

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Condutividade elétrica aparente do solo em áreas agrícolas brasileiras

Matheus Fontana Westphalen

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Matheus Fontana Westphalen
Engenheiro Agrônomo

Condutividade elétrica aparente do solo em áreas agrícolas brasileiras

Orientador:
Prof. Dr. **LEANDRO MARIA GIMENEZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Westphalen, Matheus Fontana

Condutividade elétrica aparente do solo em áreas agrícolas brasileiras /
Matheus Fontana Westphalen. - - Piracicaba, 2022.

66 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz
de Queiroz".

1. Análise exploratória 2. Agricultura de precisão 3. Sensoriamento
próximo 4. Análise multivariada I. Título

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ABREVIATURAS.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Referencial teórico	11
2.2 Condutividade elétrica aparente do solo	12
2.2.1 Mensuração da Condutividade Elétrica aparente do Solo.....	13
2.2.2 Relevância agronômica da Condutividade Elétrica aparente do Solo.....	16
2.3 Técnicas de análise de dados	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Obtenção e preparo do banco de dados	22
3.1.1 Obtenção e processamento dos dados de CEa	23
3.1.1.1 Metadados da coleção de CEa do solo obtida	24
3.1.1.2 Eliminação de dados coletados com erros.....	24
3.1.1.3 Eliminação de valores discrepantes.....	25
3.1.1.4 Filtragem local.....	25
3.1.1.5 Interpolação	25
3.1.2 Obtenção e processamento dos dados das demais variáveis.....	26
3.1.2.1 Elevação.....	26
3.1.2.2 Dados climáticos	27
3.1.2.3 Características do solo	28
3.1.2.4 Localização: tipo de solo, bioma e vegetação	28
3.1.3 Variáveis derivadas das originais.....	28
3.1.3.1 Informações variográficas	28
3.1.3.2 Velocidade e orientação durante a coleta	28
3.1.3.3 Razão entre leituras de CEa do solo	29
3.1.3.4 Declividade.....	29
3.1.3.5 Topographic Wetness Index (TWI).....	29
3.1.3.6 Tempo de cultivo	29
3.1.3.7 Índice de forma.....	30

3.1.3.8 Distância vertical à drenagem mais próxima (DVDP).....	30
3.1.3.9 Capacidade de água disponível (CAD).....	30
3.1.3.10 Textura do solo.....	30
3.2 Análise de dados.....	31
3.2.1 Análise exploratória de dados.....	31
3.2.2 Identificação de padrões nos dados de CEa do solo.....	31
3.2.2.1 Análise multivariada para redução da dimensionalidade.....	31
3.2.2.2 Análise de agrupamentos.....	32
3.2.3 Associação entre a CEa e demais variáveis.....	32
3.2.3.1 Análise multivariada para identificação de associações dentro dos grupos.....	32
3.2.3.2 Análise de correspondência.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
4.1 Análise exploratória.....	35
4.2 Identificação de padrões nos dados de CEa do solo.....	41
4.2.1 Análise multivariada para redução da dimensionalidade.....	41
4.2.2 Análise de agrupamentos.....	44
4.3 Associação entre CEa do solo e variáveis quantitativas dentro dos grupos.....	47
4.4 Associação entre variáveis categóricas e qualitativas com a CEa do solo.....	50
5. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	57
APÊNDICES.....	60

RESUMO

Condutividade elétrica aparente do solo em áreas agrícolas brasileiras

O sensoriamento de fatores relacionados ao desenvolvimento das plantas cultivadas permite obter indicadores relevantes ao diagnóstico e tomada de decisão. Sistemas sensores capazes de obter elevada densidade amostral associada ao georreferenciamento permitem produzir superfícies espaciais que podem ser sobrepostas e com isso caracterizar condições localizadas que afetam o desempenho e que por vezes podem ser manejadas para a obtenção de melhores resultados. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é uma propriedade que pode ser mensurada com facilidade e apresenta relação com diversas propriedades de interesse agrônomo. Por ser resultante das contribuições dos diversos componentes do solo sua interpretação é ambígua requerendo a caracterização de outros parâmetros para o desenvolvimento de modelos de previsão aplicáveis apenas localmente. Diversas contribuições vêm sendo realizadas no sentido de permitir o uso e interpretação dos dados de CEa obtidos em lavouras com a sugestão de métodos de processamento e modelagem para o uso. Embora estes trabalhos permitam aprofundar o entendimento eles tendem a ser pontuais havendo carência de levantamentos em escala global que permitam uma compreensão estrutural sobre o fenômeno. Este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento exploratório de dados coletados em diversas regiões agrícolas brasileiras e o seu relacionamento com informações dos ambientes em que foram obtidos. Para tal foram obtidos 193 conjuntos de dados de CEa representativos de glebas sob cultivo de grãos localizados desde a região norte até o sul do país, todos obtidos por um mesmo instrumento com profundidades de prospecção até 0,3 m e até 0,9 m, CEaR e CEaP, respectivamente. Um total de 34 variáveis locais ou regionais, quantitativas ou qualitativas foram coletadas e relacionadas. Os dados de CEa foram processados para obtenção de métricas que os caracterizam em termos quantitativos e quanto à sua estrutura espacial, uma área total de 13.649 ha de mapas com resolução de 400 m² (20 x 20 m) foi utilizada nas análises. A estatística descritiva demonstrou que após a remoção de muitos dados errôneos e discrepantes os valores de CEa oscilaram entre 3,8 e 12,7 mS m⁻¹. Os alcances dos semivariogramas locais ajustados apresentaram valores de alcances medianos de 158,6 m e 171,4 m para as camadas CEaR e CEaP respectivamente. Por meio de técnicas multivariadas de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais buscou-se identificar grupos que apresentassem características semelhantes e descrever quais as variáveis condicionadoras do comportamento dentro de cada grupo. Aplicou-se ainda uma técnica de análise de dados categóricos para identificar fatores relacionados à CEa em duas profundidades de prospecção. Os resultados demonstraram que muitas das variáveis estiveram correlacionadas e que aquelas que condicionam a disponibilidade hídrica são relevantes para a o comportamento da CEa em grande parte das situações. Foram delimitados três grupos que apresentaram uma distribuição geográfica com alguma consistência. Na região do Brasil central a capacidade de água disponível e o pH do solo se destacaram como variáveis associadas à CEa. Nos dois outros grupos não foi possível destacar variáveis, havendo uma mistura de seus efeitos. Mapas perceptuais de categorias representativas de classes para CEa e das variáveis apresentaram comportamento divergente entre profundidades mas houve relação mais estreita para aquelas relacionadas à composição granulométrica e correção química do solo. Concluiu-se haver diversidade nos dados de CEa que está relacionada aos ambientes regionais havendo uma mistura de efeitos que tornam pouco factível o desenvolvimento de modelos de previsão globais com as ferramentas tradicionais da estatística multivariada.

Palavras-chave: Análise exploratória, Agricultura de precisão, Sensoriamento próximo, Análise multivariada

ABSTRACT

Soil apparent electrical conductivity in Brazilian agricultural fields

The sensing of factors related to the development of cultivated plants allows obtaining relevant indicators for diagnosis and decision making. Sensor systems capable of obtaining high sampling density associated with georeferencing allow the production of spatial surfaces that can be superimposed assisting on the characterization of localized conditions that conditions crop performance and that can sometimes be managed to obtain better results. Soil apparent electrical conductivity (CEa) is a property that can be easily measured and is related to several properties of agronomic interest. As it results from the contributions of many soil components, its interpretation is ambiguous, requiring the characterization of other parameters for the development of prediction models applicable only locally. Several contributions have been made to allow the use and interpretation of CEa data obtained in fields and different crops such as processing and modeling methods. Although these works allow for a deeper understanding, they tend to be local, with a lack of surveys on a global scale that allow a more structuring understanding of the phenomenon. This work aimed to carry out an exploratory survey of data collected in several Brazilian agricultural regions and their relationship with information related to the environments in which they were obtained. For this purpose, 193 CEa datasets were obtained representing plots under grain cultivation located from the north to the south of the country, all obtained by the same instrument with prospecting depths up to 0.3 m and up to 0.9 m, CEaR and CEaP, respectively. A total of 34 local or regional, quantitative and qualitative variables were collected and related. The CEa data were processed to obtain metrics that characterize them in quantitative terms and in terms of their spatial structure, a total area of 13,649 ha of maps with a resolution of 400 m² (20 x 20 m) was used in the analyses. Descriptive statistics showed that after removing many erroneous and discrepant data, ECa values ranged between 3.8 and 12.7 mS m⁻¹. The ranges of the adjusted local semivariograms showed median range values of 158.6 m and 171.4 m for the CEaR and CEaP layers respectively. Through multivariate techniques such as hierarchical grouping and principal component analysis, we sought to identify groups that presented similar characteristics and to describe the variables that condition behavior within each group. A qualitative data analysis technique was also applied to identify factors related to CEa at two prospecting depths. The results showed that many of the variables were correlated whereas those that condition water availability are relevant to the behavior of ECa in most situations. Three groups were defined that presented a geographical distribution with some consistency. In central Brazil, available water capacity and soil pH stood out as variables associated with ECa. In the two other groups it was not possible to highlight variables, while a mixture of their effects was evident. Perceptual maps of categories representing classes for CEa and other variables showed divergent behavior between depths, but there was a closer relationship for those related to granulometric composition and soil chemical correction. It was concluded that there is diversity in CEa data that is related to regional environments, with a mixture of effects that make the development of global prediction models with traditional tools of multivariate statistics unfeasible.

Keywords: Exploratory analysis, Precision agriculture, Proximal sensing, Multivariate analysis

LISTA DE ABREVIATURAS

CEaR	Condutividade elétrica aparente do solo (0 a 0,3 m), mS m^{-1}
CEaP	Condutividade elétrica aparente do solo (0 a 0,9 m), mS m^{-1}
CCEaR	Coefficiente de variação da condutividade elétrica aparente do solo (0 a 0,3 m), %
CCEaP	Coefficiente de variação da condutividade elétrica aparente do solo (0 a 0,9 m), %
ALT	Altitude (m)
CALT	Coefficiente de variação da altitude (%)
DEC	Declividade do terreno (%)
CDEC	Coefficiente de variação da declividade do terreno (%)
TWI	<i>Topographic wetness index</i>
CTWI	Coefficiente de variação do <i>Topographic wetness index</i> (%)
ALR	Alcance do semivariograma experimental (0 a 0,3 m), m
ALP	Alcance do semivariograma experimental (0 a 0,9 m), m
CALR	Coefficiente de variação do alcance do semivariograma experimental (0 a 0,3 m), %
CALP	Coefficiente de variação do alcance do semivariograma experimental (0 a 0,9 m), %
CONR	Contribuição do semivariograma experimental (0 a 0,3 m)
CONP	Contribuição do semivariograma experimental (0 a 0,9 m)
CCONR	CV da contribuição do semivariograma experimental (0 a 0,3 m), %
CCONP	Coefficiente de variação da contribuição do semivariograma experimental (0 a 0,9 m), %
AREA	Área em hectares
ARR	Teor de areia (0 a 0,3 m), %
ARP	Teor de areia (0 a 1 m), %
SR	Teor de silte (0 a 0,3 m), %
SP	Teor de silte (0 a 1 m), %
AGR	Teor de argila (0 a 0,3 m), %
AGP	Teor de argila (0 a 1 m), %
COR	Teor de carbono orgânico (0 a 0,3 m), %
COP	Teor de carbono orgânico (0 a 1 m), %
CTCR	Capacidade de troca catiônica (0 a 0,3 m), mmolc dm^{-3}
CTCP	Capacidade de troca catiônica (0 a 1 m), mmolc dm^{-3}
DSR	Densidade do solo (0 a 0,3 m), g cm^{-3}
DSP	Densidade do solo (0 a 1 m), g cm^{-3}
pHR	pH do solo (0 a 0,3 m)
pHP	pH do solo (0 a 1 m)
PR05	Precipitação acumulada até 5 dias antes da coleta de dados, mm
PR5-10	Precipitação acumulada entre 5 a 10 dias antes da coleta de dados, mm
PR10-15	Precipitação acumulada entre 10 a 15 dias antes da coleta de dados, mm
TEMP	Temperatura, °C
CADR	Capacidade de água disponível (0 a 0,3 m), %v/v
CADP	Capacidade de água disponível (0 a 0,9 m), %v/v

DA	Densidade amostral (pontos ha ⁻¹)
TC	Tempo de cultivo (anos)
DF	Distância entre faixas de operação (m)

1. INTRODUÇÃO

O termo agricultura de precisão (AP) é relativamente recente no meio agrícola, contudo o conceito é inerente à atividade de produção agrícola desde seus primórdios. A AP propõe uma concepção no gerenciamento do sistema produtivo, em que a variabilidade espacial dos fatores que governam a produção é o ponto chave. Com o uso de ferramentas que permitem referenciar espacialmente as variáveis a AP visa encontrar janelas de oportunidade para tornar o sistema de produção mais eficiente e rentável.

A caracterização espacializada dos fatores de produção que regem a produtividade das lavouras é essencial para os trabalhos em agricultura de precisão. Nessa etapa, diversas ferramentas possibilitam a obtenção de camadas de informação que servem de base para o estudo e diagnóstico das causas e efeitos da variabilidade existente nos campos de produção. Algumas formas tradicionais de obtenção de informações são mapas de produtividade que podem ser obtidos por meio de sensores e de modo automatizado, mas também há diversas outras como aquelas obtidas por meio de amostras ainda que coletadas manualmente.

O sensoriamento, técnica baseada em princípios físicos para a obtenção de informações acerca do ambiente ou objeto de estudo, pode ser classificado como remoto, em que o sensor não entra em contato com o objeto de estudo, ou direto, quando ocorre o contato ou muita proximidade entre o sensor e o objeto. Quando disponível, o sensoriamento representa uma alternativa aos procedimentos de coleta e análise de amostras de solo feitos de modo manual, uma vez que permite sistematizar procedimentos e aumentar a densidade amostral, usualmente a um custo mais baixo. Os sensores podem se apoiar em diversos princípios físicos de funcionamento, e caracterizar variáveis direta ou indiretamente relacionadas àquelas de interesse agrônômico.

No meio agrícola, diversas técnicas de sensoriamento vêm sendo empregadas à luz dos princípios geofísicos que elucidam a relação das leituras de diversos instrumentos com parâmetros e variáveis do solo. A condutividade elétrica aparente (CEa) do solo é considerada uma propriedade de interesse pois se relaciona a propriedades condicionantes do desenvolvimento das plantas. Apresenta também a vantagem de ser facilmente mensurada, havendo mais de um princípio físico para obtenção e diversos equipamentos comerciais.

Independentemente do modo de obtenção da informação, a leitura da CEa pode ser um forte indicador da composição granulométrica do solo, sua umidade ou ainda da ocorrência de salinidade. Assim, é possível a partir de mensurações realizada ao longo dos campos produtivos verificar e distinguir porções com diferentes características físico-químicas podendo-se inclusive inferir acerca da capacidade de água disponível (CAD) e a capacidade de troca catiônica (CTC).

A CEa do solo é resultante da interação dos diversos componentes do meio, tendo cada um deles uma condutividade elétrica própria. Por esse motivo, a interpretação e elaboração de recomendações práticas com base no mapeamento realizado pode ser por vezes difícil, e tende a ser local.

Por ser uma propriedade com comportamento dinâmico em função da oscilação das condições de umidade e desta em interação com diversas variáveis do solo, a CEa frequentemente esbarra em dificuldades em seu uso, resultando em baixa adoção por parte dos usuários.

Apesar do tema ser explorado em muitas pesquisas, há dificuldade em extrapolar os resultados encontrados por diferentes autores para situações e ambientes distintos dos locais de estudo em que os resultados foram gerados. A maior parte dos trabalhos publicados foram produzidos em ambientes de produção bastante distintos daqueles encontrados no Brasil. Naqueles trabalhos os solos possuem elevada atividade de argila e baixo índice de intemperismo, além de serem manejados com mobilização periódica, em contraposição aos sistemas em semeadura

direta e solos altamente intemperizados do ambiente tropical. Contribuições para o entendimento da CEa nos ambientes de produção brasileiros foram realizadas ao longo das duas últimas décadas, porém também de modo local ou sem contemplar variáveis que possam auxiliar no seu entendimento de modo abrangente.

Informações sobre qual a condição de umidade do solo, a densidade amostral, o efeito do relevo e do momento de coleta estão disponíveis de forma dispersa em diversos trabalhos dificultando sua interpretação.

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo exploratório e descritivo sobre a CEa do solo, verificando sua relação com características estáticas e dinâmicas em diversos ambientes de produção do Brasil. A hipótese a se verificar é a de que seja possível identificar nos mapas obtidos em lavouras distribuídas em ambientes distintos, grupos que apresentem características comuns e condicionantes do comportamento desta propriedade. Com isso poderia se inferir sobre quais as melhores estratégias para sua obtenção e também identificar comportamentos distintos daqueles mais frequentes, contribuindo para a identificação de problemas e a melhoria do uso desta camada de informação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão está organizada de modo a permitir inicialmente uma contextualização acerca da propriedade em análise, descrevendo os princípios físicos e as estratégias para sua caracterização, embasamento importante para o entendimento do seu comportamento no solo, tema abordado logo adiante. Os métodos de coleta do dado no campo são apresentados, com ênfase para os mais difundidos na meio agrícola. Na sequência buscou-se demonstrar a relevância da propriedade como indicadora indireta das condições do solo e com isso sua utilidade para aplicação na agricultura. Por fim são apresentadas sucintamente as técnicas utilizadas na análise dos dados e sua associação com outras variáveis com o uso de técnicas multivariadas.

2.1 Referencial teórico

A condutividade elétrica pode ser definida como a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica. É uma propriedade intrínseca a cada material. A resistividade elétrica é o oposto à condutividade, sendo a capacidade que um material possui de se opor à passagem da corrente elétrica. De acordo com Runyan (1975), a resistividade elétrica em um material de dimensões conhecidas pode ser mensurada de acordo com a equação 1.

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

ρ = resistividade elétrica ($\Omega \cdot m^{-1}$)

R = resistência elétrica (Ω)

A = área da secção transversal (m)

L = comprimento do material (m²)

A resistência elétrica é uma característica própria do objeto de estudo. Diferentemente da resistividade, que é uma constante para cada material, o valor da resistência de um dado objeto varia de acordo com a sua forma e dimensões. Ela pode ser calculada segundo a lei de Ohm, proposta por Georg Simon Ohm em 1825, equação 2.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

R = resistência (Ω)

ΔV = diferença de potencial (V)

I = intensidade de corrente (A)

Por meio da mensuração da resistência elétrica de um objeto de dimensões conhecidas, a resistividade do material do objeto pode ser calculada, levando em consideração um coeficiente geométrico.

A temperatura influencia a resistividade elétrica de um material, que se altera de forma quase linear em um condutor ôhmico, como mostra a equação 3.

$$R = R_{20} [1 + \alpha_{20}(T - 20)] \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

R = resistividade

R_0 = resistividade à temperatura de 20 °C

α = coeficiente de temperatura

T = temperatura em graus Celsius

O coeficiente de temperatura é obtido empiricamente para cada material. Nos metais há aumento da resistência e portanto da resistividade elétrica com o aumento da temperatura. O oposto ocorre para compostos ricos em carbono, onde há diminuição da resistividade com o aumento da temperatura, podendo a variação da condutividade atingir patamares substanciais.

Segundo Allred (2008) a condutividade elétrica de uma solução eletrolítica aumenta cerca de 1,9% a cada grau de aumento de temperatura. Essa variação pode ser ajustada para uma temperatura de referência de 25 °C, de acordo com a equação 4.

$$CE_{25} = f_T \cdot CE_r \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

CE_{25} = Condutividade elétrica ajustada para uma temperatura de 25° C

f_T = Fator de correção

CE_r = Condutividade elétrica mensurada.

Sheets e Hendrickx propuseram uma equação para o cálculo do fator de correção, onde T corresponde à temperatura no momento da mensuração.

$$f_T = 0,447 + 1,4034e^{-T/26,815} \quad (\text{Equação 5})$$

2.2 Condutividade elétrica aparente do solo

Segundo Friedman (2005), as tentativas de se realizar a mensuração da CE do solo começaram a partir do final do século 19 com a publicação de trabalhos como, a título de exemplo, os de Briggs (1899), Wenner (1915) e Smith-Rose (1933).

O objetivo prático dos primeiros trabalhos, que eram voltados ao campo da engenharia elétrica, era encontrar uma forma conveniente de avaliar características do solo importantes para o dimensionamento de aterramentos elétricos.

Rhoades et al. (1989) apresentaram a equação 6 que, segundo os autores, mostrou descrever satisfatória e empiricamente os dados analisados em laboratório referentes ao comportamento da corrente elétrica no solo, demonstrando a necessidade de separar os componentes de condução para a modelagem da CEa, equação 6.

$$CEa = CE_s + T \cdot \theta_w \cdot CE_w \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

CEa – Condutividade elétrica aparente do solo

CEw – Condutividade elétrica da solução do solo

CEs – Condutividade elétrica da fração sólida do solo

T – Coeficiente de transmissão

θ_w – Teor volumétrico de água no solo

Dessa forma, os autores apontam que o caminho da corrente elétrica é formado pela combinação da fração sólida (devido principalmente às cargas presentes nas partículas de argila) e da solução do solo, onde os elétrons devem percorrer o tortuoso caminho formado por esses fatores na matriz do solo. Assim sendo, o ambiente pelo qual a corrente percorre o seu caminho é dinâmico e dependente da condutividade elétrica específica de diversos materiais ao mesmo tempo, sob uma condição única para cada coleta de dados, motivo pelo qual a condutividade global do solo é conhecida como condutividade elétrica aparente.

Dentre os meios para a propagação da corrente elétrica, a solução do solo é a que apresenta a maior parcela de contribuição para a condução, que nesse caso é eletrolítica. Solos com teores muito baixos de água apresentam pouca condutividade. À medida que a porosidade do solo é ocupada pelo ar, o rompimento dos filmes de água dificulta a passagem dos elétrons, obrigando-os por vezes a seguir por meio de partículas que possuam cargas. Por outro lado, maiores teores de argila implicam em maior capacidade de retenção de água e maior abundância de microporosidade, resultando em maior continuidade dos filmes d'água na estrutura do solo, levando a uma condição de valores maiores de CEa (FREELAND, 1989).

A partir do final da década de 1990 o uso de mapas de CEa do solo começa a ser difundido entre as ferramentas de agricultura de precisão para o estudo da variabilidade (e.g. SUDDUTH et al., 1997; CORWIN et al., 2003). Corwin e Lesch (2005) apontam uma série de benefícios na adoção da CEa para trabalhos em AP, como o uso da CEa no direcionamento de amostragens, delimitação de zonas de potencial produtivo e auxílio na interpretação de mapas de produtividade.

2.2.1 Mensuração da Condutividade Elétrica aparente do Solo

O uso de sensores possui algumas vantagens em relação às análises de laboratório no monitoramento da variabilidade. A coleta de dados por meio de sensores é realizada de maneira rápida e com baixo custo, havendo aqueles que podem ser facilmente transportados, permitindo realizar mapeamentos. Diversos métodos envolvendo sensores podem ser empregados na obtenção de leituras da CEa do solo. Allred et al. (2008) citam 6 diferentes técnicas de mensuração baseadas em diferentes princípios físicos de funcionamento. Entretanto, dois métodos se destacam para o uso na agricultura em função da sua simplicidade, robustez e praticidade, sendo eles o método resistivo e o de indução eletromagnética (LUND et al., 1999).

Segundo Gupta et al. (2019), o método resistivo é uma técnica baseada no arranjo de Wenner, em que quatro eletrodos são dispostos equidistantes na superfície do solo. A mensuração da resistividade elétrica é mensurada indiretamente por meio da diferença de potencial entre os eletrodos emissores e os receptores, ao ser introduzido no solo uma corrente elétrica, de acordo com a equação 7.

$$\rho = \frac{2\pi a \Delta V}{I} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

ρ = resistividade elétrica

a = distancia entre os eletrodos

V = voltagem em volts

I = corrente em amperes

O método resistivo é a base de funcionamento do produto comercial Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, KS), cuja tecnologia foi patenteada em 1998 (Figura 1). O equipamento e os dados provenientes da operação do mesmo em campo já foram bastante estudados e a literatura sobre o tema é ampla.



Figura 1. Veris 3100 com arranjo de seis eletrodos.

De acordo com o manual do usuário (VERIS, 2002), o equipamento realiza mensurações georreferenciadas da CEa do solo na frequência de 1 Hz, em duas camadas de prospecção simultaneamente, de 0 a 0,3 m e de 0 a 0,9 m, à medida que se desloca pelo campo. Durante a coleta, realizada de modo dinâmico, são armazenados o posicionamento, os valores de CEa e a altitude. Para realizar a medição, um par de discos de corte sobre o solo atuam como eletrodos, emitindo uma pequena corrente elétrica no solo. Um segundo par de eletrodos próximos dos emissores recebe a corrente, realizando a mensuração da diferença de potencial na primeira profundidade de prospecção, ao passo que o terceiro par, mais distante, realiza a mensuração da diferença de potencial na camada mais profunda (Figura 2).

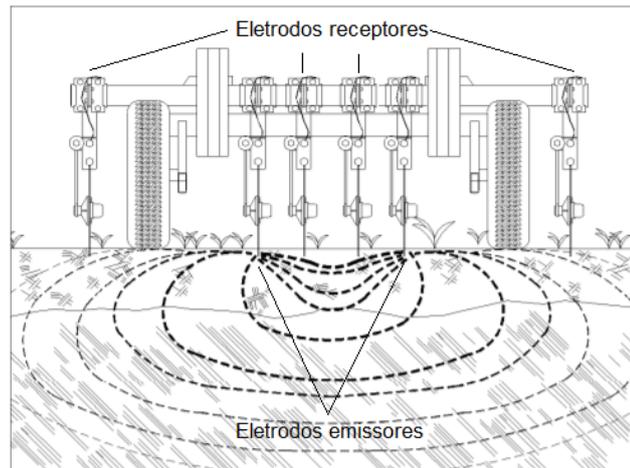


Figura 2. Arranjo de eletrodos do Veris 3100.

O dado é armazenado em formato de arquivo de texto e pode ser trabalhado em qualquer sistema de informações geográficas (SIG). Ainda segundo (VERIS, 2002) a velocidade de coleta de dados recomendada é de 12 a 20 km/h, e a largura de faixa na operação entre 15 e 23 m. Para uma boa coleta, é necessário que os eletrodos mantenham contato constante com o solo. A profundidade de inserção dos eletrodos no solo recomendada é de 2,5 a 5 cm. A condição de umidade solo deve estar uniforme ao longo da área a ser trabalhada.

Os estudos da indução eletromagnética na agricultura surgiram a partir do final da década de 1970, com a publicação de trabalhos como os de Jong et al. (1979), Rhoades e Corwin (1981) e Williams e Baker (1982), os quais, da mesma forma que com o emprego do método resistivo, buscavam avaliar problemas de salinidade por meio da CEa do solo.

Essa técnica envolve a indução de uma corrente elétrica no solo por meio do campo elétrico gerado por uma bobina. A propagação da corrente elétrica é diretamente proporcional à sua condutividade elétrica. O campo magnético secundário que é gerado pela corrente que percorre o solo interage com uma segunda bobina receptora. O sinal da bobina receptora pode ser relacionado com a CEa. Os equipamentos para uso na agricultura apresentam como característica uma profundidade de prospecção de até 2 m, coerente com a profundidade radicular das plantas cultivadas, e sendo portáteis e são adequados para mobilização e mapeamentos. A mensuração da CEa do solo pelo método indutivo é no entanto mais complexa do que pelo método resistivo. Para valores baixos de condutividade é possível a utilização de modelos lineares de associação entre a leitura e a CEa, mas para valores altos, modelos não lineares são necessários, os quais precisam ser elaborados empiricamente para cada local de estudo (Allred et al., 2008).

Segundo Sudduth et al. (2001) o equipamento do fabricante Geonics, modelo EM38, figura 3, (Mississauga, ON, Canada) é o sistema sensor baseado na indução eletromagnética mais utilizado na agricultura para fins de mensuração da CEa do solo (Figura 5). O fabricante também possui diversos outros produtos comerciais geofísicos, como detectores de metais, sondas para avaliação de propriedades do solo, softwares, equipamentos para mensuração da CEa do solo baseados em outros métodos de funcionamento e entre outros. A literatura reporta o uso do equipamento em estudos sobre a CEa do solo relacionada a diversas variáveis (Doolittle et al., 1994; Anderson et al. 2002; Corwin & Lesch, 2003).



Figura 3. Geonics EM38 MK2.

2.2.2 Relevância agrônômica da Condutividade Elétrica aparente do Solo

Há uma série de usos para a CEa do solo na agricultura e na AP. As principais propriedades do solo que afetam a CEa são a salinidade, conteúdo de água, teor de argila, capacidade de troca catiônica (CTC), temperatura e teor de matéria orgânica do solo, de modo que mapeamento da CEa auxilia no estudo dessas variáveis e demais correlatas, como classes de drenagem, profundidade de horizontes, compactação, teor de solutos na solução do solo e outras. Quando são obtidos mapas é possível direcionar a coleta de amostras de solo e auxiliar na interpretação de outras camadas de informação. A complexidade e dificuldade na interpretação de mapas de CEa do solo para fins de agricultura de precisão é recorrente, mas a natureza complexa do fenômeno pode ter um ponto positivo ao ser um meio de caracterizar a variabilidade espacial de diversas propriedades do solo sem a necessidade de uma relação direta de causa e efeito. Usualmente, apenas uma ou duas variáveis respondem pela maior parte do comportamento observado da CEa. Estas, por sua vez, podem alterar-se em ordem de importância de um local para o outro, o que é frequente, evidenciando a especificidade da interpretação da CEa para cada local (Allred et al., 2008).

Ainda na década de 1970 com o uso de métodos resistivos, Rhoades e Ingvalson (1971) mensuraram a resistividade elétrica de um solo submetido a diferentes níveis de salinidade com o uso de um eletrodo de quatro pontas no arranjo de Wenner e encontraram excelentes correlações (acima de 0,95) para o local em estudo, sob quaisquer condições de espaçamentos entre eletrodos, revelando o quão determinante é a condutividade elétrica da solução do solo para o valor final da CEa assim sua aplicabilidade.

A obtenção da condutividade elétrica em laboratório a partir da extração da solução do solo já era bem conhecida nessa época. Entretanto, a mensuração da CEa a campo ganhou adoção em função do menor custo, tempo e esforço demandados, além da possibilidade de obter alta densidade amostral e resolução espacial no resultado (Corwin & Lesch, 2005). Para além da salinidade, fez-se necessário incorporar aos modelos de predição outras propriedades do solo. Estudos relacionando a CEa com a água no solo surgiram a partir da segunda metade de década de 1980 (Fiterman & Stewart, 1986; Kean et al., 1987; Kachanoski et al., 1988), bem como com a textura (Williams & Hoey, 1987; Sudduth & Kitchen, 1993) e densidade a partir da década de 1990 (Gorucu et al., 1998).

Banton et al. (1997) utilizaram a CEa para determinar a variabilidade espacial de algumas propriedades físicas do solo em talhão sob condições de alta e baixa umidade, onde encontraram correlações razoáveis entre a CEa do solo e os teores de areia, silte, argila e matéria orgânica, variando de 0,53 a 0,65, sem diferenças significativas entre as diferentes condições de umidade do solo. Não foram obtidos, entretanto, resultados satisfatórios para outras propriedades do solo, como densidade, porosidade e condutividade hidráulica. Machado et al. (2006) relacionaram a

CEa do solo com os teores de argila de um Latossolo Vermelho sob o sistema plantio direto no Estado do Paraná, e encontraram coeficientes de determinação de 0,77 e 0,78 entre a CEa e o teor de argila do solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm, respectivamente, resultados semelhantes aos obtidos por Johnson et al. (2001).

A densidade do solo foi objeto de estudo de Schmack et al. (2022), onde os autores verificaram altas correlações ($> 0,7$) entre a densidade do subsolo (abaixo de 0,3 m) e a CEa do solo mensurada pelo método indutivo em um Luvisolo. Tsoulas et al. (2020) contrapuseram algumas propriedades de plantas e solo, não encontrando qualquer relação da CEa com a densidade do solo, mas verificaram boas associações entre a CEa e a profundidade de raízes e composição granulométrica.

Algaadi et al. (2012) utilizaram a CEa, mensurada com um equipamento indutivo, para avaliar a compactação de um solo arenoso sob diferentes condições de umidade e níveis de compactação, obtendo boas correlações ($> 0,65$) em diferentes cenários com coeficientes tanto maiores quanto maior os teores de umidade do solo. Bottega et al. (2021) utilizaram a CEa para criar quatro regiões distintas em uma área de estudo, em cada região a compactação do solo foi mensurada em diversos pontos. Os autores encontraram pouca relação entre a CEa e a compactação do solo.

De Lara et al. (2018) caracterizaram espacialmente o conteúdo de água no solo para fins de irrigação e precisão com o uso da CEa do solo e observaram concordância no padrão espacial entre as amostras coletadas e as leituras de CEa, as quais foram responsáveis pela divisão da área de estudo em zonas de teor de umidade.

Kravchenko et al. (2002) observaram grande relação entre a condutividade elétrica e a drenagem do solo. Os autores utilizaram informações sobre o relevo e a CEa do solo como informação auxiliar, junto a amostras de solo, na classificação de um solo em classes de drenagem em um talhão de 20 ha, concluindo que o uso da condutividade elétrica melhorou levemente a acurácia da predição realizada na etapa de interpolação. A alta densidade de coleta das amostras (107 ao todo) permitiu grande acurácia na interpolação. Os autores enfatizaram que a CEa pode prestar melhores contribuições no caso de amostragens mais esparsas.

Tentando correlacionar a CEa com diversas outras propriedades do solo, muitos dos estudos iniciais confrontavam as mensurações realizadas com o resultado de análises de solo coletadas em grades regulares, o que evidenciou muitas relações entre a CEa e propriedades dos solos. Entretanto, apesar da obtenção de muitos bons resultados, a falta de embasamento sólido nos princípios teóricos que envolvem a CEa levou a muitos trabalhos e publicações com interpretações equivocadas. Diferentes frentes de pesquisa possuíam enfoques distintos, de maneira que a dinamicidade da CEa as contrapunha a todo momento (Allred et al., 2008).

Johnson et al. (2001) encontraram muitas inconsistências nas correlações entre a CEa e a produtividade ao longo dos anos em um estudo conduzidos no Estado do Colorado – EUA, em uma região com altas precipitações pluviométricas. Também não foram encontradas fortes relações com outros parâmetros do solo analisados. O autor salienta que em locais onde a água é o principal fator limitante a CEa pode ser um preditor mais consistente do potencial produtivo ao longo das safras e conclui afirmando que para uma discriminação geral da variabilidade do solo a CEa pode ser útil, mas sem boas correlações com nenhuma propriedade isolada.

Carrol e Oliver (2005) exploraram, levando em consideração a variabilidade espacial, as relações entre a CEa e propriedades do solo em talhões localizados no sudoeste da Inglaterra, com o uso de um equipamento indutivo modelo EM 38 e elaboraram uma grade amostral, onde diversas propriedades do solo foram analisadas e o conteúdo de água do solo foi mensurado em diferentes épocas. Os autores encontraram alguns padrões semelhantes entre a CEa e algumas propriedades do solo nos mapas elaborados. Entretanto, o resultado das análises de correlação, regressão e componentes principais entre a CEa e diversas propriedades apresentaram várias inconsistências. A

correlação entre o conteúdo de água e CEa, por exemplo, diminuiu para a condição de solo mais seco em um dos talhões, mantendo-se moderada para o outro. Observaram que os fatores determinantes na leitura da CEa variavam a intensidade da sua influência sobre esta ao longo da área em estudo, prejudicando a interpretação e análise dos resultados. Além disso, nenhuma propriedade do solo se sobressaiu de forma consistente e homogênea em nenhum dos talhões quanto à sua influência sobre a CEa.

O fator atuante predominante sobre a CEa pode levar a diferentes interpretações. Se o fator é dinâmico e varia com o tempo, como a salinidade ou o teor de água do solo, são constatadas modificações na leitura da CEa ao longo do tempo. Se for estático, como a textura, o padrão de distribuição espacial tende a permanecer mais constante, onde as alterações dos fatores de menor influência, por sua vez, tenderão a modificar apenas a magnitude da variação (Allred et al., 2008). O funcionamento dessa dinâmica não é muito bem esclarecido pela comunidade científica, de modo que a possibilidade de interpretações distintas causam problemas para o uso e adoção da tecnologia.

Corwin e Lesch (2003) reforçam que o fato de a CEa ser função de diversas propriedades do solo ao mesmo tempo é frequentemente negligenciado no momento da sua aplicação em trabalhos em agricultura de precisão. O autor aponta que antes de partir para a investigação em si, é importante buscar entender quais são os fatores e se possível em que medida exercem influência sobre a CEa.

Além da variação no tempo, um agravante prejudicial é a existência de redundância entre as propriedades que influenciam a CEa. Muitas delas são inter-relacionadas, como é o exemplo da relação entre a umidade do solo e a condutividade elétrica da solução do solo. À medida que a umidade do solo diminui, a concentração de sais da solução aumenta, elevando a condutividade elétrica. Ao mesmo tempo, os filmes de água começam a se romper, dificultando a passagem da corrente (Gimenez, 2013).

2.3 Técnicas de análise de dados

De acordo com Vicini (2005), os métodos estatísticos estão dispostos em dois grupos. O primeiro é o da estatística univariada, que trata das variáveis de forma isolada, ao passo que o segundo, o da estatística multivariada, trata as variáveis de forma conjunta. Tal grupo é compreendido por métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis de um conjunto de dados no processo de interpretação e obtenção de conhecimento.

A análise multivariada é uma análise em que o propósito maior é a geração de hipóteses, e não a obtenção de confirmações, embora às vezes possa ser utilizada para esse fim (HAIR et al. 2009).

Segundo Walker et al. (2008) os objetivos da análise multivariada englobam o processo de sumarizar e integrar os resultados de muitos estudos ou dados, com o objetivo de gerar informações úteis a partir de uma análise abrangente. A interpretação dos resultados, formados por um novo conjunto de variáveis, é citada como um dos desafios em que tal tipo de análise pode ser empregado.

A escolha correta do método multivariado de análise depende muito do objetivo da pesquisa e dos dados disponíveis. Para Vicini (2005), em estudos que envolvam a verificação de como as amostras se relacionam e o quanto são semelhantes, dois métodos que se destacam podem ser utilizados: a análise de agrupamento hierárquico e a análise fatorial com análise de componentes principais.

A análise de componentes principais (ACP) forma a base da análise multivariada de dados. É utilizada para encontrar as características mais importantes em um conjunto de dados no que se refere a sua variabilidade. Em

geral, qualquer conjunto de dados que se encontre na forma de uma matriz pode ser simplificado com o uso de uma ACP, sendo o objetivo maior prover maiores condições para a interpretação de grande volume de dados (WOLD et al. 1987).

Na ACP a simplificação não é obtida pela simples seleção de algumas variáveis principais. Ao invés disso as variáveis iniciais são utilizadas para construir um número menor de variáveis sintéticas, os componentes principais, que sintetizam a informação contida no conjunto de dados. A sumarização dos dados para o auxílio à interpretação se dá ao custo de perda de parte das informações (BOROUCHE, 1982).

Para Hongyu et al. (2016), a ACP possibilita investigações com grande número de dados disponíveis, identificando as medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados, sem perda significativa de informações.

Borough e Webster (1976) trabalharam com o estudo da variabilidade da fertilidade do solo utilizando a ACP, onde enfatizaram o potencial e a praticidade de utilização.

Cherubin et al. (2011) caracterizaram a variabilidade espacial de uma área, cultivada com o uso de técnicas de agricultura de precisão, utilizando a análise de componentes principais. Os autores concluíram que a técnica permitiu restringir à metade o número de variáveis necessárias para o estudo da variabilidade, preservando somente as mais importantes e de maior influência, o que permitiu simplificar o estudo e o entendimento.

Officer et al. (2004) utilizaram a análise de componentes principais para sumarizar as principais variáveis condicionantes de variabilidade do solo relacionadas a topografia e fertilidade do solo. Os componentes com mais influência sobre a variabilidade foram espacializados por meio de uma interpolação, e posteriormente relacionados com a CEa do solo. Os autores observaram que a divisão dos dados em componentes principais trouxeram informações muito úteis à interpretação, facilitando o trabalho. A CEa do solo se apresentou fortemente relacionada com os componentes principais da análise referente a fertilidade do solo.

A análise de agrupamentos tem o objetivo de encontrar e separar os indivíduos de um conjunto de dados em grupos similares. A finalidade é separar os indivíduos em grupos que possuem máxima semelhança dentro do grupo e máxima heterogeneidade entre grupos. Ela não leva em consideração a dependência ou independência entre as variáveis, o que não acontece na ACP, onde através da análise fatorial é realizada a separação entre aquelas que são independentes. Por isso, tem-se que a padronização dos dados é fundamental para a realização de uma análise de agrupamentos.

Conforme descrito em Fávero e Belfiore (2017), quando as variáveis a serem analisadas são categóricas e portanto qualitativas e se deseja verificar se há uma associação estatisticamente significativa a técnica denominada de análise de correspondência pode ser utilizada. A análise de correspondência simples (ANACOR) é empregada quando há duas variáveis qualitativas e se deseja verificar seu relacionamento entre elas e suas categorias. Quando há mais de duas variáveis é empregada a análise de correspondência múltipla (ACM). A análise de correspondência múltipla pode ser considerada é uma técnica exploratória e permite identificar grupos de indivíduos com comportamento semelhante quanto as associações entre as categorias das variáveis e sua intensidade. É uma extensão natural da análise de correspondência simples. Informações quantitativas podem ser incluídas desde que passem por uma categorização. Tais técnicas permitem a obtenção de testes estatísticos como o qui-quadrado e a apresentação de modo visual do relacionamento entre as variáveis por meio de mapas perceptuais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram obtidos 193 conjuntos de dados de CEa do solo em regiões do Brasil, os quais são o objeto principal do estudo. Para além dos dados de CEa, foram obtidas camadas de informações adicionais, algumas espacializadas, outras não. Todas elas são camadas de variáveis caracterizadoras do ambiente que se relacionam com a CEa do solo ou que se pretendeu avaliar a relação. Uma parte de camadas de informações foi obtida com base no processamento das camadas de dados originais. O fluxograma da Figura 4 esquematiza a obtenção dos dados.

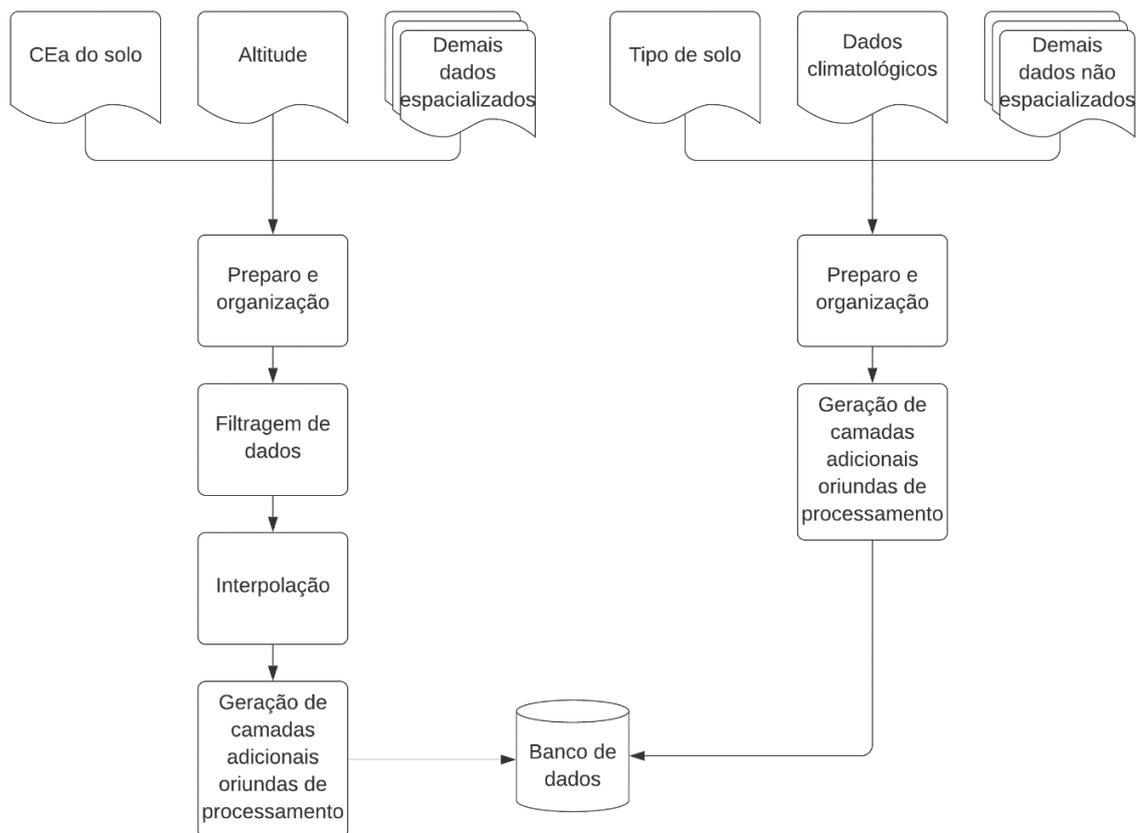


Figura 4. Fluxograma do processo de obtenção do banco de dados.

Uma vez preparadas, as informações foram utilizadas em três etapas de investigação sobre o comportamento da CEa: i) sua relação com as demais variáveis, ii) identificação de associação entre dados de CEa do e demais variáveis quantitativas, iii) relacionamento da CEa com variáveis qualitativas, como ilustrado no fluxograma da Figura 5.

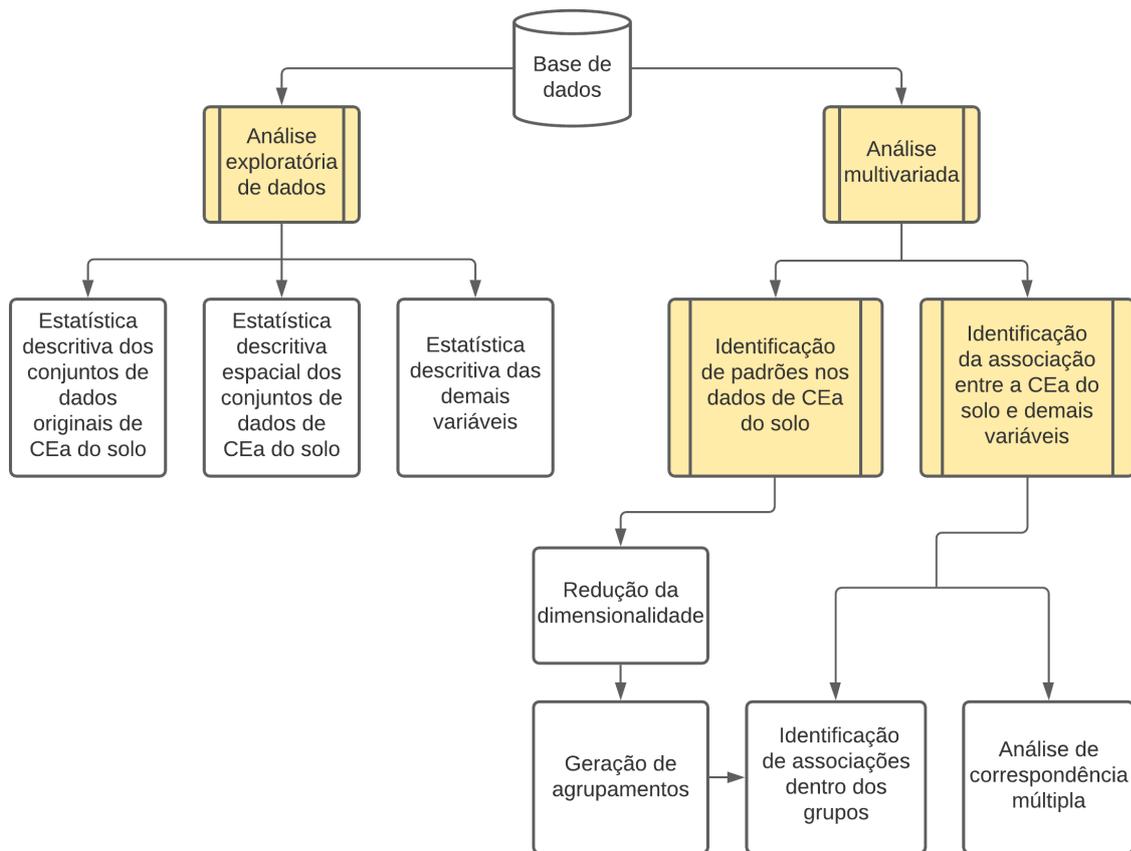


Figura 5. Fluxograma do processamento de dados.

3.1 Obtenção e preparo do banco de dados

As variáveis que compuseram o banco de dados são sumarizadas na tabela 1. Algumas variáveis são oriundas diretamente do processo de coleta de dados e outras calculadas a partir destes. O banco de dados possui variáveis quantitativas e qualitativas, especializadas (Locais) e não especializadas (Regionais). Muitas possuem um valor para cada uma das duas profundidades de prospecção do instrumento utilizado na coleta dos dados de CEa. Todas as variáveis especializadas locais foram interpoladas para a produção de uma superfície formada por quadrículas com 20 m.

Tabela 1. Variáveis do banco de dados e sua caracterização.

Variável*	Local	Regional	Numérica Quantitativa	Catagórica Qualitativa	Disponível nas duas profundidades
CEa do solo (mS m ⁻¹) ⁺	L		Q		P
Data de coleta		R	Q		
Estado		R		C	
Município		R		C	
Tipo de solo		R		C	
Bioma		R		C	
Orientação de coleta		R		C	
Distância entre passadas (m)		R	Q		
Tempo de cultivo (anos)		R	Q		
Índice de forma		R	Q		
Número de pontos		R	Q		
Área (ha)		R	Q		
Densidade amostral (pts ha ⁻¹)		R	Q		P
Altitude (m)	L		Q		
Velocidade (km h ⁻¹)	L		Q		P
Razão CEa / CEap	L		Q		
Declividade (%)	L		Q		
TWI	L		Q		
Alcance (m)	L		Q		P
Contribuição	L		Q		P
Teor de areia (%)		R	Q		P
Teor de silte (%)		R	Q		P
Teor de argila (%)		R	Q		P
Textura do solo		R		C	
MOS (%)		R	Q		P
CTC (mmolc dm ⁻³)		R	Q		P
Densidade do solo (g cm ⁻³)		R	Q		P
pH		R	Q		P
DVDP (m)		R	Q		
Precipitação (mm)		R	Q		
Ocorrência de precipitação		R		C	
Temperatura (°C)		R	Q		
Umidade em CC (% v/v)		R	Q		P
Umidade em PMP (% v/v)		R	Q		P
CAD (% v/v)		R	Q		P

*Acrônimos: TWI – Topographic wetness index; DVDP – Distância vertical à drenagem mais próxima; CAD – Capacidade de água disponível; + Obtida em duas camadas – CEa entre 0 e 0,3 m e CEap entre 0 e 0,9 m.

3.1.1 Obtenção e processamento dos dados de CEa

Foram obtidos dados não processados de CEa entre prestadores de serviço, cooperativas, fundações de pesquisa e agricultores que operam em algumas regiões do Brasil. Como critério de seleção todos os conjuntos de foram gerados por meio de um equipamento que emprega o método resistivo e que predomina no país, conhecido pelo nome comercial Veris®. O equipamento possui arranjo de eletrodos que permite obter valores de CEa em duas camadas simultaneamente, de 0 a 0,3 m e de 0 a 0,9 m. No Brasil, a Stara (Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas, Não-Me-Toque, RS) nacionalizou o produto, conhecido pelo nome de Veris CE (Figura 6).



Figura 6. Produto comercial Veris CE. Produzido pela Stara.

O equipamento opera da mesma maneira que o equipamento original Veris 3100®. A nacionalização tornou o produto mais acessível aos prestadores de serviço e usuários de AP, motivo pelo qual ele é o mais utilizado em coleta de conjuntos de dados de CEa do solo no Brasil.

A coleção de dados obtida abrangeu variações de condições dos sistemas de produção das principais regiões produtoras do país. Foram obtidos 193 conjuntos provenientes de 10 Estados.

Cada conjunto, representativo de uma gleba produtiva foi submetido a uma verificação visual e com o auxílio de séries históricas de imagens de satélite foram verificados para assegurar se tratar de glebas individualizadas. Doze conjuntos, onde se constatou práticas de manejo distintas em porções claramente delimitadas, foram separadas.

Os conjuntos de dados de CEa do solo seguiram etapas de processamento para a remoção de ruídos e criação de superfícies interpoladas.

3.1.1.1 Metadados da coleção de CEa do solo obtida

Foi solicitado a cada fornecedor de dados o preenchimento de um formulário eletrônico, que deveria ser respondido para cada uma das áreas. O formulário continha 34 perguntas relacionadas a características sobre o procedimento de coleta de dados, ambiente de produção, práticas de cultivo e histórico de manejo assim como aquelas relacionadas direta ou indiretamente com a CEa do solo.

3.1.1.2 Eliminação de dados coletados com erros

Foram identificados e eliminados os dados errôneos gerados pelo equipamento no momento da aquisição da informação, em que o sensor por algum motivo não foi capaz de realizar a leitura ou que a realizou de modo inadequado. Como configuração padronizada, o equipamento Veris®, que originou os dados nas distintas regiões armazena um valor negativo nesses casos. Dessa forma, parte da remoção de erros consistiu na eliminação dos valores negativos do conjunto de dados.

3.1.1.3 Eliminação de valores discrepantes

Um corte de valores extremos foi realizado após a etapa de eliminação dos dados errôneos. Esse procedimento teve como finalidade remover dados discrepantes, compostos por leituras demasiadamente altas ou baixas e que com grande probabilidade não fazem parte da população.

Foi empregada a metodologia proposta por Tukey (1977), que leva em consideração a distribuição dos dados. Os cortes superiores e inferiores foram calculados de acordo com as equações 8 e 9, respectivamente, onde quaisquer leituras de CEa acima ou abaixo dos pontos de corte foram removidas. O procedimento foi aplicado para cada conjunto de dados em separado e para cada uma das duas profundidades.

$$CS = Q3 + 1,6*DP \quad \text{(Equação 8)}$$

$$CI = Q1 - 1,6*DP \quad \text{(Equação 9)}$$

Em que:

CS – corte superior

CI – corte inferior

Q3 – 3º quartil

Q1 – 1º quartil

DP – Desvio padrão

3.1.1.4 Filtragem local

A filtragem local seguiu a metodologia descrita por Menegatti (2002). Cada um dos pontos restantes das duas etapas prévias foi comparado com os seus vizinhos dentro de um raio de busca de 70 metros. A média e o desvio padrão dos valores de CEa dos pontos dentro do raio de busca foi calculado e o ponto analisado excluído caso não estivesse entre o limite inferior e superior, explicitado pelas equações 10 e 11.

$$LS = M + 0,2*Md \quad \text{(Equação 10)}$$

$$LI = M - 0,2*Md \quad \text{(Equação 11)}$$

Em que:

LS – Limite superior

LI - Limite inferior

M - Média

Md – Mediana

3.1.1.5 Interpolação

Os conjuntos de dados foram interpolados em uma grade com resolução espacial de 20 m. Foi utilizado o *software* Vesper 1.6 para a realização da interpolação de cada área, que usou como base os conjuntos de dados

provenientes da etapa de filtragem local. Dentre as diversas configurações de ajuste para o procedimento, destacam-se as abaixo, adotadas de acordo com o desenvolvedor do software:

- Uso do semivariograma local;
- Uso de modelos exponenciais para geração dos semivariogramas;
- Distância máxima do semivariograma de 600 metros;
- Krigagem em blocos (X = 70 m, Y = 70 m);
- Número máximo de vizinhos para a interpolação igual a 150;
- Normalização dos dados de entrada.

3.1.2 Obtenção e processamento dos dados das demais variáveis

Foram obtidos conjuntos de informações adicionais. A seleção foi embasada na revisão de literatura em que foram identificadas associações da CEa com muitas características do ambiente. Na sequencias são descritos os modos de obtenção e o processamento realizado para cada uma das fontes e variáveis utilizadas.

3.1.2.1 Elevação

Os conjuntos de dados de CEa possuem a informação de altitude, fornecida pelo receptor de posicionamento global por satélite (GNSS) embarcado no equipamento. Para adequar os dados de altitude na mesma grade regular foi realizada interpolação. Isso também foi importante para o cálculo da declividade e TWI, que usam a camada de altitude como entrada. Para isso, a informação de altitude, presente nos dados originais de CEa do solo, foi interpolada com o uso de funções de base radial (Spline). Esse método de interpolação é um aprimoramento de outra técnica conhecida como superfícies de tendência, onde equações polinomiais de n ordens são empregadas para criar uma superfície que melhor se ajuste aos pontos dos dados originais, sendo produzidas superfícies suavizadas, para representar melhor as variações de altitude em média e grande escala ao longo do terreno, como exemplificado na Figura 7.

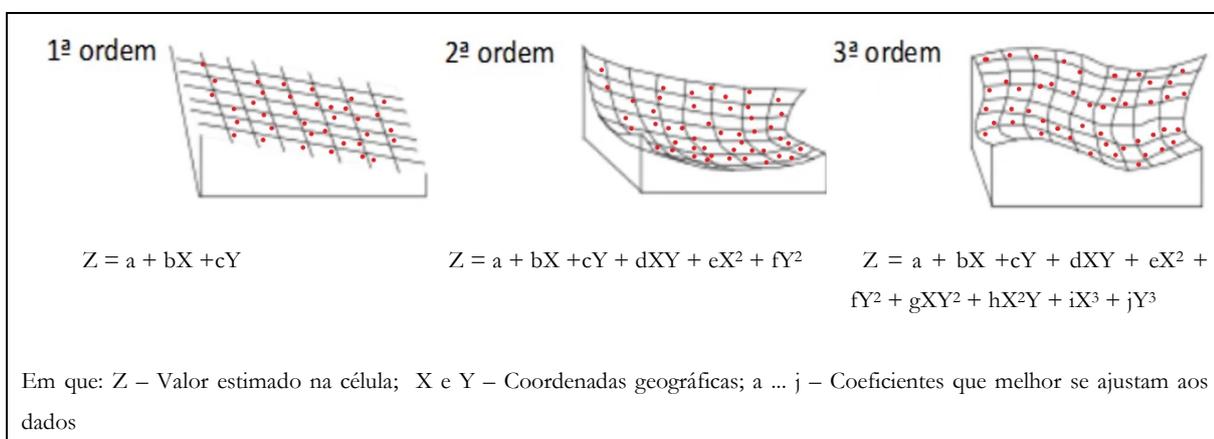


Figura 7. Exemplos de superfícies produzidas por meio do interpolador Spline. Na parte de baixo são apresentados os modelos e seus componentes.

Nas funções de base radial, é criada uma superfície de tendência para cada um dos pontos da grade regular, que é ajustada a partir dos pontos originais a volta do pixel. Dessa forma, é criada uma malha com n superfícies de tendências unidas entre si, onde cada uma delas possui o melhor ajuste possível na região que representa, como mostra a figura a seguir. Essa técnica permite a criação de uma superfície de interpolação suavizada e ao mesmo tempo fidedigna aos dados originais, figura 8.

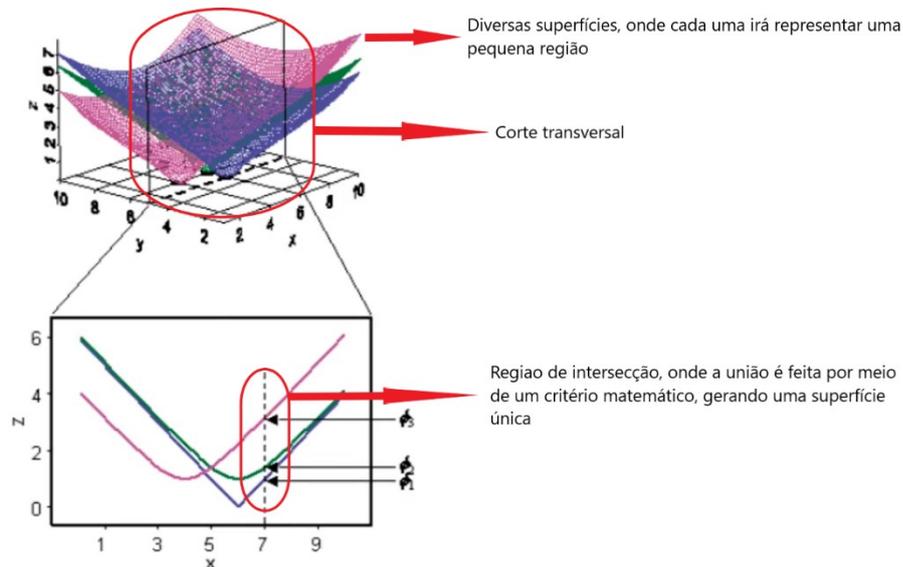


Figura 8. Esquema representativo do uso de diversas superfícies para seleção daquela mais representativa em cada ponto da malha interpolada com o uso de uma função de base radial.

3.1.2.2 Dados climáticos

Foram obtidos dados a partir da plataforma NASAPOWER (*NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*), de propriedade da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), que utiliza dados de sensoriamento remoto para realizar a predição de diversas variáveis agroclimatológicas. Foram obtidas as seguintes informações que seguem relacionadas.

Precipitação: a precipitação acumulada em três períodos anteriores a coleta dos dados de CEa (0 a 5 dias, 5 a 10 dias e 10 a 15 dias) foi levantada com base nos dados provenientes da plataforma NASAPOWER. Precipitações diárias com menos que 2 mm foram desconsideradas.

Ocorrência de precipitação: foi averiguada a ocorrência de precipitação em três períodos anteriores à coleta de dados (0 a 5, 0 a 10 e 0 a 15 dias), as classes resultantes (Sim ou Não) foram utilizadas como variável qualitativa para a entrada em análises posteriores.

Temperatura: A temperatura média do ar no dia da coleta dos dados de CEa foi apurada também por meio da plataforma NASAPOWER.

Outras variáveis climáticas: aquelas necessárias para o cálculo do balanço hídrico sequencial (precipitação, temperaturas máxima, mínima e média, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar incidente). Todas foram apuradas em resolução diária e série histórica com 20 anos de dados.

3.1.2.3 Características do solo

As características físicas e químicas do solo foram obtidas da base de dados *SoilGrids* de propriedade do *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC) e com acesso público. As camadas de informação, com abrangência global são geradas a partir do processamento de dados de solo coletados ao redor do mundo. As camadas possuem resolução espacial de 250 m. Considerou-se o valor médio dos pixels dentro de cada área de estudo em função da baixa resolução. As variáveis de solo incorporadas ao banco de dados são as que seguem: teor de areia (%), teor de silte (%), teor de argila (%), teor de matéria orgânica do solo (%), capacidade de troca catiônica (mmolc dm^{-1}), Densidade do solo (g cm^{-3}) e pH da solução do solo.

As informações são disponibilizadas pela base na forma de camadas para 5 profundidades, 0 a 5 cm, 5 a 15 cm, 15 a 30 cm, 30 a 60 cm e 60 a 100 cm. A partir delas foram calculadas camadas mais adequadas àquelas referentes às medidas de CEa, obtendo uma camada de 0 a 30 cm, calculada pela média das camadas de 0 a 5, 5 a 15 e 15 a 30 cm e uma de 0 a 100 cm média de todas as 5 originais.

3.1.2.4 Localização: tipo de solo, bioma e vegetação

Foram coletadas as informações acerca da localidade de cada uma das áreas de estudo, o que engloba o Estado da federação, município e o bioma ao qual pertencem.

Apesar de considerado como um país essencialmente agrícola o Brasil possui apenas 20% dos solos do seu território mapeados na escala de 1:100.000 e 35% na escala de 1:250.000 (DEMATTE et al., 2001). O Mapa de Solos do Brasil é disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em formato digital e na escala 1:5.000.000. O 1º nível categórico da classificação de solos foi utilizado para separar os solos em tipos tipo do solo, e incorporado ao banco de dados como variável qualitativa.

Os biomas e tipos de vegetação que recobrem o território brasileiro foram também obtidos do IBGE em mapas digitais na escala de 1:1.000.000 e considerados como variáveis qualitativas.

3.1.3 Variáveis derivadas das originais

3.1.3.1 Informações variográficas

Na etapa de interpolação dos dados de CEa do solo, optou-se pelo uso da Krigagem, onde foi adotado o uso do semivariograma local para as interpolações, resultando que em cada um dos pontos da malha de interpolação se obtivesse, além do valor de CEa interpolado, aqueles referentes à, contribuição e ao alcance do semivariograma, que foram inclusos no banco de dados.

3.1.3.2 Velocidade e orientação durante a coleta

A velocidade de deslocamento no campo pelo equipamento no momento da coleta foi calculada com o uso das coordenadas presentes no arquivo proveniente do Veris. Uma vez realizada a transformação do sistema de

coordenadas geográficas para o sistema de coordenadas métricas, a distância entre dois pontos foi calculada e considerando a taxa fixa de coleta do instrumento (1 Hz) foi obtida a velocidade durante a coleta.

A orientação das passadas durante a operação de coleta de dados em campo foi averiguada visualmente para cada uma das áreas, como o uso de imagens de satélite de diversos anos.

3.1.3.3 Razão entre leituras de CEa do solo

Um plano de informação da razão entra a CEa do solo na profundidade de 0 a 0,3 m (CEa rasa, CE_{ar}) e 0 a 0,9 m (CEa profunda, CE_{ap}) foi calculado dividindo-se uma pela outra (CE_{ar}/ CE_{ap}).

3.1.3.4 Declividade

Mapas de declividade foram obtidos a partir dos mapas de altitude interpolados, segundo as metodologias propostas por Fleming e Hoffer (1979) e por Ritter (1987). O algoritmo utilizado, que segue a metodologia dos autores, foi implementado no *software* R permitindo o processamento em série.

3.1.3.5 Topographic Wetness Index (TWI)

Segundo Mattivi et al. (2019) o TWI é o índice topográfico de base hidrológica mais comumente utilizado para descrever a tendência ao acúmulo de água no terreno, definido pela Equação 12.

$$TWI = \ln(SCA/\tan \alpha) \quad (\text{Equação 12})$$

Em que:

SCA – representa a área de captação de água acima de um dado ponto no terreno;

α – declividade local.

O conceito básico em relação ao índice é um balanço de massa: O SCA representa a tendência em receber a água vinda acima, enquanto a declividade representa a tendência ao escoamento. O TWI pode representar uma informação importante uma vez que revela o comportamento do terreno quanto a regiões propícias ao acúmulo de água, que é uma variável que interage muito com a CEa do solo. O índice foi calculado com base no mapa altimétrico por meio do *software* R.

3.1.3.6 Tempo de cultivo

A data de abertura das áreas foi aferida visualmente com o uso de imagens de satélite, a qual foi subtraída do ano de coleta das imagens para chegar ao tempo de cultivo. Algumas áreas apresentaram áreas de aberturas

anteriores a 1984, ano de lançamento do Landsat 5, utilizado para a visualização. Nestes casos foi realizado contato com o fornecedor dos dados de CEa para obter a informação.

3.1.3.7 Índice de forma

Cardoso et al. (2006) apresenta o índice de forma como sendo a razão entre a largura média e o comprimento de uma dada área. O formato das áreas de estudo é um indicativo das condições locais de relevo.

3.1.3.8 Distância vertical à drenagem mais próxima (DVDP)

O algoritmo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), idealizado e desenvolvido por Rennó et al. (2008), utiliza imagens de radar SRTM para delinear cursos d'água e caracterizar o relevo local. Com isso é possível inferir a que profundidade, em metros, se encontra o lençol freático. Valores próximos de zero indicam proximidade do lençol em relação à superfície. Em função da baixa resolução, optou-se por considerar o valor médio dos pixels dentro de cada área.

3.1.3.9 Capacidade de água disponível (CAD)

O Ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de campo (CC) do solo foram calculados com base nos dados de variáveis do solo segundo a metodologia proposta por Manrique et al. (1991), em que são utilizadas equações de pedotransferência únicas para cada tipo de solo. Os dados de solo provenientes do ISRIC foram utilizados na elaboração dessa etapa. A capacidade de água disponível (mm) foi calculada com base no PMP e CC para duas profundidades (0 a 0,3 m e 0 a 1 m) segundo a equação 13.

$$CAD = \frac{CC}{PMP} * Z \quad (\text{Equação 13})$$

Em que:

CC - Capacidade de campo ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)

PMP - Ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)

Z - Profundidade do perfil considerado (mm)

3.1.3.10 Textura do solo

A textura do solo foi classificada segundo a metodologia proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Dos Santos et al. 2018). As informações granulométricas provenientes da base de dados do ISRIC foram utilizadas para a classificação como representado pela figura 9. As classes foram incorporadas ao banco de dados como variáveis qualitativas.

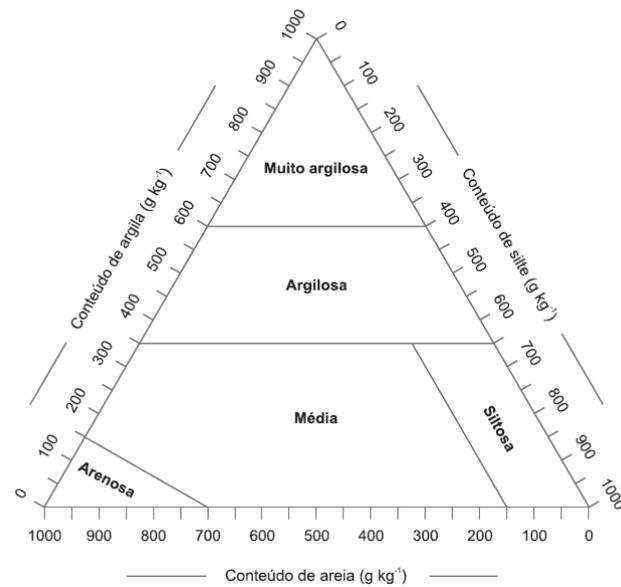


Figura 9. Triângulo das classes de textura do solo definidas com base na composição granulométrica e segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

3.2 Análise de dados

A organização das informações espaciais foi realizada por meio do software QGIS. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Pacote R.

As análises multivariadas necessitaram que as informações presentes no banco de dados estivessem sumarizadas. Algumas informações estavam disponíveis apenas como uma informação por área, ou seja em baixa resolução espacial. Para poder realizar a maior parte das análises adotou-se então o valor médio de todas as variáveis para cada gleba. Visando contemplar a variabilidade, quando disponíveis dados em maior resolução espacial foi também incorporado o coeficiente de variação (CV) como medida representativa de dispersão.

3.2.1 Análise exploratória de dados

A análise exploratória de dados consistiu na elaboração da estatística descritiva dos dados de CEa do solo, contemplando os aspectos relacionados aos valores absolutos bem como seu comportamento espacial. Histogramas foram produzidos para demonstrar a distribuição das variáveis qualitativas.

3.2.2 Identificação de padrões nos dados de CEa do solo

3.2.2.1 Análise multivariada para redução da dimensionalidade

A análise de componentes principais (ACP) foi empregada primeiramente para reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados. Para isso foram selecionadas 9 variáveis diretamente relacionadas com características descritoras e espaciais da CEa do solo, além de uma medida de dispersão de cada uma delas, totalizando 18 variáveis

conforme segue: CEa nas duas profundidades e seus respectivos CVs, Altitude e seu respectivo CV, declividade e seu respectivo CV, Índice TWI e seu respectivo CV, alcance dos semivariogramas locais e seu CV para as duas profundidades, contribuição dos semivariogramas locais e seu respectivo CV também para as duas profundidades.

Para a aplicação da ACP, o conjunto de dados de entrada foi padronizado. O teste de Kaiser Meyer Olkin (KMO), (Kaiser e Rice, 1974), foi utilizado para verificar a aptidão das variáveis quanto à aplicação dessa técnica. O teste de mensuração de adequação da amostra (MSA), também proposto por Kaiser e Rice (1974), foi utilizado para analisar a adequação de cada variável separadamente; foram mantidas apenas variáveis com um resultado maior ou igual a 0,5. Também foi utilizado o teste de teste da homoscedasticidade de Bartlett, no qual um p-valor próximo de 0 indica que os dados estão adequados.

O número necessário de componentes para representar pelo menos 70% da variabilidade do conjunto de dados foi selecionado. A investigação foi realizada por meio da interpretação dos autovalores, autovetores e tabela de cargas fatoriais, também representada ilustrativamente por meio dos gráficos que contrapõem as componentes principais.

3.2.2.2 Análise de agrupamentos

Os escores fatoriais representam as variáveis resultantes da ACP e foram utilizados como entrada em uma análise de agrupamentos. O método de agrupamento escolhido foi o hierárquico e a matriz de distâncias foi calculada com base na distância euclidiana entre os pares de pontos. O método de aglomeração escolhido foi o de Ward. A quantidade ótima de grupos foi definida de acordo com o resultado de um teste de Silhouette,(Rousseeuw, 1987).

As áreas foram separadas em grupos com características semelhantes dentro do grupo e grupos tão distintos entre si quanto possível.

3.2.3 Associação entre a CEa e demais variáveis

3.2.3.1 Análise multivariada para identificação de associações dentro dos grupos

Nessa etapa, os grupos de conjuntos de dados oriundos da análise de agrupamentos da etapa anterior foram submetidos a uma nova ACP, mas desta vez com a inclusão das demais variáveis quantitativas auxiliares do banco de dados, com o objetivo de mudar o foco para a relação da CEa com as demais informações. Os mesmos testes para a verificação da adequação do banco de dados foram empregados.

3.2.3.2 Análise de correspondência

Para a realização da análise de correspondência (ANACOR) foram mantidas as variáveis qualitativas e todas as variáveis quantitativas da forma categorizada. Para algumas variáveis, optou-se por escolher o intervalo das classes da categorização manualmente com base em interpretações identificadas na literatura. A maioria entretanto foi classificada segundo os percentis. Todas as observações das variáveis quantitativas categorizadas foram enquadradas

em classes: MB – Muito baixo, B – Baixo, M – Médio, A – Alto, MA – Muito alto. A tabela do Anexo 1 apresenta a escolha do número de classes para cada variável e os respectivos intervalos. A interpretação dos resultados foi realizada por meio da observação dos mapas perceptuais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise exploratória

Na Figura 10 é demonstrada a distribuição sobre o território brasileiro das 193 áreas a partir das quais foram obtidos os dados de CEa. Verificou-se a presença de informações nas principais regiões produtoras, com conjuntos representativos de sistemas de produção de grãos de Estados tradicionais, como o Rio Grande do Sul, Paraná e Mato Grosso, e também de regiões com exploração mais recente, como aquelas do Pará e Tocantins totalizando 10 Estados.

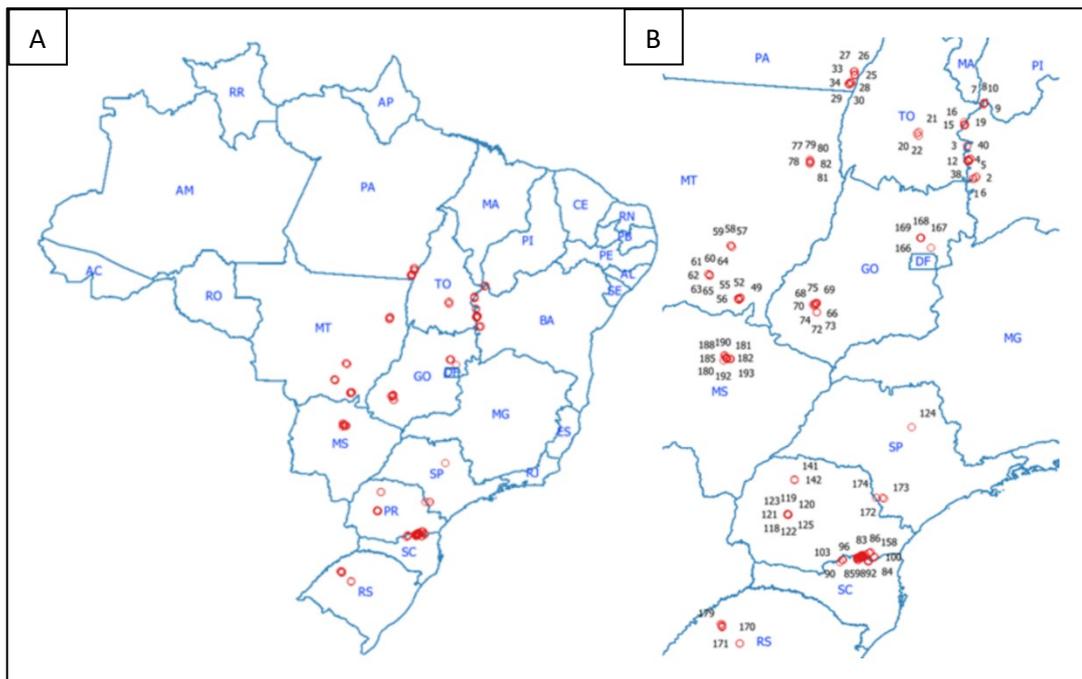


Figura 10. Na esquerda, em A, visão global do território brasileiro sobreposta por pontos representativos dos locais em que foram obtidos os conjuntos de dados. Na direita, em B, recorte dos pontos sobrepostos em maior resolução demonstrando a densidade de conjuntos de dados nas regiões.

Os conjuntos de dados estão dispersos no território, mas como foram obtidos de prestadores de serviços e entidades regionais foi frequente a ocorrência de dados coletados em glebas próximas umas às outras em uma mesma região e que por vezes aparecem sobrepostos na figura 10. Na tabela 2 são apresentados alguns resultados quantitativos que permitem caracterizar a abrangência e principais características dos bancos de dados. Ficou evidente a diversidade de condições em que os dados foram coletados, com valores médios das áreas das glebas bastante distintos. A classificação por Estado da federação permitiu verificar que na região sul o tamanho é menor que aqueles obtidos no restante do território e que nas áreas da Bahia, cujos dados foram obtidos na região de Luiz Eduardo Magalhães, estão as de maiores dimensões. O tamanho de glebas está muitas vezes associado às características do terreno, como pode ser verificado pela declividade média calculada. Os dados médios de altitude demonstraram ampla variação de ambientes com aquelas áreas muito próximas ao nível do mar e outras em planaltos.

Tabela 2. Número de conjuntos e características médias das áreas por Estado.

Estado	N ¹	n ²	DA ³ (pts ha ⁻¹)	Área média (ha)	TC ⁴ (anos)	Altitude (m)	Declividade (%)
BA	30	7104	57	136	19	841	0,57
GO	20	5786	104	75	30	906	1,87
MS	14	8086	60	144	37	688	1,27
MT	24	9434	92	105	24	578	1,61
PA	12	5341	51	109	19	190	0,54
PR	20	4307	122	39	33	723	2,97
RS	7	6156	153	43	35	285	3,19
SC	58	1148	195	8	31	832	2,93
SP	4	14700	184	86	34	641	3,63
TO	4	3861	51	84	16	427	0,72

1 – Número de áreas de estudo em cada Estado. 2 – Número médio de pontos na coleta de dados. 3 – Densidade amostral média da coleta de dados. 4 – Tempo de cultivo.

A diversidade em termos de tempo de cultivo foi também contemplada pelo banco de dados. Os valores médios demonstram haver áreas com longo histórico de cultivo mas também aquelas mais recentes. A área total mapeada de CEa foi de 13.649 ha.

Ao se analisar a dispersão das informações coletadas, utilizando como categorias os biomas presentes, é possível visualizar a dispersão e complexidade do banco de dados, Figura 11. Tomando algumas das características utilizadas para classificar esses ambientes foi possível verificar a consistência nas informações.

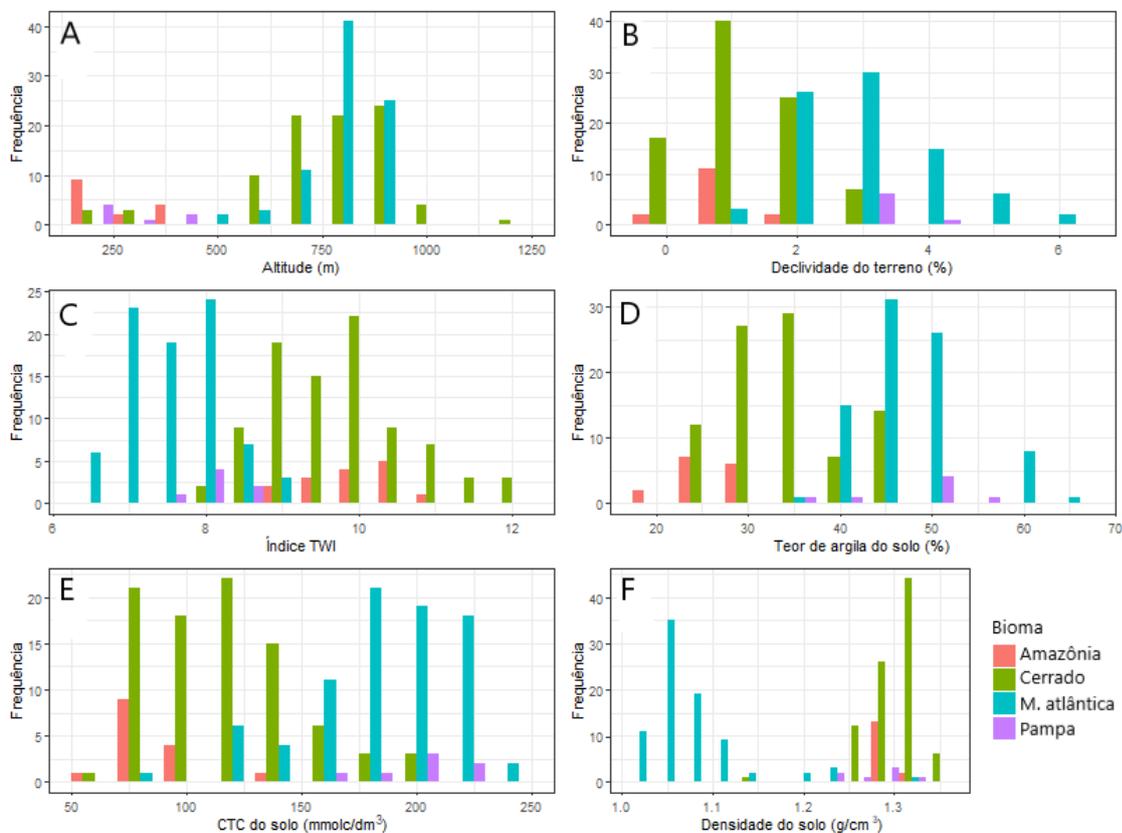


Figura 11. Dispersão de algumas variáveis nos biomas presentes. Em A – altitude média obtida a partir dos dados coletados em campo; B – Declividade do terreno calculada a partir da altitude; C – Índice TWI calculado a partir da altitude; D – Participação da fração argila no solo obtido na base de dados do ISRIC; E – Capacidade de troca do solo na base de dados do ISRIC; F – Densidade do solo na base de dados do ISRIC.

Indicadores quantitativos acerca dos dados coletados nas glebas em cada bioma são apresentados na tabela 3, ficando evidente a maior representatividade no banco de dados daqueles conjuntos oriundos dos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

Tabela 3. Número de conjuntos e características médias das áreas por bioma.

Bioma	N ¹	n ²	DA ³ (pts ha ⁻¹)	Área média (ha)	TC ⁴ (anos)	Elevação (m)	Declividade (%)
Amazônia	15	6842	60	114	25	259	0,83
Cerrado	89	7251	76	113	25	752	1,21
Mata Atlântica	82	2580	177	20	32	796	3,00
Pampa	7	6156	153	43	35	285	3,20

1 – Número de áreas de estudo em cada Estado; 2 – Número médio de pontos na coleta de dados; 3 – Densidade amostral média da coleta de dados; 4 – Tempo de cultivo.

Ainda que originadas de fontes distintas os comportamentos observados pela análise conjunta é aquele esperado para os ambientes. No bioma Amazônia estão áreas com menores altitudes, baixa declividade, solos com menor teor de argila, maior densidade e menor capacidade de troca catiônica. De modo distinto, no bioma Mata Atlântica estão presentes maiores declividades, solos com composição granulométrica mais fina, com maiores capacidades de troca e menores densidades, o que se espera de locais em que o acúmulo de material orgânico é favorecido. Quando, entretanto se observa o bioma Cerrado fica clara sua diversidade com oscilação pronunciada de composição granulométrica e capacidade de troca. É um ambiente em que há conjuntos obtidos de áreas com declividades baixas, porém com exemplos oriundos de regiões com altitude próxima aos 250 m e outras em que ela passou de 1000 m.

Algumas características do processo de coleta de dados são apresentadas nos histogramas da Figura 12. Foi possível averiguar que há épocas preferenciais de coleta, em que estão mais presentes conjuntos de dados oriundos dos meses que sucedem a safra principal, ou seja, março e abril e naqueles imediatamente anteriores ao período de semeadura, um segundo pico que ocorreu nos meses de setembro e novembro. Há diferenças regionais e estas devem estar relacionadas aos tipos de cultivos e regimes hídricos locais, que condicionam a umidade do solo, e tem influência sobre o desempenho no mapeamento.

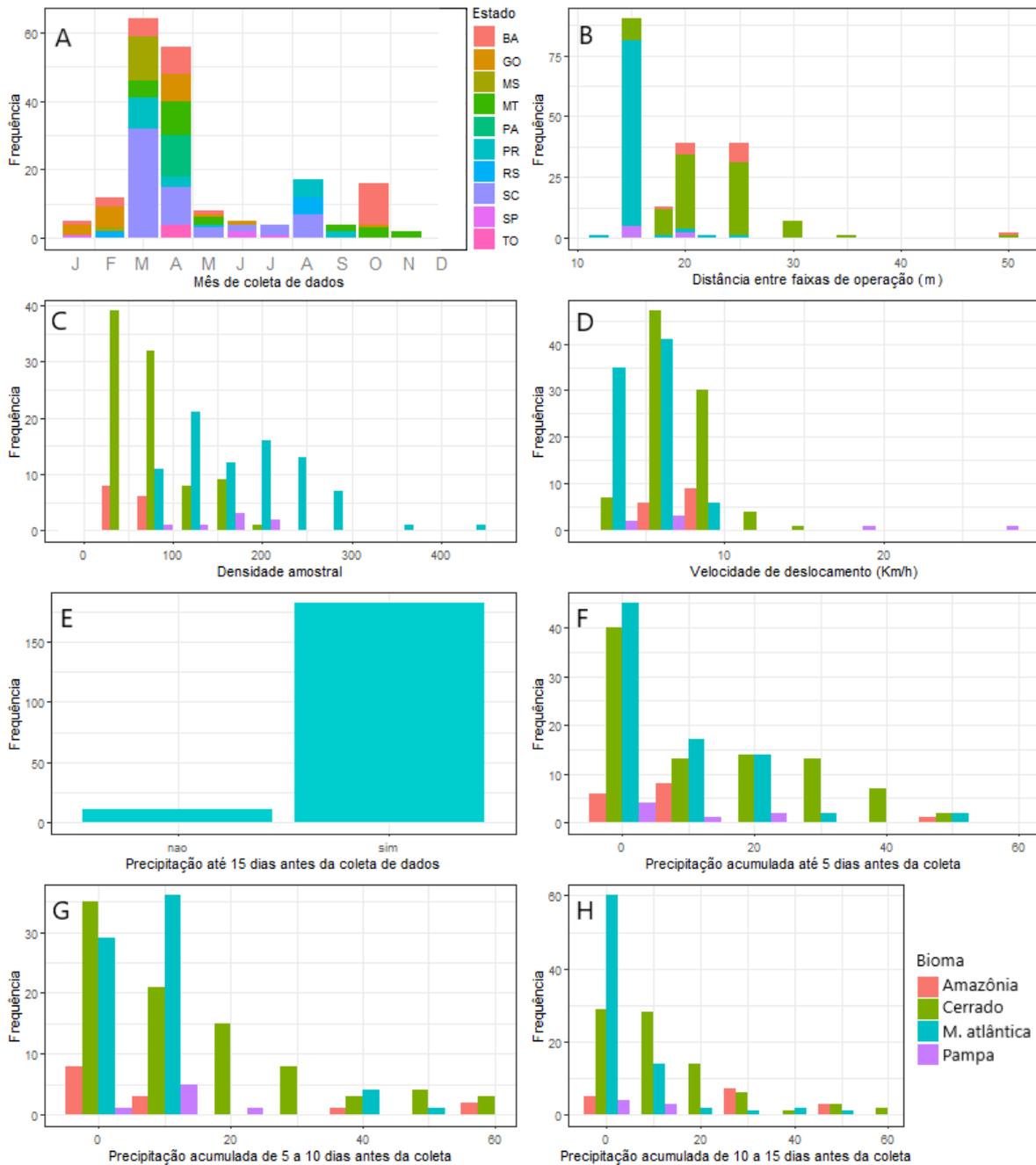


Figura 12. Dispersão de algumas variáveis nos biomas. Em A – distribuição temporal das coletas por Estado em escala mensal ; B – Distância entre passadas durante a coleta dos dados de CEa em campo por bioma; C – Densidade amostral dos dados de CEa coletados em campo por bioma; D – Velocidade de deslocamento durante a coleta de dados de CEa por bioma; E – Frequência de ocorrência de precipitação em até 15 dias antes da data de coleta dos dados de CEa; F – Precipitação acumulada em até 5 dias antes da data de coleta dos dados de CEa por Bioma; G – Precipitação acumulada entre 5 e 10 dias antes da data de coleta dos dados de CEa por Bioma; H – Precipitação acumulada entre 5 e 10 dias antes da data de coleta dos dados de CEa por Bioma.

Em uma parte das áreas, a distância entre passadas ultrapassou a recomendação do fabricante de 20 m, tendo oscilado de próximo a 15 até 50 m. A densidade amostral, que está associada à distância entre passadas e velocidade de deslocamento, mostrou-se menor nos ambientes do Cerrado a Amazônia, ao passo que a velocidade variou dentro do limite estipulado pelo fabricante. Quanto à ocorrência de precipitação, em 94,3 % das áreas choveu em até 15 dias antes a coleta de dados, com média de precipitação acumulada de 38 mm. Em 119 áreas (66%) houve precipitação em até 5 dias antes da coleta de dados o que sugere que os responsáveis pela coleta levem a condição de umidade em consideração na decisão quanto à realização da coleta.

A tabela 3 apresenta a estatística descritiva para os dados de CEa de todos os conjuntos de dados, nas duas profundidades de prospecção. As médias foram calculadas para cada uma das etapas de processamento, partindo daqueles originais até os obtidos na geração das superfícies mediante interpolação.

Tabela 4. Momentos estatísticos para os dados de CEa (mS m^{-1}) do solo em etapas do processamento de dados e nas duas camadas de coleta.

	Camada	Den. Am. ¹ (Am ha ⁻¹)	Média	Mediana	IIQ ²	Mínimo (mS m^{-1})	Máximo	Amplitude	CV (%)	p-valor ³
Dados originais	CEaR (0 a 0,3 m)	120,3	5,8	5,5	2,4	-12,4	40,0	52,37	53,9	<0,001
	CEaP (0 a 0,9 m)	120,3	7,3	6,7	3,2	-1,4	75,1	76,47	27,4	<0,001
Dados inválidos removidos	CEaR (0 a 0,3 m)	120	5,8	5,5	2,4	1,0	40,0	38,9	42,7	<0,001
	CEaP (0 a 0,9 m)	113,15	7,8	7,1	2,9	1,6	75,1	73,5	49,5	<0,001
Filtragem discrepantes	CEaR (0 a 0,3 m)	110,8	5,6	5,4	2,1	2,4	9,6	7,1	28,2	<0,001
	CEaP (0 a 0,9 m)	105,7	7,3	6,9	2,7	3,0	13,9	10,9	29,3	<0,001
Filtragem Local	CEaR (0 a 0,3 m)	60,0	5,8	5,7	1,4	3,8	9,4	5,6	17,8	<0,001
	CEaP (0 a 0,9 m)	58,7	7,5	7,3	1,7	5,0	12,7	7,7	18,0	<0,001
Dados interpolados	CEaR (0 a 0,3 m)	25,0	5,7	5,6	0,9	4,4	7,9	3,4	12,7	<0,001
	CEaP (0 a 0,9 m)	25,0	7,5	7,4	1,3	5,8	10,6	4,8	12,3	<0,001

1- Densidade amostral média de todos os conjuntos de dados, em pontos por hectare, em cada etapa do processamento de dados; 2 – Intervalo interquartilico; 3 – p-valor do teste de normalidade Kolmogorov Smirnov: Valores muito baixos indicam a presença de não normalidade dos dados

A maior concentração de dados inválidos, com valores negativos, ocorreu na camada de 0 a 0,9 m. Em média, 48 % dos dados originais foram removidos ao final da etapa de filtragem na camada superficial, contra 55 % da camada profunda. Este fato pode estar relacionado à configuração do equipamento que apresenta os eletrodos responsáveis pela leitura profunda mais externos, favorecendo a perda de contato com o solo de modo mais frequente. Ao analisar todos os dados em conjunto não se obteve uma distribuição normal, mesmo com a eliminação de valores discrepantes. As sucessivas etapas de remoção e erros e valores considerados discrepantes reduziram a dispersão do banco de dados o que pode ser verificado pela queda dos valores do CV. Os valores originais oscilaram desde leituras negativas, características de erros de coleta até o valor de 40 mS m^{-1} e $75,1 \text{ mS m}^{-1}$ para a camada superficial e profunda respectivamente, enquanto a média esteve sempre bastante abaixo desses montantes. Na última etapa de filtragem ainda restaram cerca de 60 pontos por hectare para realizar a interpolação.

A Figura 13 apresenta o histograma de frequências para os dados de CEa do solo oriundos da filtragem e interpolação, nas duas profundidades. O comportamento é semelhante, havendo entretanto um afilamento da distribuição em ambas as camadas e o surgimento de uma alteração na forma da curva de dispersão no caso de CEaR.

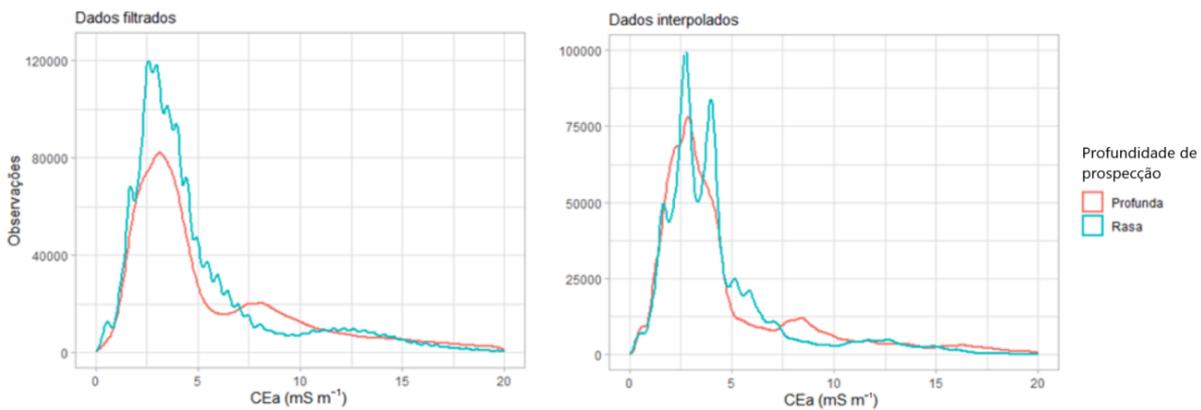


Figura 13. Curvas representativas das frequências de ocorrência de valores de CEa em camadas. Em A – dados amostrados e filtrados; B – dados obtidos após a interpolação.

A média dos valores de CEa do solo foi maior em solos de textura argilosa em relação a solos de textura média. Neossolos e argissolos apresentaram os menores valores, a população amostral dos nitossolos e plintossolos foi pequena. Os biomas Cerrado e Amazônico são detentores dos menores valores médios de CEa do solo, ao passo que na Mata-atlântica e no Pampa se aproximam de 10 mS m^{-1} . A orientação da realização da operação parece não ter efeito sobre os valores médios de CEa.

A Figura 14 apresenta os valores médios de CEa do solo sumarizados segundo algumas características de solo e ambiente pertinentes.

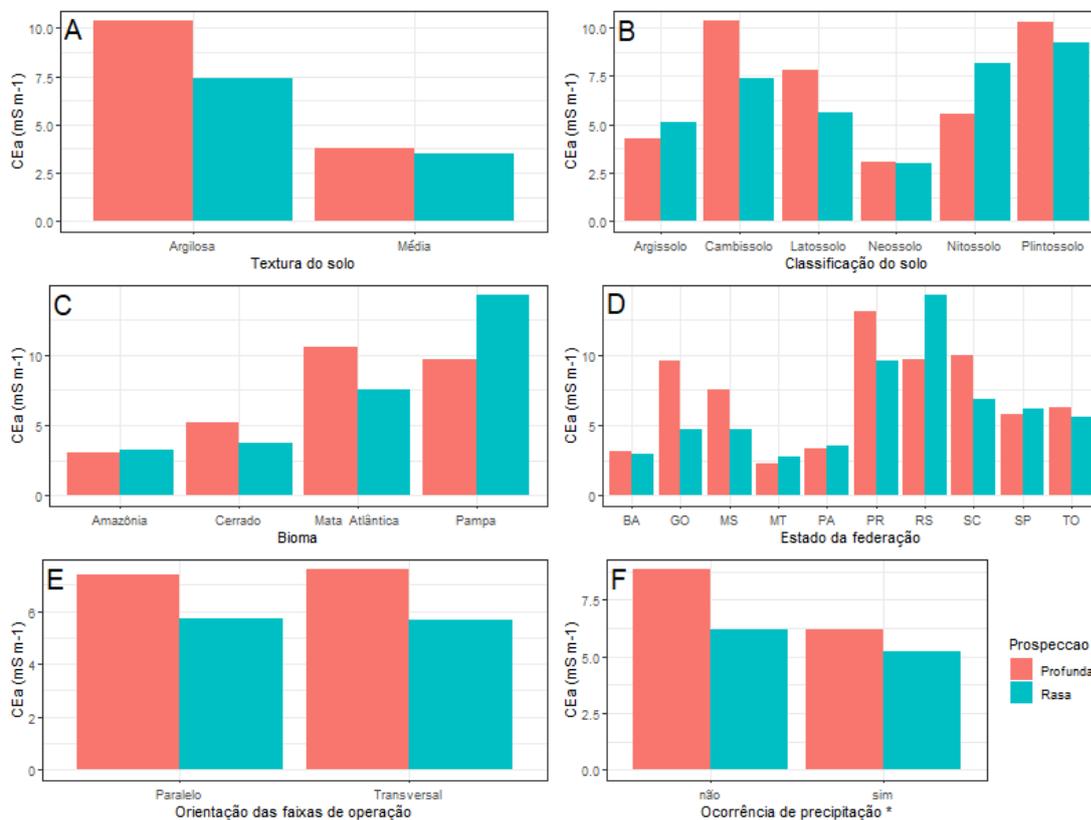


Figura 14. Valores médios de CEa em função de características do ambiente para as duas camadas. Em A – Valores médios para as classes de textura; B – Valores médios para os tipos de solos presentes; C – Valores médios para os biomas; D – Valores médios para os Estados; E – Valores médios para sentidos de deslocamento; F – Valores médios para a ocorrência ou ausência de precipitação nos 15 dias que antecederam a coleta.

Ao analisar os momentos estatísticos para os dados dos semivariogramas obtidos no processo de interpolação, tabela 5, notou-se elevada dispersão nos alcances, com valores baixos para a curtose, sendo esta inclusive negativa no caso da CEaP, indicando ser esta mais variável. Os valores do alcance oscilaram desde abaixo de 5 m até acima de 500 m, tornando clara a grande amplitude de estrutura espacial presente no banco de dados que neste caso possuía mais de 341.200 semivariogramas. A assimetria positiva indica haver valores elevados de alcance que acabam por deslocar a média para valores superiores à mediana.

Tabela 5. Momentos estatísticos do alcance dos semivariogramas experimentais obtidos para todo o conjunto de dados e nas duas profundidades.

Camada	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	IIQ ¹	DP	CV	Assimetria	Curtose
	(metros)						(%)		
CEaR (0 a 0,3 m)	165,50	158,58	4,92	587,97	183,04	122,63	74,10	0,71	0,12
CEaP (0 a 0,9 m)	184,76	171,42	3,65	562,25	197,55	141,89	76,80	0,70	-0,44

1-Intervalo interquartilico.

4.2 Identificação de padrões nos dados de CEa do solo

4.2.1 Análise multivariada para redução da dimensionalidade

O teste de esfericidade de Bartlett apresentou p-valor menor que 0,001 indicando que os dados se mostraram adequados para a ACP. Da mesma maneira o teste KMO resultou em um índice global de 0,63 o que é considerado moderado (Kaiser e Rice, 1974). Os resultados do teste MSA são apresentados na Tabela 6. Como os coeficientes foram superiores a 0,5 nenhuma variável foi retirada do conjunto de dados de entrada para a ACP.

Tabela 6. Resultados do teste de mensuração de adequação da amostra para as variáveis utilizadas na análise de componentes principais.

Variável	Coefficiente do teste MSA
Condutividade elétrica aparente da camada rasa, CEaR	0,613
Condutividade elétrica aparente da camada profunda, CEaP	0,609
Coefficiente de variação da CEaR, CCER	0,591
Coefficiente de variação da CEaP, CCEP	0,563
Altitude, ALT	0,571
Coefficiente de variação da altitude, CALT	0,617
Declividade, DEC	0,629
Coefficiente de variação da declividade, CDEC	0,717
Topographic wetness index, TWI	0,704
Coefficiente de variação do TWI, CTWI	0,787
Alcance do semivariograma experimental camada rasa, ALR	0,617
Alcance do semivariograma experimental camada profunda, ALP	0,623
Coefficiente de variação do ALR, CALR	0,605
Coefficiente de variação do ALP, CALP	0,642
Contribuição do semivariograma experimental camada rasa, CONR	0,550
Contribuição do semivariograma experimental camada profunda, CONP	0,627
Coefficiente de variação do CONR, CCONR	0,626
Coefficiente de variação do CONP, CCONP	0,710

O resultado da ACP pode ser visualizado na Tabela 7 demonstrando a necessidade de considerar até 5 componentes para explicar 70% da variabilidade presente no banco de dados originais que possuía 18 variáveis. A primeira componente apresentou-se correlacionada positivamente com os valores e CEa, com a declividade do terreno e com a variabilidade do TWI. Houve correlação negativa com a variabilidade do TWI. De forma complementar, a segunda componente teve peso maior das variáveis relacionadas à dispersão dos valores de CEa e sua estrutura espacial como alcance e contribuição dos semivariogramas.

Tabela 7. Resultados da análise de multivariada de componentes principais para os dados derivados do mapeamento de condutividade elétrica do solo. Estão relacionados os componentes principais com seus autovalores e relevância na explicação da variabilidade presente no banco de dados. As correlações entre as variáveis e os componentes principais são listadas.

	Componentes Principais				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Autovalores	4,12	3,36	2,19	1,76	1,21
Variância explicada	0,23	0,19	0,12	0,10	0,07
Variância acumulada	0,23	0,42	0,54	0,63	0,70
Variáveis	Correlação				
CEaR*	0,59	0,06	0,55	0,18	0,19
CEaP	0,69	0,06	0,30	0,17	0,36
CCER	-0,37	0,80	0,15	-0,06	-0,07
CCEP	-0,29	0,77	0,21	0,22	0,02
ALT	0,41	-0,05	-0,50	-0,06	0,46
CALT	-0,17	0,34	0,79	0,08	-0,20
DEC	0,66	0,22	0,48	-0,19	0,05
CDEC	0,60	-0,01	-0,43	0,14	-0,21
TWI	-0,88	-0,19	-0,18	0,13	0,03
CTWI	0,80	0,02	-0,06	-0,08	-0,02
ALR	-0,14	0,48	-0,16	-0,58	0,10
ALP	-0,12	0,55	-0,31	0,53	0,13
CALR	-0,16	-0,46	0,13	0,58	-0,24
CALP	-0,16	-0,61	0,36	-0,05	-0,25
CONR	0,07	0,64	-0,17	-0,38	-0,37
CONP	0,16	0,61	-0,20	0,55	-0,10
CCONR	-0,50	0,05	0,15	0,20	0,58
CCONP	-0,54	-0,07	0,23	-0,34	0,33

*CEaR - Condutividade elétrica aparente da camada rasa; CEaP - Condutividade elétrica aparente da camada profunda; CCER - Coeficiente de variação da CEaR; CCEP - Coeficiente de variação da CEaP; ALT - Altitude; CALT - Coeficiente de variação da altitude; DEC - Declividade; CDEC - Coeficiente de variação da declividade; TWI - Topographic wetness index; CTWI - Coeficiente de variação do TWI; ALR - Alcance do semivariograma experimental camada rasa; ALP - Alcance do semivariograma experimental camada profunda; CALR - Coeficiente de variação do ALR; CALP - Coeficiente de variação do ALP; CONR - Contribuição do semivariograma experimental camada rasa; CONP - Contribuição do semivariograma experimental camada profunda; CCONR - Coeficiente de variação do CONR; CCONP - Coeficiente de variação do CONP.

Um dos objetivos no uso da ACP é verificar a multicolinearidade das variáveis assim como a complementariedade. A figura 15 apresenta os gráficos em que são dispostos os componentes. As informações contidas na Tabela 7 podem ser visualizadas graficamente na Figura 15. A imagem evidencia a multicolinearidade entre as mesmas variáveis para duas profundidades. Em geral, variáveis iguais, mas que representam profundidades de prospecção diferentes, se comportam de maneira semelhante no gráfico, apontando correlação com a mesma PC no mesmo sentido.

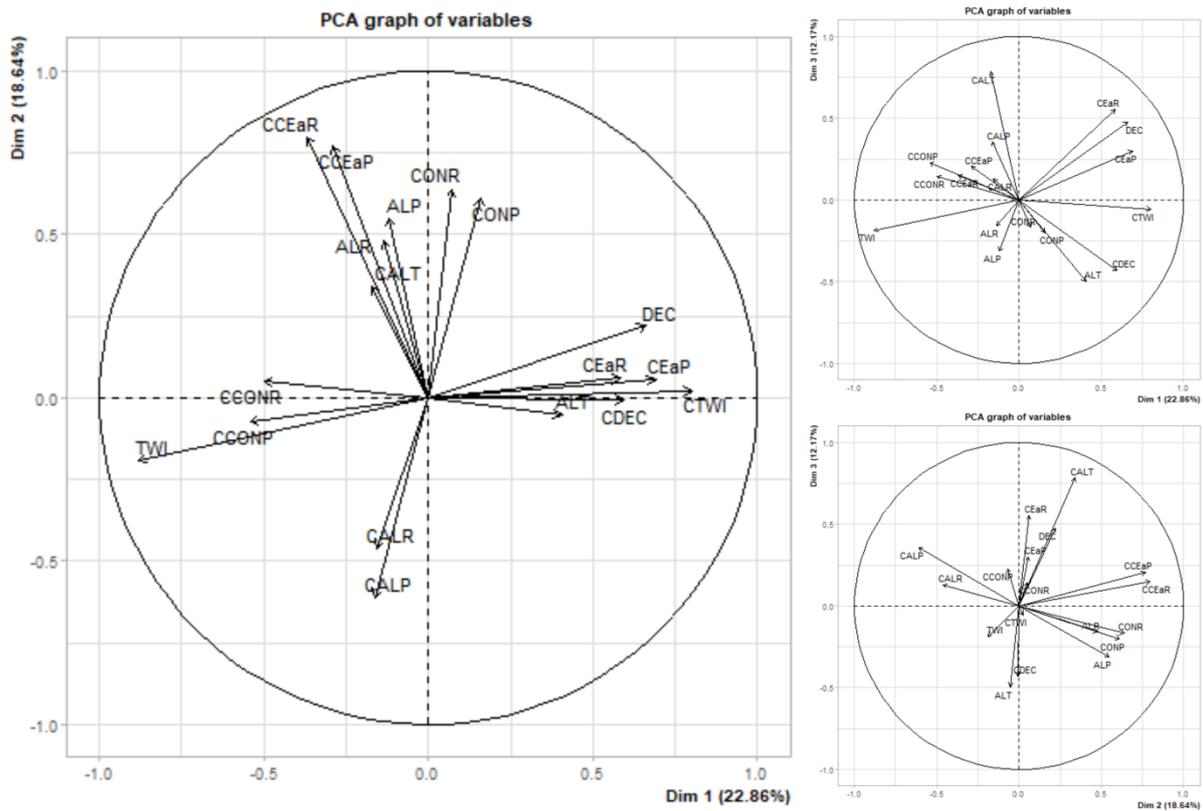


Figura 15. Biplots dos componentes principais para os dados derivados do mapeamento de condutividade elétrica do solo com os respectivos scores das variáveis. Em A – PC1 x PC2; Em B – PC1 x PC3; Em C – PC2 x PC3. CEaR - Condutividade elétrica aparente da camada rasa; CEaP - Condutividade elétrica aparente da camada profunda; CCER - Coeficiente de variação da CEaR; CCEP - Coeficiente de variação da CEaP; ALT - Altitude; CALT - Coeficiente de variação da altitude; DEC - Declividade; CDEC - Coeficiente de variação da declividade; TWI - Topographic wetness index; CTWI - Coeficiente de variação do TWI; ALR - Alcance do semivariograma experimental camada rasa; ALP - Alcance do semivariograma experimental camada profunda; CALR - Coeficiente de variação do ALR; CALP - Coeficiente de variação do ALP; CONR - Contribuição do semivariograma experimental camada rasa; CONP - Contribuição do semivariograma experimental camada profunda; CCONR - Coeficiente de variação do CONR; CCONP - Coeficiente de variação do CONP.

4.2.2 Análise de agrupamentos

A análise de agrupamentos utilizou as novas variáveis resultantes da ACP como conjunto de dados de entrada. A escolha do número de grupos a serem criados seguiu o resultado do teste de Silhouette para verificação do número adequado de grupos para particionamento dos dados. A interpretação, apresentado por meio da figura 16 foi de que o número adequado para os dados seria de 2 ou 10 grupos.

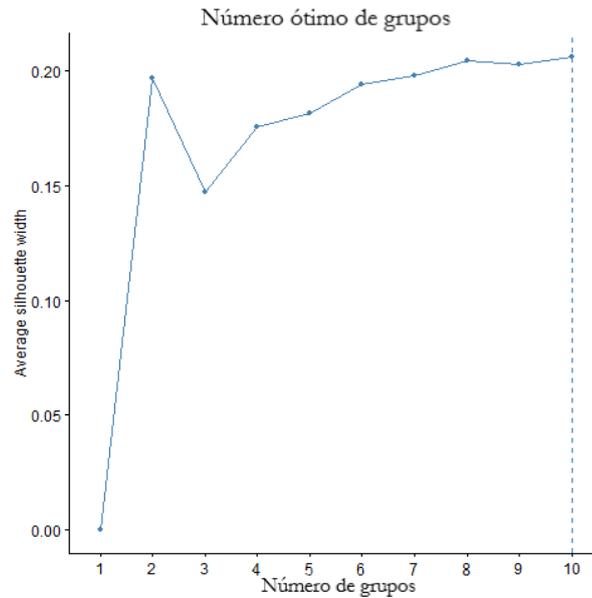


Figura 16. Valores do coeficiente do teste Silhouette para número crescente de grupos.

O agrupamento realizado pelo método hierárquico foi realizado para criar os grupos. O dendograma (Figura 17) representa graficamente o processo de agrupamento. Inicialmente, cada objeto é o único representante de seu próprio grupo, de onde o algoritmo parte iterativamente. A cada etapa, os dois grupos mais similares são unidos em um processo que continua até que haja um único grupo. A cada interação, as distâncias entre os grupos são recalculadas de acordo com o método escolhido. Na união de um par de grupos, o valor apontado no eixo das ordenadas representa a similaridade entre os ambos.

Dentro de cada um dos três grandes grupos encolhidos, é possível observar a distinção de dois subgrupos que se destacam, dentro dos quais as áreas de unem muito rapidamente, com um baixo valor na leitura do eixo das ordenadas. Isso indica que há um ou mais fatores de variabilidade em macro escala, distinguindo os grupos de áreas abruptamente. A divisão das áreas de estudo em um número maior que três grupos não foi adotada pois os ganhos seriam pequenos, tomando por base a interpretação conjunta dos resultados do método hierárquico com o teste Silhouette, adotou-se três divisões como uma escolha parcimoniosa.

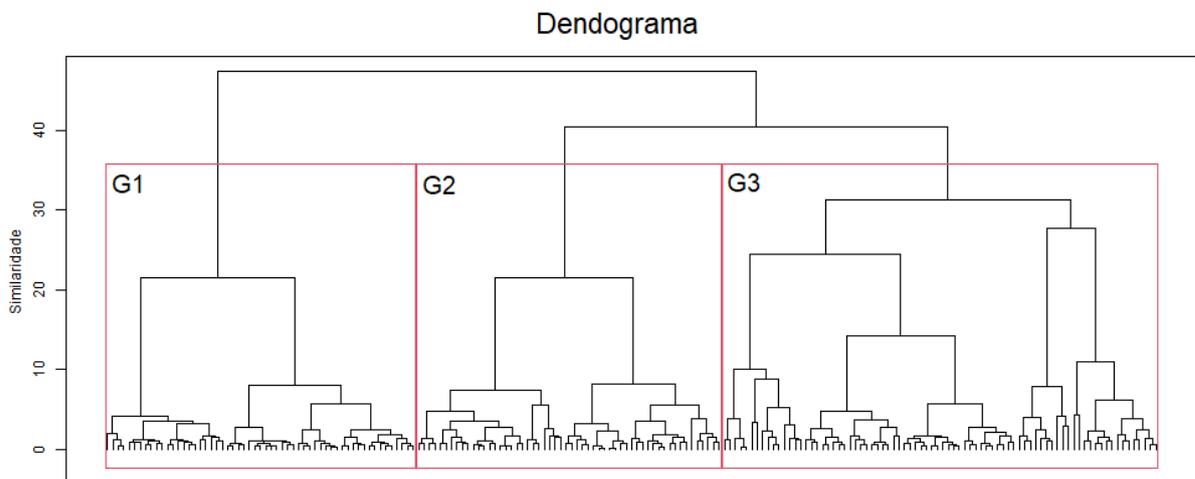


Figura 17. Resultado do agrupamento hierárquico não supervisionado. Os quadros em vermelho delimitam os grupos.

Os momentos estatísticos dos dados de CEa dentro de cada grupo demonstrou haver diferenças entre os valores médios. Para o grupo 1 foram observados menores valores em ambas camadas e menor variabilidade no caso da CEaR. A maior variabilidade em ambas as camadas ocorreu no grupo 2, que apresentou valores médios intermediário e assimetria positiva mais destacada. O grupo 3 apresentou com característica os maiores valores da CEa em ambas as camadas.

Tabela 8. Estatística descritiva dos valores de CEa do solo por grupos.

Profundidade	Grupo	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	IIQ ¹	DP	CV (%)	Assimetria	Curtose
CEaR (0 a 0,3 m)	1	3,51	3,22	0,85	6,98	1,72	1,45	41,29	0,46	-0,43
	2	5,78	5,04	0,81	16,00	3,65	3,64	62,95	1,05	0,27
	3	7,17	6,63	0,58	17,39	5,60	3,96	55,27	0,60	-0,49
CEaP (0 a 0,9 m)	1	4,15	3,35	1,11	10,51	2,26	2,44	58,85	1,10	0,04
	2	8,78	8,00	1,27	29,90	8,61	6,17	70,27	1,04	0,97
	3	8,92	9,05	0,53	19,81	5,60	4,54	50,90	0,31	-0,55

1 – Intervalo interquartilico.

A Figura 18 representa a disposição das áreas de estudo sobre o território de acordo com o grupo a que pertencem. É possível notar uma concentração das áreas pertencentes ao grupo 1 nas regiões nordeste e centro oeste, e do grupo 3 na região sul. O Grupo 2 apresentou distribuição distinta, com membros do grupo ocorrendo tanto na região central como nos estados do Paraná e Santa Catarina.

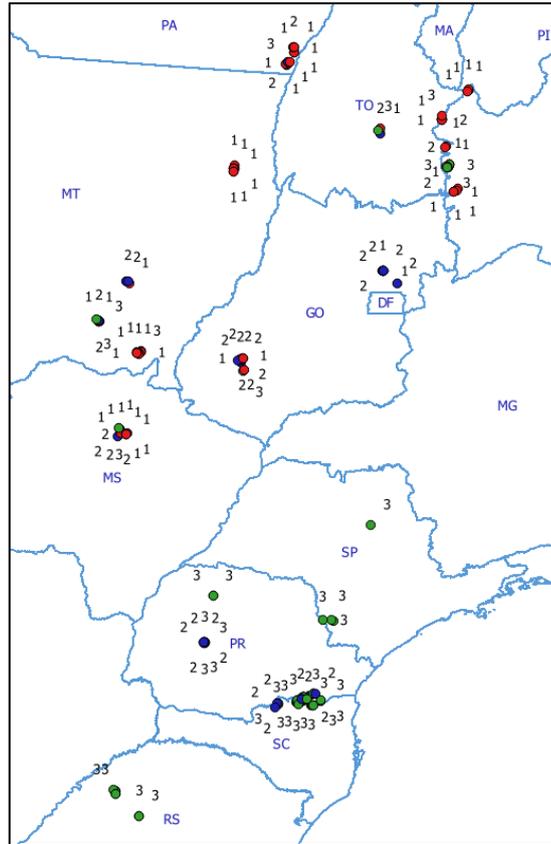


Figura 18. Mapa do território sobreposto por pontos representativos dos conjuntos de dados de glebas. As cores e números identificam os agrupamentos obtidos.

4.3 Associação entre CEa do solo e variáveis quantitativas dentro dos grupos

A ACP foi novamente realizada dentro de cada grupo de áreas. As demais variáveis do banco de dados, que representam as características do solo, ambiente e coleta de dados, foram incluídas, tabela 9.

Tabela 9. Resultados da análise de multivariada de componentes principais para cada grupo. As variáveis utilizadas para explicar a variabilidade são aquelas relacionadas ao ambiente em que a coleta foi realizada. Estão relacionados os componentes principais com seus autovalores e sua relevância na explicação da variabilidade presente no banco de dados. As correlações entre as variáveis do ambiente e os componentes principais são listadas.

	Componentes Principais Grupo 1			Componentes Principais Grupo 2			Componentes Principais Grupo 3		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Autovalores	6,41	5,33	3,86	12,42	3,66	2,51	12,52	3,03	1,69
Variância explicada	0,24	0,20	0,14	0,46	0,14	0,09	0,46	0,11	0,06
Variância acumulada	0,24	0,44	0,58	0,46	0,60	0,69	0,46	0,58	0,64
Variáveis*	Correlação								
AREA	0,05	-0,06	0,33	-0,68	-0,09	0,43	-0,76	-0,05	0,11
ARR	0,30	-0,81	-0,41	-0,86	-0,48	0,08	-0,87	-0,44	-0,02
ARP	0,31	-0,81	-0,40	-0,85	-0,49	0,08	-0,87	-0,44	-0,03
SR	-0,63	0,37	0,62	0,65	0,33	-0,60	0,78	0,18	0,25
SP	-0,62	0,36	0,63	0,70	0,24	-0,59	0,82	0,10	0,21
AGR	0,31	0,86	-0,13	0,78	0,46	0,31	0,80	0,51	-0,09
AGP	0,25	0,88	-0,12	0,74	0,55	0,28	0,77	0,56	-0,06
COR	-0,81	-0,12	-0,12	0,93	-0,28	0,01	0,92	-0,27	-0,11
COP	-0,74	0,05	-0,24	0,92	-0,28	0,05	0,93	-0,25	-0,07
CTCR	0,41	0,35	0,12	0,73	-0,46	0,26	0,80	-0,19	0,15
CTCP	0,46	0,34	0,15	0,69	-0,47	0,27	0,76	-0,18	0,20
DSR	0,68	-0,30	0,29	-0,93	0,19	-0,14	-0,89	0,24	0,15
DSP	0,27	-0,61	0,64	-0,93	0,15	-0,20	-0,86	0,24	0,20
pHR	0,62	0,27	0,67	-0,49	0,70	-0,06	-0,69	0,50	0,21
pHP	0,61	0,23	0,68	-0,54	0,67	-0,09	-0,71	0,48	0,18
DVDP	0,35	0,36	-0,56	-0,07	0,16	0,54	0,08	0,56	-0,48
PR05	0,47	-0,33	0,06	0,07	-0,31	-0,06	-0,13	-0,36	0,32
PR5-10	0,27	-0,41	-0,21	0,32	-0,10	0,20	0,07	0,04	-0,35
PR10-15	-0,08	0,07	-0,04	-0,41	-0,01	-0,05	-0,18	-0,18	0,26
TEMP	-0,40	0,07	-0,21	-0,66	0,40	-0,02	-0,45	0,19	-0,43
CADR	-0,91	-0,08	0,04	0,64	-0,29	-0,39	0,66	-0,31	0,23
CADP	-0,91	-0,03	0,01	0,63	-0,23	-0,38	0,60	-0,27	0,22
DA	0,18	0,15	-0,28	0,70	0,06	-0,20	0,55	-0,07	-0,36
TC	0,17	0,39	-0,47	0,23	0,11	0,63	0,44	-0,05	0,16
DF	-0,32	-0,17	0,45	-0,78	-0,29	-0,09	-0,77	-0,01	0,27

*AREA- Área; ARR - Teor de areia 0 a 0,3 m; ARP - Teor de areia 0 a 1 m; SR - Teor de silte 0 a 0,3 m; SP- Teor de silte 0 a 1 m; AGR - Teor de argila 0 a 0,3 m; AGP - Teor de argila 0 a 1 m; COR – Teor de carbono orgânico 0 a 0,3 m; COP - Teor de carbono orgânico 0 a 1 m; CTCR - Capacidade de troca catiônica 0 a 0,3 m; CTCP - Capacidade de troca catiônica 0 a 1 m; DSR - Densidade do solo 0 a 0,3 m; DSP – Densidade do solo 0 a 1 m; pHR - pH do solo 0 a 0,3 m; pHP – pH do solo 0 a 1 m; PR05 - Precipitação acumulada 5 dias antes da coleta de dados; PR5-10 - Precipitação acumulada 5 a 10 dias antes da coleta de dados; PR10-15 - Precipitação acumulada 10 a 15 dias antes da coleta de dados; TEMP – Temperatura média do ar no dia de coleta; CADR – Capacidade de água disponível 0 a 0,3 m; CADP - Capacidade de água disponível 0 a 1 m; DA- Densidade amostral; TC - Tempo de cultivo; DF - Distância entre faixas durante a coleta.

Os resultados de autovalores para os componentes demonstram que o grupo 1 apresentou maior diversidade de causas de variação. De modo distinto, nos grupos 2 e 3 a maior parte da variância foi explicada no primeiro e segundo componentes. A observação das correlações de variáveis com componentes corrobora que o primeiro grupo possui características contrastantes. Sua primeira componente esteve associada a características relacionadas à estrutura do solo como carbono orgânico, densidade e a capacidade de armazenamento de água. Para os demais grupos assumiram maior relevância aquelas características relacionadas à composição granulométrica do

solo. Algumas variáveis se mantiveram relevantes para explicar a variabilidade nos três grupos. Dentre elas destacaram-se a capacidade de armazenamento o carbono orgânico e as frações granulométricas. As características associadas às variáveis climáticas não contribuíram para explicar a variação presente nos grupos.

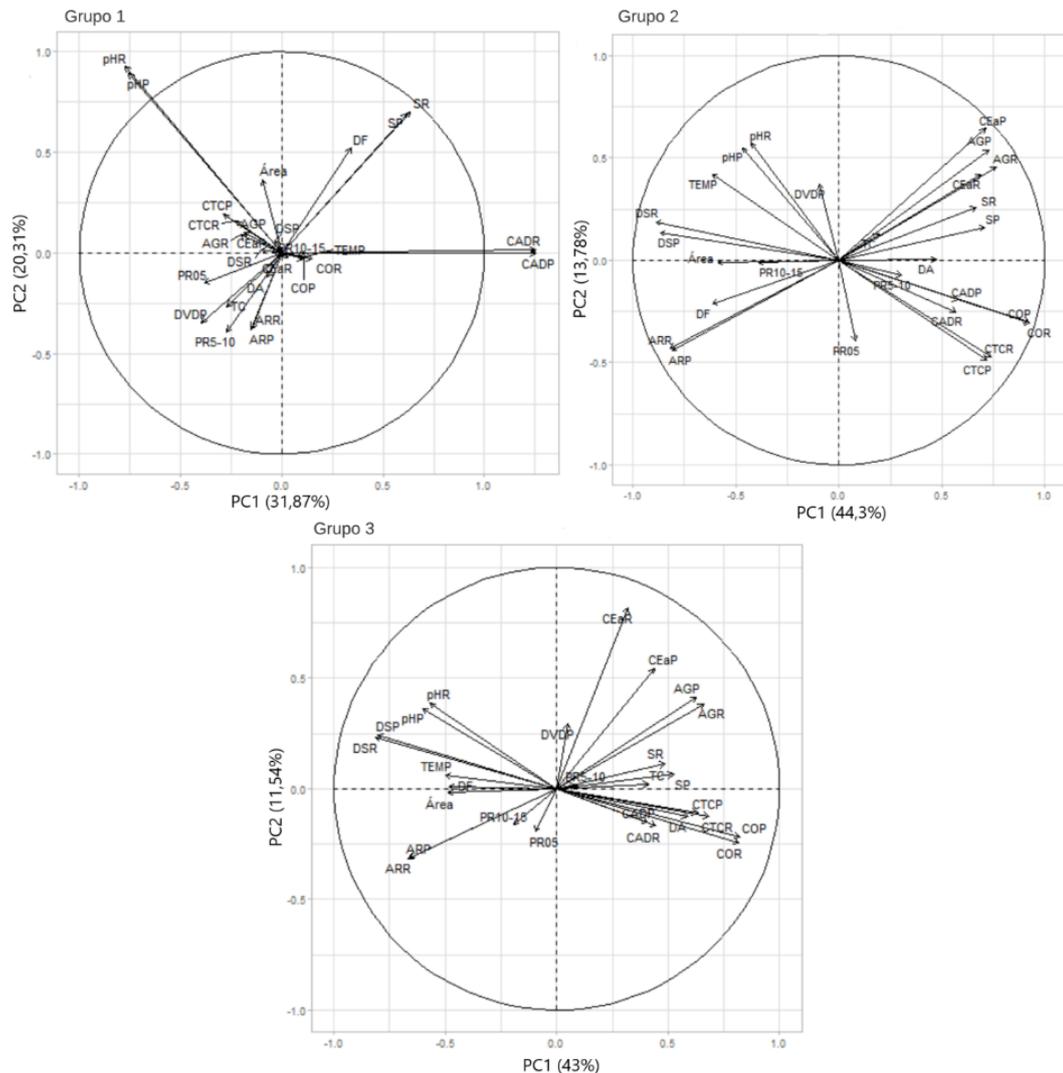


Figura 19. Biplots dos componentes principais para os grupos. As variáveis utilizadas para explicar a variabilidade são aquelas relacionadas ao ambiente. São plotados os scores das variáveis para os dois componentes principais em cada grupo. Em A – PC1 x PC2 do grupo 1; Em B – PC1 x PC2 do grupo 2; Em C – PC1 x PC2 do grupo 3. AREA - Área das áreas de estudo; ARR – Teor de areia na camada de 0 a 0,3 m; ARP – Teor de areia na camada de 0 a 1 m; SR – Teor de silte na camada de 0 a 0,3 m; AGP – Teor de argila na camada de 0 a 0,3 m; AGR – Teor de argila na camada de 0 a 1 m; COR – Teor de carbono orgânico na camada de 0 a 0,3 m; COP – Teor de carbono orgânico na camada de 0 a 1 m; CTCP – Capacidade de troca catiônica na camada de 0 a 0,3 m; CTCR – Capacidade de troca catiônica na camada de 0 a 1 m; DSR – Densidade do solo na camada de 0 a 0,3 m; DSP – Densidade do solo na camada 0 a 1 m; pHR – pH do solo na camada de 0 a 0,3 m; pHP – pH do solo na camada de 0 a 1 m; DVDP – Distância vertical ao lençol freático; PR05 – Precipitação acumulada até 5 dias antes da coleta de dados; PR5-10 – Precipitação acumulada entre 5 a 10 dias antes da coleta de dados; TEMP – Temperatura; CADR – Capacidade de água disponível na camada de 0 a 0,3 m; CACP – Capacidade de água disponível na camada de 0 a 1 m; DA – Densidade amostral; TC – Tempo de cultivo; DF – Distância entre faixas de operação.

O resultado da análise pode ser visualizado graficamente na Figura 19 em que estão dispostos os biplots para cada grupo. Grande parte da variação explicada no primeiro grupo esteve associada a um número reduzido de variáveis e a variabilidade total explicada por estas é inferior àquela explicada para os demais grupos. Nota-se pelo comprimento das setas a importância de diversas variáveis nos grupos 2 e 3 sendo que a primeira componente, plotada no eixo x, foi bastante mais relevante que a segunda e que muitas das variáveis apresentam colinearidade.

Em síntese, os resultados da ACP demonstraram haver consistência no agrupamento realizado, porém a dispersão é elevada, com dois grupos apresentando comportamento mais próximo, cuja variabilidade pode ser explicada com menos variáveis. O grupo distinto é aquele em que o maior número de representantes é do ambiente Cerrado, caracterizado por ampla diversidade de condições dentro desse ambiente, o que ajuda a compreender a dificuldade no entendimento da variabilidade.

4.4 Associação entre variáveis categóricas e qualitativas com a CEa do solo

A relação de associação entre as variáveis de interesse e as demais variáveis do banco de dados é apresentada por meio dos mapas perceptuais resultantes da ANACOR e apresentados a seguir. A interpretação dos gráficos é realizada segundo a distância entre os pontos, onde pontos próximos indicam associação. A.

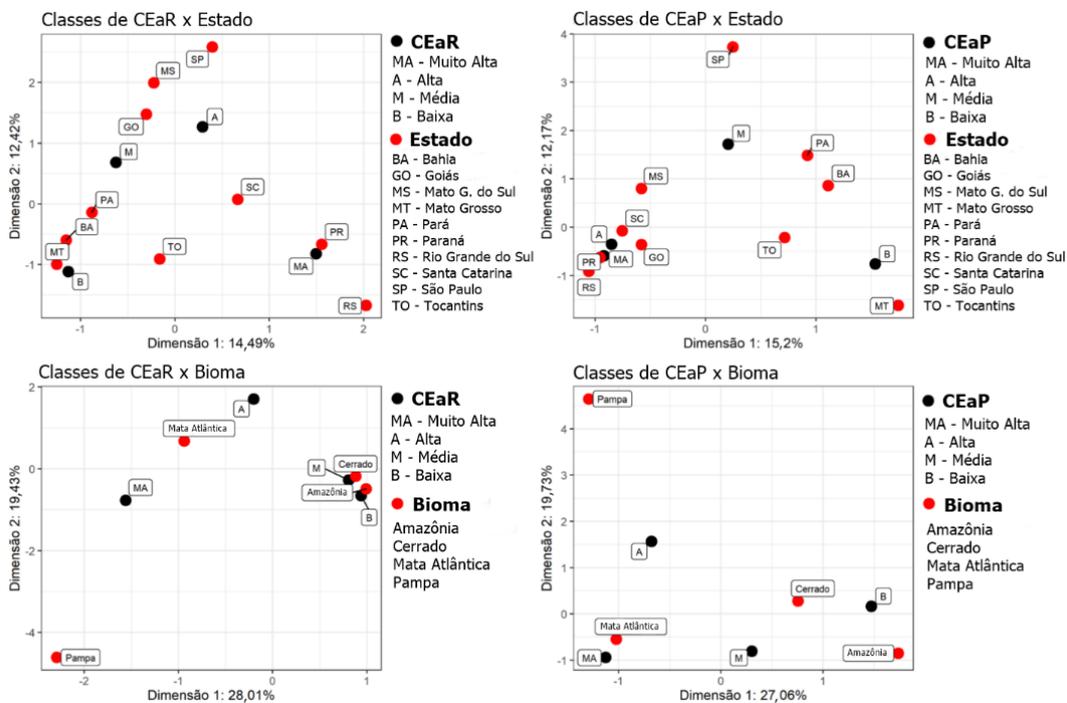


Figura 20. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e os Estados e Biomas.

Conforme apresentado na figura 20 nota-se que as classes com valores médios e baixos de CEa, independente da profundidade, estão associadas a Estados em que está presente o bioma cerrado. Para o bioma mata atlântica ocorre o oposto, com predominância de classes alta e muito alta de CEa. O ambiente Pampa apresentou características distintas dos demais, não sendo possível associar classes de CEa ao mesmo.

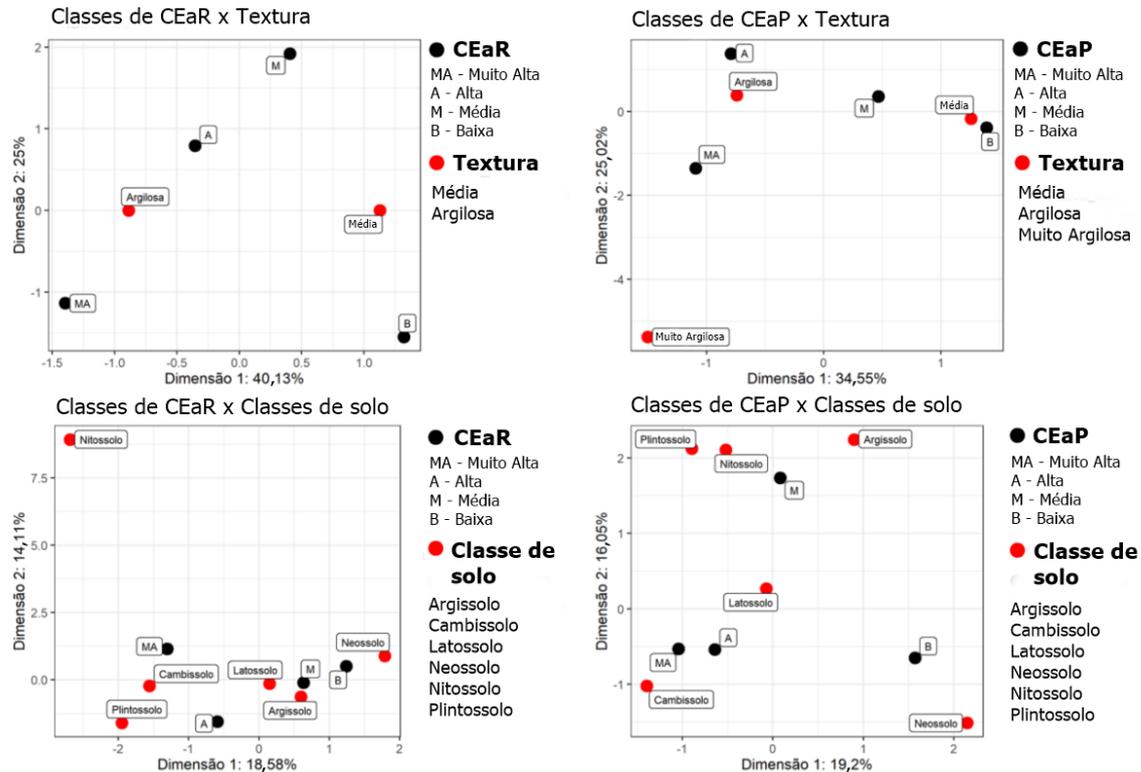


Figura 21. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e classificação textural e o tipo de solo.

Na literatura encontra-se associação direta da CEa à composição granulométrica do solo, como em Machado et al. (2006), no qual foram obtidas correlações altas entre as leituras e o teor de argila em um Latossolo Vermelho. Isto também foi verificado neste trabalho, porém a análise é mais interessante quando se considera também o tipo de solo. Conforme apresentado na figura 21 a relação entre classes de CEa e tipo de solo apresenta comportamento distinto entre as profundidades, o que deve estar relacionado com a estratificação distinta e caracterizadora dos solos. O uso de leituras mais profundas auxilia na distinção dos tipos de solo ao passo que nas leituras rasas, apesar de ficarem evidentes as associações entre Neossolos e classes de menor CEa e de Cambissolos aos maiores valores de CEa para outros como os Argissolos e Latossolos a associação com classes de CEa não é clara.

A declividade dos solos é derivada da oscilação do relevo e portanto diretamente relacionada ao processo de formação do solo. Notou-se que os valores mais altos de declividade estiveram relacionados a classes com maiores valores de CEa e o oposto sendo também válido. Dados os tipos de solos e biomas presentes infere-se que as áreas de maior declividade estão relacionadas aos solos menos intemperizados das regiões sul e sudeste. A associação entre classes de areia e CEa foi como, na maior parte dos trabalhos da literatura inversa, ou seja areia a areia atua como isolante, reduzindo a condutividade elétrica, figura 22.

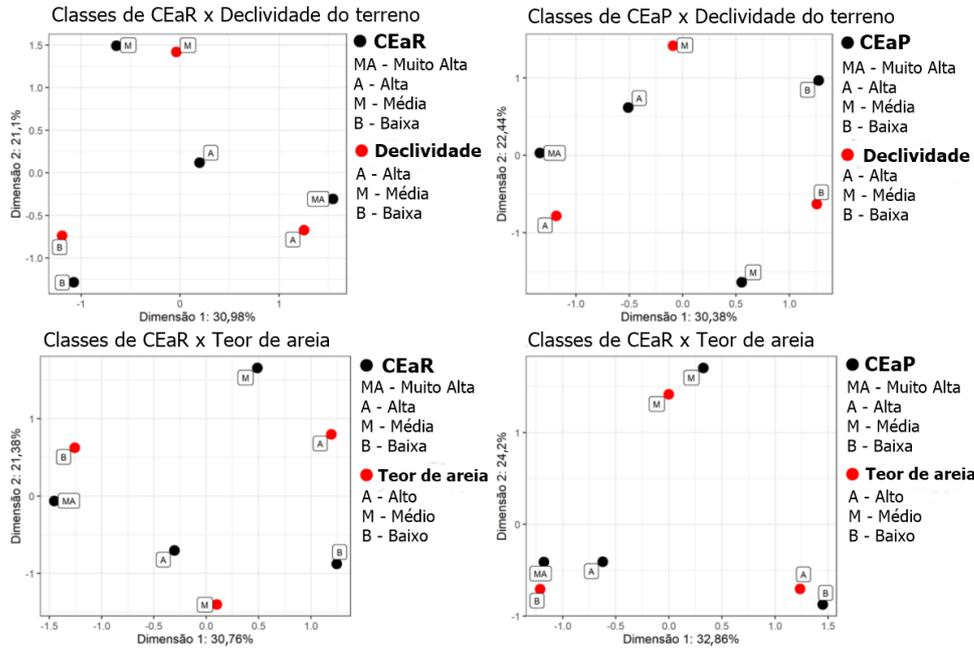


Figura 22. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e Declividade e teor de areia

No caso da argila notou-se uma associação direta e estreita entre suas classes e as de CEa, em ambas as profundidades. Não se verificou uma associação entre a densidade do solo e a CEa como aquela identificada por Schmack et al. (2022), em que os autores verificaram altas correlações (> 0,7) entre a densidade do subsolo (abaixo de 0,3 m) e a CEa do solo, porém no seu estudo a diversidade de solos era bastante inferior à deste, demonstrando que a associação está relacionada à escala espacial e características mais específicas.

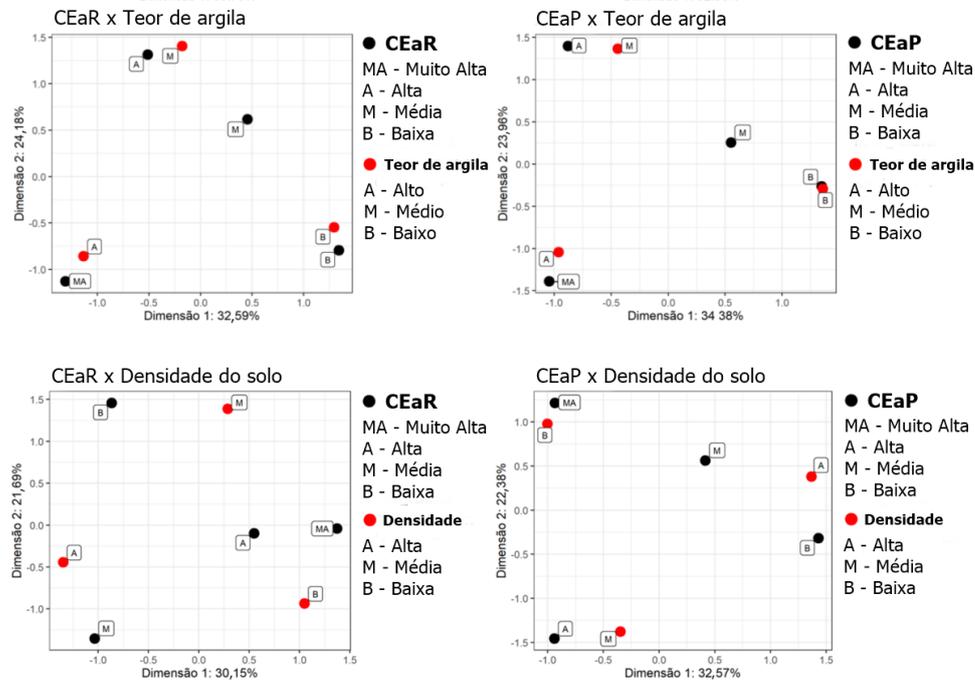


Figura 23. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e teor de argila e densidade do solo.

Ao analisar a associação entre classes de pH e CEa nota-se algo curioso, na camada rasa a relação tende a ser baixa e difusa ao passo que na camada inferior ela é bastante acentuada, com valores elevados de CEa associados aos baixos de pH. Observando de modo complementar o comportamento da associação da CTC a interpretação é mais efetiva. Maiores valores de CTC estão usualmente associados a valores mais altos de CEa, o que se refletiu nos mapas perceptuais. Nos solos em que a CTCE é maior a correção química em subsuperfície tende a ser limitada, dada a maior atividade e com isso reação do calcário de modo mais proeminente nas camadas mais rasas.

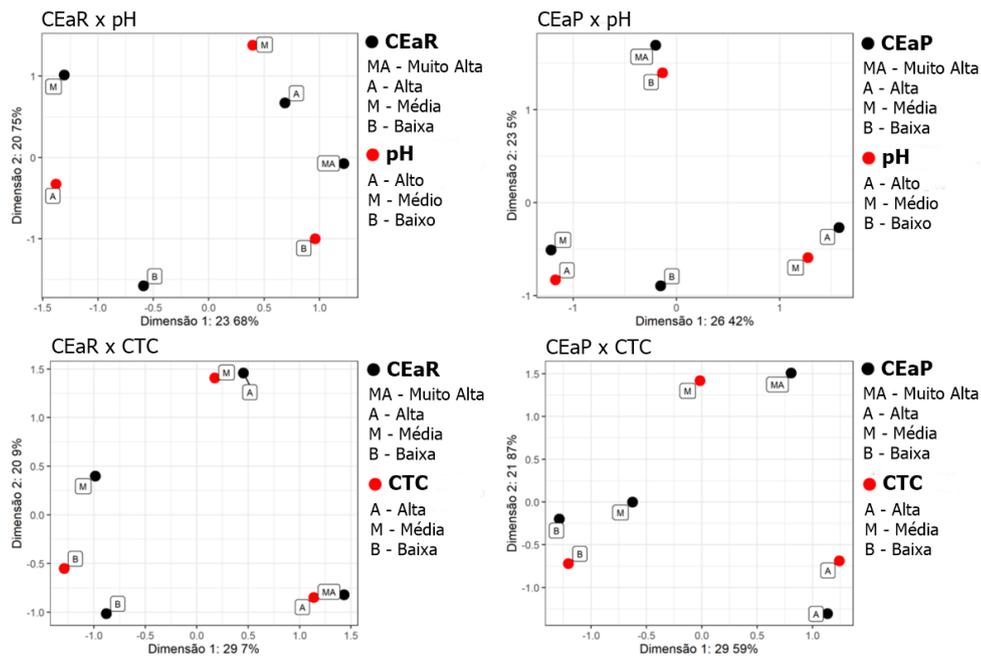


Figura 24. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e pH e CTC.

De Lara et al. (2018) caracterizaram espacialmente o conteúdo de água no solo para fins de irrigação e precisão com o uso da CEa do solo. Os resultados apresentados na figura 25 demonstram que esta relação não ocorre de modo amplo no caso da relação entre CEa e CAD, mas que pode ser inferido a partir da associação com o carbono que está usualmente associado à maior disponibilidade hídrica.

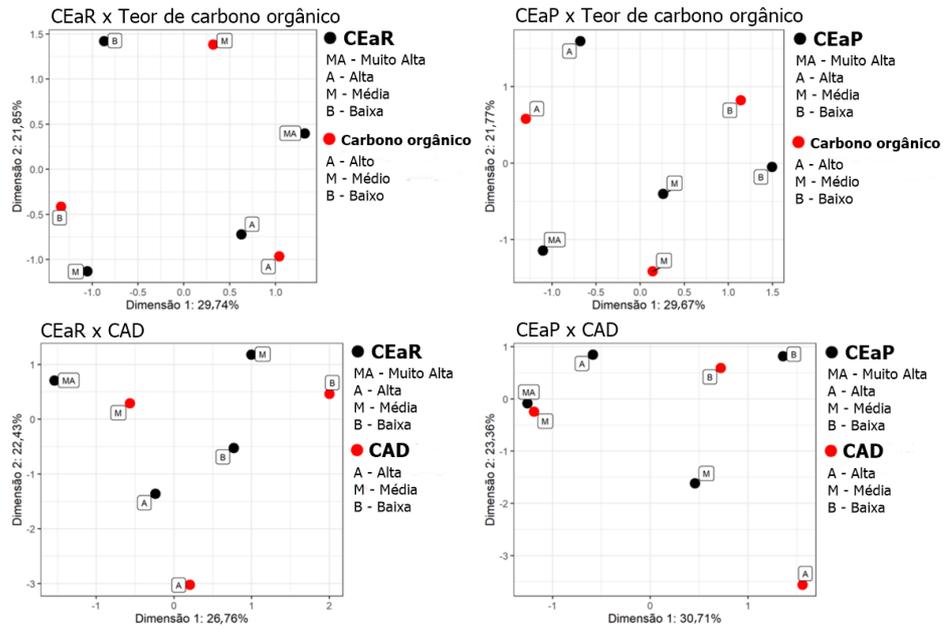


Figura 25. Mapas perceptuais obtidos na análise de correspondência entre os valores de condutividade elétrica e carbono orgânico e CAD.

5. CONCLUSÃO

Os dados de CEa são coletados com estratégias distintas em termos de densidade, época do ano e características das áreas a serem mapeadas. Maiores densidades amostrais estiveram associadas a áreas menores e com maior declividade ao passo que nas áreas mais extensas a densidade é menor.

Independente da estratégia de amostragem há coleta de dados errôneos e discrepantes que devem ser eliminados antes do uso da informação para a produção de superfícies espaciais. As densidades amostrais praticadas pelos prestadores de serviço são suficientes para caracterizar a dependência espacial da CEa e poderiam ser utilizadas densidades inferiores, aumentando a capacidade operacional sem perda da qualidade das superfícies.

Diversos fatores relacionados à composição física e química do solo, sua condição de umidade e estrutura, estão associados de forma multicolinear, não havendo um grupo definido que permita inferir sobre o comportamento da CEa de modo claro, evidenciando a impossibilidade de desenvolver modelos de predição globais.

Podem ser gerados grupos com comportamento distinto a partir de um banco de dados amplo e para os quais a interpretação dos fatores associados com a CEa é mais clara. Estes grupos são relacionados com as regiões nas quais os dados foram coletados.

Os fatores relacionados com a retenção de água no solo são sempre importantes predominando como aqueles com maior potencial de associação.

Características qualitativas do ambiente como o tipo de solo, correção da acidez e tipo de relevo podem ser relacionadas à variação quantitativa da CEa em escala global, mas a interpretação precisa ser realizada considerando mais de uma variável e está relacionada à camada do solo prospectada.

Em trabalhos futuros sugere-se a aplicação de outras técnicas de análise de dados para a avaliação da relação da CEa com as diversas variáveis do ambiente. Técnicas capazes de identificar padrões provavelmente podem contribuir ao melhor entendimento do fenômeno em estudo.

REFERÊNCIAS

- AL-GAADI, Khalid A. et al. Employing electromagnetic induction technique for the assessment of soil compaction. **Am. J. Agric. Biol. Sci**, v. 7, n. 4, p. 425-434, 2012.
- ALLRED, Barry; DANIELS, Jeffrey J.; EHSANI, Mohammad Reza. **Handbook of agricultural geophysics**. CRC Press, 2008.
- ANDERSON-COOK, Christine M. et al. Differentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield maps. 2002.
- BANTON, O.; CIMON, M.-A.; SEGUIN, M.-K. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 4, p. 1010-1017, 1997.
- BORGHI, Emerson et al. Adoption and Use of Precision Agriculture in Brazil: Perception of Growers and Service Dealership. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 11, 2016.
- BOROUCHE, J. M. SAPORTA. G. **Análise de dados**. Zahar Editores. Rio de Janeiro, 1982.
- BOTTEGA, Eduardo Leonel et al. Characterization of the soil compaction based on the mapping of the apparent electrical conductivity. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 29, p. 405-419, 2021.
- BURROUGH, P. A.; WEBSTER, R. Improving a reconnaissance soil classification by multivariate methods. **Journal of Soil Science**, v. 27, n. 4, p. 554-571, 1976.
- BRIGGS, Lyman James et al. Electrical instruments for determining the moisture, temperature, and soluble salt content of soils. 1899.
- CARDOSO, Christiany Araujo et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.
- CARROLL, Z. L.; OLIVER, Margaret A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. **Geoderma**, v. 128, n. 3-4, p. 354-374, 2005.
- CHERUBIN, Maurício Roberto et al. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 196-210, 2011.
- CIRANI, Claudia Brito Silva; MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de. Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 543-565, 2010.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture. **Agronomy journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.
- CORWIN, D. L. et al. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003.
- CORWIN, Dennis L.; LESCH, Scott M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.
- DE JONG, E. et al. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, n. 4, p. 810-812, 1979.
- DE LARA, Alfonso; KHOSLA, Raj; LONGCHAMPS, Louis. Characterizing spatial variability in soil water content for precision irrigation management. **Agronomy**, v. 8, n. 5, p. 59, 2018.
- DOOLITTLE, J. A. et al. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 49, n. 6, p. 572-575, 1994.

- DOS SANTOS, Humberto Gonçalves et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.
- FÁVERO, Luiz Paulo Lopes; BELFIORE, Patrícia Prado. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com excel, SPSS e stata**, Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- FITTERMAN, David V.; STEWART, Mark T. Transient electromagnetic sounding for groundwater. **Geophysics**, v. 51, n. 4, p. 995-1005, 1986.
- FLEMING, Michael D.; HOFFER, Roger M. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. In: **LARS Symposia**. 1979. p. 302.
- FREELAND, R. S. Review of soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 6, p. 2190-2194, 1989.
- FRIEDMAN, Shmulik P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.
- GORUCU, Serap et al. Variable depth tillage based on geo-referenced soil compaction data in coastal plain region of South Carolina. In: **2001 ASAE Annual Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998. p. 1.
- GROTE, K.; HUBBARD, S.; RUBIN, Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. **Water resources research**, v. 39, n. 11, 2003.
- GUPTA, Sonia; KUMAR, Mohit; PRIYADARSHINI, Rashmi. Electrical Conductivity Sensing for Precision Agriculture: A Review. In: **Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms**. Springer, Singapore, 2019. p. 647-659.
- HAIR, Joseph F. et al. **Análise multivariada de dados**. Bookman Editora, 2009.
- HONGYU, Kuang; SANDANIELO, Vera Lúcia Martins; DE OLIVEIRA JUNIOR, Gilmar Jorge. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016.
- JOHNSON, Cinthia K. et al. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 6, p. 1829-1837, 2001.
- KACHANOSKI, R. G.; WESENBEECK, IJ Van; GREGORICH, E. G. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 68, n. 4, p. 715-722, 1988.
- KAISER, Henry F.; RICE, John. Little jiffy, mark IV. **Educational and psychological measurement**, v. 34, n. 1, p. 111-117, 1974.
- KEAN, William F.; WALLER, Muriel Jennings; LAYSON, H. Richard. Monitoring moisture migration in the vadose zone with resistivity. **Groundwater**, v. 25, n. 5, p. 562-571, 1987.
- KRAVCHENKO, A. N. et al. Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical data and soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 1, p. 235-243, 2002.
- LUND, E. D. et al. Practical applications of soil electrical conductivity mapping. **Precision agriculture**, v. 99, p. 771-779, 1999.
- MACHADO, Pedro Luiz Oliveira de Almeida et al. Electrical conductivity mapping in relation to clay of a Ferralsol under no tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1023-1031, 2006.

- MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. Predicting soil water retention characteristics from soil physical and chemical properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 22, n. 17-18, p. 1847-1860, 1991.
- MATTIVI, Pietro et al. TWI computation: a comparison of different open source GISs. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 4, n. 1, p. 1-12, 2019.
- MENEGATTI, Leonardo Afonso Angeli et al. Metodologia para identificação, caracterização e remoção de erros em mapas de produtividade. **Piracicaba, SP**, 2002.
- OFFICER, Sally J. et al. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values. **Plant and Soil**, v. 258, n. 1, p. 269-280, 2004.
- RITTER, Paul. A vector-based slope and aspect generation algorithm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 8, p. 1109-1111, 1987.
- RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 255-260, 1981.
- RHOADES, J. D.; INGVALSON, R. D. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 35, n. 1, p. 54-60, 1971.
- RHOADES, J. D. et al. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 2, p. 433-439, 1989.
- RUNYAN, W. R. Semiconductor measurements and instrumentation. 1975.
- SAY, Sait M.; KESKIN, Muharrem; SEHRI, Mustafa; SEKERLI, Yunus Emre. Adoption of precision agriculture technologies in developed countries. **The Online Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 7-15, 2018.
- SCHMÄCK, Jessica et al. Large-scale detection and quantification of harmful soil compaction in a post-mining landscape using multi-configuration electromagnetic induction. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 1, p. 212-228, 2022.
- SMITH-ROSE, R. L. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 140, n. 841, p. 359-377, 1933.
- SOARES FILHO, Romeu; CUNHA, João Paulo Arantes Rodrigues. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção o sudoeste de Goiás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, 2016.
- SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Electromagnetic induction sensing of claypan depth. Pap. 931550. **Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI**, 1993.
- SUDDUTH, K. A.; HUMMEL, J. W.; BIRRELL, S. J. Sensors for site-specific management. **The state of site specific management for agriculture**, p. 183-210, 1997.
- TSOULIAS, Nikos; GEBBERS, Robin; ZUDE-SASSE, Manuela. Using data on soil ECa, soil water properties, and response of tree root system for spatial water balancing in an apple orchard. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 3, p. 522-548, 2020.
- Veris Technologies 3100 Soil EC Mapping System. Operating Instructions, 2002.
- VICINI, Lorena. Análise multivariada: da teoria à prática. 2005.
- WALKER, Esteban; HERNANDEZ, Adrian V.; KATTAN, Michael W. Meta-analysis: Its strengths and limitations. **Cleveland Clinic journal of medicine**, v. 75, n. 6, p. 431, 2008.
- WENNER, Frank. **A method of measuring earth resistivity**. US Government Printing Office, 1916.

- WILLIAMS, Baden G.; BAKER, G. C. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. **Soil Research**, v. 20, n. 2, p. 107-118, 1982.
- WILLIAMS, Baden G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. **Soil Research**, v. 25, n. 1, p. 21-27, 1987.
- WOLD, Svante; ESBENSEN, Kim; GELADI, Paul. Principal component analysis. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 2, n. 1-3, p. 37-52, 1987.

APÊNDICES

APÊNDICE A.

Tabela 10. Categorização das variáveis para a ACM.

Variáveis	Classificação automática	Nº classes	Classes
DF	Não	2	<20 >20
TC	Não	4	<5 5-10 10-20 >20
ÁREA	Não	4	<10 10-50 50 - 200 >200
DA	Sim	4	<61,26 61,26 a 98,16 98,16 a 165,15 >165,15
CEaR	Sim	4	<3 3 a 4,78 4,78 a 7,12 >7,12
CCEaR	Sim	4	<7,55 7,55 a 10,74 10,74 a 15,22 >15,22
CEaP	Sim	4	<3,26 3,26 a 6,72 6,72 a 10,42 >10,42
CCEaP	Sim	4	<7,55 7,55 a 11,25 11,25 a 16,39 >16,39
ALT	Sim	4	<660,39 660,39 a 805,06 805,06 a 851,28 >851,28
CALT	Sim	4	<0,47 0,47 a 0,78 0,78 a 1,42 >1,42
DEC	Sim	4	<0,84 0,84 a 1,9 1,9 a 2,89 >2,89
CDEC	Sim	4	<50,37 50,37 a 63,05 63,05 a 84,81 >84,81
TWI	Sim	4	<7,68 7,68 a 8,67 8,67 a 9,88 >9,88
CTWI	Sim	4	<13,81 13,81 a 17,81 17,81 a 22,54 >22,54
ALR	Sim	3	<144,38 144,38 a 221,16 >221,16
ALP	Sim	3	<144,77 144,77 a 218,01 >218,01
ARR	Sim	4	<25,77 25,77 a 38,42 38,42 a 51,37 >51,37
ARP	Sim	4	<24,11 24,11 a 37,18 37,18 a 49 >49
SR	Sim	4	<19,41 19,41 a 26,39 26,39 a 28,64 >28,64
SP	Sim	4	<18,51 18,51 a 25,44 25,44 a 27,96 >27,96
AGR	Sim	4	<29,09 29,09 a 37,76 37,76 a 45,03 >45,03
AGP	Sim	4	<31,82 31,82 a 40,82 40,82 a 46,4 >46,4
COR	Sim	4	<1,7 1,7 a 2,17 2,17 a 4,44 >4,44
COP	Sim	4	<1,27 1,27 a 1,55 1,55 a 3,09 >3,09
CTCR	Sim	4	<106,37 106,37 a 145,84 145,84 a 199,6 >199,6
CTCP	Sim	4	<103,11 103,11 a 141,37 141,37 a 187,4 >187,4
DSR	Sim	4	<1,03 1,03 a 1,27 1,27 a 1,3 >1,3
DSP	Sim	4	<1,07 1,07 a 1,27 1,27 a 1,31 >1,31
pHR	Sim	4	<5 5 a 5,11 5,11 a 5,39 >5,39
pHP	Sim	4	<5,04 5,04 a 5,16 5,16 a 5,41 >5,41
PR0-5	Sim	4	<0 0 a 5,16 5,16 a 18,54 >18,54
PR5-10	Sim	4	<0 0 a 8,34 8,34 a 18,03 >18,03
PR10-15	Sim	4	<0 0 a 4,63 4,63 a 17,31 >17,31
CADR	Não	3	<30 30-45 >45
CADP	Não	3	<120 120-170 >170
TEMP	Não	3	<20 20-30 >30

Tabela 11. CEa e algumas variáveis condicionantes importantes por área

Área	CEa média (0 a 0,3 m)	CV (%) (0 a 0,3 m)	CEa média (0 a 0,9 m)	CV (%) (0 a 0,9 m)	Declividade média (%)	Textura	Ocorrência de precipitação	CAD (0 a 1 m)
1	2,85	7,8	3,11	8,2	0,19	Media	Sim	100
2	3,92	6,6	4,2	9,0	0,54	Media	Sim	98,9
3	2,22	11,2	2,35	11,1	0,15	Media	Sim	101,8
4	2,29	13,0	2,57	10,2	0,16	Media	Sim	100,6
5	3,82	11,0	3,69	10,2	0,32	Media	Sim	96,8
6	4,02	6,2	4,27	7,8	0,24	Media	Sim	100,6
7	3,66	6,4	3,35	5,8	0,27	Media	Sim	94,5
8	4,06	6,6	3,71	4,5	0,22	Media	Sim	93,2
9	3,79	8,0	3,96	6,9	0,16	Media	Sim	91,9
10	2,75	11,1	2,92	14,0	0,15	Media	Não	94,9
11	1,89	21,1	2,79	15,0	1,1	Media	Sim	100,3
12	2,78	18,1	3,33	12,3	0,7	Media	Sim	100,2
13	1,47	6,0	1,96	5,6	0,51	Media	Sim	101,2
14	1,61	13,2	1,98	16,8	0,4	Media	Sim	99,9
15	2,17	7,9	3	7,5	0,56	Media	Sim	101,6
16	3,19	13,3	3,66	8,9	0,48	Media	Sim	98,9
17	1,76	5,9	2,45	6,8	1,07	Media	Sim	100,8
18	1,68	11,5	2,16	14,0	1,02	Media	Sim	100,6
19	2,76	5,9	3,05	6,8	0,45	Media	Sim	90,2
20	1,23	30,0	1,43	34,2	0,5	Media	Sim	98,8
21	4,79	12,8	4,34	11,9	0,56	Media	Sim	93,2
22	13,65	25,2	16,27	30,1	1,31	Media	Sim	101,2
23	3,04	7,0	3,68	5,7	0,29	Media	Sim	189,1
24	2,53	5,9	3,26	6,6	0,51	Media	Sim	181,9
25	2,79	6,8	3,5	6,1	0,28	Media	Sim	181,7
26	4,1	8,2	4,14	11,2	0,58	Media	Sim	188,5
27	2,95	9,2	3,12	8,8	0,6	Media	Sim	183,9
28	4,07	7,1	4,35	8,3	0,21	Media	Sim	186,2
29	1,85	14,9	1,62	10,4	0,5	Media	Sim	183,9
30	3	57,3	2,3	13,2	0,81	Media	Sim	187,2
31	1,62	25,1	2,13	25,6	0,59	Media	Sim	205,8
32	5,86	16,2	4,8	14,8	0,76	Media	Não	173,4
33	5,87	25,9	3,74	29,6	0,7	Media	Não	203,3
34	4,8	21,1	3,82	20,5	0,56	Media	Não	170,4
35	0,81	52,2	1,28	54,5	2,23	Argilosa	Não	126
36	2,33	15,5	3,35	12,1	1,09	Media	Não	103,1
37	2,44	9,8	3,35	9,4	0,89	Media	Não	100,6
38	4,78	11,0	4,68	7,1	0,63	Media	Não	103,3
39	5,12	4,4	4,62	6,2	0,35	Media	Não	100,5
40	2,58	16,5	1,89	15,2	0,28	Media	Não	103,5
41	3,37	5,8	2,93	10,3	0,84	Media	Não	99,2
42	2,89	9,0	2,13	15,2	0,85	Media	Não	98,5
43	3,56	12,2	2,93	11,4	0,73	Media	Não	97,3
44	1,89	21,1	2,79	15,0	1,1	Media	Sim	100,3

45	2,78	18,1	3,33	12,3	0,68	Media	Sim	100,2
46	3,14	9,0	3,82	9,5	0,47	Media	Sim	98
47	4,24	13,5	2,19	12,3	0,73	Media	Sim	100,7
48	4,37	9,0	2,98	9,5	1,93	Media	Sim	76
49	0,58	24,9	0,53	22,7	2,51	Media	Sim	77,7
50	1,9	12,5	1,99	11,3	1,78	Media	Sim	75,7
51	3,01	12,5	2,32	11,8	1,46	Argilosa	Sim	87,3
52	2,38	38,3	1,76	34,3	2,67	Argilosa	Sim	80,6
53	1,36	20,2	1,11	20,6	2,19	Argilosa	Sim	80,2
54	3,8	9,8	2,96	11,8	1,27	Media	Sim	87,3
55	1,88	14,0	1,56	13,4	1,81	Media	Sim	82,8
56	2,61	9,8	2,16	10,6	1,73	Media	Sim	85
57	6,98	9,2	7,84	11,2	0,62	Media	Sim	108,4
58	2,38	28,5	2,96	28,6	1,23	Media	Não	78,9
59	2,62	21,5	2,92	18,6	1,37	Media	Não	81,7
60	3,84	12,2	2,08	13,3	1,58	Media	Sim	94,3
61	2,94	13,3	1,54	16,4	2,44	Media	Sim	82,8
62	3,16	10,0	1,67	10,6	1,68	Media	Sim	83,5
63	2,83	15,2	1,33	16,9	2,51	Media	Não	82,2
64	2,47	23,7	1,27	24,6	1,59	Media	Sim	81,5
65	2,91	45,6	1,48	40,4	1,11	Media	Não	72,3
66	8,2	8,2	29,94	37,5	1,91	Argilosa	Sim	102
67	3,97	15,8	2,44	10,3	1,61	Argilosa	Não	101,7
68	4,36	10,9	12,34	26,6	2,04	Argilosa	Não	105,1
69	4,16	7,9	8,81	17,7	2,98	Argilosa	Não	105,2
70	5,9	22,5	5,64	13,4	1,22	Argilosa	Não	107,8
71	3,46	24,3	5,84	25,2	1,45	Argilosa	Não	106,9
72	4,18	8,3	10,87	29,0	0,51	Argilosa	Sim	106,9
73	4,25	4,4	9,1	8,4	0,51	Argilosa	Sim	107,9
74	5,2	23,9	10,72	24,3	1,95	Argilosa	Sim	106,5
75	4,69	16,6	7,88	21,5	1,62	Argilosa	Sim	111,7
76	5,91	6,2	8,1	9,9	1,31	Argilosa	Sim	106
77	3,83	7,3	2,88	7,5	0,82	Media	Sim	105,9
78	2,77	10,9	2,47	13,5	0,85	Media	Sim	106,1
79	3,22	12,9	2,92	21,8	0,94	Media	Sim	107
80	2,43	12,8	2,15	10,6	1,11	Media	Sim	106,3
81	0,86	23,3	2,12	13,3	1,66	Media	Sim	108,9
82	1,19	9,0	2,62	6,4	1,79	Media	Sim	108,1
83	6,96	7,3	9,9	8,0	2,29	Argilosa	Sim	127,3
84	7,46	8,6	13,84	7,3	2,84	Argilosa	Sim	119,4
85	5,15	9,5	8,74	13,1	4,86	Argilosa	Sim	123,8
86	5,69	17,4	10,42	19,4	3,58	Argilosa	Não	140,1
87	7,41	4,0	10,89	5,3	3,36	Argilosa	Sim	123,7
88	12,67	13,2	16,24	13,0	2,5	Argilosa	Sim	135,7
89	10,16	13,8	13,72	12,5	2,09	Argilosa	Sim	134,3
90	10,53	8,3	16,72	11,8	2,08	Argilosa	Sim	132,2
91	10,08	14,1	16,37	16,7	3,91	Argilosa	Sim	121,3
92	8,28	5,2	11,11	4,8	2,15	Argilosa	Sim	120,4

93	3,36	8,7	5,75	7,8	4,54	Argilosa	Sim	128,9
94	12,12	22,5	19,29	23,1	2,26	Argilosa	Sim	121,5
95	6,64	27,0	10,51	23,8	4,66	Argilosa	Não	136,1
96	8,32	13,8	12,33	18,4	2,82	Argilosa	Não	135,7
97	8,44	8,2	12,04	9,5	4,28	Argilosa	Sim	134,9
98	6,54	8,8	9,72	8,9	2,67	Argilosa	Sim	135,5
99	13,73	4,6	19,78	6,4	4,18	Argilosa	Sim	135,3
100	8,25	7,2	13,08	5,0	4,09	Argilosa	Sim	121,1
101	6,41	12,1	10,35	10,7	0,79	Argilosa	Não	136,9
102	8,58	18,3	11,41	15,5	3,32	Argilosa	Sim	129,5
103	5,11	7,2	8,33	8,3	3,08	Argilosa	Sim	132,9
104	5,8	11,3	9,3	12,1	5,16	Argilosa	Não	136,9
105	2,1	2,1	3,49	3,0	2,28	Argilosa	Sim	139,7
106	2,33	30,8	4,12	29,2	3,1	Argilosa	Sim	139,6
107	2,17	7,1	3,85	6,1	5,54	Argilosa	Sim	138,4
108	2,04	7,6	3,32	5,2	3,4	Argilosa	Sim	135,9
109	1,8	9,7	3,26	6,1	2,97	Argilosa	Sim	136,8
110	1,73	6,9	3,26	11,1	1,99	Argilosa	Sim	135,1
111	5,45	5,2	6,75	4,8	5,56	Argilosa	Sim	125,6
112	16,3	6,6	17,56	6,3	2,1	Argilosa	Sim	125,6
113	13,58	11,1	15,11	14,1	5,1	Argilosa	Sim	126,4
114	11,06	10,4	12,27	10,4	3,27	Argilosa	Sim	134,2
115	6,66	7,3	9,17	1,6	1,74	Argilosa	Sim	127,5
116	15,99	3,9	21,91	5,6	1,94	Muito argilosa	Não	128,6
117	14,69	9,3	19,8	7,3	2,15	Muito argilosa	Não	129,2
118	12,1	6,3	15,08	7,5	2,77	Muito argilosa	Não	128,8
119	10,11	8,0	15,86	6,5	2,3	Argilosa	Não	127,8
120	10,65	15,1	14,21	20,7	3,17	Argilosa	Não	125,6
121	11,88	11,4	17,61	13,9	3,86	Muito argilosa	Não	125,8
122	14,17	12,7	21,05	16,6	3,97	Muito argilosa	Não	127,1
123	12,55	4,3	16,8	6,7	3,12	Argilosa	Sim	128,1
124	5,6	25,4	5,29	34,8	2,78	Argilosa	Sim	97,3
125	11,39	6,1	17,08	7,9	2,82	Muito argilosa	Sim	128,6
126	4,79	9,5	8,42	12,3	1,98	Argilosa	Sim	129,8
127	6,86	3,3	9,49	4,2	1,83	Argilosa	Não	130,5
128	8,04	17,8	11,83	19,8	4,11	Argilosa	Sim	124,1
129	6,98	9,8	10,98	11,3	2,91	Argilosa	Sim	126,1
130	4,84	10,0	8,15	16,4	4,77	Argilosa	Não	122,4
131	7,24	11,7	12,86	9,6	2,05	Argilosa	Sim	126,4
132	9,01	8,1	10,73	6,4	4,15	Argilosa	Sim	127
133	4,18	11,7	7,37	9,0	2,9	Argilosa	Sim	126,8
134	6,34	20,0	7,25	10,6	3,01	Argilosa	Não	136,9
135	5,31	14,0	6,99	20,4	1,92	Argilosa	Sim	123,3
136	3,72	10,5	5,91	18,1	3,12	Argilosa	Sim	122,5
137	7,12	7,8	8,55	6,8	3,33	Argilosa	Sim	119,4
138	6,42	8,9	8,17	9,6	3,02	Argilosa	Sim	124,2

139	9,26	5,1	10,08	8,4	1,98	Argilosa	Sim	121,4
140	11,86	7,3	14,12	5,6	3,42	Argilosa	Sim	126,3
141	8,03	81,0	4,28	101,4	2,87	Argilosa	Não	116,1
142	8,33	47,1	6,83	56,7	3,81	Argilosa	Não	116,7
143	7,29	8,8	10,78	15,8	2,99	Argilosa	Sim	126,8
144	8,25	5,1	13,81	7,4	2,87	Argilosa	Não	138
145	4,69	13,3	6,78	23,0	0,58	Argilosa	Não	137,7
146	6,31	7,2	9,29	14,7	1,76	Argilosa	Não	137,7
147	6,3	0,0	11,81	0,0	1	Argilosa	Não	138,3
148	3,24	16,5	5,84	11,5	2,11	Argilosa	Não	135,4
149	3,24	30,8	5,57	6,4	2,64	Argilosa	Não	135,7
150	3,48	9,0	4,26	2,4	1,63	Argilosa	Não	135,8
151	9,86	10,7	14,73	7,3	3,21	Argilosa	Sim	138,3
152	7,93	10,7	9,12	14,7	1,45	Argilosa	Sim	137,5
153	4,97	7,2	6,86	10,2	1,64	Argilosa	Não	134,4
154	7,42	8,0	8,84	3,4	3,74	Argilosa	Sim	129,6
155	3,3	3,3	5,73	4,8	3,46	Argilosa	Sim	125,6
156	4,34	3,0	6,17	4,0	4,31	Argilosa	Sim	136,1
157	5,65	5,6	9,16	3,3	1,67	Argilosa	Sim	133,4
158	9,59	15,3	13,53	16,5	2,71	Argilosa	Sim	118,2
159	2,2	15,3	6,38	11,1	2,17	Argilosa	Não	122
160	12,82	12,9	19,58	12,6	2,32	Argilosa	Sim	136,2
161	6,7	12,6	8,99	9,8	2,33	Argilosa	Não	136,3
162	4,31	12,9	8,03	12,2	1,85	Argilosa	Não	98,2
163	5,4	17,3	11,51	18,3	1,8	Argilosa	Não	104,7
164	3,88	11,1	10,17	17,1	2,48	Argilosa	Não	101,1
165	4,78	20,3	8,14	23,7	2,59	Argilosa	Não	101
166	4,02	9,7	6,72	6,7	1,97	Argilosa	Não	104,4
167	6,11	6,5	12,39	8,4	2,73	Argilosa	Não	96,6
168	5,54	7,2	11,76	4,6	2,85	Argilosa	Não	97,4
169	5,74	7,1	9,98	14,3	1,84	Argilosa	Não	101,2
170	15	8,1	8,98	8,5	3,43	Argilosa	Sim	159
171	12,74	11,0	8,08	9,3	3,11	Argilosa	Sim	153,9
172	5,91	27,2	6,24	25,2	3,73	Argilosa	Não	120,9
173	6,5	20,6	5,48	21,7	4,35	Argilosa	Não	115,4
174	6,61	10,5	6,13	13,0	3,61	Argilosa	Não	157,9
175	12,92	9,9	8,31	10,5	3,16	Argilosa	Sim	111,3
176	17,39	11,3	11,84	12,8	3,54	Argilosa	Sim	103,6
177	13,57	7,6	10,1	13,0	2,93	Argilosa	Sim	111,4
178	14,48	23,4	10,81	30,3	2,84	Argilosa	Sim	103,3
179	13,62	11,9	9,86	14,7	3,4	Argilosa	Sim	95,3
180	3,17	18,3	4,84	12,8	1,57	Media	Não	106,9
181	3,55	8,4	6,04	9,3	2,15	Media	Sim	103,8
182	5,32	5,2	9,95	8,2	0,78	Argilosa	Não	109,6
183	5,83	10,4	10,51	10,7	0,94	Argilosa	Não	108,3
184	4,29	14,8	7,17	16,5	0,98	Argilosa	Não	109,3
185	6,58	7,9	8,64	7,2	1,08	Argilosa	Sim	109,6
186	5,62	7,9	8,48	14,6	0,92	Argilosa	Sim	111,1

187	6,62	5,5	9,09	6,0	0,58	Argilosa	Sim	108,1
188	3,34	12,9	5,40	13,1	2,02	Media	Não	105,7
189	4,26	12,6	7,03	12,9	1,18	Media	Não	83,5
190	3,42	14,8	5,79	15,1	0,74	Argilosa	Não	84,8
191	5,59	15,7	8,60	16,4	1,69	Media	Sim	82,3
192	3,65	7,4	5,49	7,5	1,41	Media	Sim	85,5
193	5,03	8,4	8,01	7,2	1,71	Media	Sim	79,2
