



# **CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016*  
*ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL*

Jordana Cristina Campos Oliveira

CONSTRUÇÃO DE UM BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS COM BASE EM  
SONDAGENS SPT E USO DE FERRAMENTA SIG: estudo de caso solos do  
Tocantins, com ênfase na capital Palmas - TO

Palmas – TO

2018

Jordana Cristina Campos Oliveira

CONSTRUÇÃO DE UM BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO COM BASE EM  
SONDAGENS SPT E USO DE FERRAMENTA SIG: estudo de caso solos do  
Tocantins, com ênfase na capital Palmas - TO

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA)

Orientador: Prof. Dra. Elizabeth Hernández Zubeldia

Jordana Cristina Campos Oliveira  
CONSTRUÇÃO DE UM BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS COM BASE EM  
SONDAGENS SPT E USO DE FERRAMENTA SIG: estudo de caso solos do  
Tocantins, com ênfase na capital Palmas - TO

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. Dra. Elizabeth Hernández Zubeldia

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.a Dra Elizabeth Hernández Zubeldia

Orientadora

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

---

Prof.a Esp. Kênia Parente Lopes Mendonça

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

---

Prof. MSc. Dalton Cardozo Bracarense

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2018

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar a Deus que me permitiu chegar até aqui, me amparando, dando forças, discernimento e coragem, em todos os momentos da minha vida. Sem Ele definitivamente nada sou.

Aos meus pais, Celso Canuto de Oliveira, e Elena Cristina M. C. Oliveira, e minha irmã Thainara Campos Oliveira, por todo amor, carinho, incentivo, apoio incondicional e compreensão nas ausências dos domingos em família, dedicados aos estudos; sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente! Por não medirem esforços para me veem crescendo.

Ao meu esposo Raphael Bandeira Barbosa, por estar ao meu lado em todos os momentos, de choros e alegrias durante esse processo de formação acadêmica, por abrir mão de muitos de seus objetivos para que eu pudesse alcançar os meus.

Às minhas amigas Amanda Vieira, Eduarda Martins, Larissa Bavaresco e Luciana Cristina, companheiras de trabalhos e irmãs na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

Agradeço também a minha orientadora Elizabeth Hernández Zubeldía, pela paciência, serenidade, dedicação e esforço para que eu pudesse ter confiança e segurança na realização deste trabalho, sendo em muitos casos muito além de orientadora, tornando-se amiga!

A Professora Maria Carolina D'Oliveira, pelas inúmeras vezes que estive ao meu lado me aconselhando, ouvindo, sendo mãe, amiga, e psicóloga (risos).

Ao professor Dalton Cardoso Bracarense, o qual Deus encaminhou na minha vida para que eu não desistisse no meio do caminho – momento em que nada que eu havia estudado fazia sentido por falta de experiência - me dando a oportunidade de ser estagiária em uma das maiores empresas de engenharia.

## RESUMO

O presente trabalho propõe a construção de um banco de dados em SIG a partir de sondagens SPT realizadas no estado do Tocantins, para realizar análises geotécnicas dos solos do estado, com ênfase na capital Palmas. Os perfis geotécnicos permitem a identificação dos solos e das rochas que dão origem às camadas de interesse para construção civil, apresentando grande importância na otimização de projetos, como de fundações, estabilidade de estruturas, pavimentação, etc. Os laudos de sondagem SPT, foram coletados através de contato por ofícios com empresas da área, e então analisados, tratados e espacializados através do software *ArcGis*. A metodologia empregada para a caracterização e análise foi o método de krigagem, sendo este um método que fornece valores estimados não tendenciosos, pontuais ou médias de blocos, partindo de um modelo ajustado de covariância/variograma e de uma variável em seu domínio geoestatístico. Através do semivariograma foi analisado o grau de dependência espacial entre as amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados. Com os resultados, além do banco de dados, foram geradas cartas geotécnicas em escala 1:25.000, de acordo as propostas de escala de Zuquette (1993), o qual afirma que as cartas geológico-geotécnicas podem ser classificadas de acordo com a finalidade do mapeamento geotécnico, tendo relação direta com a escala de trabalho proposta.

Palavras-chave: SIG, ArcGis, Kringagem, SPT.

## ABSTRACT

The present work proposes the construction of a GIS database from SPT surveys conducted in the State of Tocantins, to perform geotechnical analysis of the state soils, with emphasis on the Palmas capital. The geotechnical profiles allow the identification of soils and rocks that give rise to the layers of interest for civil construction, showing great importance in the optimization of projects, such as foundations, structural stability, paving, etc. The SPT probe reports were collected through trade contact with companies in the area, and then analyzed, processed and specialized through ArcGis software. The methodology used for the characterization and analysis was the kriging method, which is a method that provides estimates of non-biased, punctual or averages of blocks, starting from an adjusted model of covariance / variogram and a variable in its geostatistical domain. Through the semivariogram, the degree of spatial dependence between the samples within an experimental field was analyzed, as well as to define parameters necessary for the estimation of values for non-sampled sites. With the results, in addition to the data base, geotechnical charts were generated at a scale of 1: 25,000 according to Zuquette's (1993) scale proposals, which states that geological-geotechnical charts can be classified according to the purpose of the geotechnical mapping, having direct relation with the proposed scale of work.

Keywords: GIS, ArcGIS, Kriging, SPT.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Diagrama triangular de Atterbeg .....	17
Figura 2. Envoltória de ruptura de Mohr. ....	19
Figura 3. Estados de empuxo em função da movimentação .....	20
Figura 4 - Perfil do solo. ....	21
Figura 5. Mapa de Pedologia do Tocantins. ....	22
Figura 6. Equipamento para ensaio de reconhecimento à percussão SPT .....	26
Figura 7. Laudo de sondagem .....	27
Figura 8. Modelo de banco de dados genérico em ambiente SIG .....	28
Figura 9. Exemplo de semivariograma .....	30
Figura 10. Localização no ArcGis da ferramenta “Add XY Date” .....	38
Figura 11. Localização no ArcGis da ferramenta <i>Empirical Bayesian kringing</i> .....	40
Figura 12. Estrutura da base de dados no ArcGis.....	42
Figura 13. Distribuição dos pontos SPT no Tocantins .....	44
Figura 14. Distribuição Pontos SPT em Palmas TO.....	45
Figura 15. Distribuição dos pontos nas regiões de estudo em Palmas TO.....	46
Figura 16. Caracterização geotécnica profundidade 1 metro .....	49
Figura 17. Caracterização geotécnica profundidade 2 metros.....	50
Figura 18. Caracterização geotécnica profundidade 3 metros.....	51
Figura 19. Caracterização geotécnica profundidade 4 metros.....	52
Figura 20. Caracterização geotécnica profundidade 5 metros.....	53
Figura 21. Histogramas caracterização dos solos .....	54
Figura 25. Histograma N <sub>spt</sub> .....	56
Figura 26. N <sub>spt</sub> profundidade 2 metros .....	57
Figura 27. N <sub>spt</sub> profundidade 3 metros .....	58
Figura 28. N <sub>spt</sub> profundidade 4 metros .....	59
Figura 29. N <sub>spt</sub> profundidade 5 metros .....	60
Figura 30. Gráfico QQ Plot caracterização geotécnica profundidade 1 a 4 metros... 62	
Figura 31. Gráfico QQ Plot Caracterização geotécnica profundidade 5 metros..... 62	
Figura 32. Gráfico QQ Plot profundidade do nível da água .....	63
Figura 33. Gráfico QQ Plot N <sub>spt</sub> profundidade 2 a 4 metros .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características predominantes. ....	25
Quadro 2. Escalas em função da finalidade do mapeamento geotécnico .....	35
Quadro 3. Principais estudos recentes realizados no Brasil .....	36
Quadro 4. Valores empíricos atribuídos aos tipos de solo.....	39
Quadro 5. Distribuição dos Pontos.....	42

## LISTA DE EQUAÇÕES

$$\gamma h = 12ni = 1n[Zx + h - Z(x)]^2 \quad (1) \dots\dots\dots 31$$

$$\mathbf{ZKO} \ x_0 = i = 1n\lambda i Z(xi) \quad (2) \dots\dots\dots 32$$

$$i = 1n\lambda i = 1 \quad (3) \dots\dots\dots 33$$

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & C(x_1 - x_2) & \dots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ C(x_2 - x_1) & C(x_2 - x_2) & \dots & C(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & C(x_n - x_2) & \dots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_o - x_1) \\ C(x_o - x_2) \\ \vdots \\ C(x_o - x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4) \dots\dots\dots 33$$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GPS	<i>Global Positioning System</i>
MDE	Modelo Digital De Elevação
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SIBCS	Sistema Brasileiros de Classificação dos Solos
SIG	<i>Geographic Information System</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrica para as Américas
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator

## LISTA DE SÍMBOLOS

T	Resistencia ao cisalhamento do solo
$\sigma_3$	Tensão normal
$\sigma_1$	Tensão normal inicial
C	Coesão
$\Phi$	Ângulo de atrito
$\Sigma$	Somatório
$\lambda$	Peso atribuído a variáveis de um semivariograma

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.3 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1 SOLO 15	
<b>2.1.1 Propriedades físicas dos solos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.2 Propriedades mecânicas dos solos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.3 Empuxo dos solos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.4 Classificação dos solos de acordo com seus horizontes</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.5 Solos do Tocantins</b> .....	<b>21</b>
2.1.5.1 Classificação dos solos do Tocantins quanto à textura .....	24
2.2 SONDAGENS A PERCUSSÃO E O <i>STANDARD PENETRATION TEST</i> (SPT) .....	25
2.3 BANCOS DE DADOS E SIG .....	27
2.4 ARCGIS .....	29
2.5 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS.....	29
<b>2.5.1 Semivariograma</b> .....	<b>30</b>
<b>2.5.2 Krigagem</b> .....	<b>32</b>
2.6 CARTAS GEOTÉCNICAS .....	34
2.7 ESTUDOS SEMELHANTES EXISTENTES.....	35
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
3.1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS DE SONDAGEM Á PERCUSSÃO REALIZADAS NO ESTADO DO TOCANTINS .....	37
3.2 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS EM FERRAMENTA SIG .....	37
3.3 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE SOLOS PRESENTES NA CAPITAL DO ESTADO DO TOCANTINS ATRAVÉS DO BANCO DE DADOS GERADO. ....	39
3.4 IDENTIFICAÇÃO DO $N_{SPT}$ EM DIFERENTES CAMADAS, VISANDO SUBSIDIAR OBRAS DE ESCAVAÇÃO NA CAPITAL DO ESTADO DO TOCANTINS. ....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>

4.1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO REALIZADAS NO ESTADO DO TOCANTINS .....	41
4.2 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS EM FERRAMENTA SIG .....	42
4.3 ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS.....	47
<b>4.3.1 Identificação e caracterização dos tipos de solos presentes na capital do estado do Tocantins .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.2 Identificação do <math>N_{spt}</math> em diferentes camadas, visando subsidiar obras de escavação na capital do estado do Tocantins.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.3 Análise da confiabilidade dos dados .....</b>	<b>61</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento e condições do solo é imprescindível para fins de projetos seguros e econômicos em obras civis. Dentre os ensaios de investigação de solo “*in situ*”, o mais consagrado por várias décadas no Brasil tem sido o SPT (*Standard Penetration Test*).

As informações obtidas com o ensaio SPT atuam como subsídio fundamental ao planejamento, projeto e execução de obras geotécnicas, uma vez que permitem a disponibilização de parâmetros essenciais às etapas de cálculo, análise e monitoramento dos mais diversos fins em obras civis, como textura do solo, índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ), profundidade do nível d'água (N.A.), compactidade/consistência, etc. (SOARES, 2011).

No entanto, é de conhecimento que nem todas as obras possuem a investigação do subsolo adequada que deveriam ter, nem mesmo há recursos financeiros disponíveis por parte do empreendedor para tal. Desta forma, cada vez mais são inseridas no meio geotécnico, metodologias matemáticas que possam auxiliar no conhecimento do comportamento do solo de forma contínua (FOLLE, 2002).

Nos últimos anos, o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitiu o aprimoramento dos trabalhos envolvendo dados georreferenciados por possibilitar análises espaciais complexas, associando dados gráficos e alfanuméricos, de forma a processá-los simultaneamente com agilidade e eficiência (SANTOS, 2016).

Com isto, diversas pesquisas vêm sendo realizadas para elaboração de mapeamentos geotécnicos, aliando a ferramenta SIG às sondagens SPT, o que permite a construção de um sistema de banco de dados de armazenamento, com variáveis espacializadas, passíveis a aplicação a de modelos matemáticos de interpolação.

Todavia, a carência de informações, devido às limitações de custo de aquisição de dados, ao despreparo dos dados existentes em serem manipulados em ambiente SIG e à necessidade de conhecimentos específicos sobre SIG, são motivos que dificultam a ampla adesão da técnica. (THIESEN, 2016)

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Como identificar tipos de solos encontrados no estado do Tocantins, com ênfase na capital Palmas – TO, e suas respectivas características através de um banco de dados em ferramenta SIG?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Estruturar uma base de dados em SIG, com informações geotécnicas da capital do Tocantins, Palmas, obtidas por meio de sondagens à percussão com ensaios STP, e posteriormente gerar cartas topográficas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar e analisar dados de sondagem á percussão com ensaios SPT realizados no estado do Tocantins.
- Estruturar base de dados em ferramenta SIG.
- Identificar e caracterizar os tipos de solos presentes na capital do Estado do Tocantins através do banco de dados gerado.
- Identificar o  $N_{SPT}$  disponível em diferentes camadas de solo, visando subsidiar obras de escavação na capital do Estado do Tocantins.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A não homogeneidade dos solos impacta diretamente nos métodos construtivos em geral, pois para cada tipo de solo encontrado existem métodos executivos diferentes a serem empregados. Na grande maioria das obras a estrutura será suportada pelo solo, portanto, é fundamental o conhecimento das características desse material a fim de prever o seu comportamento diante das solicitações (CAPUTO, 1987 apud VALERIM, 2014).

De acordo com Santos (2016), a região norte é a que menos apresenta dados geotécnicos do país. Sendo assim, pode-se dizer que no estado do Tocantins poucos dados foram catalogados acerca das características geotécnicas. Atualmente na capital Palmas, alguns dos principais estudos vêm sendo desenvolvidos por Martins (desde 2014) e Castro et al. (desde 2016).

Os perfis geotécnicos permitem a identificação dos solos e das rochas que dão origem as camadas de interesse para construção civil, apresentando grande

importância na otimização de projetos, como de escavações, estabilidade de estruturas, pavimentação, etc. (Castro et al. 2017).

De acordo com Soares (2011), as sondagens com realização do ensaio SPT é o tipo de investigação geotécnica mais comum na prática brasileira, normatizado pela NBR 6484/2001. As informações obtidas com o ensaio atuam como subsídio fundamental ao planejamento, projeto e execução de obras civis, pois apresentam parâmetros essenciais às etapas de cálculo, análise e monitoramento.

Tendo em vista tais informações, esta pesquisa busca viabilizar a obtenção de informações geotécnicas do estado do Tocantins, por meio de um banco de dados na plataforma SIG, o qual permitirá consulta e visualização de tais informações, e posteriormente a elaboração de produtos cartográficos como mapas de disposição dos principais tipos de solos, e o índice  $N_{spt}$ .

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 SOLO

A necessidade de trabalhar com os solos, tem origem nos tempos mais remotos, podendo-se até dizer que é tão antiga quanto a civilização (CAPUTO, 1988). De acordo com Marques (2010), os solos são misturas complexas de materiais inorgânicos e resíduos orgânicos parcialmente decompostos. Para o homem em geral, a formação do solo é um dos mais importantes produtos do intemperismo.

São constituídos por um conjunto de partículas sólidas de vários tamanhos, deixando entre si, vazios que poderão estar totalmente ou parcialmente preenchidos por água ou outro fluido.

A classificação dos solos permite conhecer o seu comportamento, otimizar os recursos e reduzir os custos. Para engenharia, a classificação granulométrica e textural dos solos estabelece quatro grupos: pedregulhos, areia, silte e argila. Assim, conforme Varela (2010), as principais características desses solos são:

**PEDREGULHOS:** Formados predominantemente de grãos minerais, de diâmetro máximo maior que 4,8mm e menor que 76mm. Podem ser caracterizados pela textura, compactidade e forma dos grãos.

**AREIAS:** Formados predominantemente de grãos minerais, de diâmetro máximo maior que 0,05 mm e menor que 4,8mm. Podem ser caracterizados pela textura, compactidade e forma dos grãos.

**SILTE:** Solo que apresenta apenas a coesão necessária para formar, quando seco, torrões facilmente desagregáveis pela pressão dos dedos. Formados predominantemente de grãos minerais, de diâmetro máximo maior que 0,005 mm e menor que 0,05mm. Podem ser caracterizados pela sua textura e compactidade.

**ARGILA:** Apresenta alto índice de plasticidade; quando suficientemente úmido, molda-se facilmente em diferentes formas; quando seco, apresenta alta coesão, formando torrões resistentes a pressão dos dedos; Formados predominantemente de grãos minerais, de diâmetro menor a 0,005mm. Geralmente caracterizados quanto a plasticidade, textura e consistência em seu estado e umidade naturais. Quanto à textura, são identificadas pela sua distribuição granulométrica pertinente.

#### 2.1.1 Propriedades físicas dos solos

Santos (2016) apresenta a física dos solos como a ciência que estuda e define qualitativa e quantitativamente as propriedades físicas com o objetivo principal de entender os mecanismos que governam o comportamento dos solos.

As propriedades físicas dos solos são determinadas pelos meios físicos que o compõem, como a granulometria, textura, agregação, porosidade, densidade, consistência e cor.

A classificação granulométrica é uma técnica pela qual os diversos tipos de solos são agrupados e designados em função das frações predominantes das partículas que os compõem (PORTELA, 2013).

Caputo (1988) descreve que as frações constituintes do solo recebem designações próprias, e que essas frações de acordo com a escala granulométrica brasileira (ABNT), são definidas como: *Pedregulho*: conjunto de partículas cujas dimensões (diâmetros equivalentes) estão compreendidas entre 76 e 4,8 mm; *Areia*: entre 4,8 e 0,05 mm; *Silte*: entre 0,05 e 0,005 mm; *Argila*: inferiores a 0,005 mm

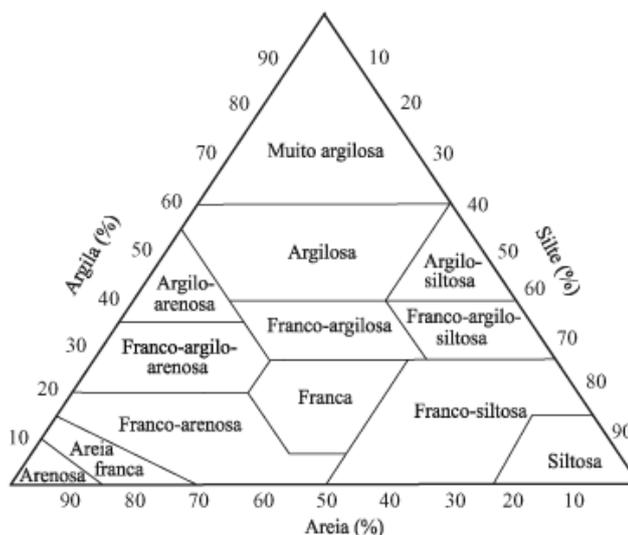
A percentagem relativa como cada uma destas classes granulométricas está no solo permite distinguir se ele é bem graduado ou não. Portela (2013), afirma que um solo bem graduado é aquele que contém uma mistura de partículas com diferentes tipos de tamanhos. Este tipo de solo tem geralmente uma resistência e estabilidade mais elevada do que um solo mal graduado em que os grãos são de tamanho mais uniforme.

A textura do solo leva em consideração a quantidade de cada partícula presente (argila, silte ou areia), determinadas na análise granulométrica, e pode ser facilmente determinada através do diagrama triangular de classificação textural do solo de Atterberg (Figura 1).

As partículas individuais constituintes das frações areia, silte e argila se encontram ligadas umas as outras pela ação de forças de coesão e adesão que se estabelecem nas interfaces entre as partículas e entre substâncias presentes no meio. De acordo com o tipo de textura o solo pode assumir diferentes tipos de umidade, porosidade, agregação e estrutura (SANTOS, 2016).

O peso específico de um solo é a razão entre o seu peso total e o seu volume total, adicionando-se o peso da água presente em seus vazios e o volume de vazios do solo. O peso específico natural não difere muito entre solos distintos. Varia entre: 19 a 20 kN/m<sup>3</sup> e, portanto, quando não conhecido, é estimado 20 kN/m<sup>3</sup>. Casos especiais, como as argilas orgânicas moles, podem apresentar pesos específicos de 14 kN/m<sup>3</sup>.

**Figura 1. Diagrama triangular de Atterbeg**



**Fonte: EMBRAPA (2006).**

A porosidade é determinada com a razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo. O intervalo de variação da porosidade está compreendido entre 0 e 1 (CAPUTO, 1988).

O índice de vazios é determinado com a razão entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas, expresso em termos absolutos, podendo ser maior do que a unidade.

Caputo (1988) definiu umidade do solo como sendo a razão entre o peso da água presente em certo volume de solo e o peso da parte sólida presente no mesmo volume, expressa em porcentagem.

Para Vargas (1977), o comportamento dos solos arenosos é fácil de identificar por meio das suas composições granulométricas; entretanto, com os solos finos, que é o caso das argilas, isso não acontece. Isto é, apenas o conhecimento da sua composição granulométrica não é suficiente para prever seu comportamento. Para tal é necessário a análise do limite de plasticidade e do limite de liquidez.

O limite de plasticidade é normalmente definido como a capacidade dos solos de serem moldados sob certas condições de umidade, sem variação de volume. Podemos destacar que esta é uma das mais importantes propriedades das argilas.

O limite de liquidez do solo pode ser definido como o teor de umidade para o qual o sulco se fecha com 25 golpes no ensaio realizado pelo aparelho Casagrande (CAPUTO, 1988).

### 2.1.2 Propriedades mecânicas dos solos

As propriedades mecânicas dos solos estão relacionadas com as características de equilíbrio e deformação dos solos, apontando elementos de coesão, ângulo de atrito, e cisalhamento.

As características de cisalhamento do solo são representadas pela coesão, ângulo de atrito interno e pela resistência do solo ao cisalhamento (Ortigão, 1995, apud SILVA e CARVALHO, 2007).

Vargas (1977) define coesão como a resistência que a fração argilosa empresta ao solo (resistência ao cisalhamento), na qual ele se torna capaz de manter suas partículas ligadas uma na outra, ou seja, formando uma “liga” natural, podendo ser moldado em forma de torrões, blocos e em diversas formas. Os solos que apresentam tal comportamento são chamados coesivos. Os solos não coesivos, que se desmancham facilmente, ao serem cortados ou escavados, são as areias puras e pedregulhos. A coesão dos solos pode ser classificada como real e aparente.

A coesão real é uma parte da resistência ao cisalhamento de solos úmidos, não saturados, resultante à pressão capilar da água transmitida as partículas. A coesão aparente é um fenômeno de atrito em que a pressão normal é consequente da pressão capilar, ou seja, saturando-se o solo essa parcela de resistência desaparece. Em solos argilosos, é onde pode-se ver melhor a coesão aparente, pois sob pressão capilar apresentam maiores valores de coesão (PINTO, 2000).

O ângulo de atrito pode ser entendido como o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a força normal aplicada ao plano normal sem que haja ruptura ou deslizamento (PINTO, 2000). O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia do solo (PINTO, 2000 apud SILVA E CARVALHO, 2007).

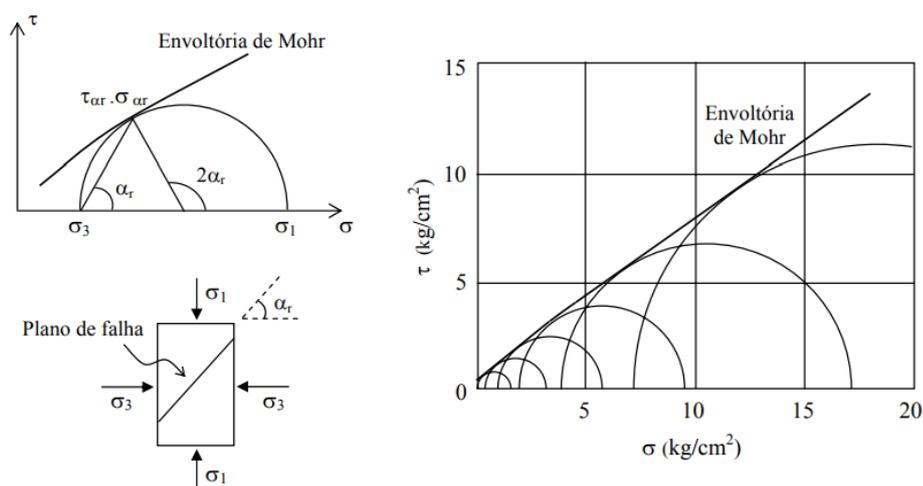
A resistência ao cisalhamento dos solos pode ser definida como a tensão máxima de cisalhamento que o solo pode suportar sem que haja ruptura, toda massa de solo se rompe quando essa resistência é excedida. A resistência ao cisalhamento dos solos se compõe basicamente da coesão e do ângulo de atrito entre as partículas, conforme a equação de Coulomb (CAPUTO, 1988).

De acordo com a teoria de Mohr há ruptura num determinado ponto quando, ao longo de uma superfície passando por esse ponto, a tensão de cisalhamento se

igual a à resistência intrínseca de cisalhamento do material, a qual é uma função de pressão normal atuante, no ponto, sobre o plano em questão (VARGAS, 1977).

O diagrama de Mohr apresenta o estado de tensões em torno de um ponto da massa de solo. Para determinar-se a resistência ao cisalhamento do solo ( $\tau$ ), são realizados ensaios com diferentes valores de tensões normais ( $\sigma_3$ ), elevando-se a tensão normal inicial ( $\sigma_1$ ) até a ruptura, conforme está representado na Figura 2.

**Figura 2. Envoltória de ruptura de Mohr.**



**Fonte: FSP (2013)**

Cada Círculo de Mohr representa o estado de tensões na ruptura de cada ensaio. A linha que tangencia estes círculos é definida como envoltória de ruptura de Mohr. A envoltória de Mohr é geralmente curva, embora com frequência ela seja associada a uma reta. Esta simplificação deve-se a Coulomb, e permite o cálculo da resistência ao cisalhamento do solo conforme a expressão:  $\tau = c + \sigma \cdot \text{tg } \varphi$ . Através do ajuste linear dessa reta pode-se também obter o ângulo de atrito e a coesão do solo ensaiado.

### 2.1.3 Empuxo dos solos

Empuxo de terra é a ação produzida pelo maciço terroso sobre as obras em contato (Neiva et al., 2014). É de suma importância a determinação do empuxo imposto pelos solos, pois a análise das estruturas de contenção depende diretamente desse fator.

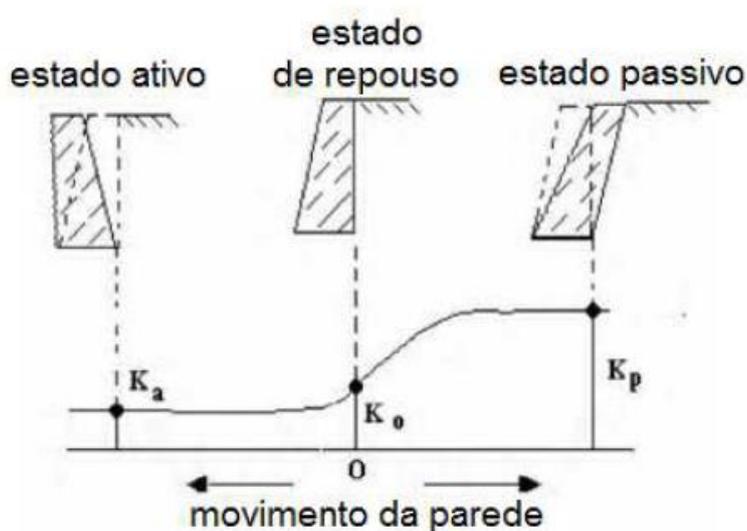
Devemos destacar também que os valores de empuxo estão diretamente ligados ao tipo de solo em questão, ou seja, a análise deve ser aliada sempre a todas as características predominantes dos solos, sejam elas físicas ou mecânicas.

Rankine baseou-se na hipótese de que uma ligeira deformação no solo é suficiente para provocar uma total mobilização da resistência de atrito, produzindo o estado ativo se o solo sofre expansão e passivo se sofre compressão. Sendo assim temos três estados de empuxo predominantes: ativo, passivo e em estado de equilíbrio (Figura 3).

De acordo com Vargas (1977), o conceito de empuxo em repouso é empírico e, portanto, seu valor é essencialmente experimental. As areias têm apresentado valores de 0,4 a 0,8 de acordo com a densidade de compactação. Já as argilas podem assumir qualquer valor, desde valores nulo, até superiores a 1. Costuma-se adotar um valor médio de 0,5 para os solos compactados em geral.

Em solos permeáveis a influência do lençol freático sobre o cálculo das pressões deve ser levada em conta, considerando-se que a pressão total é igual à soma da pressão da água mais a do solo com um peso específico submerso. No caso dos solos pouco permeáveis, deve-se calcular a pressão considerando o solo com um peso específico saturado.

**Figura 3. Estados de empuxo em função da movimentação**



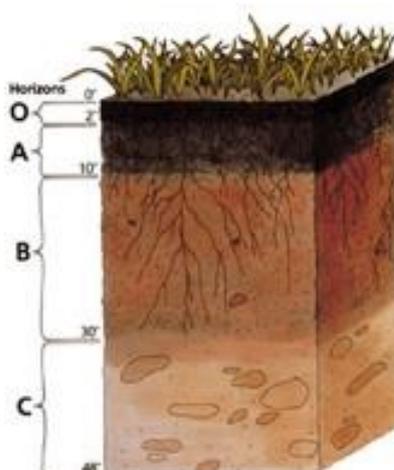
Fonte: CAPUTTO (1987)

### 2.1.4 Classificação dos solos de acordo com seus horizontes

A seção vertical das camadas de um solo desde a superfície até a rocha mãe constitui um perfil de solo (Figura 4), que se divide em (MINEIRO, 1981 apud PORTELA, 2013, pg. 6-7):

- **Horizonte A** - situa-se à superfície, possui húmus e é lixiviado. Tem espessura média de 20 a 30 centímetros. Esta camada superficial de solo possui porosidade e grau de saturação baixos (denominada por vezes de zona porosa);
- **Horizonte B** - Esta camada de solo jovem tem por vezes a mesma estrutura original da rocha mãe (solo residual). Pode ainda resultar da acumulação de materiais arrastados ou provenientes do horizonte A após a sua instalação. Por vezes é endurecido com cimentos calcários ou ferruginosos. A espessura média é da ordem de grandeza do horizonte A, mas pode atingir alguns metros.
- **Horizonte C** – subsolo – camada de topo alterado dos depósitos geológicos e é a partir dele que se formam os horizontes A e B.
- **Rocha mãe** - constitui a base e é composta por depósitos geológicos resistentes e rijos.

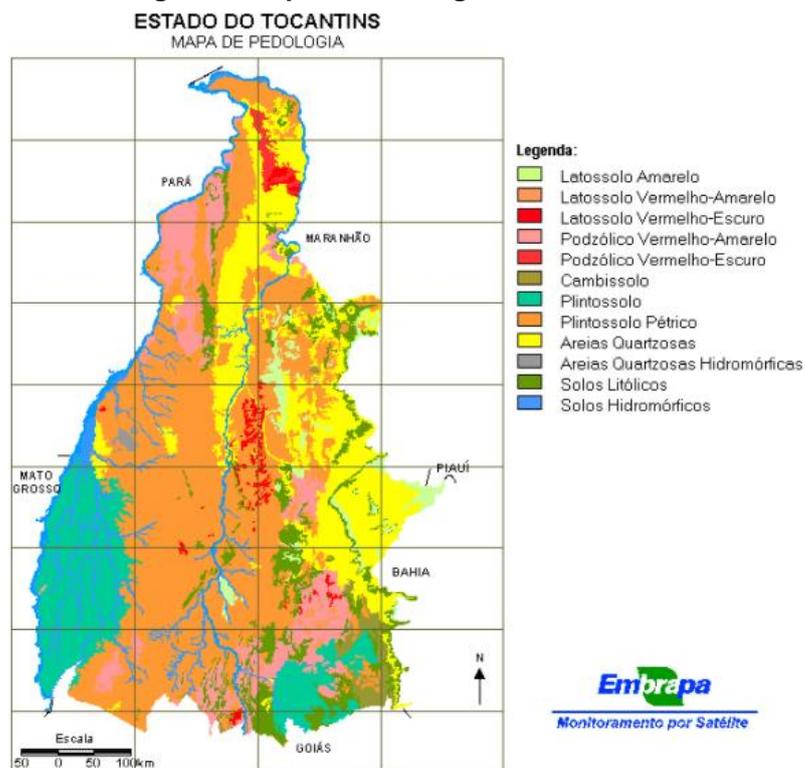
**Figura 4 - Perfil do solo.**



Fonte: EMBRAPA (2006)

### 2.1.5 Solos do Tocantins

De acordo com estudo realizado pela EMBRAPA, a composição pedológica do Tocantins, se dá conforme apresentado na Figura 5.

**Figura 5. Mapa de Pedologia do Tocantins.**

Fonte: EMBRAPA (2006)

Verifica-se na área estudada a predominância de solos distróficos, com horizonte A moderado e argila de atividade baixa. Em termos de expressão espacial, os Plintossolos Pétricos e os Latossolos são os principais, seguidos pelas Areias Quartzosas. Verifica-se ainda a presença do caráter petroplíntico na maioria das unidades taxonômicas encontradas.

Os Latossolos amarelos são formados de materiais argilosos ou areno-argilosos sedimentares da formação barreiras na região litorânea do Brasil ou nos baixos planaltos da região amazônica associados à formação Alter-do-Chão, podendo também ocorrer fora destes ambientes quando atenderem aos requisitos de cor definidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS). A cor amarelada é uniforme em profundidade, o mesmo ocorrendo com o teor de argila. A textura mais comum é a argilosa ou muito argilosa. Outro aspecto de campo refere-se à elevada coesão dos agregados estruturais (EMBRAPA, 2006).

Os Latossolos vermelho-amarelos são identificados em extensas áreas dispersas em todo o território nacional associados aos relevos, plano, suave ondulado ou ondulado. Ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito

profundos e uniformes em características de cor, textura e estrutura em profundidade (EMBRAPA, 2006).

Os Latossolos Vermelho-Escuros são solos minerais, não hidromórficos, com profundidades superiores a 2m, horizontes B com espessura maior que 50 cm, com sequência de horizontes A, B e C pouco distintos; as cores variam de vermelhas muito escuras a amareladas, geralmente escuras no A, vivas no B e mais claras no C. Apresentam teor de silte inferior a 20% e argila variando entre 15% e 80%. São solos com altamente permeáveis, podendo ser trabalhados com altos índices de umidade (EMBRAPA, 2006).

Os Podzólicos vermelho-amarelos são solos do horizonte B textural, não hidromórficos, com argila de atividade baixa, por serem constituídos por sesquióxidos, argilas do grupo 1:1 (caulinitas), quartzo e outros materiais resistentes ao intemperismo e saturação de bases baixa, isto é, inferior a 50%. Possuem textura arenosa, média ou, mais raramente, argilosa, no horizonte A e média ou argilosa, no horizonte Bt, com relação textural em torno de 1,5 (textura argilosa) e de 3,0 a 10,0, nos de caráter abrupto ou abrupto plintico, os quais possuem características morfológicas bem distintas e drenagem moderada (EMBRAPA, 2006).

Os Podzólicos vermelho-escuros são minerais não hidromórficos, com horizonte B textural de cores avermelhadas. As texturas predominantes são média cascalhenta, muito argilosa, média argilosa, argilosa. A estrutura dos horizontes A é granular, em grau moderado e, a dos horizontes B, moderada a forte em blocos angulares e subangulares (CAVEDON e SHINZATO,2016).

A ordem dos Cambissolos abrange solos minerais com características bastante variáveis, mas que sempre apresentam textura média ou mais fina e ausência de grande desenvolvimento pedogenético. São solos com pequena profundidade, elevado teor de minerais primários, presença marcante de fragmentos de rocha na massa do solo e outros indícios do intemperismo incipiente do solo (IAC, 2014).

Segundo Embrapa (2006), Plintossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte plíntico ou litoplíntico ou concrecionário iniciando dentro de 40 cm, ou dentro de 200 cm quando imediatamente abaixo do horizonte A ou E, ou de outro horizonte que apresente cores pálidas, variegadas ou com mosqueados em quantidade abundante. A classe textural no horizonte plíntico varia de franco a argila (EMBRAPA, 2006).

Os Plintossolos pétricos apresentam horizonte litoplíntico, contínuo ou praticamente contínuo, com 10cm ou mais de espessura ou 50% ou mais de petroplintita formando uma camada com espessura mínima de 15cm, dentro de 40cm da superfície do solo ou imediatamente abaixo do horizonte A ou E. Possui textura arenosa desde a superfície do solo até o início do horizonte litoplíntico, que ocorre entre 50cm e 100cm de profundidade.

As areias quartzosas são originadas de depósitos arenosos, de textura areia ou areia franca em pelo menos 2 m de profundidade. São solos constituídos principalmente de grãos de quartzo, conseqüentemente, isentos de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo. Essa classe de solos abrange as Areias Quartzosas não-hidromórficas sem coloração, podendo apresentar também coloração amarela ou vermelha. A granulometria da fração areia é variável, podendo ter grãos menores ou maiores em alguns casos. O teor máximo de argila chega a 15%, quando o silte está ausente (EMBRAPA, 2006).

Quando ocorre variação do lençol freático são denominadas areias quartzosas hidromórficas, situadas nas margens dos canais fluviais de cor acinzentadas.

Os solos litólicos são pouco desenvolvidos, rasos, não hidromórficos, apresenta horizonte A diretamente sobre a rocha ou horizonte C de pequena espessura. São normalmente pedregosos e/ou rochosos, moderadamente a excessivamente drenados com horizonte A pouco espesso, cascalhento, de textura predominantemente média, podendo também ocorrer solos de textura arenosa, siltosa ou argilosa (EMBRAPA, 2006).

Os solos hidromórficos apresentam grande umidade por estarem próximas de rios, logos, ou regiões alagadas, todas as demais classes de solo, podem ou não se enquadrar em solos hidromórficos.

#### 2.1.5.1 Classificação dos solos do Tocantins quanto à textura

O Quadro 1 apresenta as principais características físicas das classes de solos descritas no estado do Tocantins.

Os principais tipos de solos identificados foram os Concrecionários (23%), Latossolos (22%) e Neossolos Quartzarênicos (19%). Como uma das características dessas classes, pode-se citar a predominância de texturas média e arenosa, o que determina uma baixa retenção de água, favorecida também pelo baixo teor de matéria orgânica dos solos (A. FILHO, 2017).

**Quadro 1. Características predominantes.**

<b>Solo</b>	<b>Textura Predominante</b>	<b>Características Acessórias</b>
Latossolo Amarelo	Média	-
Latossolo Vermelho-Amarelo	Média e Argilosa	-
Latossolo Vermelho-Escuro	Argilosa	-
Latossolo Roxo	Muito argilosa e Argilosa	-
Podzólico Vermelho-Amarelo	Média/Argilosa; Arenosa/Média.	Fase pedregosa; cascalhenta.
Podzólico Vermelho-Escuro	Argilosa ou Muito Argilosa	-
Cambissolo	Média ou Argilosa	Fase rochosa; cascalhenta.
Plintossolo	Média/argilosa	Abruptos; muito cascalhenta.
Plintossolo Pétrico	Argilosa ou indiscriminado	-
Areia Quartzosa Hidromórfica	Arenosa	-
Areia Quartzosa	Arenosa	-
Solo Litólico	Média ou indiscriminado	Fase pedregosa e concrecionário
Plintossolo Pétrico	Arenosa/Média e Média/Argilosa	Plínticos; concrecionário

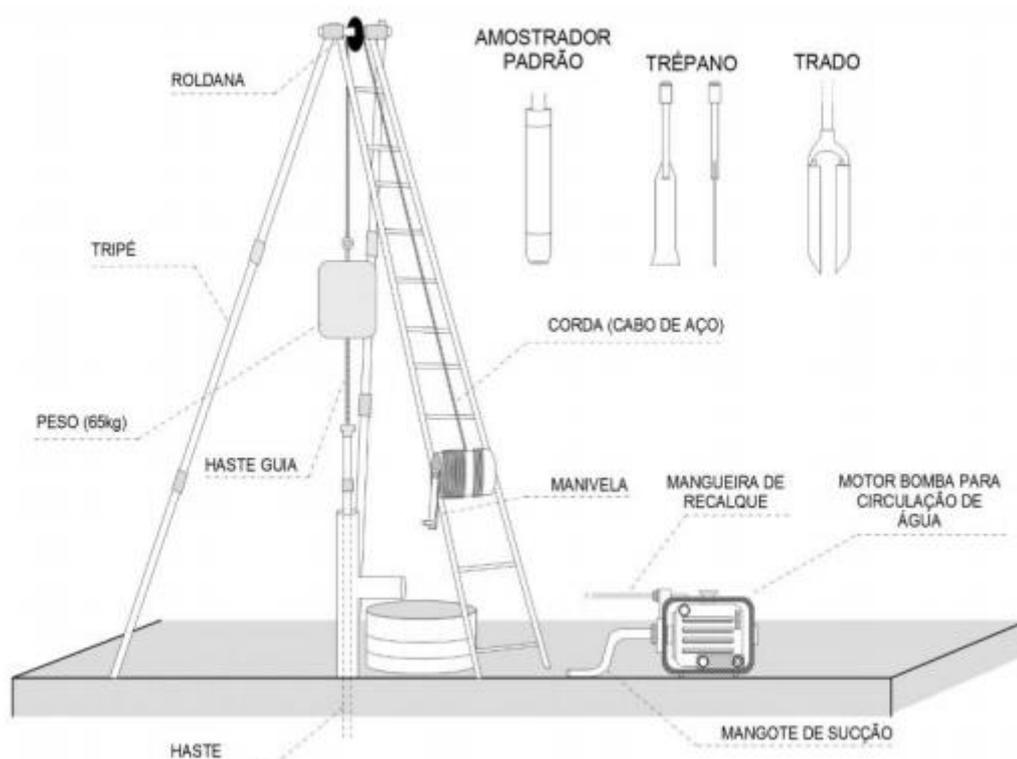
Fonte: EMBRAPA (2006) – Adaptado.

## 2.2 SONDAGENS A PERCUSSÃO E O *STANDARD PENETRATION TEST* (SPT)

De acordo com Thiesen (2016), apesar dos avanços na geotecnia nacional, as sondagens de simples reconhecimento ainda são as mais utilizadas no Brasil. A sondagem a percussão, ou se simples reconhecimento, é executada com a finalidade de se obter amostras de solos pouco deformadas e valores quantitativos de resistência dos solos por meio de ensaios padronizados, denominados STP (*Standard Penetration Test*), e nacionalmente normalizados pela NBR 6484\2001 (SOUZA; SILVA; IYOMASA, 1998 apud SOARES, 2011).

De acordo com Delatim et al. (2013), sondagem a percussão pode ser definida como um método de investigação de solo, no qual o avanço da perfuração é feito por meio de trado ou de lavagem, sendo utilizado a cravação do amostrador para a medida de índices de resistência a penetração ( $N_{spt}$ ), obtenção de amostras e determinação do nível da água. Na Figura 6, pode ser observado o equipamento de sondagem a percussão SPT.

**Figura 6. Equipamento para ensaio de reconhecimento à percussão SPT**



Fonte: Higashi (2016) apud Thiesen (2016)

De acordo com a NBR 6484/2001, os critérios de parada deverão obedecer as seguintes condições:

- Quando, em 3 m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais do amostrador-padrão;
- Quando, em 4 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador-padrão; e
- Quando, em 5 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador-padrão.

A sondagem deve ser dada por encerrada quando, no ensaio de avanço da perfuração por circulação de água, forem obtidos avanços inferiores a 50 mm em cada período de 10 min ou quando, após a realização de quatro ensaios consecutivos, não for alcançada a profundidade de execução do SPT.

Nestas condições o terreno será considerado impenetrável ao ensaio de penetração.

Após o término dos ensaios é obtido um laudo de sondagem semelhante ao apresentado na Figura 7:



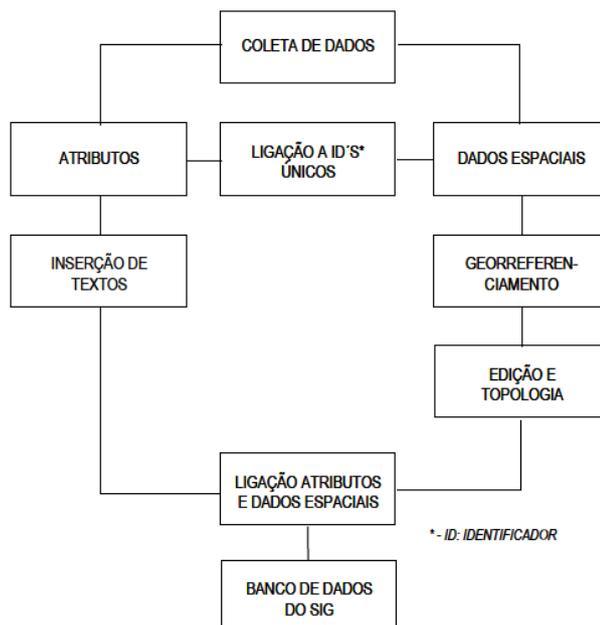
Soares (2011), aponta citando Yuaça (2003), que os bancos de dados georreferenciados e interligados a um SIG, têm alcançado grande expansão de aplicação prática no Brasil, subsidiando ações de gerenciamento de finanças, planejamento de infra-estrutura, ações no saneamento, modelagem de dados espaciais, dentre outros diversas utilizações.

Dentro deste contexto SOARES (2011), afirma que:

O objeto geográfico primário utilizado para o armazenamento dos furos de sondagem no banco de dados geotécnicos em SIG é o ponto, representando os furos de sondagem georreferenciados em uma base cartográfica. A este objeto geográfico podem ser acrescentados várias tabelas de atributos, cujos campos poderão ser do tipo texto, numérico, imagens, sons, etc. As tabelas de atributos das sondagens podem ser estruturadas utilizando programas de planilha eletrônica ou de banco de dados da linha Office do sistema operacional Windows. Posteriormente, estes dados podem ser incorporados na plataforma de SIG a ser utilizada para gestão e análise dos dados cadastrados das sondagens.

Um esquema de projeto genérico de um banco de dados em ambiente SIG pode ser analisado na Figura 8.

**Figura 8. Modelo de banco de dados genérico em ambiente SIG**



Fonte: Soares (2011)

Existem diversos *softwares* que trabalham com banco de dados em ambiente SIG, porém o abordado e utilizado neste trabalho será o *software ArcGIS*.

## 2.4 ARCGIS

O *software ArcGis* pode ser definido como um conjunto integrado de *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), produzido pela empresa americana ESRI (VERGARA, 2015). Utilizado para criação e utilização de mapas, compilação de dados geográficos, análise de informações mapeadas e gestão de informações geográficas em bancos de dados (UFRGS, 2016).

O ArcGIS usa modelos de dados de SIG para representar a geografia e provê todas as ferramentas necessárias para criar e trabalhar com o dados geográficos. Isto inclui ferramentas para todas as tarefas de SIG: editando e automatizando dados, mapeando cartograficamente tarefas, administrando dados, realizando análise geográfica, administrando dados avançados e desenvolvendo dados e aplicações na Internet.

## 2.5 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS

A geoestatística compreende a aplicação do formalismo das Funções Aleatórias ao reconhecimento e à estimativa dos fenômenos naturais. Em locais não amostrados, os valores desconhecidos podem ser estimados se forem considerados como realizações de sua variável aleatória correspondente (FOLLE, 2002).

De acordo com Silva Junior et al. (2013), cada vez mais os pesquisadores têm notado a relevância em estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo. Desde as primeiras aplicações da geoestatística em solos nos anos 80 (Burgess & Webster, 1980 apud Silva Junior et al., 2013), os pedólogos já estavam convencidos de que os solos possuem variabilidade natural, pelo seu material de origem, além da variabilidade encontrada no sentido vertical, e também no sentido horizontal.

Está baseada na teoria das variáveis regionalizadas de Matheron (1963) que parte da premissa de haver dependência espacial entre as observações vizinhas de uma variável aleatória qualquer, distribuída continuamente no espaço (Almeida et al., 2011). Sendo assim, a independência entre as observações, deve ser desconsiderada por meio de medidas de associação (auto correlação), que indicam dependência espacial ou temporal das amostras observadas em função da distância em que estas se encontram.

Considerando que observações mais próximas geograficamente tendem a ter valores mais similares e que tal fato pode ser avaliado por medidas de associação, a análise geoestatística determina o grau de associação entre as amostras, com base

na direção e na distância entre elas. A dependência espacial faz com que os pontos de amostragem mais próximos entre si estejam mais semelhantes do que aqueles mais distantes (MONTAGNA, 2001 apud ODA, 2005).

Na literatura existem vários trabalhos sobre variabilidade espacial de atributos do solo, em que a maioria utiliza a krigagem para a interpolação na confecção de mapas de variabilidade espacial, por ser considerado um interpolador local ótimo, uma vez que seu princípio é a estimativa ótima não enviesada nos pontos não amostrados usando as propriedades estruturais dos semivariogramas com variância mínima da sua estimativa e sem tendência (SILVA JUNIOR et al., 2013).

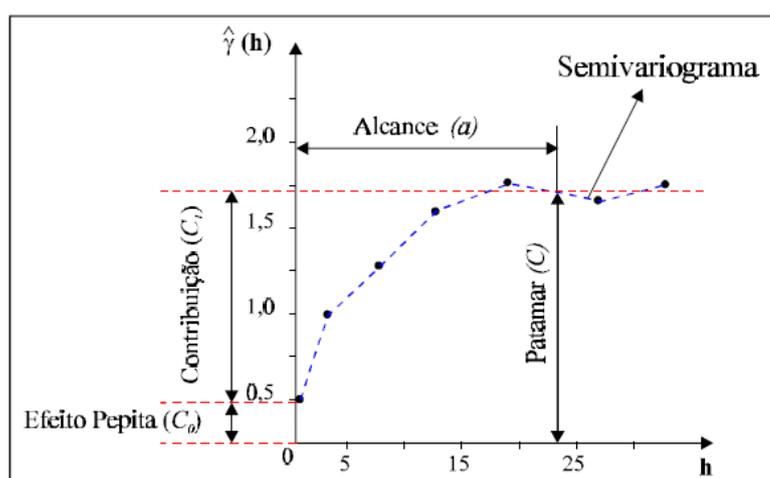
A seguir são definidos os conceitos relacionados ao método de krigagem e semivariogramas geostatísticos.

### 2.5.1 Semivariograma

O semivariograma é uma função matemática definida para representar o nível de dependência entre duas unidades experimentais e é usado para modelar dois valores correlacionados no espaço ou no tempo (ODA, 2005). Definido pela média quadrática das diferenças entre os valores obtidos em um ponto qualquer.

De acordo com Soares (2011), a figura 10 apresenta o padrão de um semivariograma representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças  $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$  decresçam à medida que  $h$ , a distância que os separa decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias.

Figura 9. Exemplo de semivariograma



Fonte: Camargo, 1997 apud Soares, 2011.

Os parâmetros do semivariograma observados na Figura 9 são definidos da seguinte maneira:

- Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Na Figura 10, o alcance ocorre próximo de 25m.
- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$ ) torna-se invariante com a distância.
- Efeito Pepita ( $C_0$ ): idealmente,  $g(0)=0$ . Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $g(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.
- Contribuição ( $C_1$ ): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ).

Dessa maneira, de acordo com Sturaro (2015), o conjunto de valores experimentais  $z(x)$  e  $Z(x_1 + h)$ , separados pela distância orientada  $h$ , define-se o semivariograma experimental pela Equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

Onde:

$g(h)$ : valor calculado da função variograma;

$h$ : Distância entre pares amostrais;

$N(h)$ : número de pares de valores medidos,  $z(x)$  e  $z(x+h)$ , separados por um vetor distância  $h$ ;

$z(x)$  e  $z(x+h)$ : Valores da variável em estudo em dois pontos distintos, separados por uma distância preestabelecida e constante em uma direção.

De acordo com Yamamoto e Landim (2013), para cada distância  $h$ , procura-se os pares de pontos que estejam dentro dessa distância e assim suas diferenças ao quadrado são acumuladas na somatória. Ao final, a somatória é dividida pelo número de pares de pontos, que é uma variância média para uma determinada distância  $h$ . Evidentemente, essa variância média está sujeita à flutuação estatística, principalmente quando o número de pares de pontos é pequeno.

Thiesen (2016), afirma que o semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre as amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem.

### 2.5.2 Krigagem

Diferente dos métodos convencionais de estimação, a krigagem está fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas. A krigagem ordinária foi e têm sido bastante empregada na estimativa pontual e na estimativa de blocos, mais especificamente no caso de recursos minerais, recursos hídricos, geotecnia etc.. Trata-se de uma combinação linear de pesos e amostras mais próximas para o caso dos dados se adequarem a uma distribuição normal com média e variância conhecidas (SOARES, 2011).

Folle (2002), afirma que o método de krigagem ordinária (KO) é parte fundamental da geoestatística linear, sendo um método que fornece valores estimados não tendenciosos pontuais ou médias de blocos, partindo de um modelo ajustado de covariância/variograma e de uma variável em seu domínio geoestatístico.

Em seus estudos sobre o método estimador da krigagem ordinária, Yamamoto (2016), define que este é baseado na fórmula da média ponderada, onde os ponderadores dependem da informação estrutural fornecida pelo variograma. Esta é a principal diferença em relação aos outros métodos de estimativa como, por exemplo, o inverso da distância. O valor da variável de interesse em um ponto não amostrado ( $x_0$ ) é calculado como combinação linear dos pontos de dados vizinhos ( $Z(x_i)$ ,  $i=1,n$ ), conforme Equação 2.

$$Z_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

Onde:

$Z_{ko}$ : valor interpolado;

$\lambda_i$ : peso atribuído aos valores amostrados com base no semivariograma;

$Z(x_i)$ : valor amostrado na posição  $x_i$ ;

$n$ : número de pontos dentro do alcance.

Durante o processo de interpolação, a krigagem ordinária tem como característica a atribuição de pesos às amostras. As amostras que estão mais próximas do ponto a ser estimado terão maior peso e, a medida que a distância aumenta, o peso ou influência diminui. Tal é feito através da determinação de uma matriz de covariância espacial, nas quais são determinados os pesos atribuídos às diferentes amostras (SILVA, 2008). Os pesos da krigagem ordinária são calculados impondo-se duas condições de restrição. A primeira impõe que em média a diferença entre o valor calculado e real seja igual a zero. Tendo-se assim a condição de não viés pela Equação 3:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

Onde:

$\lambda_i$ : peso atribuído aos valores amostrados.

A segunda condição de restrição impõe a minimização da variância do erro. A minimização da variância do erro, sujeita à condição de não viés resulta no sistema de equações de krigagem, conforme Yamamoto e Landim (2013, p. 69-70). Os ponderadores da krigagem ordinária são calculados a partir da resolução desse sistema de equações.

De acordo com Rocha (2009), o modelo teórico de semivariograma permite o acesso aos valores de variância espacial para quaisquer distâncias e em qualquer direção dentro do domínio. Estes valores, utilizados no sistema de equações de krigagem, permitirão derivar os pesos da krigagem, os quais serão empregados no estimador da krigagem conforme Equação 4:

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & C(x_1 - x_2) & \dots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ C(x_2 - x_1) & C(x_2 - x_2) & \dots & C(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ C(x_n - x_1) & C(x_n - x_2) & \dots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_o - x_1) \\ C(x_o - x_2) \\ \vdots \\ C(x_o - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

(4)

Onde:

$C(x_i - x_j)$ : refere-se à função de covariância correspondente ao vetor  $h$ , com origem em  $x_i$  e extremidade em  $x_j$ ;

$\lambda_i$ : peso atribuído aos valores amostrados com base no semivariograma.

## 2.6 CARTAS GEOTÉCNICAS

De acordo com Zuquette (1993) apud Franco et al. (2010), a cartografia geotécnica é um processo que tem por finalidade básica levantar, avaliar e analisar os atributos que compõem o meio físico. As informações devem ser manipuladas por processos de seleção, generalização, adição e transformação, para que possam ser correlacionadas, interpretadas e, no final, representadas em mapas, cartas e anexos descritivos utilizados para fins de engenharia, planejamento, saneamento, etc.

Sousa (2014), afirma que para se ter um produto compatível com a realidade deve-se ter segurança sobre os dados de entrada, e que estes necessariamente estejam em escalas compatíveis. Cerri (1990) afirma que os objetivos das cartas geotécnicas variam de acordo com o tipo de carta e o grau de detalhe, classificando-os em:

- ✓ Genéricas: são as cartas indicativas e orientativas, subsidiando o planejamento do uso e ocupação do solo.
- ✓ Específicas: são determinísticas e restritivas, impondo condições de projeto, associadas a uma determinada forma de uso e ocupação do solo.

Zuquette (1993) afirma que as cartas geotécnicas podem ser classificadas de acordo com a finalidade do estudo geotécnico, tendo relação direta com a escala de trabalho proposta. E seus estudos elaborou algumas orientações quanto as escalas de trabalho como pode ser visto no Quadro 2.

A carta geotécnica é composta principalmente de dois documentos: um conjunto cartográfico (cartas e respectivos quadros legendas) e um relatório descritivo. Estes documentos cartográficos não substituem as investigações detalhadas dos locais, com ensaios em campo e análise de amostras em laboratório, mas auxiliam no planejamento e interpretação dos resultados obtidos, sendo largamente utilizados nas diferentes fases do projeto e implantação de obras de engenharia, nos processos de planejamento territorial, urbano e ambiental, assim

como no desenvolvimento e na conservação do meio ambiente (ZUQUETTE & NAKAZAWA, 1998, apud FRANCO et al. 2010).

**Quadro 2. Escalas em função da finalidade do mapeamento geotécnico**

<b>FINALIDADE DO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO</b>	<b>ESCALA</b>
BÁSICO	1:250.000
REGIONAL	1:100.000
	1:50.000
	1:25.000
DETALHE	1:25.000
	1:10.000
	1:5.000
	1:2.000

Fonte: Zuquette (1993 adaptado)

## 2.7 ESTUDOS SEMELHANTES EXISTENTES

Conforme apresentado por Garcia (2017), mapeamentos geotécnicos importantes já foram realizados na cidade de Palmas, como o de Santos (2000) que coletou, elaborou e disponibilizou mapa da cobertura e uso da terra do ano de 1998, carta de declividade, carta da espessura, escavabilidade, erodibilidade potencial e qualidade de materiais inconsolidados, carta das condições geotécnicas e carta de áreas potenciais para a disposição de resíduos.

Martins (2014), fazendo uso de boletins de sondagem e carta das condições geotécnicas de Santos (2000), caracterizou as principais zonas geotécnicas do Plano Diretor da capital e apresentou soluções de fundações para edificações típicas da cidade.

Pesquisas realizadas por Castro et al. (2016a, 2016b), traçaram perfis geotécnicos de pontos da cidade por intermédio da combinação de ensaios geofísicos de eletrorresistividade e sondagem SPT, e com as amostras do ensaio SPT conseguiu relacionar a resistividade elétrica e as características geotécnicas dos solos de Palmas.

E mais recentemente Garcia (2017), apresentou cartas da cota do impenetrável e profundidade do nível da água da cidade Palmas, através de ensaios SPT, adquiridos por meio de laudos de sondagem.

Tais estudos mostram a importância de desenvolver pesquisas na cidade de Palmas TO, pois trata-se de uma cidade relativamente nova, e que possui poucas informações geotécnicas catalogadas.

No Brasil, diversos estudos abordando caracterização geotécnica foram realizados, na grande maioria, o embasamento matemático e teórico foi realizado através dos estudos de Krige, Matheron (1963), Zuquette (1993). Relacionando o método de krigagem idealizado por Daniel G. Krige, com as variáveis especializadas Matheron, e a adaptação das escalas de estudo propostas por Zuquette.

Os principais estudos recentes no Brasil foram listados por Garcia (2017), conforme o Quadro 3.

**Quadro 3. Principais estudos recentes realizados no Brasil**

<b>Autores</b>	<b>Estudo</b>	<b>furos/km<sup>2</sup></b>	<b>Objetivos</b>
Talamini Neto (2001)	NSPT, impenetrável ao SPT e caracterização geotécnica a 3, 10 e 15 m em Curitiba/PR	0,85 furos/km <sup>2</sup> ( 440 km <sup>2</sup> e 373 furos SPT)	Planejamento de ocupação do subterrâneo
Fonteles et al. (2006)	Modelagem do lençol freático em Fortaleza/CE	2,9 furos/km <sup>2</sup> (44 km <sup>2</sup> e 126 furos SPT)	Auxílio na escolha de fundações
Fonteles (2014)	Modelagem da superfície impenetrável em Fortaleza/CE	(44 km <sup>2</sup> e 126 furos SPT)	Auxílio na escolha de fundações
Dal'Asta, Pires e Pinheiro (2013)	Mapeamento da cota da boca do SPT e seu impenetrável em Santa Maria/RS	0,65 furos/km <sup>2</sup> (118,62km <sup>2</sup> e 77 furos SPT)	Planejamento de edificações
Silva (2008)	Mapeamento do N <sub>SPT</sub> e de Torque Máximo do SPT-T em Londrina/PR	6,43 furos/km <sup>2</sup> (37 km <sup>2</sup> e 238 furos SPT)	Correlacionar variáveis a pedologia e topografia
Alves (2009)	Mapeamento dos solos com diferentes adequabilidades à escavação no plano piloto de Brasília	11,59 furos/km <sup>2</sup> (154 km <sup>2</sup> e 1896 furos SPT)	Construção de garagens subterrâneas
Soares (2011)	Análise espacial do lençol lençol freático em João Pessoa/PB	14,8 furos/km <sup>2</sup> ( 10,7 km <sup>2</sup> e 158 furos SPT )	Banco de dados visando o auxílio a obras de fundação
Soares (2011)	Análise espacial do NSPT em João Pessoa/PB	13,1 furos/km <sup>2</sup> (13,8 km <sup>2</sup> e 181 furos SPT)	Banco de dados visando o auxílio a obras de fundação
Thiesen (2016)	Profundidade do lençol freático, impenetrável ao SPT e NSPT para zona urbanizada de Blumenau/SC	2,0 furos/km <sup>2</sup> (207,2 km <sup>2</sup> e 104 furos SPT)	Uso e ocupação do solo, informações área de fundações e geologia

Fonte: Garcia (2017, adaptado)

### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para resolver o problema de pesquisa proposto, foi a pesquisa aplicada, a qual visa identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos de estudo em questão.

Tem-se como objetivo metodológico, uma pesquisa exploratória e descritiva, com procedimentos de levantamento de dados e estudo de caso. Na qual a abordagem dos dados obtidos foi feita através de uma análise quali-quantitativa, uma vez que visa-se analisar quantidades de dados obtidos e caracterizar por meio destes, os tipos de solos no estado do Tocantins.

O objeto de estudo foram os solos do estado do Tocantins, com ênfase na capital Palmas TO, através da análise de laudos de sondagem a percussão (SPT).

Os instrumentos de coleta de dados foram ofícios explicativos, solicitando doação de laudos de sondagem SPT às empresas que realizam sondagem a percussão, dados bibliográficos já existentes para compor as análises, e as normas técnicas vigentes relacionadas ao tema. Os dados foram analisados através do *software* ArcGis, e apresentados de maneira descritiva por meio de cartas topográficas.

Nos itens seguintes, são descritas às atividades realizadas para atingir os objetivos da pesquisa.

#### 3.1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS DE SONDAÇÃO À PERCUSSÃO REALIZADAS NO ESTADO DO TOCANTINS

Através de ofícios, foi realizado contato com empresas que realizam sondagens no estado no Tocantins, solicitando o apoio de cada uma delas, para levantar laudos de sondagem à percussão. É importante lembrar que tais dados serão utilizados apenas para fins acadêmicos e elaboração deste trabalho de conclusão de curso. Após o levantamento dos laudos, os dados foram analisados, tratados e inseridos manualmente em uma planilha do *software Excel*.

#### 3.2 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS EM FERRAMENTA SIG

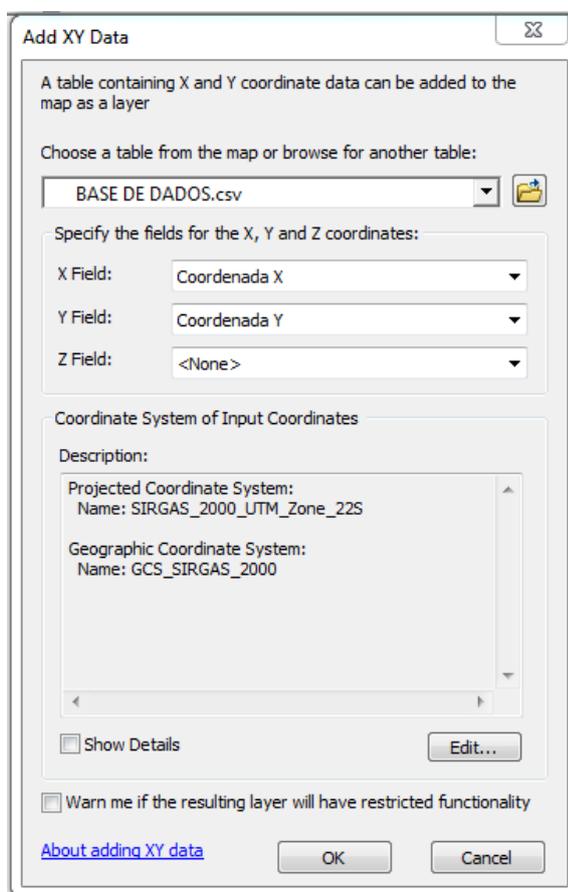
Com base na planilha gerada anteriormente através dos laudos doados, os dados foram espacializados através da ferramenta “*add xy Date*”, disponível no *software* ArgGis. Esta ferramenta permite importar através de coordenadas

geográficas os dados de uma planilha eletrônica salva em formato “.csv” (separados por virgula).

Para isto foi determinado inicialmente o sistema de coordenadas em que se desejava trabalhar. No caso do estado do Tocantins, o tipo de coordenadas mais utilizado é UTM (*Universal Transversa de Mercator*), vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro SIRGAS 2000.

Após a definição do sistema de coordenadas, a planilha foi importada para o ambiente de trabalho de ArcGis e então acionada a ferramenta “Add XY Data”, a qual abrirá uma janela solicitando que seja informado quais dados da tabela deverão ser utilizados como as coordenadas x e y, conforme Figura 10.

**Figura 10. Localização no ArcGis da ferramenta “Add XY Data”**



Fonte: Autora

Após este processo, foram gerados automaticamente pontos espacializados de acordo com suas respectivas coordenadas e correlacionados a uma tabela de atributos semelhante a criada inicialmente, em formato *shapefile* - dados

geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

### 3.3 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS TIPOS DE SOLOS PRESENTES NA CAPITAL DO ESTADO DO TOCANTINS ATRAVÉS DO BANCO DE DADOS GERADO.

Para caracterização dos solos presentes na capital Palmas TO, foi utilizado como parâmetro de interpolação, valores inteiros adotados de maneira empírica e sem relação com estudos laboratoriais, apenas para fim de resultado deste trabalho, os quais contemplam valores para 16 variações de solos, entre areia, silte, argila, e pedregulho principais tipos de solos geotécnicos classificados e investigados pelos autores Aoki e Velloso (1975). Os valores adotados estão detalhados no Quadro 4.

**Quadro 4. Valores empíricos atribuídos aos tipos de solo**

Tipo de Solo	Valor Atribuído
Argila	1
Argila Arenosa	2
Argila Areno-siltosa	3
Argila Siltosa	4
Argila Silto-arenosa	5
Silte	6
Silte Arenoso	7
Silte Areno-argiloso	8
Silte Argiloso	9
Silte Argilo-arenoso	10
Areia	11
Areia Siltosa	12
Areia Silto-argilosa	13
Areia Argilosa	14
Areia Argilo-siltosa	15
Pedregulho	16

Fonte: Autora

Com os valores adotados do Quadro 4 aplicados aos dados coletados, foi realizada uma interpolação utilizando o método de krigagem, no *software* ArcGis. A ferramenta mais completa correspondente a este método é a “*Empirical Bayesian kringing*” (Figura 11).

**Figura 11. Localização no ArcGis da ferramenta *Empirical Bayesian kriging***



Fonte: Autora

Nessa ferramenta é possível definir a quantidade de pontos vizinhos com os quais deseja-se interpolar, e o raio de pesquisa. Para este trabalho foi adotado um número máximo de 8 vizinhos, e no mínimo 4, em um raio de pesquisa de 30m, localizados em 8 setores. O resultado foi um polígono com os valores interpolados em forma de raster - imagens que contêm a descrição de cada pixel, em oposição aos gráficos vectoriais- , a partir do raster foi aplicado a ferramenta “*Extract by Mask*”, a qual extrai de um raster apenas o que esta dentro da máscara de processamento, que neste caso são os limites da capital Palmas TO.

### 3.4 IDENTIFICAÇÃO DO $N_{SPT}$ EM DIFERENTES CAMADAS, VISANDO SUBSIDIAR OBRAS DE ESCAVAÇÃO NA CAPITAL DO ESTADO DO TOCANTINS.

Para caracterização do  $N_{spt}$  presente na capital Palmas TO, foi utilizado como parâmetro valores  $N_{spt}$  coletados no laudos de sondagem para os segundos 45 centímetros do ensaio. E então realizada uma interpolação utilizando o método de krigagem. No *software* ArcGis a ferramenta mais completa correspondente a este método é a “*Empirical Bayesian kriging*”, conforme citado no item 3.3.

Nessa ferramenta é possível definir a quantidade de pontos vizinhos com os quais deseja-se interpolar, e o raio de pesquisa. Para este trabalho foi adotado um número máximo de 8 vizinhos, e no mínimo 4, em um raio de pesquisa de 30m, localizados em 8 setores. O resultado foi um polígono com os valores interpolados em forma de raster-imagens que contêm a descrição de cada pixel, em oposição aos gráficos vectoriais -, a partir do raster foi aplicado a ferramenta “*Extract by Mask*”, a qual extrai de um raster apenas o que esta dentro da mascara de processamento, que neste caso são os limites da capital Palmas TO.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS DE SONDAÇÃO Á PERCUSSÃO REALIZADAS NO ESTADO DO TOCANTINS

Foi realizado contato com as empresas que prestam serviços de sondagem, com empresas privadas que utilizam os serviços de sondagem e também com as 139 prefeituras do estado do Tocantins. Para o contato com as empresas foi utilizado um ofício explicativo do teor da pesquisa. O modelo do ofício pode ser averiguado em apêndice A.

Como resposta das prefeituras por telefone, foi solicitado o envio do ofício explicando o teor da pesquisa e suas finalidades, para liberação dos laudos por meio da secretaria de infraestrutura do município, e em contrapartida, a prefeitura encaminhou por e-mail as laudos disponíveis para “doação” acadêmica.

Já as empresas que prestam serviços de sondagem, como resposta disponibilizaram uma lista de possíveis clientes doadores de laudos, visto que o laudo é propriedade do cliente e não da empresa. Com a lista em mãos, foram realizadas ligações telefônicas para cada cliente, e em seguida os ofícios foram encaminhados por e-mail, totalizando aproximadamente 200 clientes. Dos 200 clientes contatados, somente 4 se recusaram a doar os laudos, podendo-se então perceber que a maioria entende a importância de trabalhos de pesquisa para a sociedade.

Foram recolhidos um total de 550 laudos, com em média 4 furos de sondagem cada um, totalizando cerca de 2200 pontos/furos de sondagem.

Ao analisar os laudos foi possível perceber que em laudos mais antigos, não havia a presença das coordenadas geográficas dos furos de sondagem, e em muitos casos o endereço presente também não permitia a espacialização do furo em local correto. Em casos específicos em que havia endereço completo, as coordenadas foram obtidas através do *Google Earth*. Logo, os furos aptos a compor o trabalho foram aqueles que continham as coordenadas geográficas e aqueles possíveis de identifica-las; o que, conseqüentemente, reduziu a quantidade de pontos de sondagem que fizeram parte do estudo.

A quantidade de pontos aptos as análises, resumiu-se ao Quadro 5.

**Quadro 5. Distribuição dos Pontos**

Local	Quantidade de Pontos	Área (km <sup>2</sup> )	Pontos/km <sup>2</sup>
Tocantins	942	278.846,65	0,0034
Palmas*	309	143,3	2,14

\* Área de concentração urbana

Fonte: Autora

Assim, observa-se que foi obtido um total de 942 pontos distribuídos em todo estado, dos quais 309 estão localizados na capital Palmas; o que corresponde a 32,8% do total. A grande quantidade de pontos obtidos na capital Palmas, deve-se ao desenvolvimento urbano da cidade, sendo esta a que mais cresce em todo o estado do Tocantins.

#### 4.2 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS EM FERRAMENTA SIG

A base de dados foi estruturada inicialmente no *software* Excel, com intuito de passar as informações contidas nos laudos, para um formato reconhecido pela ferramenta SIG. Os dados foram espacializados conforme descrito no item 3.2 e a estrutura final da base ficou de acordo com a figura 12.

**Figura 12. Estrutura da base de dados no ArcGis**

CD	Cidade	X	Y	PROF 1M	V1	NSPT 1m	PROF 2M	V2	NSTP 2m	PROF 3M	V3	NSTP 3 m	PROF 4M	V4	NSPT 4m	PROF 5M	V5	NSPT 5m	NA
1	Palmas	135604	8871055	Areia	11	0	Areia siltc	12	9	Areia siltc	12	5	Silte	7	6	Silte com	7	5	NE
2	Palmas	135617	8871058	Areia	11	0	Areia siltc	13	10	Areia siltc	15	10	Areia siltc	13	8	Silte argilk	9	9	NE
3	Palmas	135614	8871047	Areia	11	0	Areia com	11	11	Areia com	11	13	Areia com	11	19	Areia siltc	12	27	NE

Fonte: Autora

A coluna CD, indicada apenas um código aleatório atribuído ao ponto de sondagem, para fins de manipulação do item através do ArcGis. A coluna cidade indica em qual município esta localizado o ponto em questão, e as colunas x e y as coordenadas geográficas. A coluna seguinte denominada PROF 1M, indica qual tipo de solo encontrado, de acordo com o laudo de sondagem, na profundidade de 1m. A coluna V1 indica o valor atribuído empiricamente ao tipo de solo, como descrito no item 3.2. E a coluna NSPT 1m os valores do Nspt correspondentes aos laudos analisados. Até a coluna NA, a qual indica a profundidade do nível da água encontrada, as demais colunas seguem os mesmos parâmetros das descritas anteriormente, variando em função da profundidade.

Com a espacialização dos dados foi possível analisar de maneira visual, a destruição dos pontos obtidos. A distribuição dos pontos no estado do Tocantins, esta contida na figura 13, e a distribuição dos pontos na capital Palmas na figura 14.

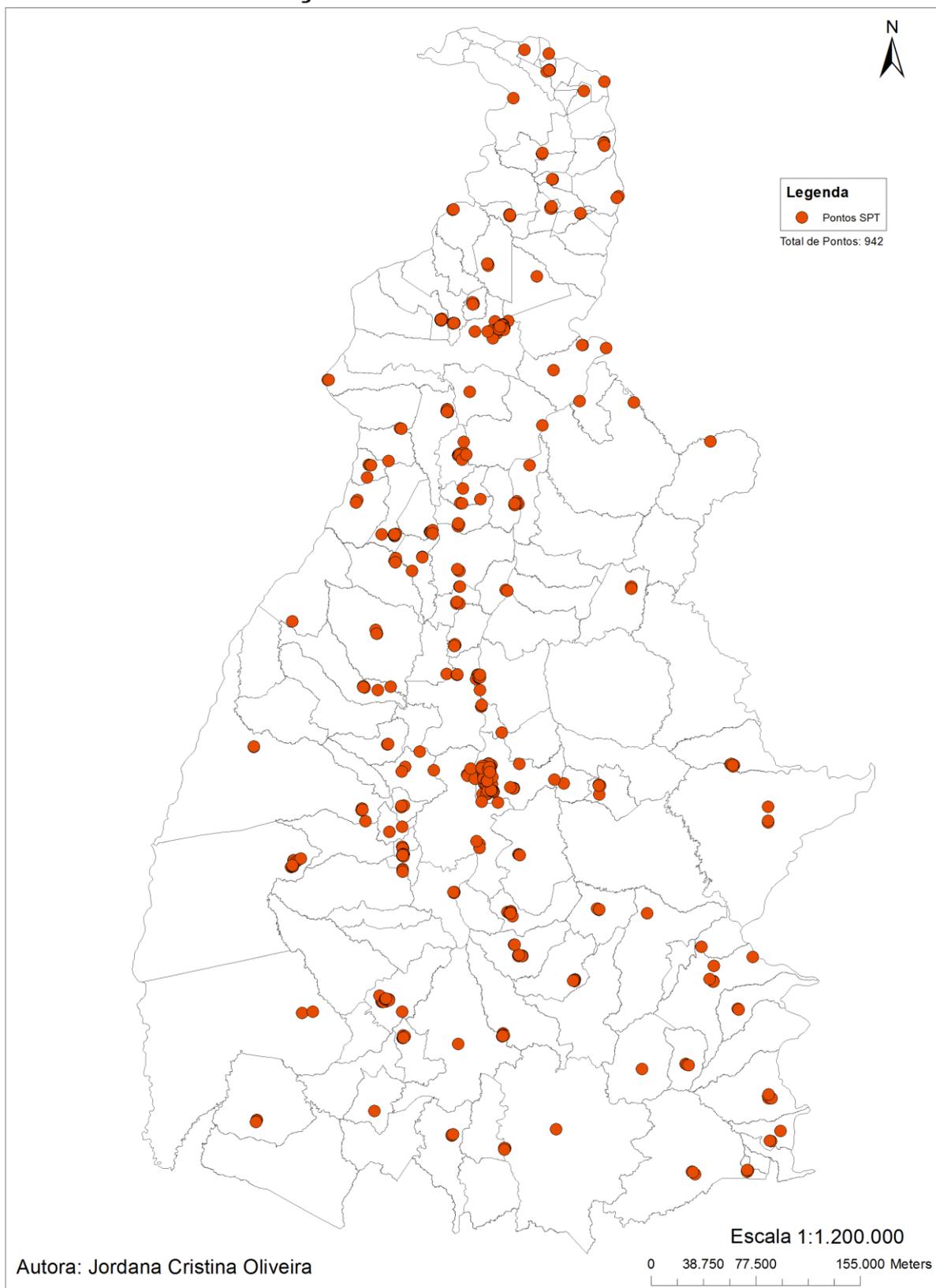
Ao observar a figura 13 nota-se que a destruição dos pontos se deu em torno na BR 153, a qual esta localizada mais ao centro do estado. Tal fato pode ser atribuído ao contexto histórico da construção da BR 153, que de acordo com Correia (2015), desde o princípio da construção desta rodovia, formaram-se novos povoados e pequenas cidades à sua margem, assim como aumentou o fluxo de pessoas e cresceu em função do que se valeram dela como principal corredor de escoamento para acessar outras regiões, bem como fomentou negócios, investimentos, dentre outras atividades que são próprias da economia.

Outro fato importante a ser analisado é que escala de trabalho, a qual enquadra a totalidade dos pontos ficou em 1:1.200.000, fato que impede que se tenha uma análise representativa da região, conforme apresentado no quadro 2 anteriormente.

Para capital Palmas, conforme Figura 14, pôde-se perceber que a maioria dos pontos ficaram localizados na regiões Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste, da cidade, tendo-se alguns pontos isolados na região sul, correspondentes a obras de saneamento. Tal fato ocorre, devido as obras de maiores portes estarem localizadas nas regiões citadas.

Sendo assim, devido ao grande espaçamento entre os pontos da região Sul, optou-se por caracterizar apenas as regiões Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste, e uma pequena parte da região sul, devido a relevante proximidade dos pontos da região sudeste, a fim de diminuir erros de interpolação. A escala de trabalho ficou de 1:25.000, conforme figura 15, ficando dentro das escalas recomendadas por Zuqette (1993).

Figura 13. Distribuição dos pontos SPT no Tocantins

**Distribuição dos Pontos SPT - Tocantins**

Fonte: Autora

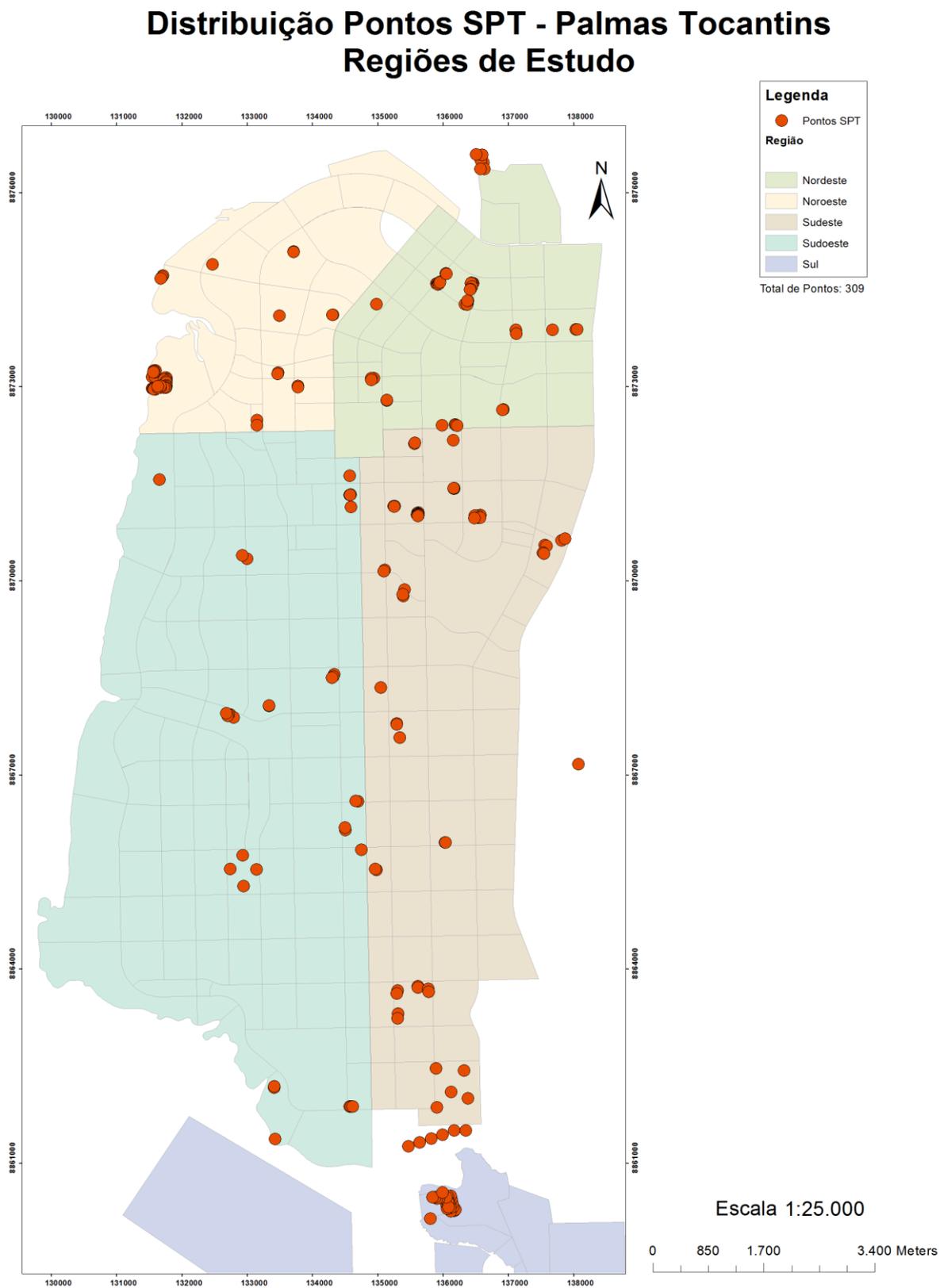
Figura 14. Distribuição Pontos SPT em Palmas TO

## Distribuição Pontos SPT - Palmas Tocantins



Fonte: Autora

Figura 15. Distribuição dos pontos nas regiões de estudo em Palmas TO



Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

### 4.3 ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS

Os dados caracterizados, para os três tipos de carta apresentados a seguir, correspondem aos pontos localizados nas regiões Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste de Palmas TO (Figura 15), com área total de 104,5 km<sup>2</sup>. A quantidade de pontos por km<sup>2</sup> para esta região ficou sendo de 2,2 pts/km<sup>2</sup>.

As cartas geotécnicas foram elaboradas pelo método de interpolação Empirical Bayesian Kriging, aplicado de acordo com a metodologia proposta.

#### 4.3.1 Identificação e caracterização dos tipos de solos presentes na capital do estado do Tocantins

Nas figuras 16 à 20 são apresentadas as cartas que mostram a caracterização geotécnica do solo a cada um metro de profundidade, para profundidades variando de 1 até 5m.

Através das cartas geotécnicas obtidas, pôde-se observar que no primeiro metro, conforme figura 16, há uma predominância solos siltosos, com uma variação suave de areia nas proximidades do lago, e uma leve variação de argila permeando as áreas próximas ao Parque Cesamar, o que possivelmente pode ocorrer devido à proximidade de um corpo hídrico. Na região noroeste, pode-se perceber a presença acentuada de solos mais grossos como pedregulhos.

No segundo metro, conforme Figura 17, nota-se que a parcela de solos arenosos presentes próximo ao lago de Palmas, apresenta-se de forma mais marcante. Nas quadras 305 N, 307 N, 504 N e 502N, pontos concentrados de solos mais grossos como pedregulho, e suavizando ao longo de seu contorno para solos arenosos, podem ser notados. Nas regiões há pequenas variações de argilas, localizadas com mais intensidade ao entorno da Praça dos Girassóis. Nas demais áreas os solos Silte Arenosos e Silte Areno-Argilosos, aparecem de maneira mais marcante.

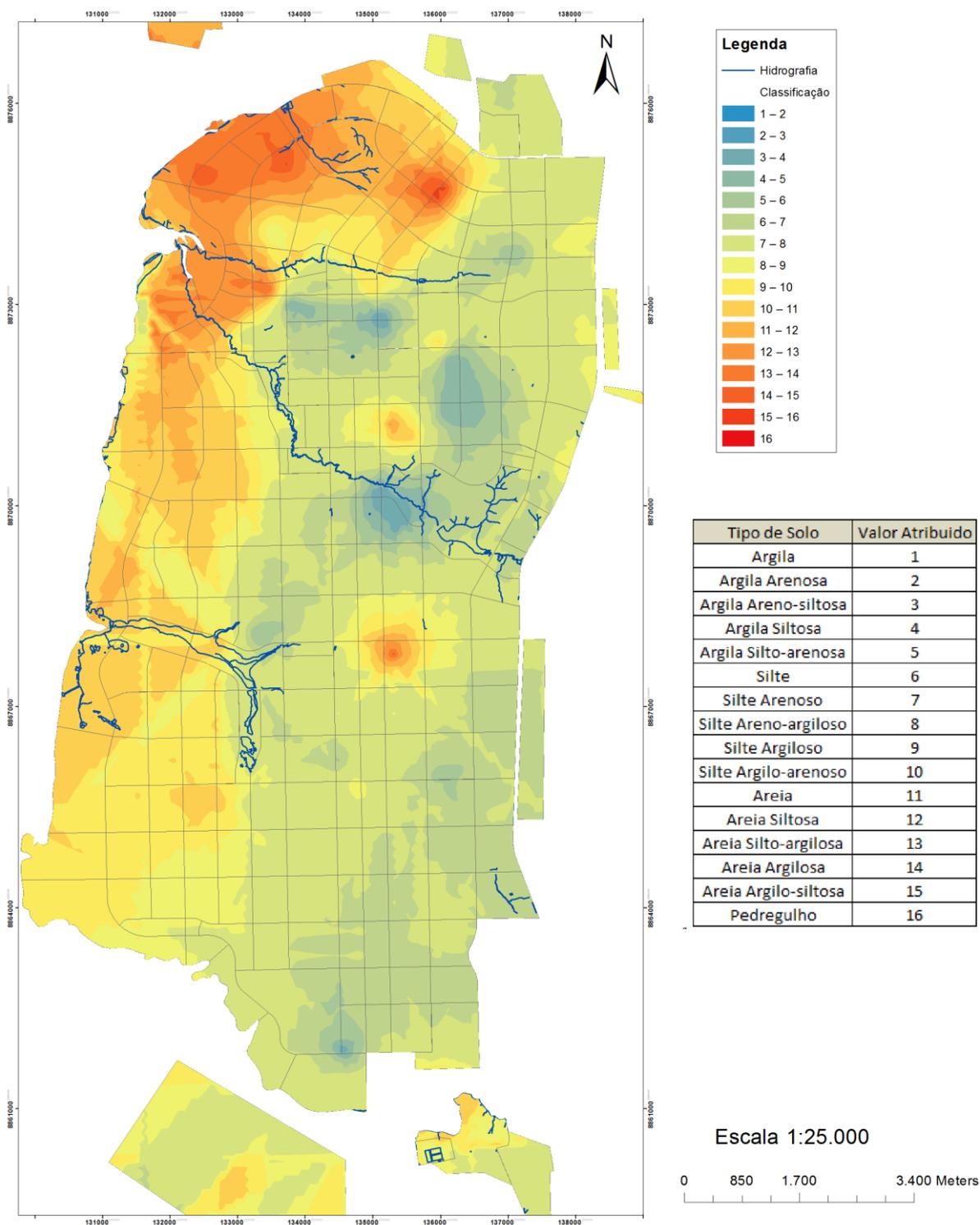
No terceiro e quarto metro, conforme Figuras 18 e 19, nota-se claramente a suavização dos solos a partir da classe 9-10, tendo as cartas nessas profundidades marcadas pelos solos Silte Arenosos e Silte Areno-Argilosos, e pequenas variações de argila.

No quinto e último metro analisado na Figura 20, nota-se claramente a presença marcante da variação dos solos entre Silte Argiloso e Silte Argilo-Arenoso, envolvendo o corpo hídrico a sudoeste. Assim como a presença de solos entre as faixas 9-10 a 12-13, antes não aparentes nas demais profundidades. A presença de

argila foi pouco perceptível, estando em evidencia novamente a solos Silte Arenosos e Silte Areno-Argilosos das classes 7-8 e 8-9.

Figura 16. Caracterização geotécnica profundidade 1 metro

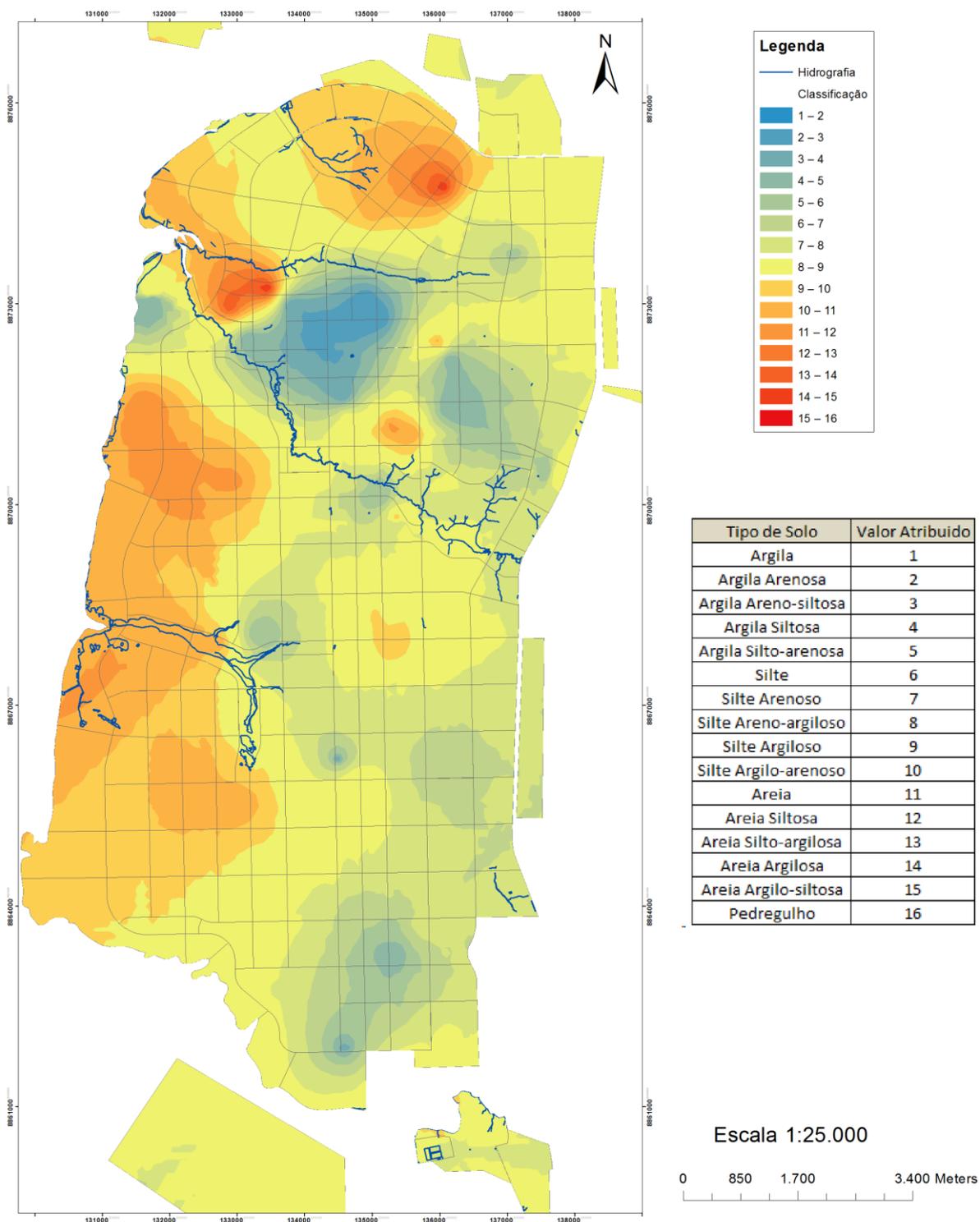
## Caracterização Geotécnica Profundidade 1m - Palmas TO



Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

Figura 17. Caracterização geotécnica profundidade 2 metros

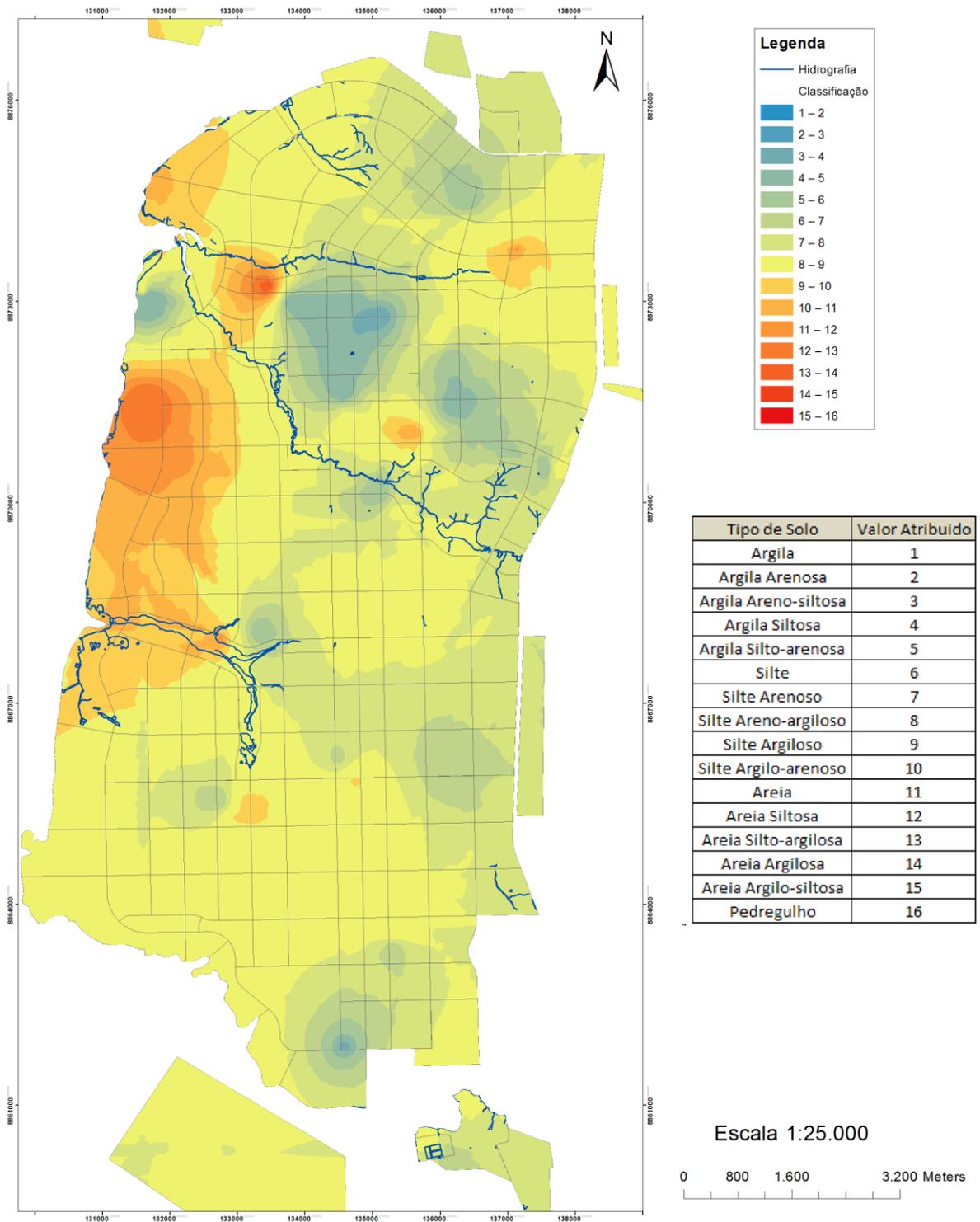
## Caracterização Geotécnica Profundidade 2m - Palmas TO



Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

Figura 18. Caracterização geotécnica profundidade 3 metros

## Caracterização Geotécnica Profundidade 3m - Palmas TO

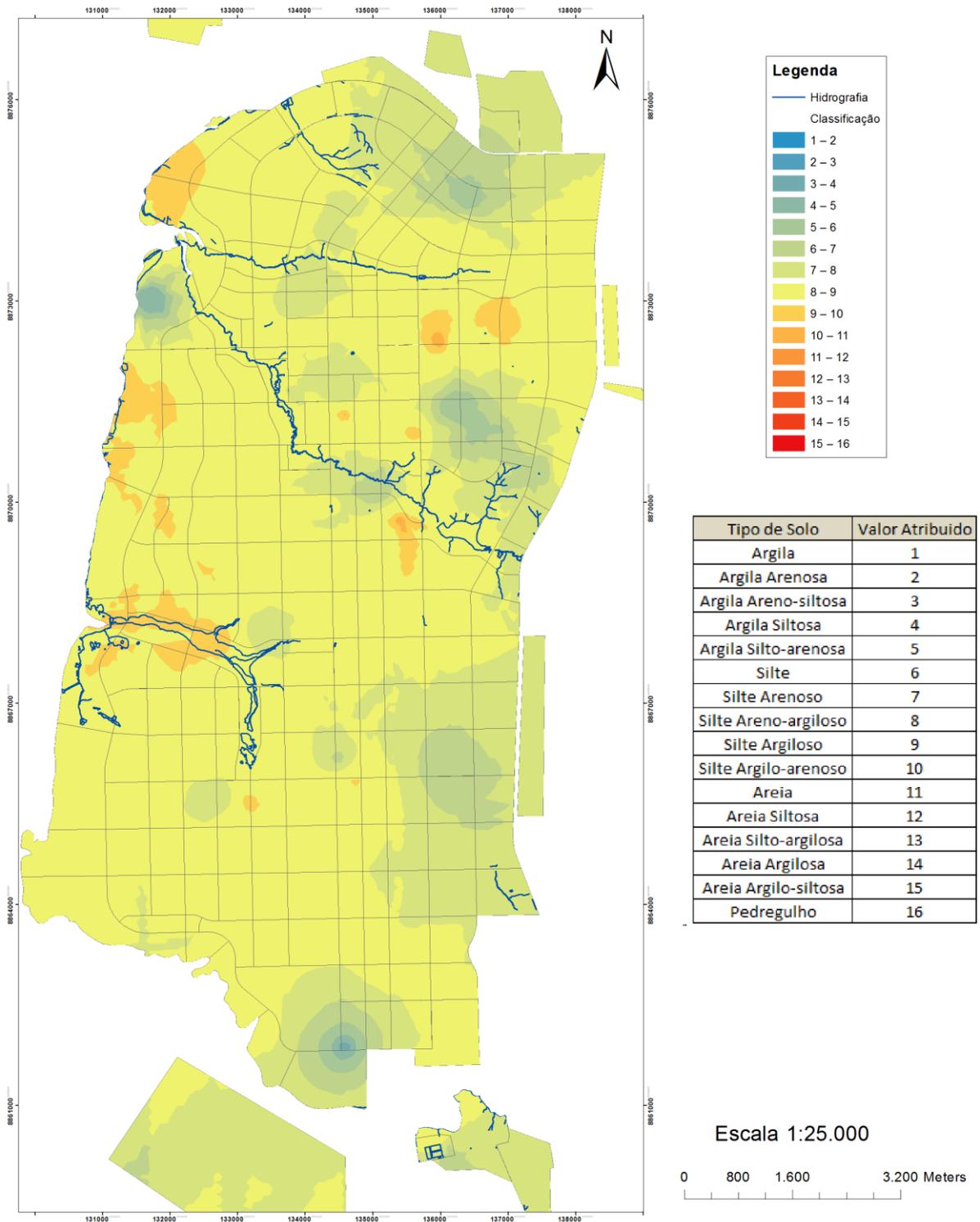


Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

Fonte: Autora

Figura 19. Caracterização geotécnica profundidade 4 metros

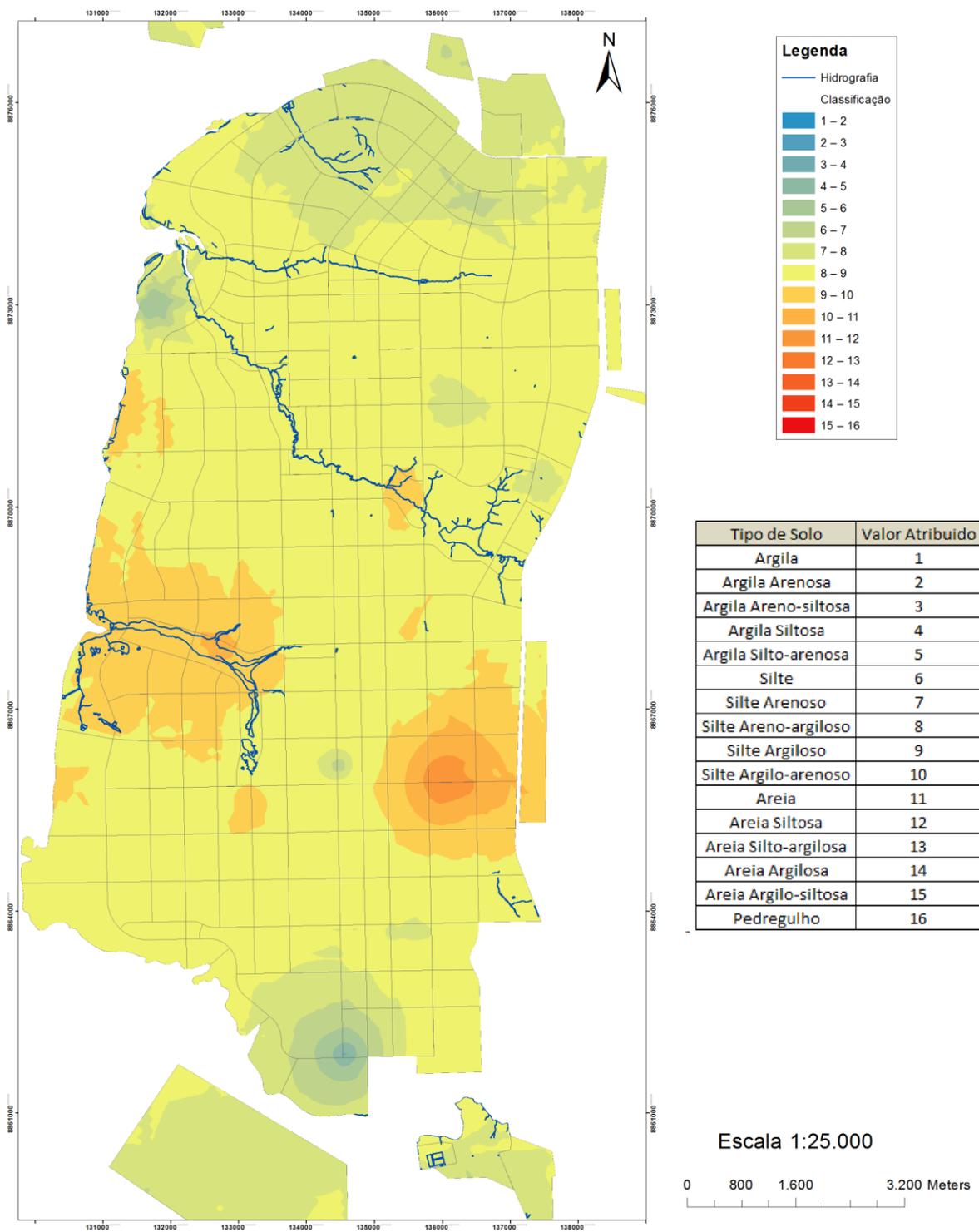
## Caracterização Geotécnica Profundidade 4m - Palmas TO



Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

Figura 20. Caracterização geotécnica profundidade 5 metros

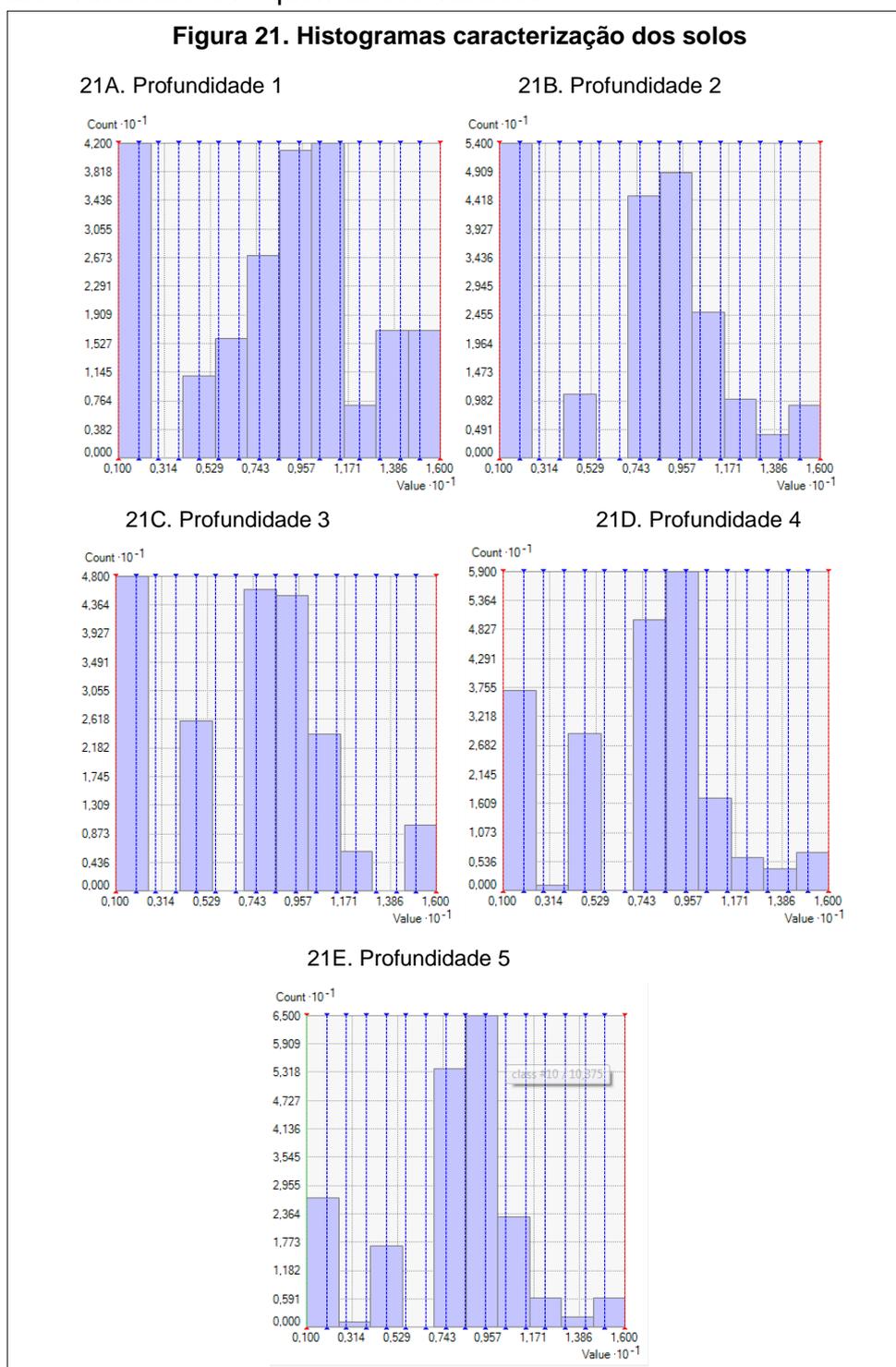
## Caracterização Geotécnica Profundidade 5m - Palmas TO



Autora: Jordana Cristina C. Oliveira

Fonte: Autora

De acordo com os histogramas (Figura 21) obtidos pelos processamentos do ArcGis pode-se constatar que a análise visual anterior está de acordo com a distribuição dos dados. Dando-se destaque aos solos Silte Arenosos e Silte Areno-Argilosos, em todas as camadas analisadas. O histograma apresenta no eixo das abscissas os valores de empíricos atribuídos aos solos por meio da interpolação, e no eixo das ordenadas a frequência dos valores.



Fonte: ArcGis

#### **4.3.2 Identificação do $N_{spt}$ em diferentes camadas, visando subsidiar obras de escavação na capital do estado do Tocantins.**

Para análise dos  $N_{spt}$ , desprezou-se a primeira camada de solo, e iniciou-se a elaboração das cartas a partir do segundo metro de profundidade.

Através da carta geotécnica obtida, pôde-se observar que no segundo metro de profundidade, conforme Figura 26, há uma predominância de índices mais baixos na região próxima ao lago de Palmas, aumentando gradativamente conforme se afasta do corpo hídrico.

Avalia-se que na região noroeste há solos mais duros, com  $N_{spt}$  um pouco mais elevados, fato decorrendo pela presença de pedregulhos, como apresentado na carta de Caracterização Geotécnica Profundidade 1m.

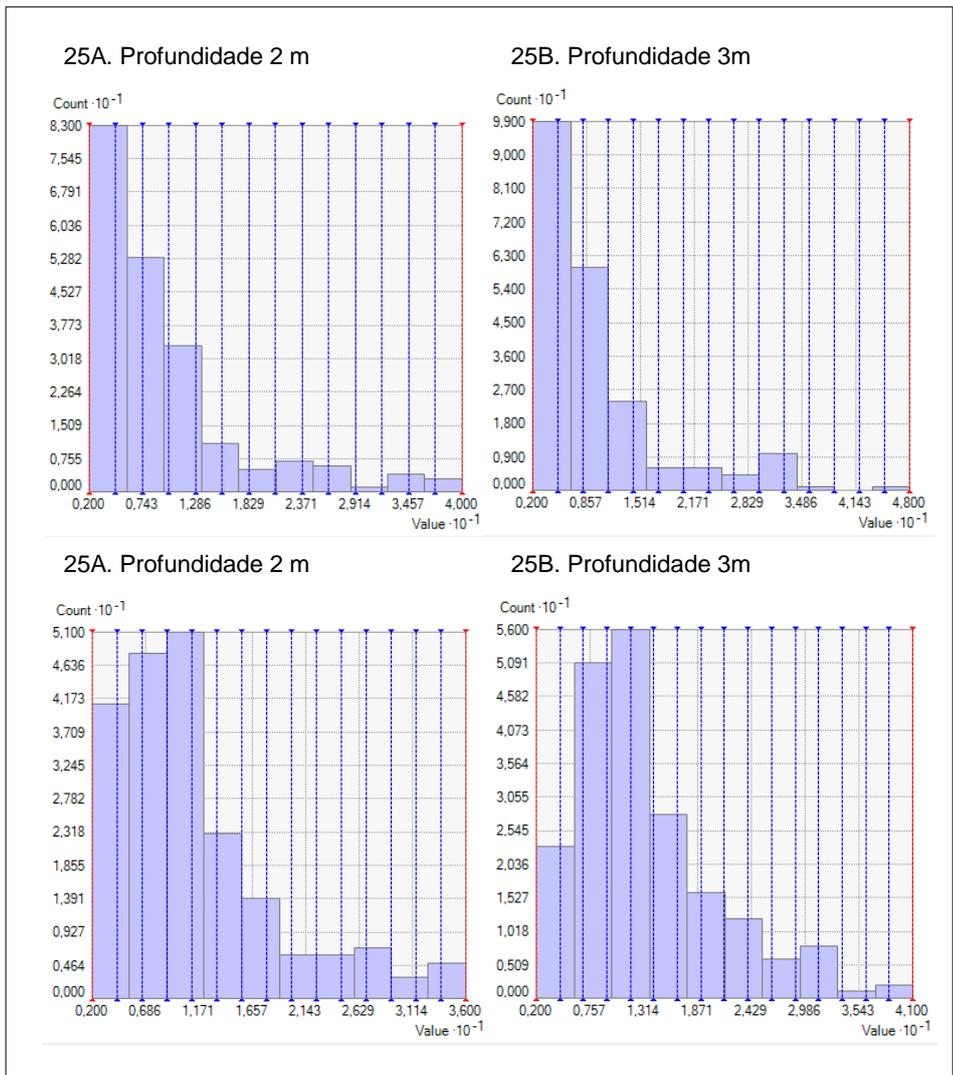
No terceiro metro, conforme Figura 27, é possível perceber que mesmo a profundidade sendo maior, a área próxima ao lago de Palmas, continua apresentando índices baixos de  $N_{spt}$ , fato decorrente do tipo de solo entrando na região. Tendo-se nas demais áreas,  $N_{spt}$  com índice variando principalmente entre as classes 10-12 a 20-25.

No quarto metro de profundidade, conforme Figura 28, nota-se claramente o aumento do  $N_{spt}$  na maioria da área estudada, fato decorrente de solos mais compactos em profundidade mais elevadas e ao adensamento natural do solo.

No quinto e último metro analisado na Figura 29, pode-se constatar que a área com maior  $N_{spt}$ , encontra-se na região noroeste da carta, a qual engloba quadras entre 305N, 602N e 204 N.

A análise realizada visualmente pode ser comprovada através da análise da Figura 25, a qual apresenta os histogramas gerados com base na distribuição dos dados.

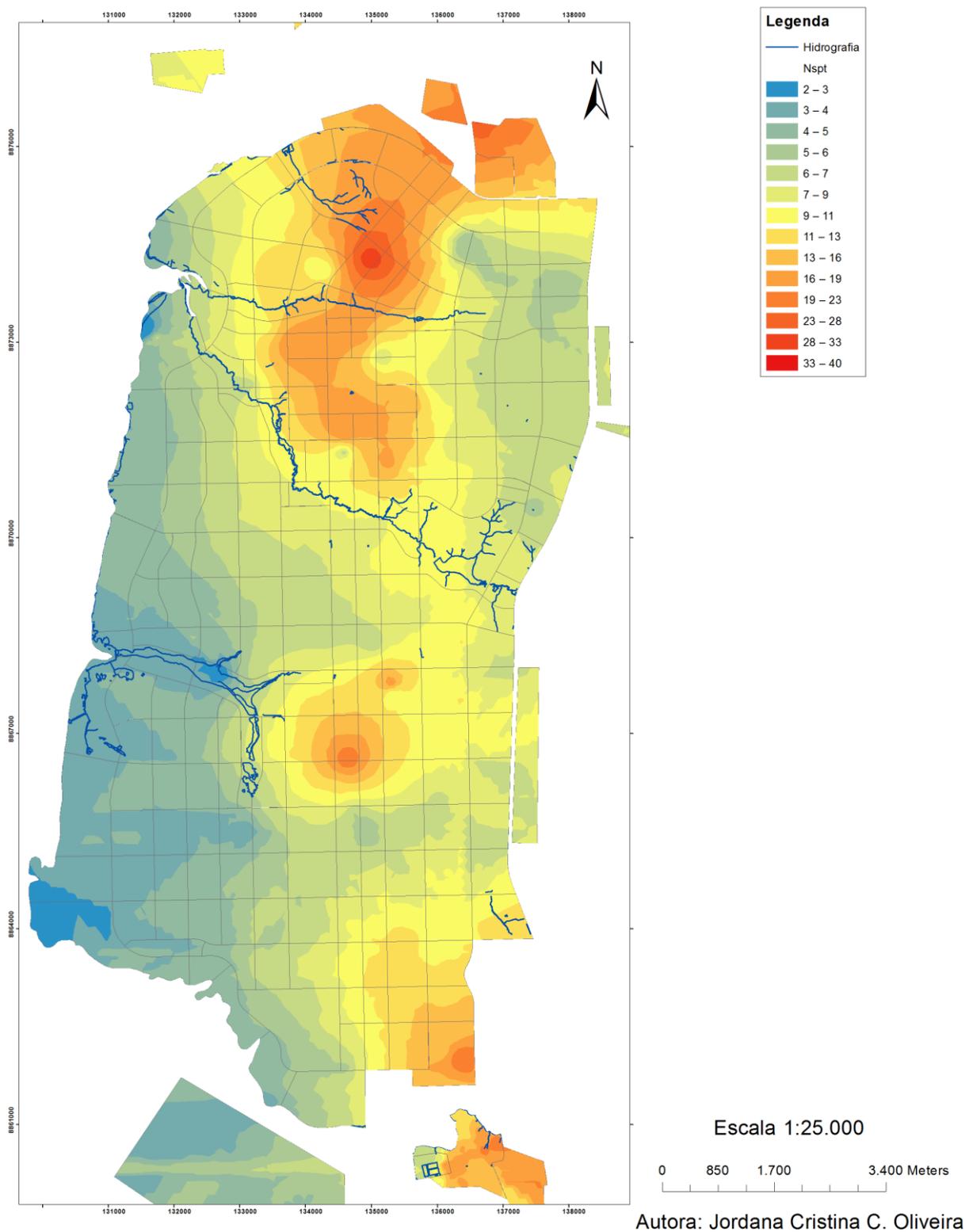
Figura 22. Histograma Nspt



Fonte: ArcGis

Figura 23. Nspt profundidade 2 metros

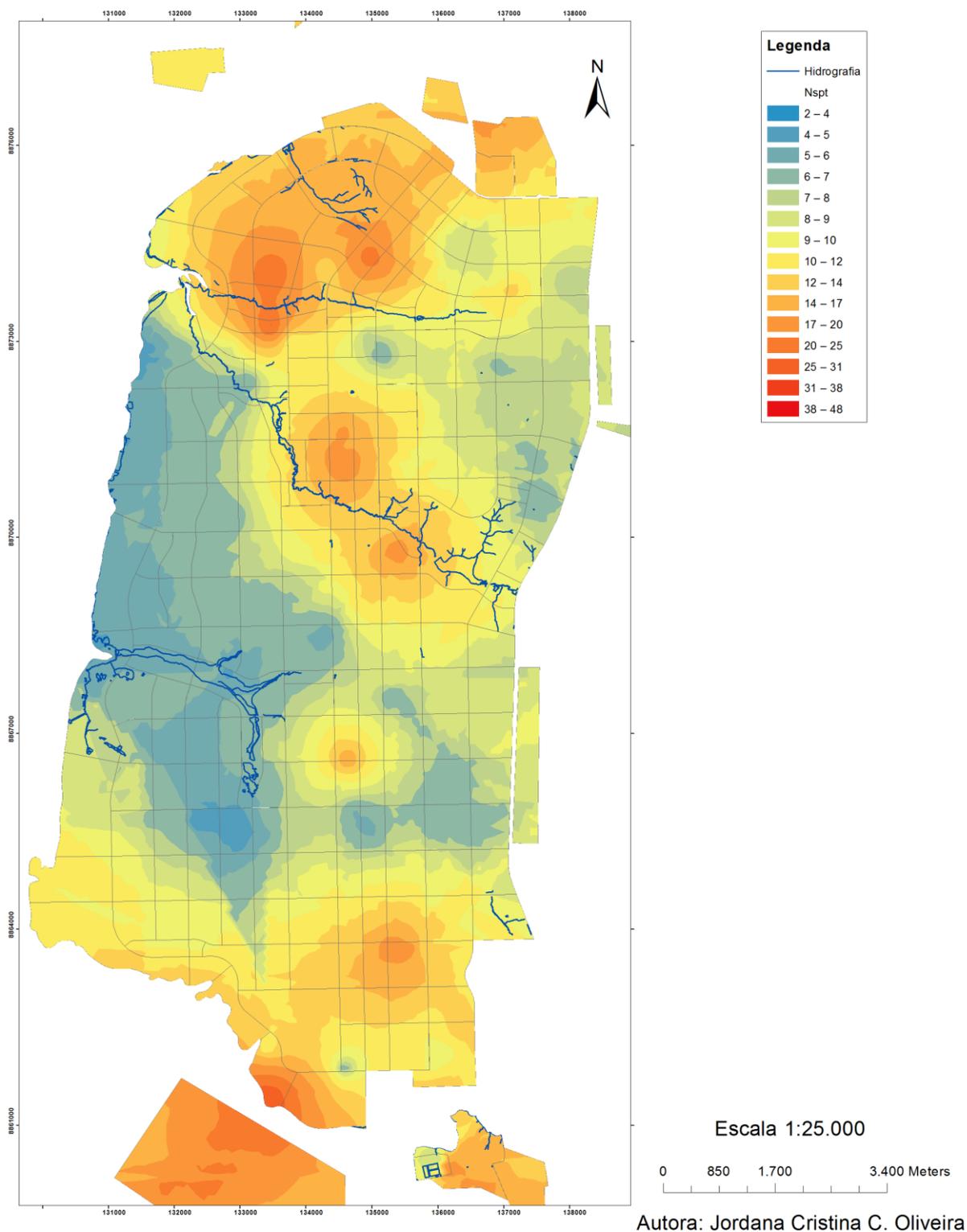
## Nspt Profundidade 2m - Palmas TO



Fonte: Autora

Figura 24. Nspt profundidade 3 metros

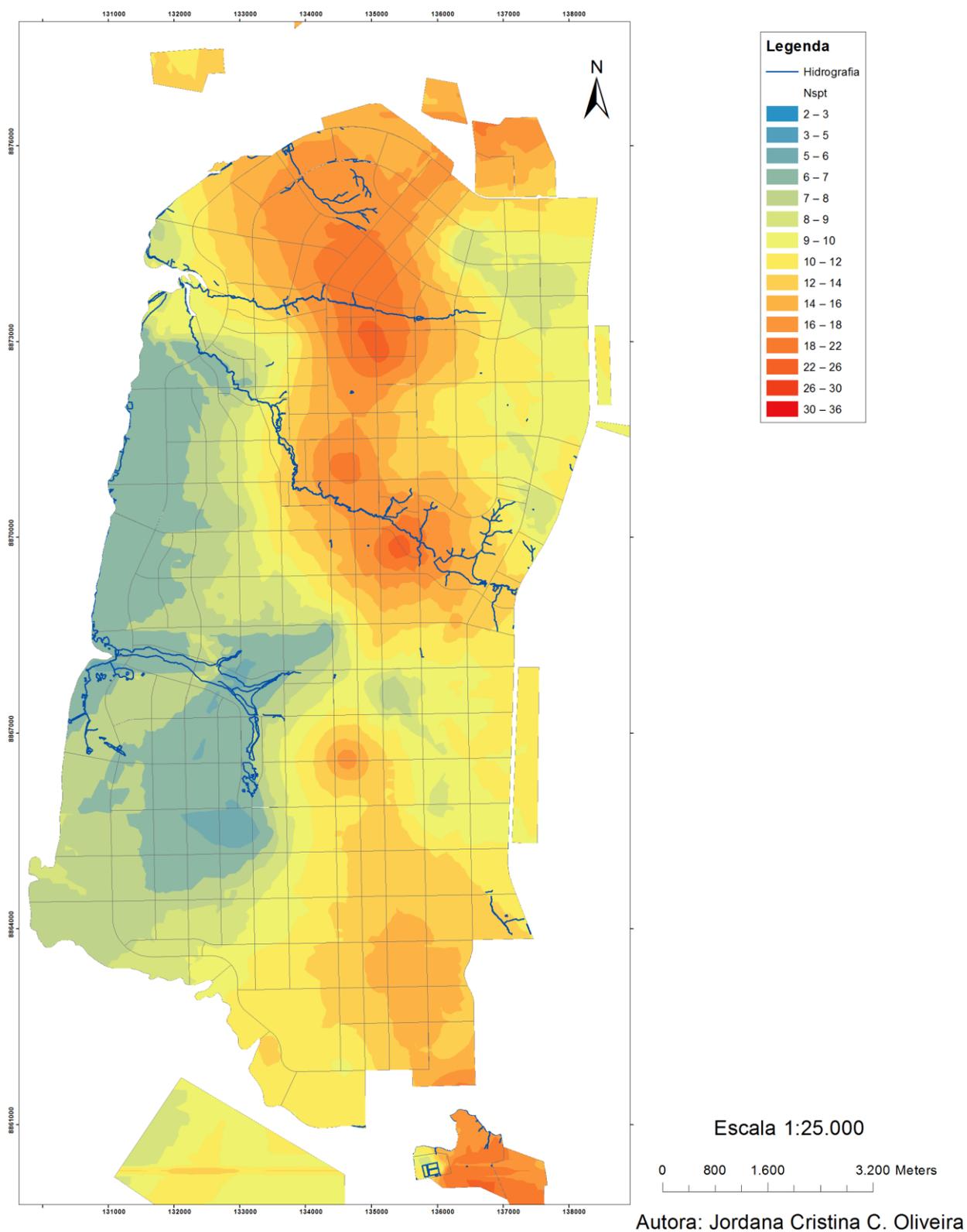
## Nspt Profundidade 3m - Palmas TO



Fonte: Autora

Figura 25. Nspt profundidade 4 metros

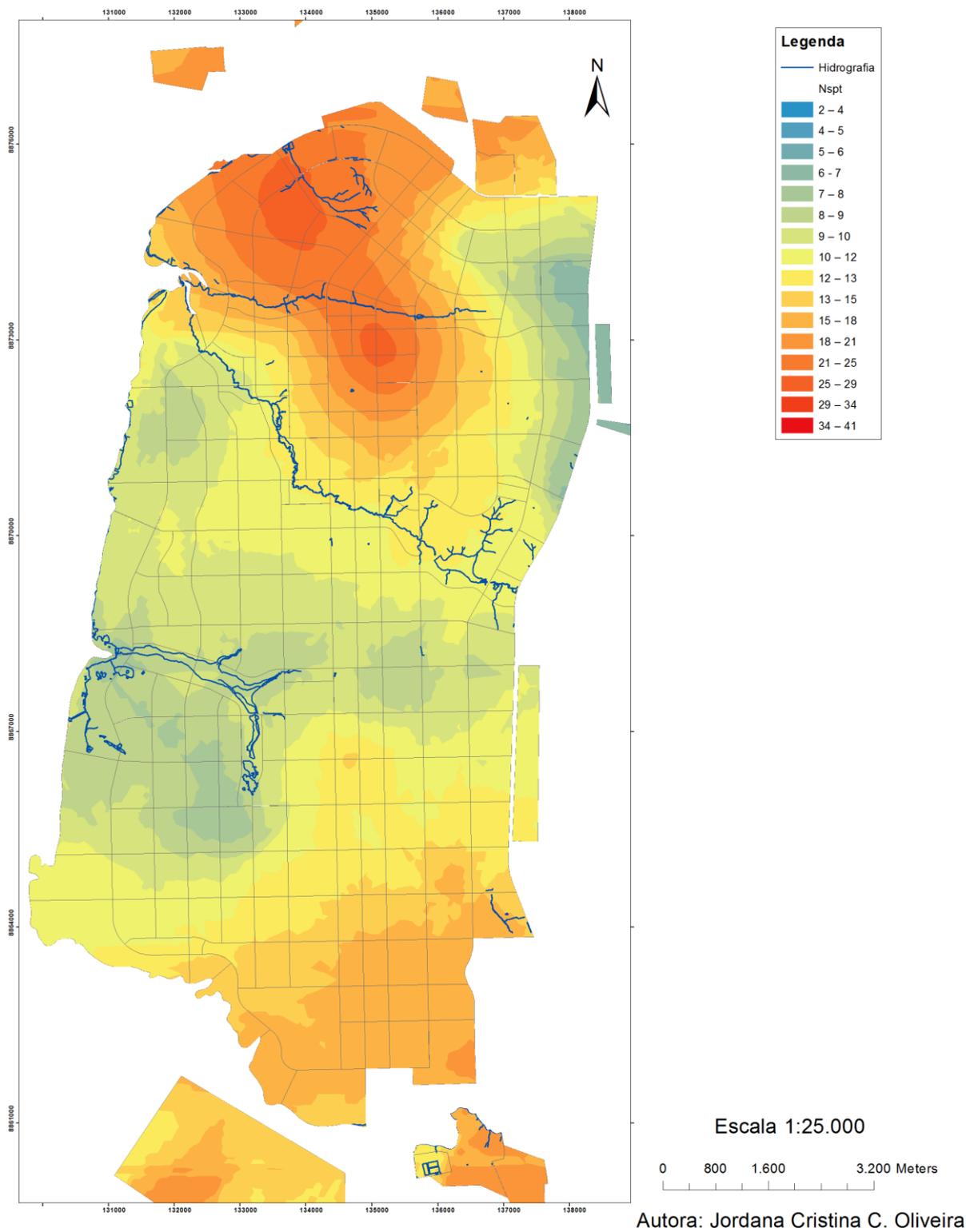
## Nspt Profundidade 4m - Palmas TO



Fonte: Autora

Figura 26. Nspt profundidade 5 metros

## Nspt Profundidade 5m - Palmas TO



Fonte: Autora

### 4.3.3 Análise da confiabilidade dos dados

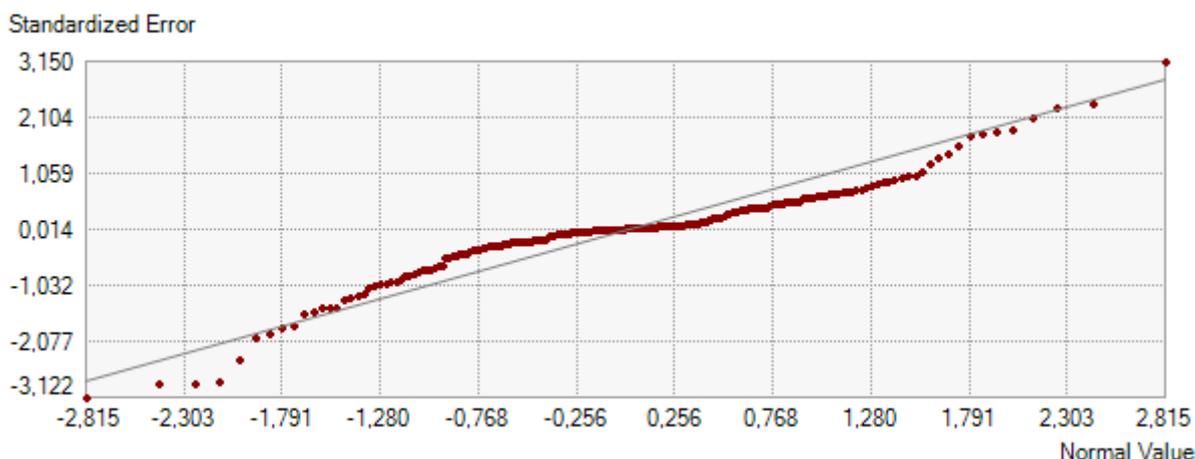
Através da análise estatística gerada pelo próprio *software* ARCGIS, pode-se dizer que a variação dos dados satisfaz parcialmente ao modelo de cálculo, havendo pequena dispersão entre os dados interpolados e o modelo padrão. Tal fato decorre da quantidade amostral estudada, a qual ficou abaixo do esperado e fora do padrão de estudos semelhantes já realizados na cidade de Palmas, porém a nível nacional a quantidade de amostral deu-se como satisfatória quando comparada as estudos semelhantes apresentados no quadro 3.

De acordo com a ESRI, empresa fabricante do software ArcGis, o gráfico Normal QQ Plot (Quantil-Quantil Plot), mostra os quantis da diferença entre os valores previstos e medidos e os quantis correspondentes a partir de uma distribuição normal padrão. Se os erros das previsões de seus valores verdadeiros forem normalmente distribuídos, os pontos devem ficar aproximadamente na linha cinza. Logo, se os erros forem normalmente distribuídos, pode-se confiar em usar métodos que dependem da normalidade, como por exemplo a krigagem simples.

Nos gráficos apresentados a seguir, a linha cinza representa o modelo matemático de variância adequado para a análise, e os pontos vermelhos o comportamento dos dados inseridos. Nota-se então que a quantidade de dados não é suficiente para a análise, devido à distância da disposição dos pontos estudados, e a variação de semelhança entre eles, as quais estão intimamente ligadas na análise da construção de um semivariograma utilizado para mensurar os pesos das variáveis amostrais no modelo matemático da krigagem, e assim a geração dos parâmetros estatísticos..

A Figura 30 demonstra o comportamento do gráfico Quantil-Quantil das profundidades de 1 a 4 metros da carta de caracterização geotécnica, vale ressaltar que será apresentado apenas um gráfico para tais profundidades, pois em todos os casos o resultado foi o mesmo. Pode-se analisar neste caso que houve pequena variação entre o modelo padrão e os dados inseridos, o que nos permite dizer que apesar do resultado ser considerado bom, porém ainda não é suficiente para afirmar com precisão os resultados obtidos.

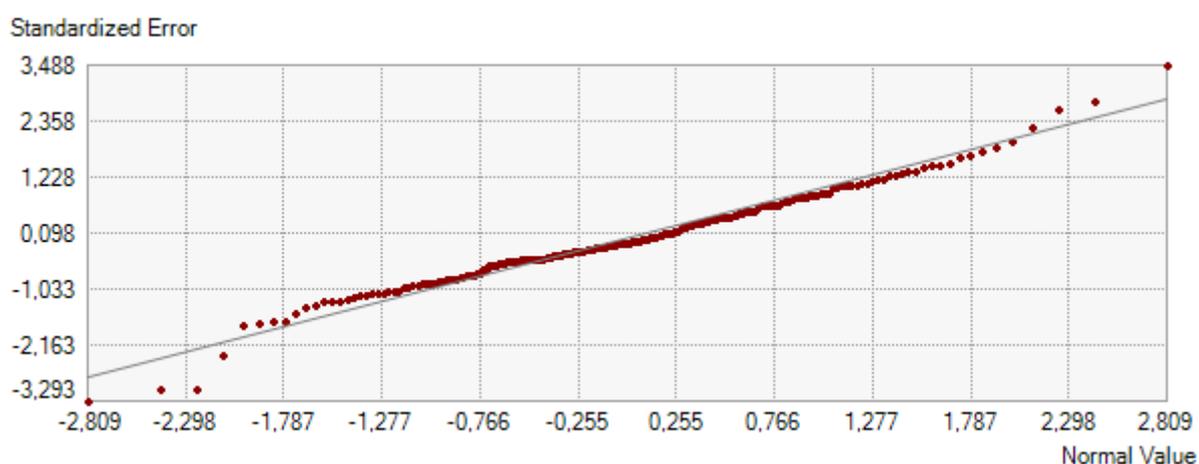
**Figura 27. Gráfico QQ Plot caracterização geotécnica profundidade 1 a 4 metros**



Fonte: ArcGis

Na Figura 31, observa-se que diferente das profundidades anteriores, a profundidade de 5 metros, apresentou um comportamento quase idêntico ao padrão, esta diferença de comportamento acontece devido às características das amostras serem mais semelhantes uma das outras nesta profundidade, ou seja, o semivariograma consegue montar um modelo onde em determinada distância haja amostras ideais (valores semelhantes) para interpolação.

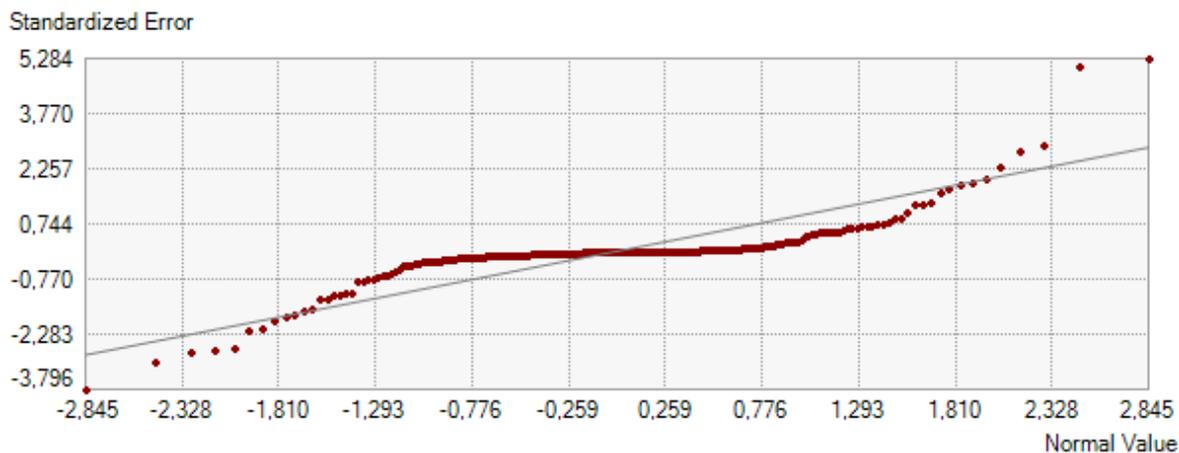
**Figura 28. Gráfico QQ Plot Caracterização geotécnica profundidade 5 metros**



Fonte: ArcGis

A Figura 32 apresenta o gráfico Quantil-Quantil da carta de profundidade no nível da água, o comportamento dos dados interpolados ocorreu maneira semelhante ao gráfico das primeiras camadas de caracterização, seguindo-se assim a mesma análise.

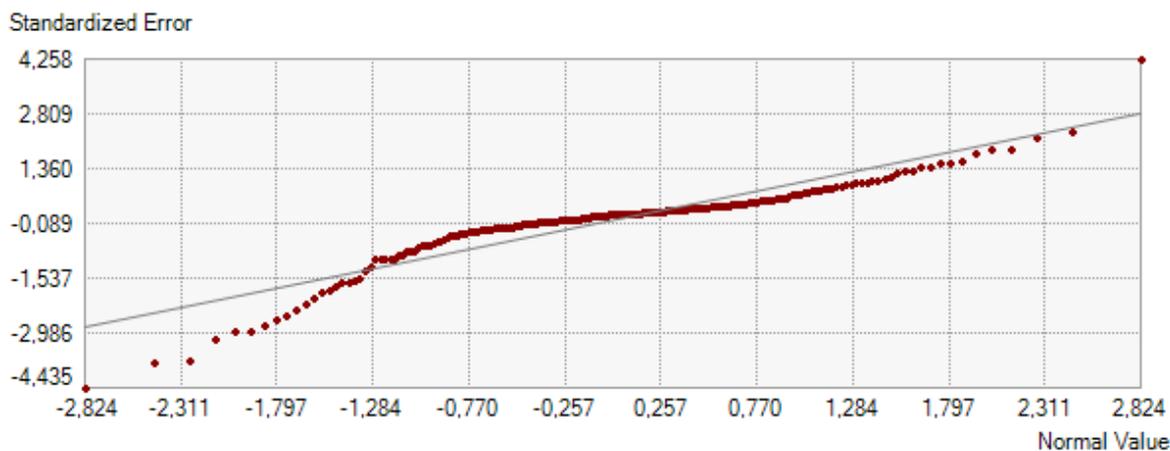
**Figura 29. Gráfico QQ Plot profundidade do nível da água**



Fonte: ArcGis

Diferente das cartas de caracterização que apresentou gráfico diferente para última camada, as cartas do Nspt apresentaram gráficos semelhantes para todas as camadas estudadas, mostrando-se assim uma uniformidade dos dados amostrais. De maneira similar, será apresentado apenas um gráfico, apresentado na Figura 33, pois não houve variação de comportamento brusca.

**Figura 30. Gráfico QQ Plot Nspt profundidade 2 a 4 metros**



Fonte: ArcGis

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal estruturar uma base de dados em SIG, com informações geotécnicas do estado do Tocantins. Para isso foram processados dados de 942 sondagens realizadas no estado, sendo 309 delas na cidade de Palmas. A partir da base de dados gerada, foram elaboradas cartas geotécnicas para a cidade de Palmas, por ser a região com densidade de pontos suficientes para realizar a interpolação. As cartas fornecem informações sobre o tipo de solo e o valor de  $N_{spt}$  a cada um metro de profundidade, com profundidades variando de 1m até 5m. Também foi gerado um mapa com o nível do lençol freático na cidade.

Através das análises comparativas entre as cartas de caracterização geotécnica, as cartas de  $N_{spt}$ , e as cartas do nível da água, observa-se que o valor do  $N_{spt}$  está diretamente ligado ao tipo de solo e a presença de água. Desta maneira, as áreas em destaque pelos altos índices  $N_{spt}$  foram as mesmas em destaque por solos mais grossos na carta de caracterização geotécnica, e as mesmas em destaque pela presença menos profunda do lençol freático. De forma geral os solos grossos, como pedregulhos, apresentam uma maior resistência à penetração que os solos finos, mas isto não pode ser utilizado como regra, pois outros fatores como adensamento, compactação, mineralogia, etc., devem ser considerados. Já a relação com o lençol freático menos profundo pode estar no fato do índice  $N_{spt}$  ser obtido por golpes realizados no solo. Abaixo do lençol freático, a penetração do martelo pode ser dificultada pela incompressibilidade da água que atua como um agente resistente. Portanto, o aumento do índice de penetração não deve apenas ser atribuído ao aumento de resistência do material, mas também à presença da água.

Conclui-se desta maneira, que os resultados apresentados devem ser considerados apenas para fins de concepção da área de estudo, não substituindo em hipótese alguma um laudo de sondagem como parâmetro de projeto, e que apesar da pequena variação apresentada pelos gráficos anteriormente, este estudo torna-se pertinente por se tratar um estudo piloto de caracterização da capital Palmas.

Deixa-se como sugestão, o incremento de dados na base já obtida, a qual ficará a disposição da comunidade acadêmica para realizar e aprimorar os

resultados aqui obtidos, através de novas pesquisas relacionadas ao tema, e com o incremento de novos dados.

## 6 REFERÊNCIAS

A. FILHO, Manoel Ricardo. **Informações Técnicas: Solo Tocantinense**. 2017. Disponível em: <<http://www.zoofertil.com.br/informacoes-tecnicas/98-solo-tocantinense.html>>. Acesso em: 18 out. 2017.

ALMEIDA, André Q. de; RIBEIRO, Aristides; PAIVA, Yhasmin G.. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 15, p.354-358, jan. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**, Solo: Sondagens de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio. Rio de Janeiro, fev. 2001.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1988.

CASANOVA, Marco Antonio; CÂMARA, Gilberto; DAVIS JUNIOR, Clodoveu A.. **Bancos de Dados Geográficos Maio**,.Curitiba: Editora Mundogeo, 2005.

CASTRO, Bruno Carrilho de. et al. Perfis geotécnicos da cidade de Palmas - TO por meio de sondagens SPT e ensaios geofísicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/309558687\\_Perfis\\_geotecnicos\\_da\\_cidade\\_de\\_Palmas\\_TO\\_por\\_meio\\_de\\_sondagens\\_SPT\\_e\\_ensaios\\_geofisicos](https://www.researchgate.net/publication/309558687_Perfis_geotecnicos_da_cidade_de_Palmas_TO_por_meio_de_sondagens_SPT_e_ensaios_geofisicos)> Acesso em: 02 fev. 2017.

CASTRO, Bruno Carrilho de. et al. Relação Entre Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas dos Principais Solos de Palmas-TO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/309216334\\_Relacao\\_Entre\\_Resistividade\\_Eletrica\\_e\\_Caracteristicas\\_Geotecnicas\\_dos\\_Principais\\_Solos\\_de\\_Palmas-TO](https://www.researchgate.net/publication/309216334_Relacao_Entre_Resistividade_Eletrica_e_Caracteristicas_Geotecnicas_dos_Principais_Solos_de_Palmas-TO)> Acesso em: 02 fev. 2017.

CAVEDON, Ari Dêlcio; SHINZATO, Edgar. **Levantamento de reconhecimento de solos**. Brasília: CPRM, 2016. 45 p. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade/ps/solos/solos\\_levantamento.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade/ps/solos/solos_levantamento.pdf)>. Acesso em 4 ago. 2017.

CERRI, L.E.S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada as necessidades brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, 1990, Salvador. Anais... Salvador, ABGE, v.1, p.309-317

DELATIM, Ivan José. **Classificação de sondagens (trado, percussão, rotativa e mista) para a apresentação em perfis individuais de sondagens: curso examinado sob a perspectiva de ensino e de pensamento geológico**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2017.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação: Embrapa Solos, 2006.

FOLLE, D. **O estudo geoestatístico de sondagens Spt para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia**. 2002. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2002.

FRANCO, Gustavo Barreto; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; CALIJURI, Maria Lucia. CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA: ESTÁGIO ATUAL DO CONHECIMENTO. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 35, n. 11, p.158-172, set. 2010. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

GARCIA, Andressa Faquinel. **Cartografia Geotécnica para a cidade de Palmas/TO: Determinação das cotas de Impenetrável e Nível Freático por meio de Sondagem SPT**. 2017. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Uft, Palmas, 2017.

IAC. **Solos do estado de São Paulo**. 2014. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/solosspp/>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. New York, Oxford University Press, 1989. 561p.

MARQUES, Sheyla Karolina Justino. **Estudo da incorporação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo em formulações para tijolos de solo-cimento**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, 2010. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12707/2/SheylaKJM\\_DISSERT\\_PARCIAL.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12707/2/SheylaKJM_DISSERT_PARCIAL.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2017.

MARTINS, João Paulo Coelho. **Caracterização geotécnica dos principais perfis de Palmas e apresentação de soluções de fundação, com vistas ao planejamento urbano**. 2014. 75 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2014.

Matheron, G. **Principles of geostatistics**. *Economic Geology*, v.58, p.1246-1266, 1963.

NEIVA, Eduardo Santos; FARIA, Filipe Eliel de; NOGUEIRA, Gabriel Torino. **Estruturas de contenção, escavações e escoramentos**. 2014. 31 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

ODA, Melissa Lombardi. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um experimento em delineamento sistemático tipo leque**. 2005. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, USP, Piracicaba, 2005.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2000.

PORTELA, Cristina de Fátima Alves. **Infraestruturas hidráulicas. Escavação de valas, equipamentos e análise económica.** 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Évora Escola de Ciências e Tecnologia, Évora, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10174/14541>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

ROCHA, Marcelo Monteiro da; YAMAMOTO, Jorge Kazuo; FONTELES, Helano Regis da Nóbrega. Cokrigagem Ordinária versus Krigagem com Deriva Externa: Aplicações para a Avaliação do Nível Potenciométrico em um Aquífero Livre. **Revista do Instituto de Geociências - Usp**, São Paulo, v. 9, n. 1, p.73-84, jan. 2009.

SANTOS, Sheila. **Propriedades Físicas dos Solos.** Teófiolo Otoni Mg: Icet, 2016. Color. Disponível em: <<http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2016/08/Propriedades-fisicas-do-solo.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

SILVA JUNIOR, João F. da; PEREIRA, Gener T.; CAMARGO, Livia A.. Métodos geoestatísticos na modelagem espacial do diâmetro médio do cristal da goethita. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 17, p.1127-1134, jul. 2013.

SILVA, Apolino José Nogueira da; CARVALHO, Fabíola Gomes de. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 31, n. 5, p.853-862, out. 2007. ISSN 1806-9657. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000500003>.

SILVA, Daniel Fermino da. **“mapeamento geoestatístico dos parâmetros nspt e torque máximo de solos em parte da bacia do ribeirão cambezinho em londrina/pr”.** 2008. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

SOARES, Wanessa Cartaxo. **Banco de Dados Geológicos-Geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG:** Análise espacial da profundidade do lençol freático e do NSPT para obras de fundação em João Pessoa/PB. 2011.

215 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 20 11.

STURARO, José Ricardo. **Apostila de geoestatística básica**. Rio Claro: Unesp, 2015.

THIESEN, Stephanie. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: um estudo de caso em Blumenau/SC**. 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

UFRGS. **Software Licenciado - ArcGIS**. 2016. Equipe CPD. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/cpd/servicos/computadores-e-aplicativos/software-disponiveis/software-licenciado-arcgis>>. Acesso em: 17 ago. 2017.

VALERIM JUNIOR, Valdir. **Levantamento dos riscos ao trabalhador na execução de escoramento de valas para implantação de esgoto sanitário**. 2014. 56 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Segurança do Trabalho., Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/3393>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

VARELA, Marcio. **Apostila Mecânica dos solos**. Natal: IFRN, 2010. 52 p. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/marciovarela/disciplinas/mecanica-dos-solos/apostila-de-mecanica-dos-solos>>. Acesso em: 18 ago. 2017.

VARGAS, Milton. **Introdução a Mecânica dos Solos**. São Paulo: Mcgraw-hill do Brasil, 1977.

VERGARA, Roberta. **Produção de Mapas temáticos utilizando ferramentas do arcgis 10**. Palmas Tocantins: 2015. 39 slides, color

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo. **Krigagem Ordinária: método de amplo uso**. 2016. Disponível em: <<https://geokrigagem.com.br/krigagem-ordinaria/>>. Acesso em: 02

maio 2018.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. São Carlos, SP, 1993. 2v. Tese de Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP.

ZUQUETTE, Lázaro V.; GANDOLFI, Nilson. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

## APÊNDICES