



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
CAMPUS DE GOIÂNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
DOUTORADO EM GEOGRAFIA**

**JEPHERSON CORREIA SALES**

**Estrutura e funcionamento de um campo de murundus da Savana Brasileira**

**GOIÂNIA-GO  
2021**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE  
TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

**1. Identificação do material bibliográfico**

Dissertação     Tese

**2. Nome completo do autor**

Jepherson Correia Sales

**3. Título do trabalho**

Estrutura e funcionamento de um campo de murundus da Savana Brasileira

**4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)**

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **JEPHERSON CORREIA SALES, Discente**, em 23/09/2021, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Taitson Bueno, Professor do Magistério Superior**, em 23/09/2021, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2366706** e o código CRC **BC331DB6**.

JEPHERSON CORREIA SALES

**Estrutura e funcionamento de um campo de murundus da Savana Brasileira**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, no Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de doutor em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço.

Linha de pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Taitson Bueno

GOIÂNIA-GO  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Sales, Jepherson Correia

Estrutura e funcionamento de um campo de murundus da Savana Brasileira [manuscrito] / Jepherson Correia Sales. - 2021.  
cxxxviii, 138 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Taitson Bueno.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, , Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2021.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. montes de terra. 2. áreas úmidas. 3. padrão espacial. 4. SIG.  
5. VANT. I. Bueno, Guilherme Taitson, orient. II. Título.

CDU 911.2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

**ATA DE DEFESA DE TESE**

Ata Nº **99** da sessão de Defesa de Tese de **Jepherson Correia Sales** que confere o título de Doutor em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Ao **primeiro dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e um**, a partir das **14 horas**, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**Estrutura e funcionamento de um campo de murundus da Savana Brasileira**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Guilherme Taitson Bueno** (IESA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Vânia Silvia Rosolen** (IGCE/Unesp), membro titular externo; Professor Doutor **Alisson Duarte Diniz** (IGEO/UFBA), membro titular externo; Professor Doutor **Márcio Henrique de Campos Zancopé** (IESA/UFG), membro titular externo; Professor Doutor **Manuel Eduardo Ferreira** (IESA/UFG), membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Guilherme Taitson Bueno**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao **primeiro dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e um**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

	Documento assinado eletronicamente por <b>Guilherme Taitson Bueno, Professor do Magistério Superior</b> , em 01/09/2021, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <a href="#">Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</a> .
	Documento assinado eletronicamente por <b>Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior</b> , em 01/09/2021, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <a href="#">Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</a> .
	Documento assinado eletronicamente por <b>Márcio Henrique De Campos Zancopé, Professor do Magistério Superior</b> , em 01/09/2021, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <a href="#">Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</a> .
	Documento assinado eletronicamente por <b>Alisson Duarte Diniz, Usuário Externo</b> , em 01/09/2021, às 19:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <a href="#">Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</a> .
	Documento assinado eletronicamente por <b>Luis Felipe Soares Cherm, Coordenador de Pós-graduação</b> , em 02/09/2021, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <a href="#">Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</a> .
	A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <a href="https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&amp;id_orgao_acesso_externo=0">https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&amp;id_orgao_acesso_externo=0</a> , informando o código verificador <b>2312633</b> e o código CRC <b>412C09BC</b> .

*Dedico aos meus pais e irmãos, à Priscilla, minha companheira de todos os dias, e ao fruto do nosso amor, Giovanna.*

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Guilherme Taitson Bueno que me acompanhou como orientador nesse importante período da minha formação acadêmica e científica. Os seus exemplos de paciência, seriedade com a pesquisa, dedicação ao trabalho e a sua visão integradora entre as atividades de campo com os aspectos teóricos-metodológicos, como modelo durante a minha trajetória acadêmica e profissional.

À Professora Doutora Vânia Rosolen, pela oportunidade de integrar o Projeto de Pesquisa da FAPESP “Reconstrução da paisagem, caracterização das fases organo-metálicas e prospecção dos depósitos de argilas aluminosas refratárias do sistema Latossolo – Gleissolo”, que apoiou a realização desta tese com as despesas de campo e análises laboratoriais. Agradeço pelo exemplo de pesquisadora e pela boa convivência nas atividades de campo.

Ao Professor Doutor Manuel Eduardo Ferreira, por auxiliar na obtenção de imagens com o Veículo Aéreo Não Tripulado e pela disponibilização da infraestrutura e recursos computacionais do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento.

Ao Doutor Márcio Henrique de Campos Zancopé e ao Professor Doutor Ivanilton José de Oliveira, pelas excepcionais contribuições durante a banca de qualificação.

Aos Doutores Lucas Furlan e Carla Coelho, por me acompanharem nessa trajetória de formação de doutorado, nos auxiliando durante as atividades de campo e análise de dados.

Ao Mestre João Vitor Silva Costa, por auxiliar nas atividades de campo com o manuseio do VANT; suas ações foram importantes para a realização deste trabalho.

Aos Doutores Ivaniza Cabral e Rogério Junqueira, pela disponibilização do Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas para realização dos ensaios de difração de raios-x e fluorescência de raios-x.

A Faculdade de Geociências, ao Instituto de Física da UFMT e ao projeto FINEP # 01.04.0121.00 pelo auxílio na realização das medidas dos ensaios de difração de raios-x e fluorescência de raios-x.

Ao meu Irmão, Belini Junior, e ao meu Compadre Valcir, por nos acompanhar durante as atividades de coleta em Uberaba-MG.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram e participaram para execução desse trabalho.

Por último, aos meus pais, Belini e Iveriana, minha Companheira Priscilla e à minha Filha, Giovanna, por me darem o apoio e o conforto do dia a dia, tão necessário para realização deste trabalho de pesquisa.

## RESUMO

A ocorrência de montes de terra não antropogênicos dispersos na paisagem ocorrem em vários locais do mundo. Os campos de murundus da Savana Brasileira são exemplos dessa categoria de fenômeno natural intrigante. Eles abarcam extensas áreas sobre as superfícies de aplanamento na transição de ambientes hidromórficos para ambiente ortomórficos, formando uma superfície suavemente plana e contínua com montes de terra organizados de forma padronizada. Com frequência, esses microrrelevos se localizam emoldurando áreas úmidas que se apresentam na forma de pequenas depressões isoladas, seja associado às cabeceiras de drenagem, ou ainda ao longo de pequenos cursos d'água. As características morfológicas desses montes parecem ser distribuídas de forma ordenada no interior do campo de murundus e associadas à dinâmica hidrológica; contudo, esse tema é pouco explorado na literatura. A gênese desses microrrelevos ainda não consensual. As principais hipóteses de formação dos murundus estão divididas em: i) construção dos montes de terra por ação de térmitas, a partir da superfície do terreno; ii) rebaixamento do entorno dos murundus, por processos de erosão diferencial; iii) mecanismos de erosão diferencial e padronização da vegetação. A presente tese tem o objetivo de: i) apresentar uma revisão bibliográfica com o levantamento dos principais estudos ocorridos em campos de murundus no Brasil e ao redor do mundo, bem como sobre procedimentos técnicos-metodológicos para análise de áreas úmidas, microtopografia e levantamento de solo voltadas para uma análise integrada da paisagem; ii) analisar as características morfológicas dos montes de terra e as características estruturais de um campo de murundus no contexto da evolução da paisagem da Savana Brasileira; iii) apresentar os principais fluxos hidrológicos e os processos físico-químicos ocorridos no solo de um campo de murundus, associado ao padrão de distribuição dos montes de terra. Foram empregados dados de imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e de satélites orbitais. Os dados espectrais e morfométricos da área de estudo foram manipulados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e analisados por técnicas estatísticas descritivas, multivariada e de agrupamento, para a obtenção dos compartimentos estruturais da área de estudo. Também foram realizadas atividades de campo para coleta de solo, bem como análise físico-químico-mineralógica do solo e análise da dinâmica da água nos compartimentos estruturais identificados. Os resultados revelam que: i) as características geométricas dos montes de terra, individuais (perímetro, área, volume, índice de circularidade e altura), ou em conjunto (distância do vizinho mais próximo e densidade), ocorreram de forma ordenada na área de estudo. A distribuição dos montes de terra revelou um gradiente de valores geométricos da borda para o centro do campo de murundus; ii) a altitude de topo dos murundus com maior volume possui uma concordância relativa com a altitude das áreas de planalto que envolvem a área de estudo, indicando que os montes de terra são remanescentes de uma antiga superfície que ligava o planalto ao topo dos murundus; iii) a análise de reflectância dos alvos revelou a existência de compartimentos ordenados de forma concêntrica na área de estudo. Os compartimentos expressam a distribuição das características da superfície do campo de murundus, como a vegetação, o solo e a geometria dos montes de terra; iv) os processos ocorridos no solo indicam que a perda e a precipitação do ferro, a distribuição física, o acúmulo de alumínio e de matéria-orgânica ocorrem de forma ordenada nos compartimentos; e v) os fluxos superficial e subsuperficial da água, identificados na área de estudo, convergem da borda para o centro do campo de murundus. Esses fluxos atuam na distribuição dos montes de terra, nas características físico-químicas do solo no interior da área de estudo. Esses achados podem contribuir para o entendimento da erosão diferencial como fonte formadora dos campos de murundus da Savana Brasileira, bem como fomentar a descoberta de novos conhecimentos sobre o funcionamento desses ambientes.

**Palavras-chave:** montes de terra, áreas úmidas, padrão espacial, SIG, VANT

## ABSTRACT

The occurrence of non-anthropogenic earth-mounds dispersed in the landscape occurs in various parts of the world. The mounds fields of the Brazilian Savanna are examples of this category of intriguing natural phenomenon. They cover extensive areas on planing surfaces in the transition from hydromorphic environments to orthomorphic environments, forming a smoothly flat and continuous surface with earth-mounds organized in a standardized way. Often, these micro-reliefs are in framing humid areas that present themselves in the form of small isolated depressions, either associated with the drainage headwaters, or even along small water courses. The morphological characteristics of these mounds seem to be distributed in an orderly manner within the mounds field and associated with hydrological dynamics, however this theme is little explored in the literature. The genesis of these microreliefs is not yet consensual. The main hypotheses for the formation of earth-mounds are divided into: i) construction of earth-mounds by termite action, from the surface of the land; ii) lowering the surroundings of the earth-mounds, due to differential erosion processes; iii) mechanisms of differential erosion and standardization of vegetation. The present thesis aims to: i) present a bibliographic review with a survey of the main studies carried out in mounds fields in Brazil and around the world, as well as on technical-methodological procedures for wetland analysis, microtopography and survey of soil and water aimed at an integrated analysis of the landscape; ii) to analyze the morphological characteristics of the earth-mounds and the structural characteristics of a mounds field in the context of the evolution of the landscape of the Brazilian Savanna; iii) present the main physical-chemical hydrological flows and the processes occurring in the soil and in the water of a mounds field, associated with the distribution pattern of the earth-mounds. Unmanned aerial vehicle data (UAV) and orbital satellites were used. The spectral and morphometric data of the study area were manipulated in a Geographic Information System (GIS) environment and analyzed using descriptive, multivariate, and clustering statistical techniques to obtain the structural compartments of the study area. Field activities were also carried out to collect water and soil, as well as physical-chemical-mineralogical analysis of the soil and analysis of the physical-chemical dynamics of the water, in the structural compartments identified. The results show that: i) the geometric characteristics of the earth-mounds, individual (perimeter, area, volume, circularity index and height), or together (distance from the nearest neighbor and density), occurred in an orderly way of the study area. The distribution of the earth-mounds revealed a gradient of geometric values from the edge to the center of the mounds field; ii) the top altitude of the earth-mounds with greater volume has a relative agreement with the altitude of the plateau areas surrounding the study area, indicating that the earth-mounds are remnants of an old surface that connected the plateau to the top of the current earth-mounds; iii) the reflectance analysis of the targets revealed the existence of concentric ordered compartments in the study area. The compartments express the distribution of the characteristics of the surface of the mounds field, such as: the vegetation, the soil and the geometry of the earth mounds; iv) the processes occurring in the soil indicate that: the loss and precipitation of iron, the physical distribution, the accumulation of aluminum and organic matter occur in an orderly manner in the compartments; and v) the superficial and subsurface flows of water identified in the study area, converge from the edge to the center of the mounds field. These flows act in the distribution of the earth-mounds, in the physical-chemical characteristics of the soil and in the chemistry of the water inside the study area. These findings may contribute to the understanding of differential erosion as a source that forms the murundus fields of the Brazilian Savannah, as well as encourage the discovery of new knowledge about the functioning of these environments.

**Key-words:** mounds field, earth-mounds, wetland, spatial patterns, GIS, UAV

## LISTA DE FIGURA

<b>Figura 1.</b> Localização de campos de murundus na Chapada Uberaba-Uberlândia	4
<b>Figura 2.</b> Hipóteses de formação dos campos de murundus	6
<b>Figura 3.</b> Montes de terra ao redor do mundo e no Brasil	11
<b>Figura 4.</b> Distribuição espacial da precipitação e temperatura do bioma Cerrado	14
<b>Figura 5.</b> Diagrama de Eh e pH para redução do Fe (III) - Fe (II).	16
<b>Figura 6.</b> Variação de solubilidade do quartzo em função pH à 25	17
<b>Figura 7.</b> Variação de solubilidade da gibbsita em função do pH à 25°C.	18
<b>Figura 8.</b> Variação mensal de alagamento em campo de murundus de cabeceira de drenagem	21
<b>Figura 9.</b> Vista aérea da vegetação em campo de murundus	22
<b>Figura 10.</b> Variação da Precipitação Mensal no Triângulo Mineiro de 1975 a 2009	33
<b>Figura 11.</b> Perfil topográfico hipotético esquemático desenvolvido com base nas informações coletadas em campo, análises químicas e mineralógicas e embasado na literatura, no qual as argilas aluminosas se formam sobre a couraça ferruginosa	34
<b>Figura 12.</b> Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa	37
<b>Figura 13.</b> Atividade de campo com o VANT	39
<b>Figura 14.</b> Correção das imagens VANT pelo método PPP.	40
<b>Figura 15.</b> Pontos de amostragem de solo	43
<b>Figura 16.</b> Trincheiras e horizontes do solo	44
<b>Figura 17.</b> Equipamento fluorescência de raios-X e pastilhas de amostra de solo	45
<b>Figura 18.</b> Localização geral da área de estudo no bioma Cerrado	52
<b>Figura 19.</b> Murundus identificados com o mosaico aerofotogramétrico	59
<b>Figura 20.</b> Distribuição e correlação das variáveis geométricas	60
<b>Figura 21.</b> Análise de altitude dos murundus	61
<b>Figura 22.</b> Vizinhos diagrama de Voronoi	62
<b>Figura 23.</b> Gráfico biplot das variáveis	63

<b>Figura 24.</b> Agrupamento das variáveis geométricas perímetro e distância para o vizinho mais próximo.	65
<b>Figura 25.</b> Classificação de imagens orbitais da área de estudo	66
<b>Figura 26.</b> Compartimentos da área de estudo	67
<b>Figura 27.</b> Distribuição das características morfológica e de vegetação dos murundus	68
<b>Figura 28.</b> Localização e imagens da área de estudo	84
<b>Figura 29.</b> Pontos de amostragem de solo, relevo e solos locais	86
<b>Figura 30.</b> Distribuição de areia, argila e matéria orgânica por compartimento	92
<b>Figura 31.</b> Distribuição de mineralógica por compartimento.	93
<b>Figura 32.</b> Distribuição ferro, alumínio e silício.	94
<b>Figura 33.</b> Relação entre Titânio e Alumínio para as amostras de todos os perfis analisados	96
<b>Figura 34.</b> Fluxos da água no campo de murundus pesquisado	98
<b>Figura 35.</b> Forma, estrutura e processos em um campo de murundus	99

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1.</b> Redução do Fe <sup>3+</sup> em Fe <sup>2+</sup>	16
<b>Equação 2.</b> Algoritmo K-means	42
<b>Equação 3.</b> Índice de Circularidade	55
<b>Equação 4.</b> Padronização por escalonamento	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> <i>Summary of outputs: Eigenvalues</i>	62
<b>Tabela 2.</b> <i>Squared correlations</i>	63
<b>Tabela 3.</b> Resultado <i>k-means</i> das variáveis em 5 clusters	64
<b>Tabela 4.</b> Descrição morfológica do solo, relevo, vegetação e alagamento	78

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional de Águas
EDX	Raios-x por Dispersão em Energia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETCCDI	<i>Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
IBGE-PPP	Posicionamento de Ponto Preciso do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IESA	Instituto de Estudos Socioambientais
LAMUTA	Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas
LAPIG	Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
PPK	Post Processed Kinematic
RTK	Real Time Kinematic
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Networks</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>Apresentação</b> .....	1
<b>Introdução</b> .....	3
<b>Capítulo I</b>	
<b>CAMPO DE MURUNDUS: UMA REVISÃO DE ASPECTOS TEÓRICOS</b>	9
1. Introdução .....	10
1.1 Definição .....	10
1.2 Categoria do fenômeno e gênese dos montes de terra .....	10
1.3 Hipóteses genéticas dos murundus .....	12
1.4 Aspectos climáticos e os Campos de Murundus .....	13
1.5 Processos pedogenéticos .....	14
1.5.1 Geoquímica do ferro .....	15
1.5.2 Geoquímica do silício .....	17
1.5.3 Geoquímica do alumínio .....	18
1.6 Dinâmica hídrica em campos de murundus .....	20
1.7 Aspectos vegetacionais .....	22
1.8 Morfologia, estrutura e distribuição de campo de murundus .....	23
Considerações finais .....	24
<b>Capítulo II</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDOS E METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA</b>	31
2.1 Aspectos climáticos .....	32
2.2 Aspectos geológicos .....	33
2.3 Aspectos geomorfológicos .....	34
2.4 Aspectos pedológicos .....	35
2.5 Abordagem metodológica para análise de campo de murundus .....	36
2.5.1 Concepção metodológica .....	36
2.5.2 Etapas metodológicas .....	37
2.5.3 Obtenção, processamento de imagens e compartimentação da paisagem .....	38
2.5.4 Coleta e análise do solo em campos de murundu .....	42

## Capítulo III

<b>ESTRUTURA DE UM CAMPO DE MURUNDUS DA SAVANNA BRASILEIRA</b>	<b>47</b>
3.1 Introdução .....	47
3.1.1 Terminologia e localização dos campos de murundus .....	47
3.1.2 Morfometria e distribuição .....	48
3.1.3 Relevância ecológica .....	49
3.1.4 Abordagem por sensoriamento remoto .....	50
3.1.5 Considerações e objetivos .....	51
3.2 Materiais e métodos .....	51
3.2.1 Área de estudo .....	51
3.2.2 Aquisição e Processamento de dados do VANT .....	53
3.2.3 Aquisição, processamento e classificação de imagens orbitais...	58
3.2.4 Análise da organização espacial do campo de murundus.....	58
3.3 Resultados .....	58
3.3.1 Análise de dados geométricos, de altitude e vizinhança dos murundus.	58
3.3.2 Resultados da ACP das variáveis geométricas .....	62
3.3.3 Agrupamento das variáveis geométricas .....	64
3.3.4 Classificação das variáveis espectrais .....	65
3.5.5 Organização espacial da distribuição dos murundus .....	66
3.6 Discussões .....	69
3.7 Considerações finais .....	71
Referências .....	73

## Capítulo IV

<b>Caracterização dos solos e dos processos pedogenéticos em um campo de murundus da savana brasileira</b>	<b>77</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	78
4.1.1 Definição, categorias e gênese dos campos de murundus.....	78
4.1.2 Distribuição dos montes de terra e a estrutura da paisagem .....	79
4.1.3 Campos de Murundus: desenvolvimento da área úmida e da cobertura pedológica .....	80
4.1.4 Hidrologia dos campos de montículos .....	82
4.1.5 Hipóteses e objetivos .....	83
4.2 Materiais e métodos .....	83
4.2.1 Área de estudo .....	83

4.2.2 Amostragem de solo no campo de murundus estuado .....	86
.....	
4.2.3. Análise física e química do solo .....	86
4.2.4 Identificação dos fluxos da água .....	87
4.3 Resultados e interpretações .....	88
4.3.1 Aspectos morfológicos e cor do solo por compartimento .....	88
4.3.2 Análise granulométrica e de matéria orgânica do solo por compartimento .....	92
4.3.3 Caracterização mineralógica do solo por compartimento .....	93
4.3.4 Análise química do solo .....	94
4.3.5 Escoamento da água em campo de murundus .....	97
4.4 Discussões .....	99
4.5 Considerações finais .....	103
Referências .....	103
<b>V. Considerações Gerais .....</b>	<b>107</b>
5.1 Padrão espacial dos murundus e hipóteses da pesquisa .....	107
5.2 Forma, distribuição e estrutura .....	108
5.3 Processos e funcionamento .....	110
5.4 Vegetação e atividades bióticas .....	112
5.5 Contribuições para gênese dos murundus e novos cenários de pesquisa...	113
Referências gerais .....	115
Apêndices .....	121

## **Apresentação**

A presente tese está inserida na área de concentração Natureza e Produção do Espaço, na linha de pesquisa Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica, do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás (UFG), no Instituto de Estudos Socioambientais (IESA). Os estudos foram realizados no período de março/2017 a março/2021 em um campo de murundus localizado na área de aplanamento da Chapada Uberaba-Uberlândia, bioma Cerrado.

Este estudo integra um projeto de pesquisa com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), intitulado “Reconstrução da paisagem, caracterização das fases organo-metálicas e prospecção dos depósitos de argilas aluminosas refratárias do sistema Latossolo – Gleissolo” (oeste de Minas Gerais) (Processo: 2017-14168-1). Participaram deste projeto pesquisadores da Universidade Estadual Paulista (UNESP /Rio Claro), da Universidade de São Paulo, do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás e da Universidade de Toulon (França).

A tese se concentrou na realização do mapeamento de um campo de murundus, bem como no estudo de processos evidenciados por análises de solo e da água do solo, de modo a entender a distribuição dos montes de terra na área de estudo e sua relação com a evolução da paisagem em áreas de aplanamento da Savana Brasileira. Foram obtidas e analisadas imagens de sensoriamento remoto orbital e aérea em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, adotadas técnicas de análise de estatística para entendimento do padrão de distribuição espacial dos montes de terra, bem como realizada a análise mineralógica e geoquímica do solo e da água.

Esta tese está organizada em quatro capítulos no formato de artigos científicos. No primeiro capítulo foi procedida uma revisão teórica e metodológica dos principais temas relacionados aos campos de murundus, especialmente relacionados aos processos de interação clima-solo-relevo e procedimentos técnicos-metodológicos para análise de áreas úmidas; no segundo capítulo foi realizada uma análise de distribuição espacial dos montes de terra ocorridos em um campos de murundus, sendo sugerida uma proposta de compartimentação da paisagem nessa área de microrrelevo, a partir das suas características geométricas e espectrais; no terceiro capítulo, foi procedida uma análise da dinâmica geoquímica do solo e da água

e de sua relação com os compartimentos de relevo mapeados na área de estudo; no quarto capítulo foram apresentadas as considerações finais da tese, onde foram discutidos em conjunto os aspectos morfológicos dos montes de terra, o padrão de distribuição dos murundus, a organização estrutural dos campos de montículos, os fluxos hidrológicos ocorridos na área de pesquisa e os processos ocorridos no solo e na água.

## Introdução

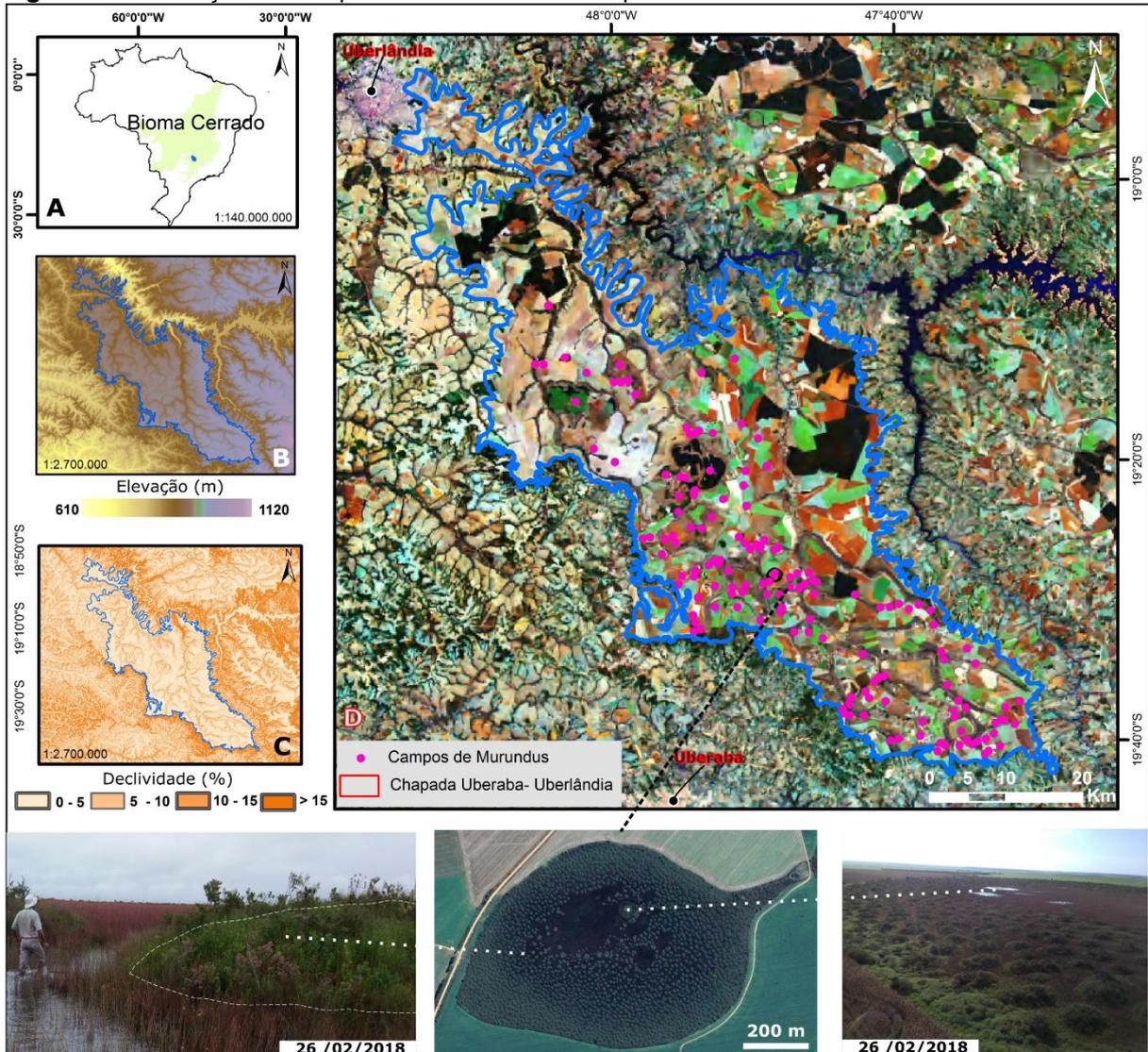
Montes de terra espalhados em um ambiente natural, formando um interessante mosaico de padrões repetidos na paisagem, ocorrem em diversos locais no mundo. Esses fenômenos intrigam e despertam a curiosidade de pesquisadores, especialmente de biólogos, ecólogos, geólogos e geógrafos, interessados em entender quais são os processos ocorridos na natureza que levam à formação desses microrrelevos.

Os montes de terra ocorridos no Brasil são denominados murundus. Eles são definidos como elevações semicirculares, arredondadas ou ovais, com dimensões médias de dez metros de comprimento, setenta centímetros de altura e seis metros de largura. As áreas onde ocorrem a dispersão dos murundus são conhecidas como campo de murundus. O microrrelevo do campo de murundus é composto por uma superfície suavemente plana, sazonalmente alagada e com a presença de vegetação de espécies herbáceas. Embutida nessa superfície, ocorrem os montes de terra que se projetam acima do chão da depressão hidromórfica, formando áreas não alagáveis. Acima dos murundus ocorrem uma vegetação composta de espécies arbustivas e arbóreas (ARAUJO NETO et al., 1986; FURLEY, 1986; OLIVEIRA-FILHO et al., 1992).

No Brasil, os campos de murundus ocorrem no Pantanal Mato-grossense (OLIVEIRA-FILHO et al., 1992) e com grande frequência em áreas de aplanamento do Bioma Cerrado (ARAUJO NETO et al., 1986). São encontrados na interface entre as áreas com boa drenagem do solo para as áreas hidromórficas, de três formas distintas: i) em depressões isoladas, localizadas no topo de planalto com colinas amplas; ii) em encostas de baixa declividade ao longo de pequenos cursos d'água; e iii) em cabeceiras de drenagens, parcialmente conectadas ou conectadas à rede de drenagem, formando uma pequena depressão em forma de anfiteatro (FURLEY et al., 1986; SCHNEIDER; SILVA, 1991).

A presente pesquisa foi desenvolvida em campo de murundus de cabeceira de drenagem localizado na Chapada entre as cidades de Uberaba-Uberlândia. A região é caracterizada pela alta frequência de ocorrência dessa microforma de relevo. Eles abrangem extensas áreas, formando uma paisagem diferenciada do seu entorno, atualmente ocupado principalmente pelas atividades econômicas do setor agropecuário (Figura 1).

**Figura 1.** Localização de campos de murundus na Chapada Uberaba-Uberlândia.



(A) Localização nacional; (B) Elevação; (C) Declividade percentual; e (D) Ponto com ocorrências de campos de murundus. **Fonte:** SRTM e Google Earth Image. **Organização:** Sales (2021).

O principal enfoque das pesquisas desenvolvidas sobre a ocorrência e dispersão dos montes de terra na natureza tem sido a busca da descoberta dos agentes que formam o microrrelevo. Nesse sentido, os fatores bióticos, os abióticos ou os de múltiplos mecanismos têm sido os principais agentes genéticos evocados para explicação do fenômeno. Os estudos que defendem a formação biótica dos montes de terra apontam como principais agentes insetos construtores dos ecossistemas, como, por exemplo: as térmitas (OLIVEIRA FILHO et al. 1986; SPAIN et al., 1986; GROHMANN et al., 2010; FUNCH et al., 2015); formigas (FLETCHER et

al., 2007; SPARAGIVNA et al., 2016); a padronização da vegetação (CRAMER; BARGER, 2014; TARNITA et al., 2016); e a atividade de roedores (JOHNSON; JOHNSON, 2012; GABET et al., 2014). Os principais fatores abióticos, indicados na literatura como responsáveis pela formação dos montes de terra, são: a erosão diferencial do solo pela ação hídrica (CRAMER et al., 2012; FURLEY et al., 1986); os processos hidrológicos em ambientes temperados (KESSLER; WERNER, 2003, KILLINGBECK; BALLANTYNE, 2012; DIAMOND et al., 2019); e erosão eólica em ambientes áridos (CRAMER et al., 2015). Os estudos que defendem múltiplos mecanismos são baseados na ocorrência da distribuição padronizada da vegetação associada a erosão diferencial do solo (CRAMER et al., 2014; MARIMON et al., 2015).

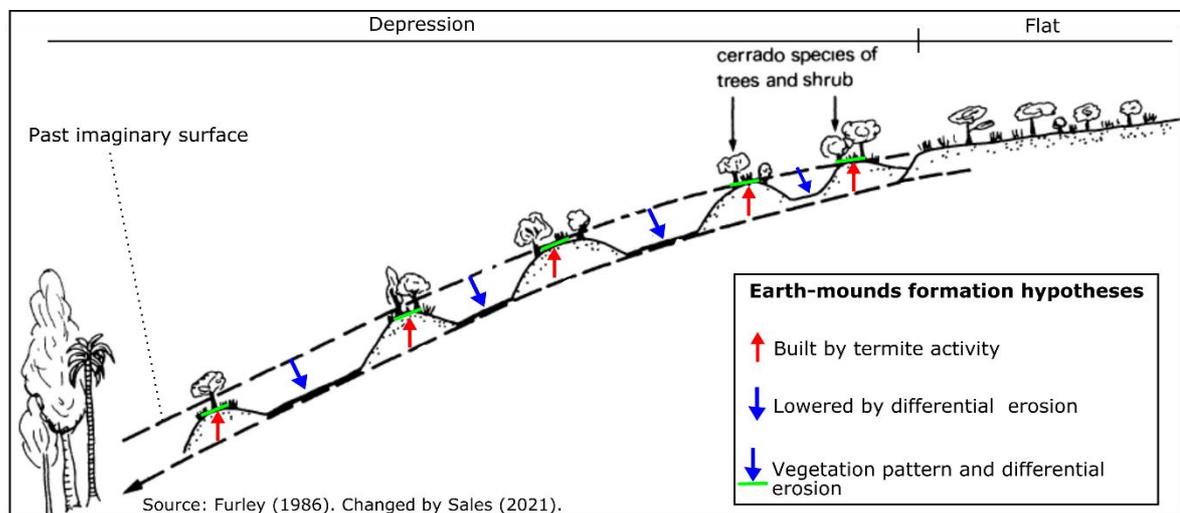
A busca da gênese dos murundus em áreas de aplanamento do bioma Cerrado deve considerar dois aspectos principais: i) a gênese da área úmida em que os murundus se desenvolvem; e ii) a gênese dos montes de terra no contexto da área úmida. Quanto à gênese da área úmida em que se encontram os campos de murundus, o foco deste estudo está voltado para as áreas úmidas desenvolvidas em forma de depressão ou cabeceira em anfiteatro sobre superfície de aplanamento. PETERSCHMITT et al. (1996), ao estudarem uma topossequência de solos vermelhos (topo), passando por solos amarelos e terminando em solos acinzentados (vale hidromórfico), em platô do sul da Índia, propuseram que a área úmida (e os solos associados) se expandiram de forma centrífuga e remontante, em detrimento dos solos ferralíticos (vermelhos). Em estudo no sudoeste da Amazônia (Humaitá-AM), Rosolen et al. (2008) encontraram configuração análoga ao longo de uma topossequência entre Cambissolos associados a um ambiente de Laterização, no topo de um baixo platô, e Gleissolos em área deprimida. Os autores constataram, também, avanço da hidromorfia e expansão da área deprimida sobre o relevo de platô. No Triângulo Mineiro, próximo à área do presente estudo, Queiroz Neto et al. (1998) propõem que as depressões hidromórficas se desenvolvem sobre a chapada Uberaba-Uberlândia devido a perdas geoquímicas diferenciais, ao longo de linhas privilegiadas de circulação das águas, condicionadas pela estrutura geológica (fraturas e cruzamentos de fraturas).

Os campos de murundus no Brasil ainda são motivo de controvérsias científicas quanto aos seus mecanismos de formação (PRINGLE; TARNITA, et al., 2017, p. 366). Atualmente, existem três hipóteses explicativas que descrevem a gênese dos campos de murundus, divididas em: i) atividades biológicas, realizadas

por cupins construtores de ecossistemas (OLIVEIRA-FILHO et al., 1992; PONCE; CUNHA, 1993); ii) erosão diferencial, a partir da dinâmica hídrica ocorrida no interior do campo de murundus (ARAUJO NETO et al., 1986; SILVA et al., 2010); e iii) erosão diferencial com padrão de vegetação ocorrido nos campos de murundus (CRAMER et al., 2014; MARIMON et al., 2015).

A figura 2 apresenta um esquema das hipóteses de formação dos campos de murundus no Brasil.

**Figura 2.** Hipóteses de formação dos campos de murundus.



Autores defensores da hipótese de formação dos murundus por atividade de cupins defendem que a competição por recursos entre as colônias de cupins resultaria na construção dos montes de terra, a partir da superfície atual. Dessa forma, os murundus seriam elevações construídas por ação pretérita de cupins (paleotermiteiros), para se abrigar em locais a salvo da saturação hídrica. Sendo os microrrelevos ocupados posteriormente por vegetação arbórea e arbustiva. Estudos desenvolvidos em campos de murundus no bioma Cerrado relatam que em muitos murundus não existem evidências da atividade de cupins e eles apresentam atividade biológica somente nos horizontes mais superficiais (SILVA et al., 2010; MOREIRA; PEREZ FILHO, 2017, ROSOLEN et al., 2019).

Os defensores da hipótese de erosão diferencial argumentam que os murundus são microrrelevos residuais, ou seja, as atividades de erosão física e química são realizadas sob influência dos fatores climáticos e geomorfológicos, predominantemente (ARAUJO NETO et al., 1986; SILVA et al., 2010). A dinâmica

hidrológica nessas áreas úmidas é caracterizada pela sazonalidade de elevação e de rebaixamento do nível freático de longo prazo. Essa dinâmica fornece as condições favoráveis para o rebaixamento diferencial de uma superfície antiga; sendo representada na atualidade pela altitude aproximadamente coincidente com o topo dos murundus com a superfície dos planaltos na área externa ao campo de murundus (FURLEY, 1986, p. 267). Ainda faltam evidências sobre como ocorre a erosão diferencial, bem como evidências sobre os processos e o funcionamento responsáveis pelo rebaixamento do solo no entorno desses murundus.

Os autores que propõem a hipótese genética que integra os mecanismos de padronização de vegetação e os processos de erosão diferencial argumentam que existe uma correlação entre a ocorrência de vegetação e os montes de terra (CRAMER et al., 2014; MARIMON et al., 2015). Afirmam, ainda, que a vegetação desempenharia o papel de controle erosivo; nesse sentido, o papel protetor da vegetação e os processos de erosão diferencial ocorridos nos campos de murundus seriam os responsáveis pela formação dos montes de terra.

Nesta pesquisa, parte-se, portanto, de dois pressupostos principais: i) as áreas úmidas a que os campos de murundus se associam se formaram por expansão centrífuga da zona hidromórfica, deprimida, em direção à superfície da chapada. Isso sugere a existência de uma sequência evolutiva desde o centro da área deprimida (estágio mais avançado da transformação), rumo à periferia da área deprimida (estágio inicial da transformação); e ii) os murundus existentes no interior da área úmida possuem características de solo e de vegetação semelhantes às da superfície da chapada do entorno.

Levando em conta estes pressupostos, foram levantadas as seguintes questões a respeito do campo de murundus da depressão em cabeceira estudada: i) considerando sua morfometria, os murundus da depressão apresentam uma distribuição aleatória ou se organizam segundo algum padrão ou gradiente desde o centro até a borda da área deprimida? ii) Os topos dos murundus apresentam altitude concordante com a superfície do relevo do entorno da depressão estudada? iii) A erosão diferencial é um fator importante para a gênese dos murundus da área de estudos?

Diante das considerações acima, apresentam-se as seguintes hipóteses de trabalho: i) o campo de murundus estudado possui um padrão interno na distribuição dos montes de terra, que revela a existência de um gradiente centro-periferia, e que

pode ser pensado segundo uma sequência evolutiva; ii) a erosão diferencial é um fator importante na gênese do campo de murundus e estes microrrelevos podem ser considerados remanescentes da paisagem da superfície da chapada situados no interior da área úmida deprimida.

Este trabalho teve como objetivo maior, compreender a estrutura de um campo de murundus, localizado em área de aplanamento do bioma Cerrado, e os processos determinantes para sua gênese. Como objetivos específicos, buscou-se: a) mapear os montes de terra de um campo de murundus representativo das superfícies aplanadas do bioma Cerrado, identificando as características geométricas dos montes de terra, tais como: área, perímetro, volume, altura, índice de circularidade e distância do vizinho mais próximo; b) analisar a distribuição espacial dos montes de terra nos campos de murundus, conforme as suas características geométricas; c) realizar a compartimentação de um campo de murundus a partir das suas características geométricas e espectrais, empregando imagens de sensoriamento remoto aéreo e orbital; e d) caracterizar os solos dos compartimentos do campo de murundus quanto à granulometria, composição química total e mineralogia.

# Capítulo I

## CAMPOS DE MURUNDUS DA SAVANA BRASILEIRA: UMA REVISÃO DE ASPECTOS TEÓRICOS

### Resumo

Os campos de murundus são paisagens encontradas em diversos locais no Brasil, particularmente em áreas de aplanamento da Savana Brasileira. São caracterizados como uma área onde ocorre a dispersão de montes de terra, formando uma interessante paisagem diferente do seu entorno. Esses microrrelevos se localizam na transição de ambientes ortomórficos para ambientes hidromórficos, emoldurando áreas úmidas na forma de pequenas depressões isoladas, associadas às cabeceiras de drenagem ou ao longo de pequenos cursos d'água. Os murundus da Savana Brasileira integram os fenômenos de padrão regulares ocorridos na natureza. Esses fenômenos são mundialmente pesquisados em diversas áreas do conhecimento, os quais buscam o entendimento dos mecanismos de funcionamento que levam a padronização desses montes de terra. Neste artigo de revisão foi realizado o levantamento dos principais estudos ocorridos em campos de murundus e outras categorias de montes de terra ao redor do mundo. Esperamos que os conhecimentos levantados fomentem pesquisas sobre o funcionamento desses ambientes, bem como a implementação de práticas de conservação dos serviços de regulação e da biodiversidade ocorrida nos campos de murundus.

**Palavras-chave:** montes de terra; áreas úmidas, hidromorfia, solos

## MOUNDS FIELDS OF THE BRAZILIAN SAVANNA: A REVIEW OF THEORETICAL ASPECTS

### Abstract

The mounds fields are landscapes found in several places in Brazil, particularly in the flattening areas of the Brazilian Savannah. They are characterized as an area where earth-mounds are dispersed, forming an interesting landscape different from their surroundings. These micro-reliefs are in the transition from orthomorphonic environments to hydromorphic environments, framing wet areas in the form of small and isolated depressions, associated with drainage headwaters or along small water courses. The earth-mounds of the Brazilian Savanna are part of the regular pattern phenomena that occur in nature. These phenomena are researched worldwide in various areas of knowledge, which seek to understand the working mechanisms that lead to the standardization of these mounds of earth. In this review article, a survey of the main studies occurred in mounds fields and other categories of earth-mounds around the world was carried out. We hope that the knowledge raised will encourage research on the functioning of these environments, as well as the implementation of conservation practices for regulatory services and biodiversity that took place in the mound fields.

**Keywords:** 1: earth-mounds; wetlands, hydromorphism, soils.

## **1. INTRODUÇÃO**

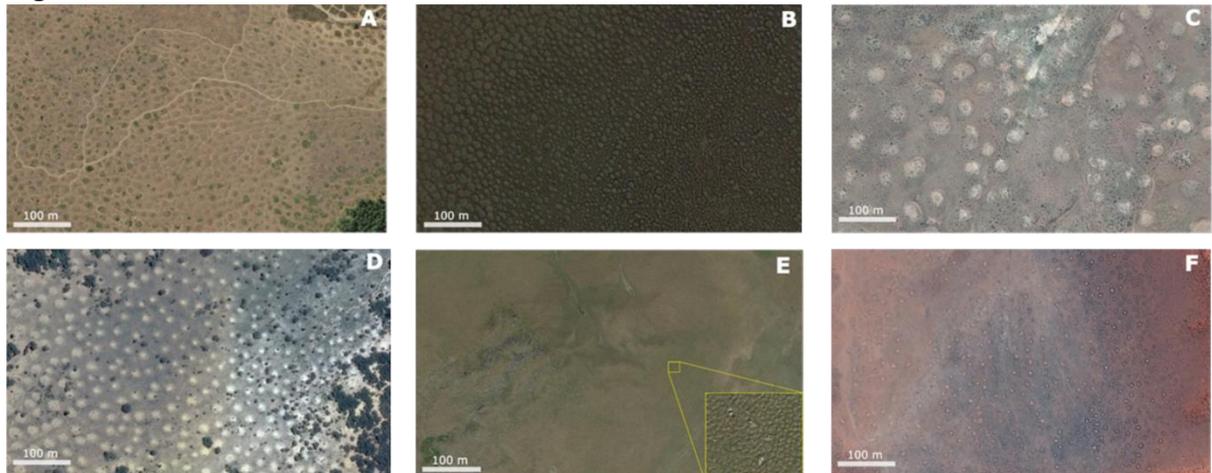
### **1.1.1 Definição**

Murundus são microrrelevos comuns no Brasil, formados por montes de terra de origem natural. Recebem diversas denominações, sendo uma das mais comuns o termo murundu, do dialeto quimbundo, referente à montanha ou monte; montículo; montão (MENDONÇA, 2012). Esse termo é a expressão utilizada para se referir aos montes de terra ocorridos nos biomas Pantanal (OLIVEIRA FILHO, et al., 1992), Cerrado (ARAÚJO NETO et al., 1986) e Amazônia (SILVA et al. 2017). Também ocorrem outras denominações regionais menos comuns, como: covoal, monchão, cocuruto (OLIVEIRA FILHO et al., 1990; SCHNEIDER; SILVA, et al., 1991). Individualmente, os murundus são elevações semicirculares, arredondadas ou ovais, com dimensões médias de 10 metros de comprimento, 70 centímetros de altura e 6 metros de largura (ARAÚJO NETO et al., 1986). Quando agrupados na paisagem, são denominados campos de murundus.

### **1.1.2 Categoria do fenômeno e gênese dos montes de terra**

Os campos de murundus integram o grupo dos microrrelevos que ocorrem em padrões repetidos em diversas paisagens mundiais (Figura 3) e despertam a atenção de botânicos, ecólogos, biólogos, geógrafos e geocientistas interessados na descoberta dos padrões espaciais e dos processos que geram esse fenômeno (TUNER, 1989; BELL, 2012).

**Figura 3.** Montes de terra ao redor do mundo e no Brasil.



(A) *mima-mounds*, América do norte (46° 53' 48.43" N, 123° 2' 55.44" O). (B) Murundus, Estado de Minas Gerais no Brasil, (C) *heuweltjies*, África do Sul (29°40' 57.95" S, 17° 36' 49.17" L); (D) *Termite-mounds*, Estado da Bahia no Brasil (12° 28' 25.79" S, 41° 45' 38.22" O); (E) *Hummocks*, Cox Tor, Inglaterra (50° 34' 16.99" N, 4° 4' 40.12" O); e (F) *Fairy circles*, Deserto da Namíbia (24° 8' 32.16" S, 15° 40' 20.17" L)

A busca da gênese dos montes de terra encontrados no continente Africano (Fig. 3 C e F), na América do Norte (Fig. 3 A), em ambientes periglaciais da Europa (Fig. 3E) e na América do Sul (Fig. 3B) foi seguida por disputas de explicações teóricas, experimentos de campo e modelagem de meio ambiente para aferir o papel dos componentes bióticos (flora e fauna) e abiótico (clima e geomorfologia) que influenciam a formação desses montes de terra. Persistem importantes controvérsias sobre a formação dos *heuweltjies*, na África do Sul (Fig. 3 C), os *mima-mounds* (Fig. 3 A) e os murundus no Brasil (Fig. 3 B) (PRINGLE; TARNITA, 2017, p. 368).

Os estudos sobre os *heuweltjies*, na África do Sul, que defendem a formação dos montes de terra por insetos construtores de ecossistemas, atribuem a dispersão e a padronização dos microrrelevos como sendo resultado da competição intraespecífica desses animais para obtenção de recursos e manutenção da sobrevivência da colônia (HOLLOBLER, 1979; THORNE; HAVERTY, 1991). Por outro lado, as pesquisas que atribuem a formação dos *heuweltjies* aos fatores abióticos defendem que: a composição do solo dos montes, que possuem cascalho e rochas (>2Kg), impossibilitaria a hipótese da ação de construtores de ecossistemas, sendo a erosão diferencial ocorrida em épocas pretéritas, com maior umidade, a responsável pela gênese desses montes de terra (CRAMER et al., 2012). Para McAuliffe (2014), entretanto, os *heuweltjies* foram formados principalmente a partir da

deposição eólica de sedimentos capturados pela vegetação, a qual provocaria um acúmulo progressivo de material no solo dos montes de terra.

Pesquisas sobre a gênese dos *mima-mounds* atribuem à fauna fossorial, encontrada nesses ambientes, a construção dos montes de terra (HORWATH; JOHNSON, 2006). O transporte de material realizado por esses roedores, seguido da erosão diferencial, seriam os responsáveis pela formação dos *mima-mounds* (GABET et al., 2014). Para Ritchie (1953), os montes mima foram formados a partir do degelo ocorrido nesses ambientes, o qual removeu parte do material ao redor dos núcleos congelados hemisferoidais.

### 1.3 Hipóteses genéticas dos murundus

As pesquisas sobre a gênese dos murundus no Brasil apresentam três hipóteses distintas. A primeira atribui a formação dos montes de terra à dinâmica hídrica na paisagem, que provocaria a erosão diferencial no solo a partir do transporte do material ao redor dos montes (ARAÚJO NETO et al. 1986; FURLEY, 1986). Silva et al. (2010) comparam a assinatura de isótopos de carbono entre o material do solo presente nos murundus, àquele encontrado no solo da depressão hidromórfica do entorno dos montes de terra e os solos do planalto, na borda do campo de murundus. Constataram que os solos dos murundus possuem maior semelhança com o material do solo presente em áreas de planalto. Essas informações sugerem que os murundus são produtos relictuais do planalto. Contudo, ainda não existem evidências na literatura apontando como ocorre a erosão diferencial para a formação dos murundus.

A segunda hipótese de formação dos murundus, de origem biótica, foi proposta por Oliveira-Filho (1992), ao estudar os murundus no Pantanal Mato-grossense. O autor constatou que os solos ocorridos nas áreas alagáveis, no interior do campo de murundus, e os presentes nas áreas não alagáveis, na borda dos murundus, apresentaram textura mais grossa e eram pobres em nutrientes. Em contraste, os solos ocorridos sob os montes apresentaram textura mais fina, menor pH e maiores quantidades de nutrientes minerais, bem como a presença de cupins. Segundo a explicação biótica para formação dos murundus, os montes de terra seriam o resultado de sucessivas construções e degradações de colônias de térmitas

(paleotermiteiros), sendo posteriormente ocupados por vegetação (OLIVEIRA-FILHO 1992).

A terceira hipótese de formação dos murundus decorre da interação de múltiplos mecanismos relacionando os fatores bióticos e os abióticos. Nesse contexto, a gênese e a distribuição dos montes de terra foram associadas ao padrão de dispersão da vegetação e à erosão diferencial. Essa explicação se apoia na relação existente entre as propriedades morfológicas dos murundus, como, por exemplo, volume, área e perímetro, com a presença de vegetação nos montes, as quais desempenham a proteção contra erosão (CRAMER; BARGER, 2014). Pesquisas em áreas com a presença de murundus na planície de inundação no Rio Araguaia, no sudeste da Amazônia, constataram a ocorrência de um gradiente de vegetação da borda para o interior do campo de murundus. As áreas sujeitas às maiores condições de alagamento possuem murundus com menor porte e baixa presença de espécies arbustivas e arbóreas. Nos locais com menores condições de alagamento, foram constatados murundus de maior porte e maior presença de espécies arbustivas e arbóreas sobre os montes (MARINON et al., 2015).

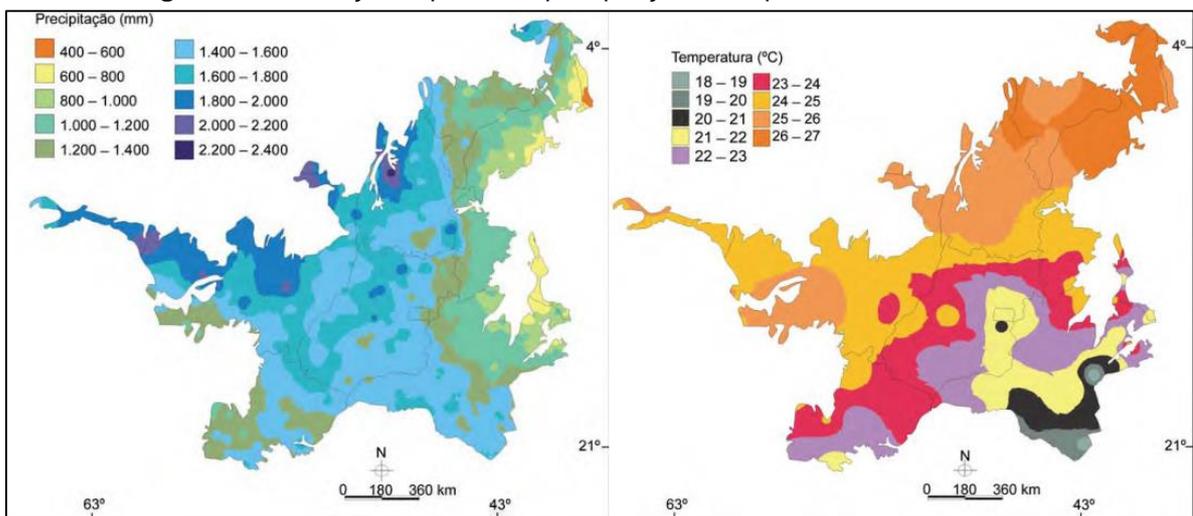
#### **1.4 Aspectos climáticos e os Campos de Murundus**

Os campos de murundus são fortemente influenciados pela dinâmica climática da Savana Brasileira, onde a distribuição da precipitação anual contribui para a elevação do nível freático, provocando o alagamento sazonal nessas microformas de relevo durante o período de maior precipitação.

O clima regional do Cerrado pode ser definido pela classificação de Köppen em clima Tropical Megatérmico (Aw), caracterizado pelo inverno seco e chuvas de verão, com temperatura média superior a 18° C; e o Mesotérmico (Cwa), caracterizado pelo inverno seco (tropical de altitude) e temperatura média do mês mais quente maior do que 22 °C (DA SILVA et al., 2008, p. 105). Medidas climatológicas realizadas no período compreendido entre de 1977 e 2010 no bioma do Cerrado, revelam que a precipitação média anual é de 1.486 mm (CAMPOS; CHAVES, 2020; RIBEIRO; WALTER, 2008).

A distribuição de chuva no Bioma Cerrado em escala regional, varia entre 1.200 e 1.800 mm. Em áreas de grande elevação, como os topos de chapadas, locais de maior ocorrência dos campos de murundus do Cerrado, é comum o registro de índices de precipitação anual maiores de 1.800 mm. Os meses de primavera e verão (outubro a março) concentra a maior parte das chuvas. A estação seca apresenta de 3 a 5 meses de duração, entre os meses de abril e setembro (SETTE, 2005; DA SILVA et al., 2008; NASCIMENTO; NOVAIS, 2020). A Figura 4 apresenta a distribuição espacial da precipitação média anual e a temperatura média anual para o bioma Cerrado, conforme Da Silva et al. (2008).

**Figura 4.** Distribuição espacial da precipitação e temperatura do bioma Cerrado



Fonte: Da Silva et al. (2008)

A variabilidade da precipitação e da temperatura ocorridas no bioma Cerrado (Figura 4), no espaço e no tempo, são os fatores que evidenciam a distribuição de umidade desse ambiente. A precipitação desigual é uma característica marcante do hidroperíodo do bioma Cerrado, apresentando uma estação seca e outra chuvosa. Esse fator contribui para a formação de um pulso de inundação das áreas úmidas ocorrida nesse bioma, formando áreas alagadas sazonalmente (JUNK et al., 2014). Particularmente, nas pequenas zonas ripárias ao longo de pequenos cursos d'água ou cabeceiras de drenagem, onde ocorrem os campos de murundus.

## 1.5 Processos pedogenéticos

Os principais processos pedogenéticos ocorridos nos campos de murundus estão relacionados à transição de ambientes ortomórficos para ambientes hidromórficos, sendo os principais: a) a gleização; b) a plintitização; e c) a lessivagem (FANNING e FANNING, 1989).

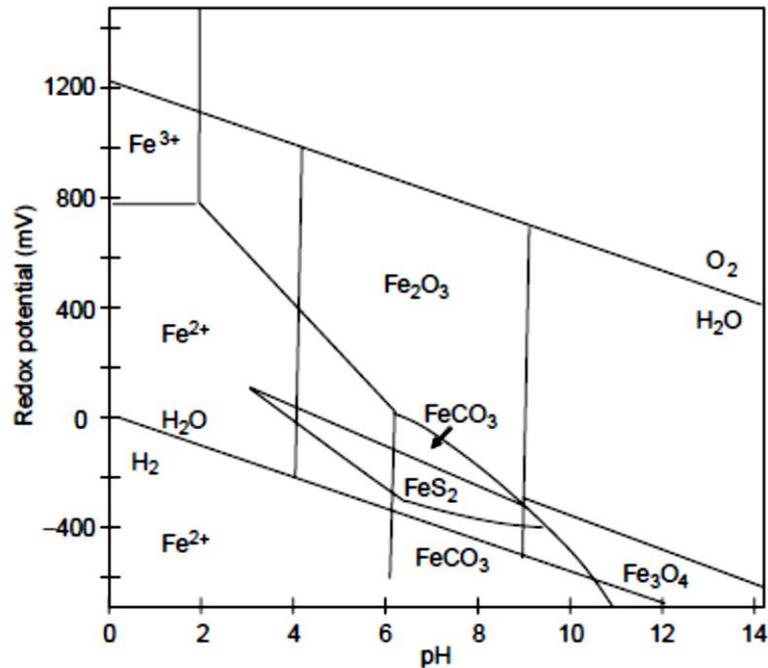
Esses processos ocorrem no contexto da expansão remontante da hidromorfia sobre os setores de menor umidade no solo (PETERSCHMITT et al., 1996), provocando a diminuição dos óxidos de ferro no solo, como a hematita, e o aumento da proporção de goethita. Nesses ambientes, a cor dos horizontes do solo apresenta um gradiente passando do vermelho para o amarelo, seguindo para cores nos tons de cinza à esbranquiçada. Os fluxos hídricos das áreas hidromórficas afetadas pela elevação do nível freático favorecerem o transporte seletivo de partículas de argila, sob a forma dissolvida e particulada, e, conseqüentemente, a acumulação de areia (ROSOLEN et al., 2002, ROSOLEN et al., 2007)

### **1.5.1 Geoquímica do ferro**

A dinâmica do ferro no ambiente pedogênico em área úmidas é condicionada por quatro fatores predominantes: i) a disponibilidade de água (Eh), que proporciona as condições redutoras ou oxidantes no solo, afetando as formas de disponibilidade de ferro; ii) o pH do solo, uma vez que condições de maior acidez favorecem a dissolução do ferro; iii) a presença de matéria orgânica no solo (fonte de elétrons) ou microrganismos que auxiliam na complexação do ferro; e iv) tempo de residência da água, uma vez que águas estagnada ou se movendo muito lentamente favorecem a mobilização do ferro (VEPRASKAS; FAULKNER, 2000, p. 87).

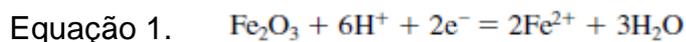
O comportamento dos minerais de Fe encontrados no solo pode ser interpretado com base no diagrama de Pourbaix. Esse diagrama exibe as formas mais estáveis do ferro, em determinadas condições de acidez (pH) e de potencial redox (Eh) (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de Eh e pH para redução do Fe (III) - Fe (II).



Fonte: DELAUNE; REDDY (2008, p. 408).

Os minerais férricos, como a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), possuem maior estabilidade na faixa de pH intermediário, entre 4 e 9. Sob pH mais ácido, abaixo de 4, o Fe<sup>3+</sup> transforma-se em Fe<sup>2+</sup>, que é solúvel em água e pode ser transportado pela infiltração da água no solo, caso as condições do meio permaneçam redutoras (equação 1) (SCHWERTMANN, 1991, VEPRASKAS, 2004)



Em ambiente de redução de Fe, em condições anaeróbias, os processos de translocação formam horizontes acinzentados com ou sem mosqueados, caracterizando os processos de Gleização e Plintitização dos solos hidromórficos. O processo ocorre por meio de interações bioquímicas, com a participação de micro-organismos no solo (PONNAMPERUMA, 1972; VEPRASKAS, 2001, KÄMPF; CURTI, 2012).

As condições de oxidação e de redução do solo impostas pela variação da altura do nível freático favorecem a precipitação do ferro nos horizontes do solo, formando áreas mosqueadas, plintitas ou petroplintitas. Essas feições possuem a coloração amarelada, marrom-avermelhada e alaranjada, localizadas ao longo de

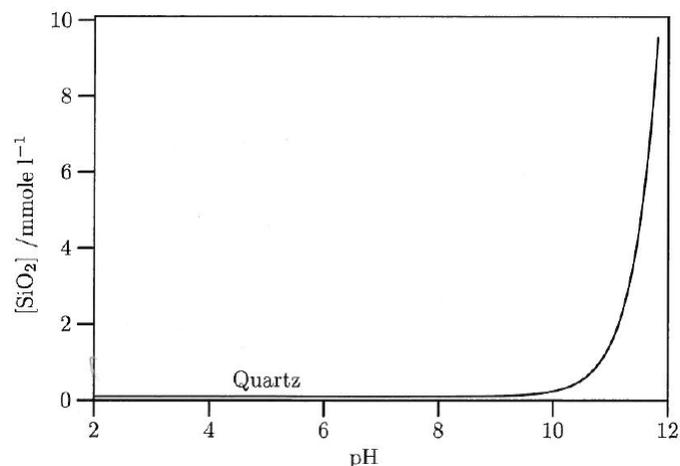
poros e superfície de agregados na matriz cinzenta do solo mal drenado. São caracterizados por individualização de manchas, concreções ou de horizontes endurecidos (FANNING e FANNING, 1989, EZE et al., 2014).

Outra forma de migração do ferro em áreas úmidas ocorre a partir da ação de ácidos orgânicos (fúlvico/húmicos), formando complexos organometálicos ou quelatos. Para que a matéria orgânica se movimente no solo, suas partículas necessitam estar quelatadas com cátions metálicos de ferro ou alumínio (PETRUZZELLI et al., 2005, RANCOURT et al., 2005, LUKO-SULATO et al., 2021).

### 1.5.2 Geoquímica do silício

A disponibilidade da sílica em solos maduros em áreas úmidas no bioma Cerrado está associada ao Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), encontrado na fração areia e silte, e à Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), encontrada na fração argila. Para Dewolf e Bourrié (2008, p.56-58), a mobilização geoquímica do silício ocorre pela solubilidade por meio de uma reação de hidrólise do quartzo. Ele explica que o acúmulo relativo de quartzo mineral residual em formações superficiais ocorre devido às seguintes razões i) o quartzo se dissolve lentamente; ii) a solubilidade do quartzo é baixa; e iii) o quartzo é protegido pela alteração de outros silicatos. A Figura 6 apresenta a variação de solubilidade do quartzo em função do pH a 25°C.

**Figura 6.** Variação de solubilidade do quartzo em função do pH a 25°C.



Devido à baixa mobilidade e solubilidade da sílica em ambientes naturais, alterações nos teores dessa substância quando encontrada no solo ou na água,

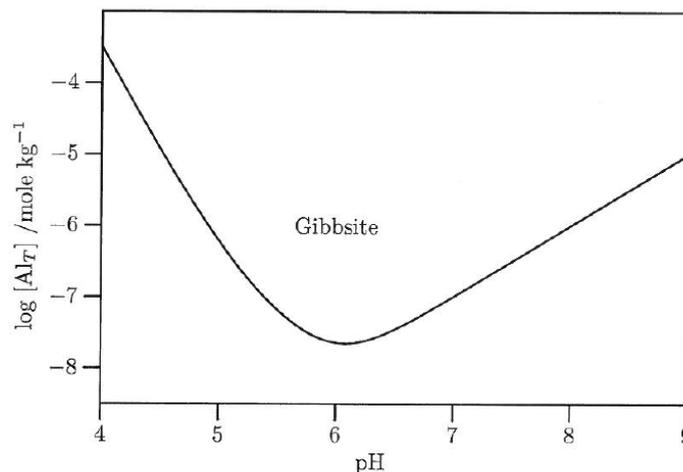
constituem indicadores de reações físico-químicas para interpretações genéticas ocorridas em coberturas superficiais.

### 1.5.3 Geoquímica do alumínio

O alumínio encontrado em solos tropicais altamente intemperizados está presente, principalmente, nos minerais Gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e Caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), ambas na fração argila.

A solubilidade do alumínio encontrada na Gibbsita está relacionada sobretudo com o pH do solo (DEWOLF; BOURRIÉ, 2008), conforme a Figura 7.

**Figura 7.** Variação de solubilidade da gibbsita em função do pH a 25°C.



A Gibbsita é pouco solúvel em pH em torno de 6. Sendo a solubilidade aumentada em pH muito ácido, próximo de 4, e ambientes mais alcalinos, acima de pH 8.

### 1.5.4 Migração de argila (lessivagem)

A lessivagem é um processo pedogenético de translocação, caracterizada pela migração de material particulado no solo (KÄMPF; CURI, 2012), sem qualquer modificação química dos minerais. Os minerais são arrastados verticalmente e/ou horizontalmente na fração argila ou formando complexos argila-húmus, dispersos (DUCHAUFOR, 1951).

As condições ambientais que favorecem o processo de lessivagem são:

- i) o clima úmido, com solo encharcado por mais de três meses, seguido de um período seco com pelo menos noventa dias consecutivos; substrato rochoso com fragmentos grosseiros; ambiente com boa drenagem e infiltração; relevo plano; grande intervalo de tempo sob essas condições ambientais;
- ii) variações climáticas ao longo do ano, com períodos chuvosos e secos alternados (FANNING; FANNING, 1989);
- iii) quantidade e tipos de colóides do solo, natureza e concentração de eletrólitos, atividade das argilas e o fluxo de água no solo (NETTLETON et al., 1987); e
- iv) precipitação média anual excedendo a evapotranspiração em pelo menos 150 mm ou mais de 400 mm para lessivagem mais expressiva. Segundo Quénard et al. (2011), a lessivagem é mais intensa quando o substrato (material de origem) possui textura arenosa a franco-arenosa; e o relevo é plano a suave ondulado favorecendo maior percolação de água e transporte de materiais finos em suspensão.

#### **1.5.5 Dinâmica geoquímica dos solos em campos de murundus**

Os processos pedogenéticos ocorridos nos campos de murundus do Cerrado Brasileiro estão associados a uma dinâmica de desferruginização dos Latossolos. Esse processo ocorre nos locais de alto curso, durante a instalação da rede hidrográfica em áreas de baixa declividade, caracterizada por nascentes ou em rios de baixa hierarquia. Nesse ambiente ocorre uma área plana, muitas vezes extensa, com alta perda geoquímica de ferro, formando feições redoxmórficas no solo em decorrência da hidromorfia sazonal devido ao aumento do nível freático (ARAUJO NETO et al., 1986; FURLEY, 1986; SCHNEIDER; SILVA, 1991).

Estudos realizados em nível de catena, ligando o setor do planalto ao campo de murundus, buscaram o entendimento dos processos geoquímicos ocorridos na evolução da cobertura pedológica (SCHNEIDER; SILVA, 1991; MARTINS; ROSOLEN, 2014; ROSOLEN et al., 2019). Essas pesquisas destacam as seguintes contribuições: i) na parte superior (planalto) ocorrem os solos com boa drenagem, caracterizados por solos argilosos, com estrutura granular, com cores em tons de vermelho-amarelo e amarelo (10YR – 5YR); ii) na porção média de catena, local de

ocorrência dos murundus, nota-se uma forte ação da hidromorfia. Os solos continuam argilosos, as cores do solo variam em tons de amarelo (10 YR - 7,5 YR), no topo do perfil. Em profundidade média, há a ocorrência de tons em cinza com manchas vermelho-amarelas; iii) no terço inferior da catena, caracterizado pela ausência de murundus, ocorre uma camada abundante em matéria orgânica; abaixo dessa camada, um horizonte cinza, argiloso, maciço, com rachaduras médias e ocorrência de nódulos ferruginosos, mosqueados em meio a uma matriz acinzentada.

No contexto da evolução da paisagem local, em nível de vertente, a cobertura pedológica com a presença de campos de murundus é associada à perda geoquímica e de material particulado. Segundo Queiroz Neto (2012), a formação e a evolução das depressões fechadas, semifechadas e abertas é da responsabilidade de “erosão” geoquímica. Nesses locais, ocorre a instalação inicial dos cursos d’água, para o posterior estabelecimento da própria rede de drenagem. Estudos semelhantes foram conduzidos na Amazônia brasileira, sendo verificados que a expansão remontante da hidromorfia, o intemperismo e a perda geoquímica ocorridos no solo são mecanismos importantes de evolução das paisagens tropicais (ROSOLEN et al., 2007; ROSOLEN, 2012).

Em pesquisas realizadas em solos de campos de murundus na Chapada entre as Cidades de Uberaba-Uberlândia, Rosolen et al. (2019) propõem uma ligação entre a dinâmica da água, a erosão química do material do solo e o desenvolvimento da paisagem na Savana Brasileira. Sugerem, assim, que a formação de montículos está associada à erosão química do material do solo presente entre os montes. A erosão geoquímica provocaria o colapso da microestrutura do solo, com dissolução mineral seguida pela exportação de solutos de elementos químicos pela água.

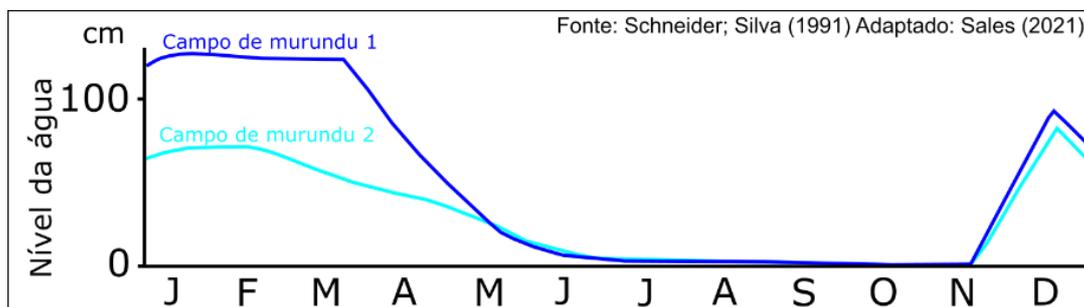
## **1.6 Dinâmica hídrica em campos de murundus**

A dinâmica hídrica dos campos de murundus em cabeceiras de drenagem possui a precipitação como a principal fonte de fornecimento de água na estação chuvosa, provocando o acúmulo de água em superfície entre os meses de novembro e junho. Nos meses com menores precipitação, ocorre a lenta infiltração da água acumulada. Estudos de dinâmica da água em campos de murundus, realizados no norte do Estado de Mato Grosso e na Chapada Uberaba-Uberlândia, indicam a

presença de dois aquíferos, um suspenso, de características sazonais, que ocorre no início do período chuvoso - alimentado pela água da chuva e pelo escoamento superficial -, e outro perene e profundo, separado do suspenso por uma camada argilosa no interior da cobertura pedológica. Estes dois aquíferos se encontram após a elevação do nível freático inferior, alimentado pela infiltração da água no solo (SCHNEIDER; SILVA, 1991; CASTRO JÚNIOR, 2002; CASTRO JÚNIOR et al., 2004).

Medições realizadas com o uso de piezômetros nos campos de murundus de cabeceiras de drenagem no Triângulo Mineiro apontam para uma grande variação do nível freático. Atinge até 1,83 m de profundidade na estação seca (outubro) e 1,46 m de altura (acima da superfície) no centro da depressão (março), perfazendo uma variação de 3,29 m de nível em seis meses (SCHNEIDER; SILVA, 1991). A variação de altura do nível freático em campo em relação à superfície, obtida no estudo acima, é apresentada da Figura 8.

**Figura 8.** Variação mensal de alagamento em campo de murundus de cabeceira de drenagem



Os fluxos hídricos subsuperficiais em campo de murundus analisados com uso de Tomografia por Resistividade Elétrica (ERT) por Furlan et al. (2020) e por Furlan et al. (2021), na mesma área de estudo da presente pesquisa, demonstraram que os campos de murundus possuem intenso fluxo lateral e vertical de água, condicionado por uma camada litológica de menor permeabilidade e pelos horizontes do solo (lateral) em direção às áreas de recarga no centro da depressão (vertical), para alimentar o aquífero confinado em subsolo.

## 1.7 Aspectos vegetacionais

Os Campos de Murundus são uma fitofisionomia do bioma Cerrado, específica do Parque de Cerrado (RIBEIRO; WALTER, 2008). A fitofisionomia ocorre na transição de áreas com melhores condições de drenagem para áreas com solos sazonalmente alagados. Nesses locais, ocorre uma mudança no padrão de vegetação da paisagem, passando de Campo Cerrado, caracterizado pela presença de uma vegetação lenhosa aberta com predominância de espécies de arbóreas e arbustivas, para o campo sujo ou limpo, com vegetação esparsas, menor presença de espécies arbóreas/arbustivas e presença de gramíneas (ARAUJO NETO et al., 1986).

No interior do campo de murundus a vegetação é organizada de duas formas distintas. A primeira, se refere ao topo dos montes, com a predominância de espécies arbóreas e arbustivas. Ao redor dos montes, nas áreas deprimidas, ocorre vegetação herbácea (Figura 9) (EITEN 1985; ARAÚJO NETO et al. 1986; OLIVEIRA-FILHO; FURLEY 1990; OLIVEIRA-FILHO 1992, RESENDE et al., 2004, MARINON et al., 2012).

**Figura 9.** Vista aérea da vegetação em campo de murundus



Fonte: Sales (2019)

A ocorrência de espécies lenhosas típicas de campo cerrado no topo dos murundus varia conforme as suas características morfológicas e as condições de alagamento. Os murundus de maior volume fornecem um ambiente livre de condições severas de umidade no solo, melhorando condições para enraizamento da vegetação (ARAUJO NETO et al., 1986; OLIVEIRA-FILHO, 1992; PONCE; CUNHA,1993). Os

murundus localizados na borda das áreas úmidas, em locais menos sujeitos ao alagamento, tendem a possuir uma maior diversidade espécies arbóreas/arbustivas do que aqueles localizados em áreas mais sujeitas ao alagamento (MARIMON et al., 2012, 2015; SILVA et al., 2010). O gradiente de vegetação arbórea encontrado sob os montes de terra também foram aferidos pelo cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), a partir de imagens de alta resolução espacial, obtidas por veículo aéreo não tripulado (VANT) (SALES et al., 2021).

### **1.8 Morfologia, estrutura e distribuição de campo de murundus**

Diversos trabalhos de morfologia dos murundus foram realizados para entender a estrutura e a formação do campo de montes (ARAÚJO NETO et al., 1986; SCHNEIDER; SILVA, 1991; CRAMER e BARGER, 2014; SILVA et. al. 2020). Esses trabalhos apontam para uma grande variabilidade das características geométricas dos murundus (perímetro, área, altura, volume, índice de circularidade e distância do vizinho mais próximo).

Araújo Neto et al. (1986) propuseram uma classificação dos campos de murundus, conforme a posição geográfica na paisagem e a dinâmica hídrica local, sendo dividida em duas classes: i) associado predominantemente com águas subterrâneas e infiltração, localizados em cabeceiras de drenagem e em pequenos vales; e ii) associado apenas ao escoamento, sem contato com a água subterrânea, localizados em interflúvios suavemente inclinados e na parte superior de pequenos vales.

Schneider e Silva (1991) delimitaram três compartimentos no interior de campos de murundus de cabeceira de drenagem no Triângulo Mineiro, sendo: i) uma zona externa onde ocorrem os murundus com maior tamanho; ii) uma zona interna em relação à primeira, onde ocorre uma redução do número de murundus; iii) e uma zona central, sem ocorrência de murundus. Contudo, a proposta não considerava aspectos relativos à distribuição espacial dos montes de terra, tampouco à morfologia dos mesmos.

Recentemente, Sales et al. (2021) realizaram a compartimentação de um campo de murundus de cabeceira de drenagem por meio de procedimentos estatísticos nas variáveis geométricas dos montes de terra e nas características espectrais desse ambiente. Esta pesquisa apontou que os murundus são distribuídos

de forma padronizada no interior do campo de murundus. Os montes de terra com maior tamanho (área, volume, perímetro) ocorrem na borda da área úmida (terreno um pouco mais elevado); essas características morfológicas reduzem de forma gradativa em direção ao centro da depressão.

### **1.9 Relevância ambiental e ameaças**

Os campos de murundus e suas áreas úmidas representam zonas da paisagem de comportamento geoquímico especial, e podem contribuir para os processos de formação do solo, como migração elementar para o intemperismo mineral e para o acúmulo de matéria orgânica no solo (FANG et al., 2019). Os campos de murundus integram também as zonas ripárias, responsáveis pelo fornecimento de serviços ecossistêmicos, tais como: provisionamento de materiais genéticos, bioquímicos, estoque e sequestro de carbono (NÓBREGA et al., 2020). Eles participam da dinâmica hidrológica da paisagem, funcionando como áreas de recarga de aquíferos confinados abaixo da área úmida ou áreas de descarga associadas à dinâmica superficial da água (FURLAN et al., 2020; 2021).

A ocupação antrópica do bioma Cerrado, acelerada a partir da década de 1970, foi facilitada pela configuração das suas características fisiográficas. As extensas áreas de planalto e presença de Latossolos foram fatores determinantes para instalação da agricultura mecanizada para produção de monocultura (FERNANDES; PESSOA, 2011). A presença acentuada da ocupação da agricultura nas proximidades de áreas úmidas do bioma Cerrado apresenta impactos já estudados, como: i) a eutrofização, em decorrência do aumento da concentração de nitrogênio total nesses ambientes, lixiviado a partir de áreas agrícolas (DUNCK et al., 2014); ii) contaminação de áreas úmidas e várzeas por metais pesados como Arsênio (As), Nitrogênio (N), Cromo (Cr), Cobre (Cu) (ROSOLEN et al., 2015a); e iii) a conversão de áreas úmidas em áreas de cultivo, o que representa uma ameaça direta nesses ambientes, facilitada por conflitos e mudanças no código florestal brasileiro (ROSOLEN et al., 2015b).

### **Considerações finais**

As controvérsias científicas sobre a gênese dos campos de murundus da Savana brasileira ainda persistem. Os estudos que defendem a erosão diferencial como o mecanismo de formação dos montes de terra demonstraram um modelo explicativo do processo de ocorrência dos montes de terra e de evolução dos campos de murundus (ARAUJO NETO et al., 1986; FURLEY, 1986; SCHNEIDER; SILVA, 1991, SILVA et al., 2010). O rebaixamento da microtopografia do relevo pelas perdas geoquímica e o decorrente colapso da microestrutura do solo entre os murundus (ROSOLEN et al., 2019), podem estar associados à distribuição dos microrrelevos de acordo com as suas características morfométricas (SALES et al., 2021). Porém, ainda não foram encontradas evidências que apontem relação das características geoquímicas com a distribuição dos montes de terra.

Apesar de que, atualmente, exista uma maior quantidade de estudos sobre a formação dos murundus da Savana brasileira realizados no contexto da evolução da cobertura pedológica. Não se pode descartar o papel de agentes zoogeomórficos na construção de microforma de relevo (VILES et al., 2020; BÉTARD, 2021), bem como os efeitos que a bioturbação realiza nos processos ocorridos no solo, como, por exemplo, no transporte de sedimentos e na proteção contra erosão exercida pelas raízes das plantas (GABET et al., 2003). Pesquisas realizadas em campos de murundus da Savana brasileira apontam a existência de uma camada com a presença de bioturbação sob os montes de terra, no horizonte mais superficial (SCHNEIDER; SILVA, 1991, ROSOLEN et al. 2019; MOREIRA et al., 2017).

A vegetação presente sob os montes de terra, no interior dos campos de murundus, ocorridas na forma de gradiente (MARIMOM et al., 2015; SALES et al., 2021), pode exercer uma proteção contra a erosão geoquímica em ambientes sazonalmente alagados. Contudo, são necessários mais estudos que integrem múltiplos mecanismos para a formação dos murundus, como, por exemplo, os realizados em pesquisas da contribuição da vegetação, denominada *matorral*, encontradas na região do Mediterrâneo, para a formação de estruturas microtopográficas. A interação dessas plantas com o solo, a erosão hídrica e os processos de sedimentação em encostas, desempenham um papel importante na morfometria dos pequenos montes de terra, expressos na forma e na altura (BOCHET et al., 2000).

Em contraste às múltiplas relações dos campos de murundus com os aspectos vegetacionais, hidrológicos, pedológicos, biológicos e geoquímicos, que podem contribuir para a formação desta singular paisagem da Savana brasileira, esses microrrelevos sofrem ameaças de degradação ambiental pela expansão das atividades agropecuárias, em busca de novas áreas de cultivo (ROSOLEN et al., 2015b). A adoção de medidas legais para proteção ambiental dessas áreas úmidas e a realização de pesquisas sobre o funcionamento desses ambientes, podem contribuir para melhores práticas de preservação e de conservação dos campos de murundus neste ecossistema de savana.

## Referências

- ARAUJO NETO, M. D. et al. The murundus of the cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, p. 17-35, 1986. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559769>. Acesso em: 04/10/2018.
- BELL, S. **Landscape: pattern, perception and process**. Routledge, 2012.
- BÉTARD, F. Insects as zoogeomorphic agents: an extended review. **Earth Surface Processes and Landforms**, 46(1), 89-109, 2021. DOI: 10.1002/esp.4944
- BOCHET, E., POESEN, J., RUBIO, J. L. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, 25(8), 847-867, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:8<847::AID-ESP103>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:8<847::AID-ESP103>3.0.CO;2-Q)
- CAMPOS, J.O.; CHAVES, H.M.L.. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 157-169, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351019>
- CASTRO JUNIOR, P. R. **Dinâmica da água em campos de murundus no planalto dos Parecis. 2002. 195 p.** 2002. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geografia) FFLCH-USP. São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-07032003-161246/pt-br.php>. Acesso em: 04/06/2019.
- CASTRO JÚNIOR, P. R.; GIRARD, P.; DA CUNHA, C. N. DINÂMICA HÍDRICA EM CAMPOS DE MURUNDUS. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23439>. Acesso em: 19/03/2018.
- CRAMER, M. D., INNES, S. N., & MIDGLEY, J. J. Hard evidence that heuweltjie earth mounds are relictual features produced by differential erosion. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 350, 189-197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.06.030>
- CRAMER, M. D.; BARGER, N. N. Are mima-like mounds the consequence of long-term stability of vegetation spatial patterning?. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 409, p. 72-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.04.026>
- DA SILVA, F. A. M. et al. Clima do bioma Cerrado. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. ALBUQUERQUE, ACS, p. 93-148, 2008.
- DEWOLF, Y., BOURRIE, G. Les formations superficielles. Génèse. Typologie. Classification. **Paysages et environnements**. Ressources et risques (pp. 896-p), 2008.
- DUCHAUFOR, Philippe. Lessivage et podzolisation. **Revue forestière française**, 1951.
- DUNK, B.; RUWER, Daiane Trevisan; FELISBERTO, Sirlene Aparecida. EunotiaceaeKützing (Bacillariophyceae) perifíticas de áreas úmidas do Cerrado (veredas) no Brasil. **Iheringia. Série**

- Botânica**, v. 71, n. 3, p. 283-295, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Daiane-Ruwer/publication/311183257\\_Eunotiaceae\\_Kuetzing\\_Bacillariophyceae\\_perifiticas\\_de\\_areas\\_umidas\\_do\\_Cerrado\\_veredas\\_no\\_Brasil/links/587e923508ae4445c06fb4a5/Eunotiaceae-Kuetzing-Bacillariophyceae-perifiticas-de-areas-umidas-do-Cerrado-veredas-no-Brasil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Daiane-Ruwer/publication/311183257_Eunotiaceae_Kuetzing_Bacillariophyceae_perifiticas_de_areas_umidas_do_Cerrado_veredas_no_Brasil/links/587e923508ae4445c06fb4a5/Eunotiaceae-Kuetzing-Bacillariophyceae-perifiticas-de-areas-umidas-do-Cerrado-veredas-no-Brasil.pdf). Acesso em 10/10/2020.
- EITEN, G. 1985. Vegetation near Santa Teresinha, NE Mato Grosso. **Acta Amazônica** 15(3/4): 275-301. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-43921985153301>
- EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, v. 24, n. 2, p. 153-166, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60002-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60002-3)
- FANG, Q., HONG, H., ALGEO, T. J., HUANG, X., SUN, A., CHURCHMAN, G. J., LIU, Y. Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China. **Geoderma**, 344, 82-98, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.008>
- FANNING, D. S., FANNING, M. C. B. **Soil morphology, genesis and classification**. John Wiley and Sons Inc., 1989.
- FERNANDES, P. A., PESSÔA, V. L. S. O Cerrado e suas atividades impactantes: uma leitura sobre o garimpo, a mineração e a agricultura mecanizada. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 3, n. 7, 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/45114>. Acesso em: 04/09/2020.
- FUNCH, R. R. Termite mounds as dominant land forms in semiarid northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, 122, 27-29, 2015.
- FURLAN, L. M., ROSOLEN, V., MOREIRA, C. A., BUENO, G. T., FERREIRA, M. E. The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04174-7>
- FURLAN, L. M., ROSOLEN, V., SALLES, J., MOREIRA, C. A., FERREIRA, M. E., BUENO, G. T., MOUNIER, S. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 8, n. 3, p. 224-244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0004>
- FURLEY, P. A. Classification and distribution of murundus in the cerrado of Central Brazil. **Journal of Biogeography**, p. 265-268, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2307/2844925>
- FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3-4, p. 223-241, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.1999.00142.x>
- GABET, E. J., PERRON, J. T., JOHNSON, D. L. Biotic origin for Mima mounds supported by numerical modeling. **Geomorphology**, 206, 58-66, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.018>
- GABET, E. J., REICHMAN, O. J., SEABLOOM, E. W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, 31(1), 249-273, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141314>
- HÖLLDOBLER, Bert. Territories of the African weaver ant (*Oecophylla longinoda* [Latreille]); a field study. **Zeitschrift für Tierpsychologie**, v. 51, n. 2, p. 201-213, 1979. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1979.tb00683.x>
- HORWATH, J. L., JOHNSON, D. L. Mima-type mounds in southwest Missouri: Expressions of point-centered and locally thickened biomantles. **Geomorphology**, 77(3-4), 308-319, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.009>
- JUNK, W. J., PIEDADE, M. T. F., LOURIVAL, R., WITTMANN, F., KANDUS, P., LACERDA, L. D., AGOSTINHO, A. A. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: marine and freshwater ecosystems**, 24(1), 5-22, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>

- KÄMPF, Nestor; CURI, Nilton. **Formação e evolução do solo (Pedogênese)**. Pedologia: fundamentos. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302, 2012.
- LUKO-SULATO, Karen et al. Concentration of essential and toxic elements as a function of the depth of the soil and the presence of fulvic acids in a wetland in Cerrado, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 4, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08945-y>
- MARIMON, B. S., Colli, G. R., Marimon-Junior, B. H., Mews, H. A., Eisenlohr, P. V., Feldpausch, T. R., Phillips, O. L. Ecology of floodplain Campos de murundus savanna in southern Amazonia. **International Journal of Plant Sciences**, v. 176, n. 7, p. 670-681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1086/682079>
- MARIMON, B. S., Marimon-Junior, B. H., Mews, H. A., Jancoski, H. S., Franczak, D. D., Lima, H. S., Moresco, M. C. Floristics of floodplain 'murundus' of the Pantanal of Araguaia, Mato Grosso, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 181-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062012000100018>
- MARTINS, F. P., ROSOLEN, V. S. Caracterização morfológica e física de uma catena (Latosolo-Gleissolo) no campo de murundu do Córrego da Fortaleza, chapada Uberlândia-Uberaba, Uberlândia-MG. **Caminhos de Geografia**, 15, 186-200, 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/24618>. Acesso em: 19/04/2018.
- MCAULIFFE, J. R., TIMM HOFFMAN, M., MCFADDEN, L. D., & KING, M. P. Role of aeolian sediment accretion in the formation of heuweltjie earth mounds, western South Africa. **Earth Surface Processes and Landforms**, 39(14), 1900-1912, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3583>
- MENDONÇA, Renato et al. **A influência africana no português do Brasil**. 2012. Disponível em: [https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/24719/983-Influencia\\_Africana\\_no\\_Portugues\\_do\\_Brasil\\_A.pdf](https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/24719/983-Influencia_Africana_no_Portugues_do_Brasil_A.pdf). Acesso em 02/05/2019.
- MITSCH, W. J., BERNAL, B., NAHLIK, A. M., MANDER, Ü., ZHANG, L., ANDERSON, C. J., BRIX, H. Wetlands, carbon, and climate change. **Landscape Ecology**, v. 28, n. 4, p. 583-597, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Moreira, V. B., & Perez Filho, A. Caracterização Física dos Microrrelevos de Murundus na Chapada Uberlândia-Uberaba/MG: Discussões Preliminares Sobre Gênese. **Revista do Departamento de Geografia**, 227-237, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132632>
- NASCIMENTO, D. T. F., NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Eliséé—Revista de Geografia da UEG**, 9(2), 2020.
- NETTLETON, W.D.; ESWARAN, H.; HOLSZEY, C.S. & NELSON, R.E. Micromorphological evidence of clay translocation in poorly dispersible soil. **Geoderma**, 40:37-48, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90012-7)
- NÓBREGA, Rodolfo LB et al. Ecosystem services of a functionally diverse riparian zone in the Amazon–Cerrado agricultural frontier. **Global Ecology and Conservation**, v. 21, p. e00819, 2020.
- OLIVEIRA-FILHO, A. D., FURLEY, P. A., Peter A. Monchão, cocuruto, murundu. **Ciência Hoje**, v. 11, n. 61, p. 30-37, 1990.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira. Floodplain 'murundus' of Central Brazil: evidence for the termite-origin hypothesis. **Journal of Tropical Ecology**, p. 1-19, 1992. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559804>. Acesso em: 03/04/2018.
- PETERSCHMITT, E., FRITSCH, E., RAJOT, J. L., HERBILLON, A. J. Yellowing, bleaching and ferritisation processes in soil mantle of the Western Ghâts, South India. **Geoderma**, 74(3-4), 235-253, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00064-X)
- PETRUZZELLI, L., CELI, L., AJMONE-MARSAN, F. Effects of soil organic fractions on iron oxide biodissolution under anaerobic conditions. **Soilscience**, v. 170, n. 2, p. 102-109, 2005. Disponível em: [https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2005/02000/EFFECTS\\_OF\\_SOIL\\_ORGANIC\\_FRACTIONS\\_ON\\_IRON\\_OXIDE.3.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2005/02000/EFFECTS_OF_SOIL_ORGANIC_FRACTIONS_ON_IRON_OXIDE.3.aspx). Acesso em: 08/06/2020.
- PONCE, V. M., CUNHA, C. N. (1993). Vegetated earthmounds in Tropical Savannas of Central Brazil: A synthesis: With special reference to the Pantanal do Mato Grosso. **Journal of Biogeography**, p. 219-225, 1993. DOI: <https://doi.org/10.2307/2845673>

- PONNAMPERUMA, Felix Nelson. The chemistry of submerged soils. In: *Advances in agronomy*. Academic Press, 1972. p. 29-96. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60633-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60633-1)
- PRINGLE, R. M., TARNITA, C. E. Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. **Annual review of Entomology**, v. 62, p. 359-377, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-035413>
- QUEIROZ NETO, José Pereira. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193295653.pdf>. Acesso em: 03/08/2018.
- QUÉNARD, Laurence et al. Lessivage as a major process of soil formation: A revisit of existing data. **Geoderma**, v. 167, p. 135-147, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.031>
- RANCOURT, D. G., THIBAUT, P. J., MAVROCORDATOS, D., LAMARCHE, G. Hydrus ferric oxide precipitation in the presence of nonmetabolizing bacteria: Constraints on the mechanism of a biotic effect. **Geochimica et Cosmochimica acta**, v. 69, n. 3, p. 553-577, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.018>
- RESENDE, I. L. D. M., ARAÚJO, G. M. D., OLIVEIRA, A. P. D. A., OLIVEIRA, A. P. D., ÁVILA JÚNIOR, R. S. D. A comunidade vegetal e as características abióticas de um campo de murundu em Uberlândia, MG. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 1, p. 9-17, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000100002>
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S.; ALMEIDA, S. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, p. 89-166, 2008.
- RITCHIE, A. M. The erosional origin of the Mima mounds of southwest Washington. *The Journal of Geology*, 61(1), 41-50, 1953. DOI: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/626035>
- ROSOLEN, V., DE-CAMPOS, A. B., GOVONE, J. S. ROCHA, C. Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). **Catena**, v. 128, p. 203-210, 2015A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.007>
- ROSOLEN, V., OLIVEIRA, D. A., BUENO, G. T. Vereda and Murundu wetlands and changes in Brazilian environmental laws: challenges to conservation. **Wetlands ecology and management**, v. 23, n. 2, p. 285-292, 2015B. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9380-4>
- ROSOLEN, V.; LAMOTTE, M.; BOULET, R.; TRICHET, J.; ROUER, O.; MELFI, A.J. Genesis of a mottled horizon by Fe-depletion within a laterite cover in the Amazon Basin. **Comptes Rendus de l'Académie de Sciences, Série Geoscience**, Paris, n. 334, p. 187-195, 2002.
- ROSOLEN, Vania et al. On the link between soil hydromorphy and geomorphological development in the Cerrado (Brazil) wetlands. **Catena**, v. 176, p. 197-208, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.022>
- ROSOLEN, Vania. PEDOGÊNESE-MORFOGÊNESE EM UMA TOPOSSEQUÊNCIA REPRESENTATIVA DA PAISAGEM SW DA AMAZÔNIA BRASILEIRA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v13i1.345>
- ROSOLEN, Vania; HERPIN, Uwe; MELFI, Adolpho José. Expansão dos solos hidromórficos na paisagem sudoeste da bacia amazônica brasileira: mudanças texturais e de porosidade do solo. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 20, 2007.
- SALES, J. C., BUENO, G. T., ROSOLEN, V., FERREIRA, M. E., FURLAN, L. M. The Structure of an Earth-Mound Field of the Brazilian Savanna. **Geomorphology**, p. 107752, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107752>
- SCHNEIDER, M. de O.; SILVA, DB da. Estrutura pedológica e dinâmica hídrica do "covoal" do Córrego da Fortaleza. **Sociedade & Natureza**, v. 3, n. 5, p. 75-89, 1991. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/download/60692/31479>. Acesso em: 10/04/2018.
- SCHWERTMANN, Ugo. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant and soil**, v. 130, n. 1, p. 1-25, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00011851>
- SETTE, Denise Maria. Os climas do cerrado do Centro-Oeste. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25225>

- SILVA, F. L., PIERANGELI, M. A. P., SANTOS, F. A. S., SERAFIM, M. E., de SOUZA, C. A. Teores naturais e valores de referência de elementos-traço em campos de murundus na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 12, n. 2, p. 172-178, 2017. DOI: <https://10.5039/agraria.v12i2a5436>
- SILVA, G. A., Dos SANTOS BORGES, M., RODRIGUES, S. C. Avaliação geomorfométrica de campo de murundus no Chapadão do Diamante, Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Geografia**, 30(1), 36-51, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30nesp1p36-51>
- SILVA, L. C., VALE, G. D., HAIDAR, R. F., SL STERNBERG, L..Deciphering earth mound origins in central Brazil. **Plant and Soil**, v. 336, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0329-y>
- THORNE, B.L., HAVERTY, M.I. A review of intracolony, intraspecific, and interspecific agonism in termites. **Sociobiology** 19, 115–145, 1991.
- Turner, M. G. **Landscape ecology**: the effect of pattern on process. *Annual review of ecology and systematics*, 20(1), 171-197, 1989.
- VEPRASKAS, M. J. **Redoximorphic features for identifying aquic conditions**. 2004.
- VEPRASKAS, M. J.; RICHARDSON, J. L. Morphological features of seasonally reduced soils. *Wetland soils: Genesis, hydrology, landscapes, and classification*, p. 163-182, 2001.
- VEPRASKAS, M.J., FAULKNER, S.P. Redox chemistry of hydric soils. In: Vepraskas, M.J., Craft, C.B. & Richardson, J.L (eds.) **Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes and classification**. CRC Press, Boca Ranro, FL, US, 2000.
- VILES, H. A., GOUDIE, A. S., GOUDIE, A. Ants as geomorphological agents: A global assessment. **Earth-Science Reviews**, 103469, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103469>

## Capítulo II

### CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDOS E METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA

#### Resumo

No presente capítulo é realizado o levantamento das características físicas da área de estudo e os aspectos técnico-metodológicos empregados para a análise do campo de murundus pesquisado, localizado na Chapada entre as Cidades de Uberaba e Uberlândia, bioma Cerrado. Através de uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos na área de estudo, foi apresentada as informações sobre as características climatológicas, geológicas, geomorfológicas e pedológicas. Bem como, os procedimentos técnicos e metodológicos para: i) obtenção de imagens de sensoriamento remoto orbital e com sensores embarcados em veículo aéreo não tripulado (VANT); ii) tratamento estatístico dos dados morfológicos e espectrais das imagens de sensoriamento remoto; e iii) análise de físico-química mineralógica do solo.

**Palavras-chave:** campo de murundus; metodologia, sensoriamento remoto, geoquímica

#### CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA AND GENERAL RESEARCH METHODOLOGY

#### Abstract

In this chapter, a survey of the physical characteristics of the study area and the technical-methodological aspects used for the analysis of the studied mounds field is carried out, located in Chapada between the cities of Uberaba and Uberlândia, Bioma Cerrado. Through a review of the main works developed in the study area, information on climatological, geological, geomorphological and pedological characteristics was presented. As well as the technical and methodological procedures to: i) obtain orbital remote sensing images and with sensors onboard unmanned aerial vehicle (UAV); ii) statistical treatment of morphological and spectral data from remote sensing images; and iii) soil mineralogical physicochemical analysis of water.

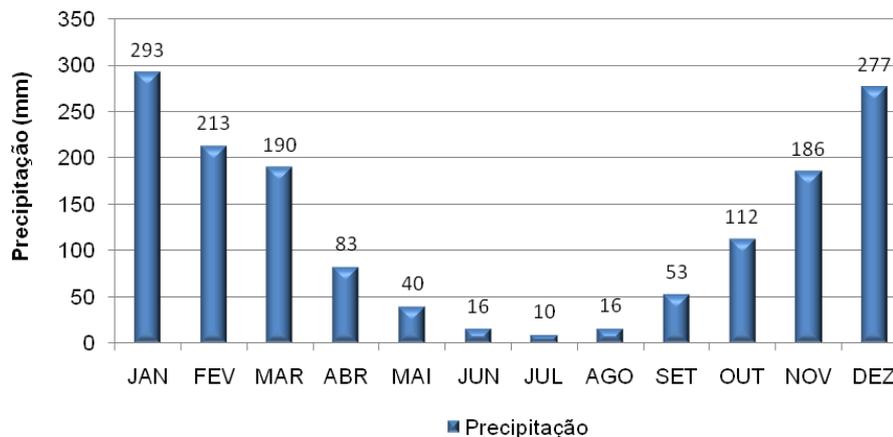
**Keywords:** mounds field; methodology, remote sensing, geochemistry

## 2.1 Aspectos climáticos

Os campos de murundus são fortemente influenciados pela dinâmica climática da Savana Brasileira. A distribuição da precipitação contribui para a elevação sazonal do nível freático nas áreas onde ocorrem essas microformas de relevo. Medidas climatológicas realizadas no período compreendido entre de 1977 e 2010 no Bioma do Cerrado, revelam que a precipitação média anual é de 1.486 mm, com variação de  $\pm 146,8$  mm; a temperatura média anual é de 20,1 °C (CAMPOS; CHAVES, 2020; RIBEIRO; WALTER, 2008). No entanto, a distribuição da chuva ocorre concentrada durante o verão, sendo o inverno caracterizado como período de redução acentuada da precipitação.

Na região do Triângulo Mineiro, local com alta concentração de campos de murundus, ocorre marcante alternância dessas estações diferenciadas em precipitação, com a seca concentrada nos meses de abril até setembro e a estação chuvosa nos meses entre outubro e março. Os meses mais secos são julho e agosto. A variação da temperatura segue as tendências de precipitação. Os meses com menores temperaturas se concentram no inverno, estação mais seca; e as maiores temperaturas no verão, estação mais úmida (Figura 10). O clima da Mesorregião do Triângulo Mineiro Aw (Clima tropical de savana com estação seca de inverno) de Köppen, ou seja, possui o inverno seco e o verão chuvoso com predominância dos sistemas intertropicais e polares, conforme dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (NOVAIS, 2011; SÁ, 2009; REBOITA et al., 2015).

**Figura 10.** Variação da Precipitação Mensal no Triângulo Mineiro de 1975 a 2009



**Fonte:** Agência Nacional da Água (ANA). Estações: Campina Grande, Comendador Gomes, Iturama, Gurinhata, Ipiacu, Ituiutaba, Campo Florido, Araguari, Canápolis, Cascalho Rico, Monte Alegre de Minas, Tupaciguara, Prata, Uberaba, Uberlândia. **Organização:** Nathalie R. Silva (2016)

Os maiores níveis de precipitação do Triângulo Mineiro ocorrem nos meses de novembro, dezembro e janeiro, somando cerca de 750 mm, 51% das chuvas anuais da região. Os meses de junho, julho e agosto apresentam o índice médio de 42 mm, correspondendo a apenas 3 % do total da precipitação média anual. Quanto aos índices de temperatura anual, a temperatura média anual de 23,1 °C e menores temperaturas médias são registradas junho (20,86 °C) e julho (21,1 °C), durante a estação seca. O mês de outubro é o mais quente do ano, com temperatura média de 25,6 °C (SILVA; MENDES 2016). A O índice médio de evapotranspiração é de 85 mm mês<sup>-1</sup>, durante a época chuvosa e de 110 mm mês<sup>-1</sup> durante a época seca (FERNANDES et al., 2011).

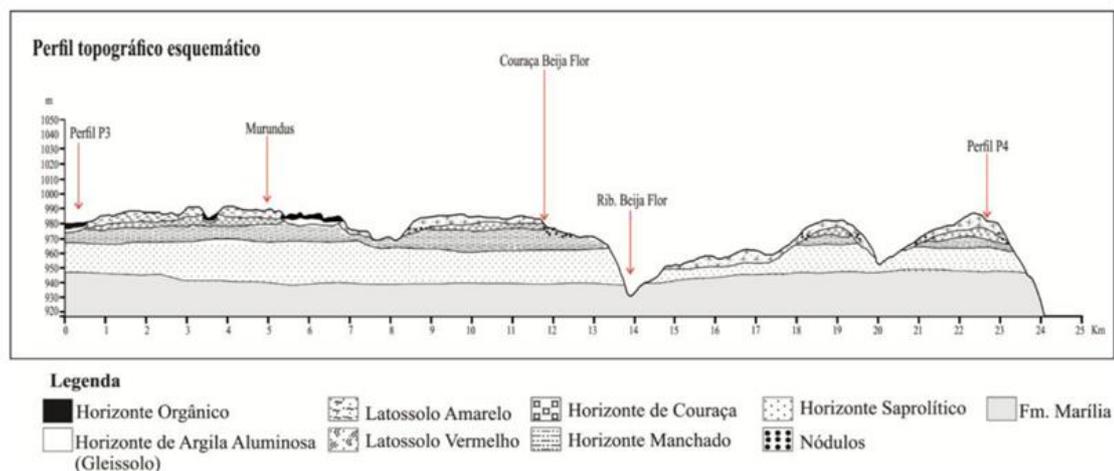
## 2.2 Aspectos geológicos

Os campos de murundus ocorridos na chapada entre as cidades de Uberaba e Uberlândia ocorrem sobre as rochas areníticas do Membro Serra da Galga, da Formação Marília, pertencente ao Grupo Bauru. A deposição das rochas do Grupo Bauru é datada do Cretáceo superior, formadas em ambiente fluviolacustre com predominância de clima árido e semiárido e marcado por períodos de seca e chuvas torrenciais (SOUSA JÚNIOR et al., 1983; FERNANDES, 1992; FERNANDES; COIMBRA 2000).

O Membro Serra da Galga corresponde aos depósitos em leque aluvial com canais fluviais distributivos e lagoas efêmeras, depositados próximos das bordas da bacia. Trata-se de materiais classificados como arenitos imaturos de granulação grossa a fina, frequentemente conglomeráticos, de cor amarelo-claro a avermelhado, com pequenos conglomerados intercalados e argilitos. Os arenitos possuem estratificações cruzadas tabulares e estreitas de médio a pequeno porte. Os conglomerados são polimíticos e texturalmente imaturos (quartzo, quartzito, calcedônia, nódulos carbonáticos remobilizados, arenitos, argilitos, fragmentos de basalto e outras rochas ígneas, fragmentos ósseos, ventifatos) (FERNANDES; RIBEIRO, 2015).

As rochas areníticas da Formação Marília, Membro Serra da Galga, constituem o material que dá origem aos relevos tubulares do Triângulo Mineiro. Alterados sob ações paleoclimáticas e pelo clima atual, esse substrato formou um espesso manto de alteração com perfil lateríticos (Figura 11) (COELHO, 2017, ROSOLEN et al., 2017).

**Figura 11.** Perfil topográfico hipotético esquemático desenvolvido com base nas informações coletadas em campo, análises químicas e mineralógicas e embasado na literatura, no qual as argilas aluminosas se formam sobre a couraça ferruginosa.



Fonte: Coelho (2017)

### 2.3 Aspectos geomorfológicos

No contexto da geomorfologia regional, os campos de murundus da chapada entre as cidades de Uberaba e Uberlândia estão localizados em uma superfície de

aplanamento remanescente, formada durante o ciclo erosão Sul-Americano, entre o Cretáceo e o Terciário Médio, denominada Superfície Sul-Americana (KING, 1956). Essa superfície apresenta cotas altimétricas de cerca de 1.000 m de elevação. No topo ocorrem colinas amplas com baixa declividade (0 a 5%).

Embutidas na superfície Sul-Americana ocorrem zonas de altitude inferior e de baixa declividade (3 a 5%), configurando ambientes de áreas úmidas. Ocorrem: i) de forma isolada, como depressões no topo do planalto ou de colinas amplas, de baixa declividade; ii) em cabeceiras de drenagem com forma de anfiteatro, conectadas ou parcialmente conectadas à rede hidrográfica; e iii) na base das encostas de baixa declividade, ao longo de vales abertos, hidromórficos (SCHNEIDER; SILVA 1991, QUEIROZ NETO et al., 1998). A gênese dessas depressões de topo, das cabeceiras e dos vales abertos e hidromórficos foi interpretada como resultante da ação geoquímica da água que, ao percolar pelo regolito, provocaria o rebaixamento diferencial da paisagem, devido ao condicionamento pela estrutura geológica (cruzamentos de fraturas, falhas ou diaclases no substrato rochoso, constituindo caminhos preferenciais para lixiviação de solutos) (FILIZOLA; BOULET, 1996; QUEIROZ NETO et al., 1998; QUEIROZ NETO, 2012). A estas áreas úmidas, embutidas na superfície das chapadas, estão associadas as paisagens de campos de murundus.

#### **2.4 Aspectos pedológicos**

Os solos que ocorrem nos campos de murundus na Savana Brasileira são influenciados pela elevação sazonal do nível freático. Essa característica interfere nas condições de aeração do solo, provocando a alternância entre os pedoambientes oxidante e redutor. Os principais tipos de solos encontrados nos campos de murundus, na chapada entre as cidades de Uberaba e Uberlândia e no Distrito Federal, são: i) os Latossolos Vermelhos, Vermelho-Amarelos ou Amarelos, localizados no entorno do campo de murundus e caracterizados por boas condições de aeração e pela presença de óxidos de ferro, como a hematita; ii) os Gleissolos e os Plintossolos, localizados na área interna dos campos de murundus e que sofrem influência da elevação sazonal do nível freático. A saturação hídrica temporária destes solos favorece a dissolução de minerais de ferro, como a hematita e a goethita, e a

dinâmica das águas promove a exportação deste elemento químico. Os Gleissolos apresentam cores em tons de cinza ou esbranquiçados. Nos Plintossolos ocorre a presença de mosqueados e nódulos de ferro, indicando a presença de má drenagem durante pelo menos uma época do ano, seja devido à deficiência de infiltração, ascensão do nível freático ou que o local está periodicamente inundado (SCHENEIDER; SILVA, 1991, FELTRAN FILHO, 1997; QUEIROZ NETO, 2012, MARTINS; ROSOLEN, 2014).

## **2.5 Abordagem metodológica para análise de campo de murundus**

### **2.5.1 Concepção metodológica**

Para o estudo integrado das formas de relevo e dos processos geomórficos ocorridos em campos de murundus é recomendado o uso de métodos e técnicas especializadas para a análise das formas desse microrrelevo, sua distribuição e o funcionamento da paisagem no contexto da área úmida, a partir de uma concepção metodológica analítica.

A orientação metodológica empregada no trabalho foi baseada na proposta de Ab'Saber (1969), relativa aos três níveis dos estudo geomorfológico: i) Forma – primeiro nível: foi considerada a morfologia da superfície do campo e murundus e suas características geométricas; ii) Estrutura – segundo nível: considera a compartimentação da área de campo de murundus, os padrões de distribuição dos montes de terra e a organização dos solos nos campos de murundus e no seu entorno, possibilitando considerações iniciais sobre sua gênese; iii) Fisiologia – terceiro nível: considera a análise do funcionamento morfohidropedológico, a partir dos compartimentos da paisagem e dos processos físico-químicos ocorridos nesse ambiente, os quais podem estar relacionados com a gênese e a evolução dos campos de murundus.

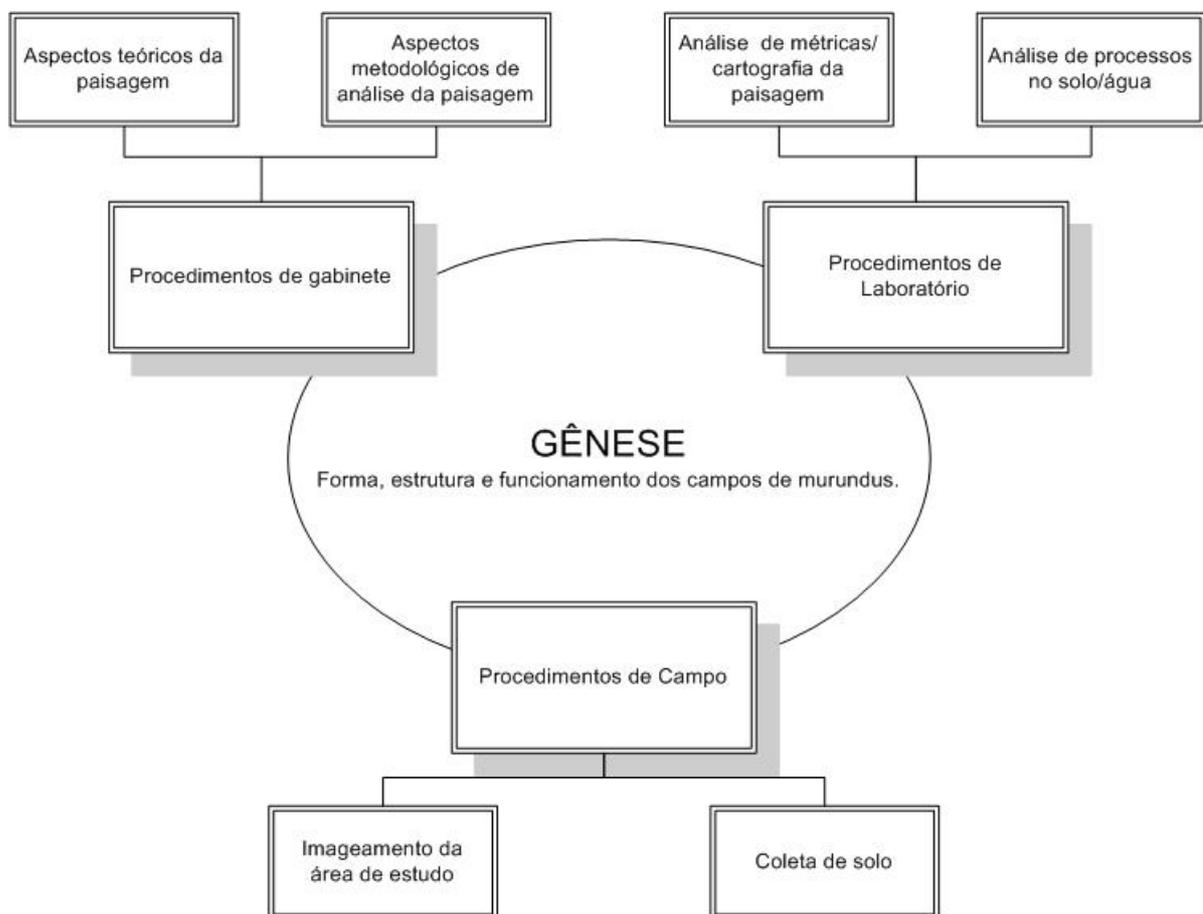
O estudo da forma e da distribuição de padrões repetidos que ocorrem em uma paisagem envolve o emprego de concepções metodológicas amplamente utilizadas no ramo da ecologia de paisagem (STEVENS, 1974; FARINA, 2008;

RIETKERK; VAN De KOPPEL, 2008, NAVEH, 2013). As métricas (forma) e a quantificação dos padrões constituem uma etapa da análise da paisagem, procedimento facilitado pelo uso dos Sistemas de Informações Geográficas e do Sensoriamento Remoto (UUEMAA, 2009; McGARIGAL, 2014). Procedimentos de estatística descritiva e multivariada podem ser utilizadas durante a análise das métricas da paisagem, com o objetivo de entender o padrão de organização desses ambientes (estrutura) (WAGNER; FORTIN, 2005). A busca do entendimento do funcionamento das paisagens envolve tratamentos que realizem a integração do padrão e dos processos (TUNNER; 1989, BELL, 2012).

### 2.5.2 Etapas metodológicas

As etapas de análise e os procedimentos técnicos e metodológicos para análise em campo de murundus estão descritos na Figura 12:

**Figura 12.** Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



O trabalho de gabinete consistiu no levantamento bibliográfico acerca da temática da pesquisa: i) formação e funcionamento das áreas úmidas; ii) formação, distribuição e funcionamento de padrões repetidos de montes de terra em ambientes naturais; iii) processos físico-químicos em solos hidromórficos; iv) uso de plataformas aéreas não tripuladas e sensores embarcados para análise de microrrelevo; e v) análise de padrão espacial com o uso de sistemas de informações geográficas (SIG).

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos em duas etapas: i) imageamento por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) com apoio do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG/UFG), realizados em 17/10/2017; e ii) coleta de solo da área de estudo, realizada em 07 e 08/08/2018.

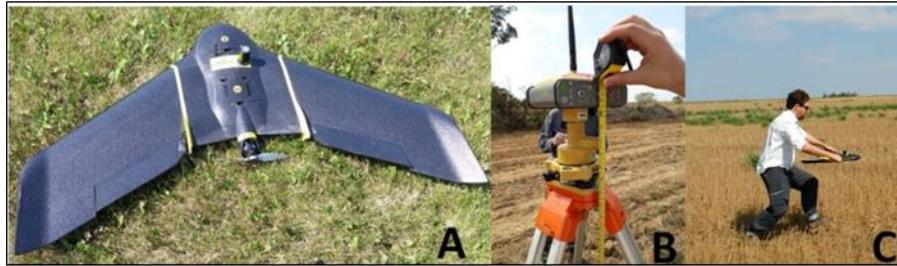
Os procedimentos de laboratório foram realizados em duas etapas: i) a cartografia e a compartimentação da paisagem realizadas com o uso de técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e estatística espacial, a partir das características geométricas e espectrais dos montes de terra (Estrutura); ii) análise mineralógica e físico-química do solo nos compartimentos encontrados no campo de murundus.

### **2.5.3 Obtenção, processamento de imagens e compartimentação da paisagem**

#### **2.5.3.1 Obtenção de imagens**

A obtenção de imagens com sensores embarcados foi realizada com o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), asa-fixa, modelo eBee Plus RTK (Figura 10A): envergadura 110 cm, peso 1,1 kg, elétrico, resistência ao vento de até 45 km/h, tempo máximo de voo de até 60 minutos, sem necessidade de pontos de controle em solo (GCP) em modo *Real-Time kinematic* (RTK) e *Post Processed Kinematic* (PPK), precisão absoluta e relativa das coordenadas X, Y, Z (RTK/PPK) de até 3 cm. O sensor utilizado para imageamento foi o SenseFly S.O.D.A., RGB de 20 *megapixel*, conforme Figura 13. O equipamento pertence ao LAPIG (IESA-UFG), parceiro do Projeto de Pesquisa.

**Figura 13.** Atividade de campo com o VANT



(A) VANT eBee Plus RTK. (B) GNSS Topcon Hiper Lite+. (C) atividades na área de campo. Foto: Bueno, 2017

A correção das imagens foi procedida na modalidade pós-processamento, utilizando-se como base o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) padrão geodésico Topcon Hiper Lite+ (receptor dos sistemas GPS e GLONASS). Este permaneceu em funcionamento por 4 horas para gravação do ponto-base (Figura 2B). A atividade de campo para obtenção das imagens ocorreu em 17/10/2017. O plano de voo e a correção das fotos no modo PPK foram realizados por meio do software Emotion. O sobrevoo foi do tipo cruzado, com sobreposição lateral e longitudinal de 70%, aumentando a acurácia dos dados por obter um maior número de fotos cobrindo o alvo, com sobreposições em direções variadas (D'OLEIRE-OLTMANN, 2012). Isso permitiu um melhor Modelo Digital de Superfície (MDS), assim como o Modelo Digital de Terreno (MDT), ambos para a análise do relevo.

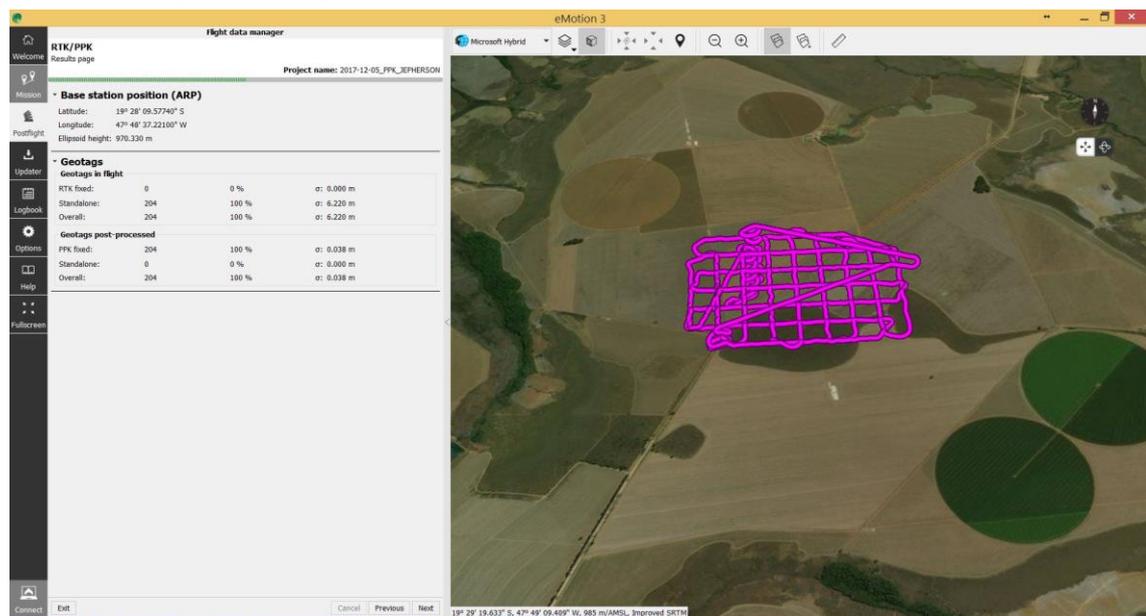
A correção dos dados da imagem VANT foi realizada por meio de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) instalado em campo, através de pós-processamento no serviço de Posicionamento por Ponto Preciso do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-PPP). Esta operação realiza a correção dos dados RINEX do GNSS para o modo PPP.

Além das imagens de sensores embarcados na plataforma aérea, foram obtidas imagens orbitais dos satélites Landsat 8 OLI e do Sentinel 2, a partir do portal de dados do *United States Geological Survey* (USGS), em datas próximas àquelas da realização dos voos do VANT. Essas imagens serviram para realizar a compartimentação da paisagem pelas suas características espectrais a partir das bandas do visível e do infravermelho próximo. As duas fontes de dados de imagens foram utilizadas para identificar os compartimentos da paisagem (estrutura).

### 2.5.3.2 Processamento de imagens VANT

O processamento das imagens foi realizado em duas etapas. Na primeira, foi realizado a correção Post Processed Kinematic (PPK) das coordenadas geográficas das imagens do VANT. A ação foi, desempenhada em escritório a partir das coordenadas do GPS interno do VANT, em conjunto com a base geodésica fixada na área de estudo. Normalmente, sem uma operação no modo PPK, as coordenadas das imagens possuem uma menor precisão, comuns em qualquer GPS embarcado em VANTs ou drones. Esta correção foi realizada por meio de uma função de “*geotagging*” com o uso do *software* Emotion (o mesmo empregado no controle da aeronave). Este processo consiste na correção e inserção de novas coordenadas nos metadados das imagens do VANT, a partir dos dados de maior precisão obtidos no PPP, conforme Figura 14.

Figura 14. Correção das imagens VANT pelo método PPP.



Fonte: Software Emotion 3.0, com plano de voo executado pelo eBee sobre o campo de murundus.

A segunda fase consistiu no processamento das imagens por meio do *software* PIX4D Mapper, sendo gerado o ortomosaico e o modelo digital de superfície (MDS). Esse *software* de fotogrametria fornece em seu relatório o número de imagens em sobreposição, a variação de geolocalização absoluta, a variação de geolocalização relativa e o erro médio quadrático, que indica a variação absoluta e local do modelo em relação às coordenadas X, Y e Z.

### 2.5.3.3 Delimitação das feições dos murundus e extração das variáveis geométricas

A delimitação dos montes de terra foi realizada por meio do software ArcGis. Nessa fase, foram realizados procedimentos de geoprocessamento do MDS e ortomosaico para delimitação das feições de murundus. Para consecução desse objetivo, foram realizados testes de declividade percentual com o MDS que mais se aproximasse da definição proposta por (ARAÚJO NETO, 1986) e por meio de interpretação visual em conjunto com o ortomosaico criado, conforme Sales et al. (2019).

Com a obtenção da melhor classe de declividade que representasse as elevações circulares, foram aplicadas as ferramentas de *Minimum bounding geometry*, *Erase*, *Multipart to single part* e *dissolve*, todas do ArcGis. Esses procedimentos possibilitaram uma exata extração das feições dos murundus na área de pesquisa. A quantificação dos murundus e o cálculo das variáveis geométricas (área, perímetro, altitude média, altitude mínima, altitude máxima, volume, superfície do volume e distância para o vizinho mais próximo) foram realizados por meio da calculadora de campo do ArcGis e apresentados por meio de gráficos e tabelas confeccionados no *software*.

Para a extração das características geométricas dos murundus, foram utilizadas as feições delimitadas a partir da declividade (%) e do MDS. Os atributos extraídos foram: a) área; b) perímetro; c) altitude mínima (base); d) altitude máxima (topo); e) altitude média; f) altura; g) volume; e h) distância do vizinho mais próximo. Todos esses passos foram realizados no *software* ArcGIS 10.3.

As características geométricas presentes nos itens a); b); c); d); e); e f) foram obtidas pela ferramenta *zonal statistics*. Para os atributos de volume, foram utilizados os seguintes passos: 1) geração da *Dense Cloud*, no *Software* Argisoft Photoscan 10.4.1; 2) exportação do arquivo *Dense Cloud* (.LAS); 3) transformação da *Dense Cloud* para o formato TIN (*Triangular Irregular Networks*), por intermédio da ferramenta LAS to TIN do *software* ArgGis 10.3; e 4) cálculo do volume acima da altitude mínima de cada feição com a ferramenta *Polygon Volume*, também no ArcGis. Para cálculo da distância do vizinho mais próximo, foi utilizado o polígono de cada feição de murundu pela ferramenta *Generate Near Table*.

### 2.5.3.4 Compartimentação da paisagem em campo de murundus

A compartimentação do campo de murundus pode ser realizada a partir dos dados espectrais e dos dados geométricos desta paisagem. O emprego de algoritmo classificação não-supervisionada (k-means) foi realizado nas imagens orbitais e nos dados geométricos dos murundus. A partir dos dados espectrais foi obtida uma superfície contígua com o agrupamento dos *pixels* (estrutura). Os dados geométricos dos murundus foram agrupados conforme as suas características (área, perímetro, volume, distância ao vizinho mais próximo e índice de circularidade), fornecendo um agrupamento de dados pontuais, conforme a localização de cada murundu (forma). Ambos os dados foram particionados pelo algoritmo k-means, conforme segue: i) Agrupamento os dados em grupos k, onde k é predefinido; ii) Seleção dos k pontos aleatoriamente, como centros de cluster; iii) atribuição dos objetos ao seu centro de cluster mais próximo, de acordo com a função de distância euclidiana; iv) cálculo do centroide ou média de todos os objetos em cada *cluster*, e v) repetição das etapas 2, 3 e 4 até que os mesmos pontos sejam atribuídos a cada grupo em rodadas consecutivas (FORGY, 1965), conforme Equação 2:

Equação 2:

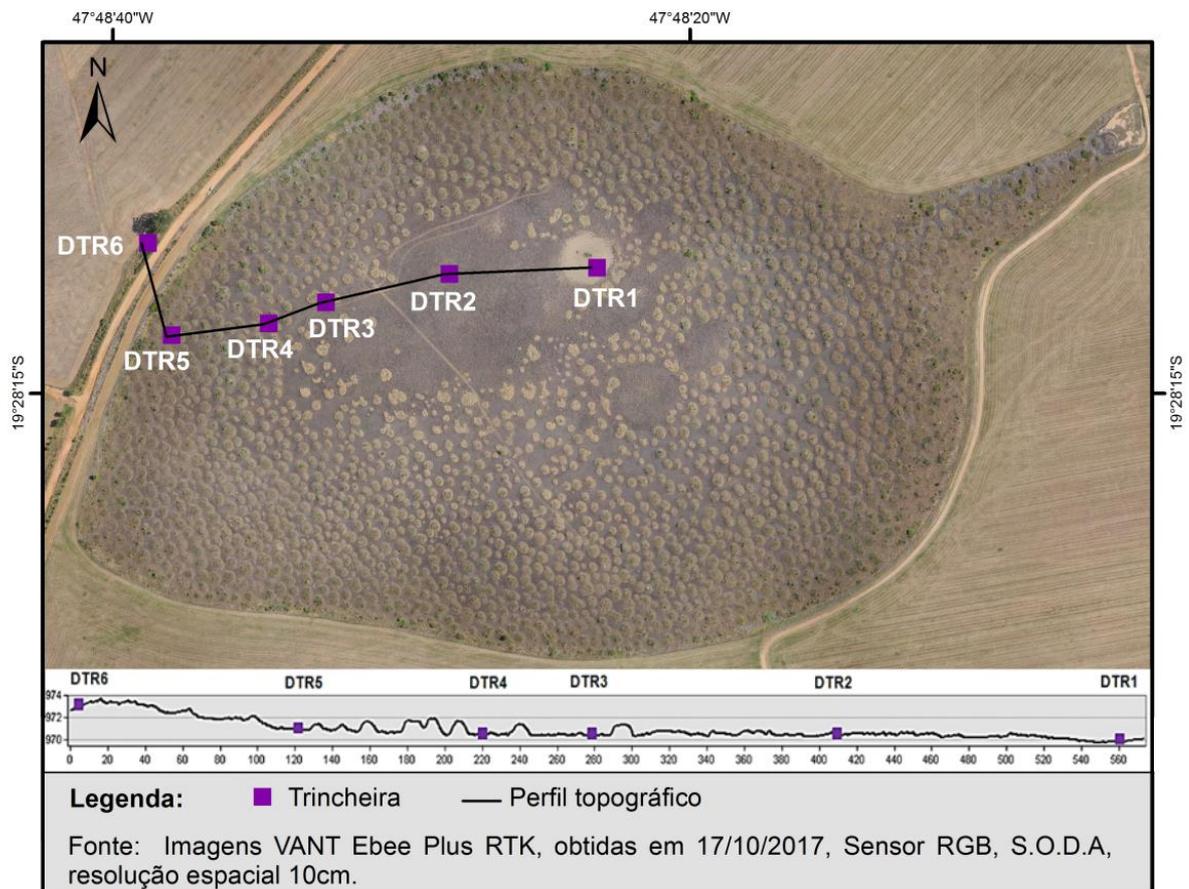
$$\text{objective function} \leftarrow J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \underbrace{\|x_i^{(j)} - c_j\|^2}_{\text{Distance function}}$$

A aplicação do algoritmo *k-means cluster* (Equação 2) nos dados espectrais e geométricos teve o objetivo de entender as características da paisagem a partir da reflectância dos alvos encontrados nos campos de murundus, como, por exemplo, a umidade do solo, textura do solo, matéria orgânica, óxidos de ferro (STONER; BAUMGARDNER, 1981), a rugosidade da microtopografia do relevo (WEEKS et al., 1996) e o índice de vegetação (HUETE, 1999). O agrupamento dos dados geométricos permitiu entender a organização e a distribuição dos montes de terra no interior dos campos de murundus.

### 2.5.4 Coleta e análise do solo em campos de murundus

A coleta do solo foi realizada em 7 e 8 de agosto de 2018 para cada compartimento do campo de murundus. Foram abertas 6 (seis) trincheiras, selecionadas conforme os compartimentos do campo de murundus, ao longo de uma vertente que começa na borda do campo de murundus (planalto) e termina no centro da depressão (Figura 15).

**Figura 15.** Pontos de amostragem de solo



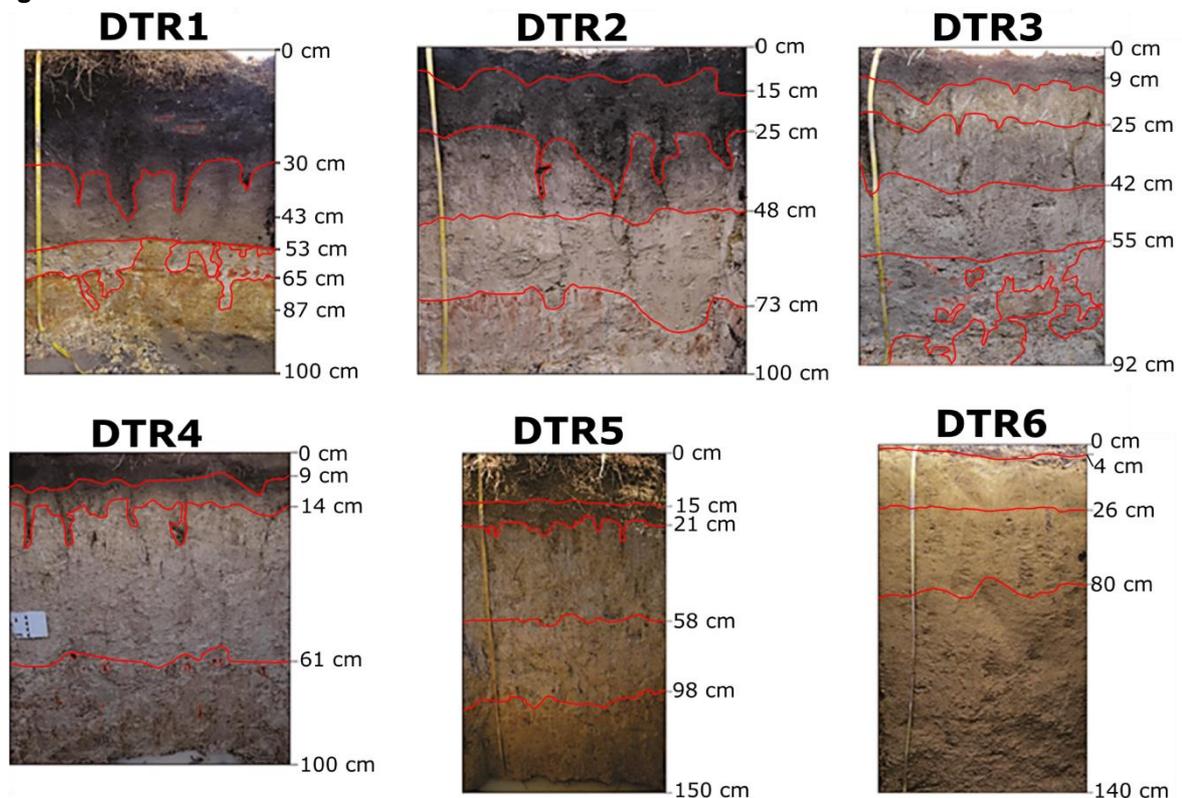
A estratégia de coleta do solo em uma vertente do campo de murundus foi realizada com base na metodologia da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica, que permite a compreensão da distribuição espacial dos solos e de seus horizontes, do seu funcionamento, além de fornecer indicações sobre sua gênese e sobre suas relações com outros componentes da natureza, incluindo a geomorfologia (BOULET, 1978; BOULET et al., 1984; QUEIROZ NETO, 2012).

Durante a coleta de solos, foram realizadas a divisão dos horizontes do solo para cada trincheira, a descrição da morfologia do solo (LEMOS; SANTOS, 1996;

DORAGEMA, 2011) e a verificação da presença de feições indicadoras de atividade biológica no solo.

As determinações dos atributos químicos foram realizadas em duas etapas. A primeira se refere à análise do solo, realizada no Laboratório Agroanálise, localizado na cidade de Cuiabá- MT. Foram levantadas as seguintes variáveis, pelos métodos da CLAESSEN (1997): pH (H<sub>2</sub>O) - em água na proporção de 1:2,5 (solo: água); pH (CaCl) - em solução de cloreto 0,01M, na proporção 1:2,5 (solo: CaCl); Ca, Mg e Al - extraídos com solução de cloreto de potássio 1 N; H, extraído com acetato de cálcio a pH=7. A matéria orgânica foi obtida por oxidação com bicromato de potássio e determinação colorimétrica. Foram calculadas a CTC potencial (T) em  $\text{cmolc dm}^{-3}$  e a saturação por bases (V), expressa em %. A determinação da granulometria de areia, silte e argila foi realizada por meio de dispersante NaOH e densímetro. Os atributos físico-químicos dos solos foram determinados em 31 (trinta e uma) amostras retiradas dos horizontes dos perfis, conforme Figura 16.

**Figura 16.** Trincheiras e horizontes do solo



Na segunda etapa, realizaram-se as análises químicas por Espectroscopia de Raios-X por Dispersão em Energia – EDX (JENKINS,1999). Foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA), instalado na Faculdade

de Geociências da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) (Figura 17), para amostras até 150 cm. Realizou-se também a análise de EDX, no Laboratório de Geoquímica – LABOGEO do DPM/UNESP, para os elementos SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e LOI, com as amostras obtidas até profundidades próximas a 3,5 m.

Para a análise química por EDX foram preparadas pastilhas prensadas (5 a 7 toneladas) a partir da amostra pulverizada. Utilizou-se um equipamento Shimadzu EDX - 700HS, capaz de realizar análises quantitativas por meio de padrões internos, através da rotina Qual-Quant FP©. Foi utilizado um feixe de 10 mm de diâmetro e tensões no tubo de 15 e 50 kV, respectivamente, para a detecção dos elementos do Sódio (Na) ao Escândio (Sc) e do Titânio (Ti) ao Urânio (U). Todos os espectros foram adquiridos em vácuo, de maneira a melhorar a precisão das medidas para os elementos mais leves, cujas radiações características são fortemente absorvidas pela matéria (inclusive pelo próprio ar).

**Figura 17.** Equipamento fluorescência de raios-X e pastilhas de amostra de solo



Para análise da composição mineralógica do solo, foram realizadas análise de Difração de Raios-X, utilizando porta-amostra de preenchimento frontal, conforme os procedimentos preconizados em Buhrke (et al. 1998). Utilizou-se um equipamento Bruker D8 Advance equipado com tubo de cobre, fenda Soller e detector linear ultrarrápido LynxEye, operando a 40 kV e 40 MA. Os perfis foram adquiridos entre 5 e 60 graus, com passos de 0,02 graus e tempo de aquisição por passo de

0,5 segundos. A identificação das fases cristalinas presentes nas amostras foi feita através de comparações com as fichas catalográficas da base de dados *do Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)*, por meio do *Software Xpert Highscore Plus*.

As análises físicas, químicas e mineralógicas dos solos amostrados no campo de murundus foram realizadas para identificação dos processos físico-químicos ocorridos nos compartimentos, os quais foram previamente mapeados segundo as características espectrais e geométricas dos murundus na área de estudo.

## Capítulo III

### ESTRUTURA DE UM CAMPO DE MURUNDUS DA SAVANNA BRASILEIRA \*

#### Resumo

Os campos de murundus são paisagens intrigantes compostas por montes de terra. Esses microrrelevos ocorrem nas áreas de transição entre o planalto e as áreas hidromórficas da Savana Brasileira. Numerosos estudos analisaram a morfometria dos murundus na busca do entendimento de sua gênese. Entretanto, o padrão de distribuição espacial desses montes de terra ainda necessita de análises detalhadas. Este estudo teve como objetivo analisar as características estruturais e morfométricas de um campo de murundus no contexto da evolução da paisagem do Cerrado brasileiro. A pesquisa foi realizada com o emprego de Veículo Aéreo não-Tripulado (VANT) de alta precisão e de imagens de satélites orbitais. Os dados espectrais e morfométricos da área de estudo foram manipulados em ambiente de Sistema de Informações Geográfica (SIG) e analisados por técnicas estatísticas descritiva, multivariada e de agrupamento. Os resultados mostraram que os campos de murundus possuem uma organização na distribuição dos montes de terra e que suas características de altitude e de volume sugerem a ocorrência de uma antiga superfície que liga o planalto ao topo dos murundus atuais.

**Palavras-chave:** campo de murundus; microrrelevo; padrão espacial; savana; cerrado; VANT; drone.

### THE STRUCTURE OF AN EARTH-MOUND FIELD OF THE BRAZILIAN SAVANNA

#### Abstract

The *campos de murundus* (literally "mound fields") are intriguing landscapes composed of earth-mounds. These microreliefs occur in transition areas between the plateau and hydromorphic areas of the Brazilian Savanna. Several studies have analyzed the morphology of *murundus* to understand its genesis. However, the pattern of spatial distribution of these mounds still needs detailed analyses. This study aims to analyze the structural and morphometric characteristics of a mound field and to raise considerations about the genesis of the studied *murundus* field. The research was conducted using a high-precision unmanned aerial vehicle (UAV) and images from orbital satellites. Spectral and morphometric data of the study area were manipulated in a Geographic Information System (GIS) environment and analyzed using descriptive, multivariate, and clustering techniques. The results show that the mound field present an ordered distribution of the earth-mounds and that their top altitude and volume indicate a lateral continuity between the surrounding plateau and the top of the *murundus*, suggesting that previously they were part of the same surface.

**Keywords:** earth-mound field, *murundus*; morphometry; spatial pattern; Savanna; *Cerrado*; UAV.

\* Artigo base para publicação na revista Geomorphology, Volume 386, 1 agosto 2021, 107752, versão final disponível no site da revista.

### 3.1 Introdução

#### 3.1.1 Terminologia e localização dos campos de murundus

Microrrelevos constituídos por montes de terra espalhados em paisagens naturais são comuns em diversas partes do mundo. Na América do Norte são conhecidos como *mima-mounds* (HORWATH BURNHAM; JOHNSON, 2012), na África do Sul como *heuweltjies* (MIDGLEY et al., 2013) e no Brasil como murundus, monchões, cocurutus ou covais (ARAÚJO NETO et al., 1986; OLIVEIRA FILHO et al., 1980; SCHNEIDER e SILVA, 1991).

Esses microrrelevos são formados por conjuntos de elevações hemisféricas, de base arredondada ou oval, com grande variedade de dimensões: de 0,3 a 1,5 m de altura, com diâmetro de 3 a 15 m, para os *mima-mounds* dos Estados Unidos (NIKIFOROFF, 1941); de 1 a 2 m de altura, com diâmetro de 4 a 32 m, para os *heuweltjies* da África do Sul (CRAMER; BARGER, 2014); até 1 m de altura, com diâmetro de 10 a 30 m, para os *mima-like mounds* no Camarões (DIAZ et al., 2016). Nos murundus das savanas brasileiras, regionalmente denominado de Cerrado, seu comprimento médio é de 10 m, largura média de 6 m e altura média de 70 cm (ARAÚJO NETO et al., 1986).

#### 3.1.2 Morfometria e distribuição

A densidade dessas feições também é muito variável: 3 a 8 montes de terra por ha<sup>-1</sup> para os *heuweltjies*, 5 a 109 ha<sup>-1</sup> para os *mima-mounds* e 21 a 247 ha<sup>-1</sup> para os murundus no Brasil (CRAMER; BARGER, 2014). A distância média para o vizinho mais próximo verificada para os *heuweltjies* é de 47,14 m (MOORE; PICKER, 1991); de 2 a 8,74 m para os *termite mounds* na Austrália (SPAIN et al. 1986); e de 1,22 a 1,44 m para os *mima-mounds* no Quênia (COX; GAKAHU, 1983). Normalmente, o número de vizinhos para cada monte de terra é seis e sua distribuição assume um padrão aproximadamente hexagonal (PRINGLE, TARNITA, 2017, p.362).

Os campos de murundus se encontram em diferentes regiões do Brasil, como o Pantanal Mato-grossense (OLIVEIRA FILHO et al., 1992), o sudoeste da Amazônia (SILVA et al., 2017) e o Cerrado (ARAÚJO NETO et al., 1986). No Cerrado, os campos

de murundus ocorrem com frequência, emoldurando áreas úmidas, imperfeitamente drenadas, dos relevos de chapadas. Há três tipos principais, segundo sua situação na paisagem: associados a depressões sem conexão superficial com a rede hidrográfica, situados sobre topos planos ou com até 5% de declividade; associados a cabeceiras de drenagem em forma de anfiteatro; ao longo dos cursos d'água, no contato entre várzea e a média vertente (SCHNEIDER e SILVA, 1991; QUEIROZ NETO et al., 1998). Comumente se encontram na transição entre as áreas de melhor drenagem das chapadas, com Latossolos e fitofisionomias de cerrado típico ou cerradão, assim como nas áreas imperfeitamente drenadas, com Plintossolos, Gleissolos, Organossolos e vegetação de campo higrófilo. Individualmente, os montes de terra se projetam acima do nível do assoalho da área imperfeitamente drenada, enquanto a cobertura vegetal desses montes se assemelha àquelas das partes de melhor drenagem, situadas mais acima na vertente (SILVA et al., 2010).

Embora haja muitos trabalhos sobre a morfometria e a densidade dessas microformas de relevo, seu padrão de distribuição nos domínios onde ocorrem é ainda pouco conhecido. Na maioria dos trabalhos, os montes de terra são descritos como regularmente distribuídos (MOORE e PICKER, 1991; DIAZ et al., 2016; CRAMER et al., 2017), embora em muitas áreas eles apresentem diferentes padrões de distribuição e forma, em função de sua posição na paisagem. Por exemplo, Horwath e Johnson (2006) constataram que os *mima-mounds* de áreas planas tendem a ser circulares, enquanto os que se encontram ao longo de vertentes tendem a ter forma elíptica, alongados no sentido da vertente. No Cerrado, Schneider e Silva (1991) delimitaram três zonas no interior de um campo de murundus de uma cabeceira de drenagem em forma de anfiteatro, segundo a morfologia e frequência dos montes de terra: uma zona periférica circular de menor umidade do solo, com murundus maiores; uma zona anelar intermediária, com murundus de menor porte, e uma zona central mais deprimida e brejosa, onde não há murundus. Entretanto, esses autores não delimitaram essas zonas e nem obtiveram índices que permitissem sua identificação e cartografia.

### **3.1.3 Relevância ecológica**

Os campos de murundus são áreas de relevante importância ecológica. Eles integram e influenciam a dinâmica hidrológica local e regional, constituindo as zonas de cabeceiras de drenagem ou depressão fechadas alimentadas pela água da chuva (JUNK et al., 2013). Essas microformas de relevo possuem uma topografia local e gradientes de elevação que podem exercer influências importantes nos processos de formação do solo, como migração de elementos, intemperismo mineral e acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) (FANG et al., 2019). Apesar disto, os campos de murundus da região do Cerrado vêm sendo fortemente degradados pelas atividades agropecuárias (ROSOLEN et al., 2015).

#### **3.1.4 Abordagem por sensoriamento remoto**

Por se tratar de áreas especiais, algumas ocupando grandes extensões, o sensoriamento remoto, tanto orbital quanto aéreo, se apresenta como a melhor forma para o monitoramento, análise da distribuição e classificação morfológica dos campos de murundus. Os Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT), por exemplo, embarcados com câmeras fotográficas digitais de última geração, têm atendido bem a este propósito, aliando parâmetros aerofotogramétricos com algoritmos de processamento do tipo *Structure from Motion* (SFM).

Dentre os vários produtos gerados a partir de sobrevoos com um VANT, destacam-se os mosaicos ortorretificados (padrão RGB e multiespectral), normalmente georreferenciados, e os Modelos Digitais de Superfície, Elevação e Terreno (MDS, MDE e MDT), amplamente utilizados para estudos de microtopografia (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; ROOSEVELT, 2014; MERCER-WESTBROOK, 2016; LOVITT et al., 2017).

Na prática, o uso de imagens de VANT possibilita o mapeamento detalhado e preciso de pequenas feições. A análise dessas formas pode ser combinada com imagens de menor resolução espacial, em geral gratuitas, obtidas por satélites (ex. Sentinel 2, Landsat 8 e CBERS 4A), possibilitando análise dessas microformas de relevo em múltiplas escalas e sensores.

Trabalhos mais recentes já apontam o potencial dos VANTs para pesquisas em campos de murundus. Silva et al. (2020), por exemplo, avaliaram o uso desta tecnologia para a análise da morfometria dos murundus em depressão de topo na Serra da Canastra-MG, quando foram obtidas diversas métricas, como perímetro,

área, altura e volume destes elementos da paisagem. Furlan et al. (2020) empregou os VANTs para estudos acerca da gênese dos campos de murundus em área de chapada do Cerrado mineiro, próximo a Uberaba-MG, e sua relação com a infiltração de água em aquíferos.

### **3.1.5 Considerações e objetivos**

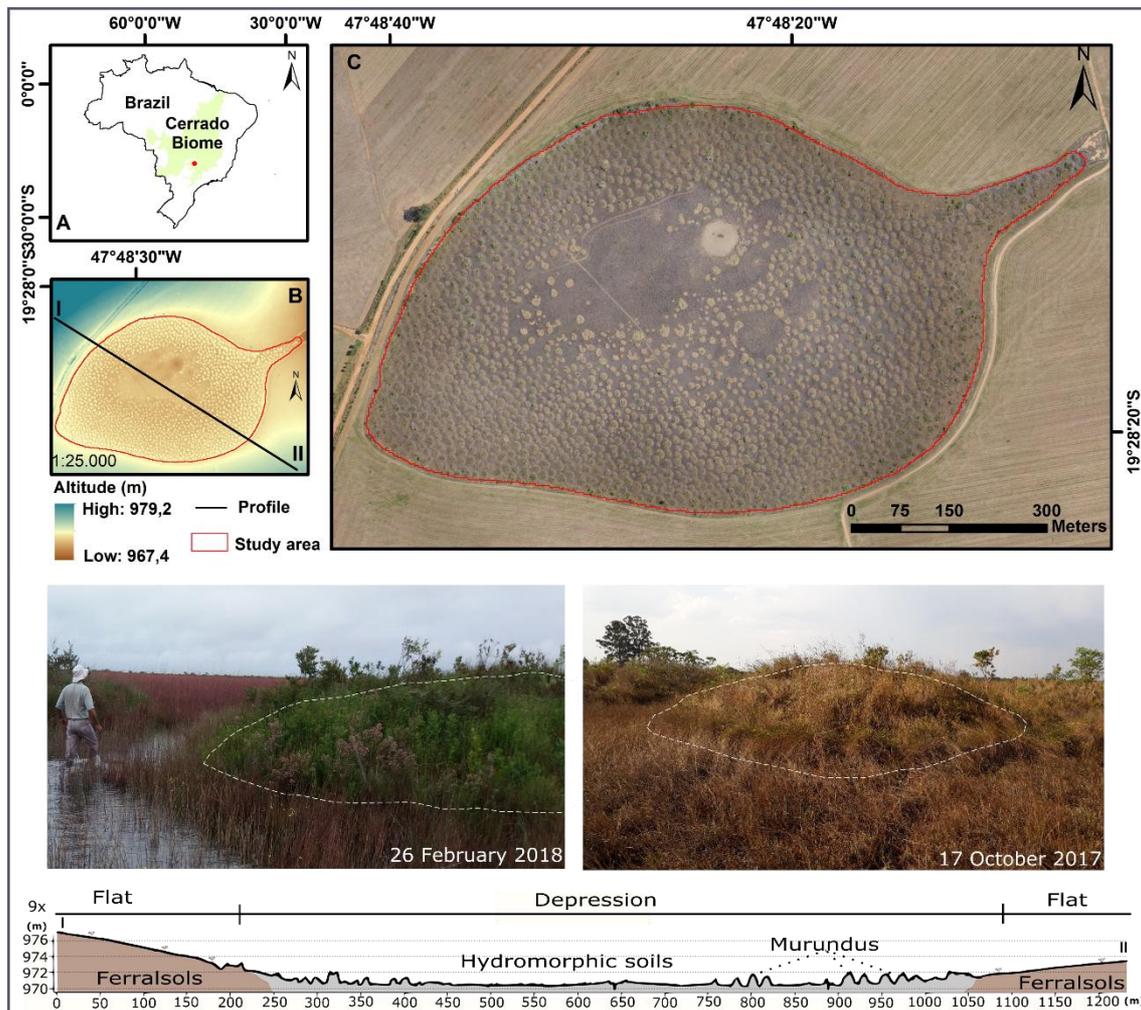
Existem lacunas importantes na literatura sobre a distribuição espacial dos montes de terra dentro de um campo de murundus. Nesse sentido, o presente trabalho levanta duas novas questões a serem respondidas por meio de um VANT: 1) Considerando sua morfometria, os murundus de uma depressão apresentam uma distribuição aleatória ou se organizam segundo algum padrão ou gradiente? 2) Os topos dos murundus apresentam altitude concordante com a superfície do relevo do entorno de uma depressão? Visando responde-las, os objetivos do presente estudo são os seguintes: 1) Obter dados morfométricos para um campo de murundus do Cerrado brasileiro; 2) Verificar e cartografar sua distribuição espacial no interior da depressão estudada; 3) Verificar as relações altimétricas entre os topos dos murundus e a superfície do planalto do entorno da depressão; 4) Analisar as características estruturais e morfométricas do campo de murundus no contexto da evolução da paisagem do Cerrado.

## **3.2 Materiais e métodos**

### **3.2.1 Área de estudo**

A pesquisa foi realizada em um campo de murundus representativo das superfícies cimeiras aplanadas do Cerrado brasileiro. O local de estudo é uma das cabeceiras de drenagem da bacia do Rio Claro, e está localizado sobre a chapada entre as cidades de Uberaba e Uberlândia, estado de Minas Gerais. A área deprimida de cabeceira possui uma superfície de 43,97 ha, conforme Figura 18.

Figura 18. Área de estudo



(A) Localização geral da área de estudo no bioma Cerrado (ponto vermelho); (B) Modelo Digital de Superfície, com variação altimétrica da área de estudo; (C) carta-imagem da área de estudo, no município de Uberaba-MG, gerada com VANT eBee Plus RTK, em 17/10/2017, equipado com sensor RGB, resolução espacial de 3 cm;

A área de estudo pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, representada pelo Grupo Bauru (FERNANDES, 1992; SOUSA JÚNIOR et al., 1983). A litologia é caracterizada por arenitos do Cretáceo Superior, com camadas de silte e argila ricas em ferro, pertencentes ao Membro Serra da Galga da Formação Marília (FERNANDES; RIBEIRO, 2015).

O clima é um fator de forte influência no regime hidrológico da área de estudo, sendo caracterizado por uma estação seca pronunciada, de abril a outubro, seguida pela estação chuvosa durante os meses de verão, de novembro a março. As médias anuais de precipitação e temperatura são, respectivamente, 1.584,2 mm e 22,3 °C, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, <https://portal.inmet.gov.br/>).

A área de pesquisa está localizada em uma área de aplanamento, sobre um remanescente da superfície de aplanamento Sul-Americana (KING, 1956), em altitudes em torno de 1.000 m. Nessa região ocorrem Latossolos nas áreas altas e planas, apresentando variação de cor: vermelho, vermelho-amarelo e amarelo. Embutidas na superfície plana, ocorrem depressões fechadas ou conectadas superficialmente à rede fluvial. Essas depressões possuem vertentes de baixa declividade (<5%) e fundo plano. Seus solos se desenvolveram em ambiente hidromórfico, destacando-se os Plintossolos, Gleissolos e os Organossolos (SCHNEIDER e SILVA, 1991; QUEIROZ NETO et al., 2001). Os murundus ocorrem associados às depressões, possuindo uma grande diversidade quanto a sua forma, área, volume, altura, entre outras características.

A vegetação local sofreu grande interferência antrópica na parte externa ao campo de murundus estudado, com a implantação de agricultura mecanizada; porém, a cobertura vegetal interna encontra-se relativamente preservada. Originalmente, os campos de murundus possuem uma composição florística estruturada em três classes principais. No assoalho das áreas deprimidas, sujeito a alagamento sazonal, predomina a vegetação hidrófila, contendo principalmente espécies de gramíneas. Os topos dos murundus, áreas com melhor drenagem do solo, apresentam composição florística diversificada, com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas. Na parte externa ao campo de murundus, localizada nas áreas com maior elevação, ocorrem as fitofisionomias de campo cerrado e cerrado típico, compostas essencialmente de espécies arbóreas, relacionadas à ocorrência de Latossolos (ARAÚJO NETO et al., 1986; SILVA et al., 2010; RESENDE et al., 2014).

### **3.2.2 Aquisição e Processamento de dados do VANT**

#### **3.2.2.1 Aquisição de imagens**

Os sobrevoos com o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) na área de estudo foram realizados no dia 17/10/2017 e 18/10/2017. O modelo utilizado é do tipo asa-fixa, modelo eBee Plus RTK (Figura 2A), operado no modo Real-time kinematic (RTK) e Post Processed Kinematic (PPK), precisão absoluta e relativa das coordenadas X, Y, Z (RTK/PPK) de até 3 cm. Graças a este sistema de posicionamento, não houve necessidade de pontos de controle em solo (GCP). Os sensores utilizados para

imageamento foram: 1) SenseFly S.O.D.A., padrão RGB, com 20 megapixels, visando a obtenção do Modelo Digital de Superfície e o ortomosaico; 2) sensor SEQUOIA, multiespectral, com quatro câmeras independentes de 1.2 megapixels (cobrindo as bandas do Verde, Vermelho, Red-edge e Infravermelho próximo) e uma RGB de 16 megapixels.

A precisão planimétrica e altimétrica das imagens foi procedida na modalidade pós-processamento (PPK), utilizando-se como base um GNSS (Global Navigation Satellite System) padrão geodésico, modelo Topcon Hiper Lite+ (receptor dos sistemas GPS e GLONASS). O sistema permaneceu em funcionamento por 04 horas durante o voo, para gravação do ponto-base (figura 2B). A atividade de campo para obtenção das imagens ocorreu em 17/10/2017. O plano de voo, controle de aeronave e a correção das fotos no modo PPK foi realizado no *software* Emotion 3. O sobrevoo foi do tipo cruzado, dobrando o número, com sobreposição lateral e longitudinal de 70%. Tal procedimento aumentou a acurácia dos dados, justamente por obter um maior número de fotos cobrindo o alvo (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012), permitindo assim um melhor Modelo Digital de Superfície (MDS).

A primeira etapa para registro de fotos com elevada precisão locacional (de ordem centimétrica), o *software* Emotion (controle da aeronave) administra a coleta de dados geodésicos durante o voo com a antena do VANT (identificada aqui como *Rover*). Simultaneamente, a estação GNSS posicionada numa base (com coordenadas conhecidas ou não) coleta dados dos sistemas GPS e GLONASS. Com a correção do posicionamento da estação pelo método PPP (Posicionamento por Ponto Preciso, provido pelo IBGE; [www.](http://www.ibge.gov.br)) e respectiva correção dos pontos/coordenadas obtidas pelo VANT, a localização de cada foto foi corrigida no *software* Pix4D Mapper, por meio da realização de um *geotag* (i.e., registro das coordenadas geográficas em cada foto). As coordenadas GNSS corrigidas possuem precisão significativamente maior do que os dados coletados por um GNSS convencional, a bordo na maioria dos VANTS.

Ainda no PIX4D Mapper, com o posicionamento das fotos corrigido, este *software* se encarrega da geração do mosaico aerofotogramétrico (projeção ortogonal, com menor distorção) e do Modelo Digital de Superfície (MDS). No caso, foram empregues os dados do sensor S.O.D.A. (RGB) e do sensor SEQUOIA, visando a geração do índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Esse *software* de fotogrametria fornece em seu relatório o número de fotos em sobreposição, a

variação de geolocalização absoluta, a variação de geolocalização relativa e o erro médio quadrático que indica a variação absoluta e local do modelo em relação às coordenadas X, Y e Z.

### 3.2.2.2 Delimitação e extração de dados geométricos, de altitude e distribuição dos murundus

A delimitação de cada monte de terra foi realizada por meio do *software* ArcGis com o uso do MDS e do ortomosaico. Foram realizados testes de declividade percentual com o MDS, que mais se aproximasse da definição proposta por Araújo Neto et al. (1986) e por meio de interpretação visual, conforme Sales et. al (2019). Com a delimitação dos murundus, foram excluídas feições do microrrelevo que apresentavam alto índice de vegetação (NDVI) e montes de terra localizados na fronteira desta área, com o objetivo de reduzir possíveis efeitos de borda referentes a atividades antrópicas da região.

Para a extração das características morfométricas dos montes de terra, foram utilizadas as feições dos murundus e o MDS, obtendo-se os seguintes atributos geométricos: a) *área*; b) *perímetro*; c) *volume*; d) *altura*; e) *distância do vizinho mais próximo*; f) *índice de circularidade*. Esses dados foram utilizados para o agrupamento estatístico das características geométricas (grupos geométricos). As características morfológicas presentes nos itens (a), (b), e (d) foram obtidas pela ferramenta *zonal statistics*. Para os atributos de volume, foram utilizados os seguintes passos: 1) geração da *Dense Cloud* no *software* Agisoft Photoscan; 2) exportação do arquivo *Dense Cloud* para extensão “.LAS”; 3) transformação da *Dense Cloud* para o formato TIN (*Triangular irregular networks*), por intermédio da ferramenta *LAS to TIN* do *software* ArgGis; e 4) cálculo do volume acima da altitude mínima de cada feição com a ferramenta *Polygon Volume*. Para o cálculo da distância do vizinho mais próximo, foi utilizado o polígono de cada feição de murundu, pela ferramenta *Generate Near Table*. O índice de circularidade foi obtido pela equação 3:

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde, IC é o índice de circularidade do murundu, A é a área, P é o perímetro e 4 é uma constante (STRAHLER, 1964).

A altitude de topo de cada monte de terra foi extraída a partir do centróide das feições. Esses dados foram utilizados para comparar a altitude dos murundus, localizados na área de depressão, com mesma quantidade de pontos aleatórios gerados na área de planalto, em até 120 metros da borda do campo de murundus. Este procedimento nos forneceu um padrão de distribuição da altitude dos topos dos murundus em comparação com as áreas do entorno da depressão.

O número de vizinhos foi calculado com o emprego do diagrama de Voronoi, gerado no plano Euclidiano a partir dos centróides de cada murundu (pontos geradores). O diagrama é obtido a partir de retas traçadas equidistantes aos pontos geradores, formando assim as bordas de cada célula fechada e adjacente a outras células, cada uma possuindo apenas um ponto gerador, formando assim os polígonos que originam o diagrama (KOLAHDOUZAN; SHAHABI, 2004). O número de lados que compõe cada célula representa um vizinho equidistante, obtendo-se assim o número de vizinhos por monte de terra. O diagrama de Voronoi forneceu um padrão local de organização de vizinhança entre os murundus da área de pesquisa.

### 3.2.2.3 Tratamento estatístico das variáveis geométricas

Os dados geométricos extraídos foram padronizados por escalonamento, conforme equação 4:

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \quad \text{Equação 4}$$

$y'_i$  = Variável geométrica

$\bar{y}$  = Média da variável geométrica

S = Desvio padrão da variável geométrica

Os dados geométricos padronizados foram submetidos a uma análise descritiva de distribuição e de correlação com ajuste linear entre as variáveis: *perímetro, área, volume, altura, distância do vizinho e índice de circularidade*. Os dados de altura e volume foram submetidos ao ajuste de curva ao modelo de regressão de potência, para verificação da significância da relação entre essas variáveis em um modelo não linear.

Após a análise descritiva das variáveis, os dados geométricos padronizados – para reduzir as altas taxas de variância das variáveis com maior escala de dados e evitar que essas sejam de maior importância (ERIKSSON et al., 2013) – foram submetidas à análise de componentes principais (ACP).

A ACP foi realizada para os diferentes grupos de variáveis geométricas dos murundus com o uso do *software* Geoda. Esta estatística de análise multivariada tem o objetivo de reduzir o número de variáveis originais por outro conjunto de dados em eixos ortogonais não correlacionados, com a menor perda possível de informação (HOTTELLING, 1936; HONGYU, 2016). Esta fase consiste em identificar qual combinação de variáveis possui o maior potencial para explicação dos dados geométricos dos murundus. O critério de Kaiser foi adotado para seleção das variáveis: os autovalores maiores que 1 são considerados "significativos" na análise ACP (KAISER, 1960).

As variáveis geométricas escolhidas na ACP foram utilizadas para o agrupamento não-supervisionado pelo algoritmo *k-means*. Esses grupos são denominados nesta pesquisa como “grupos geométricos dos murundus”. Este método de particionamento de dados em *k* grupos consiste nas seguintes etapas: 1) cálculo dos centróides para *k* clusters; 2) cálculo da distância euclidiana de todos os dados em relação a cada um dos *k* centróides; e 3) agrupamento dos dados por *k* centróides (MacQueen, 1967). Foram realizados testes para verificação do melhor valor de *significância* referente à proporção da soma entre quadrados entre os *clusters* e a soma total de quadrados para obtenção do número de *clusters*. O procedimento ACP, seguido de *k-means*, auxilia na redução de variáveis com maior significância e na redução de ruídos do modelo de agrupamento, potencializando os processos de classificação não-supervisionada (DING; HE, 2004).

### **3.2.3 Aquisição, processamento e classificação de imagens orbitais**

Para estudo do comportamento espectral do campo de murundus em diferentes escalas de análise, foram obtidas da plataforma *United States Geological Survey* (USGS) imagens orbitais Sentinel 2, órbita/ponto “T23KKU”, bandas RGB 2/3/4 e NIR (banda 8), registrada em 03/08/2017, com resolução espacial de 10 m; e

imagens Landsat 8 OLI, órbita/ponto 220/74, bandas RGB 2/3/4 e NIR (banda 5), registrada em 05/10/2017, com resolução espacial 30 m. As imagens dos produtos orbitais foram recortadas com uso do *software* Qgis, com objetivo de classificar a área do campo de murundus sem interferência de pixels de fora da área de interesse.

A classificação não supervisionada das imagens orbitais foi realizada com o uso do *software* Qgis, pelo algoritmo de *K-means cluster for grids*, método *iterative minimum distance* (FORGY, 1965). O algoritmo calcula a distância de cada centróide (centro dos *clusters*) a partir de k grupos pré-definidos para as variáveis espectrais. Posteriormente, categoriza cada *pixel* em um grupo com a menor distância em relação a cada centróide. O número de *clusters* foi definido a partir dos resultados obtidos na análise dos grupos geométricos. Este processo visa classificar o campo de murundus em setores com respostas espectrais semelhantes e agrupadas, para as bandas do visível e do infravermelho próximo. Esses setores delimitados foram denominados nesta pesquisa por Compartimentos Espectrais. Os mesmos possuem relação com o comportamento espectral dos alvos imageados pelos sensores, que revelam características da área de estudo, tais como: umidade do solo, textura do solo, matéria orgânica, óxidos de ferro (STONER; BAUMGARDNER, 1981), a rugosidade da microtopografia do relevo (WEEKS et al., 1996) e o índice de vegetação (HUETE, 1999).

#### **3.2.4 Análise da organização espacial do campo de murundus**

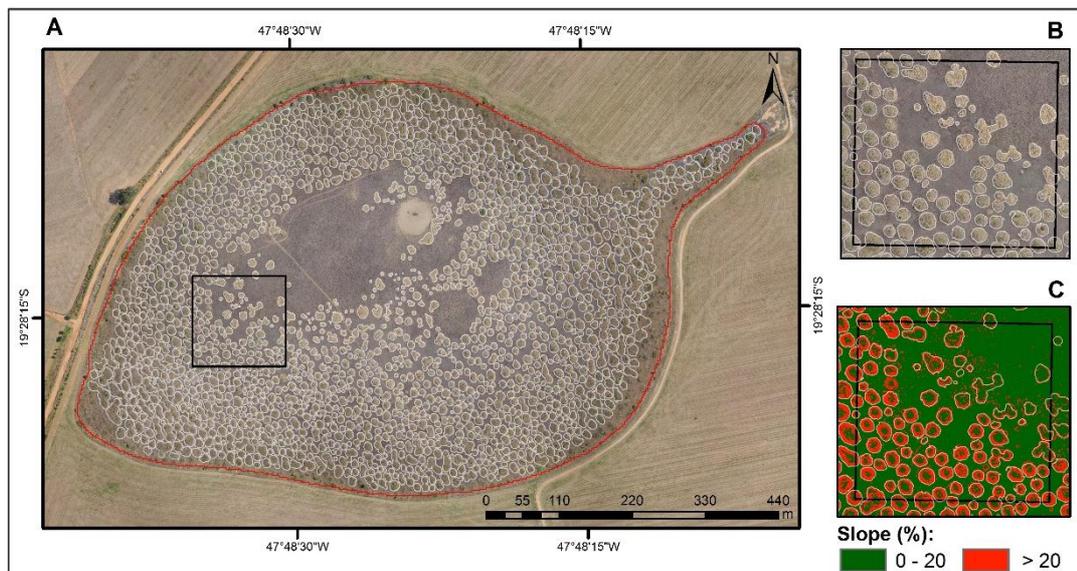
A organização espacial do campo de murundus foi obtida pela análise dos grupos geométricos (imagem VANT), dos compartimentos espectrais (imagens orbitais), dos dados de altitude, número de vizinhos e índice de vegetação. Nesta fase, adotou-se a sobreposição de mapas de grupos e compartimentos. O procedimento foi empregado para entender a distribuição e a organização dos montes de terra no campo de murundus.

### **3.3 Resultados**

#### **3.3.1 Análise de dados geométricos, de altitude e vizinhança dos murundus**

A Figura 19 apresenta os montes de terra extraídos automaticamente do campo de murundus, conforme etapas descritas na metodologia. Foram identificados 1746 montes de terra, sendo excluídos 150 por estarem próximos à borda do campo da área de estudo, evitando murundus com possíveis interferências de atividades antrópicas. Foram, assim, contabilizados 1596 murundus para análise das características geométricas.

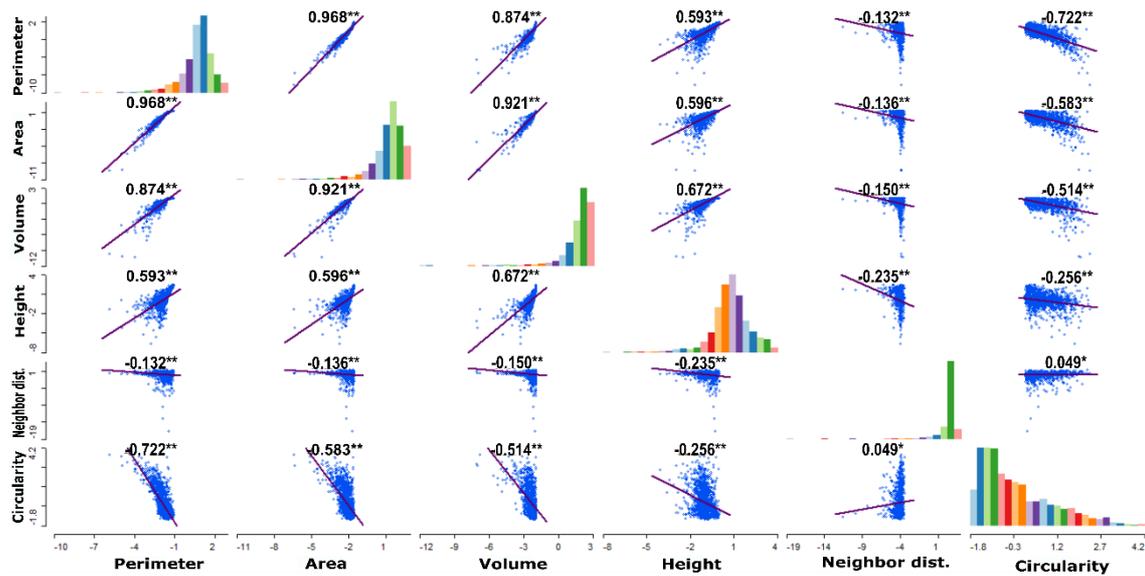
**Figura 19.** Murundus identificados com o mosaico aerofotogramétrico



(A) Montes de terra selecionados dentro do campo de murundus; (B) detalhe de parte do campo de murundu; (C) declividade (%) dos montes de terra dentro da área de detalhe. Fonte: VANT eBee Plus RTK, em 17/10/2017, equipado com sensor RGB, resolução espacial de 3 cm.

Com a extração dos murundus, foram obtidas as seguintes variáveis geométricas: *perímetro*, *área*, *volume*, *altura*, *distância do vizinho* e *índice de circularidade*. Esses resultados foram analisados por meio da distribuição e correlação entre as variáveis geométricas normalizadas (Figura 20).

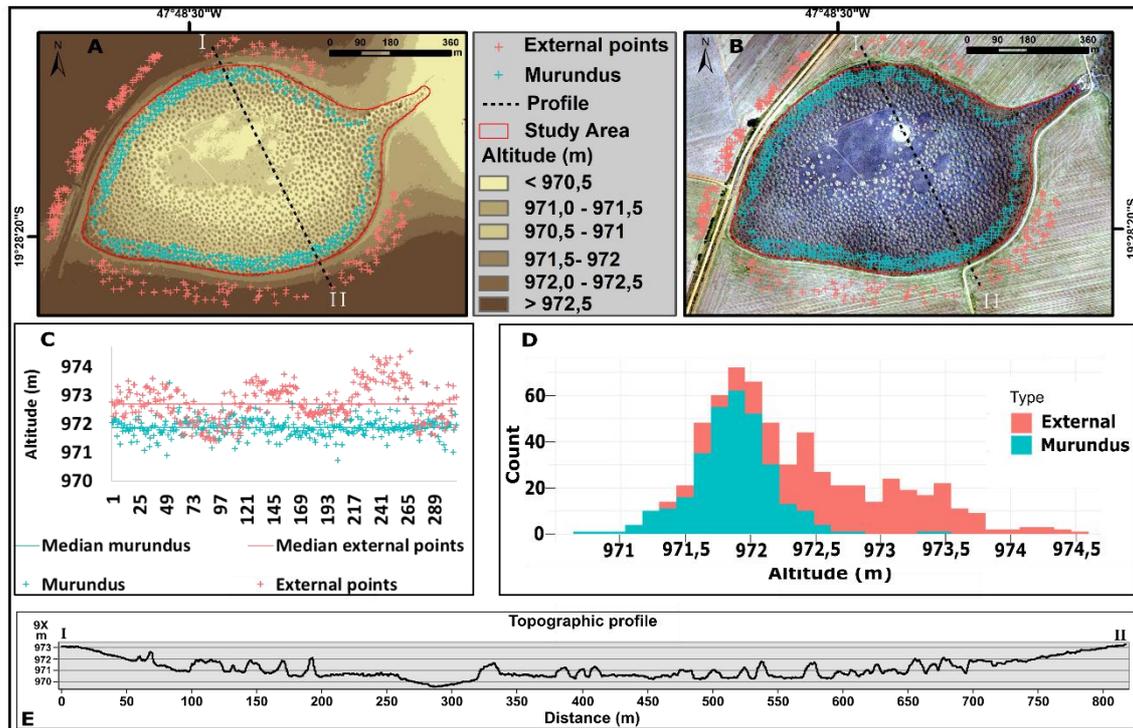
**Figura 20.** Distribuição e correlação das variáveis geométricas



O gráfico da Figura 20 demonstra forte correlação positiva entre as variáveis geométricas *perímetro*, *área* e *volume*. Esses resultados podem ser considerados comuns, pelo fato de estas variáveis serem altamente dependentes. Os histogramas das variáveis *perímetro*, *área* e *volume* apresentam uma concentração de distribuição de valores mais elevados, ou seja, são registrados poucos murundus com baixos valores nessas variáveis. A variável *altura* não apresentou correlação linear com as variáveis *perímetro*, *área*, *distância do vizinho* e *índice de circularidade* e apenas uma fraca correlação positiva com a variável *volume*. Contudo, quando empregado um ajuste da curva com o modelo de regressão de potência (gráfico não apresentado) para as variáveis *altura* e *volume*, observou-se uma significância de 0,8288. O atributo geométrico *distância do vizinho* não apresentou correlação significativa com nenhuma variável geométrica. A variável *índice de circularidade* apresentou correlação negativa com o *perímetro*, ou seja, quanto menor o *índice de circularidade* maior o *perímetro*. O histograma do *índice de circularidade* apresenta uma concentração de murundus com baixo *índice de circularidade*. De maneira geral, os montes de terra apresentam uma forma mais alongada por serem coalescentes, i.e., com mais de um topo.

A análise de *altitude* dos topos dos murundus em relação à *altitude* da área externa (planalto) é apresentada na Figura 21.

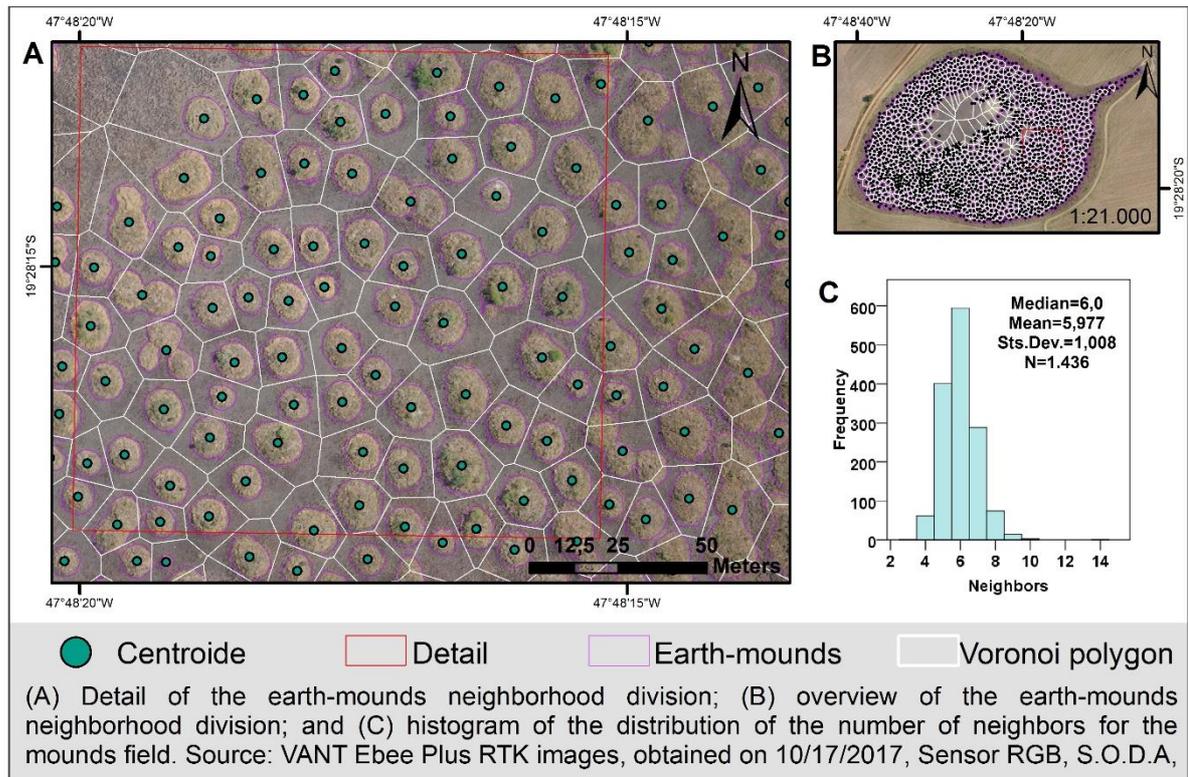
**Figura 21.** Análise de altitude dos murundus



(A) Mapa de pontos de altitude dos murundus e das áreas externas; (B) Mapa de localização dos pontos de extração de altitude dos murundus e das áreas externas; (C) gráfico de dispersão de altitudes dos murundus e das áreas externas; (D) histograma com valores de altitude dos murundus e das áreas externas; e (E) perfil topográfico do segmento I-II.

A Figura 21 (A e B) apresenta a localização de 309 pontos de altitudes dos murundus situados no interior da depressão, a partir da distância de 50 m de sua borda. Apresenta, também, 309 pontos aleatórios gerados em um *buffer* de 120 m na área externa ao local de estudo. O gráfico de dispersão (Figura 21 C) demonstra que as altitudes dos murundus e dos pontos das áreas externas ao local de estudo (planalto) apresentam valores próximos. As medianas apresentadas neste gráfico possuem valores de 971,86 m para a altitude dos murundus e de 972,70 m para pontos aleatórios externos à área de pesquisa. O histograma da Figura 21 (D) revela uma concentração de murundus e de pontos nas áreas externas com altitudes no intervalo de 971,5 m até 972,0 m. O perfil topográfico (Figura 21 E) apresenta a ocorrência de altitude dos murundus e das áreas deprimidas ao seu redor, sendo possível verificar o mesmo padrão de altitudes observadas nas figuras 18 C e 17 8.

A análise do número de vizinhos foi realizada para 1436 murundus (Figura 22). Foram retirados 160 murundus próximos à borda da área de pesquisa, com o objetivo de reduzir a influência de murundus que fazem fronteira com a borda externa da área de estudo.

**Figura 22.** Vizinhos diagrama de Voronoi

A área de estudo apresentou uma maior frequência de murundus com 6 vizinhos: 594 ocorrências, ou 41,36% do total de murundus. As medidas de tendência central *média aritmética*, *mediana* e *moda* apresentaram, respectivamente, 5,97; 6,0; e 6,0. Os murundus com 5 e 7 vizinhos somam 689 unidades e os murundus com outros números de vizinhos somam 153 ocorrências.

### 3.3.2 Resultados da ACP das variáveis geométricas

A tabela 1 contém os valores de saída da Análise de Componentes Principais (ACP) referentes às variáveis geométricas dos murundus.

**Tabela 1.** Summary of outputs: Eigenvalues

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6
Eigenvalues	<b>3.78306</b>	<b>1.03308</b>	0.713968	0.358001	0.101627	0.0102747
Proportion of variance	0.63050	0.172179	0.118995	0.059667	0.016938	0.001712
Cumulative % of var.	0.630509	0.802688	0.921683	0.981350	0.998287	1.000000

Os resultados da ACP demonstram que os dois primeiros componentes

principais possuem 80,26% de explicação do modelo de distribuição dos murundus pelas suas características geométricas, sendo 63,05% para o primeiro componente e 17,21% para segundo componente.

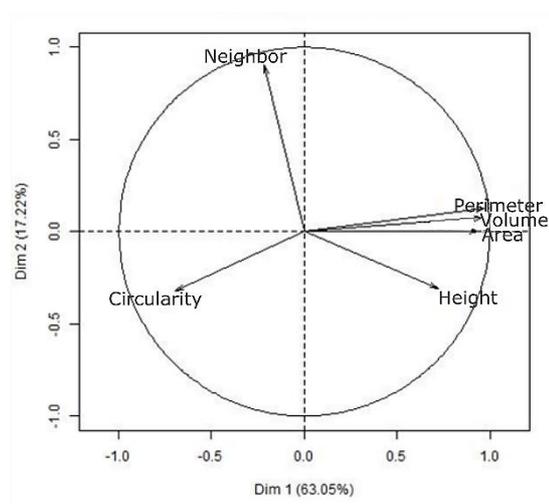
Os autovalores com índices maiores que 1 foram obtidos no primeiro e no segundo componentes principais. Os parâmetros geométricos com maiores índices de correlação com as duas primeiras componentes foram o perímetro, com 0,943 para a componente principal 1, e a distância do vizinho, com 0,813 para a componente principal 2. A tabela 2 apresenta os resultados da correlação das variáveis em cada componente principal.

**Tabela 2.** Squared correlations

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Perimeter	<b>0.943</b>	0.0152	0.0063	0.0073	0.0234	0.0049
Area	0.917	0.0056	0.0021	0.0587	0.0119	0.0048
Volume	0.875	0.0000	0.0279	0.0348	0.0617	0.0002
Neighbor Dist.	0.046	<b>0.8134</b>	0.1366	0.0031	0.0000	0.0000
Height	0.518	0.0952	0.2289	0.1564	0.0009	0.0000
Circularity Index	0.483	0.1035	0.3120	0.0975	0.0036	0.0003

A Figura 23 apresenta o gráfico biplot com os vetores de cada variável geométrica e o índice de correlação para as duas principais componentes.

**Figura 23.** Gráfico biplot das variáveis



As variáveis *perímetro*, *volume*, *área* e *altura* possuem ângulos agudos ( $< 90^\circ$ ) entre si, pois apresentaram uma baixa variabilidade de informações e dados

correlacionados. As variáveis *índice de circularidade*, *altura* e *vizinho mais próximo* apresentaram ângulos obtusos ( $> 90^\circ$ ), demonstrando uma correlação negativa. As variáveis *perímetro* e *vizinho mais próximo* apresentaram os maiores vetores na primeira e segunda componentes principais, respectivamente, e possuem entre si um ângulo próximo de  $90^\circ$ , indicando uma maior variância no conjunto das componentes principais (Figura 6).

### 3.3.3 Agrupamento das variáveis geométricas

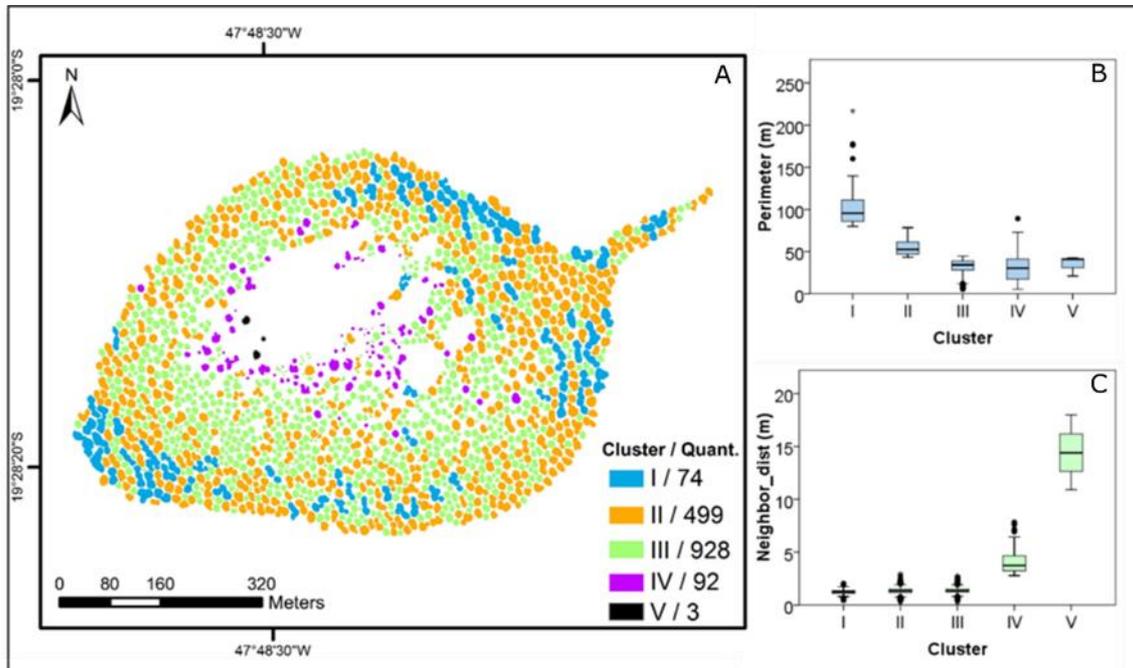
O agrupamento *k-means* foi aplicado para as variáveis geométricas *perímetro* e *distância do vizinho mais próximo*. Foram realizados testes de três, quatro, cinco e seis grupos para verificar o modelo com maior acurácia. Obteve-se a proporção da soma entre quadrados entre os *cluster* e a soma total de quadrados do modelo, com índice de 0,73, demonstrando “significância” para o modelo adotado (Tabela 3).

**Tabela 3.** Resultado k-means das variáveis em 5 clusters

<b>Number of clusters: 5</b>		
Transformation: Standardize		
Initialization method: KMeans++		
Initialization re-runs: 50		
Maximal iterations: 1000		
Method: Arithmetic Mean		
Distance function: Euclidean		
Cluster centers:		
CLUSTER	PERÍMETRO	VIZINHO
C1	3.03102	-0.351678
C2	0.616223	-0.208745
C3	-0.517136	-0.163487
C4	-0.55095	2.63836
C5	-0.400159	13.0583
The total sum of squares: 3190		
Within-cluster sum of squares:		
Within cluster S.S.		
-- -----		
C1 120.333		
C2 183.116		
C3 297.115		
C4 209.333		
C5 26.5259		
The total within-cluster sum of squares 836,424		
The between-cluster sum of square: 2353.58		
The ratio of between to total sum of squares: <b>0.737798</b>		

A Figura 24 apresenta a distribuição dos murundus agrupados em 5 *clusters* de acordo com suas características de perímetro e distância do vizinho mais próximo.

**Figura 24.** Agrupamento das variáveis geométricas perímetro e distância para o vizinho mais próximo.



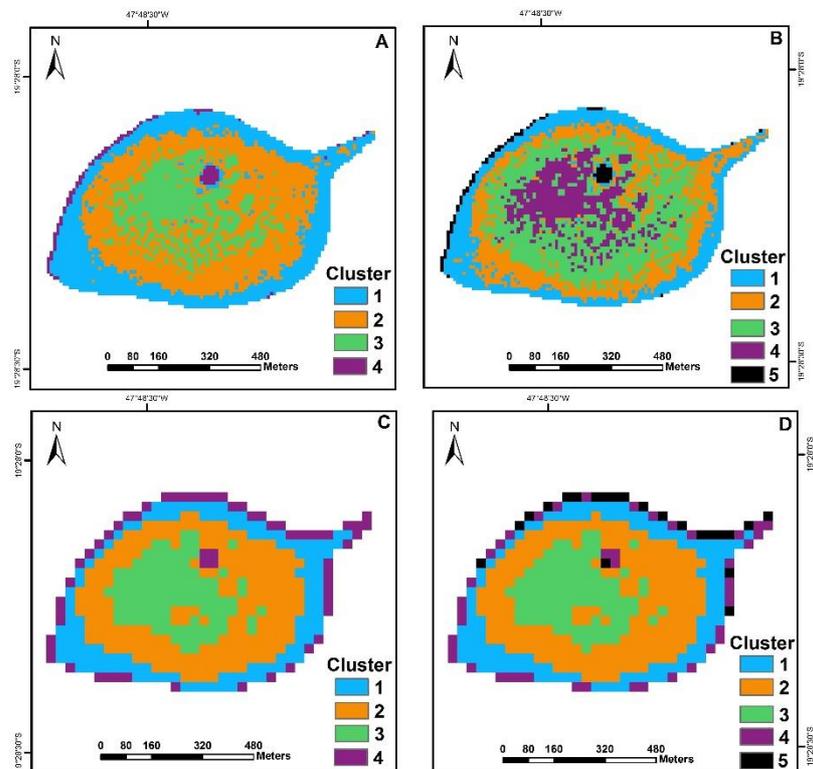
(A) Mapa de agrupamento das variáveis geométricas; (B) histograma de distribuição dos valores de perímetros dos murundus por grupo geométrico; e (C) histograma de distribuição dos valores de distância para o vizinho mais próximo por grupo geométrico.

A Tabela 3 e a Figura 24 apresentam uma redução de valores de perímetro do grupo I até o grupo IV. A direção dessa redução de valores ocorre da borda do campo de murundus, próximas à área de planalto, em direção ao centro da depressão, local com menores altitudes da área de estudo. De forma geral, os murundus mais próximos da borda apresentam os maiores valores médios de perímetro, sendo vários desses montes de terra configurados como coalescentes, com a forma alongada. Quanto à distância para o vizinho mais próximo, nota-se um aumento progressivo dos valores de distância do grupo I para o grupo V. Os murundus próximos à borda da área de pesquisa possuem uma menor distância para os vizinhos e, à medida que se aproxima do centro da depressão, a distância do vizinho tende a ser maior.

### 3.3.4 Classificação das variáveis espectrais

A Figura 25 apresenta os resultados das classificações não-supervisionadas das imagens orbitais dos satélites Sentinel 2 e Landsat 8 OLI, agrupadas em quatro e cinco classes por valores de refletâncias utilizando o algoritmo *k-means*.

**Figura 25.** Classificação de imagens orbitais da área de estudo.



(A) e (B) Imagens Sentinel 2, obtidas em 03/08/2017, Bandas R2G3B4NIR8, resolução espacial 10 m; e (C) e (D) imagens Landsat 8 OLI, obtidas em 14/10/2017, Bandas R2G3B4NIR5, resolução espacial 30 m.

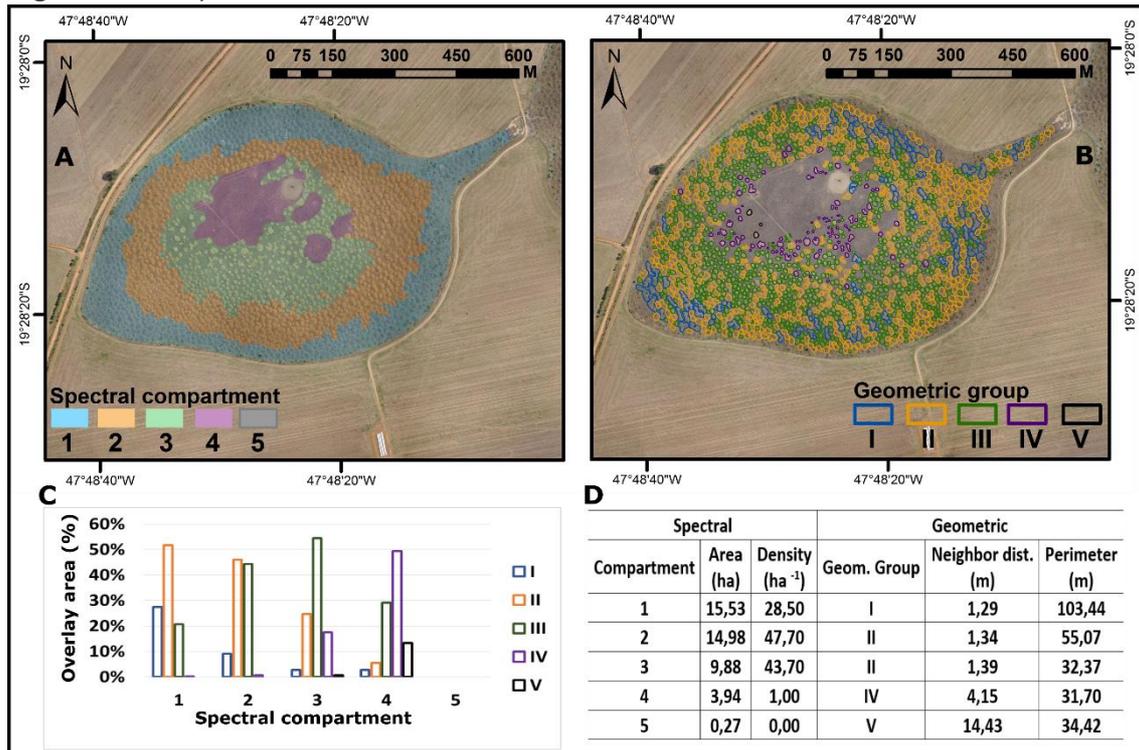
A classificação não-supervisionada das bandas do visível e do infravermelho próximo resultou em um padrão de organização espacial concêntrico do campo de murundus, para ambos sensores, em 4 ou 5 *clusters*. As características espectrais revelam a existência de uma organização dos murundus no interior da depressão, isto é, revelam a existência de um gradiente desde a borda até o centro da área deprimida.

A Figura 25 mostra que: (i) nas classes mais internas do campo de murundus estudado não ocorrem montes de terra. Essas áreas são caracterizadas por menores altitudes, predomínio de vegetação de gramíneas e estão sujeitas a um período mais longo de alagamento e (ii) nos grupos mais externos ocorrem murundus de diversos perímetros e distâncias entre os vizinhos. A cobertura vegetal é de gramíneas nos espaços inter-murundus e de arbustos e árvores nos topos dos murundus. Nesses grupos o solo está sujeito a menor período de alagamento.

### 3.5.5 Organização espacial da distribuição dos murundus

A Figura 26 apresenta a organização espacial da distribuição dos murundus em compartimentos, segundo suas características espectrais e geométricas.

Figura 26. Compartimentos da área de estudo



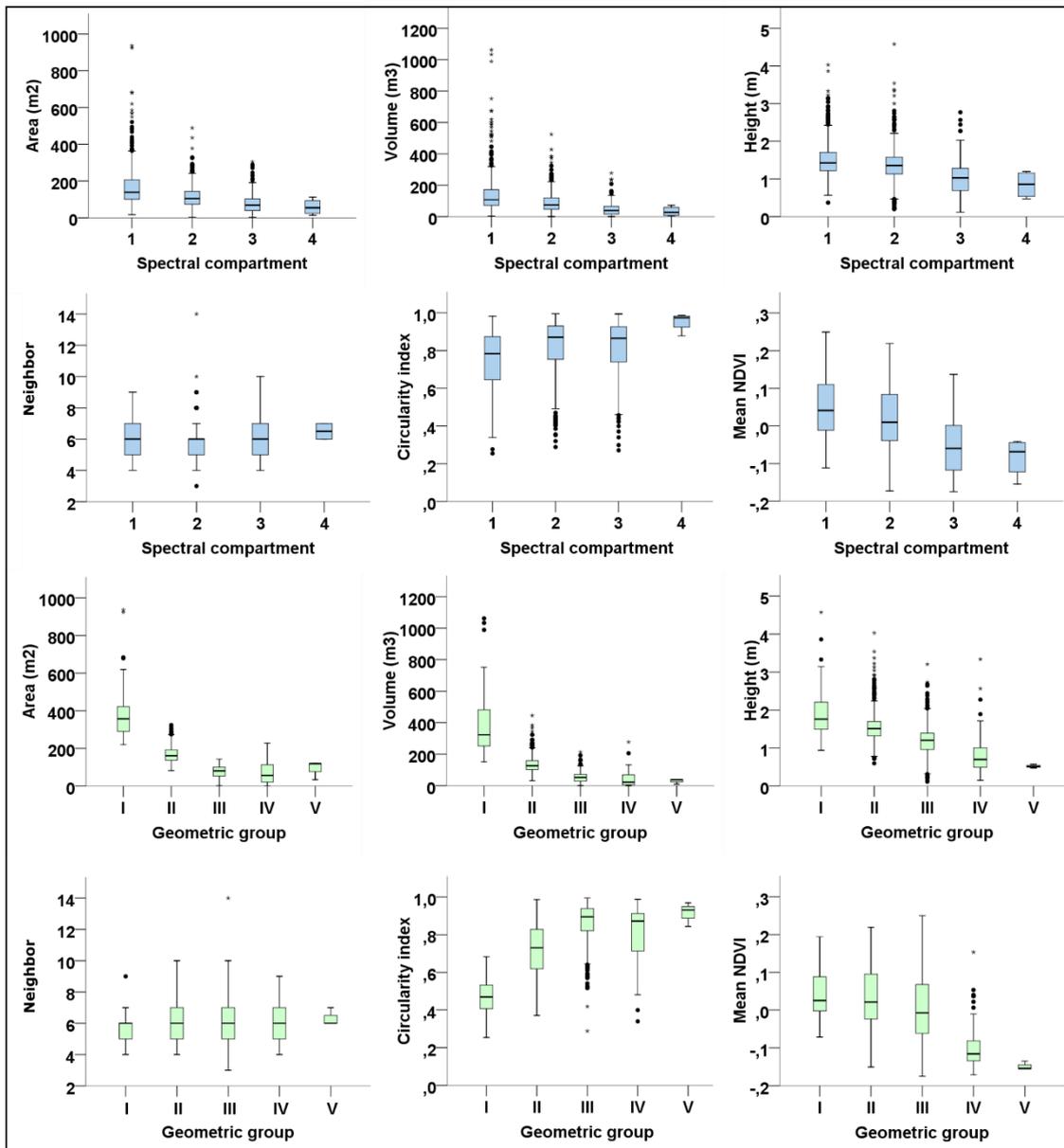
(A) Compartimentos espectrais; (B) grupos geométricos dos murundus; (C) gráfico de sobreposição compartimentos espectrais e grupos geométricos; e (D) dados médios de densidade, distância do vizinho e perímetros. Fonte: Imagens Sentinel 2, obtidas em 03/08/2017, Bandas R2G3B4NIR8, resolução espacial 10m e dados obtidos VANT.

Os compartimentos da Figura 26 (A) foram delimitados com o uso dos mapas da Figura 26 (A), sendo utilizada a suavização de contorno e interpretação visual de imagem, para melhoria da delimitação dos compartimentos. A sobreposição percentual da área dos compartimentos espectrais com os grupos geométricos é analisada no gráfico da Figura 26 (C): (a) o compartimento espectral 1, localizado na zona externa da área de pesquisa, possui principalmente murundus dos grupos geométricos I e II, sendo murundus com perímetros maiores e menores distância entre vizinhos. Este compartimento possui uma densidade de murundus de  $28,52 \text{ ha}^{-1}$ ; (b) o compartimento espectral 2 possui alta sobreposição de montes de terra dos grupos II e III, isto é, a área possui murundus com menores valores de perímetros que os do

compartimento 1 e com alta densidade de monte de terra:  $47,66 \text{ ha}^{-1}$ ; (c) o compartimento espectral 3 é caracterizado principalmente por murundus do grupo III, isto é, apresenta alta densidade de murundu, de  $43,7 \text{ ha}^{-1}$ , e uma redução significativa nos valores de perímetro em relação aos compartimentos anteriores; (d) o compartimento espectral 4 possui maior ocorrência do grupo geométrico IV, com densidade de montes de terra de  $1,0 \text{ ha}^{-1}$ , caracterizado pela diminuição dos murundus e aumento da distância entre os vizinhos; e (e) o compartimento espectral 5, da parte central da área deprimida, é caracterizado pela ausência de murundus.

A Figura 27 apresenta os dados de *área, volume, altura, número de vizinhos, índice de circularidade* e índice de vegetação médio referentes aos murundus por compartimento espectral e grupo geométrico.

**Figura 27.** Distribuição das características morfológica e de vegetação dos murundus



Os compartimentos espectrais foram numerados de 1 a 4, já que o compartimento 5 não possui montes de terra. Da análise da Figura 27, constata-se que, apesar da ocorrência de *outliers* para variáveis *área*, *volume* e *altura*, os dados apresentaram uma redução de valores da borda para o centro da área de estudo, tanto para os compartimentos espectrais como para os grupos geométricos. Uma exceção é verificada na variável *área* para o grupo geométrico V. Os *outliers* ocorridos na variável *volume* e *altura* podem ter sido influenciados pela ocorrência de vegetação seca, com baixo índice de NDVI, no topo de alguns murundus captados no imageamento do VANT.

Ainda com base na Figura 27, nota-se que o número de vizinhos está próximo a 6 para as análises espectral e geométrica. O *Índice de circularidade* não obteve ordenamento dentro dos compartimentos ou grupos, porém registrou menores valores para murundus próximos à borda externa, demonstrando ser este local mais suscetível a murundus com a forma alongada. O índice de vegetação médio dos murundus também variou de forma gradual, reduzindo os valores da borda para o centro dos compartimentos espectrais. Nos grupos geométricos nota-se comportamento semelhante, pois os grupos I e II são classes de murundus próximos à borda da área de pesquisa, ocorrendo uma redução de valores de NDVI em direção ao grupo V.

### 3.6 Discussões

Embora exista uma grande variabilidade dos valores geométricos dos murundus em virtude da sua localização na paisagem (ARAUJO NETO et al., 1986), especialmente pela ação das águas do nível freático e do escoamento superficial (SCHNEIDER; SILVA et al., 1991), os valores encontrados em outros estudos sobre campos de murundus possuem semelhança com os valores obtidos neste trabalho: i) a *densidade* de murundus aferida no local da pesquisa foi de 36,3 murundus ha<sup>-1</sup>, enquanto outros estudos encontraram 26 a 61 ha<sup>-1</sup> (ARAUJO NETO et al., 1986) e 21 a 247 ha<sup>-1</sup> (CRAMER; BARGER, 2014); ii) o percentual de ocupação de murundus na área de estudo foi de 43%, enquanto outros estudos indicam 10 a 50% (ARAUJO NETO et al., 1986), 25 a 39% (CRAMER; BARGER, 2014) e 37,8% (SILVA et al., 2020); iii) a mediana da *altura* dos murundus foi de 1,30 m, próxima das estimativas de 0,05 a 2 m (ARAUJO NETO et al., 1986), 0,3 a 2 m (SCHNEIDER; SILVA, 1991) e 0,7 m de altura média (~ 0,25 a 1,42 m) (SILVA et al., 2020); iii) a mediana do *volume* dos murundus foi aferida em 72,1 m<sup>3</sup> (~ 0,44 a 286,0 m<sup>3</sup>), frente aos valores de 0,01 a 141,5 m<sup>3</sup> (ARAUJO NETO et al., 1986) e 21 m<sup>3</sup> (SILVA et al., 2020); iv) a mediana da *área* foi calculada em 103,25 m<sup>2</sup> (1,95 a 970 m<sup>2</sup>), chegando até 70 m<sup>2</sup> (SILVA et al., 2020); v) a mediana do *perímetro* foi mensurada em 39,5 m (5,25 a 216,71 m), chegando até 40 m (SILVA et al. (2020); e vi) a *distância entre vizinhos* possui a mediana de 1,35 m (0,22 a 17,9 m), mantendo-se entre 1 e 3 m (CRAMER; BARGER, 2014).

A análise entre as variáveis *altura* e *volume* dos murundus com o modelo de regressão de potência foi significativa. Isso indica que a relação positiva entre aumento de volume e *aumento* da *altura* é significativa apenas para os murundus de menor *volume* (individualizados, convexizados), não sendo válida para aqueles de maior *volume*, (alongados, coalescentes ou com topos aproximadamente planos). Este tipo de relação mostra que os murundus de maior *volume* possuem a altura dos topos aproximadamente concordante, enquanto a altura dos murundus de menor *volume* diminui conforme ocorre a diminuição do seu *volume*. A diminuição na *altura* observada nos murundus de menor *volume* foi interpretada, conforme Jesus (2017), como resultante da erosão dos horizontes mais superficiais do solo desses montes de terra. Desta forma, os murundus de maior *volume* apresentam relevante continuidade altimétrica tanto entre seus topos quanto entre seus topos e a superfície do platô, externa à depressão dos murundus. A continuidade lateral entre a superfície do platô e o topo dos murundus, na forma de um plano imaginário levemente convexo, foi constatada por Furley (1986, p. 267), em estudo em um campo de murundus no Distrito Federal.

Quanto à distribuição local dos murundus e às relações com seus vizinhos mais próximos, os murundus analisados tendem a se agrupar em seis vizinhos, resultado semelhante àquele obtido para montes de terra na Namíbia (Getzin et al., 2014; Juergens et al., 2015; Tarnita et. al. 2017) e para os *heuweltjies* na África do Sul (Juergens et al., 2015). Nos casos citados, o padrão hexagonal foi atribuído ao fator biótico, seja pela competição entre colônias de térmitas ou pela interação das ações desses insetos com a auto-organização da vegetação. Vários outros estudos realizaram análise morfométrica dos montes de terra, levando em consideração características como densidade, perímetro, área, distância dos vizinhos, entre outras (PRINGLE; TARNITA, 2017, p. 366). Contudo, esses estudos não apresentam uma análise do padrão de organização dos montes de terra no interior de sua área de ocorrência, considerando aspectos geométricos individuais e suas relações espaciais com montes de terra vizinhos, como realizado neste trabalho.

Os dados dos parâmetros geométricos individuais dos murundus (perímetro, volume e índice de circularidade), assim como os dados produzidos pelas relações inter-murundus (densidade e número de vizinhos), permitiram a distinção de grupos geométricos. Esses grupos se distribuem de forma aproximadamente concêntrica no

interior da depressão estudada. Da parte mais externa da depressão com campo de murundus, no contato com a superfície do planalto, até sua região mais interna, ou seja, do compartimento I ao compartimento IV (Figura 27), verificaram-se as seguintes tendências: 1) individualização dos montes de terra, partindo de murundus coalescentes, com mais de um topo, para murundus de um só topo; 2) diminuição do perímetro e do volume dos murundus; 3) aumento do índice de circularidade dos murundus; 4) aumento seguido por diminuição da densidade de indivíduos; e 5) aumento do número de vizinhos.

O NDVI médio aponta, igualmente, um gradiente entre os compartimentos espectrais (do compartimento I ao compartimento V, Figura 27), indicando uma possível relação entre as propriedades da vegetação com as características geométricas dos montes de terra. Marinon et al. (2012; 2015), ao analisarem a composição florística de campos de murundus na savana ao sul da Amazônia, relatam também um gradiente de ocorrência de espécies arbustivas no topo dos murundus, organizados da borda em direção às áreas centrais do campo, de menores altitudes.

### **3.7 Considerações finais**

Neste estudo, foi constatado que imagens de alta resolução espacial obtidas por VANTs podem ser de grande utilidade para a caracterização de microrrelevos, possibilitando o reconhecimento individual da geometria das formas no terreno, no caso os montes de terras (murundus), e das relações espaciais entre estes elementos na paisagem. A análise dessas formas, via dados aéreos, foi compatível com aquela obtida pelo emprego de imagens de satélite (Sentinel 2), com base nas características espectrais da superfície da área estudada.

Assim, as duas fontes de dados (VANT e satélite) se complementam. Enquanto a abordagem geométrica analisa os montes de terra de forma isolada, associando-os posteriormente aos agrupamentos estatísticos, os dados espectrais são agrupados em compartimentos espaciais contíguos referente às características de reflectância dos alvos (i.e., da vegetação sobre os montes de terra). Embora a natureza dos dados seja diferente, as duas análises convergiram quanto à organização do campo de murundus e à sua distribuição na área de estudo.

Em termos de caracterização desta paisagem, este trabalho demonstra que:

1) a altitude média da superfície do terreno da área externa à depressão com campo de murundus (platô) é próxima da altitude média dos topos dos murundus do compartimento mais externo da depressão. Isso indica uma continuidade altimétrica entre a superfície do planalto e o topo dos murundus da borda da depressão.

2) os murundus de maior volume apresentam significativa concordância altimétrica entre seus topos, o que sugere a existência prévia de uma superfície contínua, aproximadamente paralela à superfície do assoalho da depressão, e atualmente preservada apenas nos murundus mais extensos.

3) o campo de murundus da depressão estudada apresenta uma estrutura interna, isto é, os murundus podem ser agrupados em compartimentos que se ordenam, de forma concêntrica, da borda ao centro da área deprimida. Isso é evidenciado pelas características geométricas individuais dos murundus, pelas relações espaciais entre os murundus e seus vizinhos, e pela reflectância dos alvos na superfície. A ordem de distribuição dos compartimentos no interior da área deprimida pode ser entendida como estágios evolutivos.

Essas constatações contribuem para uma melhor compreensão acerca da gênese dos murundus, e apontam para a importância de fatores abióticos, como a erosão diferencial da superfície do platô, na formação dos microrrelevos de montes de terra presentes no interior de áreas deprimidas sobre topos planos.

## Referências

- ARAUJO NETO, M. D., FURLEY, P. A., HARIDASAN, M., Johnson, C. E. The murundus of the cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, p. 17-35, 1986. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559769>. Acesso em: 04/10/2018.
- COX, G. W., GAKAHU, C. G. Mima mounds in the Kenya highlands: significance for the Dalquest-Scheffer hypothesis. **Oecologia**, 57(1-2), 170-174, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00379577>
- CRAMER, M. D., Von HOLDT, J. R., UYS, V. M., MIDGLEY, J. J. The present and likely past climatic distribution of the termite *Microhodotermes viator* in relation to the distribution of heuweltjies. **Journal of Arid Environments**, v. 146, p. 35-43, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.07.010>
- CRAMER, M. D., INNES, S. N., MIDGLEY, J. J. Hard evidence that heuweltjie earth mounds are relictual features produced by differential erosion. **Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology**, 350, 189-197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.06.030>
- DIAZ, N., DIETRICH, F., CAILLEAU, G., SEBAG, D., NGATCHA, B. N., VERRECCHIA, E. P. Can mima-like mounds be Vertisol relics (Far North Region of Cameroon, Chad Basin)? **Geomorphology**, 261, 41-56, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.021>
- DING, C., HE, X. K-means clustering via principal component analysis. In **Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning** (p. 29), 2004. DOI: <https://doi.org/10.1145/1015330.1015408>
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., Peter, K. D., Ries, J. B. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, 4(11), 3390-3416, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4113390>

ERIKSSON, L., BYRNE, T., JOHANSSON, E., TRYGG, J., VIKSTRÖM, C. . Multi-and megavariate data analysis basic principles and applications (Vol. 1). **Umetrics Academy**, 2013. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=58qLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=ERIKSSON,+L.,+BYRNE,+T.,+JOHANSSON,+E.,+TRYGG,+J.,+VIKSTR%C3%96M,+C.,+Multi-and+megavariate+data+analysis+basic+principles+and+applications+\(Vol.+1\).+Umetrics+Academy,+2013.+DOI:+&ots=oJtZc3swGF&sig=oBfBJHc8cMffkdxgrZJiAPhCiSM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=58qLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=ERIKSSON,+L.,+BYRNE,+T.,+JOHANSSON,+E.,+TRYGG,+J.,+VIKSTR%C3%96M,+C.,+Multi-and+megavariate+data+analysis+basic+principles+and+applications+(Vol.+1).+Umetrics+Academy,+2013.+DOI:+&ots=oJtZc3swGF&sig=oBfBJHc8cMffkdxgrZJiAPhCiSM#v=onepage&q&f=false).

Acesso em: 04/07/2019.

FANG, Q., HONG, H., ALGEO, T. J., HUANG, X., SUN, A., CHURCHMAN, G. J., LIU, Y. Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China. **Geoderma**, 344, 82-98, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.008>

FERNANDES, L. A. . **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo), 1992. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-24092013-094556/en.php>. Acesso em: 04/08/2019.

FORGY, E. W. Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. **Biometrics**, 21, 768-769, 1965.

GETZIN, S., WIEGAND, K., WIEGAND, T., YIZHAQ, H., VON HARDENBERG, J., MERON, E. Clarifying misunderstandings regarding vegetation self-organisation and spatial patterns of fairy circles in Namibia: a response to recent termite hypotheses. **Ecological Entomology**, 40(6), 669-675, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/een.12267>

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., DE OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18607/ES201653398>

BURNHAM, J. L. H., JOHNSON, D. L. (Eds.). **Mima mounds: the case for polygenesis and bioturbation** (Vol. 490). Geological Society of America. 2012. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Xz5BMqTxYJkC&oi=fnd&pg=PA71&dq=Burnham,+J.+L.+H.,+%26+Johnson,+D.+L.+\(Eds.\).+\(2012\).+Mima+mounds:+the+case+for+polygenesis+and+bioturbation+\(Vol.+490\).+Geological+Society+of+America.&ots=RhK9er20mA&sig=LfzzA2ckM77tv4j4Qa7yJh3XIjw#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Xz5BMqTxYJkC&oi=fnd&pg=PA71&dq=Burnham,+J.+L.+H.,+%26+Johnson,+D.+L.+(Eds.).+(2012).+Mima+mounds:+the+case+for+polygenesis+and+bioturbation+(Vol.+490).+Geological+Society+of+America.&ots=RhK9er20mA&sig=LfzzA2ckM77tv4j4Qa7yJh3XIjw#v=onepage&q&f=false). Acessado em: 08/09/2019.

HOTELLING, H. Simplified calculation of principal components. **Psychometrika**, 1(1), 27-35, 1936. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02287921>

HUETE, A., JUSTICE, C., VAN LEEUWEN, W. MODIS vegetation index (MOD13). **Algorithm theoretical basis document**, 3(213), 1999. Disponível em: [http://icdc-test.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/icdc\\_Dokumente/MODIS/MODIS\\_Collection6\\_VegetationIndex\\_ATBD\\_MOD13\\_V03.1.pdf](http://icdc-test.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user_upload/icdc_Dokumente/MODIS/MODIS_Collection6_VegetationIndex_ATBD_MOD13_V03.1.pdf). Acesso em 11/11/2018.

JESUS, G.N. (2017). **Áreas úmidas com campos de murundus sobre a chapada Uberaba/Uberlândia (MG): estrutura espacial, caracterização de solos e considerações sobre sua gênese e evolução**. Dissertação: Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial – PUC-Minas, 2017, 100 p.

JUERGENS, N., VLIEGHE, K. E., BOHN, C., ERNI, B., GUNTER, F., Oldeland, J., PICKER, M. D. Weaknesses in the plant competition hypothesis for fairy circle formation and evidence supporting the sand termite hypothesis. **Ecological Entomology**, 40(6), 661-668. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/een.12266>

JUNK W.J., PIEDADE M.T..F, LOURIVAL R, WITTMANN F, KANDUS P, LACERDA L.D., BOZELLI R.L., ESTEVES F.A., NUNES DA CUNHA C., MALTCHIK L., SCHO'NGART J., SCHAEFFER-NOVELLI Y., AGOSTINHO A.A. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. *Mar. Freshw. Ecosyst, Aquatic Conserv.*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/aqc.2386>

KAISER, Henry F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and psychological measurement**, v. 20, n. 1, p. 141-151, 1960. DOI: <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

KING, L. C. A geomorphological comparison between Eastern Brazil and Africa (Central and Southern). **Quarterly Journal of the Geological Society**, v. 112, n. 1-4, p. 445-474, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1956.112.01-04.22>

KOLAHDOUZAN, M., SHAHABI, C. Voronoi-based k nearest neighbor search for spatial network databases. In **Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases- Volume 30** (pp. 840-851), 2004. Disponível em: <http://www.vldb.org/conf/2004/RS21P6.PDF>. Acesso em: 09/11/2020.

LOVITT, J., RAHMAN, M. M., MCDERMID, G. J. (2017). Assessing the value of UAV photogrammetry for characterizing terrain in complex peatlands. **Remote Sensing**, 9(7), 715. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070715>

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In **Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability** (Vol. 1, No. 14, pp. 281-297), 1967. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=IC4Ku\\_7dBFUC&oi=fnd&pg=PA281&dq=MacQueen,+J.+\(1967\).+Some+methods+for+classification+and+analysis+of+multivariate+observations.+In+Proceedings+of+the+fifth+Berkeley+symposium+on+mathematical+statistics+and+probability+\(Vol.+1,+No.+14,+pp.+281-297\).&ots=nPUcC1OgpM&sig=9\\_oMFxmHykVHFeaS3lT0MlvB5o#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=IC4Ku_7dBFUC&oi=fnd&pg=PA281&dq=MacQueen,+J.+(1967).+Some+methods+for+classification+and+analysis+of+multivariate+observations.+In+Proceedings+of+the+fifth+Berkeley+symposium+on+mathematical+statistics+and+probability+(Vol.+1,+No.+14,+pp.+281-297).&ots=nPUcC1OgpM&sig=9_oMFxmHykVHFeaS3lT0MlvB5o#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 04/09/2019.

MARIMON, B. S., COLLI, G. R., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., EISENLOHR, P. V., FELDPAUSCH, T. R., PHILLIPS, O. L. Ecology of floodplain Campos de murundus savanna in southern Amazonia. **International Journal of Plant Sciences**, v. 176, n. 7, p. 670-681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1086/682079>

MARIMON, B. S., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., JANCOSKI, H. S., FRANCAZAK, D. D., LIMA, H. S., MORESCO, M. C. Floristics of floodplain 'murundus' of the Pantanal of Araguaia, Mato Grosso, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 181-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062012000100018>

MERCER, J. J., WESTBROOK, C. J. Ultrahigh-resolution mapping of peatland microform using ground-based structure from motion with multiview stereo. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, 121(11), 2901-2916, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JG003478>

MIDGLEY, J. J., HARRIS, C., HARRINGTON, A., POTTS, A. J. Geochemical perspective on origins and consequences of heuweltjie formation in the southwestern Cape, **South Africa. South African Journal of Geology**, 115(4), 577-588, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2113/gssajg.115.4.577>

MOORE, J. M., PICKER, M. D. Heuweltjies (earth mounds) in the Clanwilliam district, Cape Province, South Africa: 4000-year-old termite nests. **Oecologia**, 86(3), 424-432, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00317612>

NIKIFOROFF, C. C. **Hardpan and microrelief in certain soil complexes of California**. US Department of Agriculture, 1941. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp\\_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4SJah8pfWPUQtoVC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%201941.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4SJah8pfWPUQtoVC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%201941.&f=false). Acesso em: 20/02/2020.

OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira. Floodplain 'murundus' of Central Brazil: evidence for the termite-origin hypothesis. **Journal of Tropical Ecology**, p. 1-19, 1992. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559804>

PRINGLE, R. M., TARNITA, C. E. Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. **Annual review of Entomology**, v. 62, p. 359-377, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-035413>

QUEIROZ, N., FELTRAN, F. A., SCHNEIDER, M. **L'évolution de la couverture pédologique et du relief sur les plateaux de l'ouest de l'état de Minas Gerais (Brésil) Pedological cover and relief development on western Tablelands of minas gerais state** (Brazil), 1999. Disponível em: <http://nates.psu.ac.th/link/soilcongress/bdd/symp15/398-t.pdf>. Acesso em: 20/04/2018.

- QUEIROZ NETO, José Pereira. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193295653.pdf>. Acesso em: 03/08/2018.
- RESENDE, I. L. D. M., ARAÚJO, G. M. D., OLIVEIRA, A. P. D. A., OLIVEIRA, A. P. D., ÁVILA JÚNIOR, R. S. D. A comunidade vegetal e as características abióticas de um campo de murundu em Uberlândia, MG. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 1, p. 9-17, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000100002>
- ROOSEVELT, C. H. . Mapping site-level microtopography with real-time kinematic global navigation satellite systems (RTK GNSS) and unmanned aerial vehicle photogrammetry (UAVP). **Open Archaeology**, 1(open-issue), 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/opar-2014-0003>
- ROSOLEN, V., OLIVEIRA, D. A., BUENO, G. T.. Vereda and Murundu wetlands and changes in Brazilian environmental laws: challenges to conservation. **Wetlands ecology and management**, v. 23, n. 2, p. 285-292, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9380-4>
- SALES, J. C., FERREIRA, M. E., BUENO, G. T., ROSOLEN, V. Delimitação de microrrelevos de murundus com veículos aéreos não tripulados.. in: anais do **xix simpoósio brasileiro de sensoriamento remoto. Santos-SP**. Anais eletrônico. São José dos Campos, INPE. 2019. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.09.15.36/doc/97408.pdf>.
- SCHNEIDER, M. de O.; SILVA, DB da. Estrutura pedológica e dinâmica hídrica do “covoal” do Córrego da Fortaleza. **Sociedade & Natureza**, v. 3, n. 5, p. 75-89, 1991. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/download/60692/31479>. Acesso em: 10/04/2018.
- SILVA, F. L., PIERANGELI, M. A. P., SANTOS, F. A. S., SERAFIM, M. E., de SOUZA, C. A. Teores naturais e valores de referência de elementos-traço em campos de murundus na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 12, n. 2, p. 172-178, 2017. DOI: <https://10.5039/agraria.v12i2a5436>
- SILVA, G. A., Dos SANTOS BORGES, M., RODRIGUES, S. C. Avaliação geomorfométrica de campo de murundus no Chapadão do Diamante, Serra da Canastra, Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Geografia**, 30(1), 36-51, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30nesp1p36-51>
- SILVA, L. C., VALE, G. D., HAIDAR, R. F., SL STERNBERG, L.. Deciphering earth mound origins in central Brazil. **Plant and Soil**, v. 336, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0329-y>
- SOUZA JUNIOR, J. J., Projeto RADAMBRASIL. Mapa de Geologia. *Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais*, 31, 1983.
- SPAIN, A. V., SINCLAIR, D. F., Diggle, P. J. Spatial distributions of the mounds of harvester and forager termites (Isoptera: Termitidae) at four locations in tropical north-eastern Australia. **ACTA OECOL.(OECOL. GEN.)**, 7(4), 335-352, 1986. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Alister-Spain/publication/303947073\\_Spatial\\_distributions\\_of\\_the\\_mounds\\_of\\_harvester\\_and\\_forager\\_termites\\_Isoptera\\_Termitidae\\_at\\_four\\_locations\\_in\\_tropical\\_northeastern\\_Australia/links/58e1a145a6fdcc41bf944fa7/Spatial-distributions-of-the-mounds-of-harvester-and-forager-termites-Isoptera-Termitidae-at-four-locations-in-tropical-northeastern-Australia.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alister-Spain/publication/303947073_Spatial_distributions_of_the_mounds_of_harvester_and_forager_termites_Isoptera_Termitidae_at_four_locations_in_tropical_northeastern_Australia/links/58e1a145a6fdcc41bf944fa7/Spatial-distributions-of-the-mounds-of-harvester-and-forager-termites-Isoptera-Termitidae-at-four-locations-in-tropical-northeastern-Australia.pdf). Acesso em: 29/09/2019.
- STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, 45(6), 1161-1165. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060031x>
- STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. **Handbook of Applied Hydrology: McGraw-Hill, New York**, 4-39, 1964. Disponível em: <http://hydrologie.org/hsj/101/101010.pdf>. Acesso em: 10/05/2018.
- TARNITA, C. E., BONACHELA, J. A., SHEFFER, E., GUYTON, J. A., COVERDALE, T. C., Long, R. A., PRINGLE, R. M. A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns. **Nature**, 541(7637), 398-401, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20801>
- WEEKS, R. J., SMITH, M., PAK, K., Li, W. H., GILLESPIE, A., GUSTAFSON, B. Surface roughness, radar backscatter, and visible and near-infrared reflectance in Death Valley, California. **Journal of**

**Geophysical Research: Planets,** 101(E10), 23077-23090, 1996. DOI:  
<https://doi.org/10.1029/96JE01247>

## Capítulo IV

# Caracterização dos solos e dos processos pedogenéticos em um campo de murundus da savana brasileira

### Resumo:

Montes de terra não antropogênicos dispersos na paisagem ocorrem em vários locais do mundo. Na Savana Brasileira, esse microrrelevo é conhecido como Campo de Murundus. Localizam-se com frequência no topo das superfícies de aplanamento do Brasil, na transição de ambientes ortomórficos para os hidromórficos. São classificados como áreas úmidas continentais e estão sujeitas ao alagamento sazonal, conforme o regime pluvial tropical. Essas superfícies formam uma interessante paisagem, apresentando um assoalho contínuo com montes de terra dispersos que se situam em depressões isoladas, nas cabeceiras de drenagem ou ao longo de cursos d'água. No presente artigo é apresentada uma análise da distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo, associados ao padrão de distribuição dos montes de terra, bem como a identificação dos principais processos pedogenéticos ocorridos em um campo de murundus de cabeceira de drenagem. Foram empregadas técnicas de sensoriamento remoto, atividades de campo para coleta de solo e análise físico-químico-mineralógica do solo. Os resultados demonstram que o campo de murundus estudado apresenta uma sequência ordenada de processos físico-químicos ocorridos no solo em associação com a dinâmica hidrológica da paisagem. Esses achados podem contribuir para o entendimento da erosão diferencial como um fator importante no funcionamento e no desenvolvimento dos campos de murundus.

**Palavras-chave:** montes de terra; áreas úmidas; processos pedogenéticos; solos; geoquímica de solos; Cerrado.

## Characterization of soils and pedogenetic processes in a murundus field from the Brazilian Savanna

### Abstract:

Dispersed non-anthropogenic earth-mounds across the landscape occur in various locations around the world. In the Brazilian Savannah, this micro-relief is known as *Campo de Murundus*. They are often located on top of flattening surfaces in Brazil, in the transition from orthomorphic to hydromorphic environments. They are classified as continental wetlands and are subject to seasonal flooding, depending on the tropical rainfall regime. These surfaces form an interesting landscape, featuring a continuous floor with scattered mounds of earth located either in isolated depressions, in drainage headwaters or along water courses. This article presents an analysis of the distribution of physical and chemical soil parameters, associated with the distribution pattern of earth-mounds, as well as the identification of the main pedogenetic processes that occurred in a mounds field of headwater. Remote sensing techniques, field activities for soil collection and physical-chemical-mineralogical soil analysis were employed. The results demonstrate that the studied mounds field presents an ordered sequence of physical-chemical processes occurring in the soil in association with the hydrological dynamics of the landscape. These findings may contribute to the understanding of differential erosion as an important factor in the functioning and development of mounds fields.

**Keywords:** murundus field; wetlands; pedogenetic processes; soils; soil geochemistry; Savanna.

## 4.1 INTRODUÇÃO

### 4.1.1 Definição, categorias e gênese dos campos de murundus

Singular paisagem brasileira, os campos de murundus são configurados como uma área com a presença de montes de terras (*earth-mounds*) dispersos regularmente na paisagem. Os campos de murundus são encontrados no Pantanal Mato-grossense (OLIVEIRA-FILHO, 1982), no Bioma Amazônico (SILVA et al., 2017) e no Bioma Savana (ARAUJO NETO et al., 1986). Individualmente, os murundus são definidos como elevações semicirculares, arredondadas ou ovais, com dimensões médias de 10 metros de comprimento, 70 centímetros de altura e 6 metros de largura (ARAUJO NETO et al., 1986).

Os campos de murundus da Savana Brasileira são associados à paisagem na transição de ambientes ortomórficos para hidromórficos, que ocorrem seja de forma isolada, em depressões localizadas no topo de platôs ou colinas amplas com baixa declividade; seja ao longo de cursos d'água, nos vales hidromórficos de pequenos cursos d'água; ou ainda nas cabeceiras de drenagens, conectadas ou parcialmente conectadas à rede de drenagem, formando depressões em forma de anfiteatro (FURLEY, 1986; SCHNEIDER; SILVA 1991).

Eles integram o fenômeno de montes de terra em padrões repetidos nas paisagens ao redor do mundo, como, por exemplo, os *heuweltjies*, na África do Sul (MOORE; PICKER, 1991); e os *mima-mounds*, na América do Norte (DALQUEST; SCHEFFER, 1942). As principais pesquisas desenvolvidas sobre esse fenômeno estão concentradas na descoberta dos processos que levam à formação e à distribuição desses montes de terra. No entanto, ainda não estão bem definidos na literatura os mecanismos de formação para os campos de murundus no Brasil, assim como para os *heuweltjies*, na África do Sul, e para os *mima-mounds*, na América do Norte (PRINGLE; TARNITA, 2017, p. 368).

As controvérsias científicas quanto a gênese dos *mima-mounds* estão divididas entre os fatores abióticos: a erosão e as atividades sísmicas (BERG, 1990); os fatores bióticos: a construção pela fauna fossorial (REED; MUNDSON, 2007); e poligênicos: erosão e construção pela fauna fossorial (JOHNSON; BURNHAN, 2012, GABET et al., 2014). Para os *heuweltjies*, a disputa da gênese ocorre entre os fatores

abióticos: os processos geoquímicos no solo e a erosão/deposição eólica (CRAMER; MIDGLEY, 2012; MCAULIFFE et al., 2014, CRAMER; MIDGLEY, 2015); e os fatores bióticos: construção dos montes pela ação de térmitas (MOORE; PICKER, 1991; FRANCIS et al., 2013).

As hipótese sobre a gênese dos murundus no Brasil estão divididas entre: os fatores abióticos relacionados à erosão diferencial do solo a partir da dinâmica hidrológica (ARAUJO NETO et al., 1986; FURLEY, 1986; SILVA et al., 2010); os fatores bióticos, pela formação dos montes de terra a partir da construção sucessiva de colônias de térmitas (paleotermiteiros) (OLIVEIRA FILHO, 1988, 1992); e poligênica (biótica/abiótica), da combinação de erosão diferencial associada ao padrão de vegetação (CRAMER; BARGER, 2014; MARINON et al., 2015).

Os estudos que defendem a hipótese de erosão diferencial indicam que a bioturbação (raízes das plantas, formigas e térmitas) nos campos de murundus ocorre somente nas camadas superficiais do solo dos montes de terra, e que nem todos os montes de terra possuem a presença de atividades de térmitas (SCHNEIDER; SILVA, 1991, ROSOLEN et al. 2019; MOREIRA et al., 2017).

Recentemente, Rosolen et al. (2019) propuseram um modelo de formação dos montes de terra associados aos processos geoquímicos de rebaixamento do solo ao redor dos montes de terra pelo colapso da microestrutura do solo. Tal colapso ocorreu devido à dissolução de minerais e lixiviação de solutos transportados pela água por uma rede de microfissuras no solo e na rocha subjacente.

#### **4.1.2 Distribuição dos montes de terra e a estrutura da paisagem**

Frequentemente, a distribuição dos montes de terra é reconhecida como regular no interior do campo de montículos (MOORE e PICKER, 1991; DIAZ et al., 2016; CRAMER et al., 2017), embora em muitas áreas eles apresentem diferentes padrões de distribuição e forma, em função de sua posição na paisagem. Por exemplo, Horwath e Johnson (2006) constataram que os *mima-mounds* de áreas planas tendem a ser circulares, enquanto os que se encontram ao longo de vertentes tendem a ter forma elíptica, alongados no sentido da vertente; Diamond et al (2019) descobriram que a distribuição do montes de terra apresenta uma correlação das características morfológica dos montes de terra com a dinâmica hidrológica do nível freático; Sales et al. (2021) demonstraram que os montes de terra são distribuídos

conforme as suas características morfológicas e que essa distribuição representa compartimentos distintos no interior do campo de montículos.

A organização estrutural dos montes de terra no campo de montículos pode ser evidência de que os fatores abióticos, como, por exemplo, a interação dos fatores clima, relevo e do solo, contribuam para a distribuição dos montes e terra. Segundo Fahrig (2005), a adoção da abordagem de análise de paisagem para entendimento dos processos naturais é necessária sempre que se espera que a estrutura da paisagem tenha um efeito significativo na variável de resposta (abundância / distribuição / processo) de interesse.

#### **4.1.3 Campos de Murundus: desenvolvimento da área úmida e da cobertura pedológica**

Os campos de murundus da Savana Brasileira são configurados como pequenas áreas úmidas alimentadas pela água da chuva (JUNK et al., 2013). A dinâmica da água nessas superfícies é entendida como motor da expansão da área úmida (PETERSCHMITT et al., 1996, ROSOLEN et al., 2007), que ocorre de forma centrífuga e remontante. Esse processo se manifesta na cobertura pedológica observando-se seu gradiente de coloração: dos solos vermelhos (topo), passando por solos amarelos e terminando em solos acinzentados (vale hidromórfico). O ambiente redutor e os fluxos hídricos nas áreas hidromórficas afetadas pela elevação do nível freático favorecem o transporte seletivo dos minerais da fração argila ou sua dissolução, seguida da translocação ou exportação de seus elementos químicos constituintes, promovendo a acumulação seletiva da fração areia e o rebaixamento topográfico (PETERSCHMITT et al., 1996, ROSOLEN et al., 2007). Nesse contexto, o rebaixamento topográfico das depressões hidromórficas, onde ocorrem os campos de murundus, seria de responsabilidade processos pedogenéticos (QUEIROZ NETO et al., 1998 e 2011; ROSOLEN et al., 2019).

A cobertura pedológica dos campos de murundus da Savana Brasileira é caracterizada pela transição Latossolo-Gleissolo (ARAÚJO NETO et al., 1986, SCHNEIDER; SILVA et al., 1991). Os Latossolos argilosos, bem drenados e com a presença marcante de óxidos de ferro, como a hematita e goethita, são localizados na borda externa das depressões com campos de murundus. Eles variam da cor vermelha, vermelho-amarelo, ao amarelo. No interior do campo de murundus,

ocorrem Gleissolos ou Plintossolos, sujeitos à elevação sazonal do nível freático. Esse pedoambiente é caracterizado pela redução de Fe em condições anaeróbias e sua translocação ou exportação, formando horizontes acinzentados, com ou sem mosqueados (KÄMPF; CURI, 2012).

Na base da cobertura pedológica dos campos de murundus há comumente uma camada composta de concreção ferruginosa. Essa camada pode formar um assoalho contínuo, descontínuo, ou estar degradada pela ação da água, formando nódulos ferruginosos (SCHNEIDER; SILVA, 1991; QUEIROZ NETO, 2011, CASTRO JUNIOR et al., 2004; MOREIRA et al., 2017; MARTINS et al 2006, ROSOLEN et al., 2017).

#### **4.1.3.1 Pesquisas em solos de campos de murundus**

As pesquisas realizadas sobre as características físico-químicas dos solos em campos de murundus podem ser divididas em duas categorias. A primeira se trata de uma pesquisa comparativa, entre as características dos solos nos montes de terra com os solos das áreas deprimidas ao redor dos murundus e com os solos encontrados na borda dos campos de murundus, em área de planalto. Esses trabalhos demonstraram que os murundus possuem em geral atributos do solo semelhantes aos dos solos das áreas de planalto. As principais características semelhantes foram: para assinatura de isótopo de carbono, composição química e textura argilosa do solo (SILVA et al., 2010), enquanto as áreas deprimidas circunvizinhas aos montes de terra (assoalho da depressão) apresentaram maior quantidade de areia (SANTOS et al., 2020; SILVA et al. 2010; ARAUJO NETO et al. 1986).

A segunda abordagem tem sido realizada na caracterização da transição Latossolo-Gleissolo, utilizando uma catena que liga o setor do planalto ao campo de murundus. Essa abordagem busca o entendimento dos processos geoquímicos ocorridos na evolução da cobertura pedológica. Destacam-se as seguintes contribuições:

- i) a mudança das condições de umidade e a variação da altura do nível freático influenciam a organização do solo, provocando diferenças na sua composição físico-química expressas, por exemplo, na sua cor. Na

área superior da catena, onde se localizam os Latossolos bem drenados, o solo é argiloso, com estrutura microagregada granular (ROSOLEN et al., 2019, p.7), com cores em tons de vermelho-amarelo e amarelo (10YR – 5YR); em profundidade média, ocorrem manchas vermelho-amareladas distintas; e, em profundidades maiores, há o aparecimento de manchas vermelhas e nódulos vermelhos (SCHNEIDER; SILVA, 1991; MARTINS; ROSOLEN, 2014);

- ii) na porção média de catena, local de ocorrência dos murundus, nota-se uma forte ação da hidromorfia no solo. Eles continuam argilosos, as cores do solo variam em tons de amarelo (10 YR - 7,5 YR), no topo do perfil. Em profundidade média há a ocorrência de tons em cinza com manchas vermelho-amarelas; em profundidades maiores nota-se o aumento de nódulos ferruginosos; e
- iii) no terço inferior da catena, local de menor altitude e ausência de murundus, é observada uma camada superior abundante em matéria orgânica; abaixo dessa camada um horizonte cinza, argiloso, maciço, com fissuras médias e concentração de ferro na parede. Na sequência vertical, notam-se manchas cinzentas com concentrações de ferro formando manchas vermelhas e vermelho-escuras (SCHNEIDER; SILVA, 1991; MARTINS; ROSOLEN, 2014; ROSOLEN et al., 2019).

#### **4.1.4 Hidrologia dos campos de montículos**

As características hidrológicas de um campo de murundus necessitam de maiores estudos. Existem diversas lacunas nas informações sobre as características físico-químicas das águas superficiais e subsuperficiais, tais como: temperatura; salinidade; pH; transparência; e composição química.

Dois recentes estudos sobre infiltração e hidrogeologia em campos de murundus demonstraram que essas microformas de relevo se localizam em áreas de descarga de água, pela infiltração lateral, e em áreas de recarga de aquíferos confinados (FURLAN et al., 2020 e 2021).

Um estudo desenvolvido em hidrologia em um campo de montículos em ambientes temperados, com a presença de montes de terra, denominados *hummocks*, indicam que a morfologia dos montes de terra (volume e área) é

correlacionada com a dinâmica de elevação do nível freático. A dinâmica hidrológica interfere, portanto, na distribuição e na morfologia dos montes de terra (DIAMOND et al. 2019).

#### **4.1.5 Hipóteses e objetivos**

Este trabalho foi realizado a partir da hipótese de que a morfologia e a distribuição dos montes de terra são associadas aos processos hidrológicos e pedogenéticos existentes nos campos de murundus. Esses processos influenciariam a estrutura da paisagem, contribuindo para a distribuição padronizada dos montes de terra, conforme as suas características morfológicas (SALES et al., 2021). Nesse sentido, o conhecimento das características físicas e químicas dos solos pode contribuir para a compreensão dos processos geoquímicos responsáveis pela gênese e funcionamento das áreas úmidas e do campo de murundus associado, tendo como referência a hipótese de evolução por erosão diferencial na paisagem.

A partir da hipótese levantada, o presente trabalho teve como objetivos: i) analisar a distribuição de parâmetros físicos e químicos do solo em associação ao padrão de distribuição e características morfométricas dos montes de terra; e ii) identificar os principais processos pedogenéticos ocorridos em um campo de murundus que contribuem para a ocorrência da erosão diferencial.

## **4.2 Materiais e métodos**

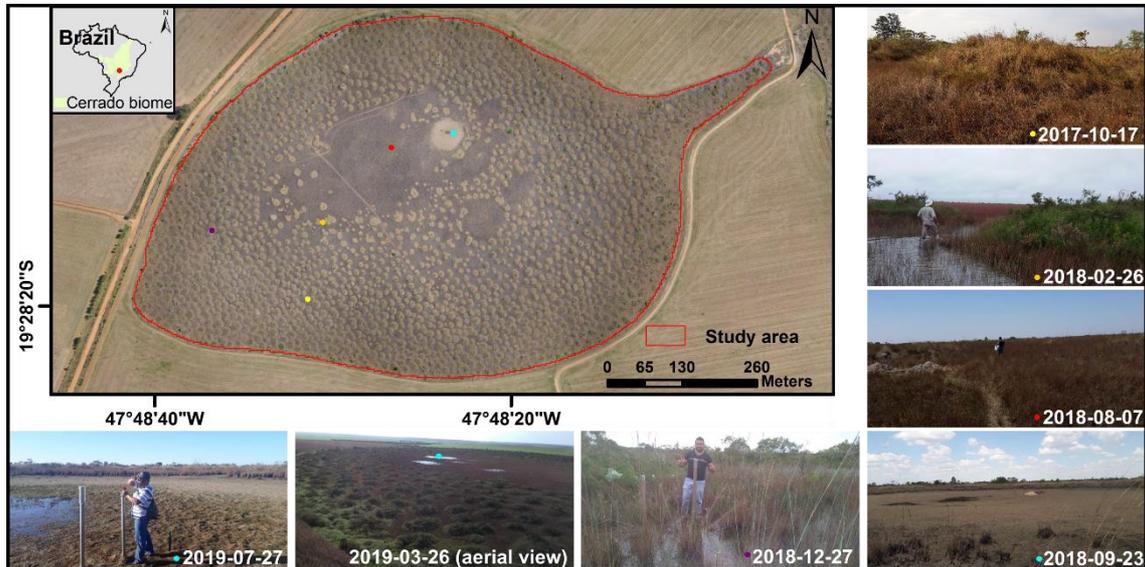
### **4.2.1 Área de estudo**

A pesquisa foi realizada em um campo de murundus representativo das superfícies de aplanamento do Cerrado brasileiro. O local de estudo é uma das cabeceiras de drenagem da bacia do Rio Claro e está localizado sobre a chapada entre as cidades de Uberaba e Uberlândia. A área deprimida de cabeceira possui uma superfície de 43,97 ha, conforme Figura 28.

A área de estudo pertence à Bacia Sedimentar do Paraná, representada pelo Grupo Bauru (FERNANDES, 1992; SOUSA JÚNIOR et al., 1983). A litologia é caracterizada por arenitos do Cretáceo Superior com camadas de silte e argila ricas

em ferro, pertencentes ao Membro Serra da Galga da Formação Marília (FERNANDES; RIBEIRO, 2015).

**Fig.28.** Localização e imagens da área de estudo.



O clima é um fator de forte influência no regime hidrológico da área de estudo, sendo caracterizado por uma estação seca pronunciada, de abril a outubro, seguida pela estação chuvosa durante os meses de verão, de novembro a março. As médias anuais de precipitação e temperatura são, respectivamente, 1.584,2 mm e 22,3 °C, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

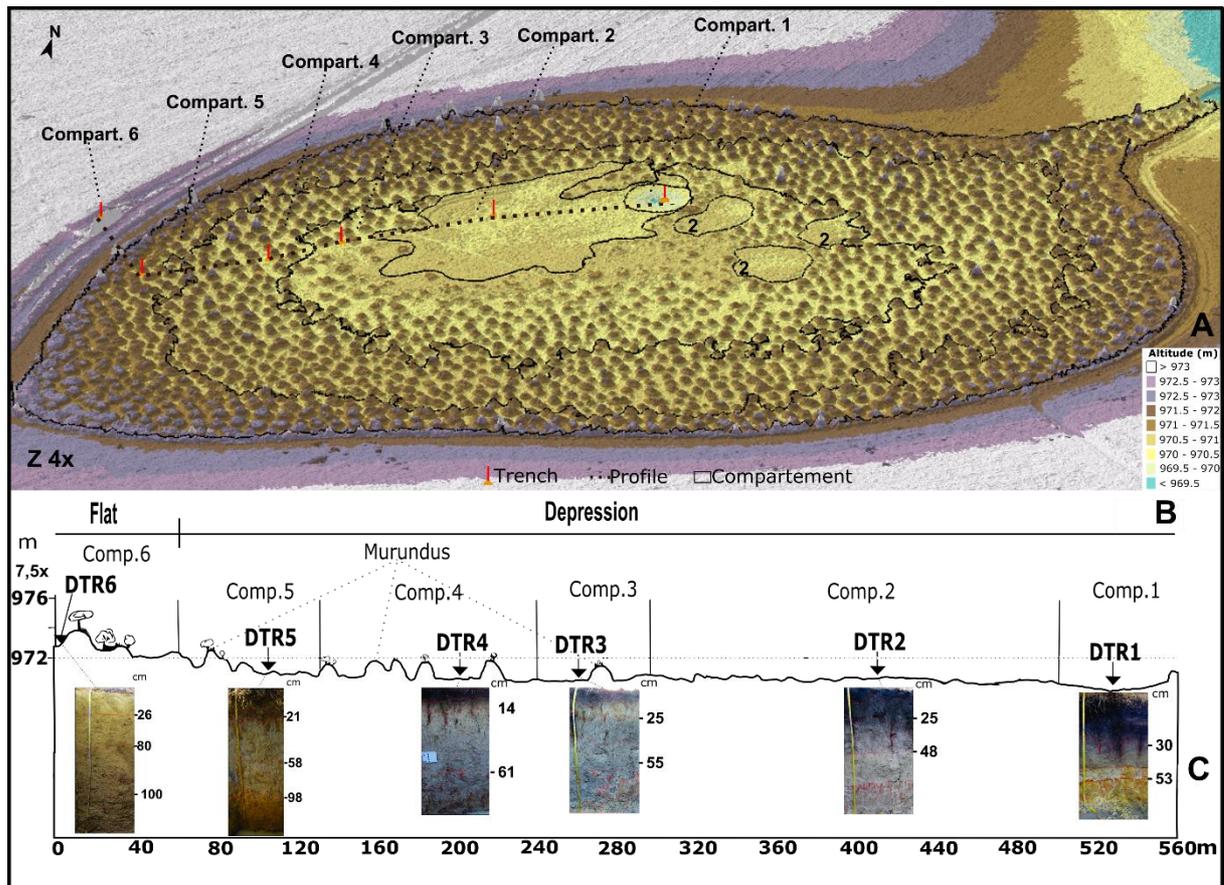
No contexto da geomorfologia regional, a área de pesquisa se localiza em uma área de aplanamento remanescente, sobre a superfície Sul-americana (KING, 1956), com altitudes em torno de 1.000 m. Localmente, é caracterizada como uma superfície embutida no planalto, na forma de uma depressão fechada. Nessa região, há a presença de Latossolos nas áreas altas e planas, apresentando variação de cor: vermelho, vermelho-amarelo e amarelo. Nas depressões com vertentes de baixa declividade (<5%) e fundo plano, os solos se desenvolveram em ambiente hidromórfico, destacando-se os Plintossolos, os Gleissolos e os Organossolos (SCHNEIDER e SILVA, 1991; QUEIROZ NETO et al., 1998). Os murundus são associados às depressões, possuindo uma grande diversidade quanto a sua forma, área, volume, altura, entre outras características.

A vegetação local sofreu grande interferência antrópica com o desmatamento de espécies arbóreas e arbustivas do cerrado para a implantação de agricultura mecanizada. A cobertura vegetal interna está relativamente preservada. Em condições naturais de ocorrência, os campos de murundus possuem uma composição florística em três classes principais. No assoalho das áreas deprimidas, sujeito ao alagamento sazonal, predomina a vegetação hidrófila, contendo principalmente espécies de gramíneas. Os topos dos murundus, áreas com melhor drenagem do solo, apresentam composição florística diversificada, com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas. Na parte externa ao campo de murundus, localizadas nas áreas com maior elevação, ocorrem as fitofisionomias de campo cerrado e cerrado s.s., compostas essencialmente de espécies de arbóreas, relacionadas à ocorrência de Latossolos (ARAÚJO NETO et al., 1986; SILVA et al., 2010; RESENDE et al., 2014).

#### **4.2.2 Amostragem de solo no campo de murundus estudado**

A amostragem do solo foi realizada nos compartimentos morfológicos descritos no capítulo anterior. Esses compartimentos refletem a organização do relevo no campo de murundus, sendo numerados de 1 (centro da depressão) até 6 (área de planalto). Em cada compartimento foi aberta uma trincheira de até 150 cm. A partir dessa profundidade, foram realizadas tradagens até cerca de 300 cm (Figura 29).

**Figura. 29.** Pontos de amostragem de solo, relevo e solos locais



(A) Relevo 3D com pontos de amostragem de solo; (B) Perfil topográfico dos pontos de amostragem de solo; e (C) perfil de solo nos pontos de amostragem

#### 4.2.3. Análise física e química do solo

A análise granulométrica com os teores de areia, silte e argila foi realizada com o uso de dispersante NaOH e determinação por densímetro, conforme procedimentos descritos em Embrapa (1997). A quantificação da matéria orgânica no solo foi realizada pelo método de oxidação com bicromato de potássio e determinação colorimétrica (CANTARELLA et al., 2001). Ambas as análises foram realizadas pelo Laboratório Agroanálise.

O estudo mineralógico do material coletado até 120 cm foi realizado por Difração de Raios-X – DRX (GUINIER, 1994). As 27 amostras brutas analisadas neste trabalho foram pulverizadas e homogeneizadas no moinho com panela e cilindros de carbeto de tungstênio (Marca AMEF), por cerca de 2 minutos. O material pulverizado foi preparado no porta-amostra de preenchimento frontal, conforme

Buhrke et al. (1998). Os perfis de difração de raios-X foram obtidos com o auxílio do aparelho Bruker D8 Advance, equipado com tubo de cobre, fenda Soller e detector linear ultrarrápido LynxEye, operando a 40 kV e 40 MA. Os perfis foram adquiridos entre 5 e 60 graus, com passos de 0,02 graus e tempo de aquisição por passo de 0,5 segundos. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA) do Instituto de Ciências Exatas e da Terra (ICET) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Para identificação e quantificação da fase cristalina foi utilizado o *Software X'pert Highscore Plus*.

A análise química do solo foi realizada em Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (DPM/UNESP). As amostras de solo foram finamente moídas usando um moinho de bolas de ágata, peneirado através de <200 *mesh* (<74  $\mu\text{m}$ ). Os resultados da análise química do solo foram submetidos a uma análise descritiva de distribuição dos elementos por compartimento:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ .

#### 4.2.4 Identificação dos fluxos da água

A identificação dos fluxos de água superficial ocorridos no campo de murundus estudado foi realizada no contexto da microbacia hidrográfica, delimitada a partir de imagem do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução de 30 m, por técnicas automatizadas de geoprocessamento, em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), utilizando-se a ferramenta *ArchidroTools* do *software* ArcMap (DJOKIC et al., 2011; GOPINATH et al.; 2014).

Os mapas de altitude e declividade foram utilizados na identificação dos possíveis fluxos de água que possam influenciar o campo de murundus estudado, no contexto regional da microbacia. No contexto local, foram utilizadas imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), com voo associado a um *Global Navigation Satellite System* (GNSS) de precisão geodésica e correção pós-processada (*Post Processed Kinematic-PPK*), com precisão de 3 cm. Após a obtenção das imagens e processamento pelo *Software Agisoft Photoscan*, foi construído um modelo 3D, *Triangulated Irregular Network* (TIN), para análise local dos fluxos d'água. Esta fase consiste na identificação dos fluxos de água superficial, bem como na localização dos fluxos subsuperficiais já identificados na literatura.

### 4.3 Resultados e interpretações

#### 4.3.1 Aspectos morfológicos e cor do solo por compartimento

A Tabela 4 apresenta a caracterização e a descrição do perfil do solo para cada ponto de amostragem. Também são apresentadas as características de relevo, vegetação e meses de inundação de cada compartimento da área de pesquisa.

**Tabela 4.** Descrição morfológica do solo, relevo, vegetação e alagamento

Horizonte	Prof. (cm)	Descrição macromorfológica	Cor	Compartimento / microrrelevo / vegetação / alagamento sazonal
<b>DTR1</b>				
O	0–30	Argiloso, estrutura granular muito pequena e pouco desenvolvida, matéria orgânica fortemente decompostas raízes finas e gramíneas. Mal drenado. Transição gradual e ondulada entre 30 e 40cm.	Preto 10YR 2/1	-Compartimento 1 (0,25 ha); - 0% de ocupação de murundus; - Área rebaixada no centro da depressão topográfica; sem a presença de murundus; e altitude entre 969,76 m e 970,67 m. - Presença de gramíneas - Ocorrência de alagamento: 7 meses (nov-mai).
AG	30-53	Argiloso, maciço com subestrutura granular, presença de grãos de quartzo (areia fina), transição abrupta.	Cinza 7.5YR 5/2	
Bg	53a65	Descontínuo, arenoso e maciço. Limite inferior com presença de cada ferruginosa vermelha laminar (2 a 5mm de espessura), com diferentes graus de endurecimento.	Cinza-claro (10YR 7/1)	
HM	75-250	Argiloso, maciço, com subestrutura fraca laminar no contato com o horizonte superior.	Manchas vermelhas amareladas (5YR 5/8); amarelas (2.5YR 7/6) e cinza 2.5Y 5/1	
<b>DTR2</b>				
O1	0–15	Argiloso, grumoso e granular, com raízes finas de gramíneas	Preto 10YR 2/1	- Compartimento 2 (3,94 ha); - 0% de ocupação de murundus; - Área plana, com leve rampa em direção ao centro da depressão; ausência de murundus; altitudes entre 970,34 m e 971,32 m. - Presença de gramíneas - Ocorrência de alagamento: 5 meses (dez-abr).
O2	15–25	Argiloso, maciço com estrutura granular ao redor de fendas abertas por raízes. Impregnações de ferro amarelo-avermelhado e vermelho-amarelado (7.Y5R 6/8 e 5YR 5/8) nas paredes dos poros. Transição ondulada a partir de 25cm.	Preto 5Y 2.5/1	
Ag1	25–48	Argiloso, maciço com subestrutura granular, impregnação de ferro ao redor de raízes	Cinza (10YR 5/1)	
Bg1	48–73	Argilosa, com pequenas impregnações de ferro, maciça com subestrutura granular bem desenvolvida, extremamente duro quando seco. Fissuras verticais com impregnações ferruginosas nas paredes dos poros.	Cinza (2,5Y 6/1)	
HM	73–250	Argiloso, maciço, com subestrutura granular bem desenvolvida. As manchas vermelhas são orientadas verticalmente e possuem núcleos mais vermelhos mais duros ou pequenos volumes cinza. Aumento dos tons de cinza a partir de 100 a 250 cm.	Manchas vermelhas amarelas (5YR 5/8) (40%) e cinza-claro (10YR 7/1) (60%)	
<b>DTR3</b>				
O1	0–15	Argiloso, grumoso, com raízes finas de gramíneas.	Preto 7.5Y 2.5/1	- Compartimento 3 (9,88 ha); - 33% de ocupação de murundus, maiores distâncias entre vizinhos e menores volumes.
Transição	15-25	Argiloso, granular, pequenas impregnações de ferro nas paredes de alguns poros.	Bruno a bruno acinzentado (10YR 5/3 a 10YR 5/2)	

Ag1	25–42	Argiloso, microagregada, com impregnações amarelas de ferro	Bruno acinzentado (10YR 5/2)	- Área plana, com leve rampa em direção ao centro da depressão; - Altitudes entre 970,34 m e 972,15 m.
Bg	42–55	Argiloso, maciço com subestrutura microagregada bem desenvolvida, vários poros com raízes apodrecidas e com impregnação de ferro nas paredes dos poros, nódulos ferruginosos (< 1 cm) vermelhos friáveis. Extremamente duro quando seco.	Cinza (10YR 6/1)	- Presença de gramíneas e espécies arbustivas em alguns murundus. - Ocorrência de alagamento: 3 meses (dez-fev).
HM	55–250	Argiloso, maciço com subestrutura granular. Extremamente duro quando seco. Tradagem a partir de 100 até 250 cm indicou similaridade morfológica dos materiais.	Cinza-claro (10YR 7/1) (80%), associado com vermelho amarelado (5YR 5/8) (10%) e amarelo avermelhado (7,5YR 6/8) (10%)	
<b>DTR4</b>				
A1	0–9	Argiloso, grumoso, muitas raízes.	Bruno muito escuro (10YR 2/2)	- Compartimento 4 (14,98 ha); - 55% de ocupação de murundus; maior densidade de montes de terra, volume médio.
Transição	9-14	Argiloso, maciço, presença de fissuras causadas por raízes. Extremamente duro quando seco. Transição ondulada de 14-27 cm.	Bruno (10YR 4/3)	- Área plana, com leve rampa em direção ao centro da depressão; - Altitudes entre 970,6 m e 973,2 m.
Bg1	14–61	Argiloso, maciço com subestrutura granular, impregnações ferruginosas amareladas nas paredes dos poros associados com raízes, nódulos ferruginosos (< 1 cm) friáveis. Extremamente duro quando seco.	Cinza claro (2,5Y 7/1) com amarelo oliva (2,5Y 6/8)	- Presença de gramíneas, espécies arbustivas e arbóreas, com menor frequência, no topo de alguns murundus. - Ocorrência de alagamento: 2 meses (jan-fev).
HM	61–25	Argiloso, maciço com subestrutura granular, extremamente duro quando seco	Cinza-claro (10YR 7/1) (70%) e manchas vermelho amareladas (5YR 5/8) e amarelo avermelhado (7,5YR 6/8) (ambas 30%)	
<b>DTR5</b>				
A1	0–15	Argiloso, grumoso, muitas raízes, com precipitações ferruginosas (5 YR 5/8 - vermelho amarelado)	Marrom amarelado escuro (10YR4/4)	- Compartimento 5 (15,53 ha); - 47,5% de ocupação de murundus, menor distância entre vizinhos, maiores volumes.
Ag1	15–21	Argiloso, granular com presença de impregnações ferruginosas vermelho-amareladas. Transição ondulada em 21a 30cm.	Bruno acinzentado (10YR 5/2)	- Área plana, com leve rampa em direção ao centro da depressão; - Altitudes entre 970,6 m e 973,2 m.
Bg1	21–58	Argiloso, granular com presença de impregnações ferruginosas vermelho-amareladas. Transição ondulada em 21a 30cm.	Cinza claro (10YR 7/1)	- Presença de gramíneas, espécies arbustivas e arbóreas em alguns murundus. Ocorrência de alagamento: 1 meses (fev).
Bg2	58–98	Argiloso, maciço com subestrutura granular, quando há raízes ocorrem impregnações vermelho-amarelada nas paredes dos poros. Apresenta uma rede de manchas muito finas bruno avermelhado claro (2,5YR 6/3) e alguns nódulos ferruginosos vermelhos (2,5YR 5/8) pouco endurecido.	Cinza claro (10YR 7/1)	
HM	98–300	Argiloso, maciço com subestrutura granular. Apresenta manchas finas bruno marrom avermelhado claro (5YR 6/4) e nódulos ferruginosos vermelhos (2,5 YR 5/8) resistentes disseminados pelo horizonte manchado.	Amarelo pálido (2,5YR 7/3)	
<b>DTR6</b>				
A1	0–4	Argiloso, laminar (compactação) com estrutura grumosa ao redor de raízes.	Amarelo-avermelhado (10YR 6/6)	- Compartimento 6 - Sem ocorrência de murundus.
B1	4–26	Argiloso, laminar, extremamente compactado, preenchimentos biológicos com argila cinza-escura.	Amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8)	- Área localizada no planalto, com leve rampa

B2	26-80	Argiloso com poros de até 3cm de diâmetro preenchidos com argila cinza-escuro, de atividade biológica, maciço com subestrutura microagregada.	Amarelo avermelhado (7.5YR 6/8)	em direção ao centro da depressão; - Altitudes superiores a 972,5 m.
B3	80-300	Argiloso, estrutura em blocos subangulares pouco desenvolvida (2x1 cm) que se rompe em microagregados, presença de manchas difusas ligeiramente mais vermelhas do que a matriz.	Bruno-vivo (7.5YR 5/6)	- Área desmatada com utilização pela agricultura anual. Ocorrência de alagamento: não ocorre).

Fonte: Schneider; Silva (1991); Sales (2021); Coelho (2021)

Os aspectos morfológicos e de cor do solo foram apresentados na Tabela 4. A seguir, apresentamos um breve resumo das características marcantes analisadas em cada compartimento:

- i) A DTR1 apresentou quatro camadas distintas, sendo representativa de área mal drenada. O topo perfil foi considerado arenoso e a base argilosa. A matriz do solo apresenta cor preta (10YR 2/1), em decorrência da matéria orgânica fortemente decomposta, e estrutura granular. Os horizontes subjacentes possuem a coloração em tons de cinza (7,5YR 5/2) e cinza-claro (10YR 7/1). A partir dos 75 cm, nota-se aumento de manchas vermelho-amareladas (5YR 5/8); amarelas (2,5YR 7/6) e cinzas (2,5 Y 5/1).
- ii) DTR2 apresentou cinco camadas distintas, sendo duas camadas orgânicas, dois horizontes com presença de redução de ferro (Ag1 e Bg1), e um horizonte manchado. O solo foi considerado argiloso em todas as camadas com estrutura granular. Nos horizontes glei, há a presença de pequenas impregnações de ferro em meio à matriz de cores em cinza (10yr 5/) e (2,5y 6/1).
- iii) DTR3 apresentou cinco camadas, sendo uma camada Orgânica (O1), uma camada de transição, e dois horizontes com presença de características hidromórficas Ag1 (bruno-acinzentado 10Y 5/2) e Bg1 (cinza 10YR 6/1), seguidos do horizonte manchado. Todas as camadas foram consideradas argilosas.
- iv) DTR4 apresentou quatro horizontes distintos, não ocorrendo uma camada de horizonte orgânico nesta trincheira. Todo o perfil foi caracterizado como argiloso. O horizonte glei apresenta tons de cinza-claro (2,5y 7/1), amarelo-oliva (2,5y 6/8) e impregnações ferruginosas amarelas nas paredes dos poros.

- v) DTR5 apresentou cinco camadas. Todo o perfil foi considerado argiloso, maciço e estrutura/subestrutura granular, apresentando impregnações de ferro vermelho-amarelas e alguns nódulos de ferro vermelho pouco endurecidos nos horizontes Bg; na base do perfil é encontrado um horizonte manchado;
- vi) DTR6, considerada a trincheira representativa da sequência bem drenada, apresentou quatro horizontes distintos. As cores dos horizontes (B) variando entre amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8) até bruno-vivo (7,5YR 5/6). O topo do perfil apresentou uma estrutura laminar compactada nos horizontes – e ali também presença de bioturbação. Todo o perfil foi considerado argiloso. Na base do perfil, foi constatada a presença de manchas difusas em tons de vermelho.

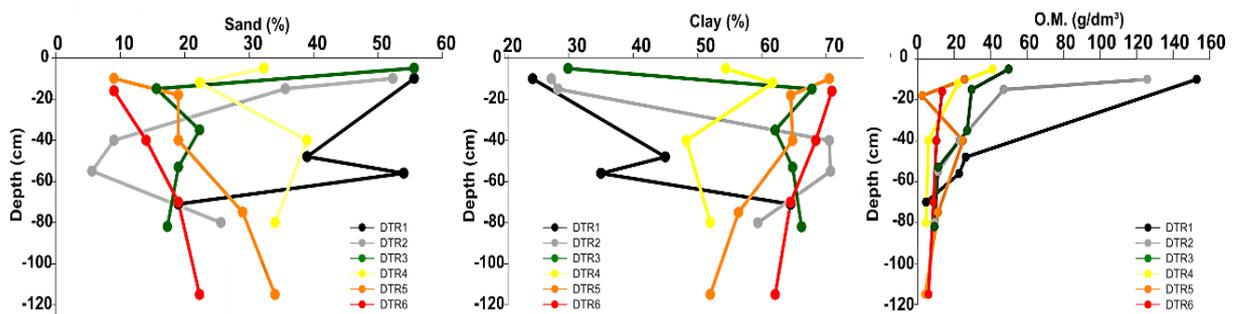
Lateralmente, nota-se um crescente empalidecimento da cor (diminuição do croma) nos horizontes B desde o compartimento 6 (Latossolos) em direção ao compartimento 1 (Gleissolos), o que é um reflexo da crescente hidromorfia ao longo da catena. Nesse trajeto, a coloração do solo passa do amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8), em ambiente oxidante, até a cor cinza-claro (10YR 7/1), onde ocorre um ambiente redutor pela presença prolongada de elevação do nível freático. Do compartimento 4 ao 3 é verificado o aumento da presença de nódulos ferruginosos, manchas vermelhas/amarelas nos poros do solo e ao redor de raízes. Os nódulos e manchas também acontecem nos compartimentos 2 e 1, porém, com menor frequência

Quanto à estrutura e subestrutura, o solo se apresenta lateralmente, do compartimento 1 ao 5, predominantemente em estrutura granular; no compartimento 6 apresentou uma estrutura microagregada com presença de compactação, provavelmente por influência antrópica. Nesse mesmo percurso, nota-se o solo maciço com subestrutura granular a partir dos horizontes (B) em direção aos horizontes manchados em todos os compartimentos. As camadas mais profundas da catena apresentaram também uma variação de coloração do bruno-vivo (7,5YR 5/6) com manchas difusas em vermelho, no compartimento 6. Foi notado o aumento de nódulos e manchas vermelhas e vermelho-amarelas associadas a um solo de matriz cinza-claro (10YR 7/1) ou cinza (2,5YR 5/1), nos horizontes manchados ao longo da catena.

### 4.3.2 Análise granulométrica e de matéria orgânica do solo por compartimento

A Figura 30 apresenta o teor de areia, argila e matéria orgânica (M.O.) por compartimento do campo de murundus estudado.

**Figura. 30.** Distribuição de areia, argila e matéria orgânica por compartimento



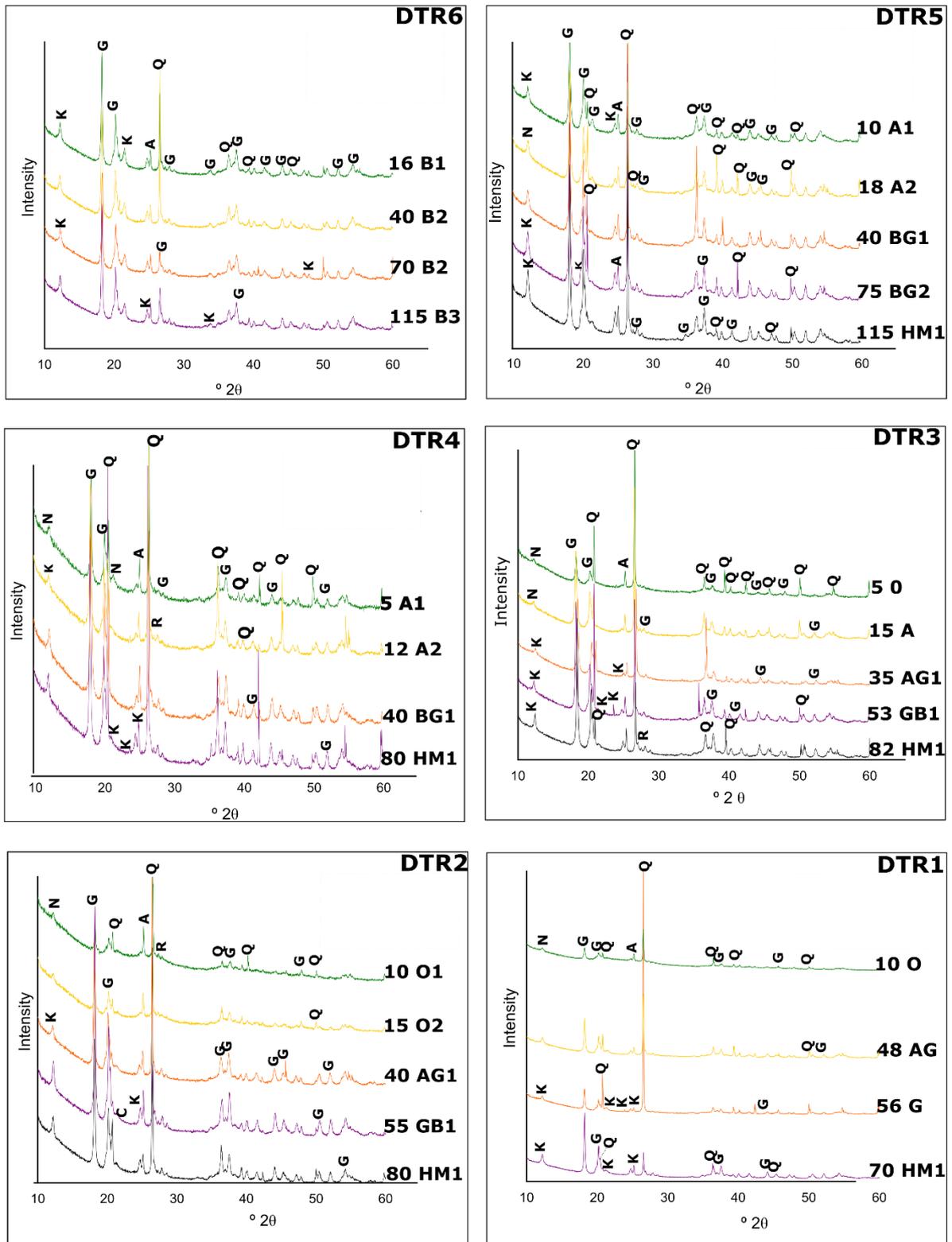
Os gráficos com a teores granulométricos do solo da área de estudo demonstra que os teores de argila e areia possuem uma distribuição oposta. De forma geral, os compartimentos mais distantes do centro do campo de murundus (4, 5 e 6) apresentaram maiores teores de argila. A partir do compartimento 4, na direção do centro da depressão, observa-se a diminuição do teor de argila dos horizontes superiores do solo (nos 40 cm superiores do solo), produzindo marcante gradiente textural nos perfis. No compartimento 1, no centro da depressão, essa diminuição no teor de argila atinge maiores profundidades, ocorrendo nos 70 cm superiores do perfil.

Os teores de matéria orgânica no solo foram mais elevados na parte superior do perfil, principalmente nos compartimentos 1 e 2. Estes são caracterizados pela ausência de murundus e, por estarem localizados no setor mal drenado, apresentam alagamento durante até 06 meses anuais, fato que dificulta a decomposição da matéria orgânica no solo. O teor de M.O. se reduz em direção aos compartimentos com menor tempo de alagamento (3, 4, 5 e 6).

### 4.3.3 Caracterização mineralógica do solo por compartimento

A Figura 31 apresenta a análise mineralógica e a quantificação de minerais por compartimento até 120 cm de profundidade.

Figura 31. Distribuição mineralógica por compartimento.



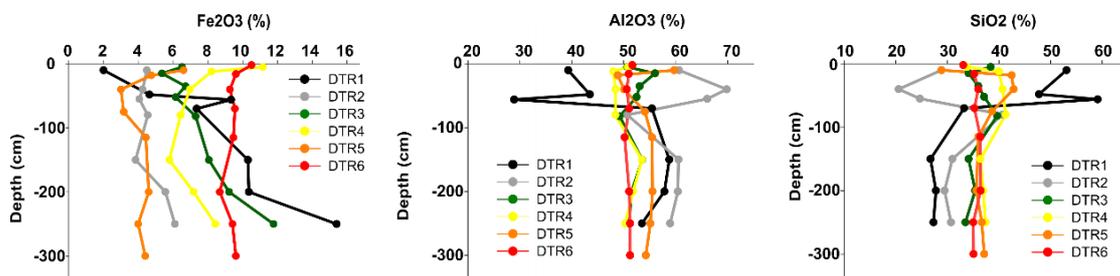
Q - quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), G - gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), C - caulinita ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ); N - nacrita ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ); A – anatásio ( $\text{TiO}_2$ ); R - rutilo ( $\text{TiO}_2$ ).

Os difratogramas apresentados na Figura 31 revelam que os principais minerais encontrados nas amostras brutas por compartimentos foram: o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), a caulinita/nacrita ( $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ) e o anatásio/rutilo ( $\text{TiO}_2$ ). É perceptível a redução dos picos da caulinita e da gibbsita do compartimento 6 em direção ao compartimento 1, que começa a se manifestar nos horizontes superiores do solo e atinge todo o perfil no compartimento 1. Os compartimentos 1 e 2 apresentaram picos elevados de quartzo no topo perfil, associados à concentração de areia (Figura 31). Nesses mesmos compartimentos, ocorre um aumento de teor de gibbsita (51,5%) e caulinita (25%), sobretudo nos horizontes mais profundos, a partir de 70 cm de profundidade. Os valores médios de gibbsita e caulinita obtidos no compartimento 2 estão associados à concentração da fração argila (>70%), ocorridos nesse mesmo compartimento entre 40 e 60 cm (Figura 31).

#### 4.3.4 Análise química do solo

A distribuição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  por compartimento até 300 cm de profundidade é apresentada na Figura 32.

**Figura 32.** Distribuição de ferro, alumínio e silício.



A análise da distribuição de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na área de estudo demonstrou que do compartimento 6 em direção ao 5 ocorre uma diminuição significativa do teor de ferro. Esta perda está associada à transição de um ambiente de condições oxidantes, com a presença de Latossolos, para um ambiente caracterizado por condições redutoras. No compartimento 5, há o alagamento sazonal devido à

elevação do nível freático, com frequência de pelo menos um mês por ano. Ao mesmo tempo, esse compartimento possui características morfológicas e químicas próximas das condições dos Latossolos, ocorridos no compartimento 6. É caracterizado pela presença de murundus de grande volume e menor distância entre vizinhos. Todos esses fatores configuram o compartimento 5 como a área em que tem início a mobilização do Fe ao longo da sequência de solos da catena (Figura 29 e Tabela 4).

Nos compartimentos 4 e 3 ocorre a redução do volume dos murundus e acúmulo de Fe nos horizontes inferiores do solo. O Fe acumulado pode ser proveniente do compartimento situado à montante (compartimento 5) e dos horizontes superiores dos próprios perfis do solo. Essa acumulação se manifesta pela presença de nódulos ferruginosos e horizontes manchados, podendo também ocorrer o aumento de ferro por impregnação nas raízes das plantas, conforme ocorrido no topo da trincheira 4. No compartimento 2 ocorre uma redução significativa no teor de ferro em todo o perfil do solo; nesse local já não existe a presença de murundus e o alagamento possui a duração de pelo menos 5 meses anuais (Tabela 4).

O compartimento 1 ficou caracterizado pelo baixo teor de ferro nos horizontes superficiais e maiores teores na base do perfil, associado ao aumento de manchas vermelhas e amarelas orientadas verticalmente. A acentuada perda de ferro no topo do compartimento 1, seguida do aumento progressivo em maiores profundidades, pode estar associada à translocação das partículas da fração argila para maiores profundidades (Figura 30). As severas condições de hidromorfia e a presença do alagamento sazonal por 5 a 7 meses influenciam a dinâmica do ferro nos compartimentos 1 e 2.

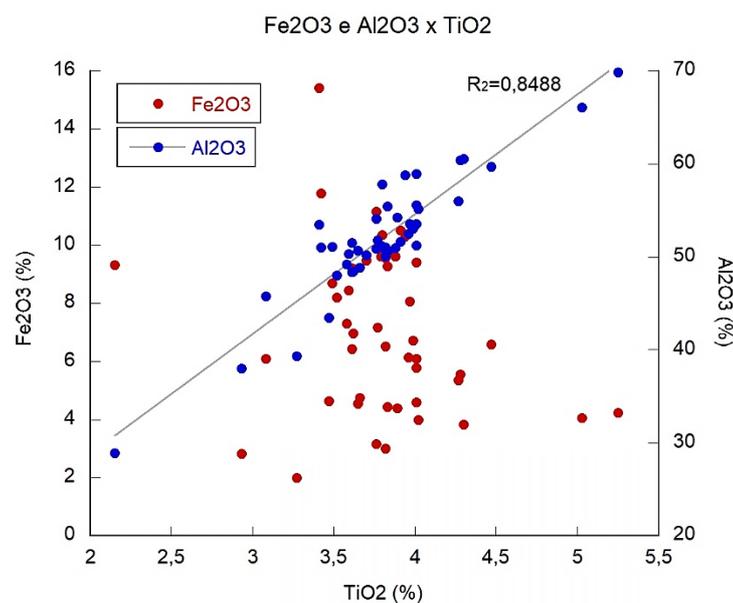
Os teores de Alumínio e do Silício por compartimento (Figuras 32B e 32C) apresentou uma distribuição oposta entre os compostos analisados. Os compartimentos 3, 4, 5 e 6 apresentaram valores aproximadamente constantes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (50 a 55%) e  $\text{SiO}_2$  (32 a 40%) em todo o perfil analisado.

Nota-se que nos horizontes superiores do compartimento 2, próximo ao centro da depressão, o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumenta significativamente (para até 70%), reduzindo-se também fortemente em seguida, nos horizontes superiores do perfil do compartimento 1 (centro da depressão). O  $\text{SiO}_2$ , por sua vez, apresenta diminuição em seu teor nos horizontes superiores do compartimento 2, aumentando

significativamente no topo do perfil do compartimento 1. Essa distribuição, analisada em conjunto com os difratogramas (Figura 31), permite as seguintes interpretações: a concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nos horizontes superiores do compartimento 2 resulta da precipitação deste elemento químico na forma de gibbsita. A forte divergência entre as curvas do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , que ocorre pela primeira vez ao longo da catena neste compartimento, sugere que parte do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  da gibbsita é proveniente da dissolução seletiva da caolinita nesta região da depressão. Rumo ao centro da depressão (Compartimento 1), entretanto, a forte diminuição do teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e o aumento do  $\text{SiO}_2$  se devem à translocação generalizada da fração argila e concentração relativa de  $\text{SiO}_2$  na forma de quartzo, na fração areia.

A relação entre os  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  com o  $\text{TiO}_2$  é útil para se discutir a mobilidade dos elementos químicos dos solos. Isso se deve ao fato de o Ti ser considerado um elemento de baixa mobilidade, pouco suscetível às variações de pH e de Eh do solo, enquanto o Al tem sua mobilidade aumentada em pH acentuadamente ácido ou acentuadamente alcalino e o Fe se mobiliza em ambientes redutores e acentuadamente ácidos (SCHWERTMANN, 1991, VEPRASKAS, 2004; DEWOLF; BOURRIÉ, 2008). A relação entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com  $\text{TiO}_2$  para os solos estudados é apresentada na Figura 33.

**Figura 33.** Relação entre Titânio e Alumínio para as amostras de todos os perfis analisados.



A relação titânio vs. alumínio (Figura 33) revela uma significativa correlação entre os elementos ( $R^2=0,8488$ ), não ocorrendo o mesmo quanto à correlação do titânio com o ferro. Esse fato revela que o titânio e o alumínio presentes na fração argila possuem comportamentos semelhantes, não sendo o pH do solo (registrado entre 4,6 e 5,1) um fator importante para a mobilidade do alumínio na área de pesquisa.

Os menores valores conjuntos de alumínio e de titânio (extremidade inferior esquerda do gráfico da Figura 33) se referem aos horizontes superiores do compartimento 1. Esse fato está associado à migração da argila ocorrida nesse compartimento, ou seja, à exportação ou translocação indiscriminada dos elementos químicos que compõem os minerais desta fração granulométrica, e à consequente concentração relativa de areia nos horizontes superficiais (Figura 30).

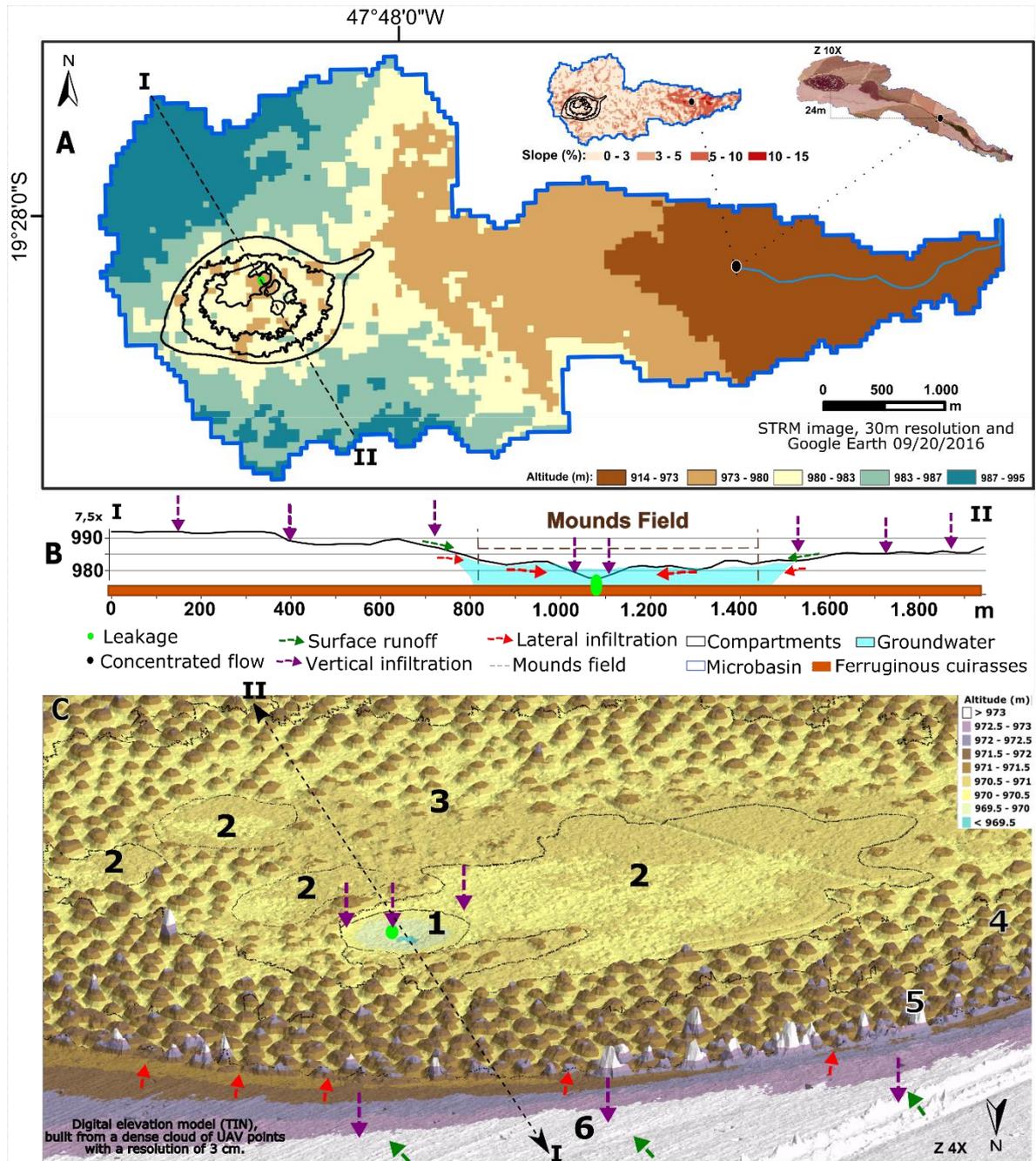
A relação entre titânio e ferro (Figura 33) demonstra que, ao contrário do alumínio, o ferro tem grande mobilidade nos solos quando comparado ao titânio, podendo deixar partes dos perfis ou da catena e se concentrar em outras.

#### **4.3.5 Escoamento da água em campo de murundus**

A microbacia onde se localiza o campo de murundus estudado possui cerca de 471,6 ha, com predomínio de encostas suaves com até 5% de declividade, ocupando cerca de 60% da área total da microbacia (Figura 34).

A Figura 34A mostra que a área do estudo está localizada entre duas amplas e suaves encostas, com predominância de baixas declividades (até 5%). No centro do campo de murundus ocorre o ponto de infiltração vertical (*leakage*), o qual funciona com uma área preferencial de infiltração vertical, identificada por Furlan et al. (2020; 2021). A morfologia plana do relevo e as características de solos profundos, e com alta capacidade de armazenamento de água, certificaram que a infiltração é a tendência dominante da água na microbacia nos terços superior e médio.

Figura 34. Fluxos da água no campo de murundus pesquisado



Com a saturação dos solos e a elevação do nível freático na depressão hidromórfica, ocorre a tendência de fluxo lateral de água no subsolo em direção ao ponto de vazamento, identificado por Furlan et al. (2021) (Figura 34B). O escoamento superficial concentrado só ocorre no terço inferior da microbacia, com o desnível de 24 metros em relação à área de pesquisa.

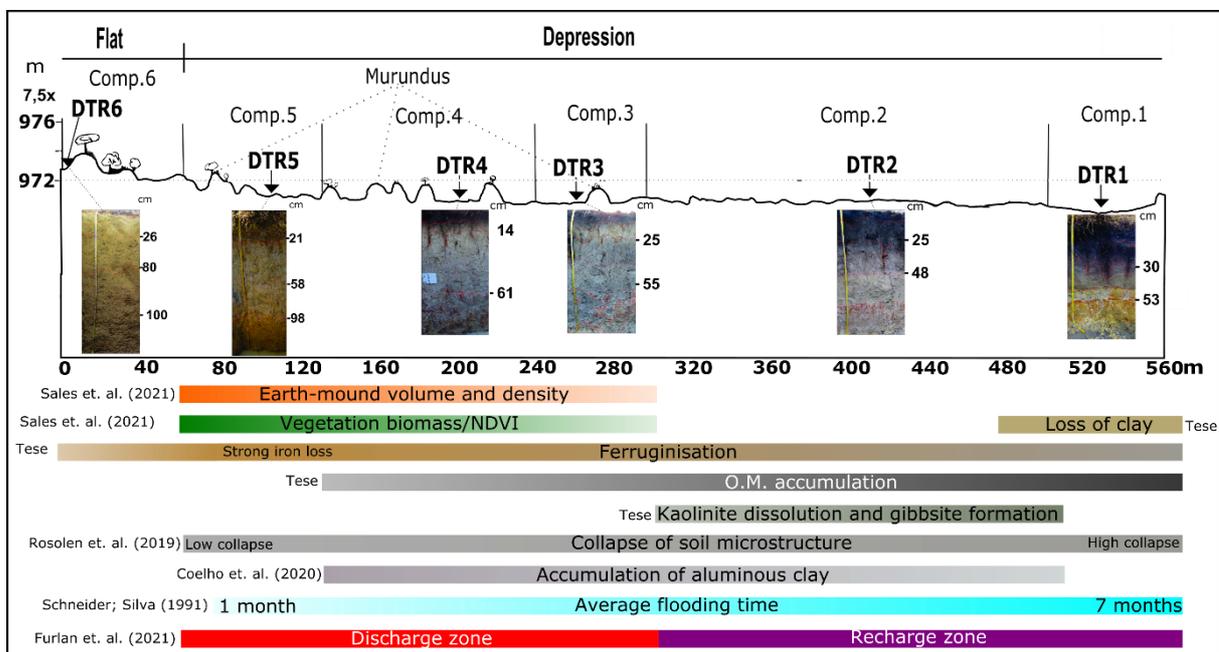
A configuração de elevação do terreno na microbacia, e as condições de umidade do solo na transição entre o planalto e a depressão hidromórfica, aumenta

a tendência da ocorrência do escoamento superficial (Figura 34C) em direção à depressão hidromórfica. Com a elevação sazonal do nível freático, a área de alagamento alcança o compartimento 5, pelo menos um mês anualmente (Tabela 4, Figura 34). Nesses momentos de excedente hídrico na paisagem, há a tendência do escoamento lateral da encosta em direção ao ponto de vazamento no interior da depressão.

#### 4.4 Discussões

A Figura 35 apresenta de forma esquemática os principais processos pedogenéticos da depressão com campo de murundus estudada, associando-se a outras características do ambiente. Esses processos atuam na organização estrutural da paisagem e na distribuição dos montes de terra pelas suas características morfológicas.

**Figura35.** Forma, estrutura e processos em um campo de murundus



Nos compartimentos 5, 4 e 3 é verificada a redução do volume e de densidade de ocorrência dos montes de terra (SALES et al., 2021). A redução de biomassa acima dos montes de terra ocorre na forma de um gradiente de vegetação, possuindo uma maior quantidade vegetação na borda e menor em

áreas mais próximo ao centro, nos locais de maior umidade no solo (MARIMON et al., 2015 e SALES et al., 2021).

A variação das características vegetacionais e morfológicas dos montes de terra está associada a elevação do nível freático. As áreas na borda da depressão registram um alagamento por cerca de 1 mês; nas áreas centrais, nos locais de menores altitudes, o alagamento temporário possui cerca de 7 meses de duração (SCHNEIDER; SILVA 1991, p.86 - 87). As condições de alagamento sazonal ocorridas na depressão hidromórfica são responsáveis pelo processo de desferruginização (retirada do ferro) e ferruginização (reprecipitação do ferro). As condições de hidromorfia induzem à segregação do ferro e à formação de zonas enriquecidas em ferro, produzindo uma coloração característica nos perfis (TARDY, 1993; VEPRASKAS; FAULKNER 2001; VAN BODEGOM et al., 2003).

Nesse sentido, o compartimento 5 e a base do compartimento 6, são áreas caracterizadas pela alta perda de ferro, seguida de aumento, nos compartimentos 4 e 3, em função da precipitação do Fe II, na forma de manchas e a formação de nódulos ferruginosos (FANNING; FANNING, 1989, EZE et al., 2014). Outra possível explicação para o aumento de nódulos ferruginosos no compartimentos 4 e 3, pode ser atribuída à existência de vestígios de couraça ferruginosa; geralmente essa camada é encontrada na base dos perfis dos campos de murundus (SCHNEIDER; SILVA, 1991; CASTRO JUNIOR et al., 2004; QUEIROZ NETO, 2012; MOREIRA et al., 2017; MARTINS et. al 2006, ROSOLEN et al., 2017). É possível que a camada de couraça ferruginosa tenha sido degradada pelo avançado estágio de hidromorfia da área de pesquisa.

O setor de hidromorfia localizada do compartimento 1 ao 5 é caracterizado como área sujeita ao colapso da microestrutura do solo. Nesses locais ocorre a perda de material particulado e dissolvido na água por meio de exportação de solutos (ROSOLEN et al., 2019). As áreas localizadas mais ao centro da depressão, sujeitas às condições de maior tempo de alagamento, podem ser entendidas como áreas com alto colapso da microestrutura do solo. Nesse setor da depressão, nota-se o aumento das feições redoximórficas em direção ao centro da depressão, deixando registrado na cobertura pedológica o processo de expansão remontante e centrífugo da hidromorfia, (PETERSCHMITT et al., 1996; ROSOLEN et al., 2007).

A distribuição da matéria-orgânica no solo variou em cada compartimento conforme as condições de hidromorfia no solo. Os teores de M.O. se concentram

nos horizontes mais superficiais, havendo um de aumento do compartimento 5 em direção ao compartimento 1 (Figura 30 e 35).

Entre os compartimentos 5 e 2 ocorre a acumulação de argila com alto teor médio de Gibbsita (51,5%) e Caulinita (25%), sobretudo nos horizontes mais profundos, a partir de 70 cm de profundidade (Figura 30 e 31). Resultados semelhantes foram verificados em pesquisas sobre o enriquecimento de argilas aluminosas (COELHO; ROSOLEN, 2016; COELHO et al., 2019; COELHO et al., 2020; COELHO, 2021). No compartimento 2 ocorre um aumento dos teores de gibbsita formada provavelmente a partir do Al liberado pela dissolução seletiva da caulinita, sugerida pelo aumento dos teores de  $Al_2O_3$  acompanhado pela diminuição dos teores de  $SiO_2$ .

O compartimento 1 ficou caracterizado pela perda de argila e concentração de areia ( $SiO_2$ ) nos horizontes superficiais (Figuras 30 e 31). Esse fato é associado à presença do processo de infiltração vertical (FURLAN et al. 2020 e 2021). A área pode ser entendida como o setor preferencial de saída de material químico dissolvido e particulado, por lessivagem. A acumulação de areia junto à matéria orgânica no topo do compartimento e a eluviação de partículas de argila acumuladas no horizonte B e em maiores profundidades caracteriza esse processo (QUÉNARD et al., 2011).

Os fluxos hidrológicos identificados na Figura 35 induzem na paisagem do campo de murundus uma dinâmica peculiar de infiltração lateral e infiltração vertical. A infiltração lateral foi caracterizada por Furlan et al. (2021) como uma zona de descarga. Essa área concentra a saída de água pela vertente da depressão, oriunda da saturação dos solos do entorno, durante a estação com maior precipitação. Essa área está associada à presença dos murundus e à diminuição de seu volume e densidade em direção ao centro da depressão. A infiltração vertical ocorrida nos compartimentos centrais do campo de murundus foi associada à zona de recarga de aquífero confinado (FURLAN et al., 2021).

A ocorrência da distribuição ordenada dos montes de terra de acordo com as suas características morfológicas nos compartimentos 5, 4 e 3 (SALES et al., 2021) está associada às seguintes características encontradas no campo de murundus estudado: i) ao processo de expansão da hidromorfia, que se reflete nos processos de desferruginização e ferruginização (PETERSCHMITT et al., 1996; ROSOLEN et al., 2007); ii) ao colapso da microestrutura do solo (ROSOLEN et al.,

2019); iii) a redução de vegetação arbórea (MARIMON et al., 2015) e de NDVI (Sales et al., 2021) no topo dos montes de terra, do compartimento 5 para o 3; e iv) ao fluxo de escoamento superficial e de infiltração lateral, caracterizado por ser uma área de descarga de água da vertente em direção ao centro da depressão (FURLAN et al., 2021) (Figura 35).

O presente estudo foi realizado com base na distribuição e na organização dos montes de terra associados aos processos físico-químicos no solo de um campo de murundus, não sendo alvo desta pesquisa a influência de térmitas no campo de murundus estudado. Porém, durante as observações de campo para imageamento da área e coletas de solo não foi possível constatar a presença significativa de térmitas ativas nos murundus. Nesse mesmo sentido, outros estudos realizados na mesma região demonstram que a ação dos cupins e formigas é superficial (SCHNEIDER; SILVA, 1991, ROSOLEN et al. 2019; MOREIRA et al., 2017).

#### 4.5 Considerações finais

A dinâmica hidrológica do campo de murundus estudado, particularmente os fluxos da água e a sequência ordenada dos processos ocorridos na cobertura pedológica, como, por exemplo, a dissolução de minerais, o alagamento sazonal e a infiltração lateral/vertical, se reflete na presença ou ausência de murundus, bem como na distribuição dos montes de terra, conforme a sua morfologia. As evidências levantadas nesta pesquisa contribuem para o entendimento de que a erosão diferencial, de natureza geoquímica, evidenciada a partir dos diferentes processos ocorridos no solo, contribuem para a gênese da área úmida deprimida e para a formação e desaparecimento natural dos montes de terra.

#### Referências

- ARAUJO NETO, M. Diniz et al. The murundus of the cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, p. 17-35, 1986. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559769>. Acesso em: 04/10/2018.
- BERG, Andrew W. Formation of Mima mounds: a seismic hypothesis. **Geology**, v. 18, n. 3, p. 281-284, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018%3C0281:FOMMAS%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018%3C0281:FOMMAS%3E2.3.CO;2)
- BUHRKE, V. E., JENKINS, R., SMITH, D. K., KINGSLEY, D. **Practical guide for the preparation of specimens for x-ray fluorescence and x-ray diffraction analysis**. Wiley-VCH. 1988.

CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., RAIJ, B. V. **Determinação da matéria orgânica. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**, 9, 173-180, 2011. Disponível em: [http://www.iac.agricultura.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/Raij\\_et\\_al\\_2001\\_Metod\\_Anal\\_IAC.pdf](http://www.iac.agricultura.sp.gov.br/publicacoes/arquivos/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf). Acesso em: 04/05/2020.

COELHO, Carla Vanessa de Sousa. **Gênese e caracterização geoquímica e mineralógica para a prospecção de argilas altamente aluminosas (Formação Marília)**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de São Paulo, 2021.

COELHO, C. V. S. et al. Analyzing the Spatial Occurrence of High-Alumina Clays (Brazil) Using Electrical Resistivity Tomography (ERT). **Pure & Applied Geophysics**, v. 177, n. 8, 2020.

COELHO, Carla Vanessa de Sousa. **Caracterização petrográfica, geoquímica e mineralógica do arenito da Formação Marília e processos de alteração**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de São Paulo, 2017.

CASTRO JÚNIOR, Prudêncio Rodrigues; GIRARD, Pierre; DA CUNHA, Cátia Nunes. DINÂMICA HÍDRICA EM CAMPOS DE MURUNDUS. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23439>. Acesso em: 19/03/2018.

CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E), 1997.

CRAMER, M. D., INNES, S. N., MIDGLEY, J. J. Hard evidence that heuweltjie earth mounds are relictual features produced by differential erosion. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 350, 189-197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.06.030>

CRAMER, Michael D.; BARGER, Nichole N. Are mima-like mounds the consequence of long-term stability of vegetation spatial patterning? **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 409, p. 72-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.04.026>

CRAMER, MICHAEL D.; MIDGLEY, Jeremy J. The distribution and spatial patterning of mima-like mounds in South Africa suggests genesis through vegetation induced aeolian sediment deposition. **Journal of Arid Environments**, v. 119, p. 16-26, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.03.011>

DALQUEST, Walter W.; SCHEFFER, Victor B. The origin of the Mima mounds of western Washington. **The Journal of Geology**, v. 50, n. 1, p. 68-84, 1942. DOI: <https://doi.org/10.1086/625026>

DEWOLF, Y., BOURRIE, G. *Les formations superficielles. Génèse. Typologie. Classification. Paysages et environnements. Ressources et risques* (pp. 896-p). Ellipses, 2008.

DIAMOND, J. S., MCLAUGHLIN, D. L., SLESAK, R. A., STOVALL, A. Pattern and structure of microtopography implies autogenic origins in forested wetlands. **Hydrology and Earth System Sciences**, 23(12), 5069-5088, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-5069-2019>

DJOKIC, D., Ye, Z., DARTIGUENAVE, C. **Arc hydro tools overview**. *Redland, Canada, ESRI*, 5, 2011. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/35870568/Arc\\_Hydro\\_Tools\\_2.0\\_-\\_Overview.pdf](https://www.academia.edu/download/35870568/Arc_Hydro_Tools_2.0_-_Overview.pdf). Acesso em: 07/10/2019.

EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, v. 24, n. 2, p. 153-166, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60002-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60002-3)

FAHRIG, Leonore. When is a landscape perspective important. **Issues and perspectives in landscape ecology**, p. 3-10, 2005. Disponível em: <https://www.glel.carleton.ca/PDF/LandPub/05/05FahrigIssues&Perspectives%20in%20LE.pdf>. Acesso em 02/02/2021.

FANG, Q., HONG, H., ALGEO, T. J., HUANG, X., SUN, A., CHURCHMAN, G. J., LIU, Y. Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China. **Geoderma**, 344, 82-98, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.008>

FANNING, D. S., FANNING, M. C. B. **Soil morphology, genesis and classification**. John Wiley and Sons Inc., 1989.

FERNANDES, L. A. FERNANDES, Luiz Alberto. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1992. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-24092013-094556/en.php>. Acesso em: 04/08/2019.

FERNANDES, L. A., RIBEIRO, C. M. M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 71-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.11.007>

FRANCIS, M. L., ELLIS, F., LAMBRECHTS, J. J. N., POCH, R. M. A micromorphological view through a Namaqualand termitarium (Heuweltjie, a Mima-like mound). **Catena**, 100, 57-73, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.004>

FRITSCH, E., BALAN, E., DO NASCIMENTO, N. R., ALLARD, T., BARDY, M., BUENO, G., CALAS, G. Deciphering the weathering processes using environmental mineralogy and geochemistry: Towards an integrated model of laterite and podzol genesis in the Upper Amazon Basin. **Comptes Rendus Geoscience**, 343(2-3), 188-198, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.11.002>

FURLAN, L. M., ROSOLEN, V., SALLES, J., MOREIRA, C. A., FERREIRA, M. E., BUENO, G. T., MOUNIER, S. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 8, n. 3, p. 224-244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0004>

FURLAN, Lucas Moreira et al. The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04174-7>

FURLEY, P. A. Classification and distribution of murundus in the cerrado of Central Brazil. **Journal of Biogeography**, p. 265-268, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2307/2844925>

GABET, E. J., PERRON, J. T., JOHNSON, D. L. Biotic origin for Mima mounds supported by numerical modeling. **Geomorphology**, 206, 58-66, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.018>

GOPINATH, G., SWETHA, T.V. ASHITHA, M.K. Automated extraction of watershed boundary and drainage network from SRTM and comparison with Survey of India toposheet. **Arab J Geosci**, 7, 2625–2632, 2014) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0919-0>

GUINIER, A. **X-ray diffraction in crystals, imperfect crystals, and amorphous bodies**. Courier Corporation, 1994. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Ipr3DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq=Guinier,+A.+\(1994\).+X-ray+diffraction+in+crystals,+imperfect+crystals,+and+amorphous+bodies.+Courier+Corporation.&ots=SRYoP9sOp9&sig=wKhSzYPSIG7x\\_8KRPrUORifT3EA#v=onepage&q=Guinier%2C%20A.%20\(1994\).%20X-ray%20diffraction%20in%20crystals%20imperfect%20crystals%20and%20amorphous%20bodies.%20Courier%20Corporation.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Ipr3DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP2&dq=Guinier,+A.+(1994).+X-ray+diffraction+in+crystals,+imperfect+crystals,+and+amorphous+bodies.+Courier+Corporation.&ots=SRYoP9sOp9&sig=wKhSzYPSIG7x_8KRPrUORifT3EA#v=onepage&q=Guinier%2C%20A.%20(1994).%20X-ray%20diffraction%20in%20crystals%20imperfect%20crystals%20and%20amorphous%20bodies.%20Courier%20Corporation.&f=false). Acesso em: 25/09/2018.

HORWATH, J. L., JOHNSON, D. L. Mima-type mounds in southwest Missouri: Expressions of point-centered and locally thickened biomantles. **Geomorphology**, 77(3-4), 308-319, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.009>

Johnson, D. L., Burnham, J. L. H. Introduction: overview of concepts, definitions, and principles of soil mound studies. **Geological Society of America Special Papers**, 490, 1-19, 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.1130/2012.2490\(00\)](http://dx.doi.org/10.1130/2012.2490(00))

JUNK, W. J., An, S., FINLAYSON, C. M., GOPAL, B., KVĚT, J., MITCHELL, S. A. ROBARTS, R. D. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. **Aquatic sciences**, 75(1), 151-167, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>

KÄMPF, N.; CURI, Nilton. Formação e evolução do solo (Pedogênese). **Pedologia: fundamentos. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 207-302, 2012.

KING, L. C. A geomorphological comparison between Eastern Brazil and Africa (Central and Southern). **Quarterly Journal of the Geological Society**, v. 112, n. 1-4, p. 445-474, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1956.112.01-04.22>

MARIMON, B. S., COLLI, G. R., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., EISENLOHR, P. V., FELDPAUSCH, T. R., PHILLIPS, O. L. Ecology of floodplain Campos de murundus savanna in southern Amazonia. **International Journal of Plant Sciences**, v. 176, n. 7, p. 670-681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1086/682079>.

MARIMON, B. S., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., JANCOSKI, H. S., FRANCAZAK, D. D., LIMA, H. S., MORESCO, M. C. Floristics of floodplain 'murundus' of the Pantanal of Araguaia, Mato Grosso, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 181-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062012000100018>

MARTINS, A. K. E., SCHAEFER, C. E. G., SILVA, E., SOARES, V. P., CORRÊA, G. R., DE MENDONÇA, B. A. F. Relações solo-geoambiente em áreas de ocorrência de Ipucas na Planície do Médio Araguaia-Estado de Tocantins. **Revista Árvore**, 30(2), 297-310, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200017>

MARTINS, F. P., ROSOLEN, V. S. Caracterização morfológica e física de uma catena (Latossolo-Gleissolo) no campo de murundu do Córrego da Fortaleza, chapada Uberlândia-Uberaba, Uberlândia-MG. **Caminhos de Geografia**, 15, 186-200, 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/24618>. Acesso em: 19/04/2018.

MCAULIFFE, J. R., TIMM HOFFMAN, M., MCFADDEN, L. D., KING, M. P. Role of aeolian sediment accretion in the formation of heuweltjie earth mounds, western South Africa. **Earth Surface Processes and Landforms**, 39(14), 1900-1912, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3583>

MOORE, J. M., PICKER, M. D. Heuweltjies (earth mounds) in the Clanwilliam district, Cape Province, South Africa: 4000-year-old termite nests. **Oecologia**, 86(3), 424-432, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00317612>

MOREIRA, V. B., PEREZ FILHO, A. Caracterização Física dos Microrrelevos de Murundus na Chapada Uberlândia-Uberaba/MG: Discussões Preliminares Sobre Gênese. **Revista do Departamento de Geografia**, 227-237, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132632>

NIKIFOROFF, Constantin Constantinovich. **Hardpan and microrelief in certain soil complexes of California**. US Department of Agriculture, 1941. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp\\_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4Sjah8pfWPUQtVC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%2C%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%2C%201941.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4Sjah8pfWPUQtVC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%2C%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%2C%201941.&f=false). Acesso em: 20/02/2020.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. D. A vegetação de um campo de Monchões microrrelevos associados a cupins na região de Cuiaba (MT). UNICAMP. Tese de Doutorado, 169p, 1988. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/315877>. Acesso em: 23/08/2019.

OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira. Floodplain 'murundus' of Central Brazil: evidence for the termite-origin hypothesis. **Journal of Tropical Ecology**, p. 1-19, 1992. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559804>

PETERSCHMITT, E., FRITSCH, E., RAJOT, J. L., HERBILLON, A. J. Yellowing, bleaching and ferritisation processes in soil mantle of the Western Ghâts, South India. **Geoderma**, 74(3-4), 235-253, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00064-X)

PRINGLE, R. M., TARNITA, C. E. Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. **Annual review of Entomology**, v. 62, p. 359-377, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-035413>

QUEIROZ NETO, José Pereira. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193295653.pdf>. Acesso em: 03/08/2018

QUEIROZ, N., FELTRAN, F. A., SCHNEIDER, M. **L'évolution de la couverture pédologique et du relief sur les plateaux de l'ouest de l'état de Minas Gerais (Brésil) Pedological cover and relief development on western Tablelands of minas gerais state (Brazil)**, 1998. Disponível em: <http://natures.psu.ac.th/link/soilcongress/bdd/symp15/398-t.pdf>. Acesso em: 25/06/2018.

QUÉNARD, L., SAMOUËLIAN, A., LAROCHE, B., CORNU, S. Lessivage as a major process of soil formation: A revisitation of existing data. **Geoderma**, 167, 135-147, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.031>

REED, S. AMUNDSON, R. Sediment, gophers, and time: a model for the origin and persistence of Mima mound—vernal pool topography in the Great Central Valley. **Vernal Pool Landscapes**, (14), 1527, 2007. Disponível em: [https://vernalpools.ucmerced.edu/sites/vernalpools.ucmerced.edu/files/documents/mima\\_mounds\\_vernal\\_pools\\_reed\\_amundson.pdf](https://vernalpools.ucmerced.edu/sites/vernalpools.ucmerced.edu/files/documents/mima_mounds_vernal_pools_reed_amundson.pdf). Acesso em 04/09/2019.

RESENDE, I. L. D. M., ARAÚJO, G. M. D., OLIVEIRA, A. P. D. A., OLIVEIRA, A. P. D., ÁVILA JÚNIOR, R. S. D. A comunidade vegetal e as características abióticas de um campo de murundu em Uberlândia, MG. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 1, p. 9-17, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000100002>

ROSOLEN, V., BUENO, G. T., MELFI, A. J., MONTES, C. R., de SOUSA COELHO, C. V., ISHIDA, D. A., GOVONE, J. S. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, 79, 421-430, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.001>

ROSOLEN, V., BUENO, G. T., MUTEMA, M., MOREIRA, C. A., JUNIOR, I. R. F., NOGUEIRA, G., CHAPLOT, V. On the link between soil hydromorphy and geomorphological development in the Cerrado (Brazil) wetlands. **Catena**, 176, 197-208, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.022>

ROSOLEN, V., DE OLIVEIRA, D. A., BUENO, G. T. Vereda and Murundu wetlands and changes in Brazilian environmental laws: challenges to conservation. **Wetlands ecology and management**, 23(2), 285-292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-014-9380-4>

ROSOLEN, V., HERPIN, U. Expansão dos solos hidromórficos e mudanças na paisagem: um estudo de caso na região Sudeste da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, 38(3), 483-490, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672008000300013>

SALES, Jepherson Correia et al. The structure of an earth-mound field of the Brazilian Savanna. **Geomorphology**, v. 386, p. 107752, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107752>

SANTOS, F. A. S., PIERANGELI, M. A. P., Silva, F. L., SERAFIM, M. E., DE SOUZA, C. A. Atributos químicos, físicos e estoque de cálcio, magnésio, potássio e fósforo em solos de campos de murundus no Brasil. **Acta Amazonica**, 45, 2, 2020. Disponível em: <https://portalcolecoes.inpa.gov.br/fasciculos/45-2/PDF/AA-2014-0295.pdf>. Acesso em: 23/10/2020

SCHNEIDER, M. de O.; SILVA, DB da. Estrutura pedológica e dinâmica hídrica do “covoal” do Córrego da Fortaleza. **Sociedade & Natureza**, v. 3, n. 5, p. 75-89, 1991. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/download/60692/31479>. Acesso em: 10/04/2018.

SCHWERTMANN, Ugo. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant and soil**, v. 130, n. 1, p. 1-25, 1991.

SILVA, L. C., VALE, G. D., HAIDAR, R. F., SL STERNBERG, L. Deciphering earth mound origins in central Brazil. **Plant and Soil**, v. 336, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0329-y>

SOLOS, E. (1997). Manual de métodos de análise de solo. *Rio de Janeiro: Embrapa Solos*. 1997. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Wenceslau-Teixeira/publication/267038200\\_Manual\\_de\\_Metodos\\_de\\_Analise\\_de\\_Solo\\_2a\\_Edicao/links/5442ea7c0cf2e6f0c0f9390d/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2a-Edicao.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wenceslau-Teixeira/publication/267038200_Manual_de_Metodos_de_Analise_de_Solo_2a_Edicao/links/5442ea7c0cf2e6f0c0f9390d/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2a-Edicao.pdf). Acesso em: 18/04/2019.

SOUZA JÚNIOR, J. J. D., FREIRE, F., OLIVEIRA, F., da SILVA, R., BONOW, C., MOREIRA, H. Geologia: Geologia da bacia sedimentar do Paraná. Rio de Janeiro: **Projeto Radam Brasil-Levantamento de Recursos Naturais** (Folha SE. 22 Goiânia), 31. 1983.

TARDY, Y. (1993). **Pétrologie des latérites et des sols tropicaux**. 1993.

VAN BODEGOM, P. M., VAN REEVEN, J., VAN DER GON, H. A. D. Prediction of reducible soil iron content from iron extraction data. **Biogeochemistry**, 64(2), 231-245, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024935107543>

VEPRASKAS, M. J., FAULKNER, S. P., RICHARDSON, J. L. Redox chemistry of hydric soils. **Wetland soils: Genesis, hydrology, landscapes, and classification**, 85-106, 2001.

VEPRASKAS, M. J. **Redoximorphic features for identifying aquatic conditions**. 2004.

## 5. Considerações Gerais

### 5.1 Padrão espacial dos murundus e hipóteses da pesquisa

Os campos de murundus são notáveis paisagens encontradas em áreas de aplanamento do bioma Cerrado. Os pequenos montes de terra se espalham ao longo de extensas áreas úmidas, podendo ocorrer: i) na forma de pequenas depressões isoladas em topos das colinas amplas, com baixa declividade; ii) associados a cabeceiras de drenagem, na interface entre solos com melhores condições de drenagem para solos hidromórficos; e iii) ao longo de vales de baixa declividade e presença acentuada de umidade.

Esta tese partiu de duas hipóteses de trabalho. A primeira propunha que os montes de terra se distribuiriam de forma ordenada no interior do campo de murundus, segundo suas propriedades geométricas, configurando compartimentos, e a segunda propunha que a erosão diferencial seria um fator determinante para a gênese do campo de murundus, resultando que os montes de terra seriam relictos da superfície do planalto no interior da área úmida deprimida. Para testar estas hipóteses foi proposto, como objetivo geral, compreender a estrutura de um campo de murundus, localizado em área de aplanamento do bioma Cerrado, e os processos determinantes para sua gênese e, como objetivos específicos, a) mapear os montes de terra de um campo de murundus, identificando as características geométricas dos montes de terra tais como; b) analisar a distribuição espacial dos montes de terra nos campos de murundus, conforme a suas características geométricas; c) realizar a compartimentação do campo de murundus a partir das suas características geométricas e espectrais; d) caracterizar os solos dos compartimentos do campo de murundus quanto à granulometria, composição química total e mineralogia.

### 5.2 Forma, distribuição e estrutura

A análise de distribuição dos montes de terra na área estudada demonstrou que os murundus são distribuídos na paisagem ordenadamente. As características geométricas dos montes de terra isoladamente (*área, perímetro, volume, índice de circularidade, distância de vizinho mais próximo, altitude*) ou em grupo (*densidade*

e número de vizinhos) se ordenam no interior da área de estudo de forma concêntrica.

A altitude do topo dos murundus na área de estudo ocorreu de forma concordantes entre si e em relação ao planalto circundante à depressão analisada. Este fato indica uma tendência de preservação da altura dos montes de terra, bem como a existência de uma superfície pretérita que se estendia do topo dos montes ao planalto, conforme sugerido por Furley (1986).

O estudo da estrutura do campo de murundus analisado foi desenvolvido em duas etapas. A primeira etapa foi realizada por meio da compartimentação da paisagem. Nesta fase, foram utilizados dados de imagens de sensoriamento remoto embarcado em VANT e orbital. O uso de técnicas de estatísticas multivariadas e de agrupamento permitiu a compartimentação do campo de murundus a partir de suas características espectrais geométricas. Na segunda etapa, foi levantada a distribuição do solo nos compartimentos identificados. Nesta fase, ficou constatado que a distribuição dos solos encontrados no campo de murundus estudado varia conforme os compartimentos espectrais e geométricos.

A metodologia de compartimentação da paisagem e de levantamento dos solos revelou que o campo de murundus estudado possui uma estrutura ordenada nas suas características morfológica e pedológica. Dessa forma, os compartimentos levantados podem ser entendidos dentro de uma perspectiva de evolução da paisagem, ao nível da vertente. A análise da cobertura pedológica nos permitiu entender que a distribuição espacial das características dos solos, dos seus horizontes e dos processos associados à hidromorfia está associada à morfologia dos murundus e à paisagem (BOULET, 1978; BOULET et al., 1984, QUEIROZ NETO et al., 1998; QUEIROZ NETO et al., 2012).

O levantamento dos solos na área de pesquisa foi utilizado como dados complementares para entendimento da distribuição dos solos nos compartimentos geométricos/espectrais identificados, conforme Ozesmi e Bauer (2002, p.395). A distribuição dos solos revelou que os compartimentos identificados por técnicas de sensoriamento remoto também refletiram diferenças nas características dos solos e dos processos pedogenéticos identificados no campo de murundus. Esse fato pode ser atribuído, em parte, à refletância dos alvos em áreas úmidas que também estão associadas às características dos solos, tais como: umidade do solo, textura do solo, matéria orgânica, óxidos de ferro (STONER; BAUMGARDNER, 1981) e a

rugosidade da microtopografia do relevo (WEEKS et al., 1996). Os resultados encontrados na análise estatística e espectral da área de estudo foi determinante para identificação dos compartimentos da paisagem, permitindo uma melhor compreensão dos processos ocorridos no solo.

Outras pesquisas desenvolvidas em campos de montículos ao redor do mundo realizaram mensuração dos montes de terra, como, por exemplo: i) nos *mima-mounds* (NIKIFOROFF, 1941; VITEK, 1978; FREDERKING, 1973); ii) nos *heuweltjies* (CRAMER et al., 2012; CRAMER; BARGER, 2014); iii) e para murundus da Savana Brasileira (ARAUJO NETO et al., 1986; SCHNEIDER; SILVA et al., 1991; CRAMER; BARGER, 2014; SILVA et al., 2020). Contudo, nenhuma dessas pesquisas desenvolveu uma análise estrutural do campo de montículos que considerasse as suas características morfopedológicas, ou seja, a relação da microtopografia dos montes de terra e o padrão de distribuição com relação à composição do solo.

Nesse sentido, a ordem estrutural dos compartimentos do campo de murundus estudado pode ser entendida como estágios evolutivos da paisagem, em que o solo e os montes de terra são influenciados pela dinâmica da água na área úmida. Queiroz Neto (2012) defende a importância da ação conjunta da morfogênese (entendida aqui como a ação da erosão física provocada pelo escoamento superficial) e da pedogênese (entendida aqui como referência aos processos pedogenéticos e às transformações, lessivagem e lixiviação a eles associadas) na evolução das áreas úmidas em superfícies de aplanamento do Triângulo Mineiro. O autor afirma que a formação e a evolução de depressões fechadas, semiabertas e abertas é da responsabilidade fundamentalmente da “erosão” geoquímica, pelo menos em seus primeiros estágios de evolução.

### **5.3 Processos e funcionamento**

A identificação e o mapeamento dos processos ocorridos no solo do campo de montículos estudado revelaram que os compartimentos morfopedológicos possuem um funcionamento conforme a dinâmica da água. Assim, o grau de hidromorfia no solo, a elevação do nível freático e o tempo de permanência em condições de alagamento estão associados aos processos pedogenéticos e à distribuição e morfometria dos montes de terra na superfície do campo de

montículos. As condições hidromórficas do campo de murundus proporcionam um ambiente redutor, favorável para a mobilização, segregação e lixiviação do ferro. A oscilação do nível freático, por sua vez, favorece a lessivagem da fração argila, sobretudo nos compartimentos mais centrais da área deprimida, contribuindo para a exportação do alumínio, do titânio e de parte do silício, e para a concentração relativa da fração areia. Outros levantamentos de solos ocorridos em campo de murundus também relatam a ação da hidromorfia nos solos por processos de desferruginização, formação de plintita / manchas no solo e acúmulo de matéria orgânica no centro da depressão (SCHNEIDER; SILVA, 1991; MOREIRA; PEREZ FILHO, 2017; JESUS et al., 2017). Contudo, esses estudos não relacionaram os tipos e os processos ocorridos no solo com a distribuição dos montes de terra.

A dissolução dos elementos químicos encontrados no solo do campo de murundus estudado revelou que os compartimentos onde ocorrem murundus estão associados aos seguintes mecanismos, que se estabelecem de forma ordenada, da borda para o centro da área deprimida: i) perda de ferro, seguida de reprecipitação de ferro na forma de nódulos; ii) à alternância das condições de hidromorfia do solo, com maiores períodos em condições de oxidação do que redução no solo, em relação aos compartimentos centrais; iii) gradual aumento do gradiente textural vertical no solo, indicando eluviação nos horizontes superficiais; e iv) a progressiva acumulação de matéria orgânica nos horizontes superficiais.

Esses compartimentos foram caracterizados por Furlan et al. (2021) a partir de levantamento geofísico por eletrorresistividade do solo, como uma zona de descarga de água do planalto em direção à depressão, por meio da infiltração lateral na vertente. Nesse setor de descarga, ocorre uma variação na morfometria dos murundus, sendo observada a redução da área, do perímetro e do volume dos montes de terra.

O setor de ocorrência de murundus foi caracterizado por Rosolen et al. (2019) como uma área onde ocorre o colapso da microestrutura do solo em decorrência das condições da hidromorfia. Esse ambiente favorece a dissolução mineral do solo, seguida pela exportação de solutos de elementos químicos pela água. Os autores relatam que a formação dos murundus seria resultado do rebaixamento das áreas do entorno dos montes de terra (assoalho da depressão) em função da diminuição da perda de volume do solo e da erosão química.

Os compartimentos centrais do campo de murundus estudado, locais onde quase não ocorrem os montes de terra, ficaram caracterizados nesta tese como: i) setores com maior tempo de permanência das águas; ii) área de acumulação de argilas aluminosas de minerais como a gibbsita e a caulinita, nos horizontes mais profundos, e dissolução da caulinita; iii) acumulação de matéria orgânica e areia nos horizontes mais superficiais do solo; e iv) perda de argila nos horizontes superficiais por lessivagem em áreas próximas ao centro da depressão. Furlan et al. (2021) caracterizaram este setor do campo de murundus como uma área de recarga de aquífero confinado. No local ocorre o predomínio do processo de infiltração vertical associada a camadas subterrâneas de maior permeabilidade.

Esta pesquisa compreende que a elevação sazonal do nível freático, associada ao longo período de permanência das condições de alagamento nos compartimentos 1 e 2 e o fluxo vertical da água, são os processos responsáveis: i) pela não ocorrência de murundus; ii) pela dissolução da caulinita, formando áreas enriquecidas em gibbsita nos horizontes mais profundos, bem como a formação de horizontes superficiais com maiores quantidade de areia; iii) pelo maior colapso da microestrutura do solo proposta por Rosolen et al. (2019).

#### **5.4 Vegetação e atividades bióticas**

O estudo da vegetação do campo de murundus estudado foi desenvolvido por uso do sensoriamento remoto com o Índice de Vegetação (NDVI). Esta análise revelou a ocorrência de um gradiente periferia-centro, com maiores índices de vegetação na borda do campo dos murundus, associados à presença de vegetação arbórea e arbustiva, com progressiva redução até onde ocorrem os murundus de menor porte. Nos compartimentos centrais da depressão, onde há baixo NDVI, é verificada a presença de gramíneas e algumas espécies acidófilas, como a *Flexuous Canche*, em decorrência da presença de solos lixiviados com presença do processo de lessivagem (DUCHAUFOR, 1951). A distribuição do NDVI indica uma relação entre as propriedades da vegetação com as características geométricas dos montes de terra.

Marimon et al. (2012; 2015), ao analisarem a composição florística de campos de murundus na savana ao sul da Amazônia, relatam também um

gradiente de ocorrência de espécies arbustivas no topo dos murundus, organizados da borda em direção às áreas centrais, de menores altitudes. Esse estudo atribui à distribuição da vegetação dos murundus um caráter não aleatório, determinado pela competição interespecífica ou competição por habitats no passado. Ressalta, ainda, a importância do papel da água no ordenamento do gradiente de vegetação, não descartando a possibilidade de que fatores abióticos possam contribuir na formação dos murundus e na distribuição da vegetação em seu topo.

Durante as atividades de campo não foi encontrada a presença frequente de termiteiros nos murundus. A falta da relação da presença de termiteiros com os montes de terra também é relatada por outros autores (SILVA et al., 2010; MOREIRA; PEREZ FILHO, 2017). Foram consideradas, portanto, evidências da bioturbação encontradas apenas nos horizontes superficiais dos montes (MOREIRA; PEREZ FILHO, 2017, ROSOLEN et al., 2019).

### **5.5 Contribuições para a compreensão da gênese dos murundus e novos cenários de pesquisa**

A presente pesquisa demonstrou que as características geométricas dos montes de terra apresentou um gradiente da borda para o centro do campo de murundu analisado. A distribuição das propriedades dos solos (morfológicas, químicas e mineralógicas) indicou que ao longo da catena os processos pedogenéticos são de diferentes tipos ou ocorrem em diferentes graus de intensidade, da borda para o centro da depressão. Os gradientes encontrados da morfologia dos montes e de intensidade dos processos pedogenéticos pode ser interpretado como resultante da dinâmica sazonal do nível freático e do estágio evolutivo dos compartimentos. A constatação da mobilidade de matéria nas formas dissolvida e particulada reforça a hipótese de que a erosão diferencial é importante para a gênese da área úmida deprimida e para a gênese dos murundus. Este estudo contribui na coleta, na análise e na divulgação das crescentes evidências de que o padrão regular de distribuição dos murundus da Savana Brasileira é uma resposta da dinâmica hidrológica, a qual contribui para a ocorrência da erosão diferencial.

Novas pesquisas podem ser desenvolvidas com o emprego de modelos numéricos, para a quantificação dos fluxos geoquímicos de elementos dissolvidos na água em campo de murundus. Essa abordagem pode fornecer melhores informações sobre a capacidade de dissolução e de transporte de minerais pela água. Pode, também, proporcionar dados quantificáveis sobre a atuação da erosão geoquímica, permitindo um melhor entendimento sobre a erosão diferencial, a evolução microtopográfica da paisagem e gênese dos montes de terra ocorridos nos campos de murundus da savana brasileira.

A adoção de novos estudos com a coleta de solo dos murundus e identificação florística de espécies no topo dos murundus, por compartimento, auxiliaria no reconhecimento das características físico-química dos montes de terra associadas ao tipo de vegetação. Dessa forma, seria possível a compreensão da relação positiva entre o aumento do índice de vegetação com maiores valores das características morfológicas dos murundus. Isso desvendaria quais as características do solo e da vegetação contribuem no controle erosivo do monte de terra.

Nesse sentido, ainda são necessários novos estudos que integrem múltiplos mecanismos para a formação dos murundus, como, por exemplo, os realizados em pesquisas da contribuição da vegetação denominada, *matorral*, encontradas na região do Mediterrâneo, para a formação de estruturas microtopográficas. A interação dessas plantas com o solo, a erosão hídrica e os processos de sedimentação em encostas, desempenham um papel importante na morfometria dos pequenos montes de terra, expressos na forma e na altura (BOCHET et al., 2000).

Uma curiosidade acerca do tamanho das áreas onde ocorrem os montes de terra foi levantada por Diamond et al. (2019, p. 5084). Os autores afirmaram que os campos onde ocorrem os *hummocks* aumentam em média 22% a sua área se consideradas as laterais das elevações, não contabilizadas nos eixos x e y. Cálculos preliminares (não apresentados) sobre a superfície útil do campo de murundus estudado revelaram que, em 39 ha, com a presença de murundus nos eixos x e y, cerca de 1 ha corresponde às laterais dos montes de terra.

Os resultados obtidos nos campos de murundus pesquisados não apresentaram o mesmo índice de aumento de superfícies que os *Hummocks*.

Contudo, em decorrência das pequenas áreas ocupadas por murundus, o aumento de área em virtude da elevação pode influenciar outros fatores ambientais que necessitam de maiores investigações, como, por exemplo: i) estoque de carbono (MITSCH, 2013); ii) estoque e ciclagem de minerais (FANG et al. 2019); e iii) provisionamento de materiais genéticos, bioquímicos, entre outros (MEA, 2005, p. 31 -32). A configuração morfológica dos montes de terras fornece condições únicas que suportam a diversidade ecológica nesses ambientes, mas ainda pouco estudados.

Por fim, espera-se que as evidências levantadas nesta pesquisa auxiliem novos estudos ambientais para conservação e a recuperação dos campos de murundus. Nesse sentido, é recomendável a promulgação de políticas ambientais direcionadas exclusivamente para preservação dessa importante fitofisionomia do Bioma Cerrado. Essa ação ajudaria a reduzir as ameaças que o avanço das atividades antrópicas, ligadas ao setor agropecuário, impõe nas áreas úmidas com presença de Campo de Murundus.

Recentes iniciativas do poder público podem ser verificadas na implementação de legislações estaduais, como, por exemplo: i) a Lei Distrital nº 6.520, de 17 de março de 2020, do Distrito Federal a qual estabelece a fitofisionomia dos Campos de Murundus como áreas de preservação permanente; a Lei nº 20.773/2020, do Estado de Goiás, a qual estabeleceu uma faixa de preservação de cinquenta metros de largura em sua projeção horizontal, contada a partir da borda exterior de sua caracterização do campo de murundus; e o projeto de mapeamento e catalogação dos campos de murundus do Estado do Goiás, que está sendo desenvolvido pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente em conjunto com o Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG), da Universidade Federal de Goiás (UFG).

## Referências Gerais

- ASSESSMENT, Millennium Ecosystem. **Ecosystems and human well-being: wetlands and water**. 2005. Disponível em: [http://millenniumassessment.org/documents/MA\\_wetlands%26water-Chinese.pdf](http://millenniumassessment.org/documents/MA_wetlands%26water-Chinese.pdf). Acesso em 05/06/2018.
- BELL, S. **Landscape: pattern, perception and process**. Routledge, 2012.
- BOULET, R., CHAUVEL, A. e LUCAS, Y. Lessystèmes de transformationenPedologie. Paris, **AFES**, Livre JubilaireduCinquanteaire, p. 167-179, 1984. Disponível em: [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-02/21626.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-02/21626.pdf). Acessado em: 16/09/2020.
- BUHRKE, V. E., JENKINS, R., SMITH, D. K., KINGSLEY, D. **Practical guide for the preparation of specimens for x-ray fluorescence and x-ray diffraction analysis**. Wiley-VCH. 1988.
- CAMPOS, J.O.; CHAVES, H.M.L.. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 157-169, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351019>
- CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos- Documentos (INFOTECA-E)**, 1997. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330804>. Acesso em: 10/10/2019.
- COELHO, C. V. S. Caracterização petrográfica, geoquímica e mineralógica do arenito da Formação Marília e processos de alteração. 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150383> .Acesso 03/05/2018.
- COELHO, C. V. S. et al. Analyzing the spatial occurrence of high-alumina clays (Brazil) using electrical resistivity tomography (ERT). **Pure and Applied Geophysics**, p. 1-18, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02444-w>
- COELHO, C. V. S. et al. The formation of high-alumina clays in a pedosedimentary sequence of Marília Formation (Western Minas Gerais, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 95, p. 102263, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102263>
- COELHO, Carla VS; ROSOLEN, Vania. Caracterização morfológica, mineralógica e química dos níveis de alteração da Formação Marília (Membro Serra da Galga) do Neocretáceo da Bacia Bauru, no Triângulo Mineiro (MG). **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 2, p. 139-151, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78207>
- CRAMER, M. D., INNES, S. N., MIDGLEY, J. J. Hard evidence that *heuweltjie* earth mounds are relictual features produced by differential erosion. **Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology**, 350, 189-197, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.06.030>
- CRAMER, Michael D.; BARGER, Nichole N. Are mima-like mounds the consequence of long-term stability of vegetation spatial patterning?. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 409, p. 72-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.04.026>
- CRAMER, Michael D.; MIDGLEY, Jeremy J. The distribution and spatial patterning of mima-like mounds in South Africa suggests genesis through vegetation induced aeolian sediment deposition. **Journal of Arid Environments**, v. 119, p. 16-26, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.03.011>
- ARAUJO NETO, M. Diniz et al. The murundus of the cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, p. 17-35, 1986. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559769>
- DEXTER, K. G. et al. Floristics and biogeography of vegetation in seasonally dry tropical regions. **International Forestry Review**, v. 17, n. 2, p. 10-32, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1505/146554815815834859>
- DIAMOND, Jacob S. et al. Pattern and structure of microtopography implies autogenic origins in forested wetlands. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 12, p. 5069-5088, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-23-5069-2019>
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K. D., RIES, J. B. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, 4(11), 3390-3416, 2012 DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4113390>

DONAGEMA, G. K. et al. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E), 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/990374>. Acesso em: 08/08/2018.

DUCHAUFOUR, Ph. Lessivage et podzolisation. **Revue forestière française**, 1951. Disponível em: [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/27815/RFF\\_1951\\_10\\_647.pdf](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/27815/RFF_1951_10_647.pdf). Acesso em: 03/05/2020.

FANG, Q., HONG, H., ALGEO, T. J., HUANG, X., SUN, A., CHURCHMAN, G. J., LIU, Y. Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China. **Geoderma**, 344, 82-98, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.008>

FARINA, A.. Principles and methods in landscape ecology: towards a science of the landscape. **Springer Science & Business Media**, 2008. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=F0vDBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=FARINA,+Almo.+Principles+and+methods+in+landscape+ecology:+towards+a+science+of+the+landscape.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2008.&ots=siJXJcGwfJ&sig=42OxuFbOIUCHxIRIJCEy9cnf-CA#v=onepage&q=FARINA%2C%20Almo.%20Principles%20and%20methods%20in%20landscape%20ecology%3A%20towards%20a%20science%20of%20the%20landscape.%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%2C%202008.&f=false>. Acesso em: 03/07/2020.

FELTRAN FILHO, A. **A estruturação das paisagens nas chapadas do oeste mineiro**. São Paulo, USP, Departamento de Geografia, 251p. + anexos, 1997. (tese Dr).

FERNANDES, L. A. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá. 1992. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-24092013-094556/en.php>. Acesso em: 02/05/2017.

FERNANDES, L. A. RIBEIRO, C. M.M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (upper Cretaceous, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 61, p. 71-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.11.007>

FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A. M.. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista brasileira de Geociências*, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/eb0e2792-85a3-4b83-bbd8-8f27bb0cb853/1225992.pdf>. Acesso em: 23/08/2017.

FERNANDES, P. A., PESSÔA, V. L. S.. O Cerrado e suas atividades impactantes: uma leitura sobre o garimpo, a mineração e a agricultura mecanizada. *Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia*, v. 3, n. 7, 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/45114>. Acesso em: 04/09/2020.

FLETCHER, Reginald S.; EVERITT, James H.; DRAWE, Lynn. Detecting red harvester ant mounds with panchromatic QuickBird imagery. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 1, n. 1, p. 013556, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2830848>

FORGY, E. W. Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications. *biometrics*, v. 21, p. 768-769, 1965.

FREDERKING, Ray Lynn. **Spatial variation of the presence and form of earth mounds on a selected alp surface, Sangre de Cristo Mountains, Colorado**. The University of Iowa, 1973. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/2c21444d31ce4537eec5485c673a31c0/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. Acesso em: 15/08/2021.

FUNCH, R. R. Termite mounds as dominant land forms in semiarid northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, 122, 27-29, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.05.010>

FURLAN, L. M., ROSOLEN, V., MOREIRA, C. A., BUENO, G. T., FERREIRA, M. E. The interactive pedological-hydrological processes and environmental sensitivity of a tropical isolated wetland in the Brazilian Cerrado. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04174-7>

FURLAN, L., ROSOLEN, V., SALES, J., MOREIRA, C., FERREIRA, M., BUENO, G., MOUNIER, S. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland

using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 8, n. 3, p. 224-244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1139/juvs-2020-0004>

FURLEY, P. A. Classification and distribution of murundus in the cerrado of Central Brazil. **Journal of Biogeography**, p. 265-268, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2307/2844925>

GABET, E. J., PERRON, J. T., JOHNSON, D. L. Biotic origin for Mima mounds supported by numerical modeling. **Geomorphology**, 206, 58-66, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.018>

GROHMANN, C., OLDELAND, J., STOYAN, D., LINSENMAIR, K. E. Multi-scale pattern analysis of a mound-building termite species. **Insectes Sociaux**, v. 57, n. 4, p. 477-486, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00040-010-0107-0>

HEFFERNAN, James B.; WATTS, Danielle L.; COHEN, Matthew J. Discharge competence and pattern formation in peatlands: a meta-ecosystem model of the Everglades ridge-slough landscape. **PLoS one**, v. 8, n. 5, p. e64174, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064174>

HUETE, A., JUSTICE, C., VAN LEEUWEN, W. MODIS vegetation index (MOD13). **Algorithm theoretical basis document**, 3(213), 1999. Disponível em: [http://icdc-test.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user\\_upload/icdc\\_Dokumente/MODIS/MODIS\\_Collection6\\_VegetationIndex\\_ATBD\\_MOD13\\_V03.1.pdf](http://icdc-test.cen.uni-hamburg.de/fileadmin/user_upload/icdc_Dokumente/MODIS/MODIS_Collection6_VegetationIndex_ATBD_MOD13_V03.1.pdf). Acesso em 11/11/2018.

JENKINS, R. **X-Ray Fluorescence Spectrometry**. Second edition. New York: Wiley, 1999.

JESUS, G. N., BUENO, G. T., de CARVALHO, D. T. L., ROSOLEN, V. S. Estrutura da paisagem e processos pedogenéticos em área de Campo de Murundus na Chapada Uberaba-Uberlândia-MG. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 4449-4460, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1933>

JOHNSON, Donald L.; JOHNSON, Diana N. The polygenetic origin of prairie mounds in northeastern California. **GSA Spec. Pap**, v. 490, p. 135-59, 2012. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Xz5BMqTxYJkC&oi=fnd&pg=PA135&dq=JOHNSON,+Donald+L.+%3B+JOHNSON,+Diana+N.+The+polygenetic+origin+of+prairie+mounds+in+northeastern+California.+GSA+Spec.+Pap,+v.+490,+p.+135-59,+2012.&ots=RhK9eq\\_-kG&sig=JOllwBjcmiYJw\\_0KSwl-WUawdLE#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Xz5BMqTxYJkC&oi=fnd&pg=PA135&dq=JOHNSON,+Donald+L.+%3B+JOHNSON,+Diana+N.+The+polygenetic+origin+of+prairie+mounds+in+northeastern+California.+GSA+Spec.+Pap,+v.+490,+p.+135-59,+2012.&ots=RhK9eq_-kG&sig=JOllwBjcmiYJw_0KSwl-WUawdLE#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 03/04/2020.

KESSLER, M. A.; WERNER, B. T. Self-organization of sorted patterned ground. **Science**, v. 299, n. 5605, p. 380-383, 2003. DOI: <https://10.1126/science.1077309>

KILLINGBECK, James; BALLANTYNE, Colin K. Earth hummocks in West Dartmoor, SW England: characteristics, age and origin. **Permafrost and periglacial processes**, v. 23, n. 2, p. 152-161, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.1739>

KING, L. C. A geomorphological comparison between Eastern Brazil and Africa (Central and Southern). **Quarterly Journal of the Geological Society**, v. 112, n. 1-4, p. 445-474, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1956.112.01-04.22>

LEMOS, RC de; SANTOS, RD dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. Disponível em: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IscScript=ACERVO.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf=039285>. Acesso em: 04/05/2017.

MARIMON, B. S., COLLI, G. R., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., EISENLOHR, P. V., FELDPAUSCH, T. R., PHILLIPS, O. L. Ecology of floodplain Campos de murundus savanna in southern Amazonia. **International Journal of Plant Sciences**, v. 176, n. 7, p. 670-681, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1086/682079>

MARIMON, B. S., MARIMON-JUNIOR, B. H., MEWS, H. A., JANCOSKI, H. S., FRANCAZAK, D. D., LIMA, H. S., MORESCO, M. C. Floristics of floodplain 'murundus' of the Pantanal of Araguaia, Mato Grosso, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 181-196, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062012000100018>

MARTINS, F. P., ROSOLEN, V. S. Caracterização morfológica e física de uma catena (Latossolo-Gleissolo) no campo de murundu do Córrego da Fortaleza, chapada Uberlândia-Uberaba,

Uberlândia-MG. **Caminhos de Geografia**, 15, 186-200, 2014. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/24618>. Acesso em: 19/04/2018.

MCGARIGAL, K. **Landscape pattern metrics**. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07723>

MITSCH, William J. et al. Wetlands, carbon, and climate change. **Landscape Ecology**, v. 28, n. 4, p. 583-597, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>

MOREIRA, V. B., PEREZ FILHO, A. Caracterização Física dos Microrrelevos de Murundus na Chapada Uberlândia-Uberaba/MG: Discussões Preliminares Sobre Gênese. **Revista do Departamento de Geografia**, 227-237, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132632>

NAVEH, Z., LIEBERMAN, A. S. Landscape ecology: theory and application. Springer Science & Business Media, 2013. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=63\\_SBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=NAVEH,+Zev%3B+LIEBERMAN,+Arthur+S.+Landscape+ecology:+theory+and+application.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2013.&ots=dO8t\\_FOVkB&sig=Tu0wZ1RPcGsCaTVTASDaD5u6OOk#v=onepage&q=NAVEH%2C%20Zev%3B%20LIEBERMAN%2C%20Arthur%20S.%20Landscape%20ecology%3A%20theory%20and%20application.%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%2C%202013.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=63_SBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=NAVEH,+Zev%3B+LIEBERMAN,+Arthur+S.+Landscape+ecology:+theory+and+application.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2013.&ots=dO8t_FOVkB&sig=Tu0wZ1RPcGsCaTVTASDaD5u6OOk#v=onepage&q=NAVEH%2C%20Zev%3B%20LIEBERMAN%2C%20Arthur%20S.%20Landscape%20ecology%3A%20theory%20and%20application.%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%2C%202013.&f=false). Acesso em: 04/08/2019.

NIKIFOROFF, Constantin Constantinovich. **Hardpan and microrelief in certain soil complexes of California**. US Department of Agriculture, 1941. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp\\_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4SJah8pfWPUQt0VC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%2C%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%2C%201941.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=otp_PSnie3QC&oi=fnd&pg=PA15&dq=NIKIFOROFF,+Constantin+Constantinovich.+Hardpan+and+microrelief+in+certain+soil+complexes+of+California.+US+Department+of+Agriculture,+1941.&ots=5YHkLlyAgt&sig=GkfY4SJah8pfWPUQt0VC4Ees2mM#v=onepage&q=NIKIFOROFF%2C%20Constantin%20Constantinovich.%20Hardpan%20and%20microrelief%20in%20certain%20soil%20complexes%20of%20California.%20US%20Department%20of%20Agriculture%2C%201941.&f=false). Acesso em: 20/02/2020.

NOVAIS, G.T. **Caracterização climática da mesoregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e do entorno da Serra da Canastra (MG)**. 175f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16101>. Acesso em: 04/04/2019.

OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira. Floodplain'murundus' of Central Brazil: evidence for the termite-origin hypothesis. **Journal of Tropical Ecology**, p. 1-19, 1992. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2559804>

OZESMI, Stacy L.; BAUER, Marvin E. Satellite remote sensing of wetlands. **Wetlands ecology and management**, v. 10, n. 5, p. 381-402, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>

PONCE, Victor M.; DA CUNHA, Catia N. Vegetated earthmounds in Tropical Savannas of Central Brazil: A synthesis: With special reference to the Pantanal do Mato Grosso. **Journal of Biogeography**, p. 219-225, 1993. DOI: <https://doi.org/10.2307/2845673>

PRINGLE, Robert M.; TARNITA, Corina E. Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation. **Annual review of Entomology**, v. 62, p. 359-377, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-035413>

QUEIROZ NETO, J. P. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193295653.pdf>. Acesso em: 03/08/2018.

QUEIROZ NETO, J.. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/193295653.pdf>. Acesso em: 27/01/2018.

QUEIROZ, NETO; FELTRAN, FILHO Antonio; SCHNEIDER, Marilena. **L'évolution de la couverture pédologique et du relief sur les plateaux de l'ouest de l'état de Minas Gerais** (Brésil) Pedological cover and relief development on western Tablelands of minas gerais state (Brazil), 1998.

QUINTERO, Carlos J.; COHEN, Matthew J. Scale-dependent patterning of wetland depressions in a low-relief karst landscape. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 124, n. 8, p. 2101-2117, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JF005067>

REBOITA, M. S., RODRIGUES, M., SILVA, L. F. ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de minas gerais (climate aspects in minas gerais state). **Revista Brasileira de Climatologia**, 17. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Cerrado. In: SANO, S.; ALMEIDA, S. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora. Planaltina**: EMBRAPA-CPAC, p. 89-166, 2008.

RIETKERK, M. ; VAN DE KOPPEL, J. Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, v. 23, n. 3, p. 169-175, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.013>

RIETKERK, Max; VAN DE KOPPEL, Johan. Regular pattern formation in real ecosystems. **Trends in ecology & evolution**, v. 23, n. 3, p. 169-175, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.10.013>

ROSOLEN, Vania; HERPIN, Uwe. Expansão dos solos hidromórficos e mudanças na paisagem: um estudo de caso na região Sudeste da Amazônia Brasileira. *Acta Amazônica*, v. 38, p. 483-490, 2008.

ROSOLEN, V. et al. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 79, p. 421-430, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.001>

ROSOLEN, V., BUENO, G. T., MUTEMA, M., MOREIRA, C. A., JUNIOR, I. R. F., NOGUEIRA, G., & CHAPLOT, V. On the link between soil hydromorphy and geomorphological development in the Cerrado (Brazil) wetlands. **Catena**, 176, 197-208, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.022>

SÁ JUNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais**. 101f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Lavras (UFV), Lavras, 2009.

SALES, J. C., BUENO, G. T., ROSOLEN, V., FERREIRA, M. E., FURLAN, L. M. The Structure of an Earth-Mound Field of the Brazilian Savanna. **Geomorphology**, p. 107752, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107752>

SALES, J. C., FERREIRA, M. E., BUENO, G. T., & ROSOLEN, V. Delimitação de microrrelevos de murundus com veículos aéreos não tripulados. In anais do **xix simpoósio brasileiro de sensoriamento remoto. Santos-SP**. Anais eletrônico. INPE São José dos Campos, 2019.. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.09.15.36/doc/97408.pdf>. Acesso em: 10/03/2020.

SCHNEIDER, M. de O.; SILVA, DB da. Estrutura pedológica e dinâmica hídrica do "covoal" do Córrego da Fortaleza. **Sociedade & Natureza**, v. 3, n. 5, p. 75-89, 1991. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/download/60692/31479>. Acesso em: 10/04/2018.

SCHNEIDER, Marilena; DA SILVA, Delcimar Bueno. Estrutura pedológica e dinâmica hídrica do "Covoal" do córrego da Fortaleza. **Sociedade & Natureza**, v. 3, n. 5, 1991. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/download/60692/31479>. Acesso em: 20/05/2019.

SILVA, Lucas CR et al. Deciphering earth mound origins in central Brazil. **Plant and Soil**, v. 336, n. 1, p. 3-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0329-y>

SILVA. N.R., MENDES, P. C. Análise das precipitações e do balanço hídrico climatológico no triângulo mineiro (mg): uma série histórica de 34 anos. XII SBCG, 1815 – 1828, 2016. Disponível em: [http://www.abclima.ggf.br/sbcg2016/anais/arquivos/eixo\\_4/trabalho%20\(6\).pdf](http://www.abclima.ggf.br/sbcg2016/anais/arquivos/eixo_4/trabalho%20(6).pdf). Acesso em: 30/08/2020.

SOUZA JÚNIOR, J. J. Geologia da Bacia Sedimentar do Paraná. **Projeto RADAMBRASIL–Folha SE. 22-Goiânia**, p. 23-348, 1983.

SPAIN, A. V., SINCLAIR, D. F., & DIGGLE, P. J. Spatial distributions of the mounds of harvester and forager termites (Isoptera: Termitidae) at four locations in tropical north-eastern Australia. **ACTA OECOL. (OECOL. GEN.)**, 7(4), 335-352, 1986. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Alister-Spain/publication/303947073\\_Spatial\\_distributions\\_of\\_the\\_mounds\\_of\\_harvester\\_and\\_forager\\_termites\\_Isoptera\\_Termitidae\\_at\\_four\\_locations\\_in\\_tropical\\_northeastern\\_Australia/links/58e1a145a6f](https://www.researchgate.net/profile/Alister-Spain/publication/303947073_Spatial_distributions_of_the_mounds_of_harvester_and_forager_termites_Isoptera_Termitidae_at_four_locations_in_tropical_northeastern_Australia/links/58e1a145a6f)

[dcc41bf944fa7/Spatial-distributions-of-the-mounds-of-harvester-and-forager-termites-Isoptera-Termitidae-at-four-locations-in-tropical-northeastern-Australia.pdf](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.018). Acesso em: 29/09/2018.

SPARAVIGNA, A. C. Patterned Vegetation Created by Red Harvester Ants and Evidenced in Satellite Images. 2016. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01289240> . Acesso em: 15/10/2020.

STEVENS, Peter S. **Patterns in nature**. 1974.

STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, 45(6), 1161-1165. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060031x>

STONER, Eric R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil SCIENCE Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1161-1165, 1981. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060031x>

TARNITA, C. E., BONACHELA, J. A., SHEFFER, E., GUYTON, J. A., COVERDALE, T. C., Long, R. A., PRINGLE, R. M. A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns. **Nature**, 541(7637), 398-401, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20801>

TURNER, M. G. **Landscape ecology**: the effect of pattern on process. Annual review of ecology and systematics, v. 20, n. 1, p. 171-197, 1989. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.es.20.110189.001131?journalCode=ecolsys.1>. Acesso em: 04/08/2019.

UJEMA, E., ANTROP, M., ROOSAARE, J., MARJA, R., MANDER, U., Landscape metrics and indices: an overview of their use in landscape research. **Living Rev. Landsc. Res.** 3 (1), 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1854/LU-695518>. Acesso em: 06/10/2020.

VITEK, John D. Morphology and pattern of earth mounds in south-central Colorado. **Arctic and Alpine Research**, v. 10, n. 4, p. 701-714, 1978. DOI: <https://10.1080/00040851.1978.12004009>

WAGNER, H. H., FORTIN, M. J. Spatial analysis of landscapes: concepts and statistics. **Ecology**, v. 86, n. 8, p. 1975-1987, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1890/04-0914>

WEEKS, R. J., SMITH, M., PAK, K., LI, W. H., GILLESPIE, A., GUSTAFSON, B. . Surface roughness, radar backscatter, and visible and near-infrared reflectance in Death Valley, California. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 101, n. E10, p. 23077-23090, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JE01247>

WEEKS, R. J., SMITH, M., PAK, K., Li, W. H., GILLESPIE, A., GUSTAFSON, B. Surface roughness, radar backscatter, and visible and near-infrared reflectance in Death Valley, California. **Journal of Geophysical Research: Planets**, 101(E10), 23077-23090, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JE01247>