DE UMA CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO**PREDICTION OF SOFT SOILS IN BRAZIL: ELABORATE OF A CLASSIFICATION KEY**Leilson Alves dos Santos¹, Rodrigo Affonso Albuquerque Nóbrega¹, Adriana Monteiro Costa¹**RESUMO**

O conhecimento das características do solo é imprescindível para o planejamento territorial. Embora os solos possuam diversas propriedades que possam levar à sua classificação como solos moles, na prática estes são conhecimentos técnicos, até o momento, tratado restritamente no campo da Geotecnia. Assim, os projetos de infraestrutura, em especial de transporte, com rodovias e ferrovias, tradicionalmente são os grandes demandadores de informações sobre a ocorrência de solos moles, seja pela abrangência geográfica das vias ou pela necessidade de identificar locais com solos apropriados para receber a infraestrutura viária e o material rodante. Neste trabalho, objetivou-se a elaboração de um mapa preditivo do potencial de ocorrência de solos moles para o Brasil. Para tal, inicialmente foi conduzida uma revisão bibliográfica a fim de identificar as principais características dos solos moles; seguida da correlação destas com as características físicas, químicas e mineralógicas das classes de solos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Com os resultados dessa análise primária, uma chave classificatória foi construída para estimar o potencial preditivo de ocorrência de solos moles a partir de dados pedológicos. Para tanto, mapas de solos do Brasil e do Estado de Goiás, em escalas de 1:5.000.000 e 1:250.000, respectivamente, foram utilizados. A validação dos dados contou com 1.470 pontos amostrais de campo no trecho da ferrovia Norte-Sul no Estado de Goiás entre os municípios de São Simão e Quirinópolis. Como resultados obteve-se duas classes de Potencial de Ocorrência de Solos Moles no território brasileiro: Baixo e Alto Potencial de ocorrência, sendo que a primeira classe engloba os solos com maior estabilidade física, bem drenados, bem desenvolvidos e com baixo teor de minerais primários e ausência de minerais expansivos representados pelos Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Planossolos e Plintossolos. Já a segunda classe de Alto Potencial compreende os solos hidromórficos, com alto teor de matéria orgânica, presença de minerais primários do tipo 2:1 e expansivos e os solos arenosos, esta classe agrupa os Cambissolos, Chernossolos, Espodossolo, Gleissolos, Luvissolos, Neossolo, Organossolos, Vertissolos. Os resultados demonstram, ainda, que a ponte de conhecimentos entre a Pedologia e a Geotecnia permitiu construir um modelo capaz de prover uma informação preditiva sobre solos moles, que embora limitado à escala do dado, cobre uma importante lacuna até então existente no planejamento de transportes.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento. Solos. Classificação. Geotecnia.**ABSTRACT**

The knowledge of the soil characteristics is vital for land planning. Although soils have several characteristics that can lead to their classification as soft soils, so far in practice, this concept is limited to Geotechnics. Notwithstanding, critical infrastructure projects, especially transport, such as roads and railways, are great demanders of information regarding the occurrence of soft soils because of the roads' geographic scope or the need to identify locations with suitable soils to receive the road infrastructure and the vehicles. The objective of this study was to prepare a predictive map of the potential for the occurrence of soft soils in Brazil. The investigation started with an in-depth literature review seeking to identify the main characteristics described as soft soils, followed by their correlation with the physical, chemical, and mineralogical characteristics of the Brazilian Soil Classification System (SiBCS) soil classes. Then, a classification lookup table was elaborated to translate the potential for soft soils from the soil database. Thus, using the pedological maps of Brazil and the State of Goiás, at scales of 1:

¹ Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (BR). raanobrega@ufmg.br; drimonteiroc@gmail.com.

Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. leylson.santos@gmail.com

5.0000.000 and 1:250.000, respectively, the potential for soft soils for the areas was spatialized. Data validation included 1,470 samples along the North-South railroad within the state of Goiás between Sao Simao and Quirinopolis. As a result, a map was generated containing two classes of Occurrence Potential of Soft Soils in Brazilian territory: Low and High Occurrence Potential. The low potential class encompassing soils with great physical stability, well-drained, well developed, and low primary mineral content, and absence of expansive minerals are represented by Oxisols, Argissolos, Nitosols, Planosols, and Plintosols. The high potential class comprises hydromorphic soils, with a high degree of organic matter content, primary minerals of the 2:1 and expansive type, and sandy soils; Neosols, Organosols, Vertisols. Findings show that bridging Soil Sciences and Geotechnics allowed the construction of a model capable of providing predictive information on soft soils. The model is limited to the map scale; however, it covers a significant gap that existed until then in transport planning.

KEYWORDS: Mapping. Soils. Classification. Geotechnical.

INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre solos tem despertado o interesse da comunidade acadêmica, de órgãos públicos e privados e da sociedade civil ao longo dos anos, devido ao seu papel fundamental no planejamento urbano, nas atividades agropecuárias e nas indústrias de diversos seguimentos, (Verheye, 2009; Hai, 2007). Dessa maneira, o planejamento do uso e ocupação terra, seja para o cultivo ou para o estabelecimento de infraestruturas como rodovias e ferrovias recorre a análise de solos com características viáveis ao uso.

No Brasil poucos investimentos têm sido realizados em novas campanhas de mapeamento de solos, reflexo da ausência de políticas públicas destinadas a este fim, associada aos altos custos, tempo de execução e da ausência de mão de obra especializada para tal (Flach; Corrêa, 2017). Devido à grande extensão territorial e a escassez de investimentos em mapeamentos de solos no Brasil, estes, quando existentes, apresentam baixo nível de detalhamento (Santos *et al.*, 2013), não sendo adequados a interpretações a nível de planejamentos regionais. Dos levantamentos de solos, disponíveis no Brasil, mais de 85% correspondem a levantamentos de baixa intensidade, ou seja, com escala de 1:250.000 a 1:750.000. Os levantamentos de alta intensidade, em escala de 1:50.000 a 1:100.000, cobrem apenas cerca de 1,71% do território brasileiro (Embrapa, 2016; Weber *et al.*, 2006).

A ausência de informações mais detalhadas sobre as características dos solos pode trazer vários impactos a diferentes setores, um deles o de transporte. Neste, a identificação prévia de áreas potenciais de ocorrência dos solos definidos como moles é de grande relevância para o planejamento de projetos relacionados aos transportes, podendo evitar problemas sérios na fase de construção da infraestrutura pertinentes a erros no dimensionamento (Mahrooghy *et al.*, 2016) e no custo do empreendimento (Nobrega *et al.*, 2016).

Considerando a inexistência de dados que apontem áreas de solos moles para suprir a demanda em planejamento, este trabalho teve como objetivo propor uma chave de classificação de predição de ocorrência de solos moles a fim de auxiliar no planejamento de grandes obras de infraestrutura, sobretudo, rodovias e ferrovias no território brasileiro.

SOLOS MOLES: conceituação, constituição e dinâmica

Para a Geografia, pedologia e agronomia os solos podem apresentar distintas definições, porém todas convergem para a mesma direção, ou seja, o solo é entendido como um recurso essencial para a manutenção da vida considerando os aspectos ambientais, econômicos e sociais. Já para a Geotecnia somente as propriedades de sustentação do solo para obras são consideradas, e é nessa perspectiva que se insere o conceito de solos moles que são aqueles que não apresentam resistência, sobretudo, quando submetidos à pressão ocasionada por alguma obra de infraestrutura e possuem material friável e colapsível (Pinto, 2006). Considera-se também aqueles que apresentam consistência predominantemente argilosa com valor de N-SPT¹ entre 3 e 5 e, de origem, geralmente, sedimentar apresentando resistência ao cisalhamento extremamente baixa, saturado e relativamente homogêneo e com alto potencial de compressibilidade (ABNT, 1982; Pinto, 2006) e baixa permeabilidade, essas características estão relacionadas ao material de origem, ao ambiente em que se encontram, geralmente úmidos, bem como a composição mineralógica (Mamat, 2013).

Há em território o brasileiro continental registros de solos moles, porém estes são mais comuns no litoral podendo ocorrer também em ambientes lacustres, não marinhos. Nos depósitos litorâneos brasileiros são encontradas extensas áreas de sedimentos com teor de matéria orgânica variando de 4% a 20% (Pinto, 2006). Rodrigues (1977) considera que os solos orgânicos, como por exemplo os Organossolos, devido as suas características morfológicas são enquadrados na categoria de solos moles na geotecnia. Dessa maneira, a sedimentação recente desfavorece a capacidade para suportar cargas pesadas tais como: aterros, edifícios, tráfego intenso de caminhões sem que sejam deformados. O autor destaca também que os solos orgânicos são frequentes em áreas de várzeas de rios devido à grande quantidade de materiais que ali são depositadas através da ação das águas.

Os depósitos moles presentes no Brasil são originários do período Quaternário, tendo sido depositados pelo menos em dois ciclos: no Pleistoceno e, mais recente, no Holoceno. Tais depósitos eram considerados como resultado do intemperismo que guardam importantes registros de eventos ocorridos no Quaternário (Spannenberg, 2003; Campos, 2006; Tatum *et al.*, 2008; Futai, 2010). De acordo com Spannenberg (2003) os depósitos moles brasileiros não apresentam grandes diferenças com relação a composição mineralógica, entretanto apresentam teores de matéria orgânica muito próximos, ou seja, inferiores a 5%, sendo que tanto os limites de consistência quanto o de compressibilidade diferem muito pouco um do outro. Massad (1999 *apud* Higashi, 2006, p. 98), considera que o período de deposição desses materiais deu origem a dois tipos de sedimentos argilosos de características diferentes:

- Sedimentos Pleistocênicos: formados há mais de 120 mil anos e apresentam textura argilosa (argilas transicionais - ATs) ou arenosos na base e topo (Areias Transgressivas). Esse primeiro momento de deposição foi marcado pela regressão do nível do mar e

¹ O Standard Penetration Test – SPT, é utilizado para verificar a capacidade de suporte do solo *in situ*.

intenso processo erosivo. Devido a ter sido submetidas a esses processos as argilas tornaram-se sobre adensadas.

- Sedimentos Holocênicos: originadas há cerca de 10 mil anos, são argilas e areias ricas em conchas, depositadas em locais de lagunas, canais, baías ou estuários, que foram denominadas de sedimentos Flúvio-Lagunares e de Baías. Os materiais oriundos desse período de deposição por não terem sofridos os processos do ciclo anterior se comportam como adensados.

Dessa forma, os depósitos moles podem ocorrer em diferentes ambientes tais como: coluvial, aluvial, eólicos residuais, bem como em fluxos de lama, porém apesar desses solos estarem relacionados a climas semiáridos e áridos são geologicamente recentes podendo aparecer em distintos tipos climáticos (Villar *et al.*, 1981 *apud* Oliveira, 2002). Todavia, ocorrem em maior abundância em ambientes marinhos com idade que remete a última era glacial, fato esse que explica a expressiva presença desse material no litoral brasileiro (Higashi, 2006).

Neste sentido, o conhecimento sobre a constituição mineralógica do solo mole é de extrema importância, uma vez que irá influenciar diretamente no seu comportamento. A literatura explica que as argilas moles são constituídas por argilominerais, matéria orgânica e outros tipos de minerais tais como a mica e a alumina e demais impurezas (Póvoa, 2016). Ressalte-se que, os solos argilosos são constituídos predominantemente por argilominerais e em alguns casos podem conter matéria orgânica, bem como quartzo e alumina além de outros elementos. Por essa razão, os argilominerais são resultantes de diferentes ligações entre as camadas e da consequente substituição de íons de alumina ou sílica (Pinto, 2006).

Medrado (2009) infere, ainda, que solos muito argilosos com muita matéria orgânica e friável não são aptos para suportar obras de pavimentação, por essa razão esses materiais são denominados pela Mecânica de Solos de solos moles. A saber, a análise que indica essas características se baseia na granulometria, nos limites de Atterberg – Limite de Liquidez-LL e Índice de Plasticidade-IP. Bertuol (2009), apresenta uma adaptação do critério proposto por Skempton e Northey (1952) para classificar uma argila quanto à sua sensibilidade, ou seja, solos moles (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação da sensibilidade de argila.
Table 1: Classification of clay sensitivity.

Sensibilidade	Classificação
1	Argilas insensíveis
1 a 2	Argilas de baixa sensibilidade
2 a 4	Argilas de média sensibilidade
4 a 8	Argila sensível
Maior que 8	Argila extrassensível
Maior que 16	Quick-Clays

Fonte: Bertuol (2009).

As análises que resultam essas características são realizadas em laboratório e são importantes para definir o grau de sensibilidade da argila, pois através do resultado dos testes é possível detectar a resistência e conseqüente capacidade de suporte do solo analisado.

Pinto (2006) atribui a sensibilidade das argilas ao processo de sedimentação, ou seja, quando as partículas se arranjam, sendo que este arranjo é dinâmico devido às atividades químicas entre as partículas e/ou pela remoção de sais através do processo de percolação da água. Dessa forma, a sensibilidade é um indicativo de resistência da argila, o autor supracitado ressalta, ainda, que os solos argilosos orgânicos das baixadas litorâneas brasileiras apresentam baixa resistência, como por exemplo, na região de mangue da Baixada Santista.

Skempton e Northey (1952 *apud* Bertuol, 2009) relatam que a sensibilidade de uma argila está associada ao cisalhamento amolgada muito reduzida, podendo haver a possibilidade da existência de uma estrutura estável após remoldagem. Os autores consideram também que a sensibilidade não está relacionada diretamente ao material de origem, pois testes feitos em laboratório em materiais com as mesmas características litológicas apresentam diferentes graus de sensibilidade demonstrando, e que a sensibilidade portanto está relacionada as condições ambientais a qual o solo está exposto. Bertuol (2009, p. 37) relata que para determinar a sensibilidade da argila correlacionada com o pH observou-se que:

“[...] com o aumento do teor de sódio, aumentava também sensibilidade com o pH, sendo este aumento crítico quando a proporção, expressa pela equação $\frac{Na}{K,Ca,Mg}$ (**grifo nosso**), atinge valores próximos a 5,5 (valor frequente). Isto mostra um elo entre pH, quantidade de íons sódio e sensibilidade. [...] Mitchell (1976) complementa afirmando que, no outro extremo, com pH elevado, os íons de hidrogênio podem ser dissolvidos aumentando a carga negativa, o que também aumenta a espessura da camada iônica dupla e por conseqüência a sensibilidade (Bertuol, 2009)”.

Neste sentido, como já mencionado anteriormente a matéria orgânica preconiza importante elemento no processo de formação dos solos moles, pois favorece o desenvolvimento dos ácidos. Cabe ressaltar que as argilas brasileiras apresentam sensibilidade de baixa à média quando comparadas, por exemplo, com as argilas moles da Escandinávia e Canadá que se apresentam extremamente elevada (Póvoa, 2016).

MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DE SOLO: uma breve descrição

Como mencionado anteriormente neste trabalho propomos um mapeamento preditivo da ocorrência de solos moles para o território brasileiro, produto demandado pela Secretaria de Infraestrutura de Ferrovias e Portos do Tribunal de Contas da União, e que beneficiaria órgãos e empresas ligadas ao planejamento de transporte em todo o território nacional. No entanto, faz-se necessário discorrer sobre a importância do mapeamento geotécnico, suas particularidades e diferenças em relação aos mapeamentos tradicionais.

Dearman e Matula (1976) afirmam que o mapeamento geotécnico é um procedimento essencial para subsidiar o planejamento regional, uma vez que este deve ser objetivo e com informações de fácil

entendimento para a avaliação geotécnica do ambiente estudado. Não obstante, a identificação e o mapeamento de áreas com ocorrências de solos moles são fundamentais para auxiliar no planejamento para grandes obras de infraestrutura, pois a partir desse dado é possível a tomada de decisão e elaboração de projetos adequados (Futai, 2010).

Estudos geológicos, pedológicos e geotécnicos, bem como observações *in loco* e coleta de material para análise em laboratório são de suma importância durante os mapeamentos preliminares da área que se pretende implantar um grande projeto estrutural. Assim, o mapeamento de solos emerge como ferramenta fundamental para a organização do espaço, pois a partir das informações nele contidas é possível planejar o tipo de uso e ocupação da terra, bem como destinar áreas que precisam ser preservadas e/ou destinadas a usos restritos, como por exemplo, as áreas com solos moles (Lenormand *et al.*, 2015; Bosch, 2016).

Francelino (2008) indica, também, que os depósitos de solos moles devem ser representados em plantas de mapeamento geológico e pedológico de toda a área de domínio para facilitar a compreensão e entendimento das características da área. Pois o mapeamento pedológico é de fundamental importância para o conhecimento das propriedades físicas, química e mineralógicas dos solos e, a utilização adequada das informações contidas em levantamentos de solos, fornece subsídios para o planejamento de diversas áreas de atividade, sejam agrícolas ou não-agrícolas (Costa *et al.*, 2009).

Embora os mapas pedológicos apresentem informações de grande importância, o uso destas ainda é restrito às áreas correlatas à pedologia, o que ocorre principalmente devido à dificuldade de interpretação das informações por não especialistas em solos. Com o avanço do desenvolvimento econômico e a necessidade de desenvolver projetos de infraestrutura, surge a necessidade de novas informações e conhecimentos acerca do comportamento geotécnico de áreas com potencial para obras de engenharia, buscando subsidiar a tomada de decisões quanto ao planejamento de obras e do uso adequado dos solos.

Os mapas geotécnicos de solos apresentam características importantes para o direcionamento adequado aos diversos tipos de obras de engenharia a serem construídas sobre tais materiais. A esse respeito, Higashi (2006, p. 33-34) enfatiza que:

“O mapeamento geotécnico aplicado a áreas urbanas é um importante instrumento da engenharia que representa a expressão prática do conhecimento geomecânico do solo aplicado à gestão de problemas impostos pelo seu uso [...]. Os estudos geotécnicos preveem (grifo nosso) a potencial utilização da área mapeada tendo em vista as mais variadas características geotécnicas, como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, infiltração de água, susceptibilidade à erosão, utilização de determinados tipos de solos como jazidas para pavimentação, entre outras, estando sua plena aplicação apenas dependente dos tipos de informações adquiridas e das escalas empregadas (Higashi, 2006).

Todavia, o mapeamento geotécnico deve ter por objetivo prever a ocorrência de fenômenos que precisam ser evitados ou minimizados baseados, principalmente, nas características geomecânicas dos solos (Higashi, 2006). Bachion (1997) relata que a ausência de bases topográficas

adequadas, bem como de conhecimento técnico por parte dos profissionais que atuam nessa área são entraves para a elaboração de mapeamentos geotécnicos. Zuquette (1987 *apud* Martins, 2005) afirma que a principal contribuição do mapeamento geotécnico é a predição do potencial de uso das unidades identificadas para direcionar o uso adequado para cada área e, assim auxiliar na tomada de decisão.

Dessa forma, é relevante destacar que os usos de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto são de extrema importância para auxiliar a elaboração do mapeamento geotécnico, pois é através delas que serão adquiridas e tratadas as imagens de satélite e fotos aéreas que serão utilizadas para geração do mapa base (Higashi, 2006).

METODOLOGIA

Primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico para entender as características geotécnicas de depósitos classificados como solos moles no Brasil e em algumas partes do mundo. A partir destas informações e do conhecimento das principais características das classes de solos brasileiros, em nível de Ordem – 1º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) – (Santos *et al.*, 2013) elaborou-se uma Chave Preditiva de Classificação do Potencial de Ocorrência de Solos Moles.

Assim, foi identificadas as características dos solos moles pela geotecnia e estas foram correlacionadas às características das classes de solos do SiBCS. Para tanto, foram analisadas as classes de solos em primeiro nível categórico com base em suas características físicas, químicas e mineralógicas sendo estas agrupadas em duas categorias de probabilidade de ocorrência de solos moles. A partir da Chave Preditiva, o mapa de solos do Brasil em escala de 1:5.000.000 (Santos *et al.*, 2013) e o mapa de solos do Estado de Goiás, em escala 1:250.000 (Emater, 2016) foram reclassificados quanto ao potencial de ocorrência de solos moles.

Para fins de validação, foram plotados pontos georreferenciados de ocorrência de solos moles para o Brasil, obtidos através da literatura disponível e para o trecho da Ferrovia Norte-Sul entre os municípios de São Simão e Quirinópolis no estado de Goiás, sendo utilizados 1.470 pontos de campo, cedidos pelo TCU (Tribunal de Contas da União) e pela empresa VALEC e comparadas a probabilidade de ocorrência quando da mudança de escala dos mapas.

Todo o processamento dos dados e a elaboração dos mapas foram realizados no *software* de acesso livre QGIS 2.18.13 (QGISBRASIL, 2018). Os arquivos da base de solos do Brasil e do Estado de Goiás foram convertidos para o Sistema de Coordenadas Geográficas no *datum* SIRGAS 2000. Em seguida, foram convertidas para o formato *Raster*, onde foram categorizados nas duas classes definidas na chave. Através da calculadora de campo do *software* QGIS 2.18.13, uma tabela de tributos foi criada com os valores de áreas para as duas classes, as tabelas foram exportadas para uma planilha eletrônica no formato *xlsx* (Excel).

Para a correlação, foi utilizado o arquivo de potencialidade de ocorrências de solos moles no estado de Goiás e foi realizado um recorte do Estado de Goiás a partir dos dados de solos do Brasil. Em seguida, através da ferramenta interseção, que une elementos comuns nos dois arquivos, foi

gerado o arquivo de correlação. O processamento foi desenvolvido utilizando-se a projeção cartográfica policônica, pois permite enquadrar todo o território brasileiro em uma representação cartesiana com medidas lineares, necessária para a amplitude pretendida para o mapeamento desejado neste trabalho. A projeção policônica é a que melhor adapta o território brasileiro, na íntegra, a um sistema linear de coordenadas planas, pois há uma diminuição da deformação da convergência dos meridianos e, assim uma melhor representação da região sul do país para o propósito do mapeamento em questão. Vale destacar também que esta projeção é a mesma usada para o mapeamento oficial do Brasil (IBGE, 2018; CSR, 2018).

A elaboração do modelo aqui proposto fez uso do método indutivo, o qual prevê resultados a partir das observações e das experiências, ou seja, é uma questão de generalização provável (Lakatos; Marconi, 2000). Nesse sentido, o método indutivo requer que o pesquisador observe a relação sistêmica entre os fenômenos estudados, que no caso deste trabalho é o comportamento dos solos. E, a partir de suas observações o pesquisador pode propor classificações agrupando fenômenos semelhantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do levantamento de dados constatou-se que as informações existentes sobre solos moles se concentram nas regiões sudeste e sul do Brasil, destaque para Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e no Nordeste para Região Metropolitana do Recife. Este fato está diretamente relacionado à instalação de grandes obras de infraestrutura nessas regiões, sejam estradas, portos, aeroportos e instalação de indústrias. Verificou-se um grande vazio de pesquisas relacionadas ao comportamento de solos moles no restante do território brasileiro. Isso, porém, não significa dizer necessariamente que nas demais áreas não existam depósitos moles, mas sim que tais regiões apresentam carência de investimentos para pesquisas dessa natureza nestas áreas.

A escassez de pesquisas sobre solos moles no interior do Brasil se dá em decorrência, principalmente, de que historicamente essas regiões não eram vistas como potenciais áreas para o desenvolvimento econômico e, conseqüentemente, onde os investimentos em estradas e grandes outras obras não foram priorizadas. Entretanto, este cenário vem se transformando com a descentralização dos polos econômicos, sobretudo, com o advento do agronegócio nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, que tem proporcionado a instalação de rodovias e ferrovias integrando todo o território nacional, razão pela qual a demanda pelo presente trabalho se justifica.

Verificou-se que a partir do final da década de 1990 tem havido a retomada de investimentos para melhorar a rede viária das regiões Norte e Nordeste, bem como o incentivo para a instalação de indústrias nestas regiões. Com isso, as pesquisas sobre a ocorrência de solos moles em todo o território brasileiro tornam-se imprescindíveis. Dessa forma, a elaboração de um mapa preliminar de predição da ocorrência de solos moles para o território brasileiro pode contribuir para o planejamento de grandes projetos que visam desenvolvimento de infraestrutura no Brasil. Através da elaboração do mapa

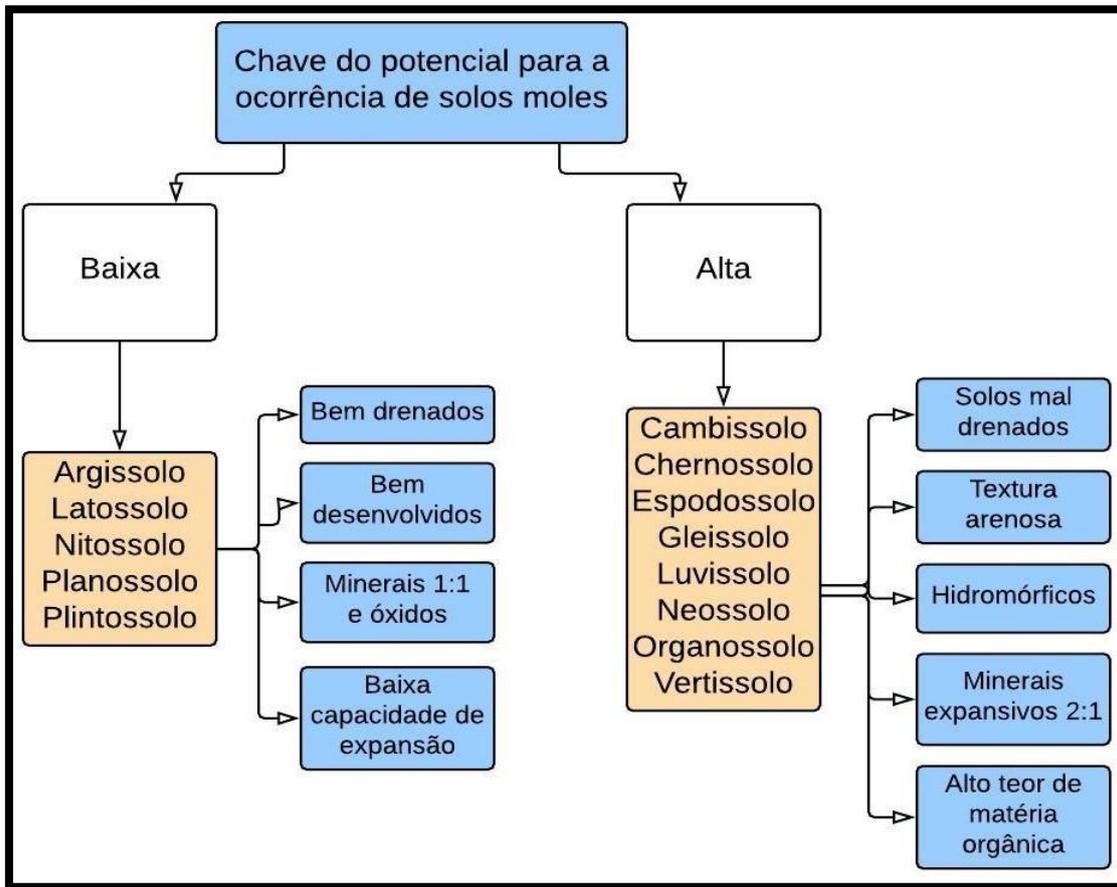
proposto neste trabalho será possível antecipar soluções para a problemática encontrada em obras, principalmente, do modal de transporte referentes à ocorrência de solos moles.

Através da chave de predição foram definidas duas classes de Potencial de Ocorrência de Solos Moles: Baixo e Alto potencial de ocorrência (Figura 1). Foram consideradas para a chave somente as características dos solos, excluindo aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrográficos, devido à grande complexidade do território brasileiro, porém considera-se que tais elementos podem ser adicionados futuramente para alimentar o modelo.

A classe de Baixo potencial foi representada pelos solos bem desenvolvidos, solos profundos, bem drenados com predomínio de minerais do tipo 1:1, como a caulinita e minerais oxídicos. São solos que apresentam maior estabilidade física, com ausência de processos de expansão e contração dos solos, o que possibilita o maior uso destes solos para obras de engenharia. Compreende as classes dos Latossolos, Argissolos e Nitossolos. Incluíram-se nesse íterim os solos que apresentam horizonte B plânico, com mudança textural abrupta e alta resistência à penetração, representados pela classe dos Planossolos, e solos com horizonte B plíntico, com presença de plintita e alta estabilidade física, representados pela classe dos Plintossolos.

Na classe de Alto Potencial estão os solos hidromórficos, os com alto teor de matéria orgânica, presença de minerais primários, com minerais do tipo 2:1 expansivos e os solos arenosos, além de solos facilmente intemperizáveis, poucos evoluídos e susceptíveis à deformação e compressibilidade (Antunes *et al.*, 2013).

Figura 1: Chave de Classificação do Potencial de Ocorrência de Solo Moles no Brasil.
Figure 1: Classification Key for the Potential Occurrence of Soft Soil in Brazil.



Fonte: Autores (2018).

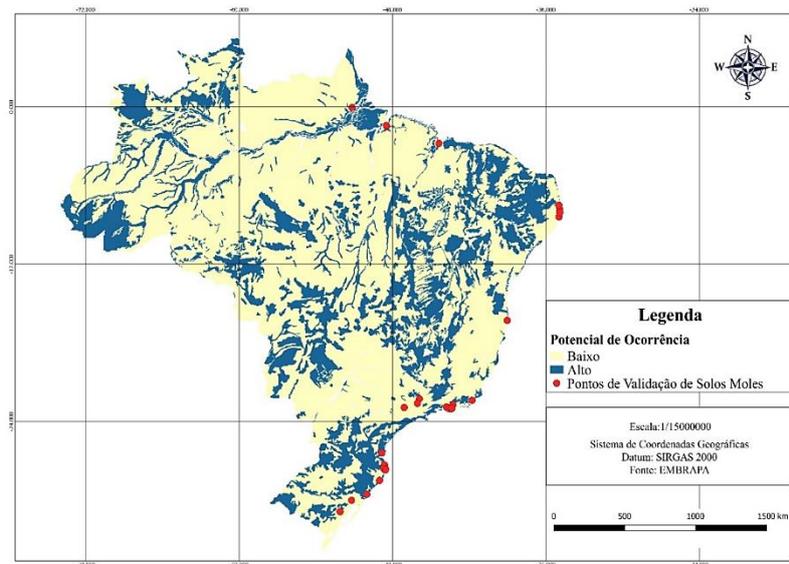
Os solos agrupados na classe de Alto Potencial são representados pelos Cambissolos e Chernossolos, que são solos poucos desenvolvidos, com pouca profundidade efetiva e alto teor de silte, que confere baixa estabilidade física e que normalmente depende do material de origem. Eles apresentam, ainda, minerais primários como os Chernossolos com horizonte A espesso, rico em matéria orgânica e com alta saturação por bases; os Espodossolos, que são solos na maioria arenosos, com baixa estabilidade física; Gleissolos hidromórficos; os Luvissolos, que apresentam minerais primários e argila de alta atividade; os Neossolos, que se constituem solos de baixa evolução pedogenética, rasos e/ou arenosos; os Organossolos, que são solos pouco evoluídos constituídos por materiais orgânicos na maioria mal drenados; e os Vertissolos, com horizonte vértico que confere características de expansão e contração devido à presença de minerais primários do tipo 2:1 expansivos e, conseqüentemente, baixa estabilidade física.

A partir de Chave de Predição elaborou-se o mapa de Potencial de Ocorrência de Solos Moles para o Brasil (Figura 2) e para o Estado de Goiás (Figuras 3 e 4). Analisando o mapa do Brasil observou-se que classe de Baixo potencial representa 62% do território brasileiro e é composta, predominantemente, pelas classes dos Latossolos (32%) e dos Argissolos (19%). São solos que apresentam maior estabilidade física, sendo mais desenvolvidos, bem drenados, com baixos teores de

minerais primários, ausência de minerais expansivos e, portanto, de processos de expansão e contração, o que possibilita maior uso destes solos para obras de engenharia.

Na classe de Alto Potencial estão os solos hidromórficos; os com altos teores de matéria orgânica; com presença de minerais primários do tipo 2:1 expansivos e, os solos arenosos. Estes representam 34% dos solos no território brasileiro, apresentam limitações ao uso geotécnico e, são representados predominantemente pelos Cambissolos (11%) e Neossolos (16%). Em 4% do território não foi possível estimar o potencial de ocorrência dos solos moles devido à ausência de informações das classes de solos no mapa pedológico utilizado.

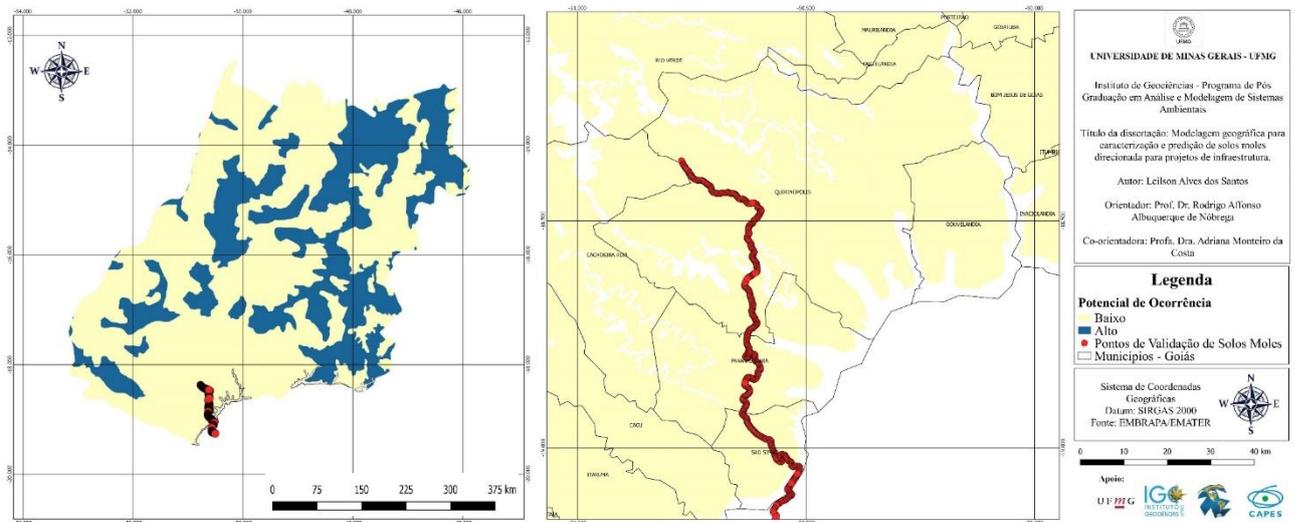
Figura 2: Mapa Potencial de Ocorrência de Solos Moles no Brasil.
Figure 2: Potential Map of Occurrence of Soft Soils in Brazil.



Fonte: Autores (2018).

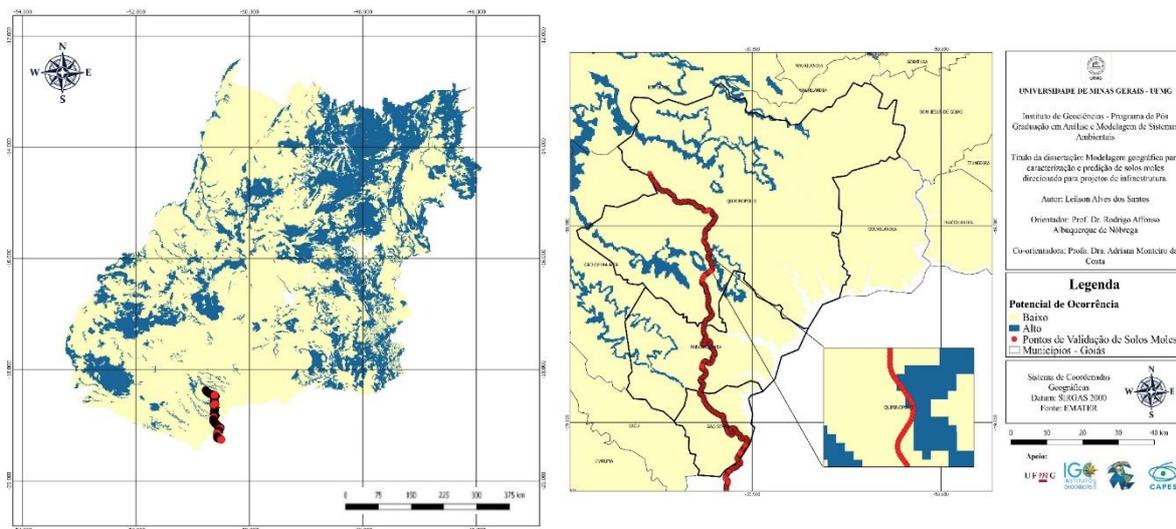
DOI: 10.33947/1981-741X-v21n2-5015
PREDIÇÃO DE SOLOS MOLES NO BRASIL: ELABORAÇÃO DE UMA CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO
Leilson Alves dos Santos, Rodrigo Afonso Albuquerque Nóbrega, Adriana Monteiro Costa

Figura 3: Mapa Potencial de ocorrência de solos moles em um trecho da Ferrovia Norte-Sul no município de São Simão – Estado de Goiás, na escala de 1:5.000.000.
Figure 3: Potential map of occurrence of soft soils in a section of the North-South Railway in the municipality of São Simão – State of Goiás, on a scale of 1:5.000.000.



Fonte: Autores (2018).

Figura 4: Mapa Potencial de ocorrência de solos moles em um trecho da Ferrovia Norte-Sul no município de São Simão – Estado de Goiás, na escala de 1: 250.000.
Figure 4: Potential map of occurrence of soft soils in a section of the North-South Railway in the municipality of São Simão – State of Goiás, on a scale of 1:250.000.



Fonte: Autores (2018).

A classe predita de Baixo Potencial de ocorrência de solos moles representa 69% do território brasileiro, enquanto a classe Alto Potencial representa 29% e 2% corresponde a locais onde não há informações no mapa de solos - fator este que não permite estimar o potencial. Cabe destacar, ainda,

que as classes de solos com maior ocorrência no território brasileiro são os Latossolos que corresponde a 33%, seguido pelos Argissolos (19%), que somados cobrem 52% do território.

Após a identificação das classes previstas de ocorrências de solos moles para o território brasileiro e validada com as classes geradas para o Estado de Goiás a partir dos pontos da Ferrovia Norte-Sul no trecho entre os municípios de São Simão e Quirinópolis, foi feita a correlação entre os dois mapas, ou seja, foram cruzados para verificar a porcentagem de correlação (Tabela 2).

Tabela 2: Correlação entre as classes de solos moles previstas e validação de campo.
Table 2: Correlation between predicted soft soil classes and field validation.

Potencial de ocorrências de solos moles	Área (milhões Km ²)	%
Baixo	171.331	50
Alto	59.247	17
Áreas não correlacionadas	115.521	33
Total	346.098,60	100%

Fonte: Autores (2018).

Ao avaliar a probabilidade de ocorrência de solos moles para o estado de Goiás em mapas com distintas escalas observou-se que não houve diferença significativa na probabilidade de ocorrência entre o mapa mais detalhado quando comparado ao mapa de menor escala (Tabela 3).

Tabela 3: Porcentagem das classes previstas de solos moles para Goiás em escalas distintas.
Table 3: Percentage of predicted soft soil classes for Goiás at different scales.

Mapa	Potencial de ocorrência de solos moles (Km ²)					
	Baixo		Alto		Outros	
	Área	%	Área	%	Área	%
1:5.000.000	242.255,68	67	117.089,14	32	2.384,60	1
1:250.000	233.970,00	68	105.203,94	30	6.924,66	2

Fonte: Autores (2018).

Ressalta-se que a escala do mapa utilizada é muito pequena e não permite uma riqueza de detalhes para uma interpretação mais apurada, sendo, portanto, um indicativo desta ocorrência. Desta forma a distribuição das classes no território pode estar sendo superestimada ou subestimada tendo em vista que a escala do mapeamento é muito generalizada.

CONCLUSÃO

A caracterização de solos moles é intrincada tendo em vista as peculiaridades desses materiais. Estes solos podem ser considerados entre os mais complexos, uma vez que é necessário conhecer não apenas sua resistência ao cisalhamento não drenado, mas também parâmetros de compressibilidade e condutividade hidráulica e comportamento em condições indeformada e amolgada.

O conhecimento tanto das características químicas, físicas e mineralógicas das classes de solos brasileiras quanto das características dos depósitos classificados como de solos moles permitiu a elaboração de uma chave preditiva de ocorrência de solos moles para o Brasil. Dessa maneira, a partir da aglomeração e semelhança das principais propriedades químicas e físicas dos solos foi elaborado o mapa, onde verificou-se aproximadamente em 34% do território brasileiro existe áreas propícias à ocorrência de solos moles - áreas estas que se correlacionam com locais onde foram realizados diversos trabalhos para entender o comportamento desses depósitos sedimentares Quaternários. Verificou-se, ainda, que não existe um padrão definido, seja da ordem mineralógica, química ou física das propriedades dos solos, que os configure como solos moles. Porém, algumas características são inerentes às áreas onde estão presentes esses depósitos tais como: presença de argilomineral expansivos 2:1, presença significativa de matéria orgânica, solos hidromórficos e textura arenosa.

A utilização dos mapas de solos foi de fundamental importância para espacialização das informações no território brasileiro e mostra a importância de interpretação dessas informações como subsídios ao planejamento do território para diferentes usos, como o geotécnico. As escalas de mapeamentos de solos existentes foram as principais limitações para a obtenção de uma espacialização mais fidedigna. No entanto, o trabalho mostrou-se promissor para a orientação de tomadas de decisões no que se refere à probabilidade de ocorrência de solos moles no Brasil. A disponibilidade de um mapa brasileiro de potencial e solos moles permite, ainda na fase de planejamento e licitação de grandes infraestruturas de transporte terrestre, tubos e linhas de transmissão, um dimensionamento mais assertivo acerca do custo e do risco destes empreendimentos.

Ressalta-se, que esse primeiro modelo não considerou algumas características que podem contribuir para melhores resultados, como por exemplo, a geologia, a geomorfologia e a hidrografia. Recomenda-se, ainda, que para trabalhos futuros em escala dessa magnitude, sejam considerados tais elementos, bem como a realização de observações de campo e análises de material em laboratório. Em suma, este protótipo vem preencher uma lacuna nos estudos sobre solos moles no território brasileiro, porém para a implantação de projetos de infraestrutura recomenda-se utilizar uma escala com maior nível de detalhes.

AGRADECIMENTO

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela concessão da bolsa e a Universidade Federal de Minas Gerais por todo o suporte no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ANTUNES, F. S.; CAMPOS, T. M. P.; POLIVANOV, H.; CALDERANO, S. B.; ANDRADE, A. G. Desenvolvimento de classes e unidades geo-pedológicas a partir da interação entre a pedologia e a geotecnia. **Geotecnia**, n. 127, 2013.

BACHION, M. L. **Mapeamento Geotécnico da Área Urbana e de Expansão da Região Metropolitana de Campinas, Escala 1:25000**. 1997. Dissertação (Mestrado) - EESC/USP, São Carlos-SP, 1997.

BERTUOL, F. **Caracterização geotécnica da sensibilidade de um depósito sedimentar do Rio Grande do Sul com o uso de laboratório**. 2009. 176f. Dissertação (Mestrado Escola de Engenharia) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

BOSCH, R. V. D. A new era for soil mapping. **ISRIC – World Soil Information**. 2016. Disponível em: [http://www.isric.org/sites/default/files/A_new_era_for_soil_mapping_\(Adjacent_Government_9_\(February_edition\)\).pdf](http://www.isric.org/sites/default/files/A_new_era_for_soil_mapping_(Adjacent_Government_9_(February_edition)).pdf). Acesso em: 25 mar. 2017.

CAMPOS, A. C. S. L. **Características de compressibilidade de uma argila mole da Zona Industrial de Santa Cruz, Rio de Janeiro**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

COSTA, A. M.; CURI, N.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F.; MARQUES, J. J. Levantamento detalhado de solos da Microbacia Hidrográfica do Horto Florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1272-1279, set./out. 2009.

CSR – CENTRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – UFMG. **Projeções Cartográficas**. Disponível: http://csr.ufmg.br/cart01/cart01_parte3.pdf. Acesso: 10 maio 2018.

DEARMAN, W. R.; MATULA, M. Environmental aspects of engineering geological mapping. **Bulletin of Engineering Geology**, Krefeld, n. 14, 1976.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Shapefile do mapa de solos do Brasil**. Disponível: www.embrapa.br. Acesso em: 10 nov. 2017.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1054924/programa-nacional-de-solos-do-brasil-pronasolos>. Acesso em: jun. 2018.

FLACH, C. W.; CORRÊA, E. A. Levantamento de solos no Brasil: métodos, práticas e dificuldades. **Geographia Meridionalis**, v. 03, n. 03, 2017.

FRANCELINO, M. J. M. **Pavimentação de concreto sobre solos moles: estudos de caso na Rodovia BR 101 Nordeste (Lotes 1, 5 e 6)**. 2008. 331f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

FUTAI, M. M. **Considerações sobre a influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles**. 2010. 197f. Tese (Livre docência) - Departamento de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HAI, T. Q. Spatial organization for rational land use and environmental protection in Uong Bi Town by functional sub-areas. **VNU Journal of Science, Earth Sciences**, v. 23, p. 88-95, 2007.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. 2006. 486f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área Territorial Brasileira**. DOU n. 124 de 30 de junho de 2017. Disponível: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm. Acesso: 20 maio 2018.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**. 3. ed. São Paulo: Altas, 2000.

LENORMAND, M. *et al.* Comparing and modeling land use organization in cities. **Royal Society Open Science**, *The Royal Society*, n. 2, p.150449, 2015.

MAHROOGHY, M.; AANSTOOS, J.; NOBREGA, R. A.; HASAN, K.; YOUNAN, N. A Neural Network Approach to Soil Electrical Conductivity Estimation on Earthen Levees Using Spaceborne X-band SAR Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 82, n. 7, p. 509–519, July 2016. Doi: 10.14358/PERS.82.7.509

MAMAT, R. B. C. **Engineering properties of Batu Pahat soft clay stabilized with Lime, Cement and Bentonite for subgrade in road construction**. 2013. 45f. Dissertação (Mestrado – Faculty of Civil and Environmental Engineering) - Universiti Tun Hussein Oun Malaysia, 2013.

MARTINS, A. H. C. **Mapeamento geotécnico do Setor Norte do município de Goiânia-GO, em escala 1/25.000**. 2005. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

MEDRADO, W. A. **Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação de obras rodoviárias**. 2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

NOBREGA, R. A. A.; VIEIRA, R. R. T.; BERBERIAN, C. F. Q.; MASUKAWA, N. ; QUADROS, E. A. T. Inteligência geográfica para avaliação de propostas de projeto de concessão de corredores ferroviários. **Transportes** (Rio de Janeiro), v. 24, p. 75-84, 2016.

OLIVEIRA, C. M. G. **Carta de risco de colapso de solos par a área urbana do município de Ilha Solteira- SP**. 2002. 89f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2002.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PÓVOA, L. M. M. **Caracterização geotécnica de um depósito de solo mole em área de baixada localizada em Macaé-RJ**. 2016. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.

RODRIGUES, J. C. **Geologia para engenheiros civis**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SPANNENBERG, M. G. **Caracterização geotécnica de um depósito de argila mole da Baixada Fluminense**. 2003. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

TATUMI, S. H. *et al.* Datação de sedimentos pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, v. 3, p. 514-524, 2008.

VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. **Relatório de complemento de informações – TCU – Plenário**. 2015. Disponível: www.valec.gov.br. Acesso: maio 2018.

DOI: 10.33947/1981-741X-v21n2-5015
PREDIÇÃO DE SOLOS MOLES NO BRASIL: ELABORAÇÃO DE UMA CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO
Leilson Alves dos Santos, Rodrigo Affonso Albuquerque Nóbrega, Adriana Monteiro Costa

VERHEYE, W. H. Land use planning. In.: VERHEYE, W. H. **Encyclopedia of land use, land cover and soil sciences**: land use planning. Volume 3. Orxord, UK: Eolss Publishers Co. Ltd, 2009.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FLORES, C.A. Geoprocessamento no apoio ao mapeamento de solos. *In*: FLORES, C. A., POTTER, R. O., FASOLO, P. J.; HASENACK, H.; WEBER, E. (Org.) **Levantamento semi-detalhado de solos**: região da campanha – Folha Palomas, Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2006.