



Serviço Público Federal
Ministério da Educação



Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Alesson Pires Maciel Guirra

**MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS: INTEGRANDO
GEOTECNOLOGIAS E GEOESTATÍSTICA**

CAMPO GRANDE - MS
Fevereiro/2021

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais

Alesson Pires Maciel Guirra

MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS: INTEGRANDO GEOTECNOLOGIAS E
GEOESTATÍSTICA

Tese apresentada para obtenção do grau de
Doutor no Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Ambientais da Fundação
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul,
área de concentração: *Saneamento Ambiental
e Recursos Hídricos*.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Conceição
Paranhos Filho

Aprovada em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Conceição Paranhos Filho
Presidente

Prof. Dr^a. Luciana Escalante Pereira
Universidade Estadual de Mato Grosso
do Sul – Campus Pantanal

Prof^a. Dr^a. Camila Leonardo Miotto
Universidade Federal de Rondonópolis

Prof. Dr. Marco Antonio Diodato
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido

Prof. Dr. Vinícius de Oliveira Ribeiro
Universidade Estadual de Mato Grosso
do Sul

CAMPO GRANDE - MS
Fevereiro/2021

DEDICATÓRIA

A Deus.
A minha família.
Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo dom da vida.

Aos meus irmãos pelo carinho e amizade.

Ao meu orientador, Professor Doutor Antonio Conceição Paranhos Filho pela confiança, acolhimento e serenidade na condução dos trabalhos durante o doutorado e pelos trabalhos de campo.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Geoprocessamento para Estudos Ambientais (LabGIS) da UFMS, em especial, Jaíza, Helen, Camila Amaro, César, Andrey, Amanda, Gisele, Isadora, Isabela, Bianca, Gustavo, Alisson, Dhonatan e Anny.

Ao Professor Doutor Roberto Macedo Gamarra pelo apoio técnico no LaBGIS.

Ao Professor Doutor Normandes Matos da Silva por ter me indicado e apresentado ao Professor Antonio Conceição Paranhos Filho.

Aos membros da banca por terem aceitado o convite e pelas sugestões e contribuições ao trabalho.

A Prefeitura Municipal de Paraíso das Águas, em especial ao apoio técnico do pessoal da Secretaria de Meio Ambiente deste município.

A Universidade Federal de Mato Grosso e a Faculdades de Engenharias Arquitetura e Urbanismo e Geografia pelo ensino público de excelência.

Aos Técnicos Administrativos do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais e aos seus professores associados pelo aprendizado ao longo desta caminhada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	16
ABSTRACT.....	16
INTRODUÇÃO.....	17
Objetivo geral.....	19
Objetivos específicos.....	19
1. CAPÍTULO 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE O USO DE GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DE CIDADES MÉDIAS.....	21
1.1 INTRODUÇÃO.....	21
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
1.3 RESULTADOS.....	24
1.4 DISCUSSÃO.....	28
1.4.1 Análise dos artigos selecionados pela cadeia de caracteres.....	28
1.4.2 Das tendências identificadas nos artigos selecionados pela cadeia de caracteres.....	30
1.4.3 Das lacunas identificadas nos artigos selecionados pela cadeia de caracteres.....	31
1.4.4 Apontamentos sobre as inovações na implantação das geotecnologias.....	32
1.4.5 Das tendências das inovações do uso de geotecnologias nas cidades.....	33
1.4.6 Das lacunas e inovações das geotecnologias nas cidades.....	34
1.5 CONCLUSÃO.....	35
1.6 REFERÊNCIAS.....	36
2. CAPÍTULO 2 – ESPACIALIZAÇÃO DO RISCO INTRÍNSECO À CONTAMINAÇÃO POR PÉSTICIDAS EM CORPOS HÍDRICOS E DETERMINAÇÃO DE PONTOS DE MONITORAMENTO.....	39
2.1. INTRODUÇÃO.....	40
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
2.2.1 Área de Estudo.....	42
2.2.2 Espacialização das variáveis ambientais.....	44
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
2.4 CONCLUSÃO.....	60
2.5 AGRADECIMENTOS.....	61
2.6 REFERÊNCIAS.....	61
3. CAPÍTULO 3 – OTIMIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO.....	65
3.1 INTRODUÇÃO.....	65
3.2.1 Área de Estudo.....	67
3.2.2 Aspectos do Plano Diretor Municipal de Rondonópolis no que tange a gestão das águas subterrâneas.....	70
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
3.5 CONCLUSÕES.....	84
3.6 REFERÊNCIAS.....	85
4. CAPÍTULO 4 – HIDRODINÂMICA EM ZONA DE PERTURBAÇÃO DE BARRAGEM TROPICAL.....	88
4.1 INTRODUÇÃO.....	88
4.2 ÁREA DE ESTUDO.....	90
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	92

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
4.4.1 Contexto histórico e legislação específica.....	96
4.4.2 Uso de geotecnologias em áreas impactadas por barragens.....	98
4.4.3 Rios impactados por barragens.....	98
4.4.4 Diagnóstico dos impactos ambientais na zona de perturbação de reservatório tropical.....	100
5. CONCLUSÃO.....	114
6. AGRADECIMENTOS.....	115
7. REFERÊNCIAS.....	115

5. CAPÍTULO 5 – CAVERNAS DO MATO GROSSO DO SUL; REVISÃO ATRIBUTOS CONDICIONANTES, ANÁLISE PREDITIVA E AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL.....

5.1 INTRODUÇÃO.....	120
5.2 MATERIAIS E MÉTODO.....	121
5.2.1 Área de Estudo.....	124
5.2.2 Revisão em Literatura Especializada.....	124
5.2.3 Condicionantes Geológico-Ambientais.....	125
5.2.4 Análises preditivas e estimador de densidade Kernel.....	126
5.2.5 Autocorrelação Espacial.....	127
5.2.6 Análise dos dados.....	129
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	130
5.3.1 Sobre as Revisões na Literatura Especializada.....	132
5.3.2 Das Tendências.....	138
5.3.3 Das Lacunas.....	138
5.3.4 Das Condicionantes Geológico-Ambientais.....	139
5.3.5 Das Análises Preditivas.....	142
5.3.6 Das autocorrelações espaciais.....	148
5.4 CONCLUSÃO.....	151
5.5 AGRADECIMENTOS.....	153
5.6 REFERÊNCIAS.....	153

6. CAPÍTULO 6 – MODELO EMPÍRICO DO POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO POR MEIO DE GEOPROCESSAMENTO: O QUE MAIS ELE PODE NOS DIZER?.....

6.1 INTRODUÇÃO.....	159
6.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	159
6.2.1 Área de Estudo.....	162
6.2.2 Banco de dados geográficos.....	168
6.2.3 Geoprocessamento.....	169
6.2.4 Método GOD.....	178
6.2.5 Análise Exploratória.....	180
6.2.6 Diagnóstico e interpretação.....	184
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	185
6.3.1 Sobre os sistemas de descontinuidades geológico-estruturais.....	185
6.3.2 Sobre o Modelo de Potencial Hídrico Subterrâneo.....	188
6.3.3 Sobre a prospecção de áreas com alto potencial hídrico subterrâneo.....	191
6.3.4 Sobre as cavidades em Paraíso das Águas.....	194
6.3.5 Sobre a estimativa indireta do nível estático por interpolação.....	196
6.3.6 Sobre os aspectos geológicos dos sistemas aquíferos.....	202
6.3.7 Sobre a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos determinada pelo método GOD.....	204
6.3.8 Sobre os fatores hidrogeoquímicos.....	209
6.3.9 Sobre as fontes termais.....	209
6.4 CONCLUSÃO.....	210
6.5 AGRADECIMENTOS.....	212

6.6 REFERÊNCIAS.....	212
CONCLUSÃO GERAL.....	217

APÊNDICE A Teste de normalidade para número de cavidades por área

APÊNDICE B Teste de normalidade para número de cavidades por área com transformada logarítmica

APÊNDICE C Verificação da normalidade dos resíduos da regressão linear simples por histograma e gráfico Q-Q Plot para os previsores de cavidades. E gráfico dos resíduos padronizados para verificação da homocedasticidade. Ordem: CxHC, CxLC e CxHL

APÊNDICE D Verificação da normalidade dos resíduos da regressão linear múltipla por histograma e gráfico Q-Q Plot para os previsores de cavidade combinados entre si (HC, LC, HL)

APÊNDICE E Resumo estatístico do índice de Moran (relatório e gráfico de dispersão em relação aos eixos de autocorrelação espacial). Ordem: CxHC, CxLC e CxHL

APÊNDICE F Resumo estatístico da regressão linear múltipla para estimar o nível estático a partir do MEPHS, carga hidráulica dos poços e nível d'água interpolada pelo método Spline.

LISTA DE FIGURAS

1. CAPÍTULO 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE O USO DE GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DE CIDADES MÉDIAS.....	21
Figura 1 Relação da quantidade de publicações da evolução da cadeia de caracteres....	26
2. CAPÍTULO 2 – ESPACIALIZAÇÃO DO RISCO INTRÍNSECO À CONTAMINAÇÃO POR PÉSTICIDAS EM CORPOS HÍDRICOS E DETERMINAÇÃO DE PONTOS DE MONITORAMENTO.....	39
Figura 1 Localização da área de estudo, situada entre divisor de bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Alto Araguaia.....	43
Figura 2 Fluxograma sintético da metodologia para obtenção dos Planos de Informação de riscos a contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos.....	47
Figura 3 Fluxograma para delimitação de áreas prioritárias para instalação de pontos de monitoramento da qualidade das águas, superficial e subterrânea, baseando-se nos maiores percentuais de risco intrínseco à contaminação por pesticidas das áreas progressivamente quarteadas.....	48
Figura 4 Carta das unidades pedológicas da área de estudo com o plano de informação qualitativo da condutividade hidráulica das ordens de solo (kV, em m/s); (B) Carta de declividade (%) da área de estudo gerada a partir do plano de informação de altimetria extraído de imagem de radar ALOS PALSAR modo FBD, com resolução espacial de 12,5 metros.....	49
Figura 5 A. Cartas do potencial qualitativo de infiltração; e B. de escoamento, em relação à declividade (%) e a condutividade hidráulica (kV, em m/s) da área de estudo, respectivamente.....	50
Figura 6 A. Carta de densidade das lavouras e estabelecimentos por quilômetro quadrado (quantidade/Km ²); e B. Carta do tamanho relativo das lavouras e estabelecimentos em hectares, ambos componentes do plano de informação de uso antrópico do terreno.....	52
Figura 7 A. Carta de densidade de drenagens por quilômetro quadrado (Km/Km ²); e B. Carta de densidade de nascentes por quilômetro quadrado (nascentes/Km ²), ambos componente do plano de informação de cobertura natural do terreno.....	54
Figura 8 Carta de risco intrínseco à contaminação das águas por pesticidas.....	56
Figura 9 Carta do risco a contaminação das águas subsuperficiais (A) e subsuperficiais (B) por pesticidas.....	57
Figura 10 Qualificação do risco natural de contaminação dos corpos hídricos superficiais e subsuperficiais segmentados por tipo de unidade aquífera e quantificação da porcentagem em área coberta das classes de risco identificadas.....	58
Figura 11 Quarteamento progressivo das áreas proporcionalmente com maior risco intrínseco e relativo à contaminação por pesticidas. Onde: Q = Quarteamento; A, B, C e D são as etapas de quarteamento; 1, 2, 3 e 4 são os setores; PMASUP = Ponto de monitoramento de água superficial; PMASUB = Ponto de monitoramento de água subterrânea.....	60
3. CAPÍTULO 3 – OTIMIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO.....	65
Figura 1 Localização da bacia hidrográfica do Córrego Grande (BHCG), Rondonópolis, MT.....	67
Figura 2 Unidades pedológicas da BHCG e nascentes identificadas neste estudo.....	69
Figura 3 Mapa dos diferentes usos da terra e cobertura vegetal encontrados na BHCG, Rondonópolis, MT.....	69
Figura 4 Fluxograma sintético aplicado neste estudo para obtenção do IVIAP.....	72

Figura 5	Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição quanto a profundidade do nível freático em relação ao nível do solo (em metros).....	76
Figura 6	Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação aos intervalos de declividade (%) na superfície do terreno.....	77
Figura 7	Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a densidade relativa de cobertura vegetal.....	79
Figura 8	Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a infiltração e recarga.....	80
Figura 9	Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a permeabilidade.....	81
Figura 10	Vulnerabilidade intrínseca à poluição dos aquíferos da BHCG.....	82
Figura 11	Modelo conceitual dos aquíferos G1(A) e G4(B) na BHCG e suas vulnerabilidades à poluição associadas às variáveis hidrogeológicas do IVIAP.....	83
 4. CAPÍTULO 4 – HIDRODINÂMICA EM ZONA DE PERTURBAÇÃO DE BARRAGEM TROPICAL.....		88
Figura 1	Localização da Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (UHEESM) em relação as bacias hidrográficas do Mato Grosso do Sul contidas nas áreas analisadas neste estudo ao longo do curso do rio Paraná, onde BHRI é Bacia hidrográfica do rio Ivinhema, BHRP é Bacia Hidrográfica do rio Pardo e BHRV é Bacia Hidrográfica do Rio Verde (ANA, 2020).....	90
Figura 2	Comparação entre Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI.....	93
Figura 3	Síntese dos materiais e métodos aplicados neste estudo.....	96
Figura 4	Legenda para classificação de corpo hídrico em relação à turbidez, profundidade relativa do nível d"água e vazão em resposta a refletância dos objetos na composição colorida das imagens de satélite.....	101
Figura 5	Área 01.....	102
Figura 6	Área 02.....	103
Figura 7	Área 03	104
Figura 8	Área 04	105
Figura 9	Área 05 com cores verdadeiras em imagens L8 e S2.....	105
Figura 10	Comparação entre imagens Sentinel-2 MSI com presença e com ausência de nuvens na acurácia visual de objetos na água.....	107
Figura 11	Constatação de Áreas de Preservação Permanentes acessíveis ao pastoreio do gado.....	108
Figura 12	Comparação entre imagens do satélite L5 e L8 pré e pós-inundação em relação às áreas de preservação permanentes.....	109
Figura 13	Comparação entre imagens realçadas por composição de bandas do S2 com imagens de aeronave remotamente tripulada destacando efeitos da erosão marginal no reservatório.....	110
Figura 14	Detalhamento das margens inundadas pelo reservatório da UHEESM.....	111
Figura 15	Síntese dos impactos na zona de perturbação de barragem no reservatório da UHEESM (perfil AA" com escala exagerada).....	114
 5. CAPÍTULO 5 – CAVERNAS DO MATO GROSSO DO SUL; REVISÃO ATRIBUTOS CONDICIONATES, ANÁLISE PREDITIVA E AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL.....		120
Figura 1	Mapa de ocorrência das cavidades naturais do Mato Grosso do Sul em relação ao Brasil. Observar que a região de MS em que há maior concentração de cavernas no mapa é a da Serra da Bodoquena, sustentada por rochas pré-cambrianas, rica em rochas carbonáticas.....	124
Figura 2	Fluxograma síntese dos materiais e métodos para estudo da ocorrência das cavidades naturais no Mato Grosso do Sul.....	131
Figura 3	A) Desempenho geral das publicações para pesquisas sobre o carste no Mato Grosso do Sul; B) Produtividade dos principais autores que estudam o carste no	

Mato Grosso do Sul; C) Principais países ranqueados pelo número de publicações sobre o tema; D) Principais instituições que pesquisam o carste no Mato Grosso do Sul; E) As principais subáreas de pesquisa relacionadas ao tema.....	133
Figura 4 A) Litotipos que representam mais de 10% da unidade litoestratigráfica; B) Deformação tectônica e/ou dobramentos; C) Tectônica de fraturamento; D) Resistência ao intemperismo físico; E) Resistência ao intemperismo químico; F) Grau de coerência.....	140
Figura 4 G) Características do manto de alteração a partir da análise da composição mineral principal das rochas; H) Porosidade primária; I) Classificação do aquífero quanto ao tipo de porosidade; J) Rede hidrográfica com as drenagens principais; K) Bacias hidrográficas para fins de planejamento regional; L) Lineamentos geológico-estruturais.....	141
Figura 4 M) Litologias ou material geológico predominante das unidades com alguma ocorrência de cavidade natural; N) Grupo ou Formação Geológica com alguma ocorrência de cavidade natural.....	142
Figura 5 Boxplot com a distribuição das variáveis C/100Km ² ; HC/100Km ² ; LC/100Km ² e HL/100Km ²	143
Figura 6 A) Histograma da distribuição do número de cavidades a cada 100 Km ² ; B) Histograma do número de interseções da rede de drenagem com contatos geológicos a cada 100 Km ² ; C) Histograma do número de interseções de lineamentos geológico-estruturais com contatos geológicos a cada 100 Km ² e D) Histograma do número de interseções da rede de drenagem com lineamentos a cada 100 Km ²	144
Figura 7 A) Mapa de densidade de Kernel de interseções de drenagens com contatos entre unidade geológicas; B) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre lineamentos e contatos geológicos; C) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre drenagens e lineamentos geológicos; D) Mapa da Ponderação entre os Mapas de Kernel anteriores para estimativa qualitativa de áreas mais predispostas à ocorrência de cavidades; E) Áreas com maior probabilidade de ocorrência de cavidades F) Desempenho da estimativa para prever ocorrência de cavidades, considerando raio de busca de 10,0 Km.....	147
Figura 8 Autocorrelação espacial incremental mostrando os raios do passo onde se verifica maior dependência espacial dada à configuração da distribuição de cavidades cadastradas no Mato Grosso do Sul.....	149
Figura 9 Mapas de significância e de clusters dos índices de Moran local.....	150

6. CAPÍTULO 6 – MODELO EMPÍRICO DO POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO POR MEIO DE GEOPROCESSAMENTO: O QUE MAIS ELE PODE NOS DIZER?.....159

Figura 1 Mapa de localização do município de Paraíso das Águas em relação aos domínios hidrogeológicos macrorregionais do Brasil e Mato Grosso do Sul, com destaque para os aquíferos Serra Geral (fraturado) e Caiuá (granular), subdivididos pelo vazão (m ³ /h) da unidade aflorante.....	163
Figura 2A) Cachoeira do Córrego Moquém (bacia hidrográfica de 4 ^a ordem), que deságua no rio Sucuriú (drenagem principal).....	165
Figura 2B) Voçoroca em plena expansão transportando sedimentos inconsolidado e desagregando neossolos quartzarênicos friável e em situação de baixa cobertura vegetal de pasto acessível ao gado.....	165
Figura 2C) Fendas separando blocos de latossolo vermelho com textura areno-silto-argilosa em estágio avançado de erosão com perda gradual de material friável para o fundo do canal erosivo.....	165
Figura 2D) Quebras abruptas no relevo oriundas do contraste reológico entre arenitos e derrames basálticos, bem como do sistema de horst e grabens e hemigrabens característico desta porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, formando escarpas, degraus de rebaixamento e rebordos erosivos.....	166
Figura 2E) Feições de descontinuidade na estratigrafia dos derrames basálticos, as quais sugerem pulsos de derrames distintos que se intercalam e se sobrepõe ao longo do intervalo do pacote vulcânico. Verificam-se feições como: diaclases	

horizontais, estruturas amigdaloides na rocha, decomposição do tipo esferoidal, e diaclases verticais.....	166
Figura 2F) Arenito quartzoso de granulometria fina, bem selecionado, com grãos arredondados, intemperizado de cor ocre.....	166
Figura 2G) Arenito quartzoso pouco feldspático, bem selecionado de granulometria grossa, bem arredondado de coloração rosa avermelhada, concentrando minerais opacos e/ou máficos entre as laminações.....	166
Figura 2H) Entrada da cavidade menor com facetas retangulares.....	167
Figura 2I) Entrada da cavidade maior com facetas em foram de arco.....	167
Figura 2J) Nível de arenito sílex de coloração branca leitosa.....	167
Figura 2K) Ressurgência formando corpo d'água elipsoidal em superfície e transportando elevado conteúdo de areias quartzosas bem selecionadas de granulometria fina a grossa para o leito do canal de drenagem. A temperatura da água que exfiltram é diferente do curso d'água de primeira ordem a intercepta no fundo de vale.....	167
Figura 2L) Ressurgência formando corpo d'água circular em superfície e transportando elevado conteúdo de areias quartzosas bem selecionadas de granulometria fina a grossa para o leito do canal de drenagem. A temperatura da água que exfiltram é diferente do curso d'água de primeira ordem à intercepta no fundo de vale.....	168
Figura 3 Escala ordinal com notas ponderadas para os atributos de cada uma das classes.....	169
Figura 4 Etapas de aquisição e produção dos temas componentes do modelo de potencial hídrico subterrâneo.....	173
Figura 5 Modelo Digital de Elevação com superfície topográfica sombreada em quatro diferentes direções de azimute de iluminação, realçando feições morfoestruturais do município de Paraíso das Águas.....	174
Figura 6 Etapas de aquisição de informações oriundas da delimitação semiautomatizada dos lineamentos identificados por imagem de radar e classificação. a) Extração de lineamentos; b) Interseção entre lineamentos; c) Densidade de lineamentos d) Ponderação combinada matricial para determinação do índice de fraturamento.....	176
Figura 7 Equação do Potencial Hídrico Subterrâneo em sistema de informações geográficas para Paraíso das Águas (MS), adaptando parte do método proposto de Brandão e Gomes (2003).....	177
Figura 8 Espacialização da rede de drenagem, nascentes, ressurgências, cavidades e poços tubulares.....	178
Figura 9 Método GOD de avaliação da vulnerabilidade á contaminação de aquíferos adaptado neste estudo.....	179
Figura 10 Rosácea de frequência absoluta (número de lineamentos) na área de estudo extraídos a partir de imagens ALOS PALSAR modo FDB com superfície topográfica sombreada.....	185
Figura 11 Boxplot da densidade absoluta (comprimento acumulado) em relação aos 12 intervalos azimutais pré-definidos.....	187
Figura 12 Comparação dos totais de nascentes (n°N), de lineamentos (n°L), de interseções entre lineamentos (n°IL) e o número de lineamentos por área de cada unidade geológica cartografada em superfície.....	188
Figura 13 Mapa do Potencial Hídrico Subterrâneo de Paraíso das Águas, classificado conforme proposta de Brandão e Gomes (2003) e de Gomes (2008), destacando as ressurgências mapeadas por Carvalho (2018).....	190
Figura 14 a) Espacialização das nascentes e rede de drenagens; b) Geração das áreas de influência de cada nascente pelo polígono de Voronoi (Thiessen); c) Contagem de centroides por polígonos de Voronoi em classes com potencial hídrico subterrâneo alto. d) Classificação e seleção dos polígonos pelo número de centroides com alto potencial hídrico.....	192
Figura 15 Distância dos pontos centroides com potencial hídrico subterrâneo alto e dos polígonos de Voronoi com maior número de pontos centroides com alto potencial	

hídrico subterrâneo em relação à cavidade 01 (a e b), cavidade 02 (c e d), ressurgência 01 (e e f) e ressurgência 2 (g e h).....	194
Figura 16A Boxplot das distâncias dos pontos centroides com potencial hídrico subterrâneo alto em relação às ressurgência e cavidades.....	194
Figura 16B Boxplot das distâncias nos polígonos de Voronoi com maior número de pontos centroides com alto potencial hídrico subterrâneo.....	194
Figura 17 Descrição das cavidades.....	195
Figura 18 Mapa geológico e perfil AB da área de ocorrência das cavidades.....	196
Figura 19 Histograma raster com o valor de pixel informando as frequências dos valores de altitude determinados pelos seis interpoladores testados.....	197
Figura 20 Regressão linear simples entre os valores de altitude de cada nascente estimada por cada uma dos seis interpoladores e o modelo digital de elevação para o mesmo ponto.....	198
Figura 21 Resumo dos resultados da regressão linear múltipla: a) Considerando duas variáveis sem a influência das nascentes (período seco); b) Considerando três variáveis com a influência das nascentes (período úmido).....	200
Figura 22 Análise de tendência espacial para a densidade de nascentes e o potencia hídrico subterrâneo estimado por técnicas de geoprocessamento.....	201
Figura 23 Estimativas baseadas em regressão linear múltipla considerando duas e três variáveis, sem e com a influência de nascentes, respectivamente e a identificação das diferenças entre estimativas para o período seco e úmido, informando a sensibilidade de oscilação do nível d'água e/ou previsão do modelo.....	202
Figura 24 Mapa do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos do município de Paraíso das Águas (MS) com detalhe para a região da malha urbana consolidada.....	205
Figura 25 Perfil construtivo do poço Pt4 mostrando a estratigrafia do intervalo pertencente ao arenito pós-basalto e os parâmetros resultantes da aplicação do método GOD.....	207
Figura 26 A) Mapa litológico com indicação dos locais com poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (B); C) Perfil geológico AA'; D) Bloco diagrama com a classificação dos tipos de aquíferos da área de estudo.....	208

LISTA DE TABELAS

1. CAPÍTULO 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE O USO DE GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO DE CIDADES MÉDIAS.....	21
Tabela 1 Método de refinamento das buscas.....	23
Tabela 2 Análise da quantidade de publicações por meio da evolução da cadeia de caracteres no período entre 1960 e 2018.....	24
Tabela 3 Publicações resultantes da busca com a cadeia de caracteres.....	26
Tabela 4 Palavras vinculadas às palavras-chave.....	27
2. CAPÍTULO 2 – ESPACIALIZAÇÃO DO RISCO INTRÍNSECO À CONTAMINAÇÃO POR PÉSTICIDAS EM CORPOS HÍDRICOS E DETERMINAÇÃO DE PONTOS DE MONITORAMENTO.....	39
Tabela 1 Combinação matricial entre classes de declividade (%) na superfície do terreno com classes de condutividade hidráulica (m/s) para obtenção de escoamento e infiltração.....	45
3. CAPÍTULO 3 – OTIMIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO.....	65
Tabela 1 Vulnerabilidade relacionada ao nível freático.....	72
Tabela 2 Classificação alfanumérica da densidade de vegetação baseada nos critérios empíricos quanto ao uso e cobertura do solo.....	73
Tabela 3 Determinação da variável infiltração e recarga.....	74
Tabela 4 Reclassificação da variável infiltração e recarga.....	74
Tabela 5 Classificação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição.....	75
4. CAPÍTULO 4 – HIDRODINÂMICA EM ZONA DE PERTURBAÇÃO DE BARRAGEM TROPICAL.....	88
Tabela 1 A filtragem e seleção de dados de imagens do Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI para o mesmo local em estudo.....	92
Tabela 2 Equações aplicadas para composição RGB das bandas multiespectrais, sendo o NDWI (Índice de de Água por Diferença Normalizada) de McFeeters (1996) na composição proposta por Volkmer (2020) susbtituído pelo MuWI-R (Índice Multiespectral de Água Revisado) de Wang et al. 2018.....	94
Tabela 3 Utilização da mesma configuração para visualização e realce das imagens pós-composição simples e baseada em equação entre bandas multiespectrais.....	94
5. CAPÍTULO 5 – CAVERNAS DO MATO GROSSO DO SUL; REVISÃO ATRIBUTOS CONDICIONATES, ANÁLISE PREDITIVA E AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL.....	120
Tabela 1 Resumo dos trabalhos com relação direta e indireta sobre o carste no Mato Grosso do Sul.....	137
Tabela 2 Estatística descritiva para as variáveis usadas no modelo de regressão.....	142
Tabela 3 Desempenho da correlação de Spearman do número de interseções por 100 km ² e o número de cavidades por 100 km ²	144
Tabela 4 Desempenho da regressão linear simples do número de interseções por 100 Km ² e o número de cavidades por 100 Km ²	145
Tabela 5 Desempenho da regressão linear múltipla do número de interseções por 100 Km ² o número de cavidades por 100 Km ²	146
Tabela 6 Resumo estatístico do índice de Moran Global.....	148

6. CAPÍTULO 6 – MODELO EMPÍRICO DO POTENCIAL HÍDRICO SUBTERRÂNEO POR MEIO DE GEOPROCESSAMENTO: O QUE MAIS ELE PODE NOS DIZER?.....	159
Tabela 1 – Cenas de imagens orbitais multiespectrais e de radar utilizadas neste estudo (USGS, 2018; ASF, 2020).....	169
Tabela 2 Notas atribuídas às classes de cobertura vegetal e uso do solo.....	170
Tabela 3 Notas atribuídas às subordens de solo.....	171
Tabela 4 Notas atribuídas às classes litoestratigráficas.....	172
Tabela 5 Notas atribuídas às classes de declividade.....	172
Tabela 6 Notas atribuídas às classes de pluviosidade média anual.....	173
Tabela 7 Número de poços classificados por vazão <i>versus</i> classes de potencialidade.....	190
Tabela 8 Área de cada uma das classes de potencialidade.....	191
Tabela 9 Diferença as superfícies altimétrica do modelo digital de elevação com a superfície interpolada pela altitude das nascentes, onde os valores negativos indicam extrapolação das cotas. Há indicação das áreas estimadas por cada interpolador em relação ao limite do perímetro municipal e o erro.....	198
Tabela 10 Informações dos poços tubulares existentes no município obtidas no Sistema de Informações de águas Subterrâneas (NE, ND, Q_est e CH). Variáveis independentes quantitativas contínuas avaliadas neste estudo (Z, PHS_sig, Spl). Onde: NE = Nível estático; ND = Nível D'água; Q_est = Vazão após estabilização (m ³ /s); CH = Carga Hidráulica; Z = Cota altimétrica pelo MDE; PHS_sig = Potencial hídrico subterrâneo obtido em sistema de informações geográficas; Spl: Cota do nível d'água estimada pelo interpolador <i>Spline</i> a partir das nascentes; (-) sem informações; Destaque em vermelho para carga hidráulica estimada por ponderação da distância e a cota dos poços Pt4 e Pt3.....	199
Tabela 11 Proposta de classificação dos tipos de aquíferos em Paraíso das Águas (MS). Adaptado de Almeida et al., (2006).....	204

LISTA DE QUADROS

4. CAPÍTULO 4 – HIDRODINÂMICA EM ZONA DE PERTUBAÇÃO DE BARRAGEM TROPICAL

Quadro 1 Alterações hidrológicas e geomorfológicas em setores de rio represado.....	
---	--

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANA	Agência Nacional das Águas
ASF	Alaska Satellite Facility
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológica
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Abastecimento
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FBD	Fine Beam Dual Polarization
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVIAP	Índice de Vulnerabilidade Intrínseca dos Aquíferos à Poluição
JAROS	Japan Resources Observation System Organization
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
MEPHS	Modelo Empírico do Potencial Hídrico Subterrâneo
NASA	Agência Espacial Norte Americana
QGIS	Sistema de Informações Geográficas Quantum
RADAMBRASIL	Projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico Integrado do Brasil
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
SEPLAN	Secretaria de Estado e Planejamento
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SICAR	Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural
SIG'S	Sistema de Informações Geográficas
SNIR	Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
TIN	Triangulated Irregular Network

RESUMO GERAL

As geotecnologias são importantes ferramentas de análise espacial, dando suporte à decisão ao permitirem a análise de fenômenos ambientais irregularmente distribuídos no espaço geográfico. O primeiro capítulo desse trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de geotecnologias aplicadas ao planejamento de cidades médias, consultando o banco de dados de periódicos da *Scopus*. No segundo capítulo se aborda a implantação de uma rotina metodológica para espacializar o risco intrínseco à contaminação por pesticidas em corpos hídricos e determinar pontos de monitoramento, essa rotina é de baixo custo e visa suprir a carência de dados hidrogeológicos consistentes em determinadas regiões do Brasil. No terceiro capítulo é apresentada uma técnica de otimização e aplicação do índice de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP), adaptando e atualizando a rotina de obtenção deste índice baseado em evidências recentes sobre a infiltração e recarga dos aquíferos no bioma Cerrado. No quarto capítulo se determina a melhor fonte de imagens multiespectrais de média resolução e gratuitas para diagnosticar processos hidrodinâmicos em zona de perturbação de barragem tropical. No quinto capítulo foi realizada revisão integrativa sobre o carste no Mato Grosso do Sul, avaliando atributos geológico-ambientais por localização que condicionam à ocorrência de cavidades naturais, além de verificado a possibilidade de prever o número de cavidades por métodos de regressão linear simples e múltipla e investigar se há autocorrelação espacial com alguns destes atributos. No sexto e último capítulo é explorado o Modelo Empírico do Potencial Hídrico Subterrâneo (MEPHS), bem como os temas a ele associados em relação às surgências, cavidades e nascentes, além da aplicação do método de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (GOD), verificando sua relação com o MPH. É também proposto um método de estimativa do nível estático a partir de do MEPHS, cota dos poços e a superfície do nível d'água interpolada pelo método *Spline*.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Bibliometria, Métodos.

ABSTRACT

Geotechnologies are important tools for spatial analysis, supporting the decision by allowing the analysis of environmental phenomena irregularly collected in geographic space. Therefore, in the first chapter it presents a bibliographic review on the use of geotechnologies applied to the planning of medium cities, consulting the database of Scopus journals. In the second chapter we discuss the implementation of a methodological routine to spatialize the intrinsic risk to contamination by pesticides in water bodies and to determine monitoring points, this routine is of low cost and aims to supply the lack of consistent hydrogeological data in certain regions of Brazil. The third chapter presents an optimization and application technique for the intrinsic vulnerability index of aquifers to the species (IVIAP), adapting and updating the routine for obtaining this index based on recent evidence on the infiltration and recharge of aquifers in the Cerrado biome. In the fourth chapter, we determine the best source of free, multispectral images of medium resolution to diagnose hydrodynamic processes in a tropical dam disturbance zone. In the fifth chapter, an integrative review on karst in Mato Grosso do Sul was carried out, evaluated as a geological-environmental attribute by location that conditions the occurrence of

natural cavities, in addition to the possibility of predicting the number of cavities by simple and linear regression methods. and investigate whether there is spatial autocorrelation with some attributes. In the sixth and final chapter, the Empirical Model of Underground Water Potential (MEPHS) is explored, as well as the themes of associated elements in relation to emergences, cavities and springs, in addition to the application of the method for assessing vulnerability to aquifer contamination (GOD) , verifying its relationship with the MPHs. It is also proposed a method of estimating the static level from the MEPHS, the quota of the wells and the surface of the water level interpolated by the *Spline* method.

Keywords: Geotechnologies, Hydrogeology, Methods.

INTRODUÇÃO

As geotecnologias representam uma alternativa extremamente viável para a produção de material temático e diagnóstico ambiental (SANTOS et al., 2016), sendo que o processamento digital de imagens de satélite em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), traz economia de tempo e recursos aos tomadores de decisões (PARANHOS FILHO et al., 2016). Essas técnicas geram avanços significativos no planejamento e gestão, onde a geoinformação é uma das estratégias mais importantes, com vistas à interpretação concreta das feições e graus de risco, na proteção dos corpos hídricos, principalmente porque essas informações não se encontram regularmente distribuídas no domínio espacial (Lisbôa et al., 2016).

Imagens de satélite e cartas temáticas de detalhe são imprescindíveis para caracterização e análise de obras de engenharia que causam grandes mudanças na geomorfologia fluvial, como é o caso de rios impactados por barragens, pois fornecem dados qualitativos e quantitativos essenciais (ARAÚJO; FURRIER; MONTEIRO, 2016). Com sensoriamento remoto é possível diagnosticar qualitativamente as variáveis físico-químicas da água, maximizando o potencial do monitoramento indireto e embasando a tomada de decisões protetivas e preventivas, sendo que em rios geralmente são avaliados parâmetros tais como: transporte de sedimentos, erodibilidade, qualidade da água, carreamento e fixação de nutrientes, entre outros (LIMA et al. 2019).

A integração de banco de dados secundários de domínio público, contendo informações geológicas, hidrogeológica e geomorfológicas, aliadas a métodos geoestatísticos e de SIG, vêm apresentando resultados satisfatórios para prever produtividade de poços, no que se refere à vazão específica, onde o aumento da

densidade de lineamentos é proporcional às áreas com maior potencial hídrico, com falhas e/ou fraturas condicionando a existência de espaços vazios, favoráveis à circulação do fluxo d'água subterrâneo (COSTA et al., 2018). Destaca-se aqui também a aplicabilidade na gestão e planejamento territorial que novos conhecimentos sobre o entendimento da distribuição espacial de áreas cársticas, pseudocársticas ou potencialmente suscetíveis a processos de carstificação podem fornecer para o uso mais racional dos recursos naturais disponíveis, sobretudo a manutenção da qualidade da água nos aquíferos e da prevenção a movimentos de massa.

É viável utilizar imagens de satélite de média-alta resolução espacial para elaborar mapas hidrológicos e de nascentes para atender diversas finalidades, sendo o processamento de informações geográficas essencial para análises qualitativas e quantitativas de drenagens e nascentes, oferecendo agilidade, objetividade, consistência e precisão para tomadas de decisão (BOSQUILIA et al., 2015).

Uma vez adquirido a base de dados geográfica de múltiplas fontes em órgãos ambientais, das mais diversas esferas de governo, é preciso fazer uma revisão crítica e relacionar as informações visando aprimorar o conhecimento sobre determinadas áreas, avançar no entendimento de como as variáveis ambientais se interagem para propor um modelo conceitual que configure uma abstração coerente com os mecanismos atuantes na realidade de uma determinada região.

Objetivo geral

O objetivo geral é o de explorar o potencial das geotecnologias para estudos ambientais, aplicando técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e análise estatística de dados espaciais com a adaptação e proposição de novos métodos ou adaptações de algumas de suas etapas a fim de suprir a carência de dados ou as limitações previamente detectadas no método original.

Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliométrica apresentando o panorama geral sobre o uso das geotecnologias aplicadas ao planejamento e gestão nas cidades médias, evidenciando as principais linhas de tendência e lacunas;
- Propor método alternativo para determinação de pontos de monitoramento da qualidade das águas, a partir da delimitação de áreas mais suscetíveis à contaminação por pesticidas, tanto superficial como subsuperficial, adotando como área de estudo a região divisora das bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Alto Araguaia em Mato Grosso;
- Aperfeiçoar o método de obtenção do índice de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP), conferindo à variável infiltração e recarga a combinação matricial entre os intervalos de declividade e a densidade relativa de cobertura vegetal, bem como a inversão da classificação da variável infiltração e recarga, baseando-se em resultados de estudos recentes para o ambiente de cerrado;
- Determinar a melhor fonte de imagens multiespectrais de média resolução espacial para diagnosticar processos erosivos hidrodinâmicos, propondo uma chave de classificação baseada em composição de bandas de imagens de satélite;
- Revisar publicações sobre o carste do Mato Grosso do Sul, em periódicos de alto impacto, verificando os principais condicionantes geológico-ambientais que favorecem a ocorrência de cavidades naturais, bem como avaliamos se é possível prever quantitativamente o número de cavidades por área usando como variáveis geológico-ambientais lineares como previsoras. Também

verificar o nível de autocorrelação espacial destas variáveis baseando-se em métricas do índice de Moran (global e local);

- Explorar o Modelo Empírico de Potencial Hídrico Subterrâneo (MEPHS) e os planos de informações hierarquizados inerentes a ele, em sistemas de informações geográficas, relacionando-os com a ocorrência de surgências, cavidades e estimativas do nível estático, bem como com o método de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos (GOD), em área com deficiência de dados hidrogeológicos.

01 CAPÍTULO

Estudo bibliométrico sobre o uso de geotecnologias aplicadas ao planejamento de cidades médias

Resumo

Este trabalho pauta-se numa revisão bibliométrica visando apresentar um panorama geral sobre o uso das geotecnologias aplicadas ao planejamento e gestão nas cidades médias, traçando as principais linhas de tendência e lacunas nessa tríade do conhecimento. O banco de dados *Scopus*, amplamente utilizado para o tema, iniciou essa indexação a partir de 2007, evidenciando a carência de trabalhos científicos sobre cidades médias em periódicos de alta performance. Destacaram-se modelos preditivos da expansão urbana e de avaliação do nível de segurança ecológica das cidades. As principais inovações adotaram múltiplas fontes de dados de satélite, programando rotinas de validação e otimização de algoritmos classificadores de imagem, bem como o incremento de cadeias de processamento semiautomatizadas com códigos livres e abertos. Diante das várias aplicações derivadas das geotecnologias é essencial a adoção destas ferramentas pelas secretarias municipais, para abandonar o modelo de planejamento e gestão arcaicos ou pouco eficientes de seus territórios.

Palavras Chave: Revisão, urbanização, sensoriamento remoto, gestão urbana, sistemas de informações geográficas.

Abstract

Aiming to describe a generic overview of the use of geotechnology applied to planning and management in medium-sized cities, outlining the main trends and gaps in this knowledge triad, this work is based on a bibliometric review. *Scopus* was selected as the key database for this study, considering its popular use in the global academic setting and the largest number of publications on the subject. The publications that compiled the key terms with the three themes in common began as of 2007 only, evidencing the lack of scientific works about medium cities in high performance journals. Predictive models of urban sprawl and assessment of the ecological safety level of cities were highlighted. Major innovations have adopted multiple satellite data sources, programming validation and optimization routines of image classifying algorithms, as well as the increment of semi-automated open and open source processing chains. Given the various applications derived from geotechnologies, the adoption of these tools by municipal secretariats is essential to abandon the model of arcane or inefficient planning and management of their territories.

Keywords: Review, urbanization, remote sensing, urban management, geographic information system.

1.1 INTRODUÇÃO

O termo 'cidade média' não deve ser confundido com o conceito de tamanho, tão pouco estar associado somente às questões demográficas. Na realidade é um termo abrangente relacionado, principalmente, ao papel de intermediação da cidade no contexto regional. Essa intermediação diz respeito aos fluxos de informações, demográficos e econômicos entre a própria cidade média e o espaço regional (AMORIM FILHO, 1984). Portanto, estudar o papel das cidades médias, bem como seus aspectos físicos, ambientais, econômicos e sociais revelam-se como

parâmetros importantes para o planejamento urbano e regional. Estas, por sua vez, possibilitam o desenvolvimento de forma integrada, à medida que favorecem o aumento da competitividade econômica, a coesão social e a sustentabilidade ambiental (COSTA, 2002).

Neste contexto, as geotecnologias representam uma alternativa extremamente viável para a produção de material temático e diagnóstico de áreas urbanas (SANTOS et al., 2016). O uso de imagens de satélite, assim como o seu processamento digital em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), traz economia de tempo e recursos aos tomadores de decisões (PARANHOS FILHO et al., 2016). Essas técnicas geram avanços significativos no planejamento e na gestão das cidades, especialmente na conjuntura regional.

Para traçar um panorama do uso das geotecnologias apoiando decisões de planejamento urbano especificamente em cidades de porte médio, aplicou-se uma técnica bibliométrica, utilizada quando se almeja analisar aspectos da produção científica de uma determinada área, permitindo então a identificação de lacunas e tendências do conhecimento científico destas produções. Com isso, reúne e organiza-se grande quantidade de dados, tais como ano de publicação, país de origem, indicadores científicos, produtividade dos autores, entre outros (TAGUE-SUTCLIFFE, 1992 *apud* MACIAS-CHAPULA, 1998; DE MEDEIROS; VITORIANO, 2015).

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Base de Dados utilizada para este estudo foi a *Scopus* (ELSEVIER BV, 2019), devido à abrangência dos temas das revistas nela indexadas. As buscas ocorreram no mês de fevereiro de 2019 e detiveram-se ao período de 1960 a 2018 como recorte temporal.

Inicialmente, foram selecionadas palavras chaves que relacionam os termos referentes à tríade: Planejamento Urbano, Cidades Médias e Geotecnologias. Para a formação da cadeia de caracteres foram utilizados termos com os radicais em inglês, visto o grande alcance desta língua no meio científico, além dos sinônimos destes termos verificados na produção científica relativa aos estudos realizados

especificamente em cidades de porte médio, ou que contemplavam o termo cidade média.

Na primeira etapa foram considerados todos os campos de busca da base de dados. No entanto, ao observar as publicações retornadas verificou-se que grande parte desse material estava fora do contexto pesquisado. A partir dessa constatação as buscas foram refinadas incluindo apenas as que possuíam os termos no título, resumo ou palavras-chaves e as publicações foram limitadas a artigos e artigos de revisão. Na Tabela 1 são apresentados os critérios de refinamento das buscas, bem como as cadeias de caracteres utilizadas nas etapas de localização das publicações.

Tabela 1. Método de refinamento das buscas.

Cadeia de caracteres	1960 até 2018	Todos os tipos de documentos	Artigos e Artigos de revisão
("med* cit*" OR "med* size cit*") AND ("urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*") AND ("photointerpret*" OR "remote sens*" OR "satellit*" OR "geotecnolog*" OR GIS)	Todos os campos	697	583
	Título + Resumo + Palavras chaves	21	9
("medium cit*" OR "medium size cit*" OR "average cit*" OR "mid cit*") AND ("urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*") AND (" photo interpret* " OR "photointerpret*" OR "satellit* image " OR "remote sens*" OR "geotecnolog*" OR GIS)	Todos os campos	136	101
	Título + Resumo + Palavras chaves	11	6

Fonte: Scopus (2019).

Devido à baixa quantidade de publicações resultantes nas buscas, foram feitas buscas progressivas para avaliar o alcance dos resultados, com a finalidade de avaliar a abrangência dos termos e seus respectivos resultados. Na sequência, as seis publicações localizadas com a cadeia de caracteres principal foram analisadas e discutidas.

Para identificar as tendências e lacunas atuais da aplicação das geotecnologias para o planejamento urbano se acessou as publicações entre os anos de 2014 e 2019. Dessa forma, realizou-se nova busca na base de dados *Scopus*, porém sem o uso do termo restritivo ‘cidade média’, tendo em vista que a demanda por gestão e planejamento nas áreas urbanas das cidades é um fator comum. Após esta busca apresentam-se os resultados e discutem-se algumas das principais inovações nesta área do conhecimento, elencando tendências e lacunas no conhecimento.

1.3 RESULTADOS

Utilizando o conjunto de termos que continham ‘Planejamento Urbano’, ‘Geotecnologias’ e ‘Cidades Médias’, por meio da cadeia de caracteres (*"medium cit*" OR "medium size cit*" OR "average cit*" OR "mid cit*"*) AND (*"urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*"*) AND (*"photo interpret*" OR "photointerpret*" OR "satellit* image" OR "remote sens*" OR "geotecnolog*" OR GIS*)), e utilizando os filtros de pesquisa por título, palavras-chaves e resumos, foram encontradas apenas seis publicações.

A quantidade de publicações retornadas foi ínfima, trazendo um novo questionamento sobre qual dos termos teria relação direta com a diminuição drástica dos resultados. Realizou-se então uma busca progressiva, sendo a primeira feita com apenas com os termos relacionados à ‘Planejamento urbano’ (cadeia de caracteres 1), a segunda com os relacionados, simultaneamente, à ‘Planejamento Urbano’ e ‘Geotecnologias’ (cadeia de caracteres 2) e a terceira com a cadeia de caracteres completa abrangendo ‘Planejamento urbano’, ‘Geotecnologias’ e ‘Cidades Médias’ (cadeia de caracteres 3), com todos os termos somente em inglês, por se tratar de uma língua de uso global (Tab. 2).

Tabela 2. Análise da quantidade de publicações por meio da evolução da cadeia de caracteres no período entre 1960 e 2018.

	Cadeia de caracteres	Nº de publicações
	Planejamento Urbano <i>("urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*")</i>	55.350
	Planejamento Urbano e Geotecnologias <i>("urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*") AND ("photo interpret*" OR "photointerpret*" OR "satellit* image" OR</i>	4.387

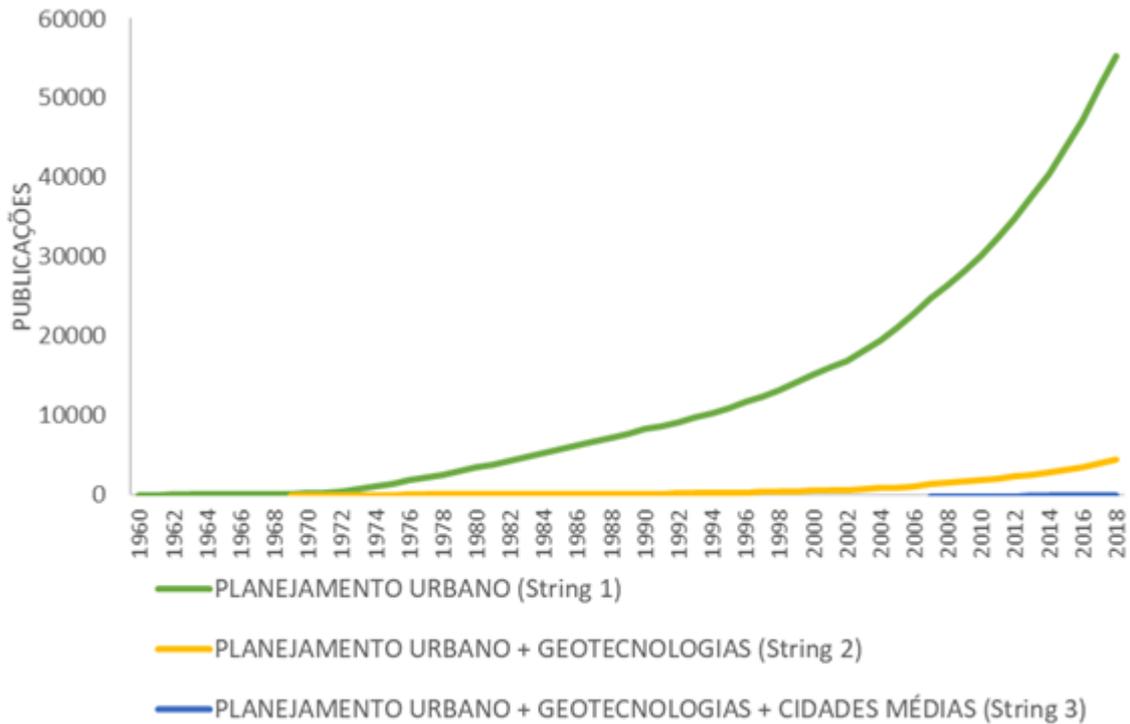
	<i>"remote sens*" OR "geotecnolog*" OR GIS)</i>	
	Planejamento Urbano, Geotecnologias e Cidades Médias <i>("urban plan*" OR "urban Manag*" OR "Urban Develop*" OR "Master Plan*") AND ("photo interpret*" OR "photointerpret*" OR "satellit* image" OR "remote sens*" OR "geotecnolog*" OR GIS) AND ("medium cit*" OR "medium size cit*" OR "average cit*" OR "mid cit*")</i>	6

Fonte: Scopus (2019).

A cadeia de caracteres 1, como esperado, por ser menos restritiva abrange uma maior quantidade de publicações. Contudo, a busca pela cadeia de caracteres 2 evidencia que uso de Geotecnologias ainda é baixo, quando comparado a outros métodos, figurando em apenas 7,9% das publicações sobre Planejamento Urbano. Essa média diminuiu ainda mais quando incluído o termo Cidade Média, resultando 0,15% das pesquisas de Geotecnologias e Planejamento Urbano.

As pesquisas sobre Planejamento Urbano (cadeia de caracteres 1) iniciam em 1960, com um crescimento constante a partir de 1972 e nova inflexão ascendente a partir dos anos 2000 (Fig. 1). Os termos relacionados à Geotecnologias (cadeia de caracteres 2) figuram em publicações de Planejamento Urbano desde 1970, com o crescimento no início dos anos 2000, sobretudo a partir de 2004. As publicações que compilaram os três termos em comum (cadeia de caracteres 3) tiveram início a partir de 2007 apenas, porém ainda possui uma quantidade inexpressiva indicando carência de publicações que versam especificamente sobre cidades médias levando em consideração essa tríade.

Figura 1. Relação da quantidade de publicações da evolução da cadeia de caracteres.



Fonte: os autores.

Observa-se que ao explorar a busca com uma cadeia de caracteres menos abrangente, esperasse que o número de publicações diminuísse, porém a diminuição de 99,85% das publicações com a agregação de mais um conjunto de termos relacionados ao mesmo tema (cidades médias), foi extremamente acentuada. Porém, como o objetivo desta análise foi verificar a produção científica no âmbito do planejamento urbano de cidades médias utilizando as geotecnologias, optou-se por analisar individualmente os seis artigos (Tab. 3).

Tabela 3. Publicações resultantes da busca com a cadeia de caracteres.

Autores	Título	Ano	Revista
Aguayo, M.I.; Wiegand, T.; Azócar, G.D.; Wiegand, K.; Vega, C.E.	<i>Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: A case study of Los Angeles, Chile</i>	2007	Ecology and Society
Azócar, G.; Romero, H.; Sanhueza, R.; Vega, C.; Aguayo, M.; Muñoz, M.D.	<i>Urbanization patterns and their impacts on social restructuring of urban space in Chilean mid-cities: The case of Los Angeles, Central Chile</i>	2007	Policy Land Use

Barton, J.; Pozo, R.; Román, Á.; Salazar, A.	<i>Urban restructuring a glocalised territory: A characterization of organic growth in the cities of Chiloé, 1979-2008</i>	2013	Revista de Geografia Norte Grande
Yalovol, P.	<i>GIS and Ukraine</i>	2014	GEO: connexion
Wu, W. ; Chen, M. ; Fan, S.W. ; Ou, M.H.	<i>A dynamic approach to land ecological security assessment: A case study of Su-Xi-Chang area, China</i>	2016	Acta Ecologica Sinica
Rahman, A.A., AL-Baghdadi, J.A., Elaiwi, A.H., Abed, F.	<i>Selection of a best recreational park location in a city using GIS technique</i>	2017	Journal of Engineering and Applied Sciences

Fonte: os autores.

As primeiras publicações são de 2007, mas apenas em 2013 se tornaram mais constantes. Os artigos são vinculados à cinco grandes áreas do conhecimento: Ciências Ambientais (3), Ciências Agrícolas e Biológicas (2) Geociências (2), Ciências Sociais (2) e Engenharia (1). Dos 24 autores, doze são filiados a instituições chilenas, quatro chinesas, quatro iraquianas, três alemãs e uma equatoriana. Contendo então mais da metade dos autores na América Equatoriana, apresentando então, maioria de autores da América Latina. Quanto ao idioma das publicações, duas são em inglês, duas em espanhol, uma em chinês e uma em alemão.

Ao todo os artigos possuem 30 palavras-chave, sem haver repetição entre elas. Estas foram listadas e agrupadas, separando-as entre os termos buscados: Cidades Médias, Planejamento Urbano e Geotecnologias (Tab. 4).

Tabela 4. Palavras vinculadas às palavras-chave.

Agrupamentos	Palavras Chaves
Cidades Médias	<i>Chile</i> <i>Chilean mid-cities</i> (Cidades medias chilenas) <i>Los Angeles, Chile</i> <i>Mid-cities</i> (Cidades medias)
Planejamento Urbano	<i>Best park location</i> (Melhor local de instalação) <i>Dynamic assessment</i> (Avaliação dinâmica) <i>Land-use change</i> (Mudança no uso do solo) <i>Rapidly urbanizing areas</i> (Áreas de rápida urbanização) <i>Spatial expansion and invasion</i> (Invasão e expansão espacial) <i>Socio-spatial restructuring</i> (Reestruturação socioespacial) <i>Spatially explicit modeling</i> (Modelagem espacialmente explícita) <i>Urban growth</i> (Crescimento urbano) <i>Urban growth patterns</i> (Padrões de crescimento urbano)

	<i>Urban land use</i> (Uso do solo urbano) <i>Urban morphology</i> (Morfologia urbana)
Geotecnologias	<i>GIS</i> (SIG) <i>Mapping</i> (Mapeamento) <i>Navigation</i> (Navegação) <i>Spatial analysis using ArcGIS</i> (Análise espacial usando o ArcGIS)
Outras	<i>Ecological risk</i> (Risco ecológico) <i>Ecosystem service</i> (Serviço Ecosistêmico) <i>Expert choice</i> (Melhor escolha) <i>Future prospect</i> (Prospecto futuro) <i>Globalization</i> (Globalização) <i>Land ecological security</i> (Segurança ecológica da terra) <i>Logistic regression</i> (Regressão logística) <i>Pairwise comparison</i> (Comparação parelha) <i>Pump station</i> (Estação de bomba) <i>Traditional</i> (Tradicional) <i>Technological Development</i> (Desenvolvimento Tecnológico)

Fonte: os autores.

As palavras-chaves relacionadas a 'Planejamento Urbano' equivalem a 36,5% (11 palavras), sendo o tema mais utilizado para se referir as pesquisas. Os temas 'Cidades Médias' e 'Geotecnologias' remetem a 13,5% (4 palavras) cada. Outros temas também figuram como referências, com destaque para os relacionados ao meio ambiente e inovações tecnológicas.

1.4 DISCUSSÃO

1.4.1 Análise dos artigos selecionados pela cadeia de caracteres

Aguayo et al. (2007) desenvolveram estudos com o objetivo de quantificar a relação entre a expansão urbana e suas forças motrizes para prever o padrão de crescimento espacial baseado em mudanças históricas do uso da terra, na cidade de Los Angeles, setor central do Chile. Os autores utilizaram variáveis preditivas por meio de análises univariadas, gerando modelos de regressão logísticas. Analisaram a influência da escala espacial e para isso construíram quatro modelos, diferenciando entre eles as variáveis de distância e densidade. Com este método os autores afirmam terem capturado mais acertadamente o processo de crescimento urbano numa sequência multiescalar. Verificaram que as distâncias para acessar estradas, a densidade do sistema rodoviário urbano, a área total urbanizada em várias escalas e o tipo de solo são os melhores indicadores para os padrões de expansão urbana. Nesse sentido, demonstraram que o crescimento urbano pode ser

descrito com sucesso por variáveis relacionadas à acessibilidade e densidade de vizinhança de elementos urbanos pré-definidos com indicadores em diferentes escalas espaciais.

Azócar et al. (2007), estudando a mesma cidade dos autores anteriores, utilizaram a matriz de Markov para analisar sequências de mudanças de uso e cobertura da terra. Os autores selecionaram um período de análise de 43 anos, bem como aplicaram métodos de regressão para entender o desenvolvimento da cidade com o aumento da população.

Barton et al. (2013) basearam-se na observação e interpretação de imagens aéreas e imagens de satélite do *Google Earth* de cinco cidades chilenas. Propuseram um método para identificar tipologias para forma de ocupação da malha urbana consolidada. Para classificar as unidades comuns do território (TCUs) estes setores aliaram fotointerpretação, sistematização dos dados em *SIG*, informação de campo, entrevistas com servidores municipais encarregados pela gestão e planejamento urbano, bem como informações morfométricas do relevo. Nesse sentido as parcelas urbanas distinguíveis por eles se referiram quanto à forma do lote rodoviário (distribuição regular e irregular, linear, sinuosidade, esfericidade - forma e tamanho), edifícios (homogêneo ou heterogêneo) e ocupação do solo (pegada construtiva alta, média ou baixa). Além disso, os autores incluíram aos *TCUs* a forma do tipo humana dispersa/solta, isto é, aqueles assentamentos descontínuos em relação à parcela urbana. E concluíram que a análise de *TCUs* permite expor a existência de paradoxos diante a presença ou ausência dos Planos Diretores nas cidades, ou ainda da eficácia da aplicação deste mecanismo.

Visando a seleção de uma melhor localização para a instalação de parque recreativo em uma cidade, Rahman et al. (2017) usaram técnicas de *SIG* justificando haver vários padrões de planejamento (parâmetros) e especificações de projeto a serem seguidos, sendo inviável analisá-los manualmente de forma integrada. Com isso, estes autores usaram seis parâmetros (espaços abertos, densidade populacional, acessibilidade do parque, distância entre o parque escolhido e as estações residenciais, rios e da rede de esgoto). Eles constataram ser possível reduzir custos e o tempo de espera para selecionar locais adequados em comparação metodologias tradicionais.

Wu et al. (2016), aplicaram o modelo de resistência cumulativa para simular as dinâmicas da paisagem, numa abordagem da dinâmica dos níveis de segurança

ecológica da terra (LES). Para isso, os autores obtiveram valores da resistência ecológica dos tipos de uso e cobertura da terra, baseado nos valores de serviços ecossistêmicos, enquanto para as áreas construídas foram utilizados valores derivados do risco ecológico. Neste contexto, eles dividiram a área de estudo em cinco níveis de *LES* com os resultados da invasão, ou seja, construção adequada (muito baixa), ecologicamente frágil (baixa), tampão (média), segurança ecológica (alta) e núcleo ecológico (muito alta). Observaram uma tendência significativa na convergência da aglomeração espacial e em contrapartida expansão de terras ecológicas de forma circular, do núcleo para o exterior, o que pode indicar melhor acessibilidade a áreas verdes no centro da cidade.

Ao examinar o estado da arte do uso das Geotecnologias na Ucrânia, Yalovol (2014) constatou que a disseminação das ferramentas de mapeamento e navegação deram um salto acentuado no desenvolvimento do país. O autor destaca que grandes empresas surgiram para fornecer serviços de navegação, o que aumentou a concorrência de mercado, a exemplo da explosão de telefones celulares com *GPS*, os quais permitem acesso às informações das condições de trânsito e escolha de rotas melhores e mais seguras.

1.4.2 Das tendências identificadas nos artigos selecionados pela cadeia de caracteres

Nos trabalhos efetuados por Aguayo et al. (2007) destacam-se quatro principais tendências, sendo ela: (1) Abordagens que combinam ferramentas de análise espacial e *SIG* avançam significativamente e são adequadas para compreensão dos padrões de crescimento urbano, podendo ser amplamente aplicadas para o planejamento e gestão urbana; (2) A acessibilidade ainda é considerada um dos fatores que melhor explicam o desenvolvimento dos serviços, comércio e atividades industriais, bem como, projetos residenciais e recreativos; (3) Modelos espaciais baseados em regressão estabelecem relações funcionais dentro de um conjunto de variáveis espaciais apropriadas para prever os locais de mudança na paisagem; (4) O crescimento urbano geralmente ocorre de forma difusa e se entende para áreas urbanizadas pré-existentes em uma forma de preenchimento de lacunas.

No estudo de Azócar et al. (2007), entende-se que o uso de ferramentas *SIG* e análise espacial podem contribuir para uma melhor compreensão da relação entre mudanças do uso e cobertura da terra, aumento da população e expansão urbana.

Em Rahman et al. (2017), a escolha adequada de parâmetros e/ou variáveis, associadas a simulação de pesos de decisão entre elas, proporcionam a identificação de áreas mais promissoras ao desenvolvimento de atividades específicas na área urbana.

Na contribuição de Wu et al. (2016) vislumbra-se que os Planos de Zoneamento como o *LES* são medidas eficazes no controle do uso e ocupação das terras e na gestão diferencial dos recursos terrestres.

Por outro lado, Yalovol (2014) advoga que Planos Diretores Municipais de grandes centros populacionais se beneficiam economicamente quando fazem o uso de ferramentas *SIG* para aumentar a transparência dos serviços prestados e indicar rotas melhores e mais seguras para o atendimento à população. Já no trabalho de Barton et al. (2013) não foram identificadas abordagens com a finalidade de expressar tendências.

1.4.3 Das lacunas identificadas nos artigos selecionados pela cadeia de caracteres

Aguayo et al. (2007) reconhecem que a urbanização é um processo multiescalar e as variáveis de distância sozinhas não oferecem modelos preditivos satisfatórios, subestimando a densidade de certos elementos como estradas e/ou áreas urbanizadas. Enquanto Azócar et al. (2007) identifica a necessidade de quantificar como as novas estruturas espaciais impactam a sociedade no que tange a segregação, isolamento e a privatização do espaço urbano.

O entendimento de Barton et al. (2013) é de que em muitas cidades médias e pequenas o planejamento urbano acaba sendo um instrumento de reconhecimento do crescimento orgânico e não de regulação e orientação de crescimento. Já, Rahman et al. (2017), reconhecem que locais de uso público, tal como parques recreativos, não são acessíveis para muitos cidadãos e isso se deve em grande parte aos procedimentos inadequados de análise sem o uso de ferramentas *SIG*.

Para Wu et al. (2016), há necessidade de melhorar o método de avaliação da segurança ecológica das terras de forma que este possa ser amplamente replicável, buscando assim uma padronização para quantificar áreas ecologicamente frágeis. Não identificamos no trabalho de Yalovol (2014) conteúdo que remetesse a possíveis lacunas.

1.4.4 Apontamentos sobre as inovações na implantação das geotecnologias nas cidades

A utilização de várias fontes de dados para a fusão de imagens visando o mapeamento do solo urbano foi testada por Feng et al. (2019), os quais obtiveram resultados promissores com o uso de redes neurais de aprendizagem profunda para classificar imagens e detectar objetos. Estes autores propuseram uma rede neural convolucional de dois ramos modificada para fundir imagens hiperespectrais (HSI) e dados de detecção ajustados à luz (LIDAR). Baseando-se no método *Squeeze-and-Excitation Network*, verificaram o bom desempenho da classificação do solo urbano, obtendo precisão geral de quase 92%, sendo viável esse procedimento para discriminar alvos em paisagens urbanas muito heterogêneas.

Para a detecção dos limites das áreas urbanas, Goldblatt et al. (2016) trabalharam com imagens *Landsat 7 ETM* e *Landsat 8 OLI*, usando três tipos de classificadores em uma rotina de supervisão baseada em *pixels* de áreas 'construídas' e 'não construídas' na plataforma em nuvem do *Google Earth Engine* (GEE). Estes autores verificaram a alta qualidade nos mapas produzidos e destacaram o potencial uso do *GEE* para análise temporal em grandes escalas para destacar processos de urbanização.

Grippa et al. (2017) desenvolveram uma cadeia de processamento semiautomatizada de código aberto para classificação da cobertura e uso da terra urbana baseada orientada a objeto. Para isso, implementaram uma rotina na linguagem *Python* utilizando complementos existentes no *GRASS GIS* e no *R*. Esses autores otimizaram os parâmetros de segmentação em ambiente não supervisionado e com aplicação de vários classificadores inseridos em sequência combinada de aprendizado de máquina, em um esquema de classificação hierárquica; obtiveram precisão global de 93% com 5 classes e de 80% com 11 e 9 classes.

Compreendendo que a informação do tipo construção é crucial para muitos estudos urbanos e que condiz com detalhar estimativas da população, planejamento e gestão urbana, Huang et al. (2017) integraram informação da altura das edificações com imagens *LIDAR*, discriminando a textura, a assimetria espectral e informações geométricas de imagens de sensoriamento remoto. Com estes procedimentos demonstram a viabilidade do alcance de precisões acima de 80% para superobjetos (segmentos dentro de outros objetos).

Combinando fusão de imagens remotamente detalhadas de alta resolução espacial com dados oriundos do *OpenStreetMap* (OSM), Luo et al. (2019) propuseram um método de classificação de cobertura do solo urbano. Estes autores obtiveram resultados *satisfatórios, de alta precisão, sendo que a sobreposição com dados do OSM reduziu efetivamente erros de classificação entre edifícios, solo e estradas.*

Um método para classificação genérica dos tipos de estrutura urbana, levando em consideração apenas atributos morfológicos e visando a padronização de informações em uma rotina multiescala é apresentada por Lehner e Blaschke (2019), os quais defendem uma abordagem puramente hierárquica na definição de tipologias baseadas em objetos para fins de planejamento urbano.

Indicando a necessidade de agências nacionais e internacionais legislarem diretrizes e mecanismos que levam em consideração a sazonalidade ambiental, Matos et al. (2019) demonstraram uma alternativa para identificação do nível de degradação em bacias hidrográficas. A fim de estimar a degradação da paisagem, ponderaram pesos para as diversas classes, com os pontos de cada classe distribuídos por quadrantes em malha regular e operados em calculadora do *S/G*.

1.4.5 Das tendências das inovações do uso de geotecnologias nas cidades

Da utilização de dados de várias fontes pode-se extrair pela fusão recursos das imagens, de acordo com Feng et al. (2019), melhorando a precisão de mapeamento do uso urbano da terra.

A crescente disponibilidade de imagens de satélite em diferentes resoluções espaciais e temporais permitiram a Goldblatt et al. (2016) desenvolverem métodos de classificação mais acurados, conduzindo a pesquisa urbana ao uso crescente de imagens digitais multiespectrais. Os autores afirmam que plataformas digitais que trabalham com o armazenamento de dados na nuvem possuem bons desempenho e capacidade de processamento de dados e, com a maior acessibilidade dada aos pesquisadores, é possível expandir as unidades espaciais e temporais de análise, visando investigar os processos de urbanização em áreas maiores e por longos períodos tempo. Sob incorporação de dados de luz noturna, eles consideram que para melhorar a precisão dos classificadores da paisagem urbana, variáveis socioeconômicas e físico-geográficas detectadas por imagem de satélite devem ser incorporadas.

Segundo Grippa et al. (2017), o desenvolvimento de soluções livres e de código aberto torna-se primordial em tempos onde a reprodutibilidade da pesquisa e o compartilhamento de soluções existentes é alta. Os autores julgam as cadeias de código aberto como rapidamente personalizáveis, podendo atender demandas urbanas e conjunto de dados bastante diversos. As informações de altura de construções de superobjeto detectados remotamente, de acordo com Huang et al. (2017) desempenham funções importantes na classificação do tipo de construção.

Para Luo et al. (2019) uso de dados OSM fornecem informações de alta complexidade da malha urbana e associados a características de sensores multiespectrais de alta resolução são capazes de distinguir classes com características espectrais semelhantes, tendo em vista a contextualização sobre os atributos morfológicos da paisagem urbana.

A demanda de uma estrutura tipológica hierarquizada, baseada em objetos, de acordo com Lehner e Blaschke (2019) pode ser superada quando trabalha-se em várias escalas, considerando textura, padrões geométricos e formas para definição de Unidades Semelhantes do Território.

É possível na gestão dos recursos hídricos, segundo Mattos et al. (2019), gerar modelos quali-quantitativos que identifiquem níveis de degradação das bacias hidrográficas, baseando-se nos serviços ecossistêmicos das classes de uso e cobertura da terra e dados balizados em campo.

1.4.6 Das lacunas das inovações das geotecnologias nas cidades

O mapeamento preciso do uso da terra urbana, apontam Feng et al. (2019), continua sendo uma tarefa desafiadora no campo do sensoriamento remoto. Apesar de numerosos mapas urbanos de pequena e média escalas serem produzidos para capturar as características da malha urbana, Goldblatt et al. (2016) salientam que estes possuem limitações em relação à resolução espacial e não podem ser utilizados para diagnosticar processos contínuos de urbanização, tendo em vista a dificuldade para detecção de mudanças sutis na paisagem em curtos períodos de tempo. Estes autores retratam também que o uso potencial do *Google Earth Engine* (GEE) está evoluindo constantemente, apresentando inúmeras funções e ferramentas de análise espacial, tal como ocorre com outras ferramentas de SIG, porém os seus recursos ainda são pouco explorados pelos tomadores de decisão e

gestores de áreas urbanas, assim como cadeias e/ou rotinas de processamento de código aberto para classificação de áreas urbanas, conforme destacam Grippa et al. (2017).

Embora haja muitos métodos para extração em sensoriamento remoto de dados de edifícios e áreas prediais, Huang et al. (2017) expõem que um número bastante limitado de pesquisadores trabalhou com classificadores adicionais aos resultados extraídos a nível *sub-pixels* e superobjeto.

Para Luo et al. (2019) há carência de estudos que demonstrem o potencial da utilização de análises multitemporais em áreas urbanas combinando multissensores e dados do *OpenStreetMap* (OSM), bem como na fusão de dados de organização sociais com sensoriamento remoto para análise de questões econômicas e sociais em áreas urbanizadas.

Até o momento, Lehner e Blaschke (2019) apontam que na área das geotecnologias ocorrem confusões entre terminologias, tal como: uso da terra e certas unidades semelhantes do território, sendo uso e estrutura da terra empregados como sinônimos, havendo a necessidade de aplicação de um princípio norteador mais preciso na diferenciação entre estes termos.

Matos et al. (2019) apontam que a gestão de áreas degradadas nas cidades médias brasileiras, com investimento em infraestrutura e projetos têm apelo midiático e eleitorais e são, muitas vezes, pouco eficazes ou mal geridas. O que corrobora a identificação de tipologias para as cidades médias brasileiras por meio de análise estatística multivariada, efetuada por Angeoletto et al. (2016), os quais demonstraram uma baixa efetividade de ações de gestão ambiental nesses municípios e sugerem o estabelecimento de áreas protegidas naturais como uma das formas mais efetivas de reduzir impactos ambientais causados por estas cidades.

Rumble et al. (2019), estabelecendo um contraste de urbanização entre o Reino Unido e o Brasil, reforçam a necessidade de abordar e compreender o desenho urbano sobre a ótica da ecologia urbana, da engenharia ecológica e da infraestrutura verde, a fim de assegurar a restauração em escala suficiente para reconectar a sociedade com a natureza, fornecendo serviços ecossistêmicos inerentes a melhoria da qualidade de vida destas populações.

1.5 CONCLUSÃO

As geotecnologias vêm sendo amplamente aplicadas para cumprir metas de gestão e planejamento urbano, apresentando vastas possibilidades de análise espacial, reduzindo custos e tempo para a tomada de decisões, permitindo também a validação de modelos mais precisos e acurados para alcançar determinadas demandas de áreas urbanas ou com tendências à urbanização. Apesar disto, o uso de geotecnologias aplicadas ao planejamento de cidades médias apresenta-se de maneira tímida em comparação à contribuição científica, econômica e social, que trazem quando bem aplicadas.

Destacam-se dentro da tríade 'geotecnologias', 'planejamento urbano' e 'cidades médias' trabalhos que visam cumprir tais objetivos: (1) previsão do padrão de expansão urbana e mudanças no uso da terra; (2) identificação de tipologias e formas de ocupação da malha urbana consolidada; (3) avaliação dos níveis de segurança ecológica da terra; e (4) o estado da arte do uso das geotecnologias em determinados países.

As inovações detectadas nesse campo do conhecimento abordam principalmente: (1) utilização de múltiplas fontes de dados para fusão de imagens multi e hiperespectrais com uso de redes neurais de aprendizagem em máquina; (2) otimização e validação de algoritmos classificadores de imagens; (3) incremento de cadeias de processamento semiautomatizadas com códigos livres e abertos; (4) otimização de métodos para identificação de unidades territoriais homogêneas; e (5) modelos para diagnóstico de paisagens degradadas.

As questões que tangem o planejamento e gestão de cidades com o uso de geotecnologias demonstram abordagens transdisciplinares, dispendo de métodos replicáveis em diversas escalas espaciais e que visam otimizar ou propor orientações e medidas mais assertivas de uso e ocupação dos territórios. Nesse sentido, entende-se que as geotecnologias são ferramentas capazes de aumentar a transparência e a eficiência, tanto da arrecadação quanto dos investimentos públicos, devendo ser implementado sobretudo, no âmbito das secretarias municipais, unidade de maior capacidade de controle e decisão local, fomentando assim o acesso a informação para além dos Planos Diretores Municipais.

1.6 REFERÊNCIAS

ANGEOLETTO, F.; SANTOS, J.W.M.C.; SANZ, J.P.R.; SILVA, F.F.da. & ALBERTIN, R.M. 2016. Tipologia socio-ambiental de las ciudades medias de Brasil: aportes para un desarrollo

- urbano sostenible. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, n. 2, p. 272-287, 2016. DOI: 10.1590/2175-3369.008.002.AO08
- AGUAYO M.I.; WIEGAND, T.; AZÓCAR, G.D.; WIEGAND, K.; VEGA, C.E. Revealing the Driving Forces of Mid-Cities Urban Growth Patterns Using Spatial Modeling: a Case Study of Los Angeles, Chile. **Ecology and Society**, v. 12, n. 1, p. 13, 2007.
- AMORIM FILHO, O.B. Cidades médias e organização do espaço no Brasil. **Geografia e Ensino**, v. 2, n. 1, p. , 1984.
- AZÓCAR, G.; ROMERO, H.; SANHUEZA, R.; VEGA, C.; AGUAYO, M.; MUÑOZ, M.D. Urbanization patterns and their impacts on social restructuring of urban space in Chilean mid-cities: The case of Los Angeles, Central Chile. **Land Use Policy**, v. 24, n. 1, p. 199-211, 2007. DOI: 10.1016/j.landusepol.2005.04.003.
- BARTON, J.; POZO, R.; ROMÁN, Á.; SALAZAR, A.. Reestructuración urbana de un territorio globalizado: Una caracterización del crecimiento orgánico en las ciudades de Chiloé, 1979-2008. **Revista de Geografía Norte Grande**, v. 56, p. 121-142, 2013.
- COSTA, E.M. Cidades Médias: Contributos para a sua definição. **Finisterra**, v. 37, n. 74, p. 101-128, 2002.
- DE MEDEIROS, J.M.G.; VITORIANO, M.A.V. A evolução da bibliometria e sua interdisciplinaridade na produção científica brasileira. **RDBCi: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, v. 13, n. 3, p. 491-503, 2015.
- ELSEVIER BV. **Scopus Database**. Disponível em: <https://www.scopus.com> Acesso em: 11 fev. 2019.
- FENG, Q.; ZHU, D.; YANG, J.; LI, B. Multisource Hyperspectral and LiDAR Data Fusion for Urban Land-Use Mapping based on a Modified Two-Branch Convolutional Neural Network. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, v. 8, p 28, 2019. DOI: 10.3390/ijgi8010051.
- GOLDBLATT, R.; YOU, W.; HANSON, G.; KHANDELWAL, A.K. Detecting the Boundaries of Urban Areas in India: A Dataset for Pixel-Based Image Classification in Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, 2016. DOI: 10.3390/rs8080634.
- GRIPPA, T.; LENNERT, M.; BEAUMONT, B.; VANHUYSSSE, S.; STEPHENNE, N. & WOLFF, E. An Open-Source Semi-Automated Processing Chain for Urban Object-Based Classification. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, rs9040358, 2017. DOI: 10.3390/rs9040358.
- HUANG, Y.; Zhuo, L.; HAIYAN, T.; SHI, Q. & LIU, K. A Novel Building Type Classification Scheme Based on Integrated LIDAR and High-Resolution Images. **Remote Sensing**, v. 9, n.7, p. rs9040679, 2017. DOI: 10.3390/rs9070679.
- LEHNER, A.; BLASCHKE, T. A Generic Classification Scheme for Urban Structure Types. **Remote Sensing**, v. 11, n.2, p. 173, 2019. DOI: 10.3390/rs11020173.
- LUO, N.; WAN, T.; HAO, H.; LU, Q. Fusing High-Spatial-Resolution Remotely Sensed Imagery and OpenStreetMap Data for Land Cover Classification Over Urban Areas. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 88, 2019. DOI: 10.3390/rs11010088.
- MACIAS-CHAPULA, C.A. O papel da informetria e da cienciometria e sua perspectiva nacional e internacional. **Ciência da informação**, v. 27, n. 2, p. 134-140, 1998.
- MATTOS, J.B.; SILVA, K.B.; SILVA, R.J.da.; ALMEIDA, T.T.M.; PÓVOAS, H.S.S.; DILVA, P.V.R.da.; GÓES, I.M.de. & MATOS, I.da.S. Natural factors or environmental neglect? Understanding the dilemma of a water crisis in a scenario of water plenty. **Land Use Policy**, v. 82, p. 509-517, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.12.027.

PARANHOS FILHO, A.C.; MIOTO, C.L.; MARCATO JUNIOR, J. & TORRES, T.G. **Geotecnologias em Aplicações Ambientais**. Campo Grande: Ed. UFMS, 2016.

RAHMAN, A.A.; AL-BAGHDADI, J.A.; ELAIWI, A.H.; ABED, F. Selection of a best recreational park location in a city using GIS technique. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 12, n. 8, p. 8426-8435, 2017.

RUMBLE, H.; ANGEOLETTO, F.; CONNOP, S. et al. Understanding and applying ecological principles in cities. In: LEMES DE OLIVEIRA, F.; MELL, I. (Eds.). **Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods**. Amsterdam: Springer Nature, 2019. DOI:10.1007/978-3-030-01866-5_15.

SANTOS et al. Aplicação de geotecnologias gratuitas e livres na delimitação e análise do uso e cobertura do solo na da Bacia Hidrográfica do córrego Laranja Doce. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 6, 2016, Cuiabá. **Anais...**

WU, W. et al. A dynamic approach to land ecological security assessment: A case study of Su-Xi-Chang area, China. *Shengtai Xuebao*. **Acta Ecologica Sinica**, v. 36, n. 22, p. 7453-7461, 2016. DOI: 10.5846/stxb201601040021.

YALOVOL, P. GIS and Ukraine. **GEO: connexion**, v. 13, n. 6, p. 20-23, 2014.

Data de submissão: 28/ fev./ 2019

Data de aceite: 03/ jul./ 2019

DOI: 10.5212/TerraPlural.v.14.2013339.024

02

CAPÍTULO

Espacialização do risco intrínseco à contaminação por pesticidas em corpos hídricos e determinação de pontos de monitoramento

Resumo

Há um grande número de agroquímicos extremamente tóxicos e altamente tóxicos (classes I e II) com uso autorizado no Brasil, em culturas agrícolas de alimentos habitualmente consumidos neste país, onde a não obrigatoriedade de avaliação toxicológica, para produtos formulados, demonstra a necessidade de aperfeiçoamento na atual legislação. As maiores incidências de agravos à saúde (intoxicações, cânceres, má-formação e crises respiratórias) são correlatas as regiões de maior produtividade agrícola, demonstrando que os municípios de base econômica agroindustrial estão conseqüentemente mais expostos à cenários de contaminação por agroquímicos. O objetivo deste trabalho é apresentar método alternativo para determinação de pontos de monitoramento da qualidade das águas, a partir da delimitação de áreas mais suscetíveis à contaminação por pesticidas, tanto superficial como subsuperficial, adotando como estudo de caso a região divisora das bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Alto Araguaia em Mato Grosso. Foi utilizado plano de informações ambientais hierarquizados, em Sistema de Informações Geográficas, para elaboração de cartas temáticas e sintéticas. Identificou-se o comportamento do terreno quanto ao risco intrínseco de contaminação por pesticidas, em termos de potencial de infiltração e escoamento. Esses dados permitiram a espacialização das áreas com risco de contaminação dos corpos hídricos superficiais e subsuperficiais. A combinação matricial entre classes de condutividade hidráulica das ordens de solo com classes de declividade tornou menos subjetiva à espacialização do potencial de infiltração e escoamento. Foi constatado que o aquífero poroso apresentou proporcionalmente, maior risco de contaminação por pesticidas do que o aquífero fraturado, onde o primeiro situa-se em área de recarga com maior densidade de lavouras com tamanhos relativos de médio à grande porte, com solos de alta condutividade hidráulica em áreas com baixo gradiente topográfico. O método demonstrou que as águas subsuperficiais de ambos aquíferos apresentam proporcionalmente maior tendência à contaminação devido às características intrínsecas do terreno aliado as formas de uso. Organizações ambientais poderão utilizar deste método para identificação de pontos mais favoráveis ao monitoramento da qualidade das águas nas bacias hidrográficas e nos aquíferos, reduzindo custos e aprimorando a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Geotecnologias; Agroquímicos; Cerrado.

Abstract

Há um grande número de agroquímicos extremamente tóxicos e altamente tóxicos (classes I e II) com uso autorizado no Brasil, em culturas agrícolas de alimentos habitualmente consumidos neste país, onde a não obrigatoriedade de avaliação toxicológica, para produtos formulados, demonstra a necessidade de aperfeiçoamento na atual legislação. As maiores incidências de agravos à saúde (intoxicações, cânceres, má-formação e crises respiratórias) são correlatas como regiões de maior produtividade agrícola, demonstrando que os municípios de base econômica agroindustrial estão, conseqüentemente, mais expostos aos cenários de contaminação por agroquímicos. The objective of this work is to present an

alternative method for the determination of water quality monitoring points from the delimitation of areas more susceptible to contamination by both surface and subsurface pesticides, adopting as a case study the dividing region of the upper Paraguay and upper Araguaia river basins in Mato Grosso. A hierarchical environmental information plan was used in the Geographic Information System to elaborate thematic and synthetic charts. The soil behavior was identified as the intrinsic risk of contamination by pesticides in terms of potential infiltration and runoff. These data allowed the spatialization of the areas with risk of contamination of surface and subsurface water resources. The matrix combination between classes of hydraulic conductivity of soil orders with declivity classes made it less subjective to the spatialization of infiltration and flow potential. It was found that the porous aquifer proportionally presented a higher risk of contamination by pesticides than the fractured aquifer, where the former is located in a recharge area with a higher density of crops with medium to large relative sizes, with high conductivity soils hydraulics in areas with a low topographic gradient. The method demonstrated that the subsurface waters of both aquifers present a proportionally higher tendency to contamination due to the intrinsic characteristics of the terrain allied to the forms of use. Environmental organizations may use this method to identify more favorable points for monitoring water quality in water basins and aquifers, reducing costs and optimizing the management of water resources.

Keywords: Geotechnologies; Agrochemicals; Tropical Savanna.

2.1 Introdução

Há um grande número de agroquímicos extremamente tóxicos e altamente tóxicos (classes I e II) com uso autorizado no Brasil, em culturas agrícolas de alimentos habitualmente consumidos neste país, onde a não obrigatoriedade de avaliação toxicológica, para produtos formulados, demonstra a necessidade de aperfeiçoamento na atual legislação (Hess, 2018). As maiores incidências de agravos à saúde (intoxicações, cânceres, má-formação e crises respiratórias) são correlatas as regiões de maior produtividade agrícola, demonstrando que os municípios de base econômica agroindustrial estão conseqüentemente mais expostos à cenários de contaminação por agroquímicos (Pignati *et al.*, 2018).

Viana (2014) diz que os principais métodos de detecção de ecotoxicidade, baseados nas propriedades físico-químicas dos pesticidas, são: *screening* da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), índice *GUS*, (Gustafson, 1989), índice *LIX* (Spadotto, 2002), índice *LEACH* (Laskowski *et al.*, 1982) e o critério *CDFA* adotado pelo *California Department Food and Agriculture*. Essa mesma autora mostra que os métodos mais utilizados para determinar vulnerabilidades de contaminação das águas, apoiados nas características hidrogeológicas do ambiente, são: o IS “Índice de Susceptibilidade” e o *DRASTIC* pesticidas (*Depth to the water table, net Recharge, Aquifer material, Soil type, Topography, Impact of the unsaturated zone and hydraulic Conductivity*). O *DRASTIC*

pesticidas (Aller *et al.*, 1987) considera os índices de particionamento intrínsecos relacionados às propriedades físico-químicas e a persistência no ambiente, específicos de cada pesticida, tendo como referência a consulta de banco de dados com selos validados internacionalmente.

Dores & Freire (2001) verificaram que pesticidas como atrazina, metolactor, metonil, metribuzina e simazina são os principais contaminantes das águas subterrâneas e superficiais em Primavera do Leste, Mato Grosso, situado entre os divisores das bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Alto Araguaia. Soares *et al.* (2017), mostraram que grande quantidade de agrotóxicos de classe altamente toxicológicas e com risco de contaminação ambiental estão sendo aplicados na região de Campo Novo do Parecis (MT). Malheiros *et al.* (2012) ao avaliarem a variabilidade espacial e temporal das características bióticas e abióticas da água de uma represa localizada em área agrícola, no município de Campo Verde (MT), observaram forte correlação entre as variáveis físico-químicas com a presença de bactérias heterotróficas, evidenciando a influência da atividade agrícola na qualidade da água em conjunto da falta de mata ciliar e assoreamento do ecossistema aquático. Já Possavatz *et al.* (2014), avaliando a contaminação por pesticidas usados nas culturas plantadas ao longo da área de drenagem do Rio Cuiabá e São Lourenço no Estado de Mato Grosso, detectou nos sedimentos baixa frequência de resíduos de pesticidas, sendo os principais: clorpirifós, endossulfam (α e sulfato), λ -cialotrina, malationa, metolacloro e permetrina, em concentrações variando de 5,7 a 79,3 $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Pignati *et al.* (2017) propuseram uma estratégia para identificar regiões prioritárias para ações de prevenção, relacionadas a problemas de saúde e danos ambientais, utilizando a distribuição espacial da área plantada de culturas agrícolas e estimativas de uso de agrotóxicos os associando aos indicadores de intoxicação aguda, subaguda e crônica por essas substâncias em municípios brasileiros. Corralo *et al.* (2016), detectaram evidências de contaminação por pesticidas organoclorados no leite materno, sendo o de maior prevalência o diclorodifeniltricloroetano (DDT) e seus derivados, sendo os principais efeitos deletérios à saúde humana, alterações no desenvolvimento, disfunções no sistema nervoso, reprodutor e endócrino.

A contaminação do ambiente por pesticidas está relacionada à aplicação no campo, onde diversos produtos, com alto poder de toxicidade são registrados para uso em algumas culturas e, devido à alta eficácia deles, os mesmos são aplicados em outras culturas para as quais não são recomendados (Dellamatrice & Monteiro, 2014). Outro aspecto que os autores ressaltam é a superdosagem, onde o produtor buscando maior eficiência aplica doses maiores que as

recomendadas pelo fabricante, as quais são determinadas em estudos ecotoxicológicos sobre o comportamento dos princípios ativos tanto no ambiente quanto em organismos.

Isso demonstra que a geoinformação é uma das estratégias mais importantes, sendo uma ferramenta de gestão, com vistas à interpretação concreta das feições e graus de risco, na proteção dos corpos hídricos, principalmente porque essas informações não se encontram regularmente distribuídas no domínio espacial (Lisbôa *et al.*, 2016).

Visando contribuir para a delimitação das áreas mais predispostas à contaminação por pesticidas, analisando separadamente os riscos das águas superficiais e subsuperficiais, este trabalho propõe método alternativo para quali-quantificação dos riscos por unidade aquífera, podendo ser replicada em qualquer domínio hidrogeológico. Para isso utilizou-se de Planos de Informações hierarquizados (PI's), baseados na interpretação de imagens de satélite gratuitas de média-alta resolução espacial, modelos digitais de superfície, cartografia de dados vetoriais, sobreposição matricial entre arquivos *rasters* com a ferramenta *Combine* do *3D Analyst* (ESRI, 2013) e estimador de densidade *Kernel* (Rosenblatt, 1956; Parzen, 1962; ESRI, 2013), em ambiente SIG na modelagem destes riscos.

2.2 Materiais e Métodos

2.2.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) localiza-se no divisor das bacias hidrográficas do Alto Paraguai e do Alto Araguaia-Tocantins, ajustada às coordenadas geográficas pelo *Datum* SIRGAS 2000, 55°21'00'' e 51°33'00'' W, 15°39'30'' e 15°50'30'' S.

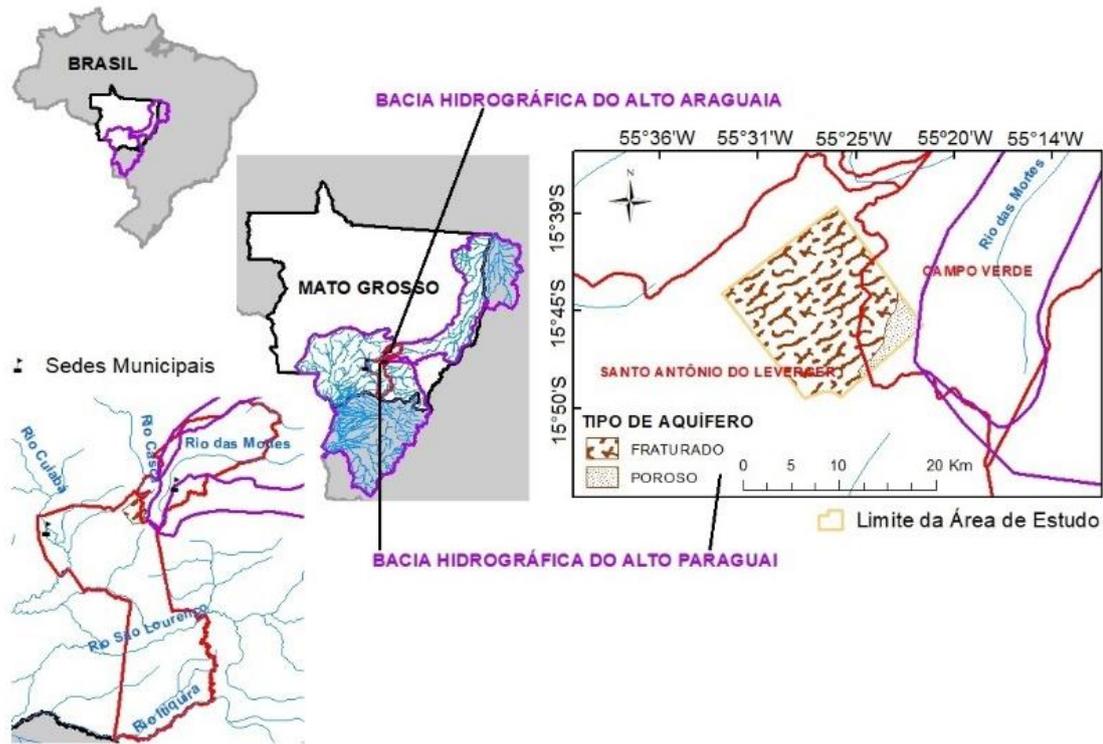


Figura 1 Localização da área de estudo, situada no divisor de bacias hidrográficas do Alto Paraguai e Alto Araguaia.

É constituída principalmente pela sub-bacia hidrográfica do rio Cuiabá, cujos cursos d'água são tributários da bacia hidrográfica do Pantanal. Está inserida em duas unidades aquíferas, sendo a de maior extensão do tipo fraturado/fissural (92,41% ou 201,13Km² desta área), afetadas por falhas extensionais, fraturas e zonas de cisalhamento e outra do tipo poroso/granular (7,59% ou 16,52Km² desta área) com estruturas predominantemente sedimentares, nas quais a permeabilidade está relacionada principalmente a porosidade entre os grãos (porosidade primária).

Esta área inclui-se em parte em uma unidade de conservação denominada, Área de Proteção Ambiental (APA) Estadual da Chapada dos Guimarães, instituída pela Lei 7.804/02 (MATO GROSSO, 2002), com 2.176,79Km² de extensão, a qual abrange os municípios de Cuiabá, Chapada dos Guimarães, Campo Verde e Santo Antônio de Leverger.

Os cursos hídricos cartografados neste estudo representam fluxos perenes e intermitentes afluentes do rio Aricá-Mirim, sendo os principais córregos: Aricá e Bigorna, que nascem nas proximidades do assentamento Santo Antônio da Fartura, próximos a BR-070, e o córrego Cinco Lanças que nasce dentro dos limites da APA Chapada dos Guimarães. A média do total da precipitação pluviométrica no período úmido (Outubro a Abril), nesta região, segundo Marcuzzo *et al.* (2011), está entre 1650-1800mm, com clima do tipo Aw na escala Köppen, conforme Álvares *et al.* (2014).

Geomorfologicamente, a área de estudo assenta-se na transição de compartimentos morfoestruturais, posicionando-se entre a Borda Setentrional (NW) da Bacia do Paraná e o setor central do Cinturão Orogênico do Paraguai-Araguaia (Ross, 1992). O substrato geológico é constituído por rochas metamórficas do Grupo Cuiabá, (Almeida, 1964), rochas ígneas da suíte intrusiva São Vicente (Almeida & Mantovani, 1975), rochas sedimentares silicilásticas das formações Rio Ivaí (Assine *et al.*, 1994) e Cachoeirinha (Gonçalves & Schneider, 1970).

2.2.2 Espacialização das Variáveis Ambientais

Neste trabalho foram elaborados Planos de Informações (PI's) hierarquizados, compostos por etapas sistematizadas na seguinte ordem: PI de Delimitação da Área de Estudo, PI de Classificação de Solos, PI de Altimetria, PI de Usos do Solo. Todas essas fases do método foram executadas com uso do *software ArcGIS* versão 10.2.1 (ESRI, 2013).

No PI de Delimitação da Área de Estudo foi selecionado, através de revisões em bibliografia específica, região onde reconhecidamente há atividades agrícolas sazonais com aplicações indiscriminadas de pesticidas, bem como áreas de conflito de uso, com vetor de pressão agrícola sobre APA. Esta área possui naturalmente elevado potencial de recarga de mananciais, sendo de suma importância a preservação da qualidade de seus recursos hídricos.

O PI de Classificação de Solos é oriundo da compilação do banco de dados geográficos disponibilizados pela Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação (SEPLAN, 2011), em levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Estado de Mato Grosso. Posteriormente adequou-se a nomenclatura das unidades pedológicas e suas associações em conformidade com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2013). A partir desta etapa, criou-se o PI de Condutividade Hidráulica, em que se obteve parâmetros qualitativos de condutividade hidráulica vertical (kV, em m/s) das ordens de solos conforme determinações de Almeida *et al.* (2006).

O PI de Altimetria foi obtido através da imagem de radar *ALOS PALSAR* modo *FDB* de resolução espacial de 12,5m (ASF, 2010a, 2010b, 2010c), por meio da qual foi efetuada a extração das curvas de nível equidistantes de um metro, do modelo digital do terreno, fatiado preliminarmente em *pixels* de cinco metros de resolução espacial, visando atender a álgebra de mapas, onde se interpolou a nuvem de pontos de cotas altimétricas pelo método de isoetas *topo to raster*. De posse do modelo digital de elevação corrigido obteve-se os intervalos de declividade em porcentagem, gerando o PI de Declividade conforme empregado por Barbalho

& Campos (2010).

Na obtenção das classes qualitativas de escoamento e infiltração (proposta neste estudo), geraram-se os PI de Escoamento e de Infiltração, operacionalizado a partir da combinação matricial (4x4), entre as classes de condutividade hidráulica (Almeida *et al.*, 2006) com os intervalos de declividade (Barbalho & Campos, 2010), com *pixels* reclassificados com valores de 1 a 4, indicando o grau de cada uma das classes. Utilizou-se a ferramenta *Combine*, a qual considera a informação local de cada *pixel* das imagens temáticas reclassificadas, gerando um arquivo *raster* final que aglutina os valores atribuídos a cada tema. Conforme Tabela 1, a associação numérica desta combinação foi correlacionada com as classes qualitativas (alta, média ou baixa) de escoamento e infiltração, as quais são inversamente proporcionais.

Classes de Condutividade Hidráulica (Valores em kV - Ordem de Grandeza em m/s)	Declividade na superfície do terreno (%)				Escoamento (m/s)	Infiltração (m/s)
	(1) Baixa < 6	(2) Suave 6-12	(3) Moderada 12-18	(4) Alta >18		
(1) Baixa - 10^{-7} a 10^{-8}	1,1	1,2	1,3	1,4	2,1;3,1;3,2;4,1;4,2;4,3	1,2;1,3;1,4;2,3;2,4;3,4
(2) Moderada - 10^{-6}	2,1	2,2	2,3	2,4	1,1;2,2	1,1;2,2
(3) Alta - 10^{-3} a 10^{-5}	3,1	3,2	3,3	3,4	3,3;4,4;	3,3;4,4;
(4) Muito Alta - $> 10^{-3}$	4,1	4,2	4,3	4,4	1,2;1,3;1,4;2,3;2,4;3,4	2,1;3,1;3,2;4,1;4,2;4,3
Qualitativo representativo da combinação matricial (4x4) entre condutividade hidráulica das ordens de solo e declividade na superfície do terreno					Alto(a)	R(102); G(72); B(48);
					Médio(a)	R(166); G(145); B(101);
					Baixo(a)	R(240); G(236); B(170);

Tabela 1 Combinação matricial entre classes de declividade (%) na superfície do terreno com classes de condutividade hidráulica (m/s) para obtenção de classes de escoamento e infiltração.

O PI de Uso dos Solos foi subdividido entre PI Antrópico e PI Natural. O PI Antrópico é constituído pelo PI Densidade de Lavouras e Estabelecimentos (peso 4) e PI Tamanho Relativo das Lavouras e Estabelecimentos (peso 3). Para a quantificação da densidade de lavouras e estabelecimentos, utilizou-se imagem de alta resolução espacial (1,6m) do *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2016), com espectro temporal de imagens de 01 de junho de 2014 a 21 de julho de 2017, na seleção destes alvos. Estes polígonos foram convertidos em formato vetorial *shapefile* (.shp), reprojatados em sistema métrico SIRGAS 2000, onde foram calculadas as áreas em hectares (ha), obtendo assim os tamanhos relativos entre cada lavoura e estabelecimento.

O histórico de ocupação desta área, previamente descrito por Berredo (2016), revela que 266 propriedades com área média de aproximadamente 22ha foram oficialmente registradas

pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) no ano de 1999. Donini *et al.* (2009) mostrou que o tamanho destas propriedades varia entre 1,5 a 50ha, e que a maioria dos moradores já haviam vendido parte ou toda parcela da propriedade para vizinhos e terceiros. Considerando esta variação, foi proposto dividir a área de 50ha por 3 classes de tamanho relativo, resultando em aproximadamente 16ha. Na sequência subtraiu-se esse valor em relação à área média das propriedades após implantação do assentamento (22,0ha), resultando em 6,0ha. Analogamente somou-se 16ha ao valor médio da área inicial das propriedades resultando em 38ha. Com base neste cálculo foram constituídos tamanhos relativos entre as lavouras e estabelecimentos, sendo os pequenos, aqueles menores do que 6,0ha, os médios com tamanhos entre 6,0 a 38ha e os grandes, aqueles acima de 38ha.

Na espacialização das densidades foi empregado o estimador geoestatístico *Kernel*, comumente utilizado em análises exploratórias de variáveis aleatórias e finitas, dado um polígono envolvente, gerando uma superfície cujo valor é proporcional à intensidade de eventos por unidade de área, fazendo assim inferências sobre a população (Rosenblatt, 1956; Parzen 1962).

No PI Natural foi composto por PI de Densidade de Drenagens (peso 2) e PI Densidade de Nascentes (peso 1). Na espacialização destas informações foram obtidos arquivos vetoriais de drenagens perenes e intermitentes, bem como a localização das nascentes pelo site oficial do Cadastro Ambiental Rural (MMA, 2014). A classificação dos intervalos relativos às densidades foi estipulada pelo método de quebras naturais, baseada no algoritmo *Jenks Natural Breaks*, o qual maximiza as diferenças entre as classes que apresentam diferenças relativamente grandes nos valores dos dados (ESRI, 2013).

O PI de Risco foi gerado a partir da sobreposição algébrica ponderada dos PI Antrópicos e Naturais, sendo atribuídos pesos relativos para cada um dos temas analisados. Este risco revela o grau de ameaça à exposição e potencial de contaminação dos corpos hídricos. Para avaliação do risco destes recursos em superfície e em subsuperfície foi necessário correlacionar por média simples o PI de Risco aos PI's Infiltração e Escoamento.

A justaposição entre o PI de Risco com o PI de Escoamento informa como resultado o PI de Risco dos Corpos Hídricos Superficiais, enquanto que a sobreposição entre o PI de Risco com o PI de Infiltração apresenta como produto o PI de Risco a Contaminação dos Corpos Hídricos Subterrâneos. O fluxograma da Figura 2 representa sinteticamente a metodologia aplicada neste estudo.

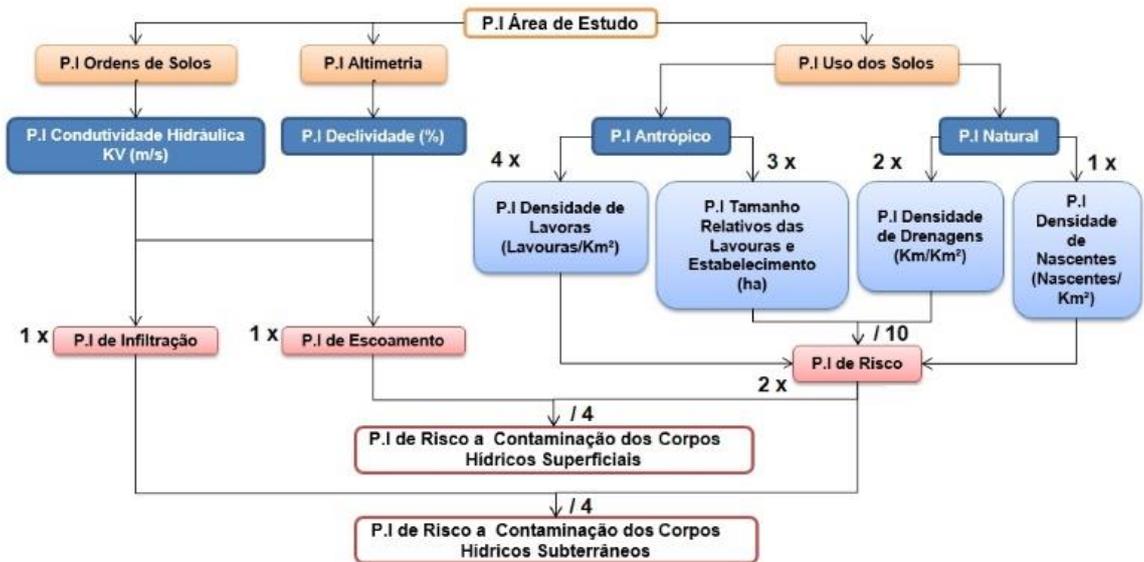


Figura 2 Fluxograma sintético da metodologia para obtenção dos Planos de Informação de riscos a contaminação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os seis principais pesticidas utilizados nesta área de estudo foram hierarquizados em porcentagens relativas de acordo com entrevista realizada por Berredo (2016), a fim de complementar as informações obtidas pelos cartogramas sintéticos obtidos neste diagnóstico. Numa segunda etapa, após determinação do Plano de Informação do Risco Intrínseco à Contaminação por Pesticidas, já delimitado e classificado, foi operado o quarteamento da área de estudo buscando-se aquelas áreas com maior proporção de riscos intrínsecos mais elevados, até se chegar numa escala que se julgue viável a implantação de pontos de monitoramento (Figura 3), para eventual investigação da qualidade da água superficial e subterrânea, no que diz respeito aos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos atualmente vigentes.

Ressalta-se que a execução do monitoramento está prevista na Lei Federal 6.938/81 (BRASIL, 1981), o qual estabelece um dos princípios da política Nacional do Meio Ambiente, em seu artigo 2º e inciso VII, o acompanhamento do estado da qualidade ambiental, assim como está fixado pela Lei Estadual 6.945/97 (MATO GROSSO, 1997) em seu artigo 7º, inciso V, a execução de programas de gestão de águas subterrâneas, compreendendo a pesquisa, o planejamento e o monitoramento.



Figura 3 Fluxograma para delimitação de áreas prioritárias para instalação de pontos de monitoramento da qualidade das águas, superficial e subterrânea, baseado-se nos maiores percentuais de risco intrínseco à contaminação por pesticidas das áreas progressivamente quarteadas.

2.3 Resultados e Discussão

Os Latossolos Vermelhos Distróficos argissólicos e (1,73% ou 3,77 Km²) Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos argissólicos (31,91% ou 69,45 Km²) com condutividade hidráulica alta, encontram-se no setor leste da carta (Figura 4A), nas áreas mais planas, entre as cotas altimétricas 700-850m, no compartimento planáltico de formas tabulares, predominantemente.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos latossólicos (24,57% ou 53,49 Km²), inseridos em maior parte na região sul e centro-leste da carta, possuem condutividade hidráulica moderada, posicionadas no intervalo altimétrico de 400 a 850m, em relevo com formas colinosas e com maiores índices de dissecação.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos petroplínticos (31,36% ou 68,25 Km²) e Neossolos Litólicos Húmicos espodossólicos (10,45% ou 22,69 Km²) correspondem a solos de baixa condutividade hidráulica, sendo que ambos ocorrem nas áreas alagáveis com elevada densidade de nascentes. Estes solos estão comumente encharcados, condicionados por drenagem interna de baixa velocidade.

As classes de declividade em porcentagem na superfície do terreno indicaram a predominância de declividades baixas, menores que 6% (Figura 4B), as quais perfazem cerca de 108,15 Km² (49,69%), seguidas pela classe de declividade suave (6,0-12,0%) que cobrem o equivalente à 65,17Km² (29,94%) desta mesma área.

Declividades moderadas (12-18%) e altas (>18%) estão preferencialmente nas bordas dos talwegues das linhas de drenagem perenes e intermitentes, bem como nas bordas das escarpas das colinas e formações tabulares, orientadas no sentido N45W à N55W, na divisa das

morfoesculturas de planalto com a depressão cuiabana e ao longo das zonas de contato litoestratigráfico.

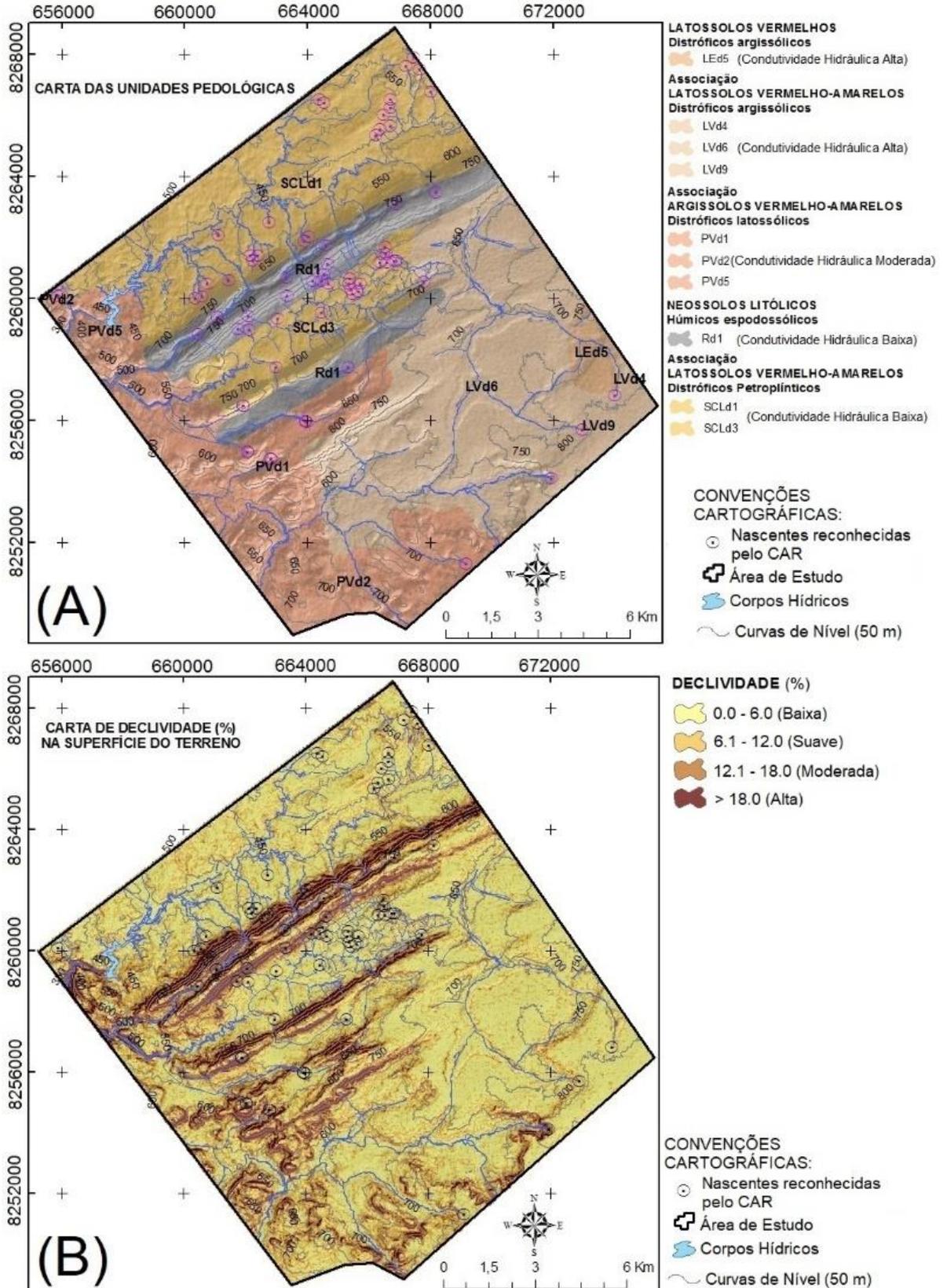
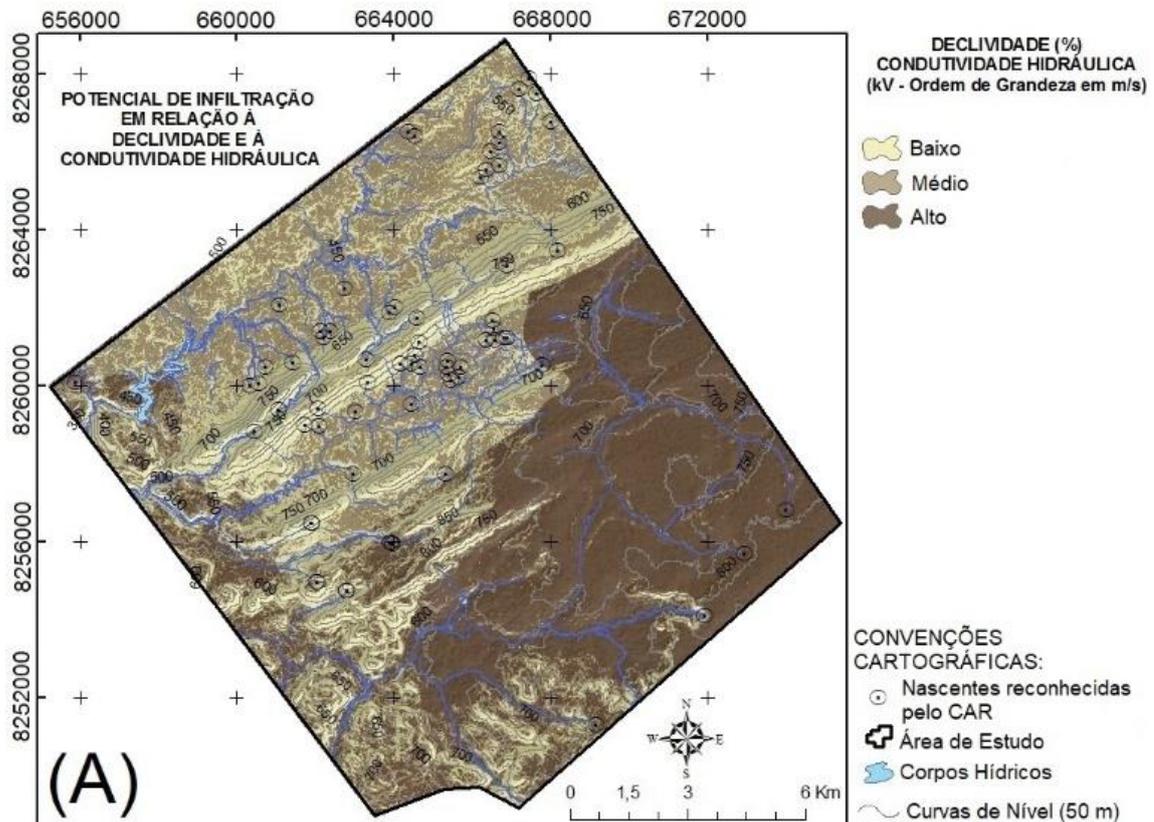


Figura 4 A. Carta das unidades pedológicas da área de estudo com o plano de informação qualitativo da condutividade hidráulica das ordens de solo (kV, em m/s); (B) Carta de declividade (%) da área de estudo gerada a partir do plano de informação de altimetria extraído de imagem de radar *ALOS PALSAR* modo *FBD*, com resolução espacial de 12,5 metros.

Os potenciais de escoamento e infiltração por serem inversamente proporcionais, possuem porcentagens de área coberta semelhantes, sendo que a classe de infiltração baixa e escoamento alto corresponderam a cerca de 66,94 Km² (30,76%), as médias classes de infiltração e escoamento assumiram o equivalente a 66,61 Km² (30,60%) e a classe de infiltração alta e escoamento baixo assumiram 84,10 Km² (38,64%) de cobertura desta área, prevalecendo leve discrepância de cerca de 8% superior em relação as demais classes (Figuras 5A e 5B).



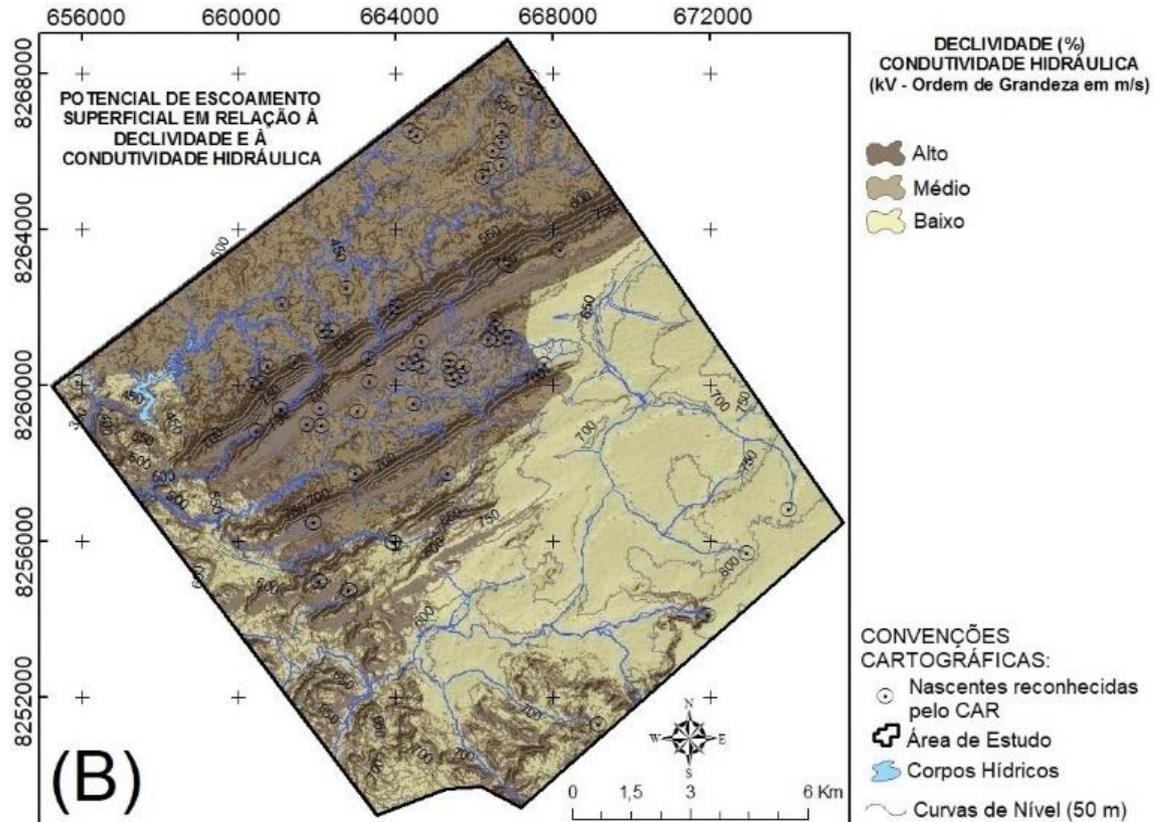


Figura 5 A. Cartas do potencial qualitativo de infiltração; e B. de escoamento, em relação à declividade (%) e a condutividade hidráulica (kV, em m/s) da área de estudo, respectivamente.

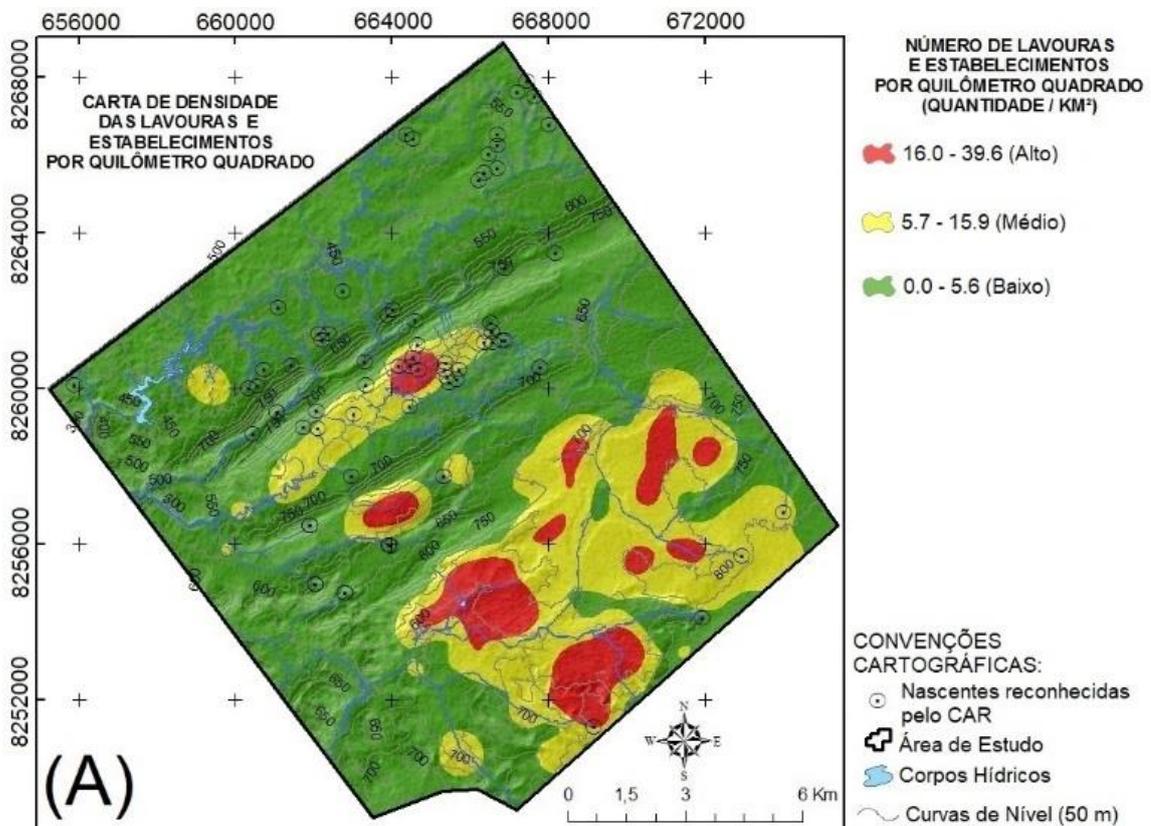
O realce dessa última classe deve-se principalmente ao fator declividade, o qual assumiu valores baixos principalmente nas regiões de ocorrência dos Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, ambos com alta condutividade hidráulica, o que permite acentuado grau de infiltração e permite maior influência na chegada de contaminantes nos corpos hídricos subsuperficiais.

No Plano de Informação de Uso Antrópico, a variável ambiental Densidade de Lavouras e Estabelecimentos demonstrou que há predominância de baixa densidade (0,0-6,6 quantidade/Km²), abrangendo 71,86% ou o equivalente a 156,417 Km², do total da área estudada, estando situadas preferencialmente ao norte, oeste e sul. As classes de média densidade de lavouras e equipamentos (6,7-15,9 quantidade/Km²) corresponderam a 21,58 Km² (46,98%), enquanto que a classes de alta densidade (16,0-39,65 quantidade/Km²) representam cerca de 14,26 Km² (6,55%) desta área, onde ambas classes encontram-se sobretudo nos setores central e leste desta região, tal como demonstra a Figura 6A.

Em relação ao tamanho relativo das lavouras e estabelecimentos rurais (Figura 6B) calculada em hectares identificou-se que cerca de 6,73 Km² (3,094%) nesta área são imóveis rurais de pequeno porte (<6,0 ha), enquanto que 4,66 Km² (2,14%) são estabelecimentos de

médio porte (6,0-38,0 ha) e outros 5,59Km² (2,57%) equivalem a grandes propriedades (>38,0 ha). O restante da área, o proporcional à 92,19% (200,66 Km²) apresentam outras finalidades de uso não associadas a lavouras e, portanto, não assumem aplicações diretas e/ou periódicas de pesticidas, sendo, portanto, ponderadas com o mesmo peso dos imóveis rurais de pequeno porte.

As maiores lavouras e estabelecimentos rurais estão no setor leste e central da área de estudo, enquanto que as menores ocorrem concentradas na região sudeste e centro-norte da mesma.



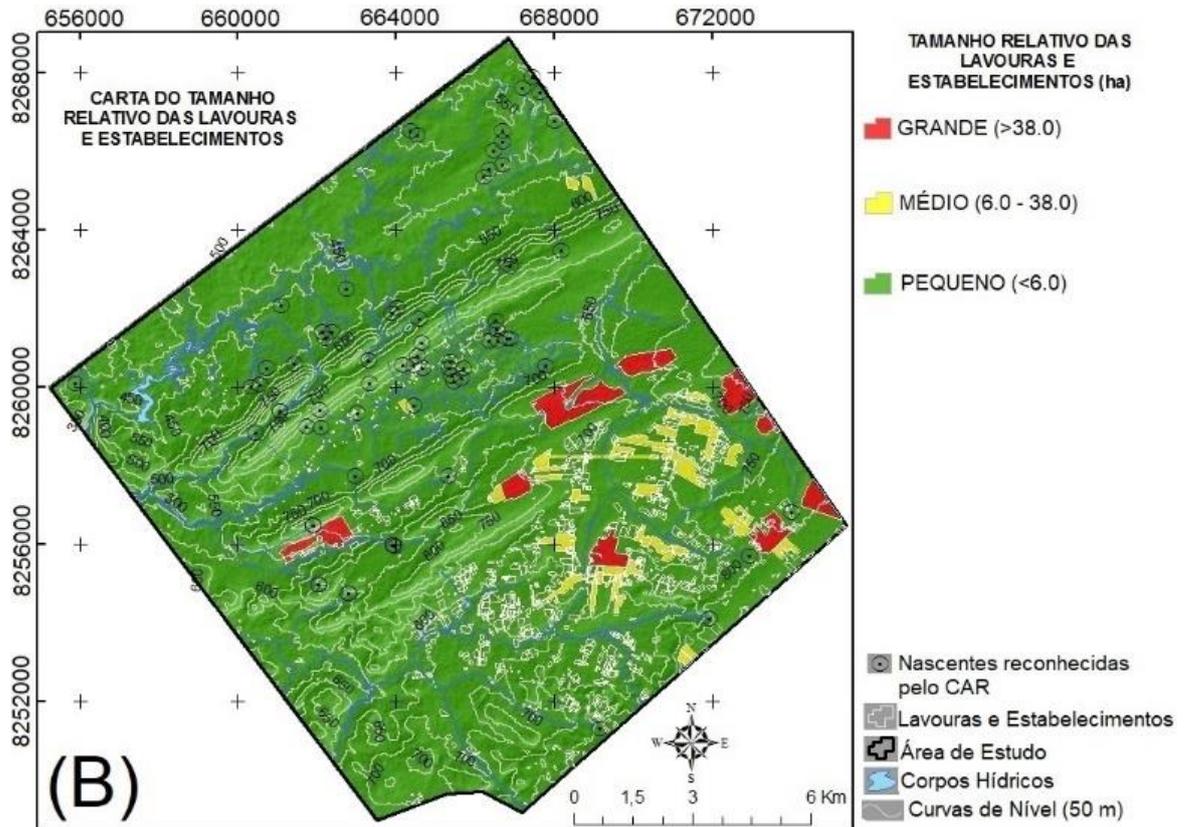


Figura 6 A. Carta de densidade das lavouras e estabelecimentos por quilômetro quadrado (quantidade/Km²); e B. Carta do tamanho relativo das lavouras e estabelecimentos em hectares, ambos componentes do plano de informação de uso antrópico do terreno.

Esse último fato deve-se a aptidão agrícola deste setor, com atributos físicos e químicos de solo favoráveis a implantação de cultivos de várias espécies de plantas.

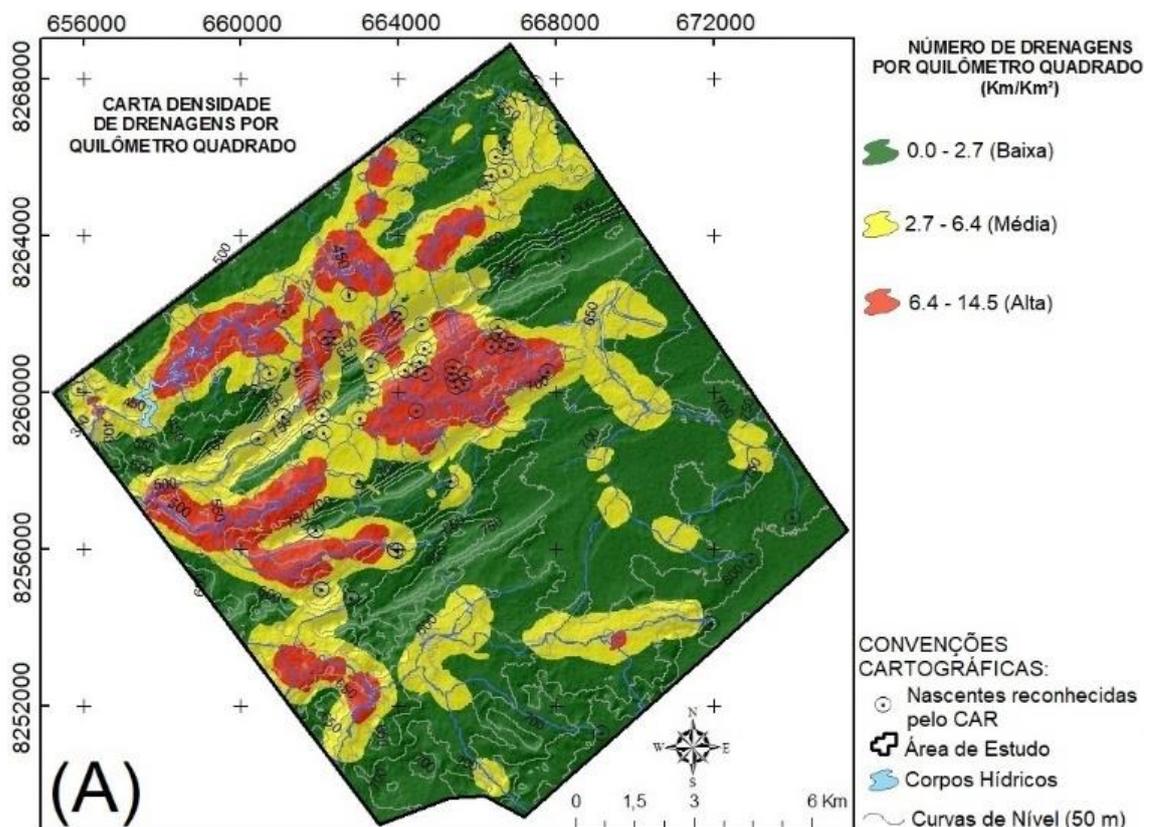
Ao especializar a densidade de drenagens perenes e intermitentes, foi observado que as baixas densidades (0,000-2,743 Km/Km²) estão situadas, sobretudo na região planáltica, onde ocorrem os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelos de alta condutividade hidráulica e rochas silicilásticas associadas a depósitos lateríticos, onde predominam as maiores densidades de lavouras e estabelecimentos rurais. As médias (2,743-6,457 Km/Km²) e altas (6,457-14,571 Km/Km²) densidades de drenagens estão concentradas nas regiões norte, noroeste, sul e sudoeste da área de estudo, onde ocorrem Latossolos Vermelho-Amarelos com horizonte petroplântico e Neossolos Litólicos, ambos com baixa condutividade hidráulica e Argissolos com moderada condutividade hidráulica.

As altas densidades de drenagens perenes e intermitentes (Figura 7A) concentram-se ao longo da zona de ocorrência de rochas metamórficas do Grupo Cuiabá e secundariamente na unidade geológica da suíte intrusiva São Vicente, as quais caracterizam o aquífero fraturado/fissural com comportamento livre, heterogêneo e anisotrópico, sendo sua permeabilidade variável, com condições de circulação das águas subterrâneas muito

complexas. A elevada densidade de drenagens desse setor está condicionada por falhas extensionais com direções azimutais preponderantes a $N45W$ e $N55E$.

Assim como a densidade de drenagens, a variável ambiental densidade de nascentes (Figura 7B) ocupou preferencialmente as regiões com substrato metamórfico e ígneo, apresentando alta (1,416-2,898 nascentes/Km²) e média (0,514-1,415 nascentes/Km²) concentrações de nascentes ao longo de falhas e fraturas, bem como na zona de contato entre as sequências litoestratigráficas. As altas densidades de nascentes perfazem o equivalente a 14,43 Km² (6,631%) da área, em contrapartida as médias densidades de nascentes cobrem cerca de 35,09 Km² (16.12%) do terreno, setores com solos de baixa a moderada condutividade hidráulica.

As baixas densidades de nascentes (0,000-0,513 nascentes/Km²) situam-se em maior parte nas regiões leste e sul, nas áreas onde ocorrem Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelos as quais apresentam maiores densidade de lavouras e estabelecimentos rurais. Esta região contempla em parte aquífero poroso/granular, onde afloram rochas siliciclásticas das formações Rio Ivaí (base) e Cachoeirinha (topo), com formas tabulares de baixo gradiente de declividade, favorecendo a infiltração em detrimento ao escoamento superficial e funcionando como área de recarga de aquífero, devido suas características geológicas e geomorfológicas.



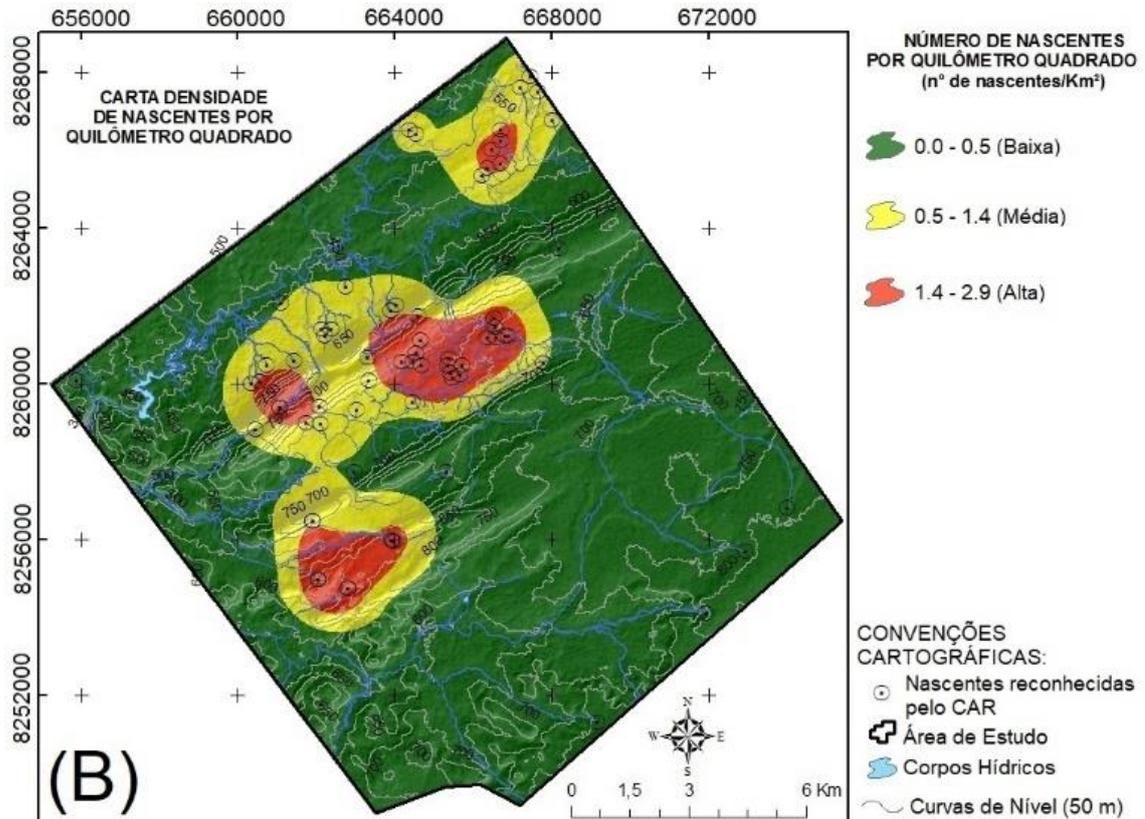


Figura 7 A. Carta de densidade de drenagens por quilômetro quadrado (Km/Km^2); e B. Carta de densidade de nascentes por quilômetro quadrado ($\text{nascentes}/\text{Km}^2$), ambos componente do plano de informação de cobertura natural do terreno.

O risco intrínseco à contaminação das águas por pesticidas (Figura 8) revelou a inexistência de risco alto nesta região. Contudo, áreas onde houve apontamento de risco médio de contaminação correspondem a um total de 31,91% (69,45 Km^2), situadas predominantemente onde ocorrem as maiores densidades de lavouras e estabelecimentos rurais, maior concentração de lavouras e estabelecimentos rurais de médio e grande porte, incidências médias e baixas de rede de drenagens perenes e intermitentes e áreas desde baixa a altas densidades de nascentes.

O baixo risco intrínseco à contaminação por pesticidas correspondeu ao total de 68,09% (148,20 Km^2) configurando áreas que apresentaram baixa densidade de lavouras e estabelecimentos rurais, com usos não relacionados às atividades de cultivo agrícola ou com predomínio de pequenas propriedades rurais, áreas com incidência alta a média de rede de drenagens perenes e intermitentes e áreas com densidades de nascentes desde baixa à alta.

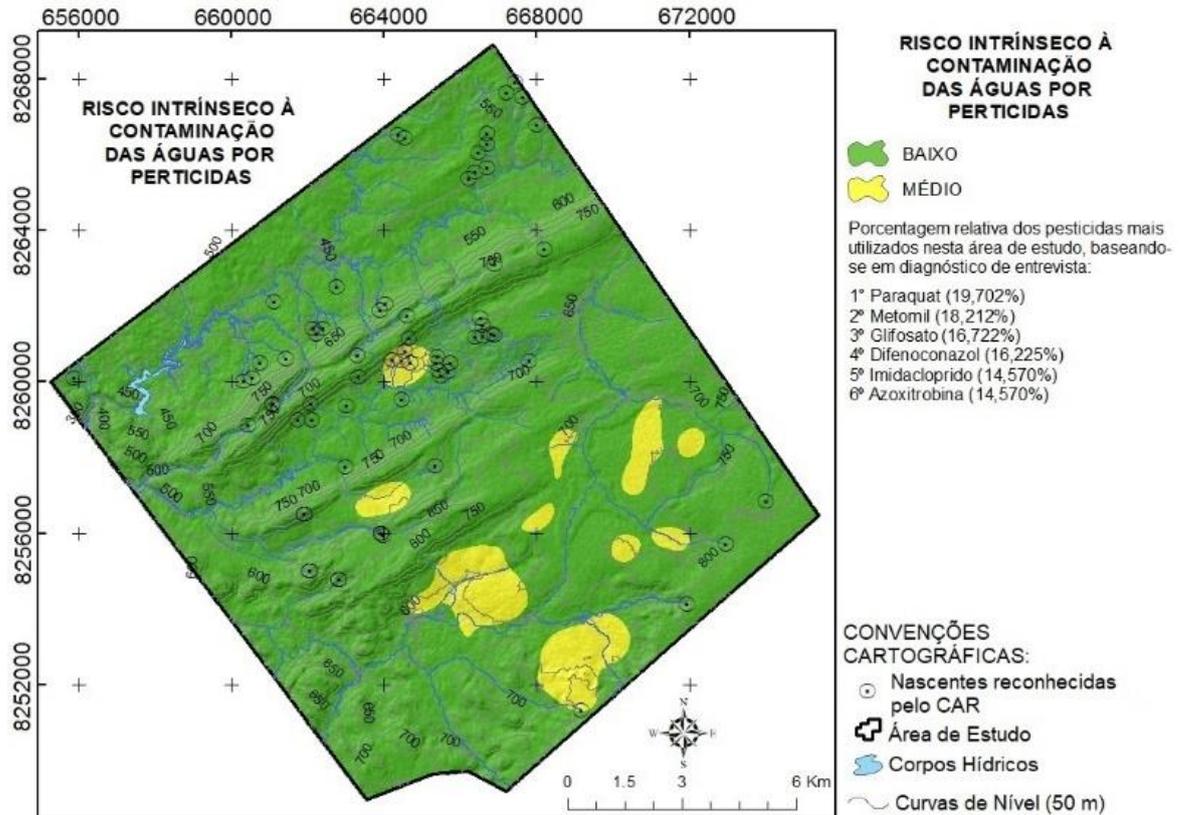


Figura 8 Carta de risco intrínseco à contaminação das águas por pesticidas.

A carta de Risco à Contaminação das Águas Subsuperficiais (Figura 9A) indicou que as regiões mais predispostas apresentaram risco médio, cobrindo o equivalente a 13,05 Km² (6,00%), sendo que o restante desta área (204,60 Km² ou 94,00%) apresentou baixo risco, onde áreas de alto risco para essa componente ambiental sintética não foram localizadas.

A carta de Risco à Contaminação das Águas Superficiais por Pesticidas (Figura 9B) demonstrou que cerca de 3,52 Km² (1,62%) apresenta médio risco, nestas áreas ocorrem alta densidade de nascentes, solos rasos ou com horizontes petroplínticos que condicionam baixa condutividade hidráulica, declividades oscilando desde baixa à alta e alta à média densidades de lavouras e estabelecimentos rurais com tamanhos relativos predominantemente de pequeno porte. O restante da área apresenta baixo risco (214,14 Km² ou 98,38%), não sendo identificadas áreas com alto potencial de contaminação.

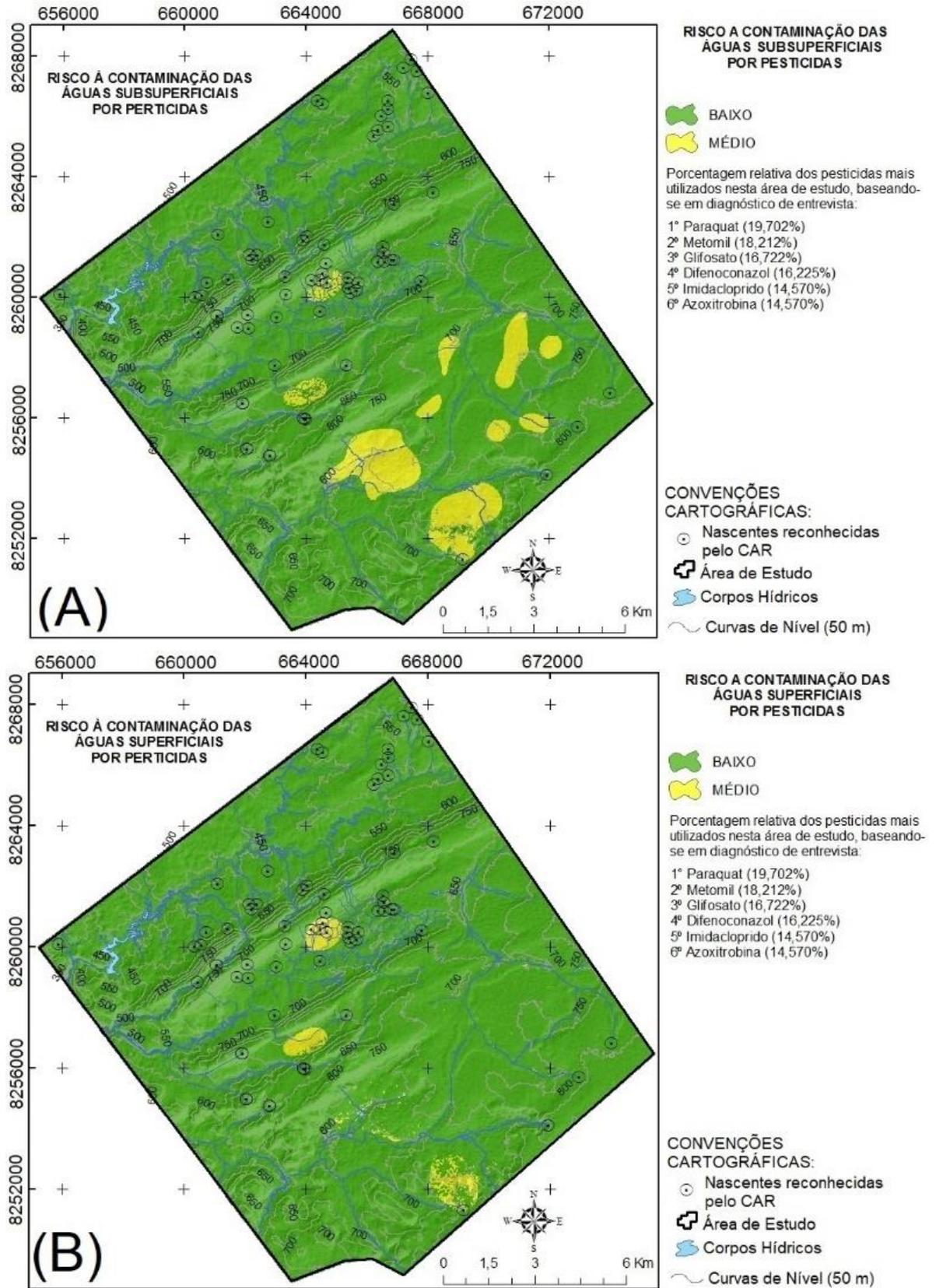


Figura 9 Carta do risco a contaminação das águas subsuperficiais (A) e subsuperficiais (B) por pesticidas.

Os setores que denunciaram médio risco à contaminação das águas subsuperficiais estão associados a áreas com elevada densidade de lavouras e estabelecimentos rurais, onde ocorrem Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos, com elevado potencial de condutividade hidráulica, associados a terreno com baixo gradiente de declividade na superfície, bem como áreas com predomínio de densidades de rede de drenagens predominantemente baixas, podendo ocorrer densidades médias e altas secundariamente, além de áreas onde prevalecem densidades baixas de nascentes.

Neste contexto, a Figura 10 demonstra sinteticamente como cada aquífero (fraturado e poroso) responde às classes de risco a contaminação por pesticidas, levando-se em consideração as variáveis ambientais ponderadas neste estudo.

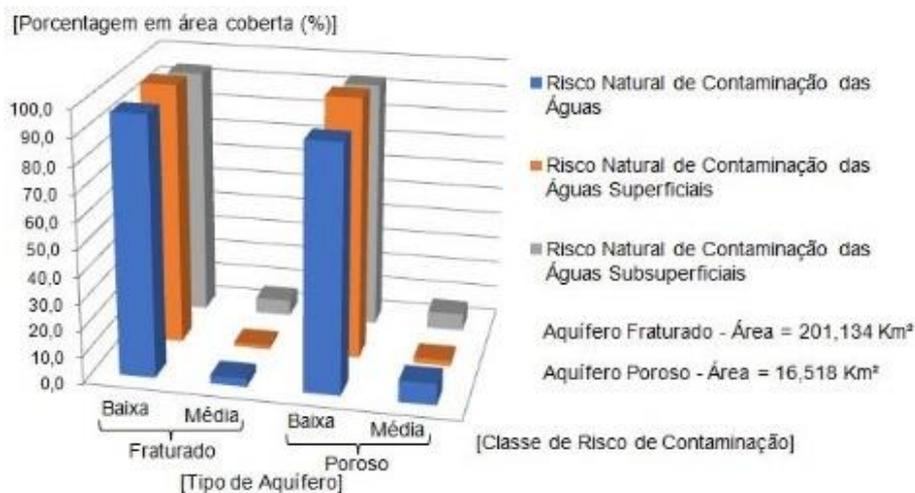


Figura 10 Qualificação do risco natural de contaminação dos corpos hídricos superficiais e subsuperficiais segmentados por tipo de unidade aquífera e quantificação da porcentagem em área coberta das classes de risco identificadas.

Nesta região foi observado que a unidade aquífera porosa em relação ao aquífero fraturado está proporcionalmente mais susceptível a contaminação por pesticidas, quando se leva em consideração os três cenários (risco natural, risco superficial e risco subsuperficial). Este fato mostra que as áreas onde há maior densidade de lavouras e estabelecimentos rurais são correlatas àquelas áreas com solos de elevado potencial de infiltração. Isto se deve à alta condutividade hidráulica do solo e baixa declividade na superfície do terreno, onde os corpos hídricos apresentam maior predisposição a alterações físico-químicas da água pela facilidade de percolação vertical dos contaminantes, associado ao escoamento superficial difuso de menor energia de propagação.

Outro fato que enfatiza maiores riscos de contaminação na região leste é a evidência da preponderância de lavouras e estabelecimentos rurais de médio à grande porte estarem assentados sobre compartimento de aquífero poroso. As aplicações sazonais de pesticidas,

neste ambiente, tendem ao aumento das concentrações de organofosforados, carbamatos, organoclorados, entre outros grupos químicos de agroquímicos, comprovadamente nocivos à saúde, necessitando de instalação de rede de monitoramento da qualidade da água para garantir maior segurança hídrica e alimentícia à população e aos animais que ingerem dessas águas, direta e indiretamente, bem como aos que se alimentam dos produtos cultivados nessas propriedades. Cabe também atenção para o monitoramento ou a instalação de poços artesianos com revestimento dos filtros e a proibição do uso de cacimbas, prevenindo e precavendo seus usuários de danos nocivos à saúde em curto, médio e longo prazos.

Após a conclusão da etapa anterior julgou-se necessário identificar, dentre as áreas com maior risco intrínseco à contaminação, àquelas nas quais há locais propícios a instalação de pontos de monitoramento da qualidade das águas, superficial e subterrânea (Figura 11). O ponto de monitoramento da qualidade da água superficial foi locado numa represa, enquanto o ponto de monitoramento da água subterrânea em propriedade rural com poço tubular regularmente cadastrado.

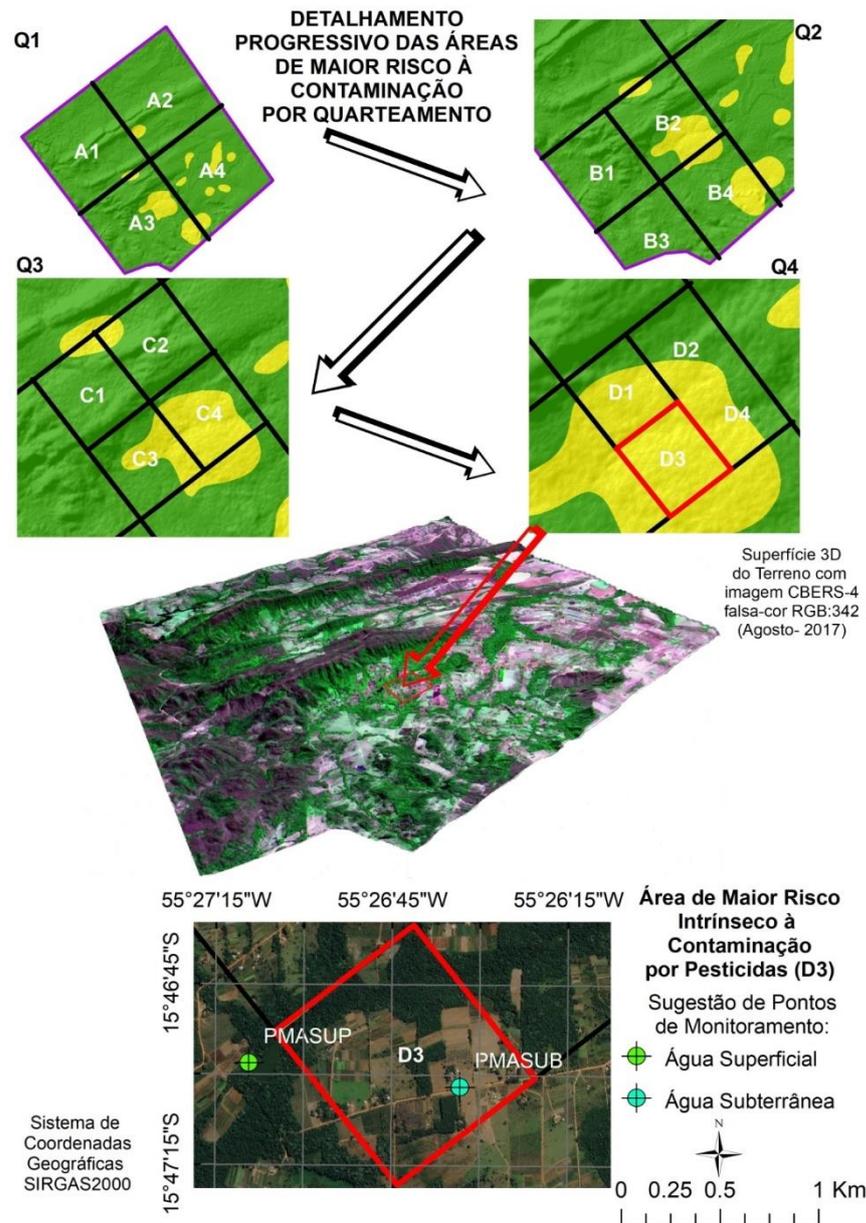


Figura 11 Quarteamento progressivo das áreas proporcionalmente com maior risco intrínseco e relativo à contaminação por pesticidas. Onde: Q = Quarteamento; A, B, C e D são as etapas de quarteamento; 1, 2, 3 e 4 são os setores; PMASUP = Ponto de monitoramento de água superficial; PMASUB = Ponto de monitoramento de água subterrânea.

2.4 Conclusão

A metodologia empregada neste estudo é satisfatória para delimitação de áreas predispostas a contaminação por pesticidas, ao considerar dentre as classes de uso antrópico àquelas que efetivamente contribuem para aplicações periódicas de pesticidas e que, portanto, possuem maior tendência a apresentarem os teores mais elevados de princípios ativos dos contaminantes nos corpos hídricos.

A espacialização de áreas com potencial de infiltração e escoamento tornou menos subjetiva com a combinação entre os intervalos das classes de condutividade hidráulica das ordens de solo com a declividade.

Ao estabelecermos no Plano de Informações do ambiente físico natural as variáveis ambientais densidade de drenagens e densidade de nascentes avaliou-se tanto o risco de contaminação das águas superficiais quanto das águas subsuperficiais dos aquíferos que ocorrem de forma livre, demonstrando que a proximidade em relação às componentes antrópicas de uso de pesticidas e o nível freático são fatores relevantes para quali-quantificar as áreas de risco.

Este diagnóstico possibilitou identificar qual dentre os aquíferos desta região apresenta proporcionalmente maior risco de contaminação por pesticidas, bem como àquelas áreas potencialmente mais afetadas, servindo como critério pré-campo para implantação de rede de monitoramento da qualidade da água e na coleta de material para análise físico-química pelas entidades e organismos ambientais atuantes.

Esta metodologia possui caráter genérico e poderá ser replicada em qualquer outra unidade espacial e hidrogeológica, que enfrenta ameaças de contaminação por pesticidas em seus corpos hídricos, tanto superficial quanto subsuperficial, relacionados às atividades agrícolas que fazem uso indiscriminado de agroquímicos comprovadamente nocivos à saúde, muito dos quais são proibidos em outros países, ou que apresentam restrições aos níveis de dosagem muito inferiores aos que são praticados em território brasileiro.

2.5 Agradecimentos

Ao CNPq pelas Bolsas de Produtividade em Pesquisa de A.C. Paranhos Filho (Processo 304122/2015-7), a bolsa de doutorado Capes/CNPq de Alesson Pires Maciel Guirra (Processo 1815261/2019-1).

2.6 Referências

- ASF - Alaska Satellite Facility. 2010a. ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) - JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. Modo FBD (Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH). Órbita 24958 Ponto 6870. Washington D.C., US Geological Survey.
- ASF - Alaska Satellite Facility. 2010b. ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) - JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. Modo FBD (Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH). Órbita 25206 Ponto 6860. Washington D. C., US Geological Survey.

- ASF - Alaska Satellite Facility. 2010c. ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) - JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. Modo FBD (Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH). Órbita 25206 Ponto 6870. Washington D. C., US Geological Survey.
- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J. & Hackett G. 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, Ada, NWWA/EPA. 58 p.
- Almeida, F.F.M. 1964. Geologia do Centro-Oeste Matogrossense. *In: Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, Rio de Janeiro, DNPM, 123p. (Boletim 215).*
- Almeida, F.M. & Mantovani, M.S.M. 1975. Geologia e Geocronologia do Granito São Vicente, Mato Grosso. *Anuário da Academia Brasileira de Ciências, 47(3): 451-458.*
- Almeida, L.; Resende, L.; Rodrigues, A.P. & Campos, J.E.G. 2006. Ensaio de Permeabilidade *in situ*. *In: ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A.P. & CAMPOS, J.E.G. (eds.). Hidrogeologia do Estado de Goiás. Secretaria de Indústria e Comércio & Superintendência de Geologia e Mineração, p.129-136.*
- Álvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.S.; Moraes, J.L. & Sparovek, G. 2014. Köppen's climate classification map of Brazil. *Meteorologische Zeitschrift, 22(6): 711-728.*
- Assine, M.L.; Soares, P.C. & Milani, E.J. 1994. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências, 24(2): 77-89.*
- Barbalho, M.G.S. & Campos, A.B. 2010. Vulnerabilidade natural dos solos e águas do estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar. *Boletim Goiano de Geografia, 30(1): 155-170.*
- Berredo, V.C.M. 2016. *Percepção de risco à saúde e ao ambiente: Um estudo de caso do uso de agrotóxicos por horticultores familiares de um assentamento do Município de Campo Verde – MT, Brasil.* Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Mato Grosso, Tese de Doutorado, 210p.
- BRASIL. 1981. Lei N° 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 17 de jan. 2018.
- Corralo, V.S.; Morais, M.M.; Benedett, A. & Ferraz, L. 2016. Presença de pesticidas organoclorados no leite materno. Fatores de contaminação e efeitos à saúde humana. *Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, 12(22): 101-108.*
- Dellamatrice, P.M. & Monteiro, R.T.R. 2014. Principais aspectos da poluição de rios brasileiros por pesticidas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 18(12): 1296-1301.*
- Donini, J.V.S.; Murata, A.T. & Marques, R.R. 2009. Diagnóstico Preliminar da Agricultura no Assentamento Santo Antônio da Fartura. *Revista Brasileira de Agroecologia, 4(2): 3171-3174.*
- Dores, E.F.G.C. & Freire, E.M.L. 2001. Contaminação do ambiente aquático por pesticidas. Estudo de caso: águas usadas para consumo humano em Primavera do Leste, Mato Grosso. *Química Nova, 24(1): 27-36.*

- ESRI - Environmental Systems Research Institute. 2013. *ArcGIS Desktop: Release 10.2.1*. Redlands, CA, U.S.A.
- GOOGLE. 2016. Google Earth Pro version 7.1.5.1557.
- Gonçalves, A. & Schneider, R.L. 1970. Geologia do centro-leste de Mato Grosso. In: Relatório Técnico Interno, Ponta Grossa, Petrobras/DESUL, 43 p.
- Gustafson, D.I. 1989. Groundwater Ubiquity Score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8(4): 339-357.
- Hess, S.C. 2018. Brasil, o país campeão no uso de agrotóxicos. In: HESS, S.C. (ed.). *Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil*. Expressões, p. 164-188.
- Laskowski, D.A.; Goring, C.A.I.; McCall, P.J. & Swann, R.L. 1982. *Terrestrial Environmental*. New York, Van Nostrand Reinhold Company. 198 p.
- Lisbôa, E.G.; Carvalho, J.M.C.M. & Mendes, R.L.R. 2016. O uso de geostatística na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos para compor o mapa de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. *Revista Brasileira de Corpos hídricos*, 21(1): 188-199.
- Malheiros, C.H.; Haroim, E.L.; Lima, Z.M. & Amorim, R.S.S. 2012. Qualidade da água de uma represa localizada em área agrícola (Campo Verde, MT, Brazil). *Ambiente e Água*, 7(2): 245-262.
- Marcuzzo, F.F.N.; Andrade, L.R. & Melo, D.C.R. 2011. Métodos de interpolação matemática no mapeamento de chuvas do estado do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 04(1):793-804.
- MATO GROSSO. 1997. Lei N° 6.945, de 05 de novembro de 1997. Dispõe sobre a Lei de Política de Recursos Hídricos, institui o Sistema de Recursos Hídricos e dá outras providências. Disponível em: <http://iomat.mt.gov.br/legislacao/diario_oficial>. Acesso em: 17 de jan. 2018.
- MATO GROSSO. 2002. Lei N° 7.804, de 05 de dezembro de 2002. Dispõe sobre a criação da Área de Preservação Ambiental Chapada do Guimarães e dá outras providências. Disponível em: <<http://rouxinol.mt.gov.br>>. Acesso em: 16 jan. 2018.
- MMA - Ministério Do Meio Ambiente. 2014. Instrução Normativa nº 2, de 5 de maio de 2014. Dispõe sobre os procedimentos para a interação, execução e compatibilização do Sistema de Cadastro Ambiental Rural – SICAR e define os procedimentos gerais do Cadastro Ambiental Rural – CAR. Disponível em: <<http://www.car.gov.br/#/>>. Acesso em: 09 de dez. 2018.
- Parzen, E. 1962. On estimation of a probability density function and mode. *The annals of mathematical statistics*, 14(1): 1065-1076.
- Pignati, W.A.; Calheiros, D.F. & Neri, F.A. 2018. O modelo de (des)envolvimento agrícola em Mato Grosso e os impactos dos agrotóxicos na saúde ambiental e humana. In: HESS, S.C. (ed.). *Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil*. Expressões, p. 164-188.
- Pignati, W.A.; Lima, F.A.N.S.; Lara, S.S.; Correa, M.L.M.; Barbosa, J.R. & Leão, L.H.C. 2017. Spatial distribution of pesticide use in Brazil: a strategy for Health Surveillance. *Ciência e Saúde Coletiva*, 22(10): 3281-3293.
- Possavatz, J.; Zeilhofer, P.; Pinto, A.A.; Tives, A.L. & Dores, E.F.G.C. 2014. Resíduos de pesticidas em sedimentos de fundo de rio na Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. *Ambiente e Água*, 9(1): 83-96.

- Rosenblatt, M. 1956. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *The Annals of Mathematical Statistics, Institute of Mathematical Statistics*, 27(3): 832-837.
- Ross, J.L.S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia*, 11(7): 17-29.
- Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C.; Oliveira, V.A.; Lumbrreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A.; Cunha, T.J.F. & Oliveira, J.B. 2013. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, 3ª Edição. Brasília, Embrapa Solos. 353p.
- SEPLAN - Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação do Estado de Mato Grosso. 2011. Mapa Pedológico do Estado de Mato Grosso. *In: CAMARGO, L. (ed.). Atlas de Mato Grosso: abordagem socioeconômico-ecológica*. Entrelinhas, p. 43-47.
- Soares, D.F.; Faria, A.M. & Rosa, A.H. 2017. Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(2): 277-284.
- Spadotto, C.A. 2002. Screening method for assessing pesticide leaching potential. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, 4(12): 69-78.
- Viana, T.N.A.C. 2014. *Proposta de método para avaliar risco de contaminação de águas subterrâneas por pesticidas com base no método Gus e Drastic*. Programa de Pós-Graduação em Corpos hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Dissertação de Mestrado, 93p.

Recebido em: 18/ out./ 2018

Aprovado em: 11/ fev./ 2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_496_513

03 CAPÍTULO

Otimização e aplicação do índice de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição

Resumo

A vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, expressa em cartogramas, é uma ferramenta utilizada pelos planejadores e gestores do uso do solo e da segurança hídrica e sanitária. Os cartogramas demonstram como as variáveis geoambientais podem afetar o movimento dos poluentes no subsolo, favorecendo tomada de decisões que reduzam o potencial de danos ou impactos mais graves. Este trabalho visa otimizar o método de obtenção do índice de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP) conferindo à variável infiltração e recarga a combinação matricial entre os intervalos de declividade e a densidade relativa de cobertura vegetal. Além da coleta de dados hidrológicos das unidades aquíferas, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi empregado para mapeamento de 34 nascentes em Rondonópolis, MT, compilação de dados do nível freático de poços tubulares e correção de imagens de satélite e de radar de média-alta resoluções espaciais. Identificou-se o IVIAP como um método alternativo, simples e eficaz na qualificação das vulnerabilidades à poluição de aquíferos, principalmente em regiões onde há carência de informações hidrológicas.

Palavras-chave: Geotecnologias, índices, água subterrânea, agroquímicos, cidades médias.

Abstract

The vulnerability of groundwater to hierarchy, expressed in cartograms, is a useful tool for planners and managers of land use and water and sanitary security. Cartograms demonstrate how geoenvironmental variables can affect the movement of pollutants underground, favoring decision-making that reduces the potential for more serious damage or impact. This paper aimed to optimize the method of obtaining the intrinsic vulnerability index of the aquifers to the pollution (IVIAP) conferring to the variable infiltration and recharge the matrix combination between the slope intervals and the relative density of vegetation cover. In addition to the collection of hydrolytic data from the aquifer units, the Geographic Information System (GIS) was used to map 34 springs in Rondonópolis, MT, compile data from the groundwater table of tubular wells, and correct satellite and radar images from medium-high spatial resolutions. The IVIAP was identified as an alternative, simple and effective method to qualify vulnerabilities to aquifer pollution, especially in regions where there is a shortage of hydrological information.

Keywords: Geotechnology, indexes, underground water, agrochemicals, medium cities.

3.1 INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição, expressa em cartogramas, é uma ferramenta utilizada pelos planejadores e gestores do uso do solo e da segurança hídrica e sanitária. Os cartogramas demonstram como as variáveis geoambientais podem afetar o movimento dos poluentes no subsolo, favorecendo tomada de decisões que reduzam o potencial de danos ou impactos mais graves (ADAMAT-AL; AL-SHABEEB, 2017). Antecipar o dano é de primordial importância, uma vez que as águas subterrâneas representam significativa parcela de água potável, sendo sua vulnerabilidade relativamente menor à poluição em comparação com a água superficial (GEMAIL et al., 2017).

A vulnerabilidade intrínseca de aquíferos podem diferir significativamente dependendo das condições geológicas locais, a profundidade do nível freático e as características dos estratos acima da camada de litológicas e pedológicas de interesse. Concomitantemente, as ameaças às águas subterrâneas podem ser reduzidas com a identificação e controle das fontes distintas de poluição, sendo os índices de vulnerabilidade uma das formas de identificar áreas mais predispostas à contaminação, onde se faz necessário uma maior proteção dos recursos e melhor controle de ameaças. Nesse sentido, Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013) criaram o Índice de Vulnerabilidade Intrínseca dos Aquíferos à Poluição (IVIAP), que foi uma adequação do Índice de Vulnerabilidade Intrínseca (IVI) proposto por Nobre et al. (2008), e parte integrante do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas, baseado no método *DRASTIC* elaborado por Aller et al. (1987).

Originalmente, o IVI compunha-se por seis variáveis com pesos específicos: profundidade do nível freático, recarga (inclui precipitação, cobertura e uso do solo), meio aquífero, mapa pedológico, topografia (declividade) e condutividade hidráulica. No IVIAP foi proposta a redução para apenas três variáveis com pesos distintos, o que segundo os autores contempla as principais características dos meios hidrológicos e geomorfológicos que interferem na vulnerabilidade, sendo essas: profundidade do nível freático, infiltração e recarga e a permeabilidade do aquífero, onde cada variável apresenta três subclasses alfanuméricas, determinadas em alta, média e baixa.

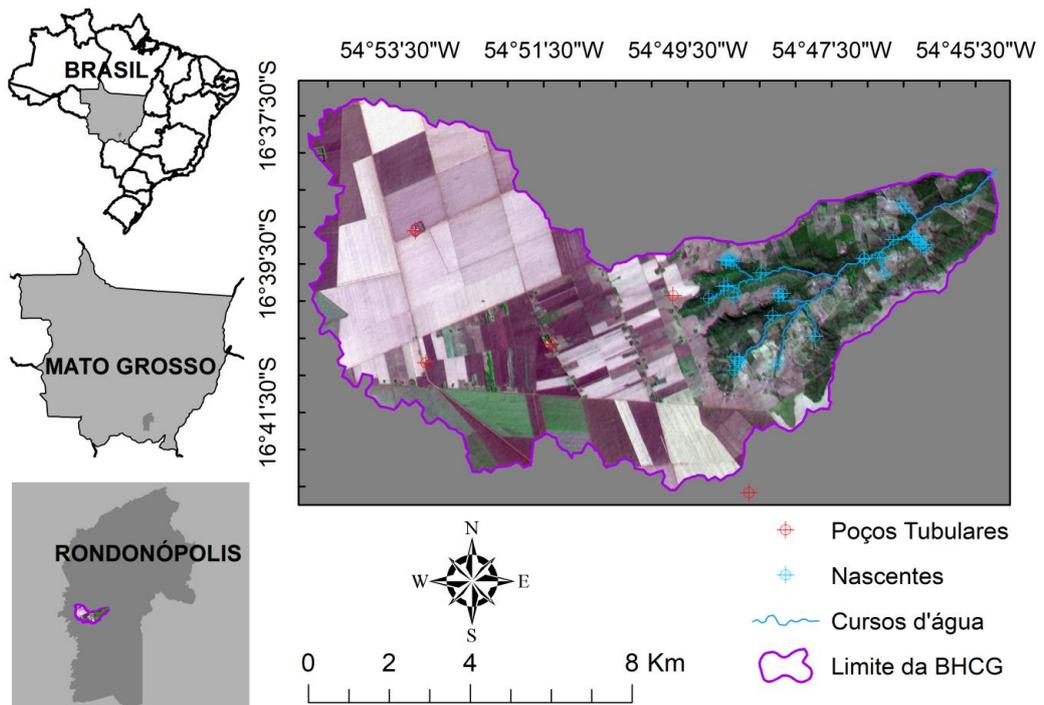
Diante do exposto, este trabalho se propõe a aperfeiçoar o IVIAP, tomando como base as variáveis hidráulicas e hidrogeológicas dos aquíferos. Para gerar o modelo foi utilizada a Bacia Hidrográfica do Córrego Grande em Rondonópolis (MT) e conferido à variável 'infiltração e recarga (IF)' como resultado da combinação matricial entre os intervalos de declividade na superfície do terreno com a densidade relativa da cobertura vegetal. Constata-se que a alta densidade de vegetação diminui o potencial de infiltração e recarga, conforme resultados obtidos em trabalhos recentes de Aguiar Junior et al. (2015a, 2015b) e Oliveira, Leite e Mattos (2017), demonstrando que o potencial de contaminação da água subterrânea é menor nestas áreas, levando em consideração a velocidade de percolação no ambiente poroso/permeável.

Essa operação visa diminuir possível subjetividade na determinação de classes e graus de infiltração e recarga subterrânea, além de atender de forma mais coerente às especificidades da densidade de cobertura vegetal presentes em áreas que apresentam transição entre fitofisionomias do bioma cerrado e interações complexas de uso do solo.

3.2.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Córrego Grande (BHCG), utilizada para teste de aplicabilidade do método proposto neste estudo, localiza-se integralmente na zona rural do município de Rondonópolis, sul de Mato Grosso.. Ocupa área de 89 Km², estendendo-se por cerca de 16,80 Km no sentido oeste/leste, com largura média de 05,37 Km e perímetro aproximado de 58 Km (Fig. 1). O principal canal de drenagem na BHCG é de 3^a ordem, na classificação de Strahler (1957), ou seja, este córrego possui confluência de afluentes de 2^a ordem, derivados preliminarmente da confluência de afluentes originados de nascentes (1^a ordem).

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Córrego Grande (BHCG), Rondonópolis, MT.

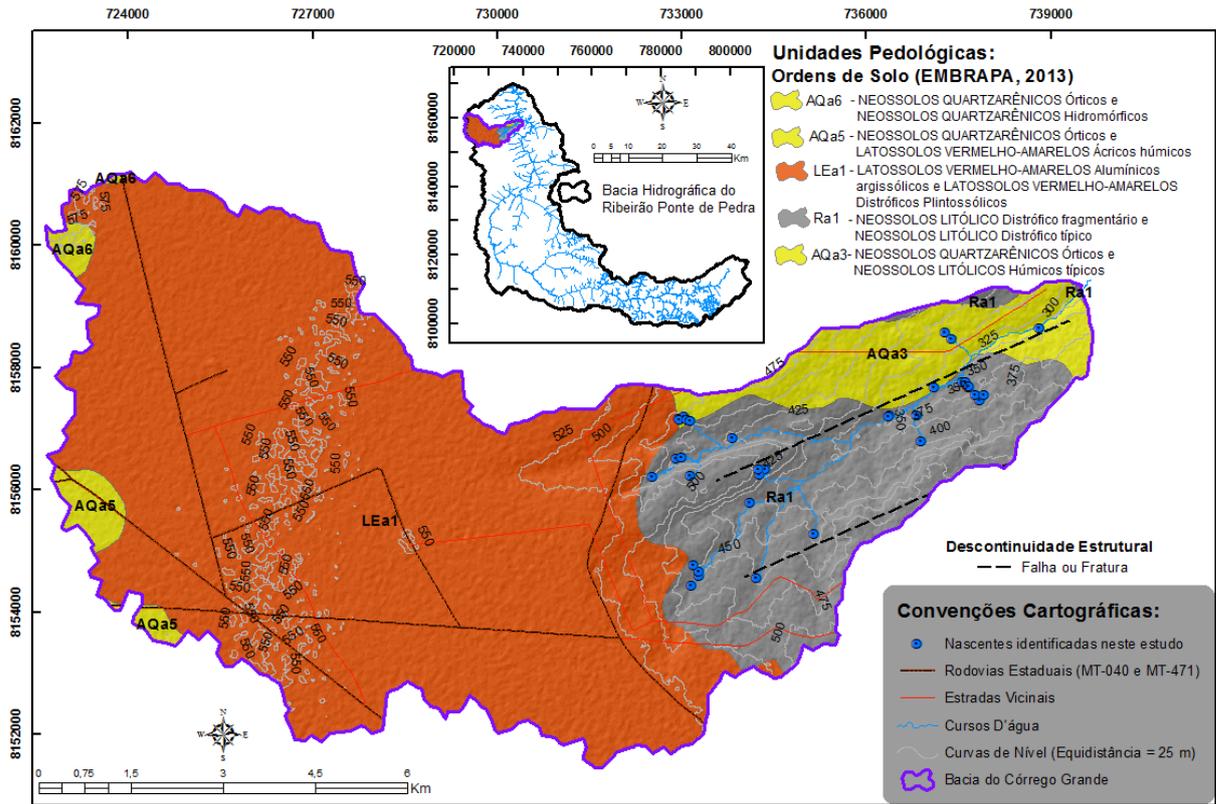


Fonte: Os autores.

O córrego Grande possui dez cachoeiras que são exploradas em atividades de turismo ecológico por moradores do assentamento Carimã. As áreas de preservação permanente (APP) deste curso hídrico são formadas por mata de galeria de Cerrado e campos encharcados. De acordo com a classificação climática de Köppen, Rondonópolis apresenta clima subúmido tropical do tipo Aw, com temperatura média anual de 25°C (ALVARES et al., 2014). A precipitação média mensal na região é de 125 mm e a média anual de 1575 mm (GUIRRA; SANTOS, 2017), contribuindo para erosividade anual forte, em torno de 7.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ano⁻¹ (SALTON; COMUNELLO; FIETZ, 2013).

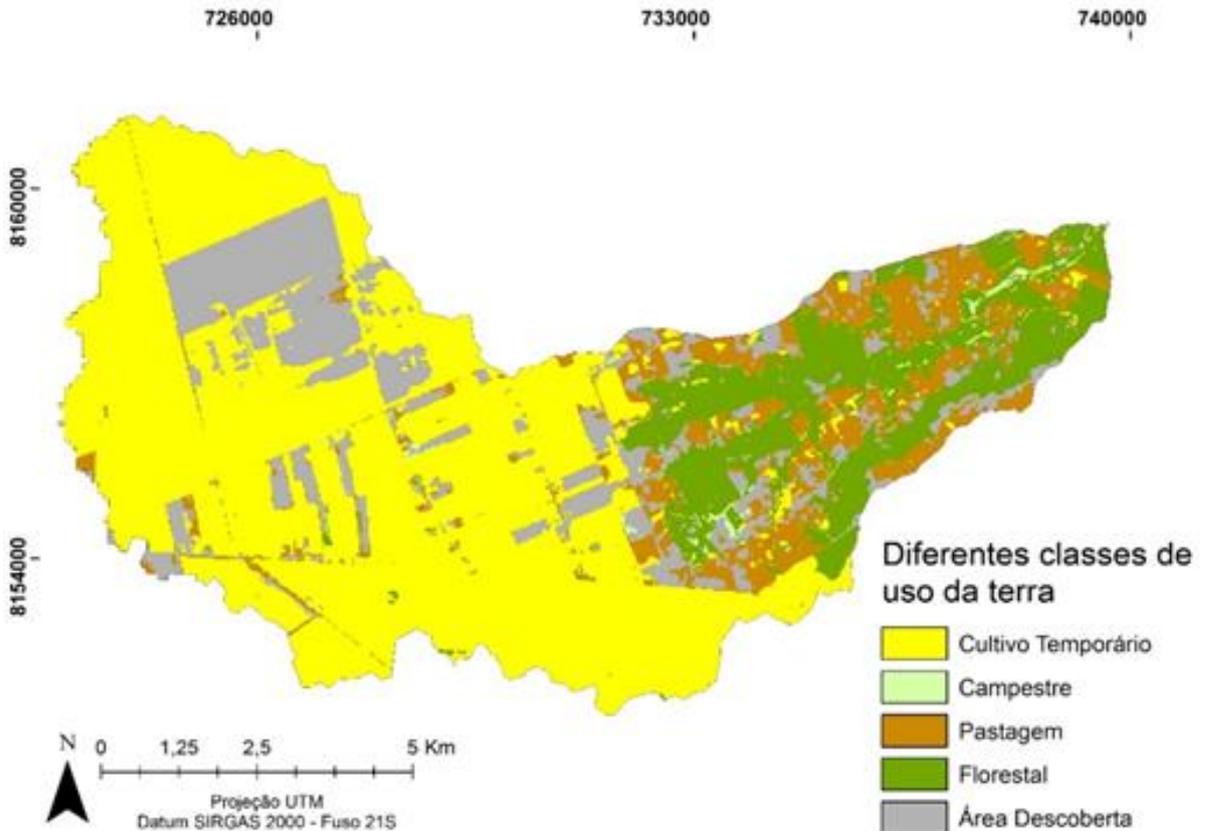
Os tipos de solos predominantes na BHCG são Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos (SANTOS et al., 2013), ambos situados no setor de patamar abatido do planalto do Taquari-Alto Itiquira, além de Neossolos Litólicos, inseridos na transição entre o planalto anterior com a depressão interplanáltica de Rondonópolis (CAMARGO, 2011), conforme mostrado na Figura 2. As principais classes de uso do solo e cobertura vegetal da BHCG (Fig. 3) são cultivos temporários (predominantemente soja, milho ou algodão em período de entressafra), florestas plantadas (eucalipto mais fragmentos de vegetação nativa), campestre (campos limpos), pastagens e áreas descobertas (estradas vicinais, áreas desmatadas e afloramentos de arenito), conforme descreve Ereio (2018).

Figura 2. Unidades pedológicas da BHCG e nascentes identificadas neste estudo.



Fonte: Os autores.

Figura 3. Mapa dos diferentes usos da terra e cobertura vegetal encontrados na BHCG, Rondonópolis, MT.



Fonte: Os autores.

A BHCG está inserida em duas unidades aquíferas, denominadas G1 e G4. O aquífero G1 é constituído predominantemente por paleossolos, solos areno-argilosos e argilo-arenosos, com cobertura detrito-laterítica de coloração vermelho-escura, formando crostas ferruginosas consolidadas a semiconsolidadas (CAMARGO, 2011; CPRM, 2014). Regiões onde ocorre este aquífero são correlatas às áreas de Planalto do Taquari-Alto Itiquira e Planalto dos Guimarães. As atividades predominantes agroindustriais e agropastoris sobre este aquífero revelam que a permeabilidade, bem como a recarga no nível freático deste aquífero aflorante, podem ter diminuído devido às interferências destas atividades implicarem em compactação do solo, com práticas intensivas de mecanização, aberturas de vias pavimentadas e não pavimentadas, desmatamento, queimadas e pisoteamento do gado.

Também está presente a unidade aquífera G4 (CAMARGO, 2011), hidrogeologicamente caracterizada como de alta permeabilidade, caráter contínuo, podendo ocorrer livre, semiconfinados ou confinado. Na BHCG esta unidade possui descontinuidades geológicas indiscriminadas (falhas ou fraturas) em arenitos estratificados mal classificados e subangulosos, médios a grossos, esbranquiçados, amarelados e subordinadamente avermelhados, pertencentes à Formação Furnas (CPRM, 2014). Este aquífero é do tipo poroso (porosidades intergranulares e primárias), capaz de apresentar camadas saturadas espessas e condutividade hidráulica excelente, para fins de exploração, permitindo a instalação de poços relativamente rasos.

3.2.2 ASPECTOS DO PLANO DIRETOR MUNICIPAL DE RONDONÓPOLIS NO QUE TANGE A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Planos Diretores são instrumentos imprescindíveis de planificação territorial (RUMBLE et al., 2019), assim sendo, o *Plano Diretor do Municipal de Rondonópolis* possui alguns mecanismos de gestão das águas, tais como os descritos a seguir:

Art. 17 - É proibido, nos imóveis que dispõem de sistema particular de abastecimento de água por meio de poços de captação de águas subterrâneas, a interligação desse sistema com o de abastecimento público. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 06)

Art. 141 - Os cemitérios horizontais e os verticais, denominados cemitérios para sepultamento de pessoas deverão ser submetidos ao processo de licenciamento ambiental e sanitário.

*I - caracterização da área na qual será implantado o empreendimento, compreendendo:
c) estudo demonstrando o nível máximo do aquífero (lençol freático), ao final da maior precipitação pluviométrica; (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 48)*

Art. 143 - Os cemitérios só poderão ser construídos mediante autorização do Poder Público, observando os seguintes critérios:

I - estarem em regiões elevadas, na contravertente de água, no sentido de evitar a contaminação das fontes de abastecimento; (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 49)

Contudo, observa-se que há uma tendência em considerar como principal fonte poluidora das águas subterrâneas e superficiais apenas os cemitérios, conforme destacado no artigo a seguir:

Art 142 - É proibida a instalação de cemitérios na Zona de Proteção Ambiental (ZPA), Zona de Unidade de Conservação (ZUC), em terrenos predominantemente cársticos, que apresentem cavernas, sumidouros ou rios subterrâneos, ou em áreas de manancial para abastecimento humano. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 48)

O município por meio do Serviço de Saneamento Ambiental de Rondonópolis (SANEAR) prevê, entretanto, para normas e exigências não prescritas para regulação no cenário municipal, a consulta e a eficácia de legislações nas esferas Estadual e/ou Federal quando houver, tal como exposto a seguir:

Art 18 - As tomadas de água para quaisquer fins ficarão condicionadas às exigências contidas em legislação superior e na ausência da mesma às exigências formuladas pelo Sanear e pelo órgão ambiental competente. (RONDONÓPOLIS, 2006, p. 06)

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção do IVIAP da BHCG, foi realizado a sobreposição por média ponderada entre os temas de cada variável hidrogeológica, utilizando a ferramenta de álgebra de mapas integrada ao SIG software ArcGis 10.2 (ESRI, 2013), de acordo com a fórmula (1).

$$\text{IVIAP} = (3 \times \text{NF}) + (4 \times \text{IF}) + (5 \times \text{PA}) \quad (1)$$

Onde,

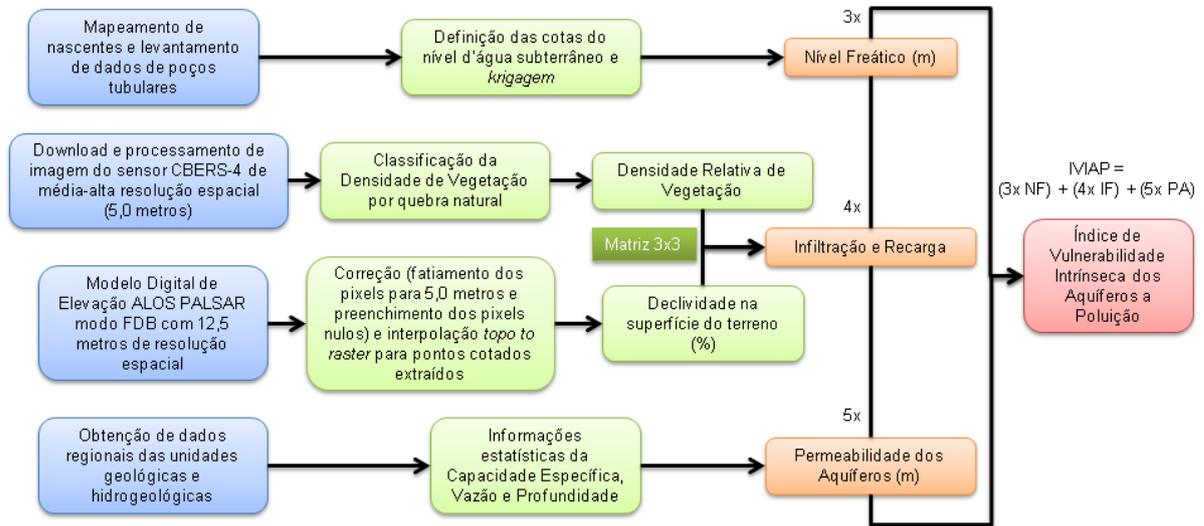
NF representa o nível freático;

IF é a infiltração e recarga;

PA corresponde à permeabilidade do aquífero.

O fluxograma da Figura 4 demonstra sinteticamente os procedimentos adotados neste trabalho.

Figura 4. Fluxograma sintético aplicado neste estudo para obtenção do IVIAP.



Fonte: Os autores.

O atual trabalho pode ser dividido em seis etapas, detalhadas a seguir:

1ª etapa: Foram utilizados dados do mapeamento das nascentes efetuados por Ereio (2018) e as informações sobre a profundidade do nível freático de cada um dos cinco poços tubulares instalados na BHCG e adjacências, cedidos pela empresa HIDROTEC – Poços Artesianos e Manutenção. Os dados das cotas do nível freático foram interpolados por krigagem pelo método das isoietas e posteriormente foram classificados em diferentes intervalos de profundidade (Tab. 1).

Tabela 1: Vulnerabilidade relacionada ao nível freático.

Método DRASTIC		Método IVIAP	
Intervalos (m)	Pesos	Intervalos (m)	Classe (Peso)
< 1.5	10	< 10.0	Alta (1)
1.5 - 4.6	9		
4.6 - 6.8	8		
6.8 - 9.1	7		
9.1 - 12.1	6	10.0 - 30.0	Média (2)
12.1 - 15.2	5		
15.2 - 22.9	4		
22.9 - 26.7	3		
26.7 - 30.5	2		
> 30.5	1	> 30.0	Baixa (3)

Fonte: Os autores.

2ª etapa: Na classificação da densidade de vegetação (DV), utilizou-se imagem do satélite sino-brasileiro CBERS-4 de média-alta resolução espacial (5 metros), pela composição falsa-cor do RGB 342 (vermelho, NIR e verde) fundida com a banda pancromática, obtida em 28 julho de 2017 pelo site do INPE (2017). Foi realizada a classificação supervisionada com o algoritmo de máxima verossimilhança do *software ArcGis 10.2* (ESRI, 2013), já com a imagem previamente corrigida. Foi atribuída classificação alfanumérica às classes de densidade de vegetação, baseando-se em critérios empíricos, as quais foram relacionadas às classes de uso e cobertura do solo (Tab. 2).

Tabela 2: Classificação alfanumérica da densidade de vegetação baseada nos critérios empíricos quanto ao uso e cobertura do solo.

Densidade	Pesos	Classes de Uso e Cobertura do Solo
Baixa densidade	1	Cultivos temporários Pastagens Áreas descobertas
Média densidade	2	Cobertura campestre
Alta densidade	3	Sistemas florestais Matas de galerias Zonas ripárias

Fonte: Os autores.

3ª etapa: O modelo digital de elevação (MDE) foi adquirido por meio do *site Alaska Satellite Facility* (2017). Desta imagem de radar extraíram-se as curvas de nível equidistantes de 1,0 metro, após fatiamento dos pixels em 1,0 m de resolução espacial. Foi extraído curvas de nível de 5,0 metros, visando atender a álgebra de mapas, onde os pontos cotados foram interpolados pelo método de isoietas *topo to raster*.

4ª etapa: Com os dados anteriormente obtidos, foi elaborado o mapa com a classificação dos intervalos de declividades na superfície do terreno associados à vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição (IVIAP), conforme proposto por Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013). Subsequente, os valores alfanuméricos foram atribuídos aos intervalos de declividade (expressos em %), onde: >12,0% é favorável ao predomínio do escoamento superficial, sendo a infiltração baixa (Peso 1), entre 6,0-12,0% média tendência à infiltração, sendo um intervalo de equilíbrio entre o escoamento a infiltração (Peso 2) e intervalos < 6,0%, nos quais há o prevailecimento da infiltração em detrimento ao escoamento superficial (Peso 3).

5ª etapa: A Tabela 3 proposta por Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013) e Tabela 4 (nova proposta) demonstram como foi avaliada a variável infiltração e recarga (IF), levando-se em consideração o resultado da combinação matricial (3x3) da justaposição entre intervalos de declividade na superfície do terreno com a densidade relativa de vegetação. Esta nova proposta oferece nove valores distintos de infiltração e recarga, restringidos em três intervalos quali-quantitativos de classes de infiltração e recarga, relativos à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, sendo eles: alta - Peso 1 (matriz: 1,1;1,2;2,1), média - Peso 2 (matriz: 1,3;2,2;3,1) e baixa - Peso 3 (matriz: 2,3;3,2;3,3).

Tabela 3: Determinação da variável infiltração e recarga.

Declividade (%)	Cobertura Vegetal	Peso
0.0 - 6.0	Favorável à infiltração	1
6.0 - 12.0	Densa ou moderadamente densa	2
> 12.0	Ausente ou rarefeita	3

Fonte: mod. de Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013).

Tabela 4: Reclassificação da variável infiltração e recarga.

Declividade (%)	Peso	*Cobertura Vegetal	Matriz	Peso
0.0 - 6.0	1	Ausente ou rarefeita	11 12 21	1
6.0 - 12.0	2	Densa ou moderadamente densa	13 22 31	2
> 12.0	3	Favorável à infiltração	23 32 33	3

*Ordem de classificação invertida.

Fonte: Os autores.

6ª etapa: A carta de Permeabilidade do Aquífero (PA) quanto a vulnerabilidade dos aquíferos à poluição foi elaborada por meio da compilação dos dados regionais de geologia e hidrogeologia, ambos em escala de 1:250.000. Este é um atributo físico que varia de acordo com o tipo de rocha, sendo embasado pela lei de Darcy, a qual estabelece que um meio poroso homogêneo e isotrópico tem velocidade constante, sendo medido geralmente em metros/segundo. Com a carta geológica da Folha SD-21-X-B, disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2014) as unidades geológicas foram convertidas em unidades hidrolitológicas, conforme aplicado por Camargo (2011) no Estado de Mato Grosso. Os resultados foram enquadrados em cinco classes – A, B, C, D e E (Tab. 5).

Tabela 5: Classificação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à poluição.

Classe	Vulnerabilidade	Pontuação
E	Muito Elevada	12
D	Elevada	13-18
C	Mediana	19-24
B	Baixa	25-30
A	Muito Baixa	31-36

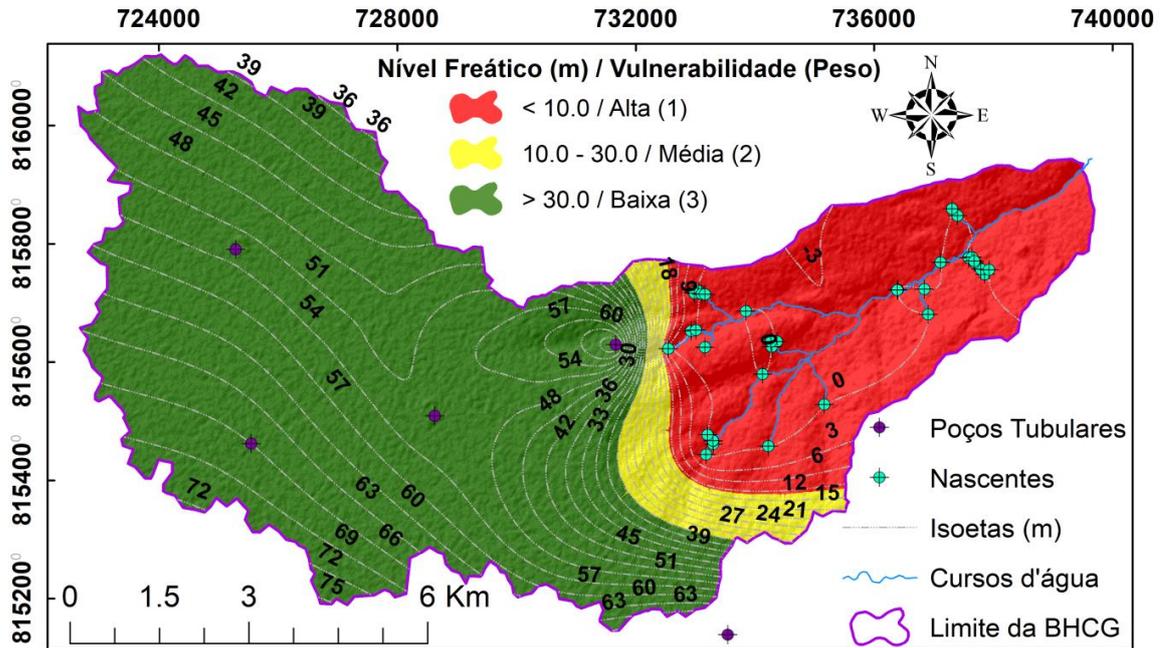
Fonte: mod. de Filizzola, Magalhães Júnior e Felipe (2013).

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O nível freático (NF) da BHCG derivado da interpolação entre os níveis piezométricos registrados durante perfuração dos cinco poços artesianos e a localização dos pontos de descarga dos aquíferos (nascentes) demonstra que para 67,89% desta bacia a vulnerabilidade à poluição é baixa. A profundidade máxima do NF estimada neste estudo foi de 75 m, situada na região extrema sudoeste da BHCG, revelando um padrão sudoeste-noroeste de ascensão do nível piezométrico em direção às nascentes. Nesta região o contorno das isoetas apresentou mais contorcido, formando bulbos, sugerindo haver a presença de cone de rebaixamento devido à exploração deste aquífero para suprir as demandas das atividades de irrigação de lavouras na BHCG.

Por sua vez, a região das nascentes apresentam intervalos relativamente rasos do nível freático (<10,0 metros abaixo do nível do solo) cobrindo o equivalente a 26,87% desta área, com alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos. Esse é considerado mais vulnerável a contaminação tendo em vista a sua maior disponibilidade hídrica, maior proximidade com fontes de contaminação, a interação com ecossistemas aquáticos superficiais, e capacidade de armazenamento. A área avaliada com nível freático entre 10,0 e 30,0 m de profundidade, portanto apresentando média vulnerabilidade à poluição, corresponde o equivalente a 5,24% da BHCG. A Figura 5 mostra o comportamento do nível freático da BHCG, na qual fica evidente a alta vulnerabilidade na região de confluência de drenagens.

Figura 5. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição quanto a profundidade do nível freático em relação ao nível do solo (em metros).

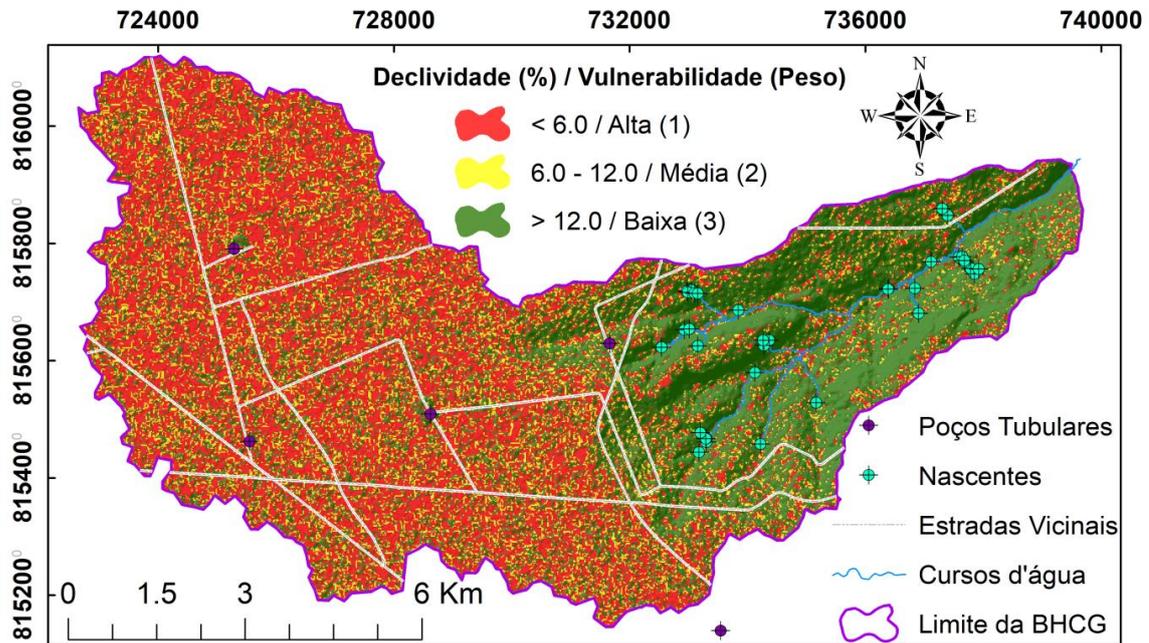


Fonte: Os autores.

O IVIAP da BHCG associada ao gradiente de declividade na superfície do terreno revela que a região com relevo predominantemente plano à suavemente ondulado, combinado com a ocorrência mútua de agricultura mecanizada, como cultivo de soja, milho e algodão, apresenta maior potencial de infiltração e, portanto, os maiores índices de vulnerabilidade, correspondendo a um total de 46,19% (40,92 km²) em área da BHCG. Enquanto na porção leste, onde ocorrem vales fluviais encaixados o relevo é mais acidentado, com presença de solos pouco desenvolvidos (Neossolos Quartzarênicos) associados a afloramentos rochosos de arenitos grosseiros da Formação Furnas, estratificados, fraturados e intemperizados. A vulnerabilidade do aquífero relacionada à variável declividade é baixa em aproximadamente 38,57% (34,17 km²) da BHCG.

A vulnerabilidade média ocorre de forma homogênea e difusa ao longo de toda a bacia, cobrindo área equivalente a 15,25% (13,49 Km²) da BHCG. Assim, áreas com aplicações sazonais de agroquímicos estão inseridas nas porções menos declivosas, possibilitando a chegada rápida de plumas de contaminação, atrelada a alta condutividade hidráulica dos Latossolos Vermelho-Amarelos (Fig. 6).

Figura 6. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação aos intervalos de declividade (%) na superfície do terreno.



Quando analisada a densidade da cobertura vegetal da BHCG, a qual está integralmente contida em fitofisionomias do bioma Cerrado, atribui-se que quanto maior a densidade de cobertura vegetal, por unidade de área menor será a capacidade de infiltração e recarga da água no aquífero (OLIVEIRA; LEITE; MATTOS, 2017) e, portanto, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação/poluição tenderá a ser menor, sendo estas áreas favoráveis a mitigação dos efeitos colaterais prejudiciais dos contaminantes, removendo-os com maior eficácia (AGUIAR JUNIOR et al., 2015a; 2015b).

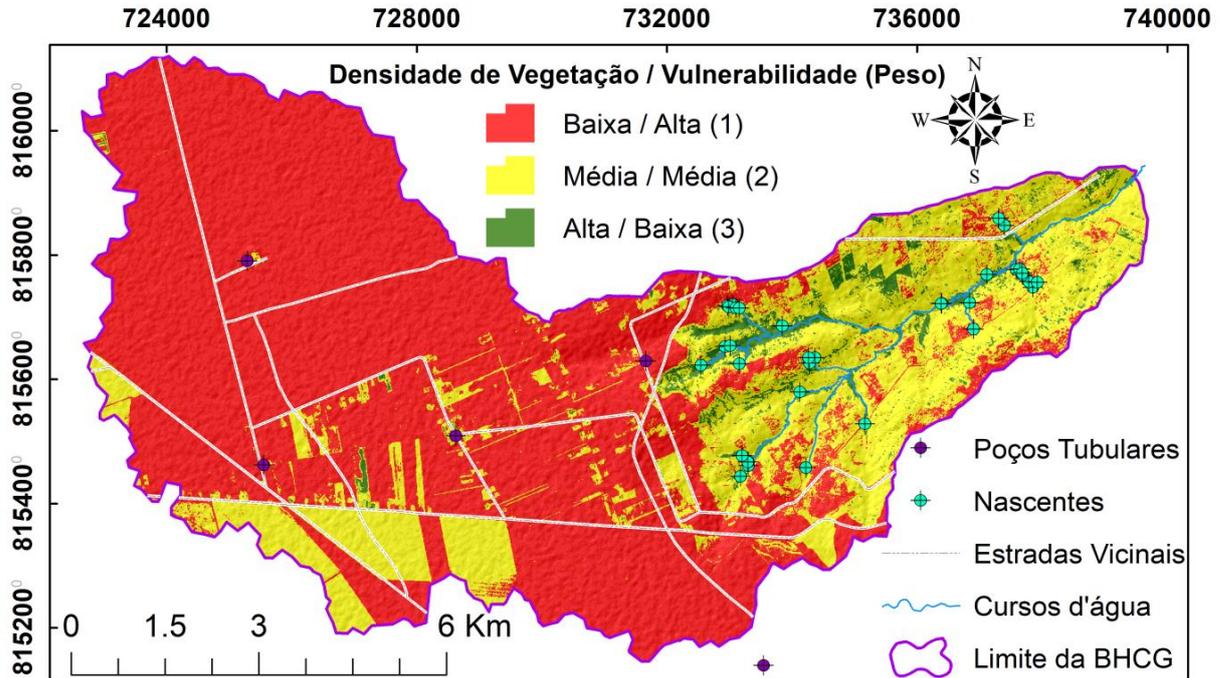
É observado que grande parte da região possui baixas densidades de cobertura vegetal, equivalente a 67,26% (59,61 Km²) da área total da BHCG, conseqüentemente, uma alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos, sobretudo na porção com relevo plano a suavemente ondulado.

A escassez de cobertura vegetal está relacionada aos processos de desmatamento progressivos (intencionais e acidentais), ocorridos ao longo da implantação de reforma agrária, iniciado no final dos anos 1990 nesta região (EREIO, 2018). Esta autora relata que houve incêndios florestais e a isenção de Reserva Legal atribuída aos loteamentos do assentamento Carimã pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

As áreas de médias densidades da cobertura vegetal e que correspondem a vulnerabilidades médias, estão localizadas nas regiões de ocorrência de Neossolos Litólicos e Quartzarênicos, ambos com baixa aptidão para agricultura (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004). Áreas destinadas à Reserva Legal extrativista e com cultivo temporário alcançando a fase de colheita, estão inseridas nas regiões com Latossolos Vermelho-Amarelos, solos com média à alta aptidão agrícola (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004). Este último aspecto (cultivo temporário), demonstra que a densidade relativa de cobertura vegetal tende a apresentar arranjos espaciais distintos ao longo dos períodos de safra e entressafra, pois processos como aração e gradagem do solo são utilizados no preparo das lavouras, expondo parcial ou totalmente o terreno. A vulnerabilidade média dos aquíferos quanto a densidade de cobertura vegetal nestas condições cobre cerca de 29,35% (26,00 Km²) desta região.

Densidades altas de cobertura vegetal estão restritas as Áreas de Preservação Permanente (APPs) do curso de drenagem (zonas ripárias) do Córrego Grande e secundariamente as áreas com plantio de eucalipto (Fig. 7). De acordo com Ereio (2018), a cultura de eucaliptos dentro do assentamento Carimã, inserido em sua maioria na BHCG, é praticada desde o ano de 2008, como forma de reflorestamento e fonte de renda para alguns de seus assentados. As altas densidades de vegetação funcionam como zonas tampão de contaminação por lixiviação de pesticidas em áreas agrícolas, sendo a largura da mata ciliar ou vegetação ripária um fator determinante na eficiência da remoção destes contaminantes no sistema hidrogeológico, (AGUIAR JUNIOR et al., 2015a; 2015b; SILVA et al., 2017; VACCHIANO et al., 2019). Os mesmos autores recomendam largura superior a 36 metros de vegetação lenhosa, através de práticas de conservação dos ecossistemas agrícolas.

Figura 7. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a densidade relativa de cobertura vegetal.



Fonte: Os autores.

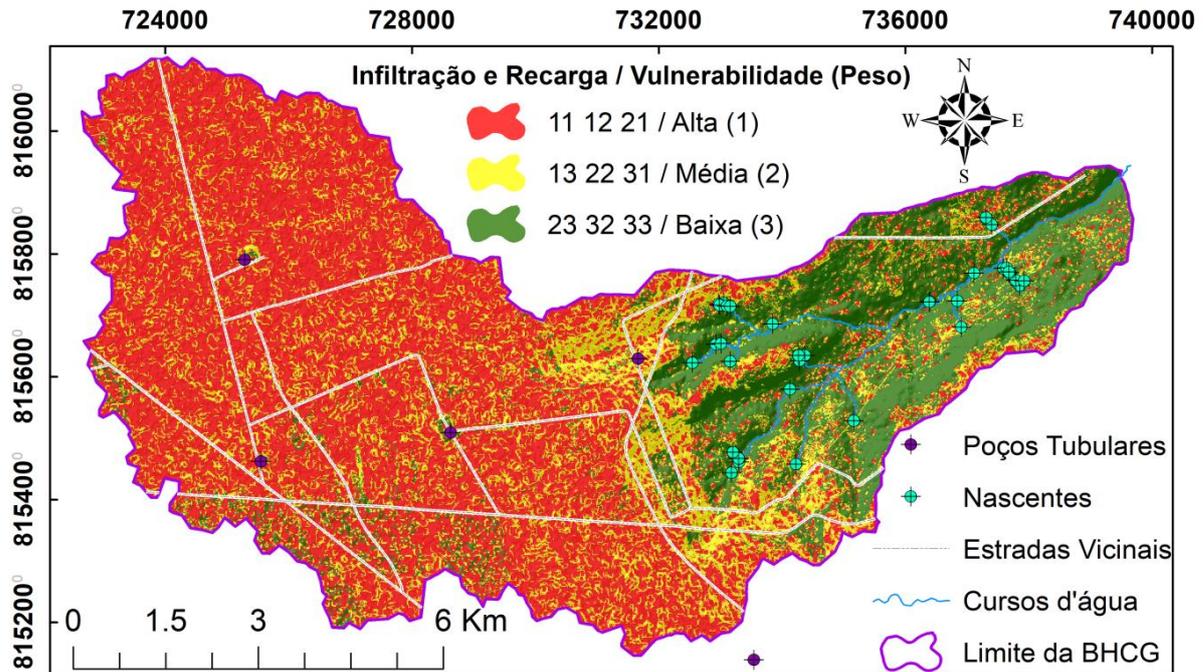
Os médios índices de vulnerabilidade à contaminação registrados, para a componente infiltração e recarga (IF), abrangem a área de transição do planalto escalonado do Taquari-Alto Itiquira, com a Depressão Interplanática de Rondonópolis, entre domínios de Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Litólicos, apresentando diversificadas formas de uso e cobertura do solo. Neste contexto, verifica-se que em 3,35% (2,97 Km²) do total da área da BHCG há baixa vulnerabilidade à contaminação relacionada à infiltração e recarga do aquífero. A vulnerabilidade quanto a infiltração e recarga das unidades aquíferas da BHCG apresentaram índices elevados, com cerca de 57,18% (50,65 Km²), ocupando preferencialmente o compartimento da alta vertente da BHCG, onde concentram-se predominantemente atividades agrárias de culturas de ciclo curto e pastagem.

A menor densidade de vegetação associada à declividade abaixo de 6,0% contribui para elevadas vulnerabilidades neste setor. Nas APPs do Córrego Grande, nos limites do curso de drenagem, onde ocorre vegetação densa de porte arbóreo, a vulnerabilidade à poluição apresenta-se baixa para esta variável geoambiental, cerca de 21,00 %, equivalente à cerca de 18,60 Km² (Fig. 8).

A mudança no uso e cobertura da terra no Cerrado tem potencial para modificar as taxas de recarga das águas subterrâneas, assim como as terras cultiváveis

provavelmente aumentam a recarga. Por outro lado, a substituição do Cerrado por cultivos florestais, tal como eucalipto, demonstra que as taxas de recarga tendem a diminuir, como constatado por Oliveira, Leite e Mattos (2017) ao monitorar flutuações do nível freático de 58 poços do Sistema Aquífero Guarani, entre 2011 e 2013, em áreas cobertas por fitofisionomias do Cerrado.

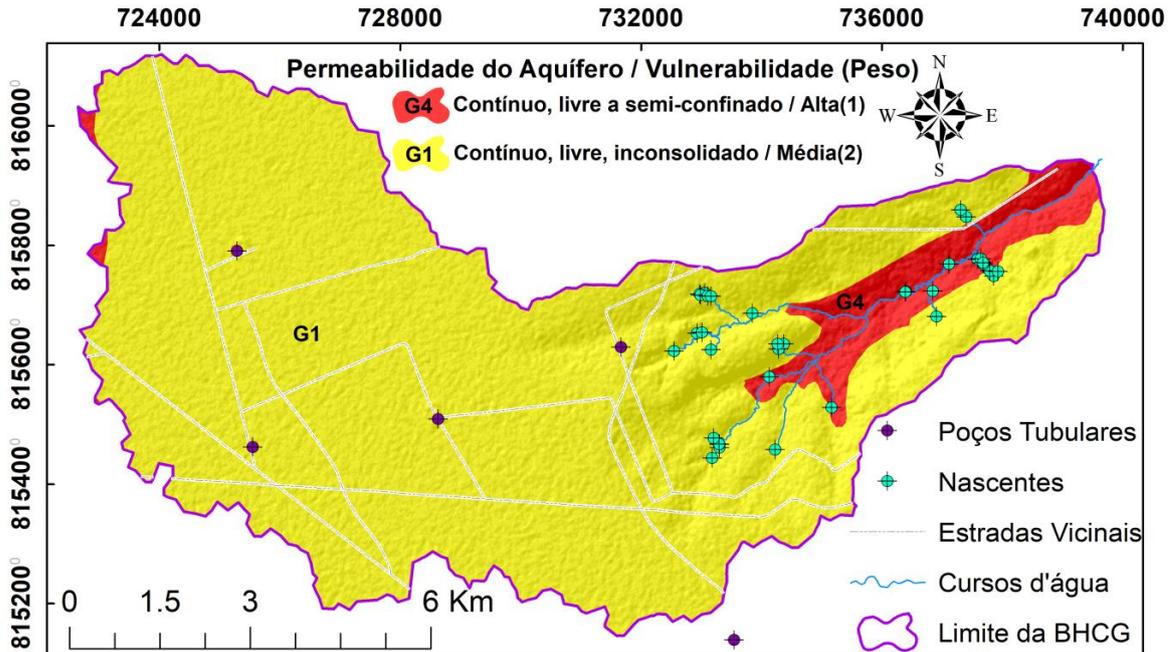
Figura 8. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a infiltração e recarga.



Fonte: Os autores.

Ao examinarmos a vulnerabilidade dos aquíferos a poluição em relação a componente permeabilidade, foi constatada duas unidades hidrogeológicas com comportamentos de vazão, capacidade específica e permeabilidades bem distintas. De acordo com critérios estatísticos, dados de poços e mapeamentos realizados por Camargo (2011), a BHCG é compartimentada nas unidades aquíferas G1 e G4 (Fig. 9).

Figura 9. Vulnerabilidade dos aquíferos da BHCG à poluição, em relação a permeabilidade.



Fonte: Os autores.

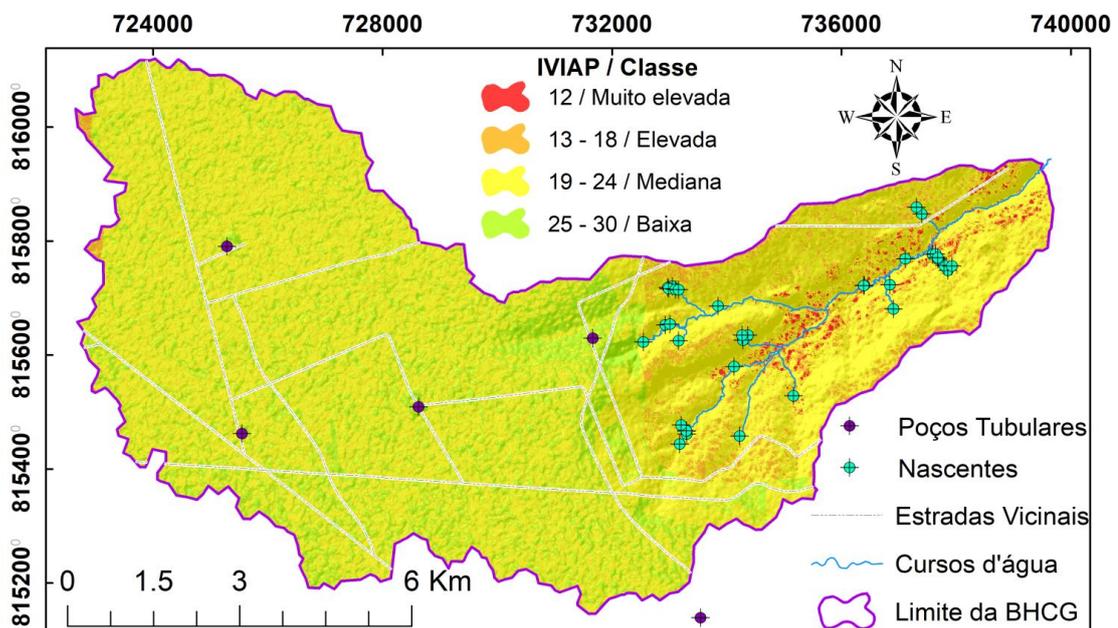
A unidade aquífera G1 abrange a maior parte da BHCG, com área correspondente a 92,94% (82,34 Km²), e está associada à vulnerabilidade média devido suas características hidrolíticas, como: alta permeabilidade, caráter contínuo, podendo ocorrer livre, semiconfinado ou confinado (CAMARGO, 2011). Esta unidade é correlata à superfície paleogênica peneplanizada com latolização. Entretanto, devido às características hidrolíticas, o aquífero se torna mais sensível à contaminação por agentes externos, necessitando avaliação da qualidade da água antes de ser inserido no sistema de abastecimento público.

As nascentes deste aquífero (G4) na BHCG estão relacionados a fontes do tipo depressão e contato. O aquífero G1 sobreposto ao G4 é de domínio poroso e inconsolidado, promove influência direta no potencial de recarga, exfiltrando água a partir da zona de contato entre ambos, onde a zona saturada é constituída por rochas intensamente alteradas pelo perfil de intemperismo. Sendo assim, a vulnerabilidade à poluição da unidade aquífera G4 é avaliada como alta, o que corresponde a uma área total de aproximadamente 7,06% ou 6,25 Km² da BHCG. Esta unidade ocorre tanto no setor nordeste-leste da bacia, condicionada ao vale fluvial encaixado com rochas aflorantes ao longo da drenagem principal do Córrego Grande, bem como no setor extremo noroeste, ao longo do limite do divisor de bacias, onde se localizam morros testemunhos.

A vulnerabilidade intrínseca à poluição da BHCG possui classes de vulnerabilidade mediana (Classe C) que cobrem cerca de 68,31 Km², o equivalente 77,11% do total de sua área. Outros 17,63% apresentam índices de vulnerabilidade baixa (Classe B), não sendo caracterizado nenhum setor com muito baixa vulnerabilidade (Classe A). Os índices muito elevados do IVIAP correspondem ao equivalente a 0,72 Km², ou seja, 0,82% do total da área da BHCG, e cerca de 3,94 Km² (4,44%), atingiu índices elevados.

Os índices graves estão condicionados, sobretudo com as características hidrogeológicas do nível freático e da permeabilidade do aquífero, as quais assumem maior predisposição a contaminação no aquífero G4. Neste aquífero há predomínio de declividades elevadas e maior densidade de vegetação, permitindo menor vulnerabilidade relacionada à variável infiltração e recarga, entretanto o IVIAP manteve-se elevado, demandando maior proteção neste setor, o qual é correlato às áreas com maior concentração de nascentes (Fig. 10).

Figura 10: Vulnerabilidade intrínseca à poluição dos aquíferos da BHCG.

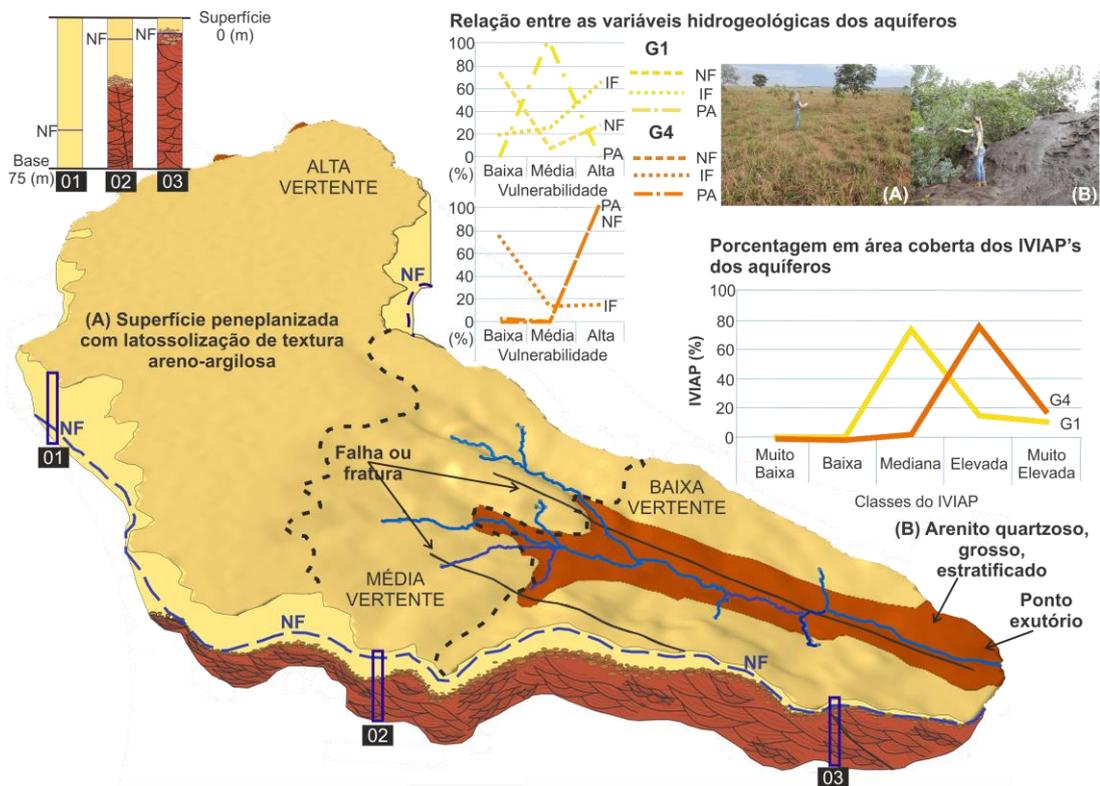


Fonte: Os autores.

Ao longo do Córrego Grande existem fraturas/falhas não preenchidas com alto mergulho (75-90°) (CPRM; 2014). Provavelmente essa condição é um dos motivos que favorece a ocorrência de sumidouros, bem como a evidência de migração de nascentes. A oscilação do nível freático, onde este é raso, promove o encharcamento do terreno, especialmente próximo às veredas e zonas ripárias,

favorecendo o hidromorfismo e a concentração de matéria orgânica nos horizontes superficiais de solos de caráter flúvico e/ou concrecionário amplamente mapeados no território rondopolitano. Nesse contexto foi determinado que o aquífero G1 (Figura 11.A) é de classe C para o IVIAP, enquanto o aquífero G4 (Figura 11.B) enquadra-se na classe D.

Figura 11: Modelo conceitual dos aquíferos G1(A) e G4(B) na BHCG e suas vulnerabilidades à poluição associadas às variáveis hidrogeológicas do IVIAP.



Fonte: Os autores.

Trojan (2015) ao analisar a vulnerabilidade à contaminação por agroquímicos na região de Ponta Grossa, em porção aflorante do aquífero Furnas, sob um sistema de produção agrossilvipastoril, condição semelhante a deste estudo, também detectou elevada vulnerabilidade. Este autor, ao analisar amostras de água subterrânea constatou presença de compostos agroquímicos de nitrogênio e seus derivados, além de pesticidas, o que revela, segundo ele, que mesmo em sistemas agrossilvipastoris, os quais integram numa mesma área, o plantio de roçados, a criação de animais e a preservação da mata, não possuem atributos que garantam a mitigação da contaminação dos recursos hídricos por agroquímicos.

No Brasil, há um grande número de agroquímicos extremamente tóxicos e altamente tóxicos com uso autorizado, sendo aplicados sazonalmente em culturas agrícolas de

alimentos habitualmente consumidos neste país, o que de acordo Hess (2018) demonstra a urgente necessidade de aperfeiçoamento na atual legislação. Segundo Pignati, Calheiros e Neri (2018), no Brasil as maiores incidências de agravos à saúde (intoxicações, cânceres, má-formação e crises respiratórias), são correlatas as regiões de maior produtividade agrícola, demonstrando que os municípios de base econômica agroindustrial estão conseqüentemente mais expostos aos cenários de contaminação por agroquímicos. Nesse sentido, a periódica utilização de pesticidas e agroquímicos em geral, em monoculturas, ao longo de vários anos dessas atividades, na BHCG, potencializa ainda mais a chegada de contaminantes em suas unidades aquíferas, principal fonte de captação de água para a população nela inserida. Vale ressaltar que Balsan et al. (2019) contribuíram para a especialização e identificação de pontos de monitoramento de recursos hídricos predispostos a contaminação por pesticidas, superficiais e/ou, subterrâneos, propondo um método alternativo e genérico, o qual estabelece plano de informações hierarquizados em SIG.

Na BHCG há também problemas relacionados à incidência e evolução de processos erosivos lineares, os quais aliados a práticas não conservacionistas em solos mecanicamente frágeis (ROSS, 1994), intensificam o assoreamento do córrego Grande, com elevado aporte de sedimentos para o canal de drenagem principal.

3.5 CONCLUSÕES

O método de espacialização da vulnerabilidade à poluição de aquíferos adotado neste estudo (IVIAP) apresenta-se como um modelo eficaz na prevenção e gestão dos recursos hídricos em escala regional, podendo ser replicado em qualquer outra unidade hidrogeológica do Cerrado.

Foi constatado neste estudo que o aquífero poroso, Formação Furnas, ao ocorrer na forma livre, é interceptado por sistemas de descontinuidades geológica-estruturais (falhas ou fraturas), em compartimentos geomorfológicos mais dissecados (domínio de depressão), favorecendo elevada densidade relativa de nascentes, mais predispostas à propagação de contaminantes no sistema ecológico aquático.

Há necessidade de implantação de alternativas que priorizem a preservação e conservação da quantidade e qualidade das águas subterrâneas, sobretudo na

unidade aquífera Furnas, tanto na BHCG quanto em outras regiões onde a mesma ocorre na forma livre.

É salutar ao Plano Diretor Municipal de Rondonópolis explicitar outras potenciais fontes poluidoras, além dos cemitérios, estabelecendo graus de risco à contaminação para as mesmas, a fim de contemplar maior número de atividades que fazem uso da água e que inerentemente geram danos às reservas hídricas existentes.

3.6 REFERÊNCIAS

ADAMAT-AL, R.; AL-SHABEEB, A.A. A simplified method for the assessment of groundwater vulnerability to contamination. **Jornal of Water Resource and Protection**, v.9, n.3, p.305-321, 2017. DOI: 10.4236/jwarp.2017.93020

AGUIAR JUNIOR, T.R.; BORTOLOZO, F.R.A.; HANSEL, F.A. et al. Riparian buffer zones as pesticide filters of no-till crops. **Environmental Science and Pollution Research**, v.22, n.14, p.10618-10626, 2015a. DOI: 10.1007/s11356-015-4281-5

AGUIAR JUNIOR, T.R.; RASERA, K.; PARRON, L.M. et al. Nutrient removal effectiveness by riparian buffer zones in rural temperate watersheds: The impact of no-till crops practices. **Agricultural Water Management**. v.149, n.1, p.78-80, 2015b. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.10.031

ALASKA SATELLITE FACILITY. Imagem de Radar ALOS-1 (*Advanced Land Observing Satellite*) PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) - **JAXA** (*Japan Aerospace Exploration Agency*). Disponível em: <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> Acesso em: 22 set. 2017.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H. et al. **DRASTIC**: a Standardized System for Evaluating Ground Water Potential using Hydrogeologic Settings. Oklahoma: Ada, 1987.

ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.S. et al. Köppen's climate classification map of Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

BALSAN, L.; GUIRRA, A.P.M.; BARBOSA, D.S. et al. Espacialização do risco intrínseco à contaminação por pesticidas em corpos hídricos e determinação de pontos de monitoramento. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n.1, p. 496-513. 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_496_513

CAMARGO, L. (Org.). **Abordagem socioeconômico-ecológica**. Atlas de Mato Grosso – Cuiabá: Entrelinhas / SEPLAN – MT, 2011.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. GEOBANK. **Carta Geológica da Folha Rondonópolis (SE-21-X-B). Escala 1:250.000**. 2014. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>> Acesso em: 28 jun. 2017.

EREIO, P.K.B. **Qualidade ambiental das nascentes do Córrego Grande na bacia hidrográfica do Ribeirão Ponte de Pedra (Rondonópolis, MT)**. Rondonópolis, 2018. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT.

ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2013. **ArcGis** Desktop: Release 10.2.1. Redlands, CA, U.S.A.

FILIZZOLA, B.R.; MAGALHÃES JÚNIOR. A.P.; FELIPPE, M.F. Proposta metodológica para desenvolvimento do índice de risco à poluição das águas de nascentes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves. **Anais...**

GEMAIL, K.S.; ALFY, M.E.; GHONEIM, M.F. et al. Comparison of DRASTIC and DC resistivity modeling for assessing aquifer vulnerability in the central Nile Delta, Egypt. **Environmental Earth Sciences**, v.76, n.350, p.1-17, 2017. DOI: 10.1007/s12665-017-6688-4

GUIRRA, A.P.M., SANTOS, C.A.M. O uso de geoestatística na correlação entre graus de vulnerabilidade e fragilidade ambientais associados à intensidade pluviométrica e erosividade das chuvas em parte da região sudeste e centro-sul matogrossense. In: PEREZ FILHO, A; AMORIM, R.R. (org). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2017. p. 1375-1387. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2046

HESS, S.C. Brasil, o país campeão no uso de agrotóxicos. In: HESS, S.C. (ed.), **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. São Paulo:, Expressões, 2018.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Imagem CBERS-4**. Disponível em <<http://geocatalogo.mma.gov.br/index.jsp>> Acesso em: 11 nov. 2017.

NOBRE, R.C.M.; NOBRE, M.M.M.; ROTUNNO, O.C.F.; MANSUR, W.J. Mapeamento do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas Vulneráveis à Contaminação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.2, p.101-111, 2008. DOI: 10.21168/rbrh.v13n2.p101-111

OLIVEIRA, P.T.S.; LEITE, M.B.; MATTOS, T. et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian Cerrado. **Ecohydrology**, v.10, n.2, p.1-8, 2017. DOI: 10.1002/eco.1759

PEREIRA, L.C.; LOMBARDI NETO, F. **Avaliação da aptidão agrícola das terras**: proposta metodológica. Jaguariaúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2004.

PIGNATI, W.A.; CALHEIROS, D.F.; NERI, F.A. O modelo de (des)envolvimento agrícola em Mato Grosso e os impactos dos agrotóxicos na saúde ambiental e humana. In: HESS, S.C. (ed.), **Ensaio sobre poluição e doenças no Brasil**. São Paulo: Expressões, 2018. p.165-188.

RONDONÓPOLIS. **Plano Diretor Participativo de Desenvolvimento Urbano e Ambiental do Município de Rondonópolis**. Lei Complementar n. 43, de 28 dez. 2006. Rondonópolis, 2006.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p.63-74, 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006

RUMBLE, H.; ANGEOLETTO, F.; CONNOP, S. et al. Understanding and applying ecological principles in cities. In: LEMES DE OLIVEIRA, F.L.; MELL, I. (Eds.). **Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods**. Amsterdam: Springer Nature, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01866-5_15

SALTON, J.C.; COMUNELLO, E.; FIETZ, C.R. **Estimativa de índices de erosividade da chuva para o Estado de Mato Grosso**. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2013.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2013.

SILVA, N.M.; ANGIOLETTO, F.; SANTOS, J.W. et al. The negative influences of the new Brazilian forest code on the conservation of riparian forests. **European Journal of Ecology**, v.3, n.2, p.116-122, 2017. DOI: 10.1515/eje-2017-0019

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v.38, n.1, p.913-920, 1957. DOI: 10.1029/TR038i006p00913

TROJAN, M. **Análise da vulnerabilidade à contaminação por agroquímicos do aquífero Furnas sob uso agrossilvipastoril**. Curitiba, 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, UFPR.

VACCHIANO, M.C.; SANTOS, J.W.C.M.; ANGIOLETTO, F.; SILVA, N.M. Do Data Support Claims That Brazil Leads the World in Environmental Preservation? **Environmental Conservation**, v.46, n.2, p.118-120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892918000371>

Data de submissão: 28/ fev./ 2019

Data de aceite: 30/ jul. / 2019

DOI: 10.5212/TerraPlural.v.14.2013329.025

04 CAPÍTULO

Hidrodinâmica em zona de perturbação de barragem tropical

Resumo

A região de flutuação do nível da água em reservatórios representa uma zona de perturbação que experimenta exposição à inundação cíclica, devido suas operações, induzindo movimentos de massa marginais que se misturam ao constante transporte de sedimentos oriundos de bacias hidrográficas adjacentes. O objetivo deste estudo é determinar a melhor fonte de imagens multiespectrais de média resolução espacial para diagnosticar processos hidrodinâmicos, propondo uma chave de classificação baseada em composição de bandas de imagens de satélite. Além disso, entender quais os principais tipos de movimentos de massa que ocorrem e como os fatores naturais e antrópicos condicionam estes eventos. Para isso, comparou-se qualitativamente imagens dos satélites Landsat-5 TM, Landsat 8 OLI e Sentinel-2 MSI, em combinações de bandas simples e baseadas em equação com imagens detalhadas obtidas por aeronave remotamente pilotada. Verificou-se que a associação entre a composição simples cor verdadeira 432 juntamente com a composição VRE-VIS, adaptada neste estudo, fornecem realces de transporte de sedimentos ativos em solo exposto nas margens do reservatório e a combinação VNIR-VRE2, também adaptada, apresenta melhor nitidez em relação à profundidade da lâmina d'água.

Palavras-chave: Usina Hidrelétrica, Reservatório Tropical, Perda de Solos, Sentinel, Rio Paraná.

Abstract

The region of water level fluctuation in reservoirs represents a disturbance zone that experiences exposure to cyclical flooding, due to its operations, inducing marginal mass movements that mix with the constant transport of sediments from adjacent hydrographic basins. The objective of this study is to determine the best source of multispectral images of medium spatial resolution to diagnose hydrodynamic processes, proposing a classification key based on the composition of satellite image bands. In addition, understand what the main types of mass movements occur and how natural and anthropic factors influence these events. For this, we qualitatively compare images from the Landsat-5 TM, Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI satellites, in combinations of simple bands and based on equation with detailed images obtained by remotely piloted aircraft. We found that the association between the simple composition true color 432 together with the composition VRE-VIS, adapted in this study, provides enhancements for transporting active sediments on exposed soil at the reservoir margins and the combination VNIR-VRE2, also adapted, presents better clarity in relation to the depth of the water depth.

Keywords: Hydroelectric Plant, Tropical Reservoir, Soil Loss, Sentinel, Paraná River.

4.1 INTRODUÇÃO

O rio Paraná concentra um grande complexo hidroelétrico, no qual a dinâmica fluvial perdeu características naturais ao ser controlado por algumas barragens. O sistema opera com ciclos de erosão e deposição constantes, extremamente dinâmicos e

complexos devido a frequente transferência de energia no regime fluvial controlado por barragem. Os processos erosivos são intensificados e agravados em território com encostas íngremes e muito friáveis, oriundos do impacto de ondas com alturas significativas (OLIVEIRA, 2004). Como os rios represados apresentam um alto potencial de acumular sedimentos de grãos finos, devido à exposição à forte erosão e a carga anômala de sedimento localizada a montante da barragem, aumenta-se deposição de fluxos de detritos na planície de inundação a jusante durante eventos catastróficos de escoamento (GARCÍA et al., 2011).

As interações entre os processos geomorfológicos, hidrodinâmicos, geoquímicos e ecológicos fazem desta região uma unidade geomorfológica excepcional, sendo assim, as análises multitemporais de imagens de satélite e pesquisa de campo, contribuem para aprimorar o gerenciamento de reservatórios de usinas hidrelétricas (UHE) em cascata. Porém, há poucos estudos científicos sobre o impacto do represamento de água em erosão do solo, sendo que a maioria dos estudos ocorreu em regiões frias ou temperadas, com apenas alguns estudos em regiões tropicais (BAO, 2018).

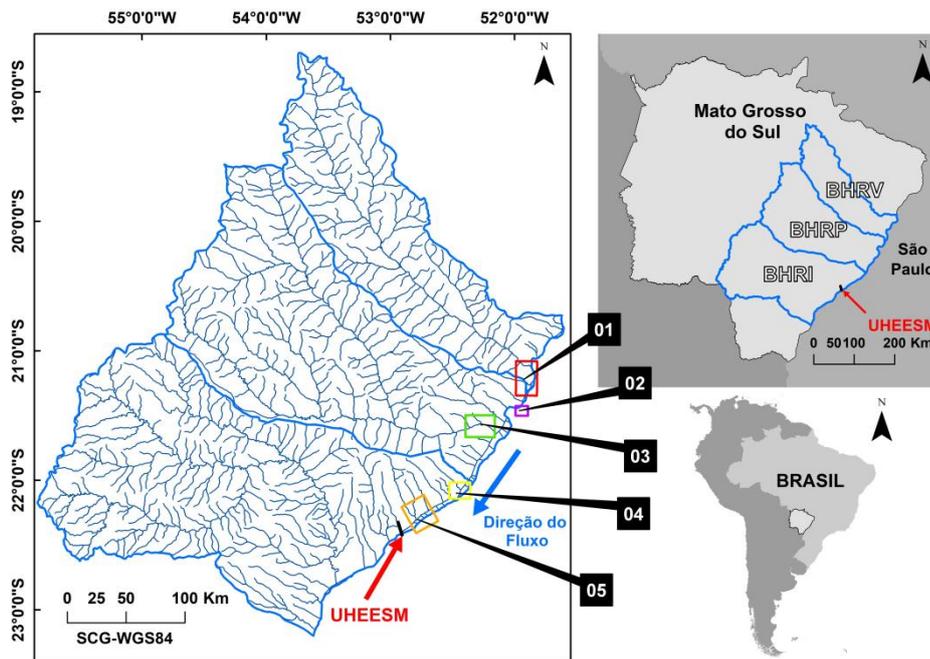
Nesse contexto, o presente trabalho descreve e contextualiza impactos ambientais em zona de perturbação de reservatório tropical com intuito de extrair informações qualitativas de dinâmica fluvial e de processos erosivos marginais. Inicialmente realizamos uma revisão na literatura sobre o contexto histórico de uso e ocupação do solo em regiões impactadas por barragens e como as geotecnologias vêm sendo aplicadas para diagnosticar estas áreas. Esta etapa é fundamental para que haja uma abordagem holística de processos erosivos, tendo em vista que estes são induzidos tanto por fatores naturais quanto antrópicos.

O estudo também faz uso de geotecnologias em diferentes escalas espaciais e temporais a montante da barragem Porto Primavera, a qual contém o reservatório da Usina Hidroelétrica Engenheiro Sérgio Motta (UHEESM) com intuito de identificar qual dentre as técnicas de realce têm maior aplicabilidade para determinar locais onde operam processos erosivos marginais em reservatório, tendo em vista o detalhamento realizado em campo com aeronave remotamente pilotada. E por fim, elaborou-se um perfil topográfico esquemático detalhando como os atributos do meio físico influenciam na deflagração de movimentos de massa nas margens do reservatório.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a análise de 05 (cinco) trechos a montante da barragem Porto Primavera, o qual forma o reservatório da Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (UHEESM), sendo detalhado o 5º trecho indicado na Figura 1. A UHEESM apresenta a barragem mais extensa do Brasil, interligando os Estados de Mato Grosso do Sul (MS) e São Paulo (SP), com 11.380,41 metros de largura total, incluindo as estruturas de terra e de concreto (ANA, 2014). Com maior potencial hidrométrico do país, a porção brasileira da Bacia do Paraná conta com mais de 150 barragens hidrelétricas fazendo o rio Paraná e seus afluentes tornarem-se uma sucessão de lagos (STEVANUX; MARTINS; MEURER, 2009)

Figura 1. Localização da Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (UHEESM) em relação as bacias hidrográficas do Mato Grosso do Sul contidas nas áreas analisadas neste estudo ao longo do curso do rio Paraná, onde BHRI é Bacia hidrográfica do rio Ivinhema, BHRP é Bacia Hidrográfica do rio Pardo e BHRV é Bacia Hidrográfica do Rio Verde (ANA, 2020).



Fonte: Os autores

O seu reservatório é considerado o 4º maior em área do Brasil (2140 Km²) com a 8º maior em capacidade volumétrica (19,9 Km³), o que o enquadra na categoria de reservatório médio (MESS, 2014). O acesso a UHEESM é fácil, pois a usina localiza-se na Rodovia SP-613, no Km 78, sob as coordenadas UTM-22S 298739 E/

7512326 N; quanto ao acesso fluvial localiza-se a 28 km da confluência dos rios Paraná e Paranapanema.

A barragem conta com elevador, escada para peixes e uma eclusa que interliga o Brasil à rota do Mercado Comum do Sul (MERCOSUL). Insere-se parcialmente na Bacia Hidrográfica do rio Ivinhema (BHRI) (ARAI, 2010) e integralmente na Bacia da Área Drenada pelo rio Paraná (BADRP), onde apresenta áreas com vulnerabilidade a inundação (IMASUL, 2015). Situa-se na divisa entre os Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, este último teve grandes áreas submersa com a instalação da UHEESM. A extensão do reservatório da UHEESM comprometeu, principalmente, o território do Município de Anaurilândia - MS, onde 35% foi submerso com o enchimento do reservatório (OLIVEIRA, 2004).

Os solos dessa região são predominantemente Latossolos e Argissolos que ocupam o topo de colinas amplas, suaves e dissecadas, bem como, morros baixos, escarpas serranas, planaltos e superfícies aplainadas degradadas (CPRM, 2009). Ocorrem Argissolos limítrofes à superfície de inundação e Planossolos próximos às margens dos principais cursos d'água afluentes da margem direita do rio Paraná. Associações complexas de Argissolos com Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Litólicos e areias quartzosas inconsolidadas também são evidenciadas ao longo das margens do rio Paraná (SEPLAN, 1988). O substrato rochoso genericamente é constituído por arenitos quartzosos, de granulação fina a média, secundariamente subarcoseanos e com boa maturidade textural, formando estratos tabulares, estratificações cruzadas e laminações plano-paralelas (CPRM, 2006a; CPRM, 2006b; CPRM, 2009).

O clima na região é tropical úmido continental, com média anual entre 20°C a 22°C, apresenta acentuada amplitude térmica anual, mensal e diária, inserida na trajetória de anticiclones polares, onde ocorrem episodicamente geadas durante outono e inverno (OLIVEIRA, 2004). A média anual das chuvas varia de 1.300 a 1.500 mm, sendo o verão o período com maior volume pluviométrico, cerca de 520 mm, conforme média sazonal de uma série de 31 anos (AMADOR, 2017). Esta autora constata ainda registros de anos excepcionalmente chuvosos no verão e super secos na primavera, onde os maiores volumes de chuva mostram tendência de acúmulo ao final da estação de verão.

As maiores precipitações ocorrem nas regiões de cabeceira, tal como, as maiores vazões específicas médias de longa duração, sendo o rio Dourados o maior

contribuinte potencial e real na BHRI (ARAI, 2010). Com influência de anticiclone subtropical e zona de convergência do Atlântico Sul, e outros sistemas meteorológicos, esta região possui a menor taxa de precipitação acumulada durante a estação seca (junho, julho e agosto) em relação ao restante do Estado de Mato Grosso do Sul (TEODORO et al., 2016).

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados selecionados são imagens dos satélites Landsat-5 TM (L5), Landsat-8 OLI (L8) e Sentinel-2 MSI (S2) disponíveis gratuitamente pelo no site oficial do Serviço Geológico Americano (USGS, 2020a), sendo considerado um intervalo médio de 5 anos entre as imagens Landsat e o mesmo ano para as Sentinel, conforme disponibilidade e limitações do intervalo de aquisição de cada série de imageamento. Nas imagens L5 e L8 os valores digitais dos pixels foram convertidos a valores de radiância e em seguida reflectância no topo da atmosfera com auxílio do módulo *i.atcorr* integrado ao software *QGis 3.10*.

O detalhamento desse procedimento pode ser visto em Shiroma et al. (2020). As imagens do S2 adquirida no nível 1-C já possuem a reflectância ortorretificada na atmosfera (TOA) e subpixel com registro multiespectral. A Tabela 1 dispõe em detalhe cada uma das imagens utilizadas neste trabalho.

Tabela 1. A filtragem e seleção de dados de imagens do Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI para o mesmo local em estudo.

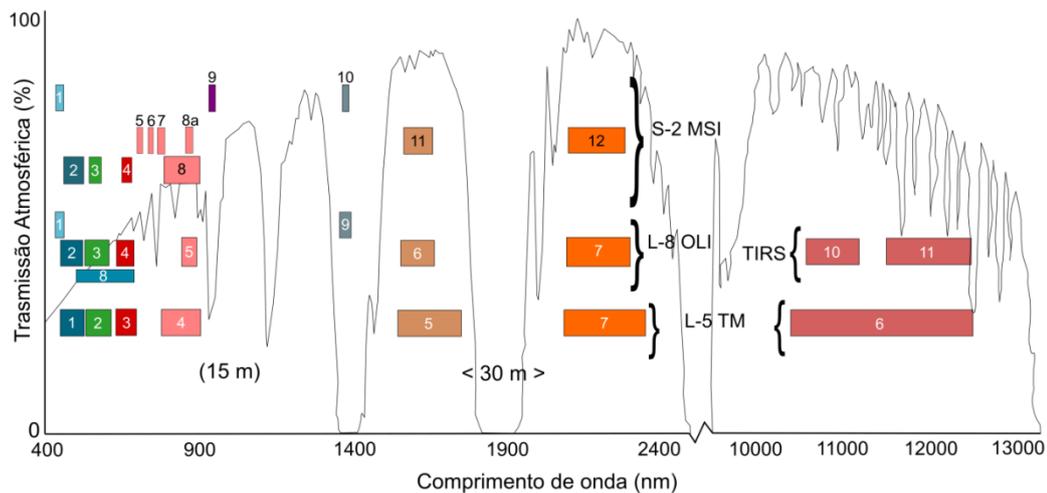
Data	Sensor	Órbita Ponto	Cobertura de Nuvens (%)	Hora de Aquisição	Ângulo Azimutal Solar	Ângulo Zenital Solar
30/09/2019	L8	223/075	0.0	13:28:46	58,706905	57,217976
28/09/2019	S2	124/T22KCA	9.5	13:42:09	51,054578	30,038090
08/09/2019	S2	124/T22KCA	16.3	15:21:24	43,844004	36,887880
08/09/2011	L5	223/075	21.6	13:17:03	53,022192	48,035318
29/07/2008	L5	223/075	1.3	13:14:53	43,159120	37,047784
18/09/2003	L5	223/075	3.7	13:06:27	59,307206	48,952825
17/09/1997	L5	223/075	0.0	13:00:54	60,178959	47,795915

Fonte: United States Geological Survey (2020a), compilado pelos autores.

De posse destas imagens foi feito o empilhamento de bandas para composição simples de cor verdadeira e falsa-cor baseado em equação. A resolução espectral

destes três sensores multiespectrais é similar (Figura 2), abrangendo faixas do espectro eletromagnético compatíveis para comparação em estudos ambientais, pois mostram correlação quase que perfeita para cenas do mesmo dia e área, podendo ser usadas conjuntamente para criar séries temporais de observação mais densas para avaliar mudanças na paisagem (RUNGE; GROSSE, 2019).

Figura 2 – Comparação entre Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI.



Fonte: United States Geological Survey (2020b), editado pelos autores.

Wang et al. (2018), visando o mapeamento preciso de corpos hídricos propuseram o Índice Multiespectral de Água Completo e Revisado (MuWi-C e MuWi-R), com a utilização de bandas multiespectrais do S2 (Equação 01), suprimiram as limitações do Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI - (Mc FEETERS, 1996), do Índice Modificado de Água por Diferença Normalizada (XU, 2006) e do Índice Automático de Extração de Água (FEYISA et al., 2014). O MuWi-C obtém maior precisão geral, porém o MuWi-R tendo em vista sua maior simplicidade de cálculo, também executa ótimo desempenho e acurácia, sendo que ambos os índices reduziram as classificações errôneas de sombra e brilho solar sobre corpos hídricos, em relação aos propostos anteriormente.

$$\text{MuWi-R} = -4 \left[\frac{(\rho_{\text{blue}} - \rho_{\text{green}})}{(\rho_{\text{blue}} + \rho_{\text{green}})} \right] + 2 \left[\frac{(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{NIR}})}{(\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{NIR}})} \right] + 2 \left[\frac{(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{SWIR2}})}{(\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{SWIR2}})} \right] - \left[\frac{(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{SWIR1}})}{(\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{SWIR1}})} \right] \quad \text{Equação 1}$$

1

Onde:

ρ_{blue} : É a reflectância na banda do azul (coc: 0,490 μm);

ρ_{green} : É a reflectância na banda do verde (coc: 0,560 μm);

ρ_{NIR} : É a reflectância na banda do infravermelho próximo (coc: 0.842 μm);
 ρ_{SWIR1} : É a reflectância na banda do infravermelho de ondas curtas (coc: 1.610 μm);
 ρ_{SWIR2} : É a reflectância na banda do infravermelho de ondas curtas (coc: 2.190 μm);
coc = comprimento de onda no centro.

Para o realce de características da água por imagem de satélite utilizou-se o repositório *GitHub*, o qual funciona como plataforma colaborativa de hospedagem de código-fonte livre e aberto para programadores e usuários em geral, onde acessou-se o repositório sobre composições de imagens Sentinel disponibilizada por Volkmer (2020). Este autor originalmente utilizou nas composições VNIR-VRE1, VNIR-VRE2, VRE-VIS, e o NDWI de McFeeters (1996). Neste estudo foi substituído o NDWI pelo MuWi-R de Wang et al. (2018), conforme Tabela 2. Para permitir melhor comparação entre os objetos hídricos e não hídricos, foi equalizado os parâmetros de ajuste fino da imagem, conforme Tabela 3.

Tabela 2. Equações aplicadas para composição RGB das bandas multiespectrais, sendo o NDWI (Índice de de Água por Diferença Normalizada) de McFeeters (1996) na composição proposta por Volkmer (2020) substituído pelo MuWI-R (Índice Multiespectral de Água Revisado) de Wang et al. 2018.

Sentinel 2 – MSI		
VNIR-VRE1	VNIR-VRE2	VRE-VIS
$R = [(\rho_{\text{red}} * 7) - (\rho_{\text{NIR}} * 7)] * \text{MuWI-R}$	$R = [(\rho_{\text{red}} * 7.5) - (\rho_{\text{NIR}} * 4)]$	$R = [(\rho_{\text{red}} * 3) - \rho_{\text{red edge 1}}]$
$G = (\rho_{\text{red edge 2}} * 7)$	$G = [(\rho_{\text{green}} * 2) + (\rho_{\text{red edge 2}} * 6)]$	$G = [(\rho_{\text{green}} * 3) + \rho_{\text{NIR}}]$
$B = (\rho_{\text{blue}} * 3)$	$B = [(\rho_{\text{blue}} * 4) + \text{MuWI-R}]$	$B = (\rho_{\text{blue}} * 3.5)$

Onde:

ρ_{red} : É a reflectância na banda do vermelho (coc: 0,665 μm);
 $\rho_{\text{red edge1}}$: É a reflectância na banda de borda do vermelho (coc: 0,705 μm);
 $\rho_{\text{red edge2}}$: É a reflectância na banda de borda do vermelho (coc: 0,740 μm);

Fonte: Os autores.

Tabela 3. Utilização da mesma configuração para visualização e realce das imagens pós-composição simples e baseada em equação entre bandas multiespectrais.

Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI e Sentinel-2 MSI
Contraste: 23
Brilho: 15
Transparência: 0
Fundo: ativo

Ajuste de faixa dinâmico: ativo
TopUp: ativo
Histograma: Porcentagem de corte

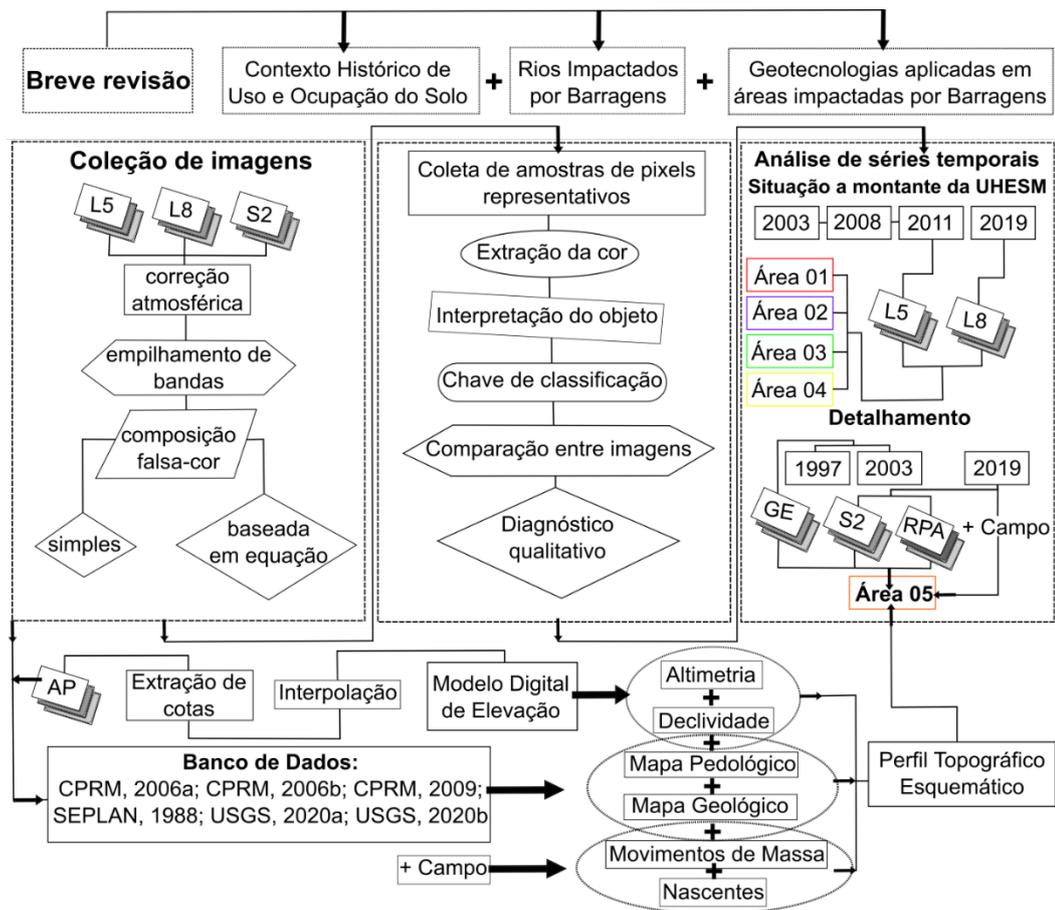
Fonte: Editado pelos autores em Image Analysis do ArcMap (ESRI, 2013).

Em seguida coletou-se amostras de pixels representativos que indiquem, através da diferença da cor da água, mudanças qualitativas em relação à turbidez, a vazão e a profundidade relativa ao nível de base local, gerando assim uma chave de classificação individualizada a partir dos níveis de cor RGB de cada pixel, extraídas com o *software* gratuito *Just Color Picker* (JCP, 2020). De posse desse resultado foi feita a comparação entre as séries temporais das imagens L5 e L8 considerando os anos de 2003, 2008, 2011 e 2019. Já para as imagens S2 comparou-se a interferência de cenas com baixa e média nebulosidade para diagnóstico dos mesmos parâmetros na água, para duas datas do mês de setembro de 2019.

Imagens do lapso de tempo, históricas e gratuitamente acessíveis do *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2019) foram utilizadas para dar suporte à delimitação das faixas de áreas de preservação permanente (APP) pré e pós-inundação, áreas de pastoreio do gado, cicatrizes de movimentos de massa nas margens e nos afluentes do rio Paraná. Em campo com a aeronave remotamente pilotada (RPA) foram coletadas imagens que mostram em detalhe o transporte de sedimentos nos taludes da margem direita do canal principal e os principais danos advindos desse processo atualmente ativo.

Empregamos a imagem de radar *ALOS Palsar* modo *FDB* de resolução nativa de 12,5 metros (Alaska Satellite Facility, 2010), foi usada para extração dos pontos cotados do modelo digital de elevação e interpolando estes valores pelo método *topo to raster*, os quais foram reamostrados para resolução espacial de 10 metros no ArcGIS versão 10.2.1 (2013). A partir deste produto obtiveram-se intervalos de altimetria e declividade do terreno. Os mapas pedológico (SEPLAN, 1988) e litológico (CPRM, 2006a; CPRM, 2006b e CPRM, 2009), ambos em escala 1:1.000.000 foram agregados aos dados de movimentos de massa e de nascentes obtidos em campo, permitindo a geração de um perfil topográfico esquemático, representando sinteticamente os processos atuantes no meio físico da zona de perturbação mais próxima ao barramento (área 05). A seguir a Figura 3 traz uma síntese de todo método empregado neste estudo.

Figura 3 – Síntese dos materiais e métodos aplicados neste estudo.



Fonte: Dos autores. Onde L5 = Landsat-5 TM, L8 = Landsat-8 OLI, S2 = Sentinel-2 MSI, GE = Google Earth, RPA = Aeronave Remotamente Pilotada, AP = Alos Palsar.

4.4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.4.1 CONTEXTO HISTÓRICO E LEGISLAÇÃO ESPECÍFICA

O início da construção da UHEESM, em 1979, e o seu projeto básico (1978) foram realizados sem a exigência de Estudo de Impacto Ambiental (EIA), pois não havia leis nem regulamentações sobre o tema à época (OLIVEIRA, 2004). Porém em 1980, a Companhia Energética de São Paulo editou o Controle Ambiental e Aproveitamento Múltiplo do Reservatório Porto Primavera, prevendo e definindo: Área de Influência, Área de desapropriação e Área de inundação (OLIVEIRA, 2004). Durante esse processo várias famílias foram indenizadas e reassentadas, e ocorreram resgates à fauna silvestre. O preenchimento da UHEESM, apesar de trazer medidas compensatórias e mitigatórias, não previu ações suficientes para

controlar danos provenientes da erosão marginal do rio Paraná e seus tributários, conforme previsto no “Programa de Controle Ambiental” (OLIVEIRA, 2004).

As fronteiras, a demarcação e ocupação das terras nesta região se intensificaram com a campanha marcha para oeste (1937 – 1945), porém havia migrações desde o início da década de 1930, havendo derrubada de florestas, forja da civilidade intervencionista e expansionista, promovida pela migração de sulistas, nordestinos e paulistas (ROSA; FERREIRA; ROSA, 2018). A porção sul e leste do Mato Grosso do Sul teve assentamentos instalados durante o período de 2001 a 2002, porém muito aquém do planejado, sem aplicação significativa da reforma agrária no Estado (FACHIN, 2016). Nas últimas décadas, a expansão canavieira substituiu antigas áreas de lavouras e pecuárias, sobretudo na BHRI, sendo ausentes políticas que regulamentem o uso do solo agrícola (TEIXEIRA; HESPANHOL, 2012).

A qualidade da água nesta região pode estar sendo impactada pela intensa adubação artificial, uma vez que os solos desenvolvidos sobre os arenitos são desprovidos de elementos químicos vitais ao desenvolvimento agrícola. Nesse sentido as perdas de solo anual, também promovem lixiviação da adubação empregada no cultivo da cana-de-açúcar (ARAÚJO; FURRIER; MONTEIRO, 2016). As drenagens artificiais de veredas, associadas a eventos sazonais de queimadas vêm provocando o rebaixamento do nível freático ao longo da BHRI, onde há necessidade dos buritizais serem considerados APPs (POTT; SILVA; GOMES, 2014). Outra demanda é o fortalecimento de políticas públicas, aplicadas de forma descentralizada e compartilhada para atender expectativas dos comitês de bacias hidrográficas (CBH's) locais e regionais (BATAGHIN et al., 2017).

Atualmente o CBH-Ivinhema passa por aperfeiçoamento técnico e cultural por parte de seus membros e busca com apoio do IMASUL (Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul) captar recursos financeiros para desenvolver Programas de Gestão Ambiental (PEPE; BEZERUK, 2013). A lei Estadual nº 2.406, de 29 de janeiro de 2002, institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e cria o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, no qual em seu Artigo 3º parágrafo 1º diz que compete ao instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL), outorgar e fiscalizar o direito de uso dos recursos hídricos. Sendo assim, o regime de outorga visa assegurar o controle quantitativo e qualitativo do uso das águas superficiais e subterrâneas, bem como o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (FERNANDES; OLIVEIRA, 2018).

4.4.2 USO DE GEOTECNOLOGIAS EM ÁREAS IMPACTADAS POR BARRAGENS

Imagens de satélite e cartas temáticas de detalhe são imprescindíveis para caracterização e análise de obras de engenharia que causam grandes mudanças na geomorfologia fluvial, como é o caso de rios impactados por barragens, pois fornecem dados qualitativos e quantitativos essenciais (ARAÚJO; FURRIER; MONTEIRO, 2016). Escaneamento terrestre móvel aliado a tecnologias de detecção de altimetria variável com geração de nuvem de pontos (*Laser Scanner* e *LiDAR*) são também alternativas ao monitoramento da dinâmica erosiva marginal em reservatórios, podendo ser implementado integração de imagens RGB para classificações e filtros automatizados (TOMMASELLI et al.; 2014).

Para fornecer diagnósticos das mudanças na morfologia fluvial de rios impactados por barragens, Coelho e Cunha (2019) propõem o monitoramento por análises multitemporais com planos de informações em várias escalas cartográficas em sistemas de informações geográficas, campanhas de campo com entrevistas a comunidade local e estimador *kernel* para identificar onde as erosões marginais são mais intensas. Com sensoriamento remoto é possível diagnosticar qualitativa e quantitativamente as variáveis físico-químicas da água, maximizando o potencial do monitoramento indireto e embasando a tomada de decisões protetivas e preventivas, sendo que em rios geralmente são avaliados parâmetros tais como: transporte de sedimentos, erodibilidade, qualidade da água, carreamento e fixação de nutrientes, entre outros (LIMA et al. 2019).

4.4.3 RIOS IMPACTADOS POR BARRAGENS

Erosão, transporte e deposição nos ambientes fluviais variam ao longo do tempo e são interdependentes, causando mudança no fluxo e na carga existente (COELHO, 2008). A velocidade da água depende principalmente de fatores geomorfológicos e hidrológicos, tais como: os padrões de drenagem e da geometria do leito geram variações nos diversos setores do canal no qual a água flui e culminam em processos específicos de erosão, transporte e deposição (COELHO, 2008).

O Quadro 1 distingue entre os três principais setores da bacia hidrográfica os impactos hidrológicos e geomorfológicos promovidos por barramentos de canais fluviais.

Quadro 1 - Alterações hidrológicas e geomorfológicas em setores de rio represado.

SETOR DA BACIA	PRINCIPAIS IMPACTOS HIDROLÓGICOS	PRINCIPAIS IMPACTOS GEOMORFOLÓGICOS
Montante da barragem	Deposição de carga sólida; Mudança térmica das águas; Redução da velocidade do fluxo; Ascensão do nível de base local; Criação de lago; Modificação do balanço hídrico; Alteração na qualidade da água; Estratificação térmica da água; Diminuição da vazão média por aumento da evaporação*.	Assoreamento na desembocadura dos rios principais; Assoreamento no fundo dos vales principais; Assoreamento na desembocadura e no fundo dos vales afluentes; Formação de novas áreas de inundação.
No reservatório e periferia	Armazenamento de carga líquida; Armazenamento de carga sólida; Modificação no conteúdo de gases dissolvidos; Elevação do nível piezométrico (compressibilidade dos líquidos); Alteração nas taxas de infiltração; Maior disponibilidade de água subterrânea; Ocorrência de inundações; Assoreamento no reservatório; Redução da vida útil da barragem; Alteração na transparência da água; Alteração na estrutura térmica da água.	Submersão das formas de relevo; Processos de abrasão lacustre; Recuo das margens ou das falésias lacustres; Formação de praias e depósitos de abrasão; Processos de assoreamento; Formação de bancos arenosos emersos ou imersos; Formação de lagoas fechadas; Colmatação da desembocadura dos rios principais; Formação de novas áreas de inundação.
A jusante da barragem	Controle da regularização das descargas; Redução da carga sólida transportada e da turbidez da água; Modificação das características de transporte da carga de fundo; Salinização da água; Alteração na estrutura térmica; Redução do nível piezométrico; Alterações nas taxas de infiltração; Menor disponibilidade de água subterrânea; Redução na variabilidade sazonal e na magnitude das cheias; Alteração no padrão de variação de temperatura da água*.	Entalhe no leito do rio, com conseqüente descida do nível de base local; Modificação nas taxas de erosão de ilhas e margens; Descida do nível de base dos afluentes com retomada erosiva (entalhe) dos seus leitos; Processos de erosão nas margens; Alteração nos sedimentos de fundo e das margens; Reajustamento na morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação; Processos de deposição nas margens e fundo do leito e alteração na textura da carga de fundo; Alteração na pendente; Modificações na dinâmica da foz.

*Efeitos mais evidentes em rios de clima temperado ou semiárido. Fonte: Cunha (1995) apud Coelho (2008); Petts (1984, 1999), Downs e Gregory (2004), Stevaux et al. (2009), Martins (2008) e Stevaux, Martins e Meurer (2009) apud Stevaux e Latrubesse (2017).

Os principais impactos ambientais presentes na área drenada pelo rio Paraná (BADRP) são: assoreamento, queimadas e redução do pescado. Dentre as formas de uso e ocupação do solo predominam: a agricultura (39%) e as pastagens (22%), com aptidão agrícola para este tipo de atividade (IMASUL, 2015). Este mesmo órgão aponta que quase metade (47%) das nascentes não possui a faixa mínima de APP preservada, das quais cerca de 38% foram apropriadas por atividades agropecuárias.

O maior uso de recursos hídricos está ligado à irrigação e dessedentação de animais, cujo panorama de impactos ambientais já produziu efeitos de diminuição da produtividade econômica e degradação da fauna e da flora aquática (IMASUL, 2015). Fatores como, desrespeito ou desconhecimento da população à legislação vigente e aspectos econômicos e culturais aliados, ou não, com a omissão do poder público nas mais diversas esferas, podem conduzir a este panorama (SANTOS et al, 2016).

4.4.4 DIAGNÓSTICO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NA ZONA DE PERTURBAÇÃO DE RESERVATÓRIO TROPICAL

A banda individual de cada satélite pode ser aplicada para discriminar objetos terrestres e aquáticos em níveis de cinza, porém quando empilhadas podem gerar uma combinação cor-verdadeira ou falsa-cor com amplo espectro cromático no sistema vermelho-verde-azul (RGB).

Sendo assim, a banda do azul das imagens L5, L8 e S2 são úteis para mapear o nível batimétrico e delimitar corpos hídricos, diferenciando-os do solo, da vegetação e de áreas construídas, enquanto que a banda do verde destes satélites enfatiza sedimentos em suspensão e a banda do vermelho permite maior contraste de áreas com e sem vegetação (FRANCO, 2017). Nesse contexto, obtivemos da composição entre estas bandas a chave de classificação conforme Figura 4.

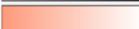
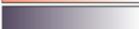
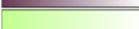
Figura 4 – Legenda para classificação de corpo hídrico em relação à turbidez, profundidade relativa do nível d'água e vazão em resposta a refletância dos objetos na composição colorida das imagens de satélite.

Legenda de classificação de corpos hídricos proposta neste estudo, baseada na composição RGB dos sensores: Landsat-5 TM (321), Landsat-8 OLI (432) e Sentinel-2 MSI (432)

Faixa de cores detalhada para objetos hídricos:

	Água rasa com baixíssima turbidez e alta vazão
	Água rasa com elevada turbidez e altíssima vazão
	Água rasa com elevada turbidez e alta vazão
	Água rasa com banco de areia quase emerso
	Água rasa com elevada turbidez média vazão
	Água rasa com elevada turbidez e baixa vazão
	Água rasa com substrato rochoso quase emerso
	Água rasa com média turbidez e baixa vazão
	Água profunda com elevada turbidez e média vazão
	Água profunda com elevada turbidez e baixa vazão
	Água com elevada turbidez e concentração de matéria orgânica e baixa vazão
	Água profunda com baixa turbidez e baixa vazão
	Cobertura de nuvens sobre corpo d'água

Faixa de cores genérica proposta para objetos não-hídricos:

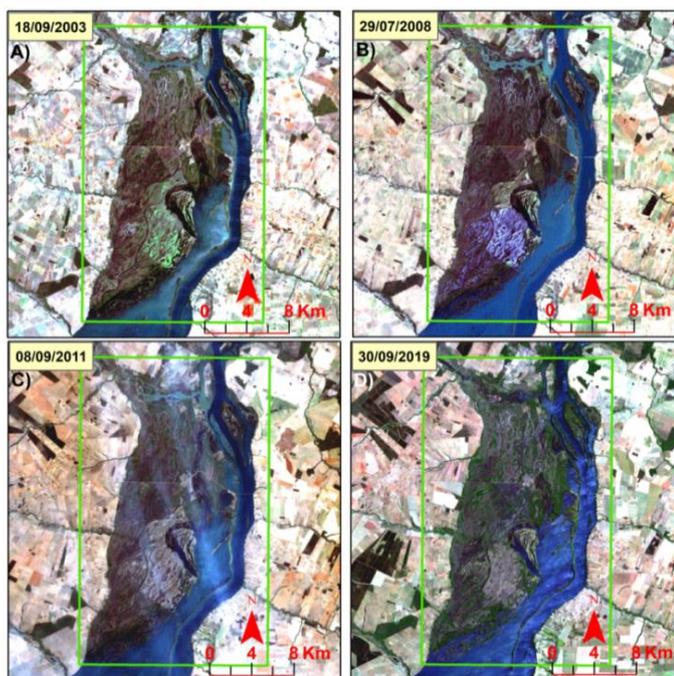
	Áreas Contruídas / Concreto / Asfalto
	Solo exposto
	Solo agrícola parcialmente exposto
	Solo / Rocha / Sedimento expostos
	Vegetação rasteira / Gramíneas / Algas
	Vegetação arbórea e arbustiva

Fonte: Dos autores

Ao analisar a Área 01 (Figura 5) identifica-se a planície aluvial na confluência entre o rio Verde com o rio Paraná, contendo pântanos e lagoas concatenadas que compõe a planície de inundação, com corte de colo de meandro. A turbidez da água ao longo de toda série temporal é maior na margem direita, onde uma ilha fluvial alongada no centro do canal principal de drenagem isola a carga sedimentar oriunda dos tributários da parte sul-matogrossense.

Nesta série verifica-se que o período com maior turbidez na margem direita do rio Paraná ocorre na cena de 2003 (Figura 5A), já em 2008 (Figura 5B) fica nítido o acúmulo de sedimentos na confluência de afluente da margem direita do rio Paraná, devido a mudança do vetor de transpote do fluxo, diminuindo a energia do transporte. Na cena de 2011 (Figura 5C), ocorre a interferência da cobertura de nuvens, a qual mascara a batimetria e o material particulado na água. Na cena de 2019 (Figura 5D) tem-se a dispersão de sedimentos finos em ambas as margens devido a maior turbulência das correntes, provavelmente influenciada por ventos.

Figura 5 – Área 01.



Fonte: Dos autores.

A Área 02 mostra a confluência do rio do Peixe (margem paulista) com o rio Paraná (Figura 6), onde observa-se a influência do regime de vazão provocado pela abertura das comportas, a qual interfere diretamente na turbidez da água.

O ano de 2003 (Figura 6A) foi o período de menor vazão e maior redução do nível d'água, expondo rochas no leito e na base da barragem e com elevada turbidez destacada em tons de azul esverdeados mais claros.

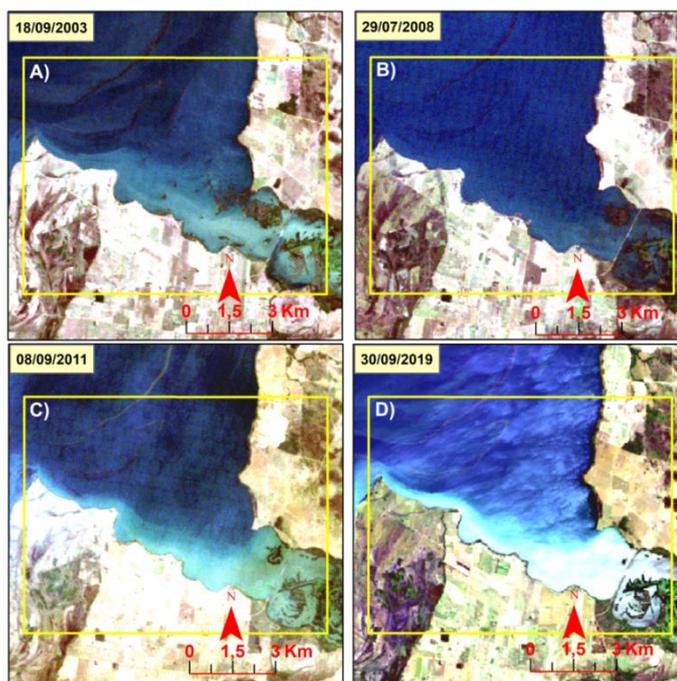
A cena de 2008 (Figura 6B) mostra a subida do nível d'água, que em relação a cena anterior encobre grande parte das rochas do leito, deixando-as submersas. Verifica-se que este evento possibilita maior dissolução de sedimentos finos e decantação, o que diminui a turbidez.

O ano de 2011 (Figura 6C) foi um período com nível d'água ainda mais elevado do que o anterior (Figura 6B), sendo a turbidez oriunda de sedimentos transportados e em suspensão pelo rio do Peixe é realçado. Em 2019 (Figura 6D) com a abertura das comportas, houve aumento expressivo da vazão fazendo com que a mistura água/sedimento aumente a refletância do corpo hídrico, devido a presença de vapor d'água e sedimentos areno-argilosos em movimento caótico de saltação.

Na Área 03 (Figura 7) observa-se para a cena de 2003 (A), 2008 (B), 2011 (C) e 2019 (D) a manutenção contínua de elevada capacidade de transporte de sedimentos da bacia de drenagem do rio Pardo, contribuindo com elevado aporte de

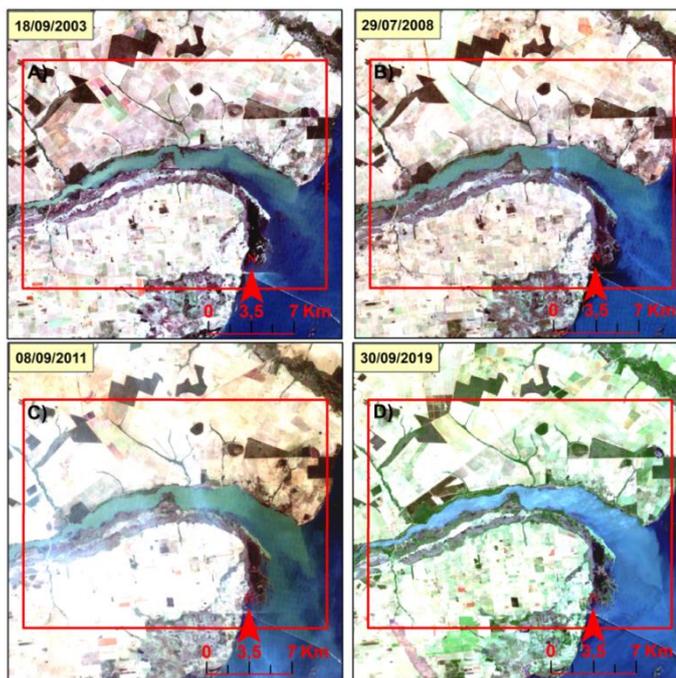
material em suspensão para dentro do rio Paraná, e conseqüentemente elevada turbidez. Provalvelmente há um incremento da velocidade de escoamento e da energia do fluxo turbulento, conforme Figura 7D, tendo em vista que a frente de deposição da pluma de sedimentos alcança maior distância quando comparada aos períodos anteriores.

Figura 6 – Área 02.



Fonte: Dos autores.

Figura 7 – Área 03.



Fonte: Dos autores.

Na Área 04 (Figura 8) tem-se ilhas fluviais e ressaco, onde há uma zona de baixa velocidade de fluxo, favorecendo a decantação de material fino da corrente e a separação do fluxo.

A Figura 8A mostra que ocorre a emersão do leito rochoso na margem direita, na Figura 8B a mudança da tonalidade da água indica maior turbidez em relação ao que se apresenta na imagem anterior (Figura 8A). A Figura 8C mostra a influência das nuvens sobre a visibilidade dos objetos no corpo hídrico e na Figura 8D é realçado o transporte de sedimentos ao longo das margens devido a erosão das mesmas, além da descarga de sedimentos dos tributários do rio Paraná (ribeirão Quiterozinho na margem direita e ribeirão das Pedras na margem esquerda) e a vegetação cobrindo as ilhas fluviais estabilizadas.

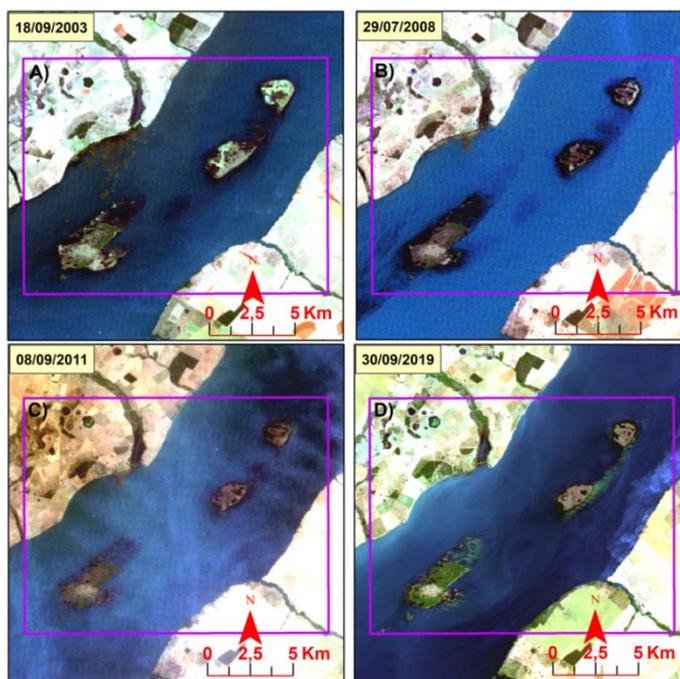
A Área 05 (Figura 09) mostra a comparação entre composições coloridas cores-verdadeira das imagens L8 e S2 (com nuvem e sem nuvem) no mês de setembro de 2019.

Na Figura 9A visualiza-se o contraste entre água pouco turva (azul escuro) com água muito turva (azul claro), esta última se concentra na margem direita do rio Paraná e apresenta na superfície da água uma textura lisa.

A Figura 9B apresenta a interferência das nuvens na cor, contraste e nitidez da imagem e na Figura 9C a superfície da água apresenta padrão rugoso, onde a cor, o

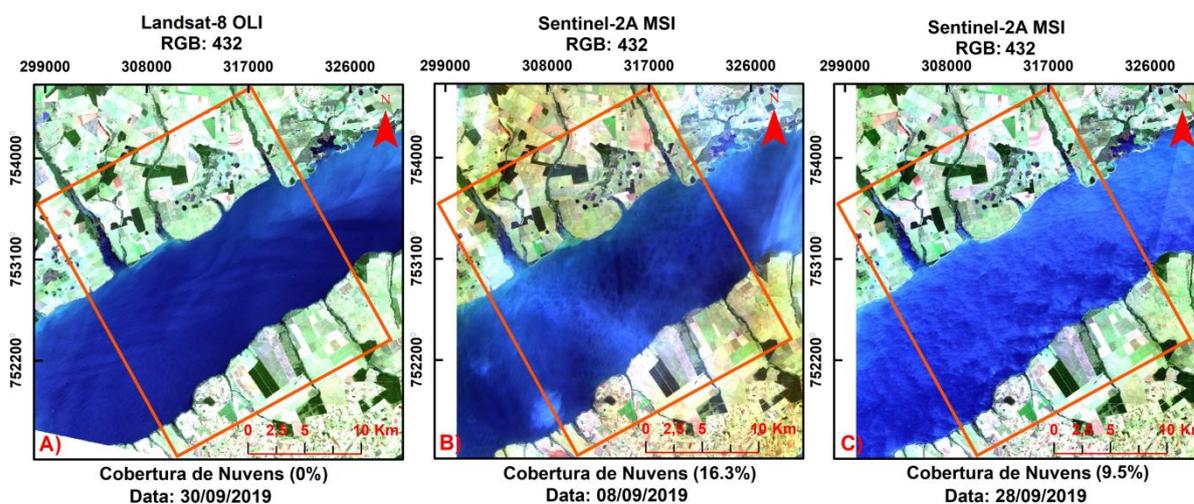
contraste e a nitidez são realçados, devido à melhor resolução espacial e a baixa densidade de nuvens, sendo perceptível a tendência do aumento da turidez (azul mais claro) na margem direita do rio Paraná.

Figura 8 – Área 04.



Fonte: Dos autores.

Figura 9 – Área 05 com cores verdadeiras em imagens L8 e S2.

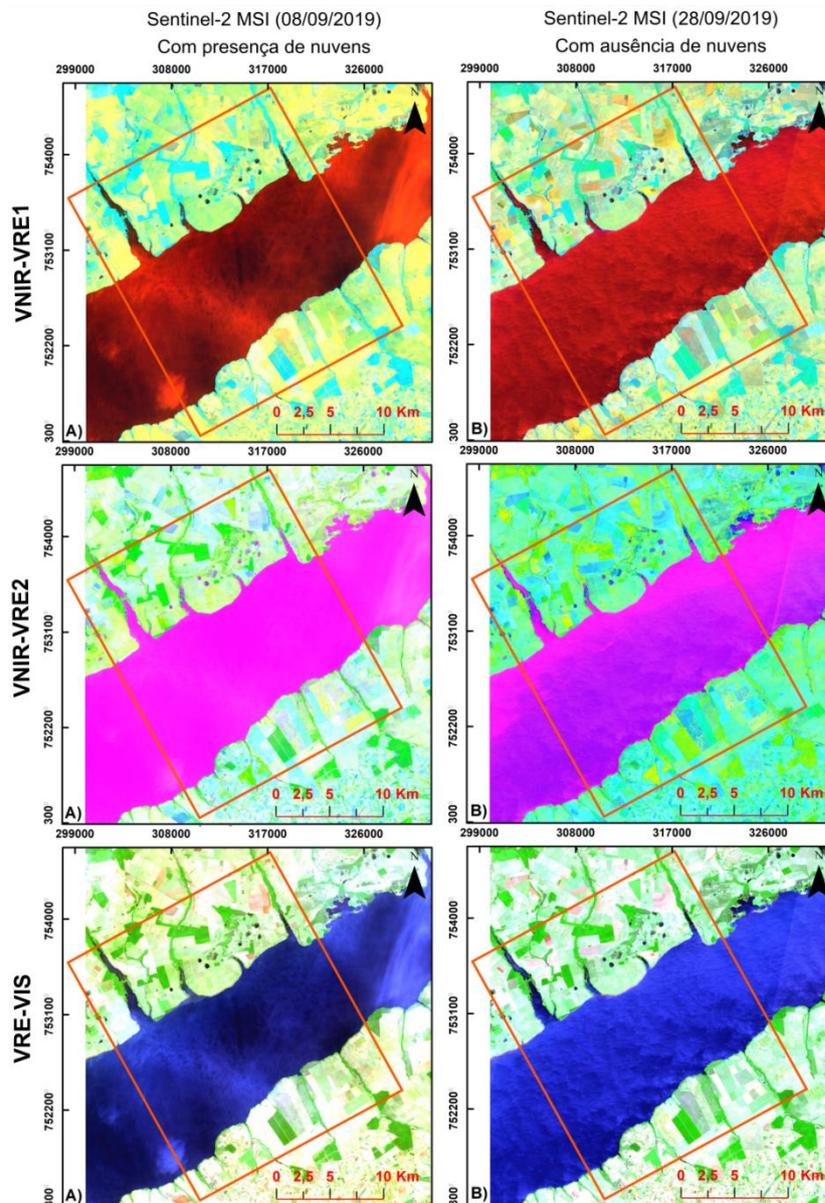


Fonte: Dos autores.

Com a aplicação da composição de bandas, baseada em equação (Figura 10), obtém-se a comparação entre imagens S2 com alta e com baixa nebulosidade. Verifica-se que a acurácia visual de objetos na água na composição VNIR-VRE1 (A) e (B) realça a profundidade da lâmina d'água e a rugosidade do canal, porém é fortemente influenciada por nuvens, mesmo que esta esteja em porcentagens menores do que 20% de cobertura na área, modificando significativamente a reflectância dos objetos e a reamostragem dos pixels. A Composição VNIR-VRE2 (A e B) realça melhor a profundidade da lâmina d'água no canal principal em relação a VNIR-VRE1 e a VRE-VIS reduzindo a rugosidade da imagem, porém é fortemente prejudicada pela presença de nuvens, até mais do que VNIR-VRE1. A VRE-VIS (A e B) consegue realçar o solo exposto e diminuir a interferência das nuvens na imagem.

Em comum todas as composições de bandas ao utilizarem bandas espectrais na borda do vermelho (*red edge*), infravermelho próximo e azul, permitiram a detecção de turbidez em águas opticamente rasas. O S2 capta bem a batimetria em até 10 metros de profundidade, apresentando erros de até 0,58 metros em profundidades que variam de 0 a 18 metros (CABALLERO; STUMPF; MEREDITH, 2019).

Figura 10 – Comparação entre imagens Sentinel-2 MSI com presença e com ausência de nuvens na acurácia visual de objetos na água.



Fonte: Dos autores.

Constata-se que um dos principais fatores que desencadeiam elevado aporte de sedimentos na margem direita (setor sul-matogrossense) está relacionado ao uso agropecuário do terreno (Figura 11), onde Áreas de Preservação Permanentes que possuem acesso ao pastoreio do gado (Figura 11A) intensificam a compactação do solo, favorecendo a instalação de processos erosivos não relacionados diretamente a ablação derivada do impacto de ondas do reservatório nas margens.

Na Figura 11B evidencia-se acesso às margens do córrego Segredo e na Figura 11C o acesso às margens do córrego Fumaça, ambos afluentes da margem direita do rio Paraná.

Na Figura 11D observa-se a cicatriz de deslizamento de terra recente em argissolo vermelho com textura areno-argilosa em decorrência do fatores como desmatamento, pisoteio de gado e provável ascensão do nível piezométrico local, onde o solo sazonalmente tende a se saturar em períodos prolongados de precipitação pluvial, com acumulados em março (AMADOR, 2017).

Na comparação entre imagens do satélite L5 e L8 (Figura 12), pré-inundação (Figura 12A) ocorrida em 1998 e pós-inundação (Figura 12B), destaca-se como a APP demarcada entre as linhas rosa e amarela foi afetada com o avanço da linha de costa. Anterior a inundação a APP possuía larguras entre 106 a 50 metros (Figura 12C) e após a inundação a área inundada reduziu de 84 a 9 m a APP (Figura 12D).

Figura 11 – Constatação de Áreas de Preservação Permanentes acessíveis ao pastoreio do gado.

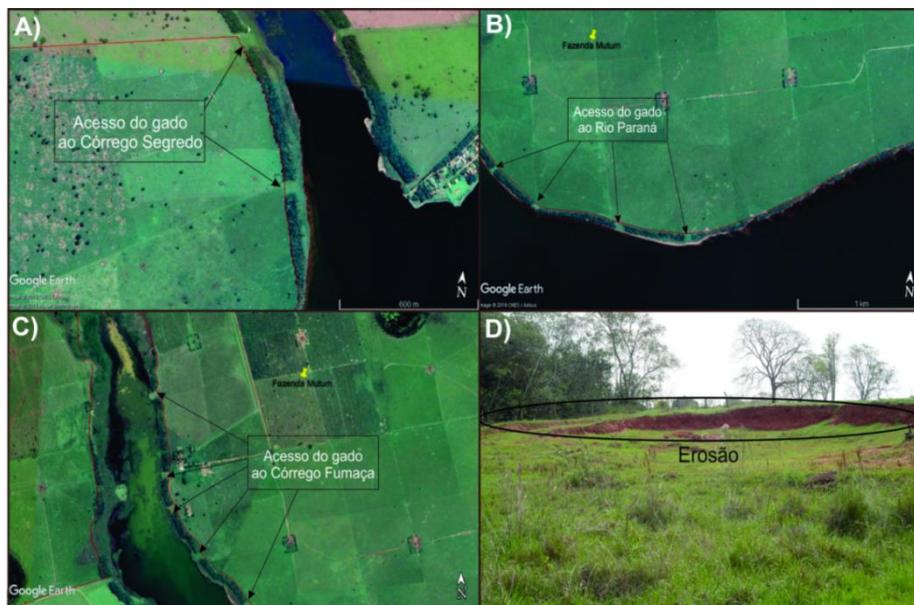
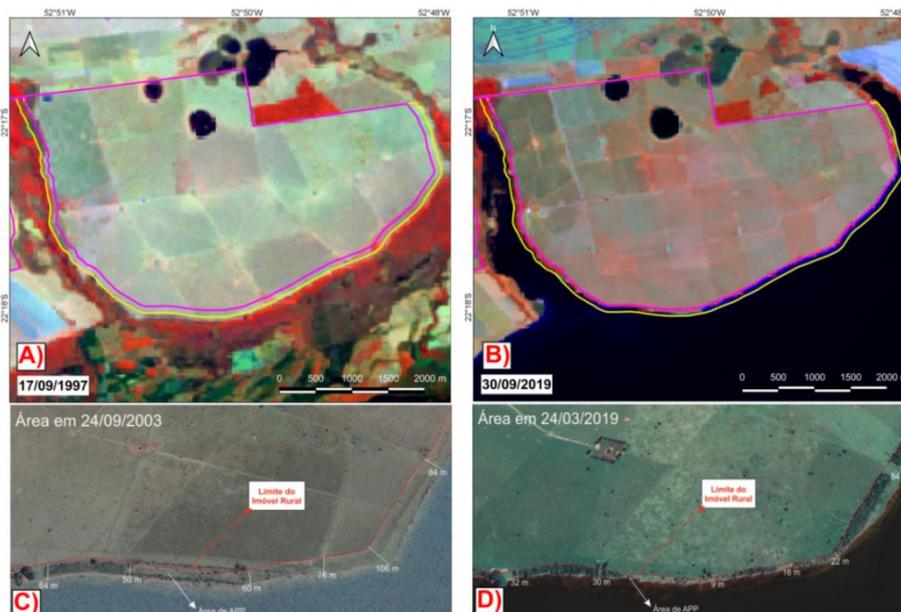


Figura 12 – Comparação entre imagens do satélite L5 e L8 pré e pós-inundação em relação às áreas de preservação permanentes.



Fonte: Dos autores.

A Figura 13 mostra que a composição cor-verdadeira (RGB:432) realça o transporte de sedimentos oriundo de processos de erosão do material friável das margens impactada pela oscilação de ondas no reservatório (Figura 13 A).

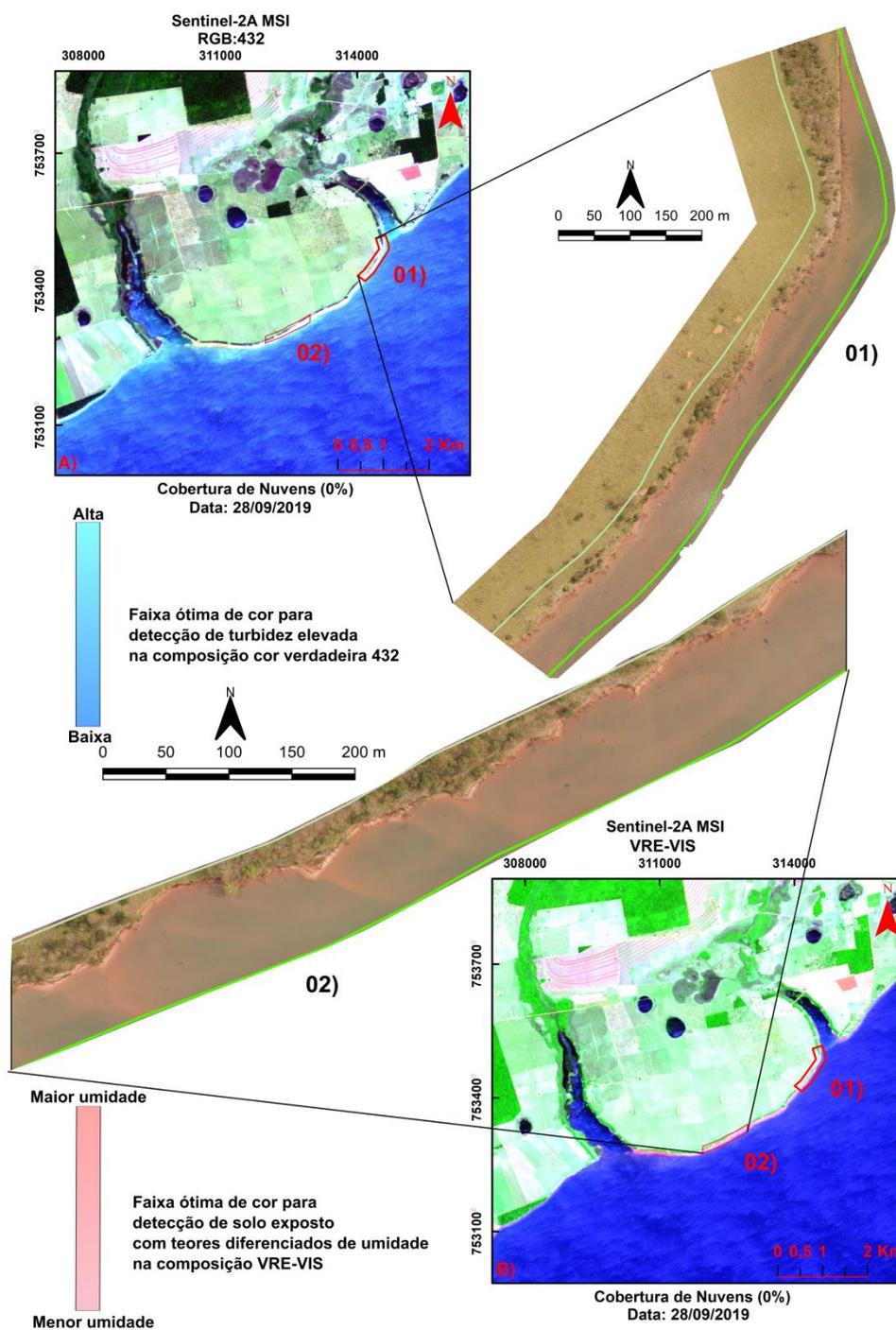
O intervalo de azul claro em comparação ao azul escuro é o que apresenta maior turbidez quando comparado com a imagem de alta resolução obtida pelo RPA (01) no mesmo local. Nesta composição o solo apresenta tons muito variados entre branco e rosado, possivelmente relacionado ao conteúdo relativo entre areia e argila.

Quando agrega-se a composição VRE-VIS (Figura 13 B), consta-se níveis diferenciados de umidade do solo, sendo que nas margens do reservatório (02) e em áreas agricultáveis, há uma faixa ótima de cor em níveis de rosa com tons semelhantes indicando solo exposto. O teor de umidade provavelmente afeta a tonalidade, sendo que solos mais secos ou bem drenados tendem a apresentar tons de rosa mais claros.

A Figura 14 apresenta o detalhamento das margens inundadas pelo reservatório da UHEESM, onde evidencia-se: (1) Queda de árvores de grande porte; (2) Incisão de sulcos erosivos transversais; (3) Deslizamento de terra associado a solifluxão; (4)

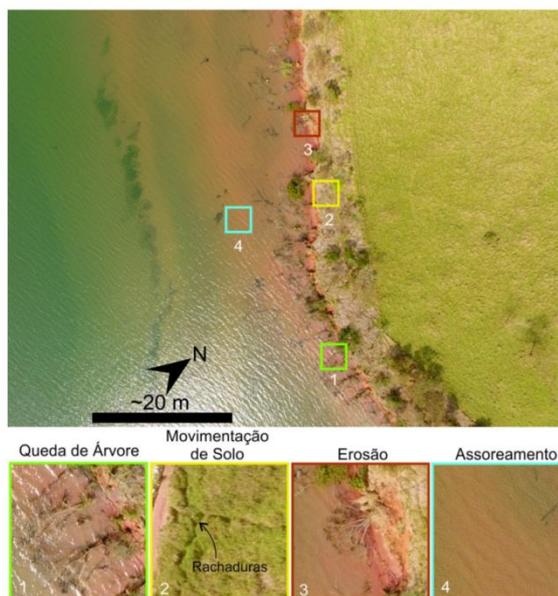
Turvação da água devido ao transporte e a elevada carga de material em suspensão oriundo de perda de solo das margens.

Figura 13 – Comparação entre imagens realçadas por composição de bandas do S2 com imagens de aeronave remotamente tripulada destacando efeitos da erosão marginal no reservatório.



Fonte: Dos autores.

Figura 14 – Detalhamento das margens inundadas pelo reservatório da UHEESM.



Fonte: Dos autores.

Taxas de erosão podem ser explicadas pelo aumento significativo da vazão e são mais intensas onde o canal principal (talvegue) se aproxima da margem, em que, partículas grosseiras do solo diminuem sua resistência ao cisalhamento, e os baixos valores de coesão favorecem excessiva drenagem interna tornando-o mais suscetível à oscilação do nível da água do rio (ROCHA, 2009). Somando-se a isto, mudanças no regime hidrológico, cobertura vegetal e gradiente de declive, são os principais fatores que governam os padrões espaciais e temporais da erosão do solo na zona de perturbação de flutuação do nível d'água de uma barragem (BAO, 2018). A proximidade do canal com o talvegue é uma das principais causas de perdas de solo, as quais estão associadas com meses com maiores valores de vazão, podendo ocorrer também erosão eólica em blocos de solos com perfis expostos (ROCHA et al., 2018). A perda por infiltração não deve ser negligenciada para não resultar em superestimação do hidrograma de descarga do reservatório, além disso, ela pode alterar consideravelmente o tamanho crítico do sedimento do leito, incorporando-o pelo movimento incipiente de fluxo ao transporte de sedimentos com o ajuste morfológico (NI et al., 2020).

O curso inferior do rio Ivinhema é constituído por uma sequência de blocos de falhas basculadas N-NW formadas por falhas antitéticas rotacionadas, as quais geraram altos estruturais que condicionaram zonas deposicionais em áreas baixas

adjacentes (FORTES; STEVAUX, VOLKMER; 2005). Este modelo, sustentado por estes autores, condizem com os dados obtidos neste estudo, no qual também é observado o entalhamento assimétrico dos vales, formando uma depressão que repercute em leques aluviais depositados preferencialmente na margem direita numa zona de mistura com colúvio oriundo da parte terrestre marginal erodida, favorecendo maior aporte de material inconsolidado em na margem esquerda.

O conjunto de áreas analisadas denota uma considerável variabilidade quanto às taxas de erosão marginal ao longo do reservatório. Genericamente, a margem esquerda é menos afetada por processos erosivos, mesmo possuindo declividades altas, uma vez que está estabilizada pelo substrato rochoso aflorante em compartimentos de relevo escarpado e menos favorável a formação de perfis espessos de solo. Porém este setor é suscetível a eventos de tombamento de terra quando há solo, geralmente neossolos.

Já a margem direita é menos estável devido à presença de perfis de solos mais espessos, onde leques aluvionares são retrabalhados por ondas, aumentando a turbidez e conseqüentemente a quantidade de sólidos totais em suspensão (Figura 15). A maior taxa relativa de erosão nesta margem é influenciada pelo aumento relativo da vazão, tendo em vista que a área total de decantação e a profundidade do canal são menores, conforme aferido indiretamente pela composição VNIR-VRE2, sendo a rugosidade e a geometria do canal fatores que induzem essa variação.

Mesmo nas margens vegetadas e com solos argilosos, o contato direto com a água do rio vem favorecendo a incidência de escorregamentos de terra com a evolução de cicatrizes e sulcos erosivos, sendo comum o tombamento de árvores na faixa de APP.

Há possibilidade de ocorrência de *pipping* ou processos de carstificação sendo induzidos com a subida do nível freático, porém será necessária a aplicação de métodos geofísicos de investigação aliados a mapeamentos geológicos de maior detalhe para confirmar esta hipótese.

A frequente transferência de energia no regime fluvial controlado por barragem opera ciclos de erosão e deposição constantes, extremamente dinâmicos e complexos. Com as operações da barragem, o nível d'água oscila diariamente, favorecendo a elevação do nível freático e o aumento do fluxo das águas

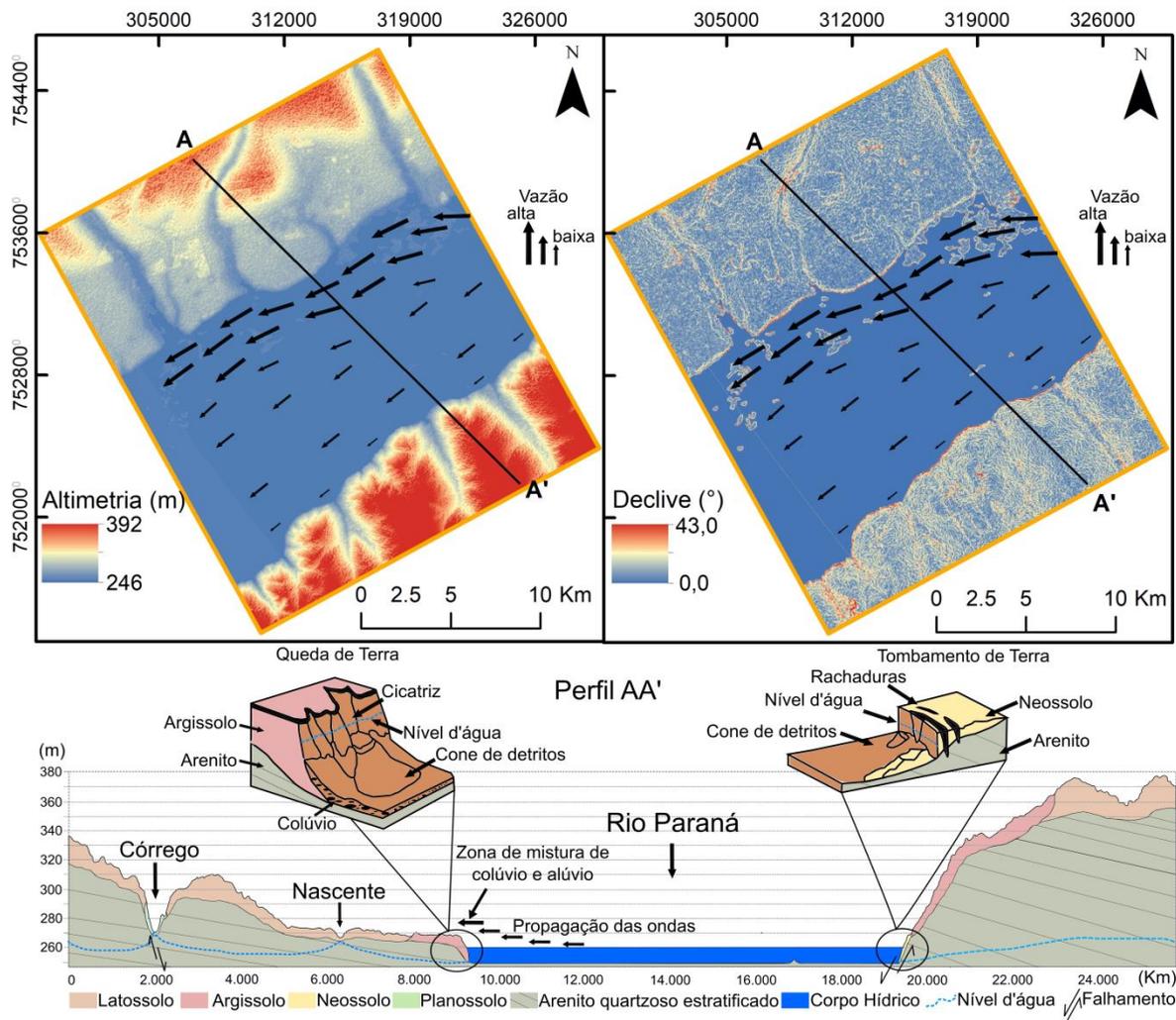
subterrâneas, tanto nas ilhas quanto nas margens (STEVAUX; MARTINS; MEURER, 2009).

Há combinação de dois vetores principais de dissipação da energia das ondas, guiadas de montante para jusante no sentido natural do fluxo e da margem esquerda para direita, provavelmente induzida pela operação dos reservatórios da margem direita (setor paulista).

Atualmente há pouco conhecimento do impacto do represamento da água na erosão do solo, considerando séries temporais longas (acima de 30 anos). Monitorar, e modelar os processos atuantes que controlam o fluxo de entrada e saída de sedimentos, considerando a perda de solo nas bacias hidrográficas adjacentes, bem como o desenvolvimento de técnicas de amostragem contemplando o uso de geotecnologias servirão na tomada de decisões relativas à manutenção da barragem e seu ecossistema.

Rotinas de processamento digital de imagens no *Google Earth Engine* (GORELICK et al, 2017) e aplicações de contrastes com redução da dimensionalidade da imagem, tal como a análise de componentes principais poderão ser implementadas para suprir essa lacuna do conhecimento nos reservatórios tropicais brasileiros.

Figura 15 – Síntese dos impactos na zona de perturbação de barragem no reservatório da UHEESM (perfil AA' com escala exagerada).



Fonte: Dos autores.

4.5 CONCLUSÃO

As técnicas de realce baseada em combinação simples e por equação de bandas multiespectrais são capazes de discernir, macroscopicamente, variações no ambiente hídrico. A utilização de múltiplas fontes de imagens, tanto na comparação entre séries temporais, quanto na identificação de impactos na zona de perturbação de barragem realizada em escalas progressivas, foi essencial para um diagnóstico holístico dos fenômenos.

A combinação 432 no S2, juntamente com a combinação VRE-VIS, adaptada neste estudo, fornecem informações de erosões marginais ativas, uma vez que, a primeira

realça sedimentos em suspensão e a segunda o solo exposto nas margens ou submerso por pequena coluna d'água. Já para destacar a profundidade da lâmina d'água indicamos a composição VNIR-VRE2, pois ela apresenta maior nitidez comparada às demais combinações realizadas.

Processos erosivos marginais ativos, detectados por RPA, demonstram-se eficientes para diagnósticos que necessitam de maior detalhamento e compreensão do nível de severidade do dano ambiental.

A zona de impacto da barragem possui tanto fatores naturais, quanto antrópicos, que induzem conjuntamente e em escalas diferentes a incidência e evolução de movimentos de massa com perdas de solo significativas e constantes para o corpo hídrico.

Nesse contexto, as geotecnologias são ferramentas auxiliares com alto potencial a ser explorado para identificar e priorizar tomadas de decisões que visem estabilizar áreas marginais afetadas pela dinâmica de flutuação do nível d'água dos reservatórios.

4.6 AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem ao PGTA/UFMS (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos ainda a CAPES pelo acesso ao Portal de Periódicos. Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de doutorado de A. P. M. Guirra (CNPq Processo 1815261/2019-01) e pela bolsa de produtividade em pesquisa de A. C. Paranhos Filho (CNPq Processo 305013/2018-1). O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

4.7 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (2014). *Acervo educacional sobre água: Qualidade de Água em Reservatórios*. Brasília. (Unidade 1: Reservatórios). Recuperado de <https://capitacao.ana.gov.br/conhecerh/browse?type=dateissued>.

Agência Nacional de Águas (2020). *HidroWeb: Sistemas de Informações Hidrológicas*. Recuperado de <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa.aspx>

Alaska Satellite Facility (2010). *Imagem de Satellite ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) - JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. Modo FBD (Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH)*. Recuperado de <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

Amador, Maisa Cofani (2017). *Variabilidade e regime das chuvas na Unidade de Planejamento e Gerenciamento Ivinhema no período de 1980 a 2010*. (Dissertação de Mestrado em Geografia). Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados, MS, Brasil. <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/1246>

Arai, Fabiane Kazue (2010). *Caracterização da disponibilidade hídrica na Bacia Hidrográfica do Ivinhema, MS*. (Dissertação de Mestrado em Agronomia). Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados, MS, Brasil. <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/298>

Araújo, Silvânia H., Furrier, Max, & Monteiro, Gabriel N. (2016). Geoprocessamento aplicado à análise de assoreamento e erosão fluvial em reservatório: estudo de caso dos reservatórios Gramame-Mamauba – PB. *Geo UERJ*, 29:473-490. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2016.22180>

Bao, Yuhai, He, Xiubin, Wen, Anbang, Gao, Peng, Tang, Qiang, ... & Long, Yi (2018). Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir. *Catena*, 169:128-139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.032>

Bataghin, Fernando A., Gonçalves, Marcelino A., Ikuta, Flávia A. et al. (2017). Comitê de bacia hidrográfica do rio Ivinhema - MS: Origens e desafios para atuação na área de resíduos. *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, Campo Grande, MS, Brasil, 8. (pp. 1-6). <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/III-004.pdf>

Caballero, Isabel, Stumpf, Richard P., & Meredith, A. (2019). Preliminary assessment of turbidity and chlorophyll impact on bathymetry derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A satellites in South Florida. *Remote Sensing*, 11(645):1-20. <https://doi.org/10.3390/rs11060645>

Coelho, André L.N. (2008). Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. *Caminhos da Geografia*, 9(26):16-32. <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15721>

Coelho, André L.N., & Cunha, L. (2019). Análise da intensidade e das áreas de erosão marginal no médio-baixo rio Doce (ES). *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Fortaleza, CE, Brasil, 17. (pp. 1-12). <http://www.editora.ufc.br/images/imagens/pdf/geografia-fisica-e-as-mudancas-globais/289.pdf>

Environmental Systems Research Institute (2013). *ArcGIS Desktop*, 10.2.1. Redlands.

Fachin, Viviane S. (2016). Reordenamento de terras no Mato Grosso do Sul. *Revista de Ciências Sociais*, 45:47-66. <https://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/politicaetrabalho/article/view/30636>

Feyisa, Gudina L., Meilby, Henrik, Fensholt, Rasmus, & Orgulhoso, Simon R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140:23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

Fortes, E, Stevaux, J.C, Volkmer, S. Neotectonics and channel evolution of the Lower Ivinhema River: A right-bank tributary of the upper Paraná River, Brazil. *Geomorphology*, 70:325-338. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.011>

Franco, Rodolfo (2017). *Composiciones Landsat em ArcGis. Guía Básica*. Bogotá. Recuperado de <https://mixdyr.wordpress.com/2017/06/30/composiciones-landsat-en-arcgis/>.

García-García, Fernando, Sánchez-Gomez, Mario, Navarro, Vicente, & Pla, Sila (2011). Formation, infill, and dissection of a latest-Pleistocene landslide-dammed reservoir (Betic Cordillera, Southern Spain): Upstream and downstream geomorphological and sedimentological evidence. *Quaternary International*, 233(1):61-71. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.07.010>

Gorelick, Noel, Hancher, Matt, Dixon, Mike, Ilyuschenko, Simon, Thau, David, & Moore, Rebecca (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing*, 202(1):18-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (2015). *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Ivinhema*. Campo Grande (Versão Final). <https://www.imasul.ms.gov.br/plano-de-recursos-hidricos-rio-ivinhema-2/>

Lima, Diego L., Motta, Jaíza S., Souza, Camila A., Guirra, Alesson P.M., & Paranhos Filho, Antonio C. (2019). Revisão bibliométrica sobre turbidez e sólidos suspensos por sensoriamento remoto. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42(1):107-116. http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_107_116

McFeeters, Stuart K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7):1425–1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>

Ni, Yufang, Cao, Zhixian, Liu, Qing, & Liu, Qingquan (2020). A 2D hydrodynamic model for shallow water flows with significant infiltration losses. *Hydrological Processes*, 34(10):2263-2280. <https://doi.org/10.1002/hyp.13722>

Oliveira, Wallace (2004). *Os impactos ambientais motivados pela UHE Porto Primavera no município de Anaurilândia – MS*. de (Tese de Doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, UNESP, Presidente Prudente, SP, Brasil. <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/101437>

Pepe, Thiago A.P., & Berezuk, André G. (2013). [Recursos hídricos e a dinâmica produtiva da bacia hidrográfica do rio Ivinhema - MS](#). *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, RS, Brasil, 20. (pp. 1-8).

Pott, Arnildo, Silva, João dos S.V., & Gomes, Edmur L. (2014). Características da bacia hidrográfica do rio Ivinhema. *Revista GeoPantanal*, 16:109-124. <https://periodicos.ufms.br/index.php/revgeo/article/view/366>

Rocha, Igor Pinheiro (2009). *Relação entre a erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no baixo São Francisco sergipano*. (Dissertação de Mestrado em Agrossistemas). Universidade Federal de Sergipe, UFS, São Cristóvão, SE. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFS-2_204f512734696153f362932f6f842e50

Rocha, Igor P., Holanda, Francisco S.R., Rolim, Mario M., Lino, Janisson B., & Araújo Filho, Renisson N. (2018). Magnitude and spatiotemporal variation of the erosion on the slope of the lower São Francisco river, northeastern Brazil. *Journal of Experimental Agriculture International*, 24(1):1-11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/41944>

Rosa, Jota J.M., Ferreira, Djane da S., & Rosa, João R. (2018). O fomento Terra Prometida no sul de Mato Grosso (1930-1950). *Geo UERJ*, 32:1-26. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.23672>

Serviço Geológico do Brasil (2006a). *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso do Sul* (Texto Explicativo). Campo Grande. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10217?show=full>

Serviço Geológico do Brasil (2006b). *Mapa Geológico do Estado do Mato Grosso do Sul* (1:1.000.000). Campo Grande. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10217?show=full>

Serviço Geológico do Brasil (2009). *Mapa Geodiversidade de Mato Grosso do Sul* (1:1.000.000). Campo Grande. <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/10217?show=full>

Shiroma, Gustavo M., Gamarra, Roberto M., Guirra, Alesson P. M., Motta, Jaíza S., Figueiredo, Helen R., Encina, Paulo C.C. ... & Paranhos Filho, Antonio C. (2020). Comparação entre índices de vegetação de diferentes sensores na identificação de fitofisionomias do Cerrado. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(1):18-32, 2020. http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_18_32

Teodoro, Paulo E., Oliveira-Júnior, José F., Cunha, Elias R., Correa, Caio C.G., Torres, Francisco E., ... & Ribeiro, Larissa P. (2016). Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Mato Grosso do Sul State, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 128(2):197-209. <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0408-y>

Tommaselli, Antonio M.G., Moraes, Marcus V.A., Silva, Lara S.L., Rubio, M.F., Carvalho, G.J., & Tommaselli, J.T.G. (2014). Monitoring marginal erosion in hydroelectric reservoirs with terrestrial mobile laser scanner. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, p. 589-596. <https://doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-589-2014>

Runge, Alexandra, & Grosse, Guido (2019). Comparing Spectral Characteristic of Landsat-8 and Sentinel Same-Day for Arctic-Boreal Regions. *Remote Sensing*, 11(1730): 1-29. <https://doi.org/10.3390/rs11141730>

Santos, Jeater Waldemar Maciel Correa, Loverde-Oliveira, Simoni, Angeoletto, Fabio (2016). Diagnóstico socio-ambiental de las áreas de preservación permanente del río Arareau en la zona urbana de Rondonópolis. *Terr@ Plural*, 10(1):35-45. <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.10i1.0003>

Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral (1988). *Projeto Estudos Integrados do Potencial de Recursos Naturais – Solos* (1:1.000.000). Campo Grande.

Stevaux, José C., & Latrubesse, Edgardo M. (2017). *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Oficina de Textos,

Stevaux, José C., Martins, Débora P., & Meurer, M. (2009). Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, 113(1): 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.015>

Teixeira, Jodenir C., & Hespanhol, Antonio N. (2012). A expansão canavieira na bacia do rio Ivinhema no estado de Mato Grosso do Sul. *Encontro Nacional de Geografia Agrária*, Uberlândia, MG, Brasil, 21. (pp. 1-16). http://www.lagea.ig.ufu.br/xx1enga/anais_enga_2012/eixos/1169_1.pdf

United States Geological Survey. (2020a). *EarthExplorer*. Washington, DC. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

United States Geological Survey (2020b). USGS EROS Archive - Sentinel-2 - *Comparison of Sentinel-2 and Landsat*. Washington, DC. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20170515022022/https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/Landsat.v.Sentinel-2.png>.

Volkmer, Sérgio A.J. (2020). Selective Enhancement based on Indices. *Git Hub Repository*. Porto Alegre. Recuperado de https://github.com/smaprs/sel_enh_index/blob/master/script.js

Wang, Zifeng, Liu, Junguo, Li, Jinbao et al. (2018). Multi-Spectral Water Index (MuWI): A native 10-m multi-spectral water index for accurate water mapping on Sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(1643):1-21. <https://doi.org/10.3390/rs10101643>

Data de submissão: 02/jun./2020

Data de aceite: 17/ago./2020

DOI: 10.5212/TerraPlural.v.14.2015782.057

05 **CAPÍTULO**

Cavernas do Mato Grosso do Sul: revisão, atributos condicionantes, análise preditiva e autocorrelação espacial

RESUMO

O carste e o pseudocarste desempenham funções ecossistêmicas vitais, fornecendo recursos naturais e assegurando atividades econômicas importantes, além de fornecer materiais importantes para entender paleoambientes. Porém, estas regiões são intrinsicamente frágeis, associadas a movimentos de massa ou a manutenção da qualidade dos aquíferos, sendo restritas há algumas formas de uso e ocupações do solo. O objetivo deste estudo é executar uma revisão integrativa sobre o carste no Mato Grosso do Sul, avaliar atributos geológico-ambientais por localização que condicionam a ocorrência de cavidades naturais, além de verificar se é possível prever o número de cavidades por métodos de regressão linear simples e múltipla e investigar se há autocorrelação espacial com alguns destes atributos. Observamos que estudos sobre o carste no Estado são recentes e concentram-se em temas de reconstituição paleoambiental. A maior parte das cavidades cadastradas ocorre em rochas carbonáticas neoproterozóicas, porém há um relevante potencial espeleológico em rochas não carbonáticas paleozoicas e mesozoicas. Não é possível prever por método estatístico puramente determinístico a ocorrência de cavidades, sendo verificado padrão estocástico em sua distribuição. O estimador de densidade Kernel possibilitou inferências qualitativas da probabilidade de ocorrência de cavidades. Os índices de Moran foram eficientes ao demonstrar que condicionantes geológico-ambientais de cavidades em rochas carbonáticas podem interagir de maneira distinta e inversa em rochas não carbonáticas.

Palavras-chave: Cavidades Naturais, Espeleologia, Geoestatística.

Caves of Mato Grosso do Sul: review, conditioning attributes, predictive analysis and spatial autocorrelation

ABSTRACT

Karst and pseudocarste perform vital ecosystem functions, providing natural resources and ensuring important economic activities, as well as providing important materials to understand paleoenvironments. However, these regions are intrinsically fragile, associated with mass movements or the maintenance of aquifer quality, and there are some forms of land use and occupations restricted. The aim of this study is to perform an integrative review on the karst in Mato Grosso do Sul, evaluate geological-environmental attributes by location that condition the occurrence of natural cavities, besides verifying whether it is possible to predict the number of cavities by simple and multiple linear regression methods and to investigate whether there is spatial autocorrelation with some of these attributes. We observed that studies on karst in the State are recent and focus on topics of paleoenvironmental reconstitution. Most of the registered cavities occur in neoproterozoic carbonate rocks, but there is a relevant speleological potential in paleozoic and mesozoic non-carbonate rocks. It is not possible to predict by purely deterministic statistical method the occurrence of cavities, being verified stochastic pattern in its distribution. The Kernel density estimator allowed qualitative inferences of the probability of occurrence of cavities. Moran indices were efficient in demonstrating that geological-environmental constraints of cavities in carbonate rocks can interact differently and inversely in non-carbonate rocks.

Keywords: Natural Cavity, Speleology, Geostatistics.

5.1 INTRODUÇÃO

Terrenos cársticos e pseudocársticos são extremamente relevantes como fontes de água subterrânea e também desempenham funções ecossistêmicas vitais, além de fornecer recursos naturais, abrigam valores em termos de biodiversidade, cavernas, agricultura, patrimônio fossilífero e arqueológico, de desenvolvimento do turístico e atividades culturais, sendo também importantes áreas para o entendimento do clima atual e pretérito (BERTAUX et al., 2002; LOBO et al., 2009; BECKER et al., 2018; GOLDSCHIEDER et al., 2020; SI-LIANG et al., 2021).

Carste é um tipo específico de terreno (ou paisagens), que ocorre devido à alta solubilidade da rocha e/ou porosidade secundária, preferencialmente rochas carbonáticas tais como: calcários, dolomitos e mármore, nas quais se desenvolvem feições de dissolução subterrânea ou drenagem subterrânea integrada (FERREIRA; UAGODA, 2019). Uma variedade de processos não dissolucionais em rochas não-carbonáticas, mas que formam terrenos análogos a certos tipos de carste, tais como: dutos subterrâneos, depressões superficiais, ou feições de colapso enquadram-se, em termos litológicos, na definição de pseudocarste (MACIEL FILHO et al., 2013).

Cerca de 10% da população mundial depende de aquíferos cársticos, sendo a agricultura uma das principais atividades desempenhada, conforme mostra o banco de dados do *World Karst Spring (WoKaS)*, o qual promove a internacionalização da pesquisa hidrológica cárstica e a gestão de águas subterrâneas (OLARINOYE et al., 2020). Gestões personalizadas para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos, dados as condições climáticas adversas, bem como a tendência a expansão urbana aliada ao aumento demográfico, frente a estes ambientes naturalmente suscetíveis, são estratégias a serem implantadas na prevenção, contenção ou mitigação de danos (KLASS et al., 2020).

Regiões cársticas e pseudocársticas podem representar na paisagem significativos sítios de interesse geomorfológico e espeleológicos, mas também são áreas intrinsecamente frágeis, podendo provocar uma série de eventos perigosos, configurando restrições ao uso e ocupação do solo, dado a suscetibilidade a movimentos de massa, associadas principalmente a eventos de dolinamento, abatimento, recalque, *piping* entre outros (SALLUN FILHO, 2007a; SALLUN FILHO, 2007b; PARISE, 2010). Cavidades naturais na América do Sul são fontes promissoras de sítios paleoarqueológicos, podendo até fornecer elementos da

presença humana, de animais da megafauna Quaternária ou a interação destes, quando se considera assinaturas tafonômicas e ecológicas (MOTHÉ et al., 2020).

Estas regiões também são responsáveis em maior frequência pela formação de sumidouros, promovendo descontinuidades na rede fluvial e fornecendo recargas alogênicas (OLARINOYE et al., 2020). Diferentes unidades litológicas podem apresentar propriedades como, espessura, rugosidade superficial, grau de fraturamento, entre outros tipos de descontinuidades que controlam o padrão de circulação de fluxos na interação rocha- fluido, ocasionado processos de dissolução dos minerais (BALSAMO et al., 2020). O campo de tensões regional pode imprimir uma complexa rede de drenagens em superfície, ou ainda estabelecer contrastes e anisotropias entre camadas de uma mesma unidade geológica com intensidade de fraturamento diferentes (BALSAMO et al., 2020).

Várias informações das descontinuidades podem ser obtidas em campo, como geometria, espaçamento interno, distância entre descontinuidades, densidade, direções preferenciais entre outros atributos. Os principais elementos estruturais passíveis de medição neste contexto, são: fraturas paralelas ou ao longo de contatos geológicos, juntas sistemáticas e transversais, ou zonas de falhas e fraturas. Por imagens de radar é possível obter de forma semiautomatizada os lineamentos regionais que repercutem em superfície em linhas com contraste de sombreamento no terreno ou estreitos traços de depressões lineares com certa continuidade, os quais geralmente refletem estruturas tectônicas rúpteis, ou rúptil-dúcteis.

Diante desse contexto, pode-se questionar: quais os principais atributos geológico-ambientais desempenham processos de carstificação em Mato Grosso do Sul? Existe alguma correlação ou autocorrelação espacial entre estes atributos com o número de cavidades oficialmente cadastradas no Estado por áreas? É possível estimar por métodos de estatística determinística a ocorrência de cavidades naturais, diante da escala do mapa de geodiversidade atualmente disponível para este território? Ou ainda, pode haver autocorrelação espacial entre algumas destas variáveis com a ocorrência de cavidades?

Nesse sentido pode-se formular como hipótese alternativa (H_1) que o número de interseções por área entre lineamentos geológicos estruturais, rede de drenagem e contatos geológicos, mutuamente combinados entre si podem prever o número de cavidades naturais por área. Em contrapartida, a hipótese nula (H_0) diz que estes

três elementos pontuais, quando quantificados em termos de interseções por unidade de área não podem prever o número de cavidades naturais de forma inteiramente determinística.

No Mato Grosso do Sul o mapa de geodiversidade derivado do mapa geológico macrorregional (CPRM, 2009) é resultante da articulação de folhas cartografadas com baixo a médio nível de detalhamento (1:1.000.000 até 1:50.000), os quais não suprem as necessidades de planejamento em escala de município, dada a baixa representatividade do modelo. A área que concentra o maior número de cavidades é também a área com maior quantidade de afloramentos visitados e conseqüentemente de maior detalhe cartográfico. Estes fatores demonstram que pode haver maior número de cavidades em outros setores do Estado que ainda não foram cadastradas. Outro fato que chama a atenção, pela raridade, é o conteúdo de rochas não-carbonáticas com cavidades já cadastradas, as quais se desenvolvem em sua maioria em arenitos, responsáveis por cobrir vasta área deste território, sobretudo no setor centro-leste. Em face destas constatações alguns autores vêm demonstrando a ocorrência de cavidades em rochas não carbonáticas (SALLUN FILHO, 2007a; SALLUN FILHO, 2007b; GUIRRA et al., 2019; GUIRRA, PARANHOS FILHO, 2020).

Neste estudo, objetiva-se revisar publicações sobre o carste do Mato Grosso do Sul, em periódicos de alto impacto, verificando os principais condicionantes geológico-ambientais que favorecem a ocorrência de cavidades naturais, bem como avaliamos se é possível prever quantitativamente o número de cavidades por área usando como variáveis preditivas, interseções entre atributos geológico-ambientais lineares, dentre eles: rede de drenagem, contato entre unidades geológicas e lineamentos geológico-estruturais. Também foi observado o nível de autocorrelação existente entre as variáveis anteriormente expressas, baseando-se em métricas do índice de Moran (global e local).

Destaca-se neste contexto a ampla aplicabilidade na gestão e planejamento territorial que novos conhecimentos sobre o entendimento da distribuição espacial de áreas cársticas, pseudocársticas ou potencialmente suscetíveis a processos de carstificação podem fornecer para o uso mais racional dos recursos naturais disponíveis, sobretudo a manutenção da qualidade da água nos aquíferos e da prevenção a movimentos de massa.

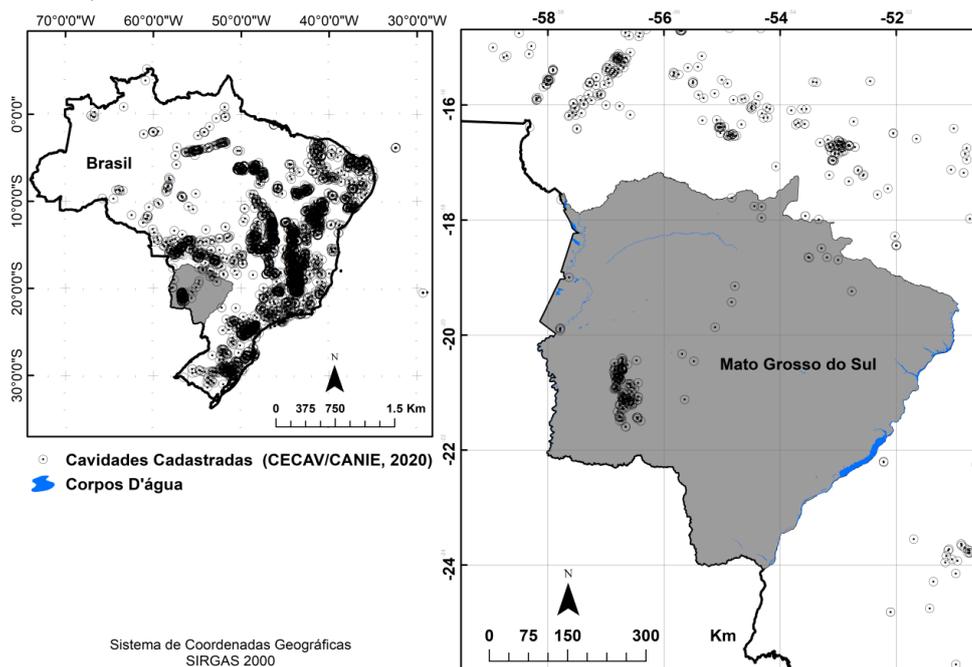
5.2 MATERIAS E MÉTODOS

5.2.1 Área de Estudo

O Estado de Mato Grosso do Sul localiza-se na região centro-oeste do Brasil, está centrado nas coordenadas $20^{\circ}17'24''\text{S}$, $54^{\circ}52'12''\text{W}$, abrange área de 357.145,534 Km^2 , fazendo limite com a Bolívia (noroeste), Paraguai (sudoeste), Goiás (nordeste), Minas Gerais (leste), Paraná (sul) e São Paulo (sudeste), conforme IBGE (2019).

O mapa de ocorrências de cavernas do Brasil (Figura 1) mostra que atualmente há 268 cavidades naturais cadastradas no Mato Grosso do Sul, o que corresponde a 1,41% em relação a todo o território brasileiro (CANIE, 2020).

Figura 1 – Mapa de ocorrência das cavidades naturais do Mato Grosso do Sul em relação ao Brasil. Observar que a região de MS em que há maior concentração de cavernas no mapa é a da Serra da Bodoquena, sustentada por rochas pré-cambrianas, rica em rochas carbonáticas.



Para realização deste estudo, foram seguidos alguns passos que envolvem a elaboração da pergunta de pesquisa, busca sistematizada por artigos especializados na literatura, coleta de dados, análise dos estudos, proposição de métodos de estimativa de ocorrência de cavidades naturais, discussão dos resultados e apresentação da revisão (SOUZA et al., 2010).

5.2.2 Revisão em Literatura Especializada

Na revisão optou-se pelo método integrativo (SOUZA et al., 2010), usando técnica de sistematização por filtros processados por operadores booleanos, reunindo os estudos mais relevantes sobre o tema - Cavidades no Mato Grosso do Sul – buscando identificar tendências, lacunas e interações entre pesquisas e pesquisadores. A base de dados utilizada para cumprir esta etapa foi a *Scopus* (ELSEVIER BV, 2020), pois nesta plataforma reúne-se um dos maiores bancos de dados de periódicos revisados por pares, com relevantes fatores de impacto, indexando vários títulos em sua biblioteca, das mais diversas áreas e subáreas do conhecimento.

Utilizou-se como apoio a bibliometria, a qual pauta-se na quantificação de publicações sobre determinado tema, coletando informações tais como: a produtividade ao longo de uma série temporal, o ranque entre os principais autores, principais instituições envolvidas, países, subáreas de pesquisa, principais formas de publicação, conteúdos com maior repercussão, entre outros elementos.

Para permitir a análise bibliométrica, utilizou-se o *VOSviewer* (Van Eck et al., 2007), o qual possibilita a criação de redes de conectividade, interações de citações, coautoria, frequência de citações, força da relação entre os conectores, ou até mesmo o desempenho dos autores, publicações ou palavras ao longo do tempo. O *VOSviewer* (VOSviewer, 2020) é um *software* de visualização de similaridades e baseia-se na teoria de Análise de Redes Sociais (SNA), permitindo a elaboração de mapas bidimensionais ponderados pela distância e frequência de citações, sendo que distâncias menores indicam relações mais fortes e nós ou ilhas de calor mais intensas demonstram maior força ou importância da citação (LIMA et al., 2019).

A seleção da cadeia de caracteres empregadas na busca refinada sobre o carste no Mato Grosso do Sul teve os seguintes parâmetros:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "cavi*" OR "cave*" OR "speleo*" OR "karst*" OR "carst*" OR hole ) AND "mato grosso do sul" ).
```

Nesta primeira tentativa houve retorno de 56 publicações, porém com temas muito variados que divergiram do objetivo deste estudo, sendo necessário empregar outros filtros na busca. Com base nisso, utilizou-se a seguinte cadeia de caracteres:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "cavi*" OR "cave*" OR "speleo*" OR "karst*" OR "carst*" OR hole ) AND "mato grosso do sul" ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "EART" ) ) AND (
```

LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Brazil") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Cave") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Mato Grosso Do Sul")) , a qual filtrou publicações deste tema nas subáreas de retornando 17 documentos, sendo todos estes analisados.

Para tornar o estudo mais abrangente e inclusivo, resgataram-se a partir do portal de periódicos de livre acesso da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2020), estudos que responderam a mesma cadeia de caracteres formulada e que não estavam incorporadas à Scopus, resultando em mais 03 documentos complementares. Estes estudos foram incorporados na análise, porém não foram quantificados na bibliometria, por se tratar de outra base de periódicos.

5.2.3 Condicionantes Geológico-Ambientais

O banco de dados geográficos utilizado para relacionar com a distribuição das cavidades é oriundo da base do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2019), o qual fornece vários parâmetros de dados derivados das características físicas, químicas, mecânicas e de formação das unidades litoestratigráficas mapeadas. A tabela de atributos compilada nos vetores georreferenciados suporta diversos temas em função das características geológicas. Este banco de dados também faz a convergência com dados oriundos de outras fontes oficiais de governo, tal como da Agência Nacional das Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), todos estes dados podem também ser consultados pela plataforma da Infraestrutura Nacional De Dados Espaciais (INDE).

Esse banco de dados geográficos também fornece informações sobre a rede de drenagem, lineamentos geológico-estruturais, bacias hidrográficas, unidades aquíferas e parâmetros associados, além de idade das formações e métodos de datação que foram utilizados caso haja.

Dados atualizados sobre a localização das cavernas naturais brasileiras foram obtidos através do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE, 2020). Neste cadastro se faz diferenciação entre abrigo, caverna e abismo, quanto à classificação de cavidades naturais subterrâneas, dadas as dimensões de abertura, altura, desenvolvimento vertical, horizontal, todas em relação a uma base de referência (base zero). Estas definições estão dispostas em Decreto, havendo também Instruções Normativas do Ministério do Meio Ambiente.

5.2.4 Análises preditivas e estimador de densidade Kernel

Análises de correlação e de regressão (simples e múltipla) foram usadas para estimar a relação entre as variáveis pontuais do número de interseções por área de: contatos geológicos com rede hidrográfica (HC), lineamentos geológico-estruturais e contatos geológicos (LC), rede hidrográfica com lineamentos (HL) com a variável pontual do número de cavidades, no mesmo sistema de medida.

Foi feito teste-t de normalidade Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov para uma amostra no SPSS (IBM Corp, 2013), para verificar se a distribuição do número de cavidades por área se aproxima de uma distribuição normal (H_0) ou não (H_1). Onde foi verificado para ambos os testes-t para uma amostra que a média do número de cavidades por área é compatível com um distribuição não paramétrica ($t_{KS}(579) = 0,373$; $p < 0,005$ e $t_{SW}(579) = 0,455$, $p < 0,005$), rejeitando-se assim a hipótese nula (H_0). A transformação logarítmica foi tentada para normalizar os dados, porém não surtiu efeito ($t_{KS}(579) = 0,122$; $p < 0,005$ e $t_{SW}(579) = 0,952$; $p < 0,005$). Dessa forma, manteve-se para efeitos de relação entre as variáveis o número de cavidades por áreas sem transformação.

Diante do exposto acima a correlação de Spearman foi utilizada, a qual é calculada da seguinte forma (Equação 1):

$$r_s = 1 - \frac{6 \times \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: $d_i = r_{xi} - r_{yi}$, com r_{xi} e r_{yi} variando de 1 a n, com valor máximo de $r_s = 1$ (maior correlação positiva) e mínimo $r_s = -1$ (correlação perfeitamente negativa), sendo que valores próximos de zero sugerem inexistência de correlação linear.

A regressão linear simples parte de um conjunto de observações pareadas (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) , em relação a variáveis X e Y, dada pela seguinte fórmula (Equação 2):

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: y_i é a variável resposta associada a i -ésima observação de Y ; x_i é a i -ésima observação do valor fixado para a variável independente (e não aleatória) X ; ε_i é o erro aleatório para a i -ésima observação, isto é, o efeito de fatores que estão afetando a observação de Y de forma aleatória; enquanto que α e β são parâmetros que precisam ser estimados pelo método dos mínimos quadrados.

O modelo estatístico da regressão linear múltipla com k variáveis regressoras (x_1, x_2, \dots, x_k) é dada por (Equação 3):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: y_i é o valor observado de Y no i -ésimo nível de X ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os parâmetros desconhecidos a serem estimados; $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ é o i -ésimo nível das k variáveis independentes ($i = 1, 2, \dots, n$); ε_i é o erro que está associado à distância entre o valor observado Y_i e o correspondente valor estimado Y^* , do modelo proposto para o mesmo nível de X .

Para ambos os modelos de regressão o coeficiente de determinação (R^2) é uma medida descritiva da proporção da variação de Y explicada pela variação de X , sendo que quanto mais próximo a 1, melhor o grau de explicação de Y em termos de X (Equação 4).

$$R^2 = \frac{\text{variação explicada pelo modelo}}{\text{variação total}}; \text{ sendo } 0 < R^2 < 1 \quad (\text{Equação 4})$$

Já o estimador de densidade de Kernel é uma função de densidade de probabilidade, técnica não paramétrica para estimar curvas de densidade ponderadas pela distância em relação a um valor central (núcleo). Onde, x_0 e um tamanho de janela h é definido em um histograma com intervalo $[x_0 + mh, x_0 + (m + 1)h)$ para inteiro positivos e negativos m . Geralmente K é a função de densidade de probabilidade unimodal radialmente simétrica. A extensão para dados multivariados é direta, com o estimador de densidade p -dimensional, para uma amostra aleatória x_1, x_2, \dots, x_n , retirada de uma amostra comum f , definida por (Equação 5):

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ e $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})'$, $i = 1, 2, \dots, n$. Sendo que a função Kernel mais utilizada é a gaussiana com padrão de distribuição normal padrão (Equação 6):

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{Equação 6})$$

Para as estimativas de densidade adotamos neste estudo tamanho de pixel de 100 metros e raio de busca de 10 quilômetros.

5.2.5 Autocorrelação Espacial

O índice I de Moran foi utilizado para o cálculo de autocorrelação espacial bivariada entre as variáveis preditoras HC, LC e HL em relação às cavidades (C). A autocorrelação espacial global é expressa conforme Equação 7 (SEFRIN et al., 2018):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_i z_j w_{ij}}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde n é o número de polígonos, $z_i = (x_i - \bar{x})$ e $z_j = (x_j - \bar{x})$ para $i \neq j = 1 \dots n$, referindo-se aos valores analisados das populações i e j centradas na média \bar{x} da variável de interesse. Enquanto que w_{ij} é o elemento da matriz de proximidade W , $n \times n$, indicando a relação espacial para n populações, sendo S_0 expresso pela fórmula a seguir (Equação 8):

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (\text{Equação 8})$$

A estatística LISA, ou índice local de Moran, é dado pela equação abaixo (Equação 9):

$$I_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma_0^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \mu), i = 1, \dots, n \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo que σ_0^2 representa a variância populacional da variável em estudo dos n polígonos; x_i mostra a observação de uma variável de interesse no polígono $i = 1, \dots, n$, e μ corresponde a média dos n polígonos (população). Dentre as regras de convenção de matrizes de vizinhança, neste estudo adotamos a mais comumente utilizada, o movimento da rainha de 1ª ordem na contiguidade (*Queen Contiguity*), o que torna a análise mais detalhada.

5.2.6 Análise dos dados

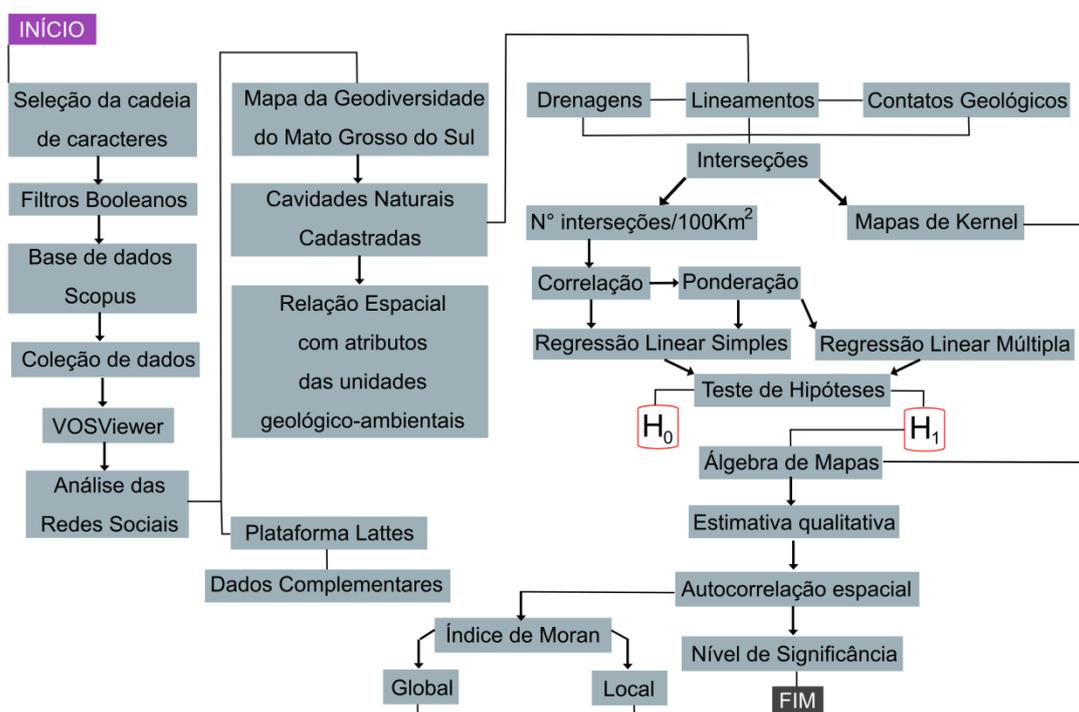
A análise de dados foi dividida em quatro etapas, sendo elas:

- 1ª) Exposição dos estudos obtidos sobre o tema específico do carste no Mato Grosso do Sul, suas relações, tendências e lacunas;
- 2ª) Relacionamento entre atributos das unidades geológicas com a distribuição das cavidades naturais cadastradas;
- 3ª) Análise preditiva por regressão linear simples e múltipla, considera como variável dependente o número de cavidades por 100 quilômetro quadrados (células de amostragem regular de 10 x 10Km) e como variáveis independentes, as interseções combinadas por pares entre drenagens, lineamentos e contatos geológicos, todas amostradas no mesmo intervalo (100 km²);
- 4ª) Obtenção dos índices de Moran, global e local, bem como o nível de significância das autocorrelações espaciais entre as variáveis da 3ª etapa. Para o processamento destas informações utilizou-se o *softwares QGis 3.10.3 com GRASS 7.8.2 'A Coruna'* (QGIS Development Team, 2020). Técnicas de união de atributos por localização, criação de malha regular amostral de 10 km, cálculo da densidade de pontos, estatísticas zonal, geração de mapa de calor pelo método *Kernel* foram empregadas nas análises quantitativas e qualitativas.

Os dados estatísticos derivados desse processo foram analisados com o pacote estatístico *SPSS* (IBM Corp, 2013), obtendo-se informações de correlação e utilizando o valor do coeficiente de correlação para compor pesos na regressão linear simples e múltipla a fim de tentar aperfeiçoar a previsão. As hipóteses nulas (H_0) e alternativas (H_1) foram avaliadas utilizando os parâmetros do p-valor, coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajustado}$), erro padrão da estimativa (EP), e do teste Durbin-Watson (d).

A álgebra de mapas foi suporte para espacialização das áreas com maior potencial qualitativo de ocorrência de novas cavidades, operada na calculadora raster do *QGIS* (QGIS Development Team, 2020), sendo os planos de informações hierarquizados com os pesos arredondados resultantes da correlação, em uma equação modelada pela regressão linear múltipla. Para cumprir a 4ª etapa, foi utilizado o software de código aberto e gratuito *GeoDa* (ANSELIN et al., 2006), o qual apresenta várias funcionalidades analíticas espaciais especializada, como teste de autocorrelação e modelagem de regressão espacial. O fluxograma das etapas encontra-se resumida na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma síntese dos materiais e métodos para estudo da ocorrência das cavidades naturais no Mato Grosso do Sul.



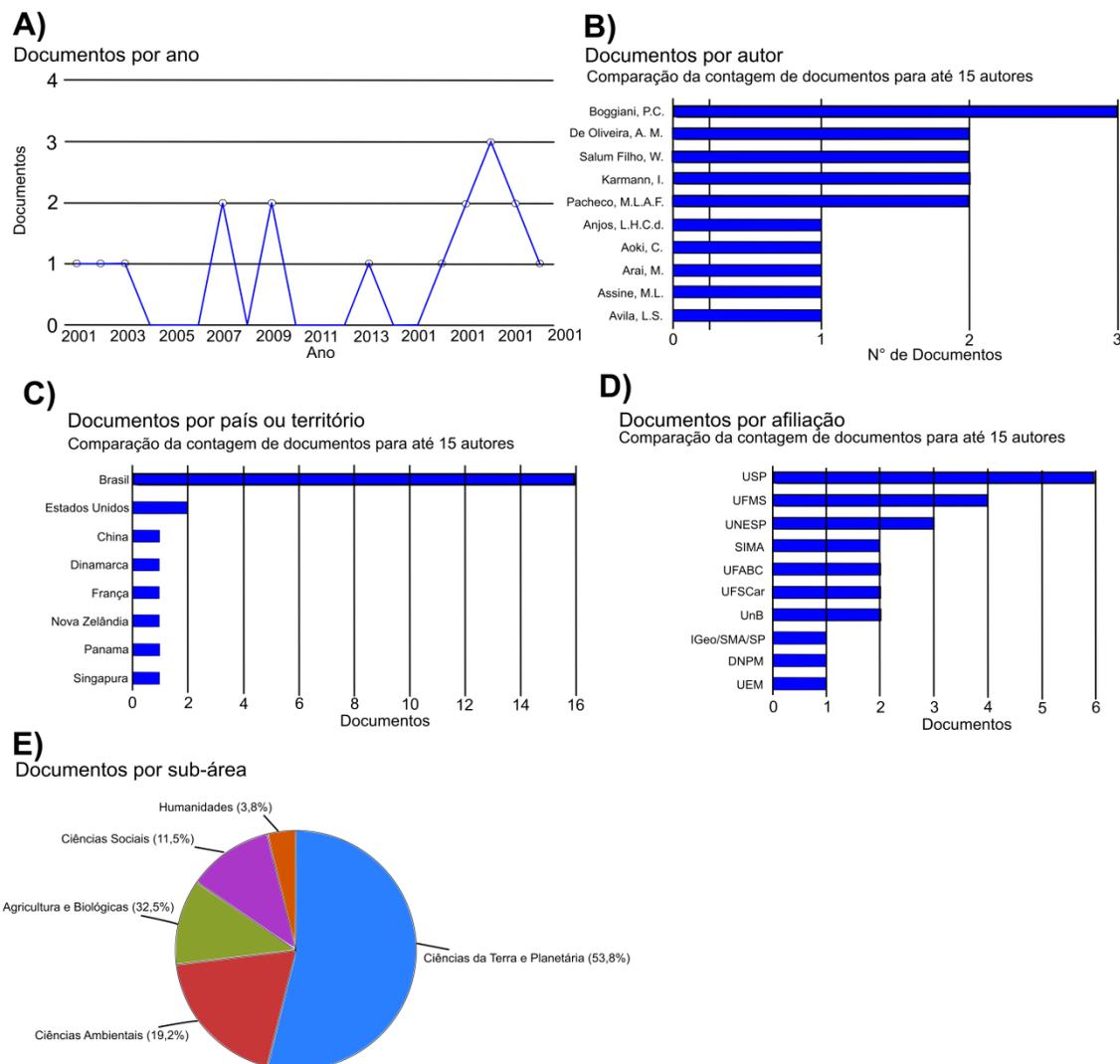
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Sobre as Revisões na Literatura Especializada

Os estudos relacionados ao carste do Mato Grosso do Sul são recentes, sendo o primeiro trabalho realizado no ano de 2001, abordando a unidade Geomorfológica Taquaruçu e suas lagoas associadas (KRAMER; STEVAUX, 2001), com o objetivo de caracterizar morfológica e sedimentologicamente material sedimentar na tentativa de reconstruir cenários durante o Holoceno no que diz respeito às mudanças climáticas e ambientais (Figura 3A). Neste estudo os autores confirmaram a proposta evolutiva paleoclimática definida por outros autores, para o território centro-sul brasileiro e nordeste argentino. Os principais autores ranqueados sobre esta temática são mostrados na Figura 3B, trazendo estudos sobre: paleoclima, reconstrução paleoambiental, paleogeográfica e paleoecológica, espeleoturismo, mapeamento geomorfológico e geológico de unidades cársticas.

A maior parte dos trabalhos é oriunda de pesquisas realizadas no Brasil, tendo cooperação com países como: Estados Unidos, China, Dinamarca, França, Nova Zelândia, Panamá e Singapura (Figura 3C). As três instituições que se destacam no tratamento deste tema são: Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e Universidade Estadual Paulista (Figura 3D). Os estudos do carste no Mato Grosso do Sul interagem com algumas subáreas do conhecimento, tendo participações importantes em: Ciências da Terra e Planetária (53,8%), Ciências Ambientais (19,2%), Agricultura e Biológicas (32,5%), Ciências Sociais (11,5%) e Humanidades (3,8%), tal como mostra a Figura 3E.

Figura 3 – A) Desempenho geral das publicações para pesquisas sobre o carste no Mato Grosso do Sul; B) Produtividade dos principais autores que estudam o carste no Mato Grosso do Sul; C) Principais países ranqueados pelo número de publicações sobre o tema; D) Principais instituições que pesquisam o carste no Mato Grosso do Sul; E) As principais subáreas de pesquisa relacionadas ao tema.



Bertaux et al. (2002) detalharam a mineralogia e a geoquímica de estalagmite de 44 cm, de uma das cavernas mais bem estudadas no Mato Grosso do Sul, denominada João Arruda. Os autores deste estudo verificaram informações relacionadas às mudanças climáticas durante os últimos 4000 anos, comparando dados climáticos de áreas próximas na América do Sul. Os resultados também demonstraram haver consistência com o padrão climático regional, confirmando a estalagmite como material de paleorregistro climático de alta resolução.

Registros de alta resolução paleoclimática baseados em isótopos de oxigênio de estalagmites, coletados na região sudoeste do Brasil, especificamente nas localidades de Bonito no Mato Grosso do Sul (caverna Jaraguá) e no Parque

Estadual Terra Ronca, em Goiás (cavernas São Bernardo e São Mateus) permitiram avaliar nos últimos dois milênios a variabilidade hidrológica e verificar a intensidade da influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul no regime de monções (NOVELLO et al., 2018). Em áreas muito próximas às estudadas por Novello et al. (2018), foram monitorados, por mais de 1 (um) ano, parâmetros que regem o crescimento de espeleotemas e da dinâmica de infiltração em ambientes cársticos, indicando que as estalactites apresentam variações na taxa de gotejamento intrinsecamente influenciadas pela defasagem no excedente de água e do fluxo de água em relação a cobertura (SONDAG et al., 2003). Dados isotópicos de oxigênio e estrôncio obtidos em espeleotemas da caverna do Jaraguá, no planalto do Mato Grosso do Sul, também permitiram recentemente identificar o padrão e a influência do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nas variações significativas de umidade e seca a depender da latitude, durante o Holoceno (WARD et al., 2019).

O filtro de busca retornou o trabalho de Trolle et al. (2003), o qual trata de fauna de mamíferos recentes na região do Pantanal no Município de Aquidauana. Essa associação tem dois motivos principais, sendo elas: o nome de uma das principais unidades geológicas carstificáveis presentes no Estado é a Formação Aquidauana e também há estudos que tratam de mamíferos relacionados à megafauna pleistocênica e de outros mamíferos no registro paleontológico da Serra da Bodoquena (DE OLIVEIRA et al., 2017).

Derivado de relatório de Estudo de Impacto Ambiental da Visitação Turística do Monumento Natural Gruta do Lago Azul, no Município de Bonito (MS), com a autorização dos órgãos de controle – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), Boggiani et al. (2007) determina o número de visitas por dia para as grutas do Lago Azul e Nossa Senhora Aparecida. Neste trabalho mostram a importância e a necessidade de estabelecer caminhos fixos para visitação, ao invés de apenas fazer um zoneamento quanto ao tipo de uso. Segundo estes autores, uma rota fixa de visitação evitaria vários problemas, entre eles: pisoteamento de certas espécies de fauna, acesso as áreas com risco a doenças, contato com fezes de morcego e com espeleotemas. Outro estudo sobre a utilização de cavernas para o turismo foi conduzido por Lobo et al. (2009), visando identificar os procedimentos técnicos de manejo e as características das cavernas de forma que seja garantido a qualidade ecológica e a

sustentabilidade destas atividades. Os autores verificaram a necessidade de aprimorar as técnicas e sistemas de gestão, rever políticas adotadas e que já até foram extintas em outros países. Eles também propuseram um programa de gestão contínua dos impactos da visitação turística e um controle da capacidade de carga em um sistema unificado.

O primeiro mapeamento geomorfológico para identificar zonas distintas no carste em escala de semidetalhe (1:60.000) foi elaborado na serra da Bodoquena, sendo possível identificar várias feições, entre elas: dolinas, cavernas, sumidouros, fontes, cones, corredores, etc, sendo definidas seis principais zonas (SALLUN FILHO et al., 2007b). De acordo com estes autores, a serra da Bodoquena é uma das áreas cársticas mais contínuas em superfície do Brasil, com cerca de 200 Km de extensão, possuindo também importantes depósitos de tufas. Dolinas em arenitos na Formação Aquidauana, no Município de Jardim (MS) foram comparadas as da Formação Furnas, no Município de Ponta Grossa (PR), sendo os colapsos formados pelo mecanismo de *piping* (SALLUM FILHO et al., 2007a). Estes autores afirmam que o relevo runiforme se apresenta como formas superficiais de origem erosiva e intempérica no arenito, resultando num pseudocarste conectado em profundidade com o sistema cárstico, sendo a direção dos condutos estruturalmente controlada sobre o arenito. Neste contexto, Sallum Filho et al. (2009) afirmam que a deposição de tufas são devido a predominância de águas autogênicas enriquecidas em carbonato de cálcio. Por possuir características litológicas distintas, bem como contatos claros e abruptos mapeáveis, estes autores deram o status de Formação, nessa seção tipo da Serra da Bodoquena, portanto denominada Formação Serra da Bodoquena para esses sedimentos quaternários. A serra da Bodoquena também tem se configurado como um importante sítio paleontológico, com restos de fauna plesitocênica, as quais permitiram a redefinição da distribuição paleozoogeográfica de alguns táxons (DE OLIVEIRA et al., 2017). O trabalho de Miraya et al., (2018) que trata sobre depósitos de tufas restritas à algumas drenagens no Vale do Ribeira, no Estado de São Paulo, ocorre associado aos filtros utilizados na pesquisa integrativa, pelo fato de ter como um dos autores o pesquisador Sallum Filho, mas também por ser um dos importantes registros de tufas até então conhecidos no contexto geográfico sul americano. Há também tufas da Formação Serra da Bodoquena ao longo de drenagens que escavam rochas subjacentes do Grupo Corumbá, onde Oste et al., (2018) detalharam três fácies, sendo elas: fitoherma, shurbs e

estromatólitos, sendo os ambientes deposicionais equivalentes a piscinas, barreiras e cascatas/cachoeiras.

O filtro booleano de busca retornou o trabalho de Puker et al. (2013), pelo fato de tratar de interações ecológicas entre humanos, mamíferos e insetos atuais na região de Aquidauana e Anastácio. Apesar de não envolver o carste os nomes de unidades geológicas (Formação Aquidauana e Formação Santo Anastácio), bem como a existência de estudos que tratam de coexistência das populações humanas com megafauna (PANSANI et al., 2016) conduziram a associação com este trabalho. O mesmo efeito ocorre com o trabalho de Teodoro et al. (2019), o qual relata o padrão de comportamento de mamíferos recentes em área urbana do Município de Aquidauana. Recentemente obteve-se registro da ocorrência de um roedor nativo da América do Sul, o *Cuniculus rugiceps* (popularmente conhecido como paca), na Toca da Raposa, Estado de Sergipe, ampliou o conhecimento sobre a sua distribuição geográfica (DA SILVA; DANTAS, 2020). O gênero *Cuniculus spp*, anteriormente se restringia nas regiões de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Acre, Pará e Piauí, conforme relata os autores. A associação com este estudo também se deu pela existência do trabalho de Pansani et al., (2016).

O Mato Grosso do Sul tem revelado um importante potencial paleontológico em seus depósitos quaternários, tanto em grutas como em rios das regiões da Serra da Bodoquena e de Miranda (PANSANI et al., 2016), as quais vêm auxiliando na elucidação de questões ainda em aberto sobre a extinção da megafauna pleistocênica na América do Sul e as interações ecológico-geográficas.

Com o objetivo de avaliar características físicas, químicas e micromorfológicas de solos no planalto da Bodoquena, Silva et al., (2017), mostram que ao longo de uma topossequência pode haver uma grande variabilidade dos atributos do solo, mas frequentemente os solos possuem alto teor de carbonato de cálcio, sendo este responsável por revestimento de poros por calcita acicular. As unidades de solos identificam, nesta topossequência, foram: neossolos, luvisolos e chernossolos, assumindo que a gênese destes solos foi principalmente condicionada pela proximidade com o material parental e pela posição da encosta, conforme afirmam os autores.

As assembleias palinológicas preservadas em sedimentos recuperados do fundo de um dos lagos salinos na área de Nhecolândia do Pantanal permitiram reconstruir a

história da vegetação local, bem como informações de isótopos de carbono confirmaram em grande parte os registros regionais oriundos de espeleotemas (BECKER et al., 2018). Estes autores definiram dois principais períodos, mostrando que entre 3760 a 1510 antes do presente predominou regimes de seca, sendo o período atual equivalente ao período úmido. O resumo geral dos trabalhos sobre o carste no Mato Grosso do Sul pode ser visualizado na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Resumo dos trabalhos com relação direta e indireta sobre o carste no Mato Grosso do Sul.

Autor(es)	Ano	Método(s)	Objetivo(s)
KRAMER et al.	2001	Caracterização morfológica e sedimentológica de depósitos da unidade geomorfológica Taquaruçu, datação por termoluminescência e susceptibilidade magnética	Reconstituição paleoclimática
BERTAUX et al.	2002	Datação U/Th de lâminas de espeleotemas	Reconstituição paleoclimática
TROLLE et al.**	2003	Relação sem associação direta	
SODAG et al.*	2003	Monitoramento do clima pelo EDAS e relação com taxa de gotejamento de espeleotemas	Identificar parâmetros que regem o crescimento de espeleotemas
BOGGIANI et al.	2007	Método Cifuentes, medida de temperatura, umidade e fluxo energético	Determinação do número de visitantes em monumento natural
SALLUN FILHO & KARMANN	2007	Mapeamento geomorfológico 1:60.000	Identificar zonas cársticas morfológicamente distintas
SALLUN FILHO et al.*	2007	Mapeamento e comparação entre dolinas em arenito	Demonstrar a relação com o carste subjacente
LOBO et al.	2009	Proposição da capacidade de carga turística	Identificação de procedimentos técnicos de manejo em práticas espeleoturísticas
SALLUN FILHO et al.	2009	Mapeamento de depósito de tufa	Formalização estratigráfica
PUKER et al.**	2013	Relação sem associação direta	
PANSANI et al.	2016	Descrição e identificação de registro paleontológico de depósitos quaternários	Auxiliar na elucidação sobre extinção da megafauna pleistocênica
DE OLIVEIRA et al.	2017	Registro da ocorrência de mamíferos quaternários	Redefinição da distribuição paleogeográfica
SILVA et al.	2017	Avaliação física, química e mineralógica de solos	Estabelecer a gênese
BECKER et al.*	2018	Análise da assembleia palinológica em sedimentos de lago salino e datação pro radiocarbono	Reconstituição paleoambiental
MIRAYA et al.*	2018	Mapeamento, caracterização petrográfica e classificação dos depósitos de tufas	Interpretação sobre a gênese
OSTE et al.	2018	Correlação de dados isotópicos de carbono, oxigênio e palinológicos, análise geoquímica por DRX e FRX,	Reconstituição paleoambiental e identificação do ambiente deposicional

NOVELLO et al.*	2018	Isótopos de oxigênio e correlação com outras localidades	Reconstituição paleoclimática
TEODORO & AOKI**	2019	Relação sem associação direta	
WARD et al.	2019	Correlação entre isotópicos de estrôncio e oxigênio	Reconstituição paleoclimática
DA SILVA & DANTAS*	2020	Registro da ocorrência de <i>Cuniculus rugiceps</i> e interpretação da razão isotópica de carbono	Reconstituição paleoecológica

*Base de dados dos periódicos CAPES; **Relação sem associação direta com estudos do carste no Mato Grosso do Sul.

5.3.2 Das Tendências

Diante das informações adquiridas pode-se perceber que as pesquisas concentram-se principalmente em torno de temas relacionados à investigação do paleoclima, fazendo posse de dados isotópicos coletados em espeleotemas. Também há o emprego de técnicas destinadas a reconstituição paleoecológica e paleogeográfica. As tufas calcárias são uma das feições do carste do Mato Grosso do Sul mais bem estudadas em termos estratigráficos e paleoambientais, dada a sua importância na indústria de petróleo como rocha reservatório, auxiliando na compreensão de modelos exploratórios. As tufas foram mapeadas e formalizadas em termos estratigráficos, o que auxiliou na compressão de ambientes deposicionais.

Os trabalhos de geomorfologia cárstica foram essenciais para estabelecer as diferenças entre as feições do relevo com o desenvolvimento de dolinas em rochas não-carbonáticas. Enquanto que o espeleoturismo vem buscando formas mais sustentáveis para suas atividades de visitas ao patrimônio natural.

5.3.3 Das Lacunas

O carste fornece inúmeros métodos de pesquisa, exploração e fomento de atividades que podem contribuir para melhor entendimento da paisagem e da interação entre rocha, solo, clima e água e os processos de dissolução. Avaliar as rochas mais solúveis e com maior porosidade (primária ou secundária), permite identificar relevos cársticos, onde o fluxo de água subterrânea tende a formar uma rede complexa de canais, contribuindo para o aparecimento de dolinas, cavernas, lapíás, sumidouros, ressurgências, entre outras feições. Definir as tipologias cársticas, o seu zoneamento hidrológico e os processos geradores de dolinas, tal

como revisado por Ferreira e Uagoda (2019), são questões ainda em aberto no Mato Grosso do Sul.

Neste contexto, denota-se carência de estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, geofísicos e estruturais, os quais podem contribuir para melhor compreensão do carste, pseudocarste e do endocarste do território sul-mato-grossense. Diagnosticar e monitorar os possíveis fluxos de contaminantes sobre estes aquíferos, tendo em vista a ampla atividade agrícola e pecuária desenvolvida no Estado torna-se, portanto essencial para garantir melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis.

5.3.4 Das Condicionantes Geológico-Ambientais

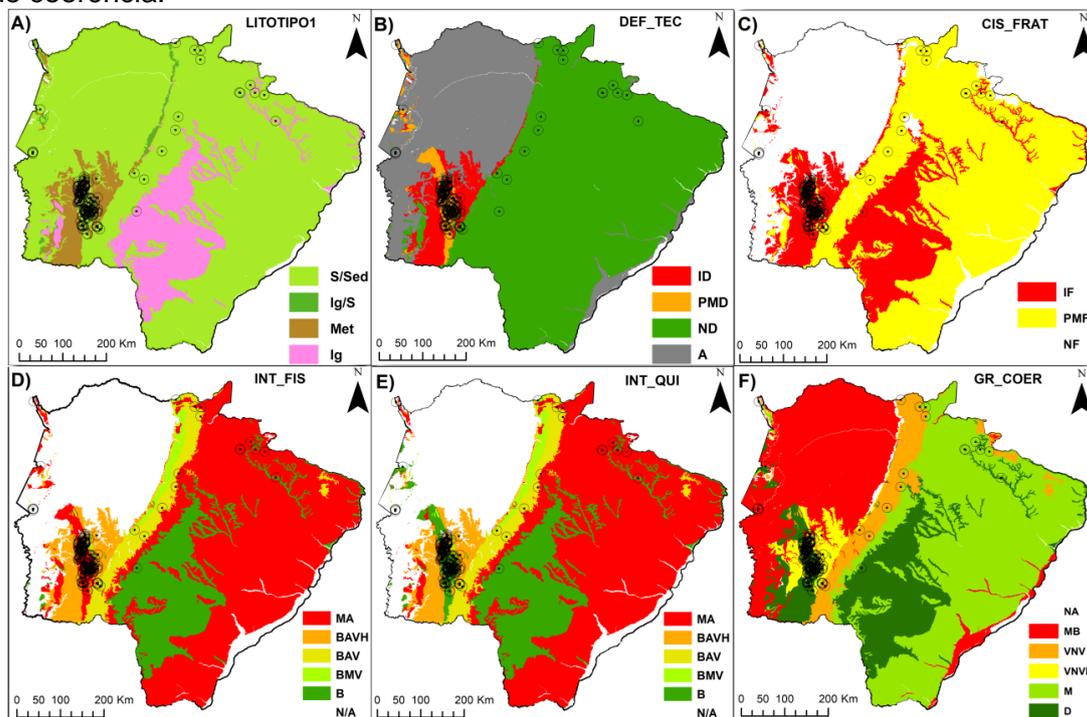
Aproximadamente 21% dos 79 municípios de Mato Grosso do Sul possuem cavidades cadastradas, do total de 268 registros, 78% ocorrem nos municípios de Bodoquena e Bonito, outros 16% em Porto Murtinho, Jardim, Corumbá e Pedro Gomes. O restante de 6% se distribui entre uma ou duas ocorrências em outros 11 municípios. Considerando o número de cavidades por área municipal, tem-se: Bodoquena, Bonito, Jardim, Porto Murtinho e Pedro Gomes destacando-se entre os 5 principais municípios com maior número de cavidades por área variando de $4,7 \times 10^{-2}$ cavidades/Km² a $8,2 \times 10^{-4}$ cavidades/Km².

As classes de rochas que concentram o maior número de cavidades são metamórficas (Met), seguidas pelas sedimentares (S/Sed) e pelas ígneas (Ig), conforme Figura 4A, tendo maior afinidade com ambientes onde a deformação tectônica é considerada pouco ou moderadamente dobrada (PMD), seguida por intensamente dobrada (ID), não dobrada (ND), ou ausência de dobramento (A), de acordo com a Figura 4B. É notória a prevalência de cavidades em domínios onde a tectônica rúptil se estabeleceu, ocorrendo preferencialmente em zonas intensamente fraturadas (IF) ou em zonas pouco a moderadamente fraturadas (PMF), tal como mostrado na Figura 4C.

As cavidades estão associadas a setores onde o intemperismo físico é principalmente moderado a alto (MA), secundariamente onde varia de baixo a alta na vertical (BAV) e com menor expressão onde varia de baixo a alto tanto na vertical quanto na horizontal (BAVH), tendo raras ocorrências onde o intemperismo físico é baixo (B), conforme Figura 4D. As cavidades se estabeleceram em unidades geológicas com amplo contraste de suscetibilidade ao intemperismo químico, desde

baixa (B) a muito alta (MA), Figura 4E. O grau de coerência ou coesão, que diz respeito à resistência à penetração, baseado na tabela de resistência à compressão uniaxial e classes de alteração (VAZ, 1996), desse modo identifica-se maior ocorrência de cavidades em rochas duras (D), seguidas pelas médias (M) e com coerência variável na vertical e horizontal (VNVH), Figura 4F.

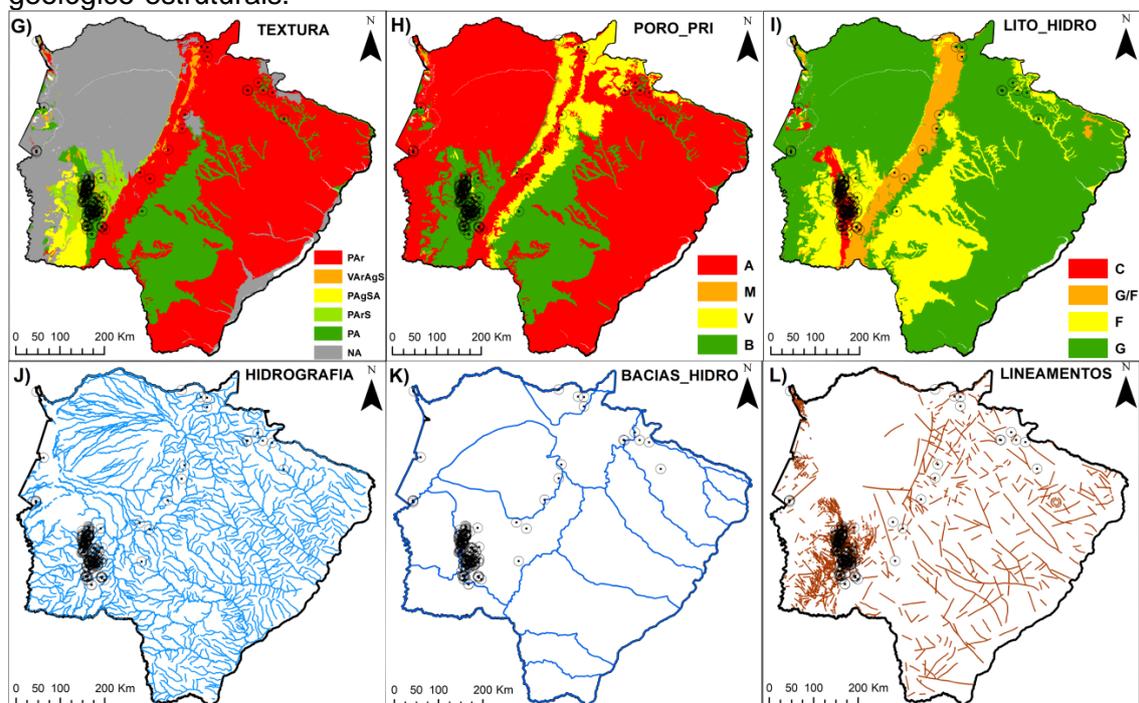
Figura 4 - A) Litotipos que representam mais de 10% da unidade litoestratigráfica; B) Deformação tectônica e/ou dobramentos; C) Tectônica de fraturamento; D) Resistência ao intemperismo físico; E) Resistência ao intemperismo químico; F) Grau de coerência.



Há uma preferência por domínios com rochas de texturas predominantemente arenosas (PA), seguidas por áreas com caráter predominantemente argiloso (Par), Figura 4G. As cavidades ocorrem preferencialmente nos domínios onde há existência de rochas carbonáticas com baixa porosidade primária (B), e secundariamente onde há arenitos com alta porosidade primária (A), sendo mais rara em basaltos com baixa porosidade primária (B), Figura 4H. Os aquíferos com maior incidência de cavidades são os cársticos (C), seguidos pelos mistos – granulares e fraturados (G/F) e em menor expressão os granulares (G), Figura 4I. Estão arranjadas em rochas com amplo intervalo de tempo geológico, do Criogeniano ao Holoceno e estão instaladas preferencialmente na parte alta e média das bacias hidrográficas, próximo a cabeceiras de drenagens (Figura 4J). As bacias

hidrográficas do Rio Miranda, Rio Apa e Rio Taquari concentram 95% das ocorrências, outros 5% são partilhadas nas bacias do Rio Sucuriú, Correntes e Negro, sendo que não há registro para as outras 15 bacias macrorregionais de planejamento (Figura 4K). Relacionam-se preferencialmente com terrenos mais antigos e dissecados, em regiões de alta concentração de lineamentos e com baixa porosidade primária (Figura 4L)

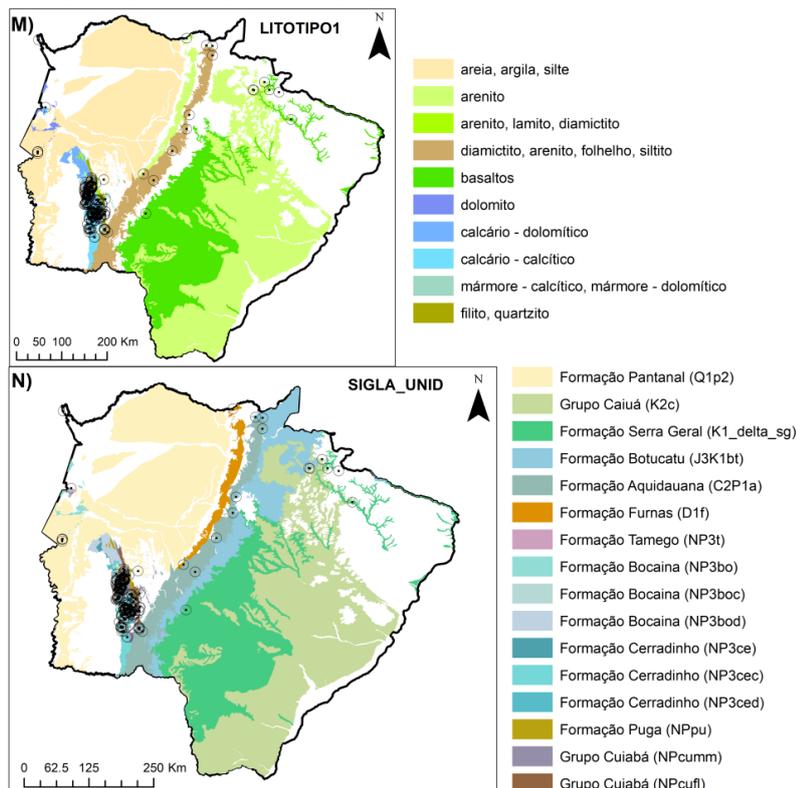
Figura 4 – G) Características do manto de alteração a partir da análise da composição mineral principal das rochas; H) Porosidade primária; I) Classificação do aquífero quanto ao tipo de porosidade; J) Rede hidrográfica com as drenagens principais; K) Bacias hidrográficas para fins de planejamento regional; L) Lineamentos geológico-estruturais.



Cerca de 80% das cavidades ocorrem em rochas carbonáticas neoproterozóicas, 56% das cavidades ocorrem em calcários calcíticos, outros 14% em mármore, 11% arenitos, 10% em calcários dolomíticos, 8% em quartzitos e 1% em basaltos (Figura 4M). A unidade litológica responsável por abrigar o maior número de cavidades (cerca de 59%) é a Formação Bocaina, com metacalcários oolíticos e dolomíticos silicosos, enquanto que mármore e filitos do Grupo Cuiabá correspondem a outros 22% do total. Entre os arenitos se destacam a Formação Aquidauana, Formação Botucatu e o Grupo Caiuá (Indiviso e Formação Santo Anastácio), as quais juntas expressam 5% do total de cadastros (Figura 4N). Até o momento, não há registro de

cavidades nas formações ferríferas, cangas lateríticas, granitos e gnaisses existentes no Estado. Neste contexto, Mato Grosso do Sul dispõe de relevante potencial espeleológico em rochas não carbonáticas, as quais cobrem a maior parte do estado, e mapeamentos com maior detalhe poderão revelar novas cavidades.

Figura 4 – M) Litologias ou material geológico predominante das unidades com alguma ocorrência de cavidade natural; N) Grupo ou Formação Geológica com alguma ocorrência de cavidade natural.



5.3.5 Das Análises Preditivas

O resumo estatístico das variáveis preditoras utilizadas para prever o número de cavidades por área pode ser visto na Tabela 2.

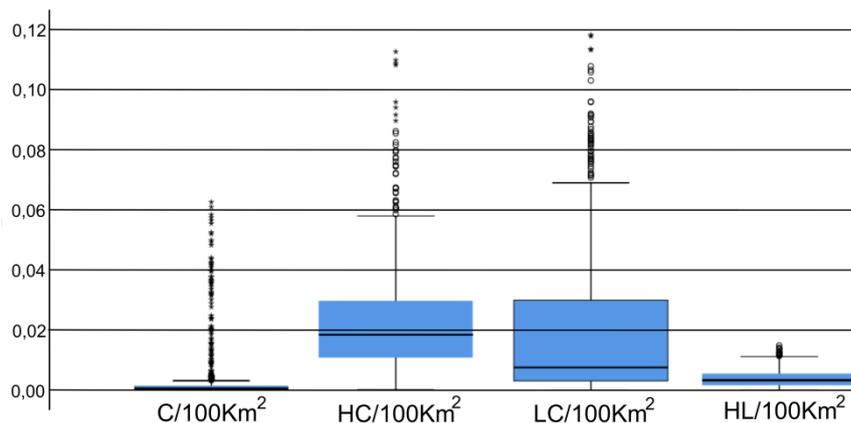
Tabela 2 – Estatística descritiva para as variáveis usadas no modelo de regressão.

Var	N	Média	Mediana	D.P.a	C.V	I.I	Min	Máx	O
C	580,0	0,004615	0,000498	0,011097	2,404300	0,001185	0,000001	0,062611	0,0
HC	580,0	0,023289	0,018390	0,019180	0,823550	0,018867	0,000056	0,112660	0,0
LC	580,0	0,020354	0,007507	0,026129	1,283700	0,027018	0,000000	0,118280	0,0
HL	580,0	0,003964	0,003266	0,003149	0,794360	0,003880	0,000000	0,014847	0,0

Onde: Var = Variável; N = Número de amostras; D.P.a = Desvio padrão amostral; CV: Coeficiente de variação; I.I = Intervalo interquartil; Mín = Mínimo; Máx = Máximo; O = Casos omissos.

O Boxplot (Figura 5) mostra o resumo do conjunto de dados utilizados, onde se verifica alta dispersão de valores e alto número de valores discrepantes para C, HC e LC, sendo HL o dado com menor variabilidade de dispersão de valores.

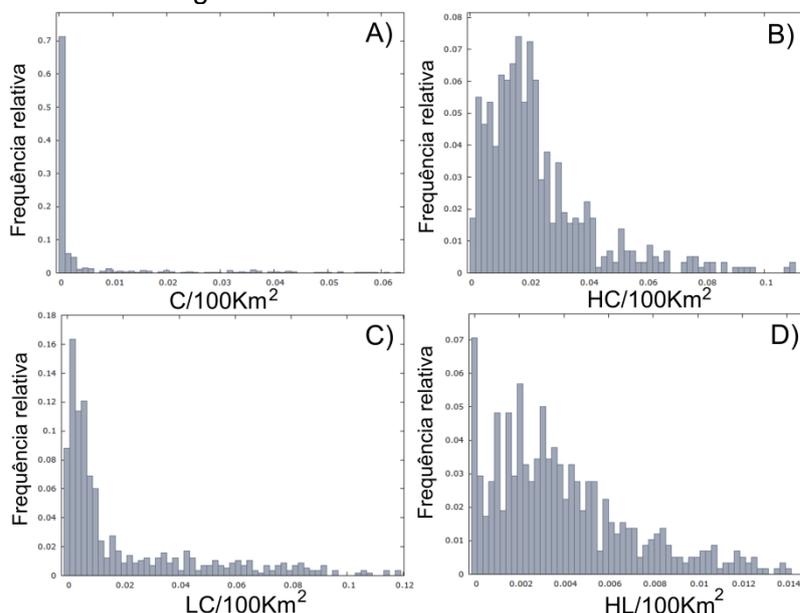
Figura 5 – Boxplot com a distribuição das variáveis C/100Km²; HC/100Km²; LC/100Km² e HL/100Km².



O histograma (Figura 6) resume o conjunto de dados utilizados, mostrando a distribuição da frequência de classes de valores. Observa-se que C e LC concentram grande parte dos dados próximos a limite inferior (zero), enquanto que HC e HL estão mais bem distribuídos, apresentando maior frequência de valores fora do limite inferior. Ou seja, as variáveis C e LC apresentam-se no terreno de forma agrupada, enquanto que HC e HL tendem a ocorrer de forma mais dispersa.

Figura 6 – A) Histograma da distribuição do número de cavidades a cada 100 Km²; B)

Histograma do número de interseções da rede de drenagem com contatos geológicos a cada 100 Km²; C) Histograma do número de interseções de lineamentos geológico-estruturais com contatos geológicos a cada 100 Km² e D) Histograma do número de interseções da rede de drenagem com lineamentos a cada 100 Km².



A correlação bivariada de Spearman mostrou que há uma correlação positiva e baixa entre o número de interseções entre drenagens e contatos geológicos (HC) com o número de cavidades naturais ($\rho = 0,392$; $p < 0,001$), tal como apresentou correlação positiva e fraca com o número de interseções de lineamentos geológico-estruturais e contatos geológicos (LC), sendo ($\rho = 0,336$; $p = 0,001$) e o número de interseções das drenagens e os lineamentos geológico-estruturais (HL), onde ($\rho = 0,228$; $p = 0,001$), Dessa forma temos que a correlação HC>LC>HL em relação as cavidades (C) no geral, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Desempenho da correlação de Spearman do número de interseções por 100 km² e o número de cavidades por 100 km².

Correlação	C x HC	C x LC	C x HL
rô de Spearman (ρ)	0,392**	0,336**	0,228**
Sig. (2 extremidades)	0,000	0,000	0,000
Número de amostras	580	580	580

A regressão simples mostrou que o número de interseções a cada 100 km² entre a rede hidrográfica e contatos geológicos não prevê o número de cavidades (C) a cada 100 km² ($HC = [F(1,578) = 369,984$; $p < 0,001$; $R^2 = 0,390$]), tal fato também ocorre com as interseções de lineamentos geológico-estruturais e contatos

geológicos (LC = [F (1,578) = 349,173; $p < 0,001$; $R^2 = 0,377$]). As interseções entre a rede hidrográfica e os lineamentos geológico-estruturais (HL = [F (1,578) = 117,696; $p < 0,001$; $R^2 = 0,169$]) e com a soma destas interseções ponderada pelo coeficiente de correlação de Spearman, ($HC_P + LC_P + HL_P = [F (1,578) = 536,258$; $p < 0,001$, $R^2 = 0,481$) também não são predictoras de número de cavidades por área (a cada 100 km²), tal como mostra a Tabela 4.

Apesar dos pré-requisitos quanto ao número mínimo de amostras para cada variável preditora, dos valores dos sujeitos experimentais serem independentes e de haver relação linear entre a variável dependente e a variável independente, alguns outros pré-requisitos não foram satisfeitos. Dentre os pré-requisitos da regressão, o teste Durbin-Watson mostrou que existe autocorrelação entre os resíduos ($d < 1,5$), também não houve normalidade dos resíduos, nem homocedasticidade para cada um dos casos, possuindo valores discrepantes acima e abaixo de 3 vezes o desvio padrão (Tabela 4).

Tabela 4 – Desempenho da regressão linear simples do número de interseções por 100 Km² e o número de cavidades por 100 Km².

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão da Estimativa	Durbin-Watson
C x HC	0,625	0,390	0,389	0,0083	0,669
C x LC	0,614	0,377	0,376	0,0089	0,662
C x HL	0,411	0,169	0,168	0,1017	0,268
C x Soma (HC _P +LC _P +HL _P)	0,694	0,481	0,480	0,007999	0,771

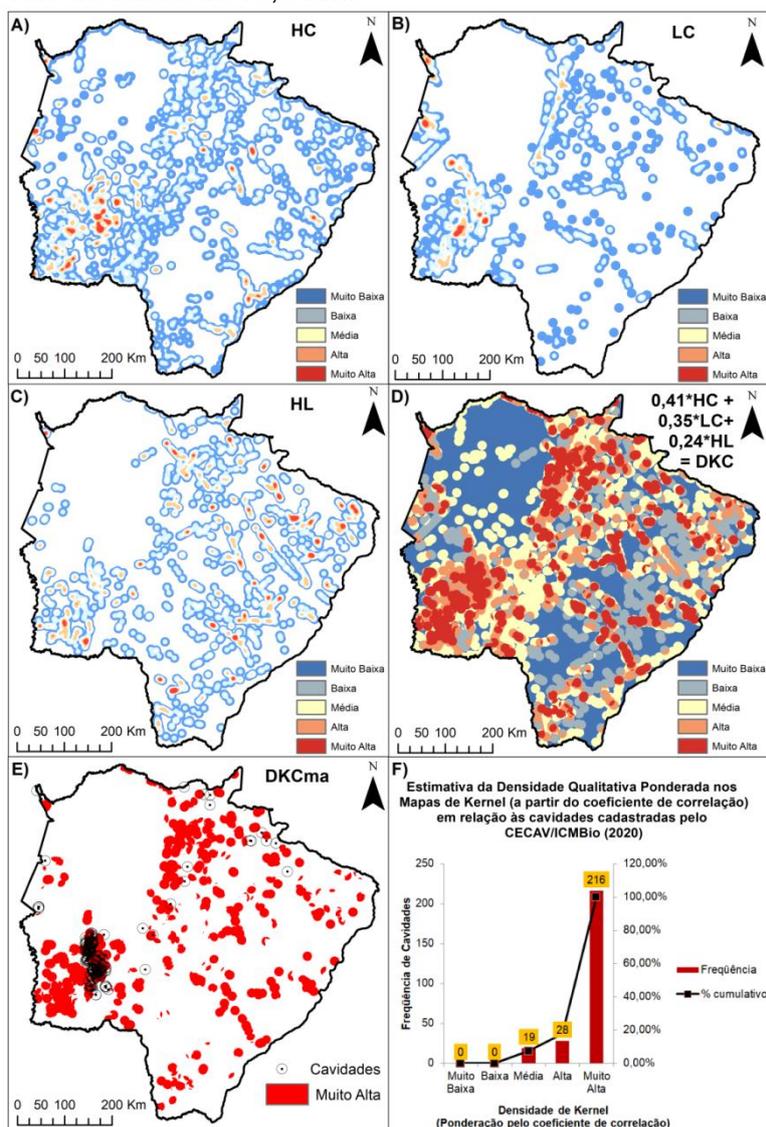
Foi utilizada a regressão múltipla considerando o modelo hierárquico para verificar se as variáveis de interseção ponderadas pelo coeficiente de Spearman (HC_P, HC_P + LC_P e HC_P + LC_P + HL_P), são capazes de prever o número de cavidades por áreas a cada 100 km². A análise resultou em um modelo estatisticamente não significativo [F (3,576) = 185,424; $p < 0,001$; $R^2 = 0,491$]. Pré-requisitos como: número mínimo de amostras para cada variável preditora, valores dos sujeitos amostrais serem independentes, haver relação linear entre a variável dependente e entre as variáveis independentes e não existir multicolinearidade (Tolerância > 0,1; VIF < 10,0), foram atendidos. Porém, o teste Durbin-Watson, mostrou existência de autocorrelação entre os resíduos ($d < 1,5$), bem como não houve normalidade entre os resíduos, nem homocedasticidade, possuindo valores discrepantes acima e abaixo de 3 vezes o desvio padrão (Tabela 5).

Tabela 5 – Desempenho da regressão linear múltipla do número de interseções por 100 Km² o número de cavidades por 100 Km².

Modelo	R	R ²	R ² ajustado	Erro padrão da Estimativa	Mudança de R ²	p-valor	Durbin Watson
C x HCp	0,625	0,390	0,389	0,009	0,390	0,000	0,791
C x (HCp + LCp)	0,690	0,476	0,475	0,008	0,086	0,000	
C x (HCp + LCp +HLp)	0,701	0,491	0,489	0,008	0,015	0,000	

Nesse contexto, sabendo-se que não se podem utilizar as variáveis de interseção HC, LC, HL puras ou ponderadas para prever quantitativamente o número de cavidades. Partiu-se para estimativas qualitativas pelo interpolador de densidade Kernel, usando a função de densidade de probabilidade gaussiana para cada um das variáveis independentes (Figura 7A, 7B, 7C). O mapa de álgebra ponderado o valor arredondado do coeficiente de correlação das variáveis HC, LC e HL, revelou regiões mais propícias à ocorrência de cavidades (Figura 7D, 7E) e a sobreposição das áreas com probabilidade muito alta, quando comparada com áreas com cavidades já cadastradas revelou um forte consistência, considerando um raio de busca de 10 km² (Figura 7F).

Figura 7 – A) Mapa de densidade de Kernel de interseções de drenagens com contatos entre unidade geológicas; B) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre lineamentos e contatos geológicos; C) Mapa de densidade de Kernel para interseções entre drenagens e lineamentos geológicos; D) Mapa da Ponderação entre os Mapas de Kernel anteriores para estimativa qualitativa de áreas mais predispostas à ocorrência de cavidades; E) Áreas com maior probabilidade de ocorrência de cavidades F) Desempenho da estimativa para prever ocorrência de cavidades, considerando raio de busca de 10,0 Km.



De modo geral, os mapas de Kernel mostram que a ocorrência de cavidades está mais bem relacionada às regiões que apresentam interseções entre a rede de drenagem com contatos geológicos, seguida de uma associação secundária onde há lineamentos intercedendo contatos geológicos. Estas associações são melhor explicadas no contexto de afloramento de rochas carbonáticas neoproterozóicas. Para o contexto de cavidades desenvolvidas em substrato de rochas não carbonáticas, as interseções entre a rede de drenagem e lineamentos geológico-

estruturais são mais evidentes e, portanto melhor relacionadas, estando associadas de forma secundária a interações entre a rede de drenagem com contatos geológicos.

5.3.6 Das autocorrelações espaciais

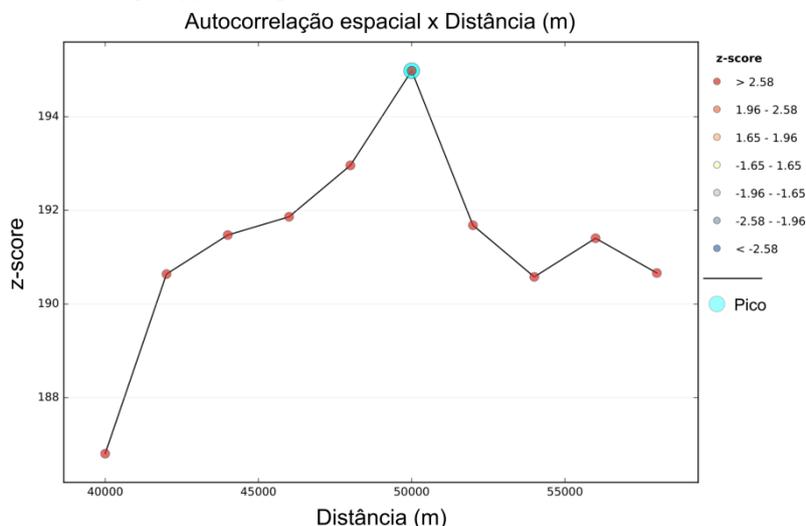
A Tabela 6 mostra que todas as variáveis possuem padrão agrupado, onde a diferença entre as n observações pode ser em parte descrita pela distância entre elas, havendo dependência espacial nas medidas, ou seja, indica que valores próximos tende a ser mais semelhantes entre si. Seguindo essa lógica temos que a autocorrelação espacial de $LC > HC > C > HL$, onde descartamos a hipótese nula de aleatoriedade (H_0), sendo $p < 0,005$ e $z\text{-score} > 0$.

Tabela 6 – Resumo estatístico do índice de Moran Global.

	C	HC	LC	HL
Índice de Moran Global	0,89771	0,929352	0,92863	0,896365
Índice Esperado	-0,000265	0,000265	-0,000265	-0,000265
Variância	0,000210	0,000136	0,000136	0,000138
Z score	103,006040	82,724727	82,577861	78,594061
p-valor	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Ao avaliarmos o z-score em relação à distância (Figura 8), o maior valor que indica que número de cavidades por área possuirá maior dependência espacial quando analisada em distâncias com passos de 50 Km, ou seja, o padrão agrupado é mais forte e o disperso é mais fraco, diminuindo a probabilidade de distribuição aleatória. Neste caso, para uma análise exploratória de novas cavidades se indica fazer observações em grades regulares de 50 Km, onde a dependência espacial é mais intensa, dado o contexto atual da escala de mapeamento e a quantidade e distribuição espacial das cavidades cadastradas.

Figura 8 – Autocorrelação espacial incremental mostrando os raios do passo onde se verifica maior dependência espacial dada à configuração da distribuição de cavidades cadastradas no Mato Grosso do Sul.



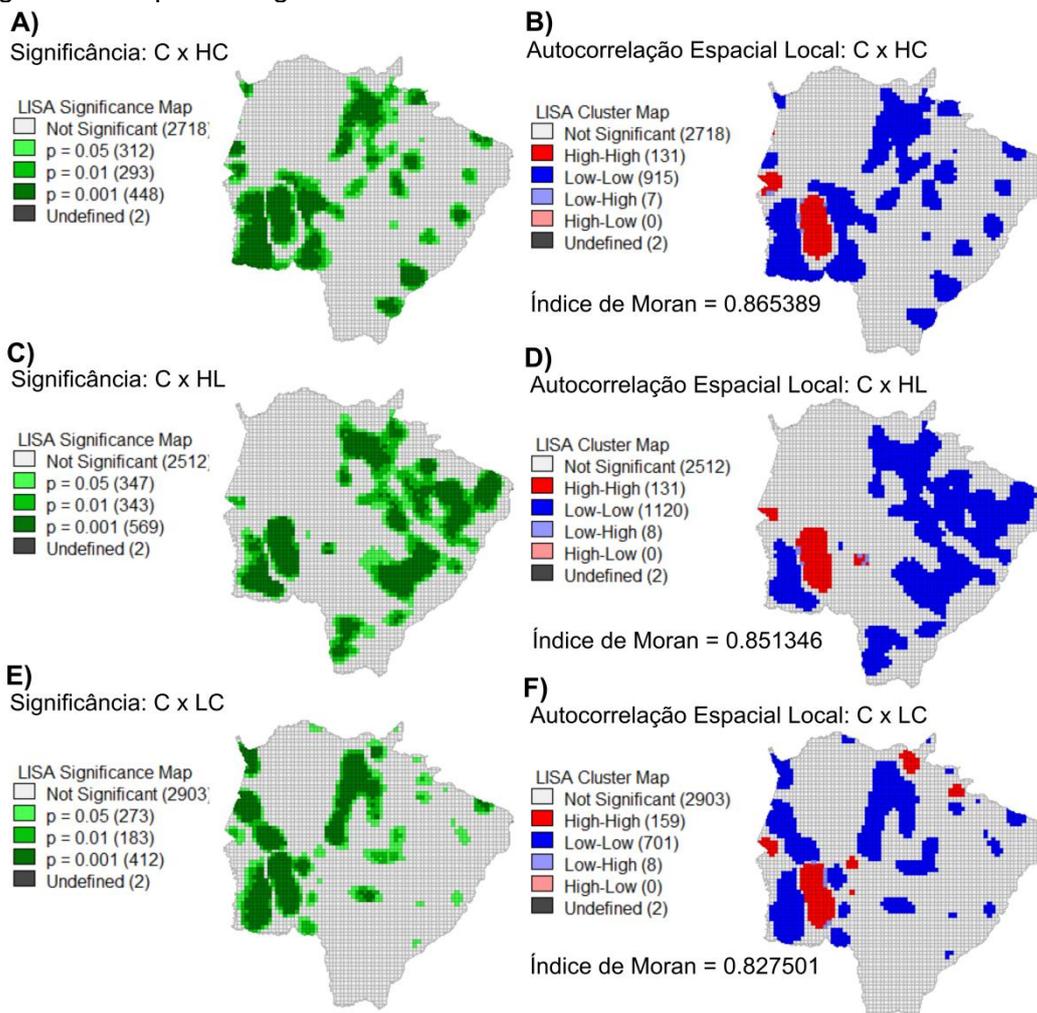
A aplicação do índice de associação local (LISA) representada em cartogramas fornece identificação de agrupamentos e zonas de transição entre bivariáveis.

Os mapas de significância de autocorrelação espacial local de Moran (Figura 9A, 9C, 9E) mostram os locais com uma estatística local significativa, representando em tons de verdes cada vez mais escuros. Para valores não significantes o apontamento se dá em condições onde o número de interseções ou de cavidades estimada é nulo para ambas as variáveis, considerando o valor até a sexta casa decimal.

Os mapas de clusters (Figura 9B, 9D, 9F) demonstra para as localizações significativas o tipo de associação espacial, expressas em quatro categorias em relação à média, onde: vermelho escuro (clusters alto-alto), azul escuro (clusters baixo-baixo), azul claro (valores discrepantes baixo-alto), vermelho claro (valores discrepantes alto-baixo).

De modo geral, os mapas da Figura 9, sugerem padrões de autocorrelação diferentes, o que implica em efeitos de interação diversificados com as variáveis condicionantes a depender do substrato rochoso ou compartimento geológico-ambiental envolvido.

Figura 9 – Mapas de significância e de clusters dos índices de Moran local.



A relação entre C e HC (Figura 9A, 9B) revela que há uma dependência espacial entre estas variáveis com intervalo de confiabilidade entre 95% e 99%, sobretudo nos domínios onde há rochas do Grupo Cuiabá (subunidade carbonática), Grupos Corumbá (Fm. Cerradinho, Fm. Bocaina e Fm. Tamego). Nos setores onde há alta significância, porém com associações equivalentes de baixa densidade pra ambas variáveis (C e HC), predominam rochas dos Grupos São Bento (Fm. Botucatu e Fm. Serra Geral) e Caiuá (Fm. Santo Anastácio).

A relação entre C e HL (Figura 9C, 9D) acompanha o mesmo sentido da relação anterior, porém nesta se torna mais evidentes domínios de alta-significância na autocorrelação do tipo baixo-baixo. As unidades que apresentam associação baixo-baixo, entre C e HL, são regiões de ocorrência do maciço Rio Apa (complexo metavulcanossedimentar), bem como na porção oriental do Estado onde o substrato rochoso é representado pelo Grupo Caiuá (Fm. Caiuá Indiviso e Fm. Santo

Anastácio). Chama-se atenção para a autocorrelação (alto-alto) das variáveis C e HL na parte central do mapa (Figura 9D), onde aflora a Formação Aquidauana, em zona de degraus estruturais e rebordos erosivos, indicando uma resposta a essa interação na forma de relevo predominante.

A relação entre C e LC (Figura 9E, 9F) é significativamente alta nas unidades carbonáticas do Grupo Cuiabá e Corumbá, tal como as interações anteriores, porém nesta há maior autocorrelação com aglomerados do tipo alto-alto em unidades de rochas não carbonáticas. Nas porções onde aparecem rochas da Fm. Ponta Grossa, Fm. Aquidauana e Fm. Santo Anastácio, as quais são predominantemente areníticas com certa interdigitação com argilito, siltito e conglomerado, a relação entre C e LC há bolsões de significância na dependência espacial e conseqüentemente uma autocorrelação espacial positiva. Isso mostra que zonas de lineamentos geológico-estruturais próximas a contatos entre unidades geológicas são áreas propícias ao desenvolvimento de processos de carstificação, o que vem confirmando evidências de mapeamento efetuadas por outros autores no Estado, tal como nos trabalhos de Sallum Filho (2007a), Sallum Filho (2007b), Guirra et al., (2019) e Guirra, Paranhos Filho (2020).

Em face destas constatações podemos estabelecer a seguinte regra para as condicionantes geológico-ambientais de interseção previsoras de processos de carstificação: Em cavidades tipicamente carbonáticas a autocorrelação $HC > HL > LC$, enquanto que em cavidades não carbonáticas estas variáveis promovem controle e intensidade inversamente proporcional, sendo $LC > HL > HC$.

5.4 CONCLUSÃO

Estudos sobre o carste do Mato Grosso do Sul são recentes (a menos de 20 anos) e se concentram em temas de reconstituição paleoambiental, paleoclimática, paleoecológica e paleogeográfica. Nestes trabalhos, o estado de conservação dos espeleotemas, vestígios fósseis e arqueológicos foram fundamentais. O uso de isótopos de oxigênio, carbono e estrôncio mostraram-se como técnicas promissoras de alta resolução na reconstituição paleoambiental. A posição geográfica em relação à América Latina e os padrões de circulação atmosféricas atualmente vigentes nesta região, bem como, a preservação dos espeleotemas, a existência extensos depósito de tufas e evidências de restos de megafauna pleistocênica com coexistência

humana, torna o carste no Mato Grosso do Sul, estrategicamente importante para entender interações ecológicas e reconstruir cenários paleoambientais.

Outras contribuições dizem respeito a mapeamentos geomorfológicos, estratigráficos, da gênese de solos e sobre a gestão do patrimônio natural para desenvolvimento do espeleoturismo. A partir deste estudo verificamos a carência de pesquisas que fazem uso da hidrogeologia, geofísica e de geologia estrutural no carste, haja vista a relevância destes temas para o entendimento da dinâmica destes ambientes.

Apesar de haver correlação entre interseções por área dos parâmetros geológicos (rede hidrográfica, contatos de unidades geológicas e lineamentos geológico-estruturais) com o número de cavidades por área, essa correlação mostrou-se fraca. Não é possível prever quantitativamente o número de cavidades a partir destas interseções, tendo em vista que nem todos os pré-requisitos das regressões (simples e múltipla) foram atendidos. Diante deste fato, aceitamos a hipótese nula (H_0), onde o ajuste do modelo sem previsor é igual o ajuste do modelo com o previsor. Porém, o estimador de densidade Kernel Gaussiano mostrou-se eficiente na estimativa qualitativa de áreas propícias a ocorrência de cavidades, quando ponderada pelo coeficiente de correlação na equação algébrica de mapas utilizando as variáveis HC, LC e HL como previsores.

Os métodos estatísticos espaciais dados pelos índices de Moran (global e local), bem como o nível de significância das autocorrelações mostraram-se eficientes para identificação de padrões de agrupamento entre as variáveis de interseção (HC, LC e HL) com as cavidades (C). Estas condicionantes geológico-ambientais atuam de maneiras distintas em rochas carbonáticas e não-carbonáticas, sendo que a partir deste estudo conclui-se que a autocorrelação das variáveis HC, LC e HL a depender do substrato geológico atuam com intensidade inversamente proporcional. Ou seja, em rochas carbonáticas temos que a autocorrelação segue a ordem $HC > HL > LC$, enquanto que em rochas não-carbonáticas (arenitos) opera a sequência $LC > HL > HC$. As informações oriundas deste estudo servirão como uma primeira aproximação sobre estimativas de zonas homólogas potencialmente carstificáveis. Sugerimos para estudos futuros a aplicação do *Karst Disturbance Index* (PARISE, 2010), o qual considera perigos naturais e antropogênicos. Na avaliação do grau de perturbação destes ambientes. Também utilizar as informações oriundas deste estudo para futuras campanhas de prospecção, aliando técnicas de geoprocessamento,

parâmetros métricos de bacias hidrográficas e da rede de drenagem associada a métodos aerogeofísicos, possibilitando identificação do encodaste ou feições associadas que repercutem na superfície, tal como sumidouros e ressurgências.

5.5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PGTA/UFMS (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Esta pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Também ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Processo 1815261/2019-01 de bolsa de doutorado; Processo 305013/2018-1 de bolsa de produtividade em pesquisa)

Esse trabalho contou com o apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC.

5.6 REFERÊNCIAS

ANSELIN, L.; SYABRI, I. & KHO, Y. GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, v.38, n.1, p. 5-22, 2006.

BALSAMO, F.; BEZERRA, F.H.R.; KLIMCHOUCK, A.B.; CAZARIN, C.L.; AULER, A.S.; NOGUEIRA, F.C. & PONTES, C. Influence of fracture stratigraphy on hypogene cave development and fluid flow anisotropy in layered carbonates , NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 114, n. December 2019, p. 104207, 2020.

BECKER, B.F.; SILVA-CAMINHA, S.A.F.da.; GUERREIRO, R.L.; OLIVEIRA, E.J.de.; D'APOLITO, C.D. & ASSINE, M.L. Late Holocene palynology of a saline lake in the Pantanal of Nhecolândia, Brazil. *Palynology*, v. 42, n. 4, p. 457–465, 2018.

BERTAUX, J.; SONDAG, F.; SANTOS, R.; SOUBIÈS, F.; CAUSSE, C.; PLAGNES, V.; CORNEC, F.L. & SEIDEL, A. Paleoclimatic record of speleothems in a tropical region: Study of laminated sequences from a Holocene stalagmite in Central-West Brazil. *Quaternary International*, v. 89, n. 1, p. 3–16, 2002.

BOGGIANI, P.C.; SILVA, O.J.da.; GESICKI, A.L.D.; GALLATI, E.A.B.; SALLES, L.de.O. & LIMA, M.E.R. Defining carrying capacity fortourism in caves of the Gruta do Lago Azul Natural Monument (Bonito, MS) . *Geociencias*, v. 26, n. 4, p. 333–348, 2007.

CAPES. 2020. Portal de Periódicos da Capes. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

CANIE. 2020. Cadastro Nacional de Informações Espeleológica: Sistema Nacional de Informações do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>> Acesso em: 03 de setembro de 2020.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geodiversidade de Mato Grosso do Sul (1:1.000.000). Campo Grande, 2009. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>> Acesso em: 15 de março de 2019.

DA SILVA, G.C.R. & DANTAS, M.A.T. Fossil record and isotopic paleoecology ($\delta^{13}C$) of *Cuniculus rugiceps* in Toca da Raposa, Simão Dias, Sergipe, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 1, p. 334–338, 2020.

DE OLIVEIRA, A.M.; KERBER, B.K.; BORGHEZAN, L.M.C.R.; AVILLA, L.S.; PACHECO, M.L.A.F. & SANTOS, C.M.D. Quaternary mammals from central Brazil (Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul) and comments on paleobiogeography and paleoenvironments. *Revista Brasileira de Paleontologia*, v. 20, n. 1, p. 31–44, 2017.

ELSEVIER BV. Scopus Database. Disponível em: <https://www.scopus.com> Acesso em: 11 fevereiro de 2020.

FERREIRA, C.F. & UAGODA, R.E.S. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Caminhos de Geografia*, v. 20, n. 70, p. 519-53, 2019.

GOLDSCHIEDER, N.; CHEN, Z.; AULER, A.S.; BAKALOWICZ, M.; BRODA, S.; DREW, D.; HARTMANN, J.; JIANG, G.; MOOSDORF, N.; STEVANOVIC, Z. & VENI, G. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources, v. 28, p. 1661–1677, 2020.

GUIRRA, A.P.M.; CARVALHO, I.S.; VASCONCELOS, A.M.C & PARANHOS FILHO. Carste em arenito pós-basalto no nordeste de Mato Grosso do Sul. In: RODET, J (Org.). IV Simpósio Mineiro do Carste: o carste em suas múltiplas dimensões. 01 ed. Belo Horizonte, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, 2019, v. 01, p. 17-18.

GUIRRA, A.P.M. & PARANHOS FILHO, A.C. Cavidades do Mato Grosso do Sul. I Open Network em Geotecnologias. Evento Online, Universidade Federal do Semi-Árido. 2020. No prelo.

IBGE. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ms.html>> Acesso em: 26 de novembro de 2020.

IBM Corp. 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Versão 22.0. Armonk, NY: IBM Corp.

KLAAS, D.K.S.Y.; IMTEAZ, M.; SUDIAYEM, I.; KLASS, E.M.E. & KLASS, E.C.M. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. *Journal of Hydrology*, v. 582, n. October 2019, p. 124426, 2020.

KRAMER, V.M.S. & STEVAUX, J.C. Climatic changes in the Taquaruçu region (MS, Brazil) during the Holoceno. *Boletim Paranaense de Geociências*, n. 49, p. 79–91, 2001.

LIMA, D.L.; MOTTA, J.S.; SOUZA, C.A.; GUIRRA, A.P.M. & PARANHOS FILHO, A.C. Revisão bibliométrica sobre turbidez e sólidos suspensos por sensoriamento remoto. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, n.1, p.107-116, 2019.

LOBO, H.A.S. & MORETTI, E.C. Tourism in caves and the conservation of the speleological heritage: The case of serra da bodoquena (mato grosso do sul state, Brazil). *Acta Carsologica*, v. 38, n. 2–3, p. 265–276, 2009.

MACIEL FILHO, C.; NUMMER, A.V.; SILVA, J.L.S.; SANGONI, D.S. & DESCOVI FILHO, L. Feições de carste sobre a Formação Serra Geral, na região de Vacaria, RS, e Lages, SC. *Caminhos da Geografia*, v. 14, n.48, p. 197-208, 2013.

MIRAYA, B.B.; SALLUN FILHO, W.; RIBEIRO, L.M.A.L.; BOGGIANI, P.C. & SHIMADA, H. New occurrences of tufa in the ribeira river valley (São Paulo state, Brazil) . *Geociências*, v. 37, n. 2, p. 299–313, 2018.

MOTHÉ, D.; AVILLA, L.S.; ARAÚJO-JÚNIO, H.I.; ROTTI, A.; PROUS, A. & AZEVEDO, S.A.K. An artifact embedded in an extinct proboscidean sheds new light on human-megafaunal interactions in the Quaternary of South America. v. 229, 2020.

NOVELLO, V.F.; CRUZ, F.W.; MOQUET, J.S.; VULLUE, M.; de PAULA, M.S.; NUNES, D.; EDWARDS, R.L.; CHENG, H.; KARMANN, I.; STRIKIS, N.M. & CAMPOS, J.L.P. Two Millennia of South Atlantic Convergence Zone Variability Reconstructed From Isotopic Proxies. *Advanced Earth and Space Science, Geophysical Research Letters*, p. 5045–5051, 2018.

OLARINOYE, T.; GLEESON, T.; MARX, et al. Global karst springs hydrograph dataset for research and management of the world's fastest- flowing groundwater. p. 1–9, 2020.

OSTE, J.T.F.; ARAI, M.; FRANÇA, A.B.; CURY, L.F. & BAHNIUK, A.M. Geochemistry and palinology of calc tufas of the Bonito region (MS): environmental implications. *Geociências*, v. 37, n. 4, p. 733-744, 2018.

PANSANI, T.R.; DE OLIVEIRA, A.M. & PACHECO, M.L.A.F. New occurrence of Pleistocene megafauna in Mato Grosso do Sul . *Revista do Instituto Geológico*, v. 37, n. 2, p. 73–85, 2016.

PARISE, M. Harzards in Karst. In: BONACCI, O. Sustainability of the karst environment. International Interdisciplinary Scientific Conference [Proceedings], Centre for Karst, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, Fontenoy, Paris. 2010. p.155-162.

PUKER, A.; CORREA, C.M.A.; KORASKI, V.; FERREIRA, K.R. & OLIVEIRA, N.G. Dung beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) attracted to dung of the largest herbivorous rodent on earth: A comparison with human feces. *Environmental Entomology*, v. 42, n. 6, p. 1218–1225, 2013.

QGIS Development Team. 2020. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Avaliado em: <<http://www.qgis.org/>>. Acessado: Abril 10, 2020.

SALLUN FILHO, W.; BOGGIANI, P.C. & CRISTALLI, P.de.S. The deposition of quaternary tufas in Mato Grosso do Sul state: Proposal for the definition of the Serra da Bodoquena Formation. *Geologia USP - Serie Cientifica*, v. 9, n. 3, p. 47–60, 2009.

SALLUN FILHO, W. & KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 3, p. 551–564, 2007a.

SALLUN FILHO, W. & KARMANN, I. Geomorphological map of the Serra da Bodoquena karst, west-central Brazil. *Journal of Maps*, v. 3, n. 1, p. 282–295, 2007b.

SEFRIN, R.; ARAÚJO, E.C. & BAZZI, C.L. Análise espacial de área aplicada a produtividade de soja na região oeste do Paraná utilizando o software R. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 1, p. 23-43, 2018.

SONDAG, F.; RUYMBEKE, M.van.; SOUBIÈS, F.; SANTOS, R.; SOMERHAUSEN, A.; SEIDEL, A. & BOGGIANI, P. Monitoring present day climatic conditions in tropical caves using an Environmental Data Acquisition System (EDAS). *Journal of Hydrology*. v. 273, p. 103–118, 2003.

SOUZA, M.T.de.; SILVA, M.D.da.; CARVALHO, R.de. Integrative review: what is it? How to do it? *Einstein*, v.8, p.102-106, 2010.

SI-LIANG, LI.; CONG-QUIANG, L.; JIN-NA, C. & SHI-JIE, W. Agriculture, Ecosystems and Environment Karst ecosystem and environment: Characteristics, evolution processes, and sustainable development. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 306, n. July 2020, p. 107173, 2021.

SILVA, M.B.; ANJOS, L.H.C.dos.; PEREIRA, M.G.; CHIAVO, J.A.; COOPER, M. & CAVASSANI, R.de.S. Soils in the karst landscape of Bodoquena plateau in cerrado region of Brazil. *Catena*, v. 154, p. 107–117, 2017.

TEODORO, J. R. & AOKI, C. Effect of temperature and relative humidity on the behavior of *Capybaras* (*Hydrochoerus hydrochaeris*) in an urban area. *Oecologia Australis*, v. 23, n. 4, p. 1109–1113, 2019.

TROLLE, M. Mammal survey in the southeastern Pantanal, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, v. 12, n. 4, p. 823–836, 2003.

VAN ECK, N.J. & WALTMAN, L. VOS: A new method for visualizing similarities between objects. In: DECKER, R, LENZ, H.J (eds). *Advances in data analysis: Studies in Classification, Data Analysis and Knowledge Organization*, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 299-306, 2007.

VAZ, L.F. Genetic classification of soils and rock weathering layers in tropical regions. *Solos e Rochas*, São Paulo, v. 19; n. 2, p. 117-136, 1996.

VOSviewer. 2020. VOSviewer version 1.6.15. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/download>> Acesso em: 13 de janeiro de 2020.

WARD, B.M.; WONG, C.I.; NOVELLO, V.F.; MCGEE, D.; SANTOS, R.V.; SILVA, L.C.R.; CRUZ, F.W.; WANG, X.; EDWARDS, R.L. & CHENG, H.. Reconstruction of Holocene coupling between the South America Monsoon System and local moisture variability from speleothem $\delta^{18}O$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$ records. *Quaternary Science Reviews*, v. 210, p. 51–63, 2019.

Data de Submissão: 26 de dezembro de 2020

Periódico: *Ciência e Natura* (A3)

Status: Em avaliação

28/12/2020

Gmail - [CeN] Submission Acknowledgement



Alesson Guirra <engeoguirra@gmail.com>

[CeN] Submission Acknowledgement

Prof. Hans Rogério Zimmermann <cienciaenatura@ufsm.br>
Para: "Sr. Alesson Pires Maciel Guirra" <engeoguirra@gmail.com>

26 de dezembro de 2020 15:17

Sr. Alesson Pires Maciel Guirra:

Thank you for submitting the manuscript, "Cavernas do Mato Grosso do Sul: revisão, atributos condicionantes, análise preditiva e autocorrelação espacial" to Ciência e Natura. With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site:

Manuscript URL:
<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/author/submission/63695>
Username: alesson

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

Prof. Hans Rogério Zimmermann
Ciência e Natura
Ciencia e Natura Journal - Editorial Team

06

CAPÍTULO

Modelo empírico do potencial hídrico subterrâneo por meio de geoprocessamento: o que mais ele pode nos dizer?

Resumo

O Modelo Empírico do Potencial Hídrico Subterrâneo (MEPHS) proposto por Brandão e Gomes e testado para aquíferos fissurais é baseado em regras heurísticas, compondo-se de variáveis explicativas tais como o índice de fraturamento. O objetivo deste trabalho é aplicar o MEPHS em região inserida na Bacia Intracratônica do Paraná, tendo em vista evidências de controle estrutural de drenagens e lineamentos associados a atividades neotectônicas. Também é explorada a relação do MEPHS e os temas associados a ele com nascentes, ressurgências e cavidades em arenito. Aplicou-se adaptação ao método de vulnerabilidade à contaminação de aquífero GOD para verificar a relação com o MEPHS. É proposto estimar o nível estático usando o MEPHS, a cota dos poços e a superfície do nível d'água interpolada pelo método *Spline*. O MEPHS não é viável para aquíferos porosos pouco afetados por lineamentos, porém é indicado para explorar áreas favoráveis à ressurgências, e processos ativos de carstificação quando combinado ao método de polígonos de Voronoi, sendo sugerido para aquíferos fraturados ou de dupla porosidade. O método GOD demonstrou que as regiões onde estão localizados os poços tubulares tende a apresentar vulnerabilidade baixa, sendo o principal fator atenuante à profundidade do nível estático, abaixo de 50 metros.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Geotecnologias, Metodologias.

Abstract

The Empirical Model of Underground Water Potential (MEPHS) proposed by Brandão and Gomes and tested for fissure aquifers is based on heuristic rules, composing itself of explanatory variables such as the fracturing index. The objective of this work is to apply the MEPHS in a region inserted in the Intracratonic Basin of Paraná, in view of evidence of structural control of drainages and lineages associated with neotectonic activities. The relationship of MEPHS and the themes associated with it with springs, surgencys and cavities in sandstone is also explored. The method of vulnerability to GOD aquifer contamination was applied to verify the relationship with MEPHS. It is proposed to estimate the static level using MEPHS, well dimension and water level surface interpolated by the *Spline* method. MEPHS is not feasible for porous aquifers little affected by lineage, but is indicated to explore areas favorable to surgency, and active karst processes when combined with the Voronoi polygon method, being suggested for fractured or double porosity aquifers. The GOD method demonstrated that the regions where the tubular wells are located tends to present low vulnerability, and the main mitigating factor is the depth of the static level, below 50 meters.

Keywords: Hydrogeology, Geotechnologies, Methodologies.

6.1 INTRODUÇÃO

No âmbito do Projeto Águas Subterrâneas do Nordeste do Brasil (PROASNE), executado entre 2003 e 2004, a folha Irauçuba (SB.24Y-D-V) foi uma das áreas piloto escolhidas pelo Serviço Geológico do Brasil em parceria com o Serviço Geológico do Canadá, com outras instituições estaduais e federais. Nesta área foram aplicadas tecnologias avançadas para aumentar o conhecimento hidrogeológico para reduzir o insucesso de locação de poços e conseqüentemente melhorar o aproveitamento destes. Um dos grandes problemas enfrentados naquela

região, diz respeito à salinização em terrenos de rochas cristalinas, além da escassez de recursos hídricos (GOMES, 2008).

Ao compilar variáveis explicativas que influenciam no processo e armazenamento de água em meios fissurais, tal como; fraturas, declividade e intemperismo, Gomes e Brandão (2003), após análise exploratória, propuseram dois modelos de potencial hídrico subterrâneo. Um dos modelos é baseado no conhecimento revisado e previamente estabelecido, o qual possui atributos hierarquizados e ponderados por regras heurísticas para compor os temas selecionados. O outro modelo é fundamentado em análise estatística dos dados espaciais (GOMES, 2008).

Há evidências de controle estrutural no ordenamento das drenagens, nas escarpas associadas, relacionadas ou não com reativações cenozoicas da antiga zona de fraqueza em diversas regiões da bacia sedimentar do Paraná (PINHEIRO et al., 2019; BONGIOLO et al., 2014; CAMOLEZI et al., 2012) e em contextos geológicos semelhantes aos do município de Paraíso das Águas – Mato Grosso do Sul (ALBREZ, 2013). Há também evidências sísmicas, geomorfológicas, estruturais da atividade neotectônica que mostram que a Planície do Pantanal, é uma bacia sedimentar ativa, controlando a existência, o arranjo e a conectividade entre drenagens de diferentes ordens e lagos, bem como a compartimentação de suas sub-regiões (MIOTO et al., 2019; PARANHOS FILHO et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2018; ASSINE et al., 2015; PARANHOS FILHO et al., 2013).

Nesse cenário, as zonas de acomodação estrutural representa um composto de profundas fraturas crustais, que em escala regional, se interligam, formando um cinturão transcontinental com zona de acomodação e deformação intraplaca a qual repercutiu também a incidência e reativação de bacias andinas no período Triássico ao Jurássico, sugerindo que o controle de lineamentos crustais está intimamente relacionado com a reorganização de blocos crustais, incluindo setores da Bacia do Paraná (JACQUES et al., 2003).

No município de Paraíso das Águas (MS) foram mapeados dois pontos de ocorrência de ressurgência (CARVALHO, 2018), que é um tipo de exfiltração que se integra a rede de drenagem e possui características físico-químicas, localização, condições de relevo e fluxo d'água subterrâneo diferente das águas superficiais e nascentes freáticas (FELIPPE et al., 2013). Outra evidência que chama atenção pelo fato de não ser raro é a existência de cavidades em arenitos sobrepostos a derrames basálticos, as quais foram cartografadas neste estudo.

A integração de banco de dados secundários de domínio público, contendo informações geológicas, hidrogeológica e geomorfológicas, aliadas a métodos geoestatísticos e de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), vêm apresentando resultados satisfatórios para prever produtividade de poços, no que se refere à vazão específica, nos quais o aumento da densidade de lineamentos é proporcional às áreas com maior potencial hídrico, com falhas e/ou fraturas condicionando a existência de espaços vazios, favoráveis à circulação do fluxo d'água subterrâneo (COSTA et al., 2018). A obtenção de informações de subsuperfície, sobretudo relacionadas a recursos hídricos é dificultada por diversos fatores intervenientes, tais como, disponibilidade e ocorrência, porém com o avanço tecnológico e da integração de diversas fontes de informações hidrogeológicas atualmente disponíveis é possível definir regiões de maior potencialidade hídrica (HERNADEZ, 2019).

É viável utilizar imagens de satélite de média-alta resolução espacial para elaborar mapas hidrológicos e de nascentes para atender diversas finalidades, sendo o processamento de informações geográficas essencial para análises qualitativas e quantitativas de drenagens e nascentes, oferecendo agilidade, objetividade, consistência e precisão para tomadas de decisão (BOSQUILIA et al., 2015).

Nesse contexto, o objetivo geral desse estudo é novas aplicações do Modelo Empírico do Potencial Hídrico Subterrâneo (MEPHS) proposto por Brandão e Gomes (2003), utilizando sistema de informações geográficas. Os objetivos específicos são:

- Refinar e atualizar o Plano de Informações dos temas necessários ao MEPHS;
- Identificar a tendência de ocorrência dos lineamentos, em relação as unidade geológicas cartografadas, a frequência absoluta e a densidade absoluta;
- Elaborar o MEPHS para o município de Paraíso das Águas;
- Explorar o MEPHS para prospectar ressurgências e cavidades com técnicas de busca por distância euclidiana e estatística determinística;
- Verificar qual método de interpolação é mais indicado para espacializar o nível d'água subterrâneo a partir da localização das nascentes;
- Espacializar o nível d'água estático (NE) por análise estatística, utilizando dados de poços tubulares (SGB, 2020) como: carga hidráulica, cota e

superfície do nível d'água obtida por interpolação do nível de exfiltração das nascentes (conforme etapa anterior deste estudo).

- Verificar a relação entre a densidade de nascentes com o MEPHS;
- Adaptar o método GOD de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (Foster et al., 2006) e relacionar com o MPHS.
- Elaborar modelo conceitual representativo da interação rocha/água para esta área de estudo, consistido por estudos anteriores e perfil construtivo de poço tubular profundo obtido descrito disponibilizado por órgão oficial de governo (SGB, 2020).

6.2 MATERIAIS E MÉTODOS

6.2.1 Área de Estudo

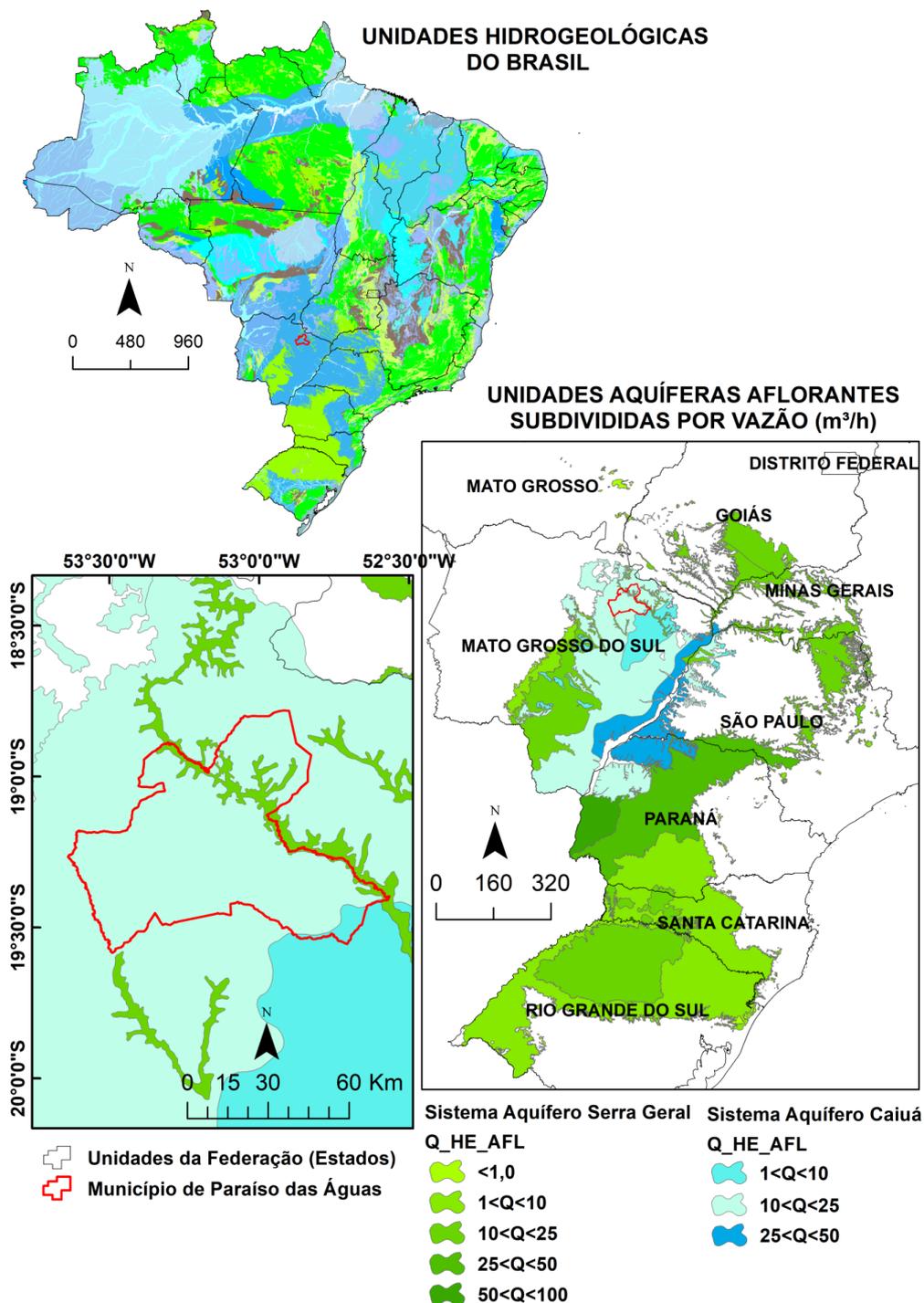
Localizada na região nordeste de Mato Grosso do Sul, Paraíso das Águas (latitude 19°03'08" Sul; 52°58'06" Oeste), configura-se numa das cidades mais jovens do estado, tendo sido emancipada em 2013 (Figura 1). Apresenta área de 5.034 km² e população estimada em 5.555 habitantes (IBGE, 2019a). Está contida na parte média da bacia hidrográfica do rio Sucuriú (ANA, 2020), onde a precipitação anual total pode chegar a 1600 mm configurando um clima tropical mansônico (ALVARES et al., 2013).

Nesta região há predomínio de solos arenosos finos sensíveis à deflagração de processos erosivos pela ação destas chuvas, mesmo quando não há intervenção antrópica (CPRM, 2009; OLIVEIRA, 2018). O relevo dessa região ocorre na forma de divisores tabulares que contornam rampas arenosas dos planaltos interiores da Bacia Sedimentar do Paraná, predominando associações de latossolos e neossolos (CPRM 2009). A vegetação é savânica, prevalecendo o Cerrado Stricto Sensu, onde se pratica pecuária extensiva em cenários de pastagens degradadas e floresta plantada (POTT et al., 2014).

Esta região insere-se integralmente na Bacia Sedimentar intracratônica do Paraná, representada por pacotes sedimentares continentais associados a rochas ígneas, pertencentes à Supersequência III (Neojurássico-Eocretáceo), conforme estabelecido por Milani (1997). Em alguns municípios do Brasil a reserva hídrica do

aquífero Caiuá é uma das principais fontes de suprimento da demanda por água, tanto na área urbana quanto na rural, sendo de extrema importância estudos hidrogeológicas neste sistema aquífero (CELLIGOI; SANTOS, 2001).

Figura 1 – Mapa de localização do município de Paraíso das Águas em relação aos domínios hidrogeológicos macrorregionais do Brasil e Mato Grosso do Sul, com destaque para os aquíferos Serra Geral (fraturado) e Caiuá (granular), subdivididos pelo vazão (m^3/h) da unidade aflorante.



Fonte: Modificado de CPRM (2014) e IBGE (2020).

O arenito Caiuá foi desmembrado do Grupo e elevado a categoria de Grupo conforme os trabalhos realizados por Fernandes (1992) e Fernandes e Coimbra (1994), onde foram determinadas três formações, sendo elas: Formação Goio Êre, Formação Rio Paraná e Formação Santo Anastácio. Estas formações representam subambientes desérticos distintos e geneticamente ligados entre si, onde a Formação Rio Paraná corresponderia à zona central de deposição, a Formação Goio Erê a zona periférica e a Formação Santo Anastácio é equivalente a depósitos em planícies de lençóis de areia (CELLGOI, SANTOS; 2001).

Localmente o sistema fluvial apresenta várias quedas d'águas naturais, encaixadas em fundos de vale, que em alguns trechos permitem a exposição de soleiras dos derrames basálticos (Figura 2A). Feições erosivas são comuns, sobretudo nas cabeceiras de drenagens, onde há solos mecanicamente frágeis, desenvolvidos sobre arenitos e associados a atividades de agropecuária intensiva (Figura 2B e 2C). A paisagem é bem marcada pela diferença e o contraste de resistência à erosão entre os arenitos e os basaltos (Figura 2D). Os basaltos dessa região são representados pelos derrames da Formação Serra Geral (Figura 2-E) que estão sobrepostos provavelmente aos arenitos da Formação Botucatu, mas descritos aqui como arenitos pré-basaltos dado à incerteza e carência de dados de subsuperfície detalhados para essa porção da Bacia Sedimentar do Paraná.

Os basaltos estão sotopostos por rochas silicilásticas neocretácicas do Grupo Caiuá (FERNANDES, 1992; FERNANDES; COIMBRA, 1994) especificamente o intervalo correlato à porção média da Formação Santo Anastácio (Figuras 2-F, 2G). Nestes arenitos foram registradas cavidades próximas uma da outra (Figuras 2-H e 2-I). Também foram mapeadas ressurgências em dois setores distintos do município, as quais não estão conectadas ao sistema freático (Figuras 2-K, 2-L), conforme Oliveira (2018).



Figura 2A) Cachoeira do Córrego Moquém (bacia hidrográfica de 4ª ordem), que deságua no rio Sucuriú (drenagem principal).



Figura 2B) Voçoroca em plena expansão transportando sedimentos inconsolidado e desagregando neossolos quartzarênicos friável e em situação de baixa cobertura vegetal de pasto acessível ao gado. (Fonte: OLIVEIRA, 2018)



Figura 2C) Fendas separando blocos de latossolo vermelho com textura areno-silto-argilosa em estágio avançado de erosão com perda gradual de material friável para o fundo do canal erosivo. (Fonte: OLIVEIRA, 2018)



Figura 2D) Quebras abruptas no relevo oriundas do contraste reológico entre arenitos e derrames basálticos, bem como do sistema de horst e grabens e hemi-grabens característico desta porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, formando escarpas, degraus de rebaixamento e rebordos erosivos. (Fonte: CARVALHO, 2018)

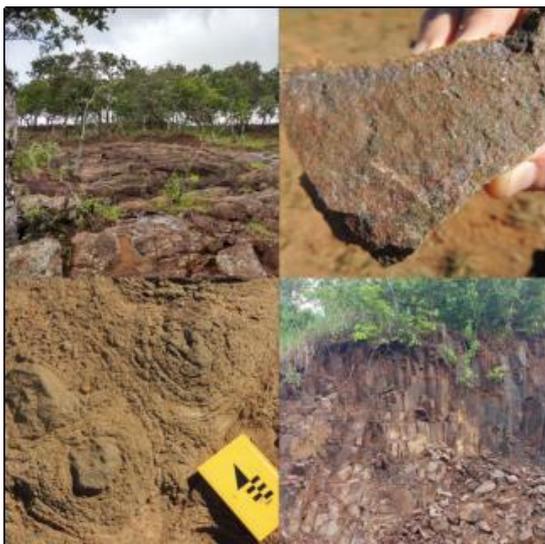


Figura 2E) Feições de descontinuidade na estratigrafia dos derrames basálticos, as quais sugerem pulsos de derrames distintos que se intercalam e se sobrepõe ao longo do intervalo do pacote vulcânico. Verificam-se feições como: diaclases horizontais, estruturas amigdaloides na rocha, decomposição do tipo esferoidal, e diaclases verticais. (Fonte: CARVALHO, 2018)



Figura 2F) Arenito quartzoso de granulometria fina, bem selecionado, com grãos arredondados, intemperizado de cor ocre. (Fonte: CARVALHO, 2018)



Figura 2G) Arenito quartzoso pouco feldspático, bem selecionado de granulometria grossa, bem arredondado de coloração rosa avermelhada, concentrando minerais opacos e/ou máficos entre as laminações. (Fonte: CARVALHO, 2018)



Figura 2H) Entrada da cavidade menor com facetas retangulares.

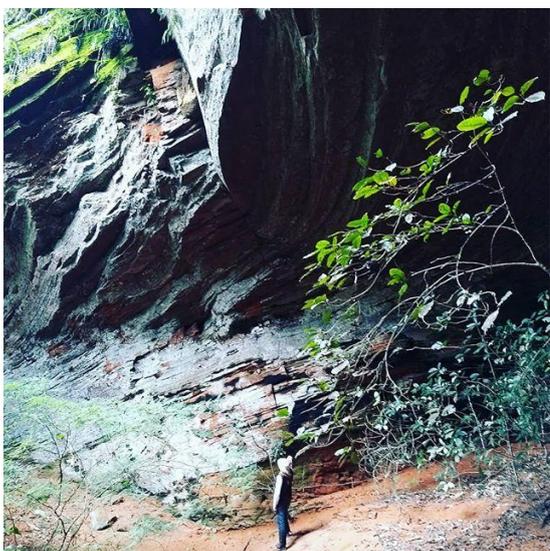


Figura 2I) Entrada da cavidade maior com facetas em foram de arco.



Figura 2J) Nível de arenito sílex de coloração branca leitosa.
(Fonte: CARVALHO, 2018)



Figura 2K) Ressurgência formando corpo d'água elipsoidal em superfície e transportando elevado conteúdo de areias quartzosas bem selecionadas de granulometria fina a grossa para o leito do canal de drenagem. A temperatura da água que exfiltram é diferente do curso d'água de primeira ordem a intercepta no fundo de vale.
(Fonte: CARVALHO, 2018)



Figura 2L) Ressurgência formando corpo d'água circular em superfície e transportando elevado conteúdo de areias quartzosas bem selecionadas de granulometria fina a grossa para o leito do canal de drenagem. A temperatura da água que exfiltram é diferente do curso d'água de primeira ordem à intercepta no fundo de vale.
(Fonte: CARVALHO, 2018)

6.2.2 Banco de dados geográficos

As informações para a construção do banco de dados geográfico foram obtidas de instituições oficiais do governo brasileiro, devidamente georreferenciadas no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000, sendo de acesso aberto e permitindo *download* gratuito. Para este estudo obteve-se em arquivos vetoriais os atributos litológicos, pedológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos do Mapa Geodiversidade do Mato Grosso do Sul e dos Levantamentos Hidrogeológicos, em escala 1:1.000.000 (CPRM, 2006a; CPRM, 2006b; CPRM, 2009; SEPLAN; 1988).

Dados hidrográficos (bacias, drenagens e nascentes) foram obtidos em consulta ao banco de dados do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR, 2020), pelo Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (ANA, 2020) e pelo banco de dados fornecido pela Secretaria de Infraestrutura Rural e Urbana de Paraíso das Águas (Paraíso das Águas, 2018). A base de dados de poços atualizada foi extraída do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SGB, 2020).

Foram necessárias três cenas do satélite orbital Sentinel-2 MSI e seis cenas de imagem de radar do ALOS PALSAR modo FBD para cobrir toda a área do município (Tabela 1), as quais foram obtidas gratuitamente no site oficial do Serviço Geológico Americano e no Earth Data da Agência Espacial Norte Americana (USGS, 2018; ASF, 2020), respectivamente.

Para a imagem ALOS PALSAR foi necessário o tratamento e correção dos vazios existentes em raros pixels nulos da imagem. Após esta etapa operou-se o fatiamento dos pixels para 5,0 metros de resolução espacial usando o interpolador *Topo-to-Raster*. De acordo com Marcuzzo et al., (2011) este interpolador é o mais

indicado para variáveis relacionadas a elevação (ex: precipitação) ou mesmo a própria elevação através de pontos cotados, como é neste caso.

Tabela 1 – Cenas de imagens orbitais multiespectrais e de radar utilizadas neste estudo (USGS, 2018; ASF, 2020).

SENTINEL 2A - MSI	ALOS PALSAR modo FBD
	AP_26052_FBD_F6790
	AP_26052_FBD_F6800
29082017_22KBD	AP_26475_FBD_F6790
29082017_22KBE	AP_26475_FBD_F6800
29082017_22KCD	AP_26898_FBD_F6790
	AP_26898_FBD_F6800

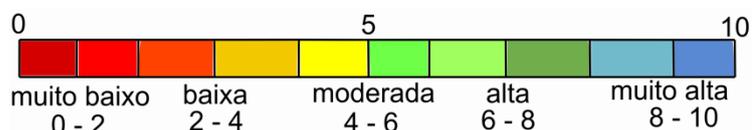
6.2.3 Geoprocessamento

As etapas necessárias para obtenção do MEPHS envolvem quatro principais etapas (GOMES, 2008): (1) Seleção com base no conhecimento empírico; (2) Análise dos fatores com atribuição de notas; (3) Atribuição de pesos para cada um dos fatores (Figura 3) e (4) Combinação dos fatores entre si por modelagem baseada em combinação linear ponderada (Equação 1):

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} * Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad (1)$$

Sendo, W_{ij} o peso atribuído à classe “i” do tema “J” e Y_j o peso atribuído ao tema “J”.

Figura 3 – Escala ordinal com notas ponderadas para os atributos de cada uma das classes.



A classe cobertura vegetal e uso do solo foi derivada do processamento digital de imagem mosaicada e empilhada com todas as bandas disponível pelo Sentinel-2 MSI nível 2-A gerado a partir do produto do nível 1-C, em situação de baixa ou nenhuma cobertura de nuvens abrangendo toda a área de estudo. Esse procedimento permite a obtenção da correção radiométrica na base da atmosfera

(BOA). O realce da imagem foi dado pela combinação falsa-cor R8G4B3 capaz de realçar diferentes estágios de vegetação em relação ao solo exposto. Empregando-se técnicas de segmentação pela ferramenta do plugin de classificação semiatutomática (SCP) do QGis 3.18, foi empregada a classificação supervisionada a partir de amostras de assinaturas espectrais. Obteve-se 88 assinaturas espectrais de cobertura vegetal e uso do solo, sendo o algoritmo de máxima verossimilhança utilizado para definir 8 (oito) principais classes (Tabela 2). O índice Kappa fornecido pelo SCP foi de 0,9617 e a acurácia de 96,31% com concordância quase perfeita.

Tabela 2 – Notas atribuídas às classes de cobertura vegetal e uso do solo.

CLASSE	NOTA
Floresta Densa, Planície aluvial, periodicamente inundada e Flor. Ombrófila Densa.	9
Savana Estépica Arbórea densa, Cerradão Savana arbórea densa	7
Campo cerrado, Savana Arbórea aberta, Savana Estépica Arborizada, Savana Estépica Arbórea aberta	6
Savana gramíneo-lenhosa, Savana Estépica Gramíneo-lenhosa, Estepe Gramíneo-Lenhosa, Form. Pioneira influên. Fluvial, palmeiras e herbácea, eucalipto	5
Área Cultivada	4
Pastagem	3
Solo exposto, Área Urbana, Mineração	0
Espelho d'água	0

Originalmente os mapas de solos disponíveis para esta região encontram-se em escalas de pouco detalhe (1:1.000.000), o que exigiu a utilização de índices multiespectrais mineralógicos para discriminar classes de solos. Para cumprir tal tarefa, os índices utilizados foram os sugeridos por Meer et al., (2014), que comparou composições de imagens de sensor multiespectral aerotransportado (HyMAP), do *Advanced Spaceborne Thermal Emission na Reflection Radiometer* (ASTER), com uma série de razões de bandas do Sentinel-2 e percebeu boa correlação.

As regiões espectrais que mostraram melhor correlação entre si, nestes sensores foram do infravermelho de ondas curtas (VNIR) e o infravermelho de ondas longas (SWIR). Nesse contexto, foi redefinido os contatos pedológicos usando a razão de bandas Sabin para o Sentinel-2 (VAN DER MEER et al., 2014), que são: Banda 11/12 = que realça feições de hidroxilas produtos de alteração no canal do vermelho;

Banda 04/02 = que estima todos os óxidos de ferro no canal do verde; Banda 04/11 = que reforça a presença de óxidos de ferro ferroso no canal do azul.

De posse dessa combinação, foi realizada redução da dimensionalidade da resposta espectral filtrando os três canais com a ferramenta de Análise de Componentes Principais (PCA) do software QGis 2.18, a qual permite eliminar ruídos da imagem, aumentando o realce de áreas com composição mineralógicas de solo e rochas mais homogêneas.

Dessa forma foram definidas as classes de solo, segundo características intrínsecas favoráveis à infiltração de águas meteoríticas (Tabela 3), considerando a permeabilidade e espessura (Gomes, 2008).

Tabela 3 – Notas atribuídas às sub-ordens de solo.

SIGLA	ORDEM E SUB-ORDEM	NOTA
LB	Latosolos Brunos	3
LV	Latosolos Vermelhos	3
NB	Nitossolos Brunos	6
GX	Gleissolos Háplicos	8
RY	Neossolos Flúvicos	7
RQ	Neossolos Quartzarênicos	4
RL	Neossolos Litólicos	1
AR	Afloramento Rochoso	0

O mapa de litoestratigrafia disponível para esta região, está em escala de pouco detalhe (1:1.000.000), sendo necessário refinar os contatos. Dessa forma, para realce de características litológicas por imagem de satélite, utilizou-se a composição sugerida por Volkmer (2020) para este tipo de trabalho. Essa combinação denominada Geology_SWIR-Veg NIR é dada pela seguinte ordem: Canal do Vermelho: Banda 12 *2,2; Canal do Verde: Banda 04*1,4 + Banda 08*1,0; Canal do Azul: Banda 02*2,5, aplicando-se o filtro dos três canais por análise de componentes principais (PCA).

De posse dos dados de campo coletados em campanhas posteriores, dados de poços, do mapeamento da área de ocorrência de cavidades (GUIRRA, 2019), localização das nascentes, e de erosões (OLIVEIRA, 2018), foi possível atualizar o mapa litológico para uma escala compatível a 1:75000. Os litotipos elaborados em formato vetorial foram reclassificados, após conversão para formato raster e ponderados em escala ordinal de 0 a 10, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Notas atribuídas às classes litoestratigráficas.

SIGLA	CLASSE	NOTA
Q2a	Depósitos Aluvionares	10
Q1p1	Fácies Terraços Aluvionares	9
Q1pc	Fácies Terraços Coluvionares	8
ENdl	Coberturas Detrito-lateríticas Inconsolidadas	7
K2sa	Formação Santo Anastácio	6
K1βsg	Formação Serra Geral	2

As classes de declividade, para compor o MEPHS, justifica-se pela sua influência na velocidade do escoamento superficial das águas pluviais e consequentemente na taxa de infiltração (BRANDÃO; GOMES, 2003; GOMES, 2008). Estas informações foram extraídas a partir do pré-processamentos do MDE, posteriormente aplicando comandos de análise do terreno do QGis 2.18, que implementa o algoritmo do método de Horn (1981) com razão horizontal/vertical igual a 1.

Este método considera que os pontos cotados mais próximos têm mais peso do que os vizinhos diagonais, avalia os efeitos de borda e determina que a célula central não tem influência sobre a inclinação calculada. Convertem-se declividade obtida em graus radianos em porcentagem, através da calculadora raster com a fórmula: $\tan(\text{"dec_raster"} * 3,14159 / 180) * 100$. Onde \tan = tangente; dec_raster : declividade em radianos; 3,14159 = aproximação do valor de π . A carta de declividade expressa em termos de porcentagem foi fatiada em cinco classes, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Notas atribuídas às classes de declividade.

DECLIVIDADE(%)	CLASSE	NOTA
00 - 03	relevo plano	10
03 - 08	suavemente ondulado	8
08 - 0	ondulado	5
20 - 45	fortemente ondulado	2
> 45	montanhoso/escarpado	0

A determinação do intervalo de pluviosidade média anual se deu por revisão na literatura, considerando dados climatológicos regionalizados para escala do estado e do Brasil (TEODORO et al., 2016; ALVARES et al., 2013). Estes autores apontam que nesta região há um clima de zona tropical monsonico, de acordo a classificação climática de Köppen.

O período chuvoso vai de dezembro a março, apresentando as maiores precipitações mensais durante a estação chuvosa em relação ao restante do estado.

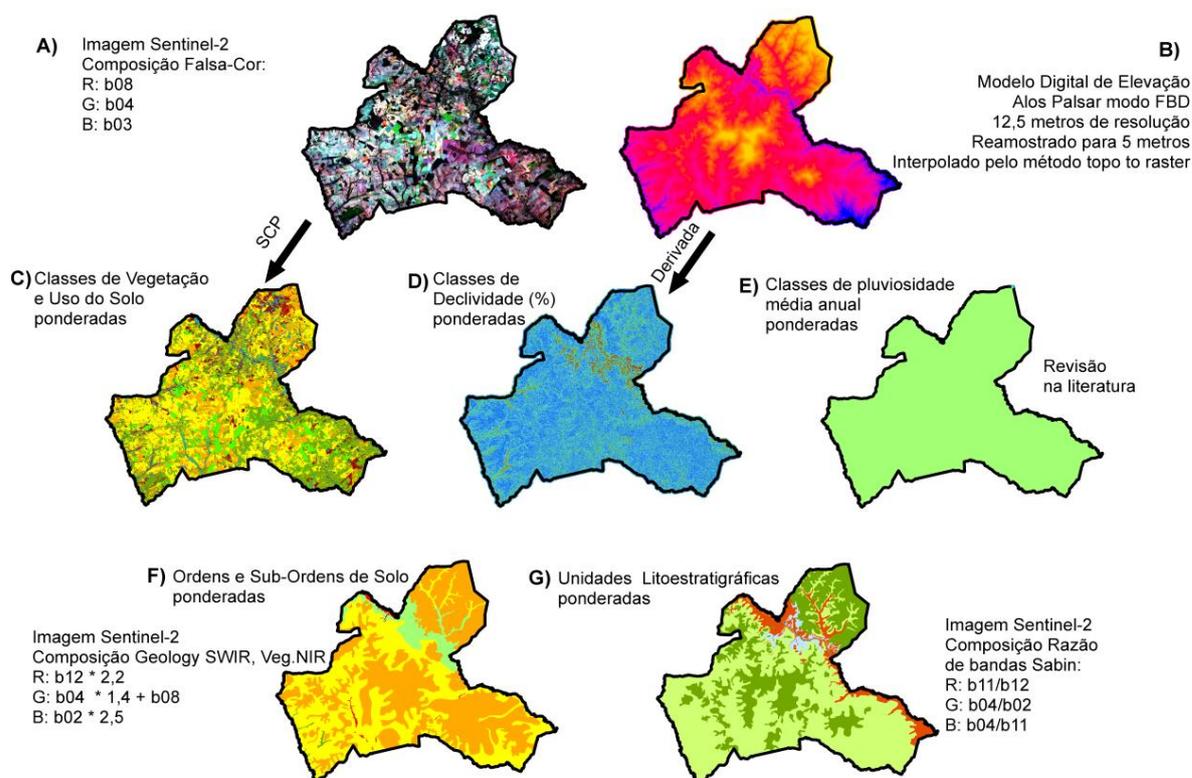
Sendo assim, a classe de precipitação média anual está em torno de 1.600 mm, bem acima do limiar de 950 mm conforme proposto por Brandão e Gomes (2003) para o MEPHS (Tabela 6).

Tabela 6 – Notas atribuídas às classes de pluviosidade média anual.

PLUVIOSIDADE MÉDIA ANUAL (mm)	NOTA
>950	6
850 - 950	5
750 - 850	4
650 - 750	3
550 - 650	2
< 550	1

A Figura 4 mostra uma síntese do processamento envolvido para elaboração dos temas envolvidos no MEPHS, a partir de etapas necessárias à atualização e refinamento dos planos de informações hierarquizados.

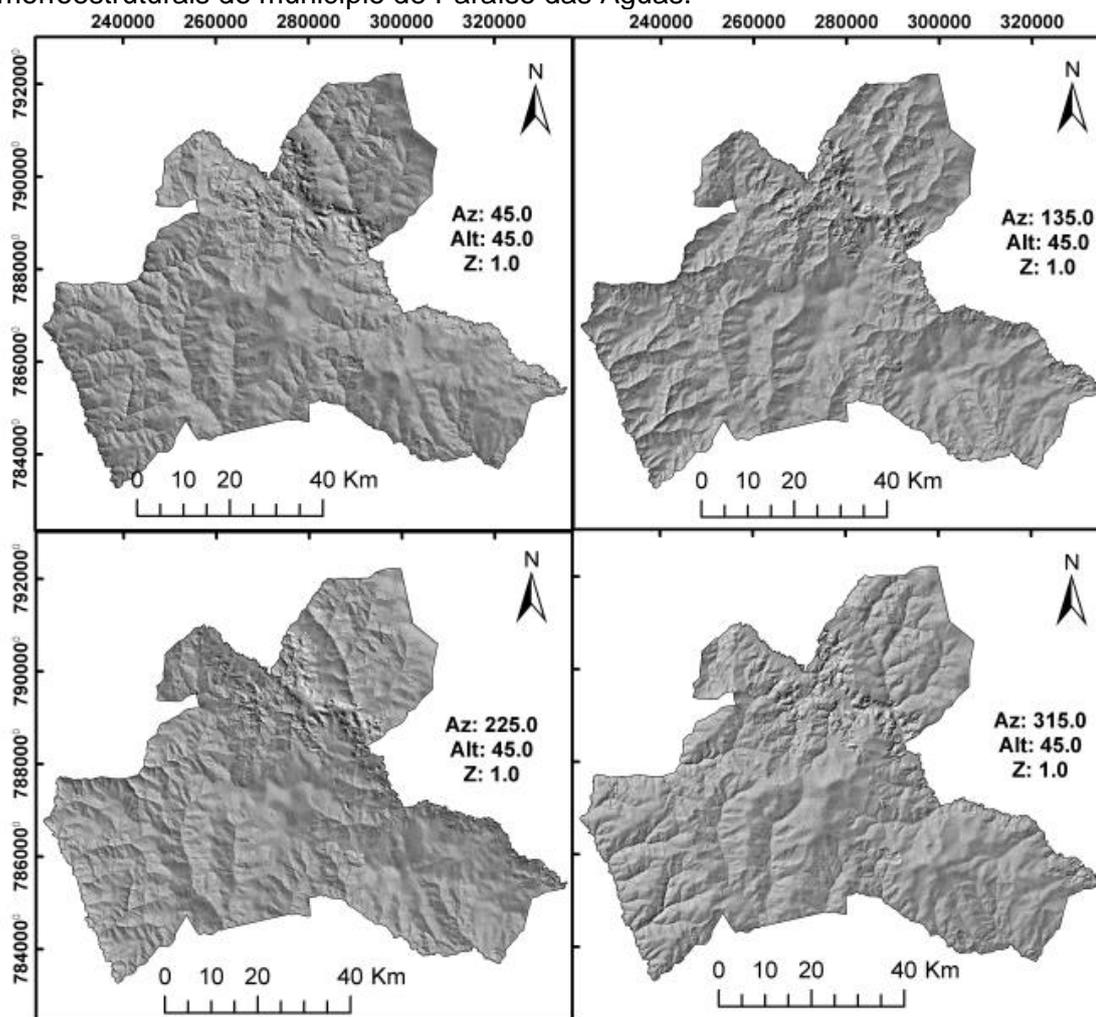
Figura 4 – Etapas de aquisição e produção dos temas componentes do modelo de potencial hídrico subterrâneo.



O mosaico de imagens do radar ortoretificada com duas polarizações (HH e HV) do ALOS PALSAR modo FDB (Polarização Dupla de Feixe Fino), com 12,5 metros de resolução espacial, possui potencial para explorar informações adquiridas sobre diferentes ângulos azimutais de visada. Assim, a Figura 5 fornece estruturas morfológicas do terreno, destacando os principais lineamentos, linhas de cumeada, fundos de vales e incisão de drenagens, cabendo ao especialista diferenciá-las.

Nesta área, o azimute que melhor distinguiu a superfície do terreno foi o $Az = 45^\circ$, com inclinação de 45° e sem exagero vertical (1.0x), seguido pelo de $Az = 315^\circ$, $Az = 225^\circ$ e descartando o $Az = 135^\circ$ pelo fato de ter promovido efeito óptico de falsa inversão da superfície, porém este último efeito facilita a identificação de linhas de cumeada.

Figura 5 – Modelo Digital de Elevação com superfície topográfica sombreada em quatro diferentes direções de azimute de iluminação, realçando feições morfoestruturais do município de Paraíso das Águas.

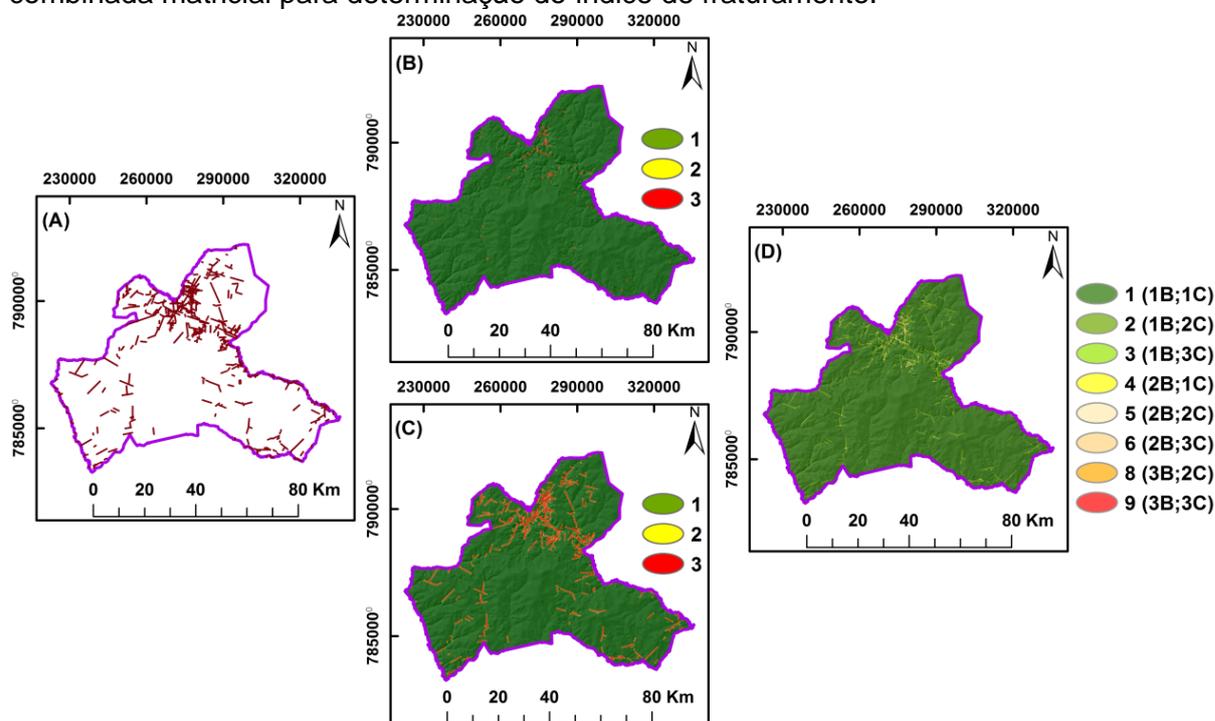


Todos os azimutes contribuíram para a extração efetiva dos lineamentos, visto que algumas direções de iluminação da superfície topográfica podem mascarar, ou cobrir determinados lineamentos, sobretudo os de menor comprimento que não fazem parte do *trend* de estruturas rúpteis regional.

Para medir o azimute de cada lineamento traçado de maneira semiautomatizada, o procedimento se deu por uma rotina em código aplicada na tabela de atributos da camada vetorial de linhas. Estes lineamentos foram agrupados em doze classes de intervalos azimutais iguais em relação ao norte, seis para o setor NE e outras seis para o setor NW. O complemento *line direction histogram* forneceu o diagrama de rosetas destacando direções preferenciais, sendo considerado tanto o peso associado ao comprimento dos lineamentos, quanto à ausência destes. Para quantificar a densidade de linhas, pontos de interseção e ilhas de calor nesta área de estudo, aplicou-se interpoladores estatísticos de linha (Km/Km²), pontos (n° interseções/Km²) e kernel (adimensional) integrado ao software QGIS 2.18 (DEVELOPMENT TEAM, 2017).

Adiante, foi reclassificado os intervalos representativos 3x3, contendo as classes de baixa, média e alta densidades de linhas (lineamentos) e pontos (interseções). Com isso, estes dois planos de informações matriciais, cada um com três classes foram combinadas, fornecendo o índice de fraturamento, conforme proposta de Brandão e Gomes (2003). Nesse contexto, uma das formas indiretas de se obter parâmetros para análise regional de lineamentos é por meio do índice de fraturamento, que é o resultado da soma algébrica ponderada de dois mapas: densidade de lineamentos e densidade de interseções de lineamentos (Figura 6).

Figura 6 – Etapas de aquisição de informações oriundas da delimitação semiautomatizada dos lineamentos identificados por imagem de radar e classificação. a) Extração de lineamentos; b) Interseção entre lineamentos; c) Densidade de lineamentos d) Ponderação combinada matricial para determinação do índice de fraturamento.

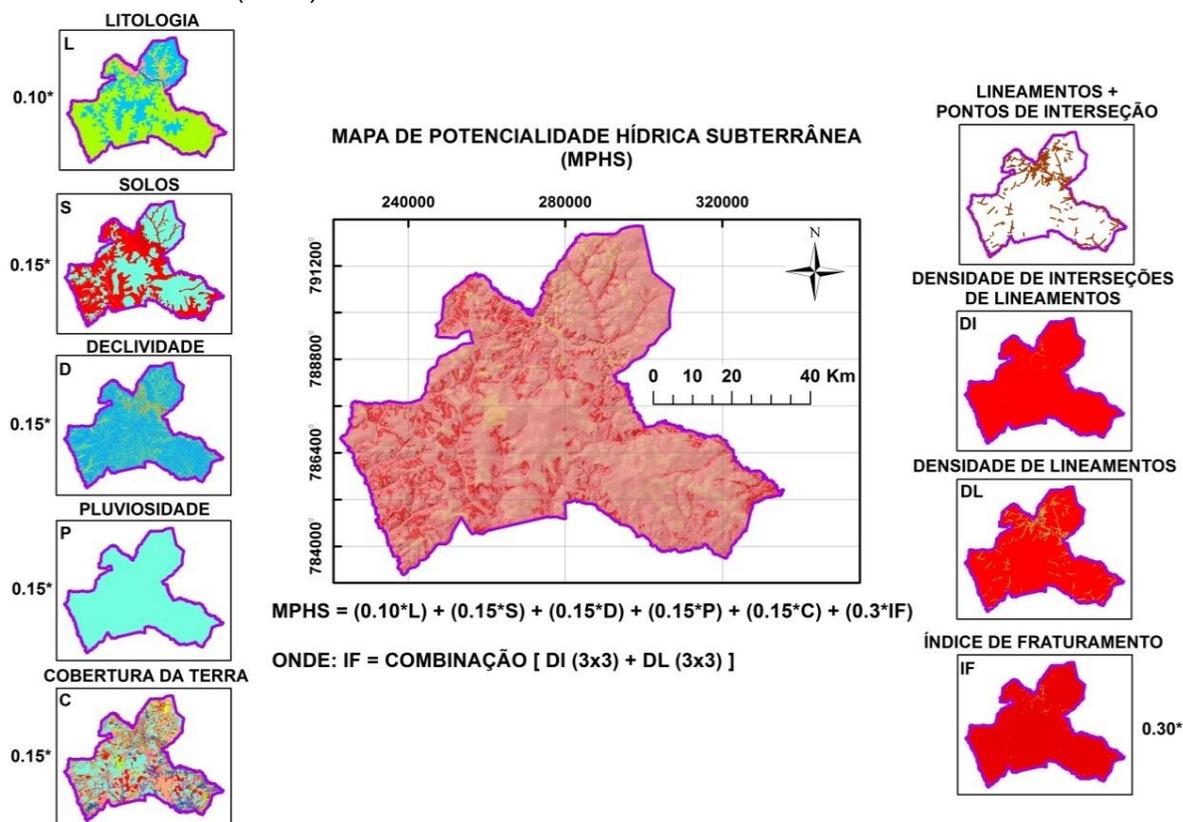


Aquíferos fraturados influenciam o fluxo de água subterrâneo, devido à configuração da rede de fraturas, que podem ou não estar conectadas entre si, tendo como outro fator interferente na transmissividade, o volume de abertura entre as fraturas. O regime tectônico rúptil pode imprimir nas mais diversas litologias um conjunto de falhas, fraturas ou juntas extensionais.

Concluída as etapas anteriores, com todos os temas no formato raster e com as classes ponderadas, foi hierarquizadas regras de decisão previamente definidas. O produto final da álgebra de mapas aplicada aos planos de informação é um grid numérico com valores de 2,7 a 7,5 para esta área de estudo, porém pode variar de 1,5 a 7,7 expressando a favorabilidade regional de 1,0 a 10,0.

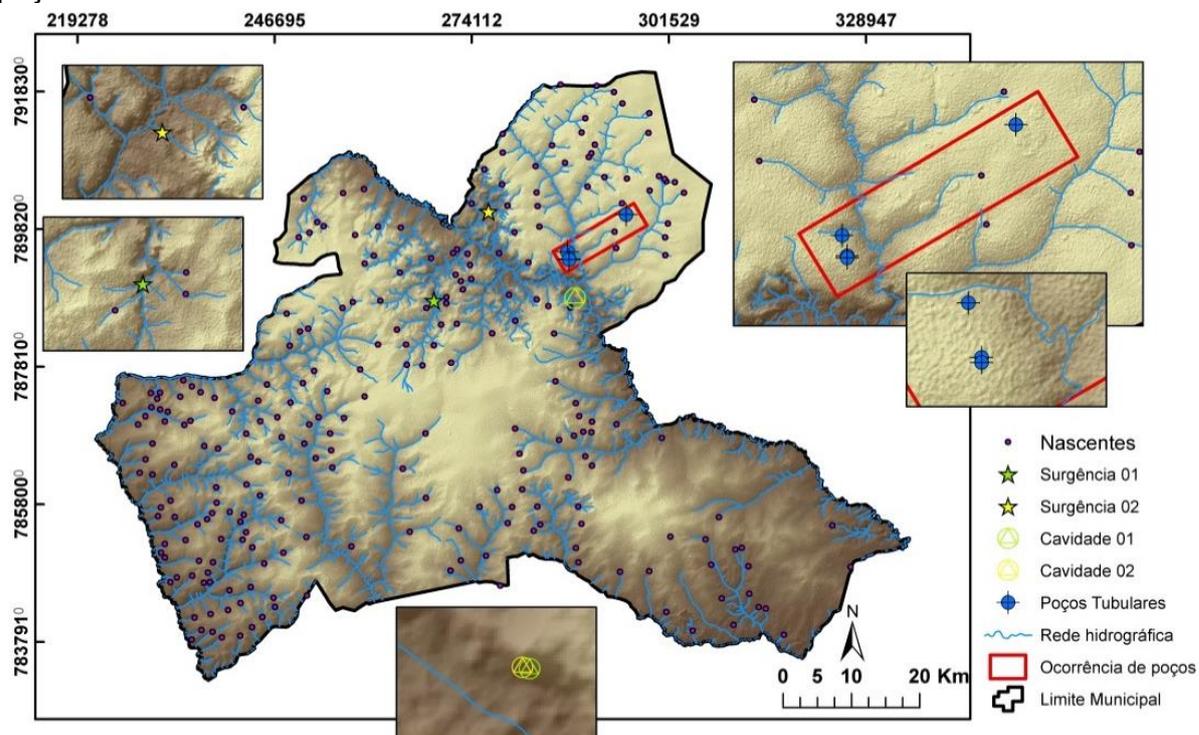
Estes valores foram convertidos para classes nominais de favorabilidade, sendo elas: Muito Baixa, Baixa, Moderada e Alta, resultando no Mapa Empírico de Potencialidade Hídrica Subterrânea (Figura 7).

Figura 7 – Equação do Potencial Hídrico Subterrâneo em sistema de informações geográficas para Paraíso das Águas (MS), adaptando parte do método proposto de Brandão e Gomes (2003).



De posse do MEPHS estabeleceu-se critérios de investigação para verificar se há relação entre nascentes, cavidades e parâmetros hidrogeológicos obtidos por poços tubulares oficialmente cadastrados (Figura 8). Para interpolação foi utilizado o pacote de ferramentas disponíveis na análise estatística espacial do *software* ArcGis 10.2 (ESRI, 2016). Nesse contexto, foi explorado método de previsão do nível estático por regressão linear múltipla, dado um conjunto de variáveis explicativas como: cota dos poços tubulares, superfície do nível d'água interpolada a partir do método *Spline* e corrigida pelo MDE e MEPHS.

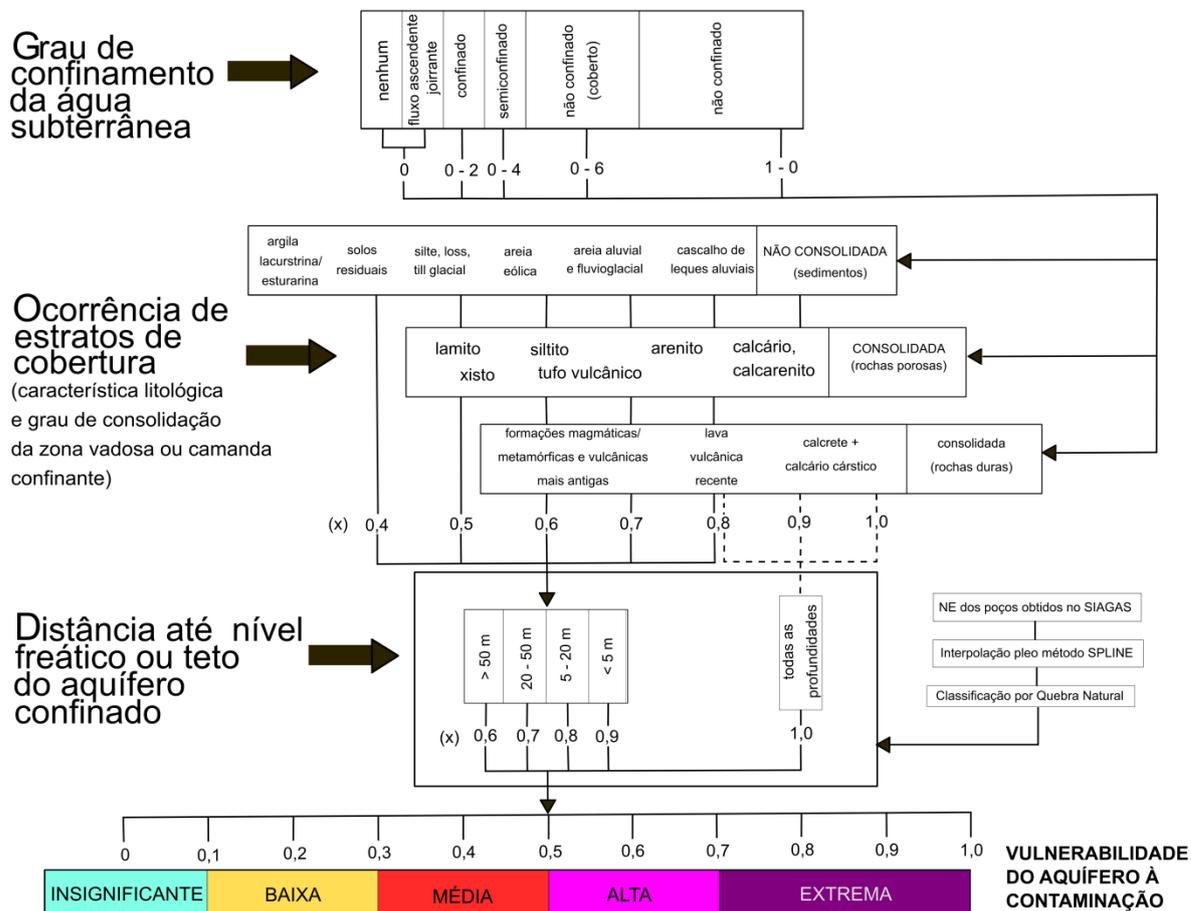
Figura 8 – Espacialização da rede de drenagem, nascentes, ressurgências, cavidades e poços tubulares.



6.2.4 Método GOD

O método GOD é amplamente utilizado em países da América Latina haja vista o seu desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção dos parâmetros hidrogeológicos usados (PINHEIRO et al., 2015). Os atributos considerados pelo método são: confinamento do aquífero ($G = \text{Grau de confinamento}$), natureza composicional da zona não saturada e/ou grau de fraturamento ($O = \text{Ocorrência de estratos geológicos}$), e profundidade do nível de água ou base confinante do aquífero ($D = \text{Distância}$). O produto dos valores destes atributos resulta no índice GOD ($G \times O \times D$), podendo cada variável oscilar entre valores de 0 a 1, onde 0 indica baixo potencial de contaminação e 1 o valor máximo de vulnerabilidade e o resultado do índice GOD indica a vulnerabilidade do aquífero que pode variar desde insignificante à extrema (Figura 9).

Figura 9 – Método GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos adaptado neste estudo.



O grau de confinamento (G) neste trabalho considerou para os depósitos aluvionares e terraços aluvionares o valor 0,4, pois apesar de não estarem confinados são unidades desprezíveis em termos de volume de água armazenável. Já para os depósitos coluvionares e superfície paleogênica o valor 1,0 que remete ao status de não confinado, sendo unidades de maior expressão em termos de cobertura e volume. Já para os arenitos da Formação Santo Anastácio foi atribuído valor 0,4, ou seja, semiconfinados, tendo em vista a presença de horizontes silicificados e ou nível de sílex que em algumas porções impedem que haja exfiltração de água. Já para os basaltos foi estabelecido o valor 0,2 que indica características mais semelhantes à aquíferos confinados.

O grau de consolidação da zona vadosa ou camadas confinantes (O) está relacionado com o tempo de deslocamento dos contaminantes e os processos de

atenuação a depender do solo e da litologia existente (PINHEIRO et al., 2015). Sendo assim, foi atribuído valor de 0,4 para depósitos aluvionares, terraços aluvionares, depósitos coluvionares e superfície paleogênica, enquanto que para os arenitos foi definido o valor de 0,65 e para os basaltos valor de 0,75, conforme o método GOD sugere.

A profundidade da água no aquífero (D) considera a distância que o contaminante precisará percorrer para alcançar a zona saturada, ou seja o nível estático (NE). Para isso consideramos informações oriundas dos poços tubulares (SIAGAS, 2019) e ponderamos as áreas com maior densidade de nascentes utilizando a densidade de pontos classificada pelo por quebras naturais no interpolador *Spline* (SPL). Sendo assim, áreas com grande número de exfiltrações tendem a apresentar o nível estático mais raso, o que não poderia ser estimada utilizando somente dados de poços, tende em vista serem insuficientes para permitir a interpolação do nível d'água.

5.2.5 Análise exploratória

O método Thiessen (1911) ou método Voronoi é amplamente utilizado para resolver métodos de engenharia que necessitam verificar a influência de variáveis hidrológicas numa determinada área em que as medidas são realizadas de forma pontual, estabelecendo o polígono envoltório de influência da estação de medida em relação às do seu entorno.

Partindo-se do pressuposto de que o método Voronoi é menos tendencioso para regiões com relevos planos e que este é o caso de Paraíso das Águas, neste estudo, utilizamos a localização das nascentes e informamos o mesmo peso para cada uma delas ($W_{ij} = 1$), visto não ser possível estabelecer pesos diferentes em relação à vazão de cada uma delas por fatores como custo e logística. O polígono envolvente foi o perímetro municipal, sendo determinado a partir das nascentes vizinhas as mediatrizes e áreas de influência.

Dessa forma tem-se para a Equação 2 que $W_{ij} = 1$ é o peso unitário igual às demais nascentes. $Y_j =$ é a área de influência da nascente j . A área de influência da nascente possui um peso perante a área total, expresso pela Equação 2 e Q_m seria a vazão média caso fosse possível medi-la. Sendo assim o fator determinante para

especializar os polígonos de Voronoi é a área entre as mediatrizes de cada ligação entre os pontos de nascentes.

$$W_i = \frac{A_i}{A} \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{\sum A_i Q_i}{A} \quad (3)$$

Foi verificado o desempenho de seis interpoladores na espacialização de uma superfície de nível d'água em relação ao modelo digital de elevação dado a cota de cada nascente. Os interpoladores utilizados foram: *IDW* (Inverso da Distância Ponderada), Krigagem ordinária, *Natural Neighborhood* (Vizinhança Natural), *Spline*, *Topo to Raster* e *Trend* (Tendência).

O método *IDW* parte do pressuposto de que objetos mais próximos possuem condições e valores mais semelhantes do que objetos mais distantes. Dessa forma, vizinhos mais distantes contribuem com menor peso para a estimativa do local de interesse (Equação 4, onde x_p = valor interpolado; x_i = valor do i -ésimo ponto vizinho; d_i = distância entre o i -ésimo ponto de vizinho e o ponto de interesse).

O método de Vizinhança Natural utiliza-se da mesma equação do IDW, a diferença consiste no cálculo dos pesos, o qual é baseado na rede de polígonos de Voronoi no conjunto de pontos dispersos sobre uma malha de grade regular (RIGHI; BASSO, 2016).

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} * x_i \right)}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (4)$$

A krigagem ordinária, diferentemente do inverso da distância aplica o cálculo para um determinado ponto não amostrado (x_0) o valor da combinação linear de pontos de dados vizinhos (Equação 5), sendo estabelecidas algumas condições. A primeira restrição diz que a diferença entre a média e o valor calculado deve ser igual à zero (Equação 6) e a segunda atribui que a haja minimização do erro (7).

$$Z^*_{K0}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

$$E[Z^*_{K0}(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (6)$$

$$\sigma_E^2 = Var [Z(x_0) - Z^*_{K0}(x_0)] \quad (7)$$

O *Trend* é um interpolador determinístico global, baseado na regressão múltipla entre os valores do atributo e as localizações geográficas, utilizada pra estimar os valores dos pontos em todas as localizações de uma grande de superfície (DA SILVA, 2015). De acordo este autor, a Equação 8 mostra que $F(x,y)$ corresponde ao valor interpolado em função das coordenadas (x_i,y_i) , f geralmente é uma função polinomial bivariada de grau n baseada nas coordenadas de longitude e latitude e ϵ_{ij} representa os resíduos, ou seja, a fonte não-sistemática de variação. Dessa forma, a interpolação na coordenada (x,y) é expressa conforme Equação 9, sendo n o grau da superfície e $\theta = (\alpha_k, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ vetor que condiciona melhor ajuste aos dados observados conforme soma dos mínimos quadrados de resíduos (Equação 10) (DA SILVA, 2015).

$$F(x,y) = f(x_i, y_i) + \epsilon_{ij} \quad (8)$$

$$\hat{F}(x,y) = \sum_{k=0}^n \alpha_k x^i y^j, \text{ com } i+j \leq k, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \epsilon^2_{ij} = \sum_{i=1}^n [\hat{F}(x,y) - F(x,y)]^2 \quad (10)$$

O método *Topo to Raster* interpola dados a partir da soma ponderada dos quadrados dos resíduos da elevação de uma superfície de grade amostral, conforme a Equação 11, onde o valor de $Z_{est}(l_i)$ de cada posição (x_i,y_i) representam o local l_i para o qual é estimada a profundidade, f é uma função desconhecida bivariada de amortização superfície finita em grade, n_p é o número de pontos amostrados e ϵ_i é o resíduo de média zero e desvio padrão ω_i (CARMO et al., 2015). Esse mesmo

autor diz que ao assumir que cada ponto amostral é localizado aleatoriamente entre seu correspondente no grid, o desvio padrão é dado pela Equação (12), sendo h o espaçamento na grade regular e S_i a inclinação de cada célula na grade regular. Sendo assim, o desvio padrão é dado pela Equação (13), onde $J(f)$ é uma medida de rugosidade da função f em termos de primeira e segunda ordem derivadas e λ é um parâmetro de suavização (CARMO et al., 2015).

$$Z_{est}(l_i) = f(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, np \quad (11)$$

$$\omega_i = h * \frac{S_i}{\sqrt{12}} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{np} [Z_{est} l_i - f x_i y_i / \omega_i]^2 + \lambda * J(f) \quad (13)$$

O *Spline* resulta numa superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada, minimizando a curvatura da superfície, levando em consideração que a função $S(x)$ deve ser igual a $z(x)$ (14) ao mesmo passo que o semi-variograma de suavização $I(S)$ deve ser o menor possível (15).

Para *Spline* de Tensão, temos que $T(x) = a_1$. As constantes a_1 e λ_1 são determinadas resolvendo o sistema de equações (16), onde x_i e y_j são pontos amostrados e z_i é o valor de z no local x_i (MARCUIZZO et al., 2011).

$$S(x_j) = z(x_j) \quad (14)$$

$$I(S) = \min \quad (15)$$

$$a_1 + \sum_{j=1}^N \lambda_1 R(x, x_1) = z_i, i = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_1 = 0$$

A escolha do interpolador mais adequado se deu por dois critérios de decisão: O valor do coeficiente de determinação (r^2) e pelo menor erro em área equivalente (Km^2) entre as altitudes do MDE com a superfície do nível d'água interpolado pela

cota das nascentes. Para preencher as lacunas de valores da capacidade hidráulica oriunda da base de dados hidrogeológica dos SIAGAS (2020), a partir dos valores da carga hidráulica de outros dois poços tubulares existentes, identificados como Pt1 e Pt4, contidos na mesma região do município foi determinado um valor de carga hidráulica ponderada para os poços tubulares Pt2 e Pt3 a partir dos anteriores.

Partindo do pressuposto de que a carga hidráulica em um determinado ponto é influenciada pela carga hidráulica de poços vizinhos, que os poços mais próximos tendem a apresentar carga hidráulica mais semelhante entre si do que poços mais distantes e que a cota da superfície onde se encontra o poço tubular é uma variável importante para estimá-la, foram usadas as Equações 17 e 18, onde x e y são latitude e longitude em um determinado ponto no sistema métrico de coordenadas e o valor de d mede a distância de um poço em relação ao outro em metros (m).

Foi proposto, como medida de ponderação um peso (w) proporcional ao inverso da porcentagem relativa entre as distâncias (Equações 19 e 20). A carga hidráulica para o poço tubular de interesse será dado pela soma dos produtos da carga hidráulica dos poços vizinhos, considerando a cota altimétrica do poço de interesse e o peso anteriormente estimado (Equação 21).

$$d_{1,2} = \sqrt{[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]/1000000} \quad (17)$$

$$d_{3,2} = \sqrt{[(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2]/1000000} \quad (18)$$

$$w_{1,2} = 1 - \left[\frac{d_{1,2}}{(d_{1,2} + d_{3,2})} \right] \quad (19)$$

$$w_{3,2} = 1 - \left[\frac{d_{3,2}}{(d_{1,2} + d_{3,2})} \right] \quad (20)$$

$$CH_2 = \left[\frac{CH_1 * Z_2 * W_{1,2}}{Z_1} \right] + \left[\frac{CH_3 * Z_2 * W_{3,2}}{Z_3} \right] \quad (21)$$

6.2.6 Diagnóstico e interpretação

O diagnóstico se deu a partir dos resultados de quali-quantificação dos lineamentos, dos valores de potencial hídrico subterrâneo pelo MEPHS e sua quantificação em área de cobertura em relação à área total do município, pela contagem de centroides de alto potencial hídrico subterrâneo, delimitados por polígonos de Voronoi. Houve

também a verificação da relação espacial dos pontos de maior potencial hídrico subterrâneo em relação às ressurgências e cavidades, pelo método da matriz de distância.

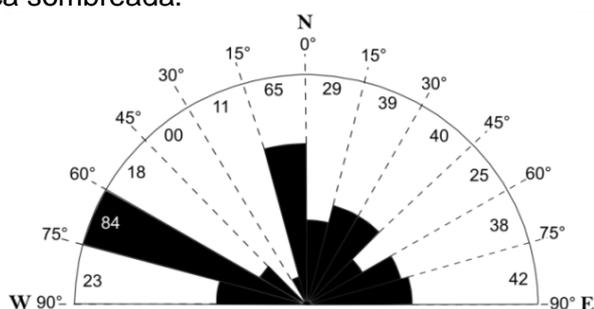
Determinou-se o interpolador da cota das nascentes de melhor desempenho baseando-se no valor do coeficiente de determinação e no menor erro em área extrapolada acima da superfície topográfica para o nível d'água. Com o método determinístico de regressão linear múltipla obteve-se equação de estimativa do nível estático considerando duas variáveis (altitude e potencial hídrico subterrâneo) e três variáveis (altitude, potencial hídrico subterrâneo e nível d'água estimado pelo interpolador *Spline* e corrigido pelo MDE).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.3.1 Sobre os sistemas de descontinuidades geológico-estruturais

Abrangendo a área de 5.034,77 Km², o perímetro municipal de Paraíso das Águas, após detalhamento das feições morfoestruturais da superfície topográfica sombreada, apresentou a soma de 414 lineamentos, sendo detectados três principais azimutes de tendência distintos: Um sistema de direção média NW, concordante com a direção preferencial dos diques da Formação Serra Geral, outra família de descontinuidades na direção NNW-SSE e em menor expressividade na direção E-W. A Figura 10 mostra os intervalos azimutais em relação à frequência absoluta dos lineamentos.

Figura 10 – Diagrama de roseta da frequência absoluta (número de lineamentos) na área de estudo extraídos a partir de imagens ALOS PALSAR modo FDB com superfície topográfica sombreada.



O sistema NWW-SEE insere-se, preferencialmente na porção aflorante dos derrames basálticos, ao longo da calha do rio Sucuriú, onde há deslocamento topográfico, formando um contato estratigráfico basculado que repercutiu nas unidades areníticas do pós-basalto. Essa expressão é amplamente verificada em toda a borda nordeste do Mato Grosso do Sul, sendo evidente também por dados magnetométricos e gravimétricos (CAMPOS, 2015).

Em trabalho recente, Pinto e Vidotti (2019) demonstram haver para esta região um sistema regional de falhas profundas a 3,0; 14,5 e 31,1 Km que se truncam, sendo elas: Zona de falha F1, que é paralela e relacionada à continuidade do Lineamento Transbrasiliano, repercutindo nesta área na direção NNW-SSE o que indica o efeito da mecânica *strike-slip* Transbrasiliana; a zona de Falha F3 que intercepta F1 formando um traço curvo de longo prolongamento desde o extremo leste até o extremo norte da bacia do Paraná, sendo o efeito da interação do embasamento da Faixa Araguaia (D3) com do Arco Magmático de Goiás (D4); e a zona de Falha Cassilândia (ZFC), a qual está relacionada com a deriva da Placa Sul Americana durante o Cretáceo Superior ao Neógeno, geralmente formando binários dextrais, num sistema *strike-slip* de reativação tectônica (neotectônica).

A espessura litosférica estimada para a região que se assenta a Bacia Intracratônica do Paraná é de pelo menos 47 km no centro e de 40 km nas bordas (AN; ASSUMPÇÃO, 2005) e o delineamento estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral em algumas porções da bacia encontra-se intensamente falhado ou fraturado, associado a diques de diabásio são determinantes no fluxo e no quimismo das águas (BONGIOLO et al., 2014). Métodos geofísicos como o radar de penetração no solo (GPR), sondagens elétricas verticais (VES) e tomografias de resistividade elétrica (ERT) vêm auxiliando no entendimento das características dos aquíferos e na melhoria dos modelos conceituais de águas subterrâneas e na calibração de balanços hídricos, sobretudo em relação a recarga e descarga (COUTINHO et al., 2020). A sismicidade pode ser induzida pelo aumento da pressão dos poros dentro de um aquífero de basalto com falhas profundas pré-existentes devido a injeção natural da água do aquífero sobrejacente, movida pela gravidade (KUME; BOLOGNA; ASSUMPÇÃO, 2019).

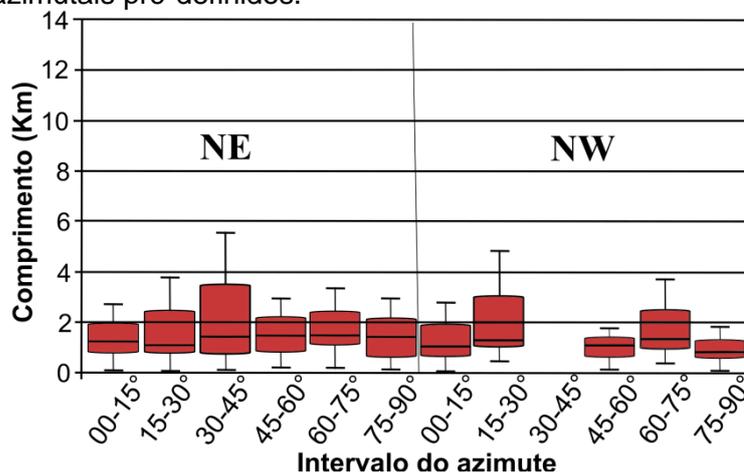
O truncamento de falhas profundas de longo prolongamento, o adelgaçamento litosférico e os pulsos de reativação neotectônica são, portanto três mecanismos que podem explicar a existência de anomalia térmica em Paraíso das Águas e que

consequentemente repercute na favorabilidade do aparecimento de ressurgências termiais.

Do ponto de vista estrutural, estes dados corroboram para a existência de uma tectônica rúptil de direção geral NE-SW, responsável pela formação de horst no limite nordeste do município, associado a um hemi-graben na porção centro-sul do município, onde a zona de contato entre os blocos favoreceu a instalação da drenagem principal, o rio Sucuriú.

Considerando toda a área do município, os 414 lineamentos somam um comprimento total de 765.32 Km, com tamanho médio de 1,8 Km e desvio padrão de 1,7 Km, apresenta valor máximo de 12 Km, e mínimo de 0,05 Km. O bloxplot da Figura 11 mostra a mediana do tamanho em que cada intervalo azimutal pré-definido possui, o qual destaca três intervalos azimutais de maior persistência de lineamentos, sendo eles: o intervalo 30-45° no quadrante NE, o intervalo 15-30° NW e o intervalo 60-75° NW. Isso mostra que os sistemas rúpteis que repercutem na direção NNW-SEE e os NNW-SSE além de serem os principais em relação a frequência absoluta, também o são em relação a densidade absoluta.

Figura 11 – Boxplot da densidade absoluta (comprimento acumulado) em relação aos 12 intervalos azimutais pré-definidos.

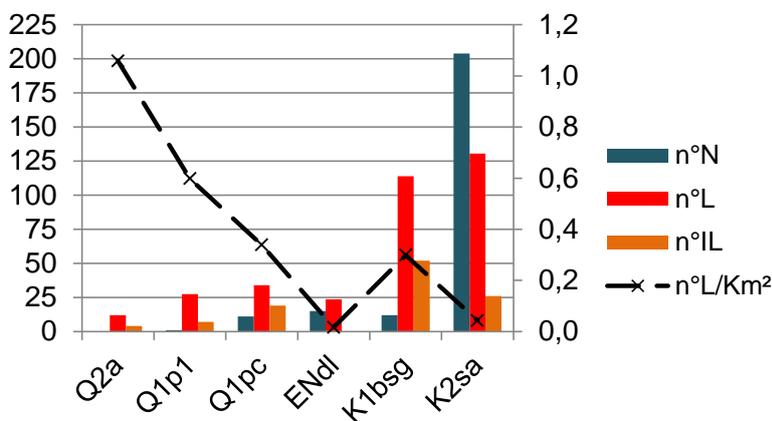


A banda L, abordo do radar ALOS PALSAR, por ter comprimento de onda relativamente grande, é capaz de ter boa penetração, tanto sobre o dossel de árvores, quanto em solos, sendo possível derivar informações de cobertura do solo e operar o mapeamento digital de atributos físicos dos solos (BERNINI, 2016; SANO, 2009).

Nesse contexto, ao individualizarmos os lineamentos extraídos por unidade litológica, sabendo-se que a espessura das unidades mais recentes é rasa, estando representadas por depósitos aluvionares (Q2a), fácies terraços aluvionares (Q1p1) e fácies depósitos coluvionares (Q1pc) e que estas unidades ocorrem assentadas sobre unidades de derrames basálticos ao longo do vale do rio Sucuriú, pode-se assumir que os lineamentos das unidades suprabasálticas são detectados devido as descontinuidades existentes no próprio basalto.

Podemos assumir que a Figura 12 corresponde a maior incidência proporcionalmente à área sobre os basaltos Serra Geral (K1bsg) e que considerar somente a frequência de lineamentos por unidade geológica pode induzir a falsas impressões sobre o índice de fraturamento, como é o caso do arenito pós-basalto (K2sa), o qual possui a maior área de cobertura nesta região.

Figura 12 – Comparação dos totais de nascentes (n°N), de lineamentos (n°L), de interseções entre lineamentos (n°IL) e o número de lineamentos por área de cada unidade geológica cartografada em superfície.



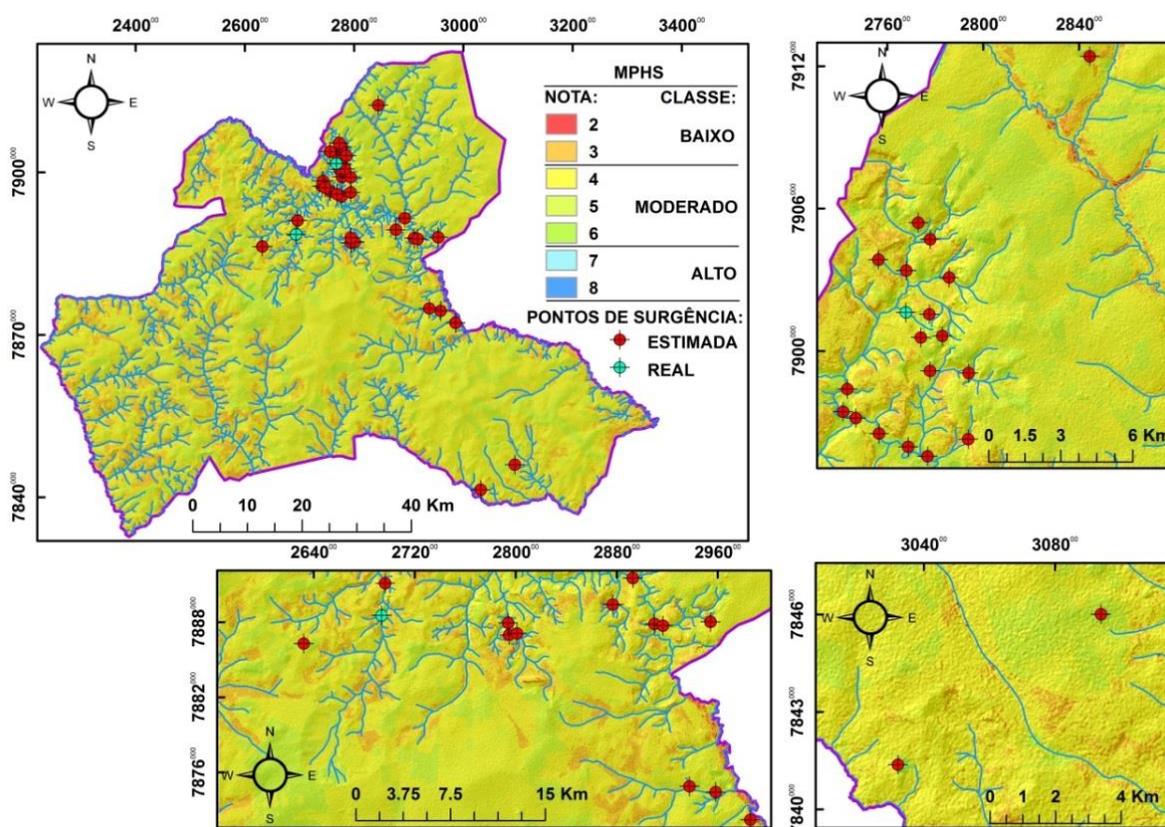
6.3.2 Sobre o Modelo de Potencial Hídrico Subterrâneo

Em Paraíso das Águas o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é do tipo fissural, com favorabilidade à exploração variável, estruturado em soleiras de derrames cretáceos e encontra-se heterogeneamente fraturado em escarpas estruturais e rebordos erosivos (CPRM, 2009), contornado na base e no topo por arenitos. O potencial relativamente elevado do SASG é resultado de fraturas presentes no maciço, relacionadas ao resfriamento térmico nas fases finais de cristalização do

derrame, quanto ao fraturamento tectônico formado na fase do estiramento crustal (ALMEIDA et al., 2006). O sistema fissural é composto por rochas vulcânicas com estruturas de disjunção colunar e sistemas de falhas e fraturas responsáveis por aumentar a abertura entre as superfícies de fraqueza pré-existentes. Neste sistema é provável que diaclases possam operar na segmentação de blocos e facilitem o preenchimento desses espaços por água.

O sistema de porosidade intergranular é constituído por arenitos com porosidade primária e secundária entre os grãos constituindo aquíferos com potencial armazenamento em camadas espessas e saturadas em períodos de maior taxa de precipitação. O potencial dos sistemas de dupla porosidade é caracterizado pela ampliação da porosidade secundária e pelo contraste de litificação entre as camadas à medida que aumenta a profundidade de soterramento (ALMEIDA et al., 2006). Os pontos de ressurgência ocorrem próximos aos pontos centroides com alto potencial hídrico subterrâneo, confirmando o método MPHS como um bom estimador de exfiltrações. Os setores com maior potencial hídrico subterrâneo coincidem com cabeceiras de drenagens de cursos d'água de primeira ordem e com drenagens de ordem superiores subordinadas aos fundos dos vales esculpidos sobre o arenito Caiuá e que em algumas porções permite o afloramento dos basaltos sotopostos (Figura 13).

Figura 13 – Mapa do Potencial Hídrico Subterrâneo de Paraíso das Águas, classificado conforme proposta de Brandão e Gomes (2003) e de Gomes (2008), destacando as ressurgências mapeadas por Carvalho (2018).



Os dados obtidos pelo MPHS quando relacionados aos dados de vazão dos dois poços regularmente cadastrados no município permite verificar que em condições de potencial moderado a vazão pode ser compatível com vazões entre 5-10 m³/s (Tabela 7).

Tabela 7 - Número de poços classificados por vazão *versus* classes de potencialidade.

Classe de Potencialidade	Vazão de Produção (m ³ /h)					Soma
	<1	1-2	2-3	3-5	5-10	
Alta	0	0	0	0	0	0
Moderada	0	0	0	0	2	2
Baixa	0	0	0	0	0	0
Muito Baixa	0	0	0	0	0	0
Soma	0	0	0	0	0	2

Ao quantificar a taxa de área coberta para cada uma das classes do MPHS verifica-se que maior parte do município possui potencialidade moderada (88%), seguida

pela classe baixa (13%), e apenas 0,02% foi avaliada como de alta potencialidade (Tabela 8)

Tabela 8 – Área de cada uma das classes de potencialidade

Potencialidade	Área (km ²)	Área (%)
Alta	1,01	0,02
Moderada	4343,02	86,26
Baixa	690,77	13,72
Muito Baixa	0,00	0,00
Total	5034,80	100,00

6.3.3 Sobre a prospecção de áreas com alto potencial hídrico subterrâneo

Os polígonos de Voronoi com pontos centroides de alto potencial hídrico subterrâneo, apresentam dois principais polígonos, com 5 e 4 pontos, com área de 66 Km² e 16 Km² respectivamente. Estas áreas restringem-se a 1,31% e 0,33% de toda a área do município, respectivamente, o que nos permite dizer que houve uma redução significativa em áreas com provável ocorrência de ressurgência ou cavidade (Figura 14 e Figura 15).

Nesse sentido, recomenda-se explorar os planos de informações de nascentes com o plano de potencial hídrico subterrâneo, considerando o método de polígonos de Voronoi um delimitador acurado para investigação de áreas hidrogeologicamente favoráveis a exfiltração, ou que o nível d'água subterrâneo tende a promover efeitos de carstificação.

A utilização de um critério para busca de áreas com potencial de exfiltração e/ou com processos de carstificação ativos permitiram redução de custos e melhoria na logística, tendo em vista que essas informações não se encontram regularmente distribuídas no espaço geográfico.

Figura 14 – a) Espacialização das nascentes e rede de drenagens; b) Geração das áreas de influência de cada nascente pelo polígono de Voronoi (Thiessen); c) Contagem de centroides por polígonos de Voronoi em classes com potencial hídrico alto. d) Classificação e seleção dos polígonos pelo número de centroides com alto potencial hídrico.

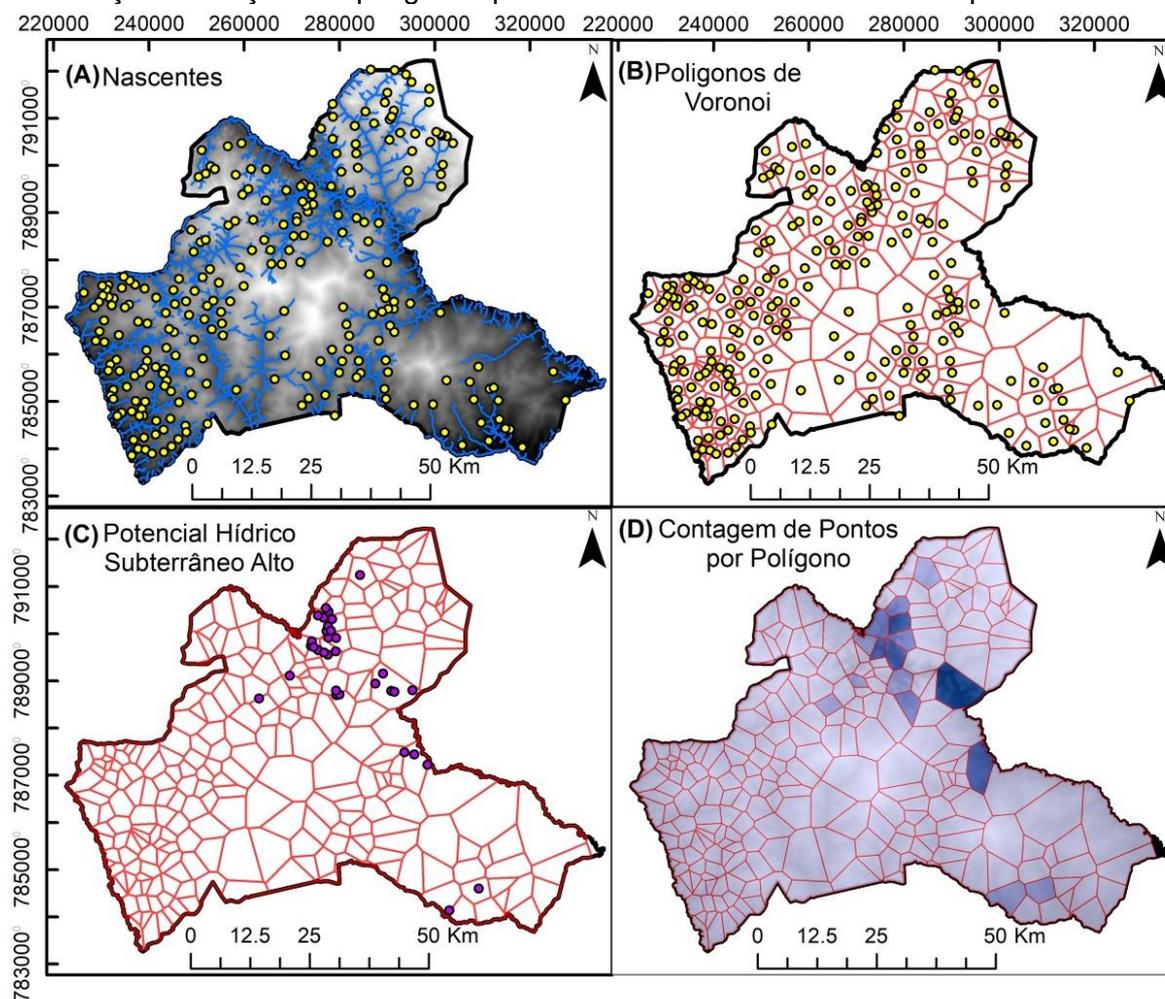
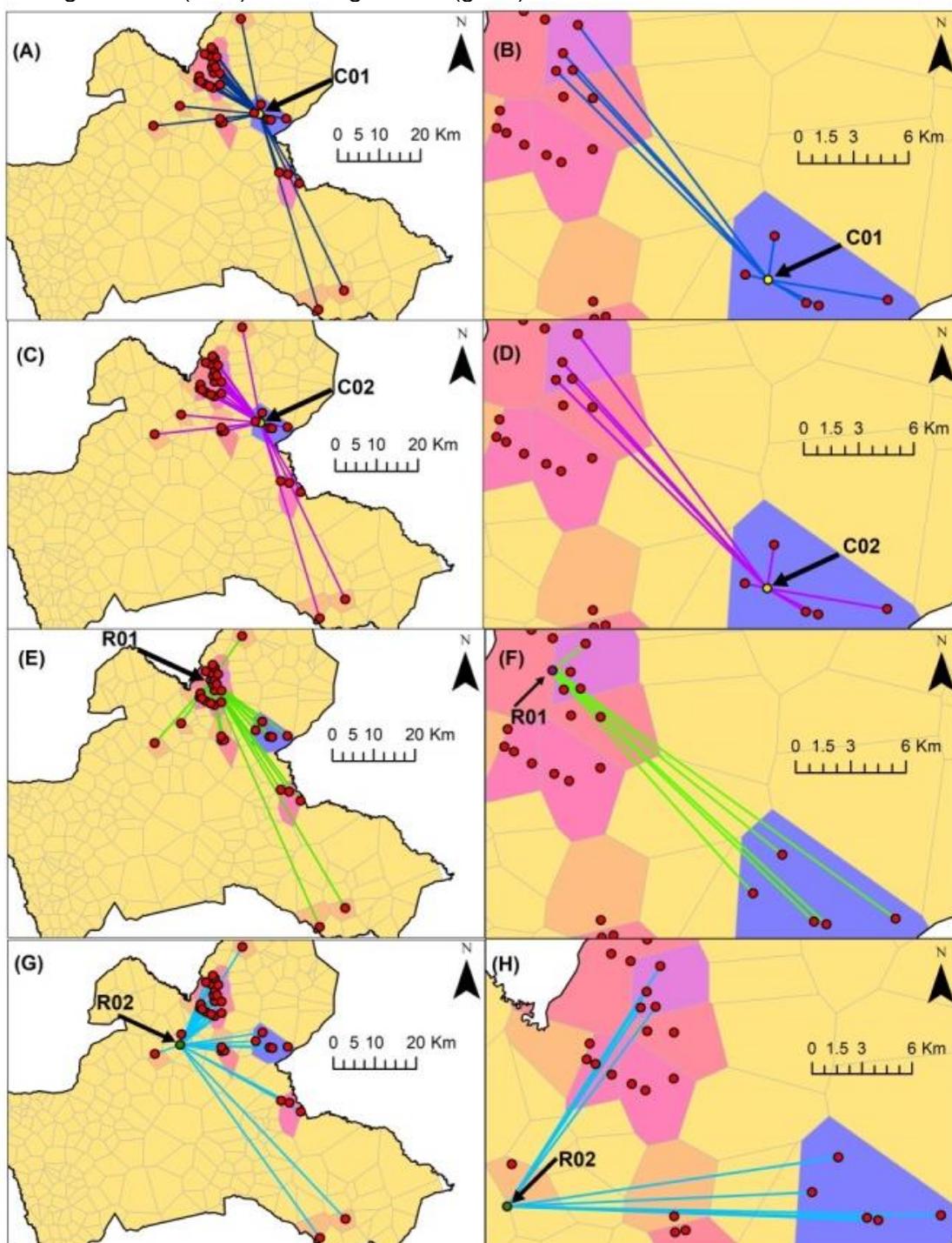


Figura 15 – Distância dos pontos centroides com potencial hídrico subterrâneo alto e dos polígonos de Voronoi com maior número de pontos centroides com alto potencial hídrico subterrâneo em relação à cavidade 01 (a e b), cavidade 02 (c e d), ressurgência 01 (e e f) e ressurgência 2 (g e h).



A Figura 16a e Figura 16b mostram a diferença da variabilidade entre as distâncias determinadas pelos centroides de interesse, considerando os polígonos com alta

potencialidade hídrica subterrânea e os polígonos com maior número de pontos centroides com alto potencial hídrico subterrâneo.

Figura 16a – Boxplot das distâncias dos pontos centroides com potencial hídrico subterrâneo alto em relação às ressurgências e cavidades.

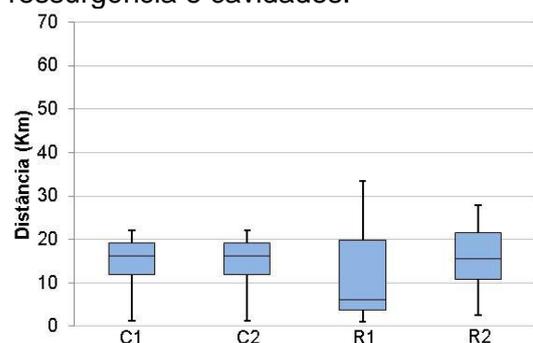
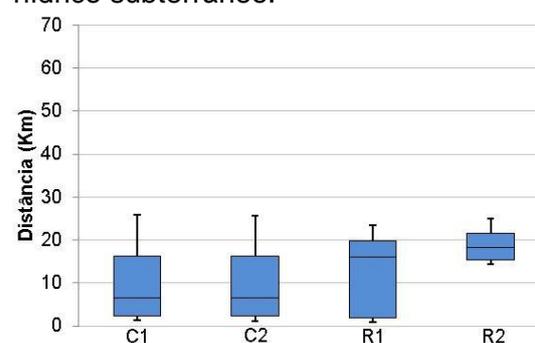


Figura 16b – Boxplot das distâncias nos polígonos de Voronoi com maior número de pontos centroides com alto potencial hídrico subterrâneo.



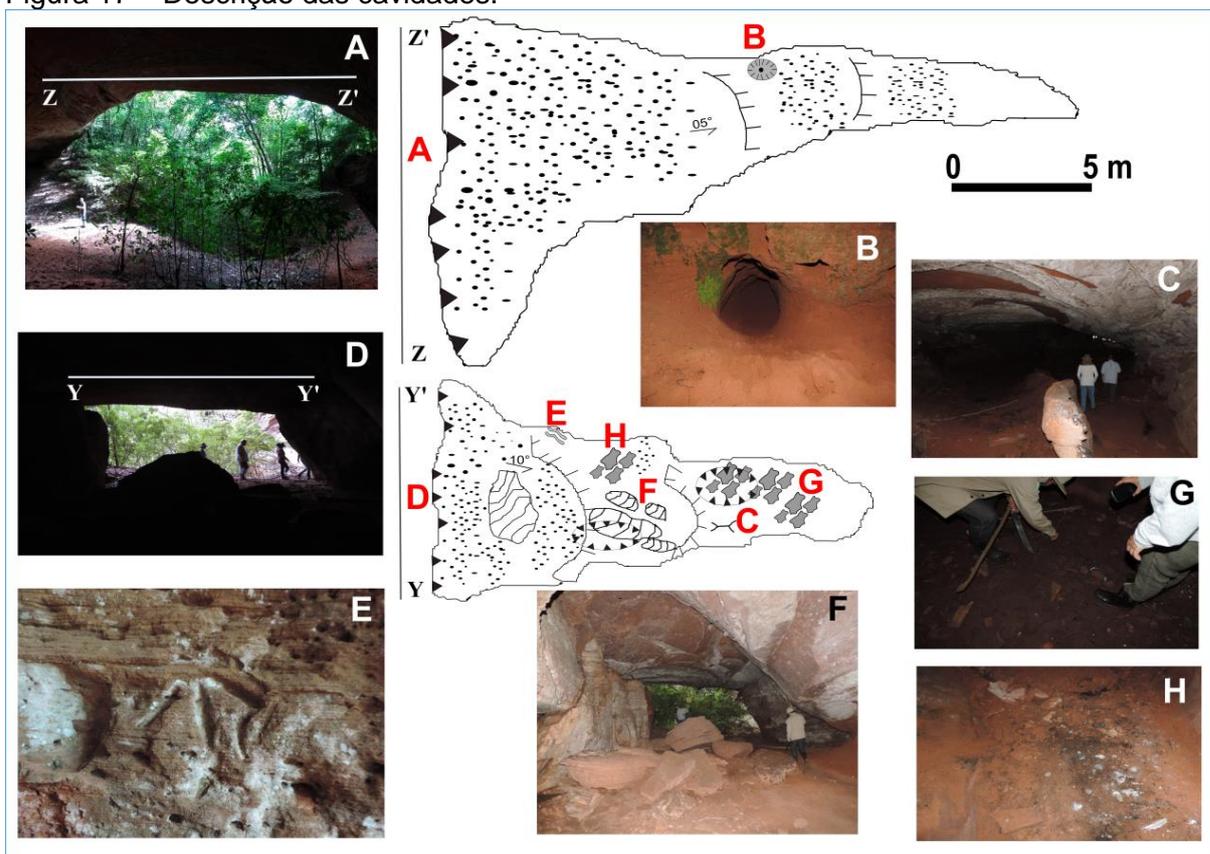
6.3.4 Sobre as cavidades em Paraíso das Águas

Ao se detalhar as cavidades (C1 e C2) percebe-se a entrada da cavidade maior em foram de arco (Figura 17A), o paleoconduto fóssil com cerca de 80 cm em arenito vermelho intensamente alterado e friável (Figura 17B), resto de parede entre condutos, com resquícios de coluna e esfoliações plano-concêntricas no teto, oriundas de entupimento por alterite pressionando as paredes do conduto preteritamente confinado (Figura 14C).

Há também a entrada da cavidade menor e salão com facetas retangulares e paleocondutos paralelos indicados pela presença de uma coluna alongada no sentido do eixo de desenvolvimento da cavidade, sendo o produto residual da antiga parede entre os condutos, no teto observa-se um domo suavizado resultante do entupimento (Figura 17D).

Existem orifícios tubulares associados a dissolução de nódulos e concreções carbonáticas enrijecidas no nível de laminação *wavy* do arenito quartzoso fino com matriz carbonáticas e alvéolos acompanhando o acamamento (Figura 17E). Há um conjunto de blocos desprendidos do teto e das paredes na porção central da cavidade (Figura 17F), bem como seixos mal selecionados e mal arredondados de laterita e arenitos quartzosos encobertos por películas de hidróxidos de ferro no assoalho da cavidade (Figura 17G) e restos de animais recentes (Figura 17H).

Figura 17 – Descrição das cavidades.



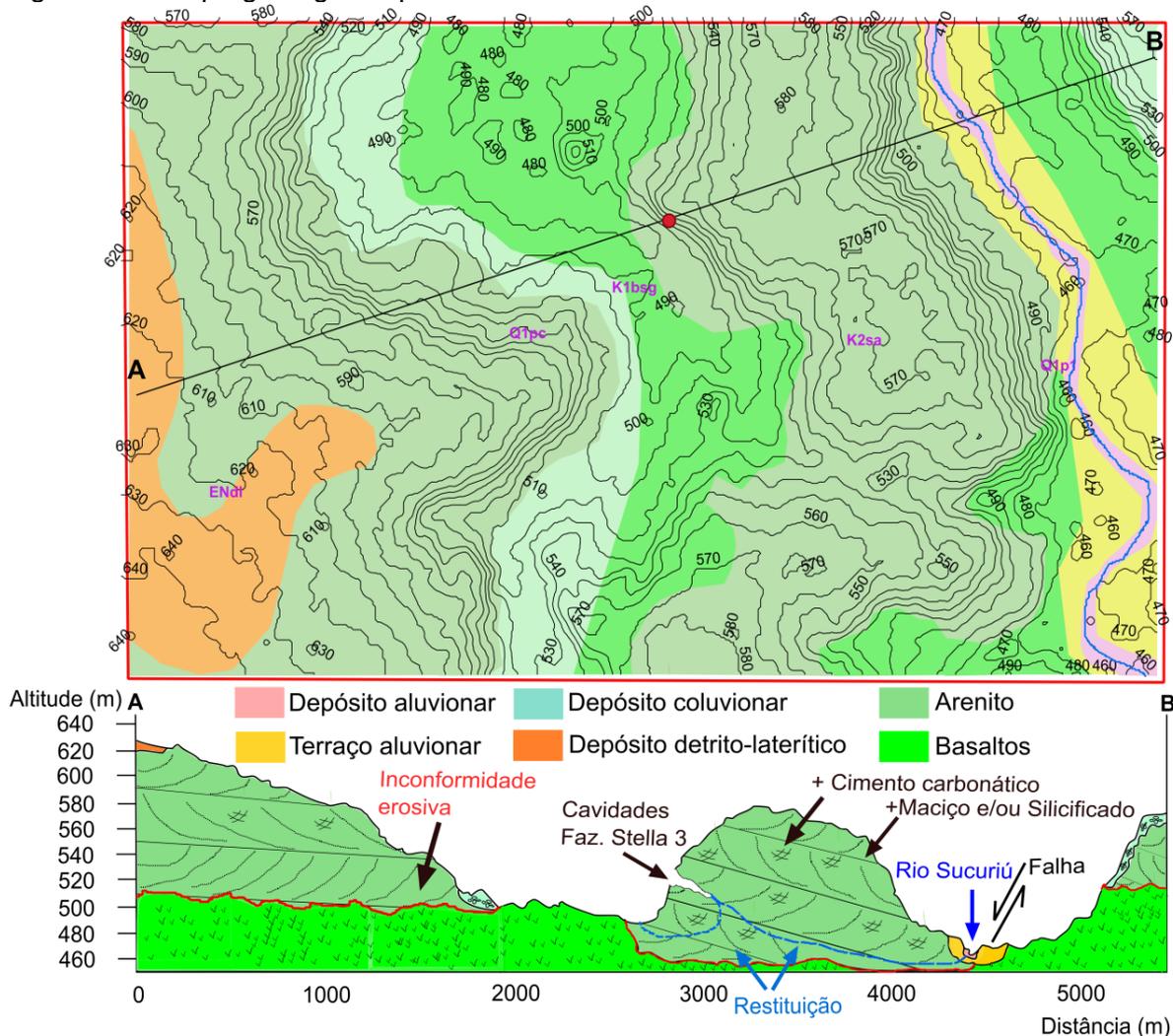
O mapa geológico e o perfil AB correspondente (Figura 18) indicam a ocorrência das cavidades na Fazenda Stella III. As duas cavidades ocorrem no mesmo nível estratigráfico e distam lateralmente um da outra cerca de 10 metros, sendo que em ambas, o desenvolvimento preferencial da galeria acompanha o acamamento do pacote sedimentar, estando o maciço basculado a N08W/15NE, por influência de falhamento normal com plano de falha interceptando a calha do rio Sucuriú, evidenciando o controle geológico-estrutural nas drenagens dessa região.

A restituição do carste provavelmente se dá no sentido do nível de base local (rio Sucuriú), com cerca de 40 metros de desnível topográfico, ou pode haver conexão com a dolina, a qual se apresenta como depressão suavizada preenchida perenemente por água.

O desnível topográfico estabelece o caminho do fluxo d'água subterrâneo, onde a erosão hídrica nas camadas subhorizontalizadas do arenito, por serem heterogêneas, intercalando níveis ricos em cimento carbonático e níveis silicificados, contribuem para a formação do carste.

Este estudo permite formular a hipótese de que arenitos pós-basaltos são propícios ao desenvolvimento de feições características de processos de carstificação e podem constituir províncias cársticas não-carbonáticas. O basalto pode ter fornecido minerais instáveis e íons em solução durante eventos de retrabalhamento e deposição do arenito pós-basalto, no sistema playa-lakes e de canais efêmeros. A Fm. Santo Anastácio (arenito pós-basalto) pode alcançar espessuras superiores a sua sessão tipo descrita no Estado de São Paulo por Soares et al., (1980).

Figura 18 – Mapa geológico e perfil AB da área de ocorrência das cavidades.



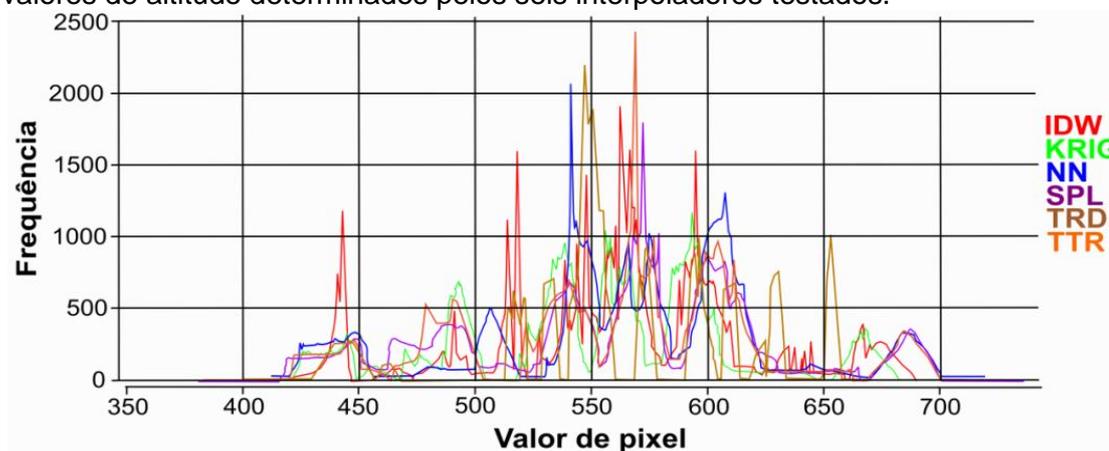
6.3.5 Sobre a estimativa indireta do nível estático por interpolação

Ao analisarmos o comportamento do histograma de cada um dos interpoladores testados num mesmo gráfico (Figura 19), percebe-se que o TTR (*Topo-to-Raster*) apresenta o menor valor de mínimo, seguido do SPL (*Spline*) e do TRD (*Trend*). Os

valores de máximo são realçados pelos interpoladores SPL, seguido do TRD e do IDW (Inverso da Distância ao Quadrado) juntamente com a KRIG (*Krigagem*). Os valores médios das interpolações ficaram em torno de 561 metros (m), onde os interpoladores KRIG, SPL, e TTR apontam esta tendência. Os menores desvios estão presentes nos interpoladores TRD, NN (Vizinhança Natural) e IDW, e o maior desvio é verificado no SPL.

Os valores de mínimo (mín), máximo (máx), média (méd) e desvio padrão (dp) podem ser verificados a seguir, todas medidas estão em metro (m): IDW (mín= 409; máx= 717 ; méd= 563; dp: 56); KRIG (mín= 406; máx= 717 ; méd= 561 ; dp: 58); NN (mín= 409; máx= 716 ; méd= 559; dp: 52); SPL (mín= 386; máx= 732; méd= 561; dp: 60); TRD (mín= 401; máx= 670; méd= 563; dp: 51); TTR (mín= 384; máx= 727; méd= 561 ; dp: 59). A estimativa média mínima dos interpoladores é 399 m, a média máxima é de 713 m e o desvio padrão médio é 56 m, sendo os interpoladores SPL, TTR e KRIG e IDW os que tiveram a melhor condição de contorno entorno da média (Figura 19).

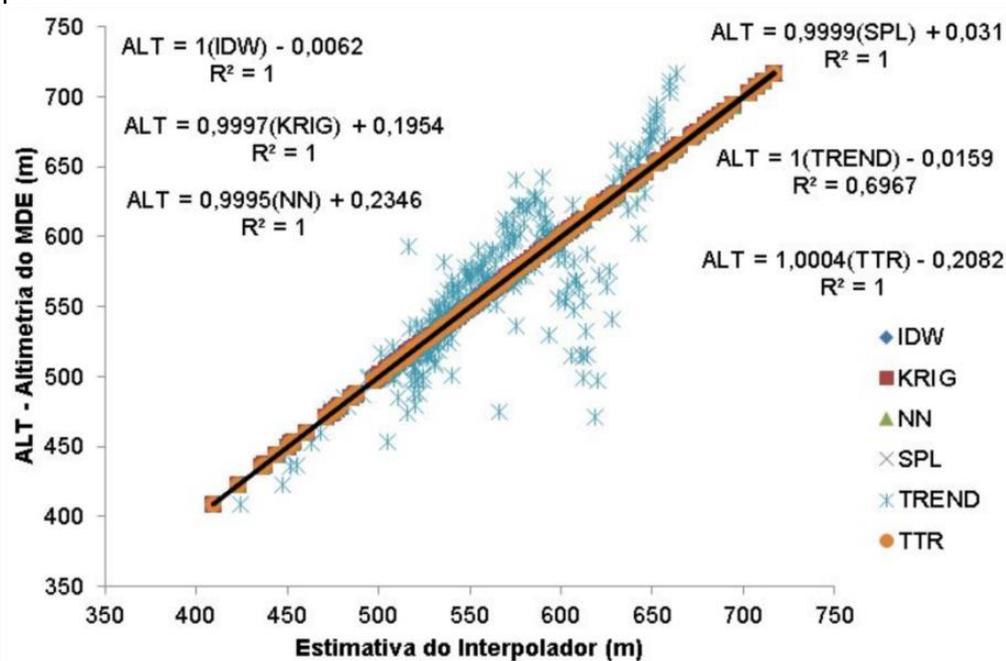
Figura 19 – Histograma raster com o valor de pixel informando as frequências dos valores de altitude determinados pelos seis interpoladores testados.



A regressão linear da altimetria estimada por cada um dos seis interpoladores em relação à cota de cada uma das nascentes, extraídas a partir do modelo digital de elevação fornecem coeficientes de determinação exatos para cinco dos seis interpoladores testados (IDW, KRIG, NN, SPL e TTR), sendo o único que apresenta comportamento anômalo é o interpolador de tendência (TREND). O TREND ao apresentar elevada variância e conseqüentemente alto erro quadrático médio, revela

um índice de concordância abaixo do demais interpoladores, indicando baixa aplicabilidade para espacialização do nível d'água (Figura 20).

Figura 20 – Regressão linear simples entre os valores de altitude de cada nascente estimada por cada uma dos seis interpoladores e o modelo digital de elevação para o mesmo ponto.



Denota-se que o interpolador ao SPL por possuir maior variação e estar associado aos maiores valores de mínimo e máximo, e ter boa correspondência com a média geral dos interpoladores testados consegue aderir melhor ao contorno da superfície do modelo digital de elevação, condicionando menor erro em área (Km^2), sobretudo nos fundos de vales, onde ocorrem as maiores variações abruptas de altitude (Tabela 9).

Tabela 9 – Diferença as superfícies altimétrica do modelo digital de elevação com a superfície interpolada pela altitude das nascentes, onde os valores negativos indicam extrapolação das cotas. Há indicação das áreas estimadas por cada interpolador em relação ao limite do perímetro municipal e o erro.

Interpolador	Área com valores negativos (Km^2)	Área com valores positivos (Km^2)	Área total estimada pelo interpolador (Km^2)	Área total real (Km^2)	Erro (Km^2)
IDW	1363,4	3669,6	5033,0	5034,8	1,8
KRIG	1202,4	3830,6	5033,0	5034,8	1,8
NN	1181,0	3851,7	5032,7	5034,8	2,0
SPL	1061,9	3971,2	5033,0	5034,8	1,7

TREND	1481,1	3551,2	5032,3	5034,8	2,5
TTR	1102,7	3929,6	5032,3	5034,8	2,5

A tabela 10 mostra o significado de cada uma das siglas das informações hidrogeológicas disponível no banco de dados do SIAGAS (2019), indicando em vermelho o preenchimento realizado pelo método de ponderação apresentado neste estudo, conforme Equações 17, 18, 19, 20 e 21.

Tabela 10 – Informações dos poços tubulares existentes no município obtidas no Sistema de Informações de águas Subterrâneas (NE, ND, Q_est e CH). Variáveis independentes quantitativas contínuas avaliadas neste estudo (Z, PHS_sig, Spl). Onde: NE = Nível estático; ND = Nível D'água; Q_est = Vazão após estabilização (m³/s); CH = Carga Hidráulica; Z = Cota altimétrica pelo MDE; PHS_sig = Potencial hídrico subterrâneo obtido em sistema de informações geográficas; Spl: Cota do nível d'água estimada pelo interpolador *Spline* a partir das nascentes; (-) sem informações; Destaque em vermelho para carga hidráulica e nível estático estimados por ponderação da distância e a cota dos poços Pt4 e Pt3.

Ponto	X	Y	ND		Q_est		Z	PHS	
			NE (m)	m)	(m³/s)	CH (m)	(m)	sig	Spl (m)
Pt4	295893262	7901430751	86,05	125,10	9,60	624,95	711	4,70	665,97
Pt2	288040405	7894761142	86,90	-	-	538,10	625	4,85	583,74
Pt1	288039348	7894853357	87,00	92,00	10,00	538,00	625	5,15	584,73
Pt3	287793763	7895865482	83,02	-	-	520,98	604	4,95	596,18

O resumo estatístico das informações necessárias para obtenção das equações é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Resumo dos resultados da regressão linear múltipla: a) Considerando duas variáveis sem a influência das nascentes (período seco); b) Considerando três variáveis com a influência das nascentes (período úmido).

a)

RESUMO DOS RESULTADOS								
Estatística de regressão								
R múltiplo	1,00							
R-Quadrado	1,00							
R-quadrado ajustado	1,00							
Erro padrão	2,78							
Observações	4,00							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	2,00	6616,51	3308,25	426,69	0,03			
Resíduo	1,00	7,75	7,75					
Total	3,00	6624,26						
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-40,84	83,87	-0,49	0,71	-1106,46	1024,78	-1106,46	1024,78
Z	0,97	0,05	20,30	0,03	0,36	1,58	0,36	1,58
PHS_sig	-5,51	12,06	-0,46	0,73	-158,78	147,76	-158,78	147,76
RESULTADOS DE RESÍDUOS				RESULTADOS DE PROBABILIDADE				
Observação	Previsto(a) Ch	Resíduos	Resíduos padrão	Percentil		Ch		
1	624,49	0,46	0,29	12,50		520,98		
2	540,05	-1,95	-1,21	37,50		538,00		
3	538,40	-0,40	-0,25	62,50		538,10		
4	519,09	1,89	1,18	87,50		624,95		

b)

RESUMO DOS RESULTADOS								
Estatística de regressão								
R múltiplo	1,00							
R-Quadrado	1,00							
R-quadrado ajustado	65535,00							
Erro padrão	0,00							
Observações	4,00							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
Regressão	3,00	6624,26	2208,09	#NÚM!	#NÚM!			
Resíduo	0,00	0,00	65535,00					
Total	3,00	6624,26						
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-86,82	0,00	65535,00	#NÚM!	-86,82	-86,82	-86,82	-86,82
Z	0,89	0,00	65535,00	#NÚM!	0,89	0,89	0,89	0,89
PHS_sig	-0,75	0,00	65535,00	#NÚM!	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75
Spl	0,13	0,00	65535,00	#NÚM!	0,13	0,13	0,13	0,13
RESULTADOS DE RESÍDUOS				RESULTADOS DE PROBABILIDADE				
Observação	Previsto(a) CH	Resíduos	Resíduos padrão	Percentil		CH		
1	624,95	0,00	0,00	12,50		520,98		
2	538,10	0,00	1,22	37,50		538,00		
3	538,00	0,00	1,22	62,50		538,10		
4	520,98	0,00	0,00	87,50		624,95		

Equações obtidas para nível estático sem influência das nascentes, denominada de Nível Estático em condições de seca (NEs), e Nível Estático em condições de umidade (NEu), considerando que todas as nascentes estejam em plena exfiltração.

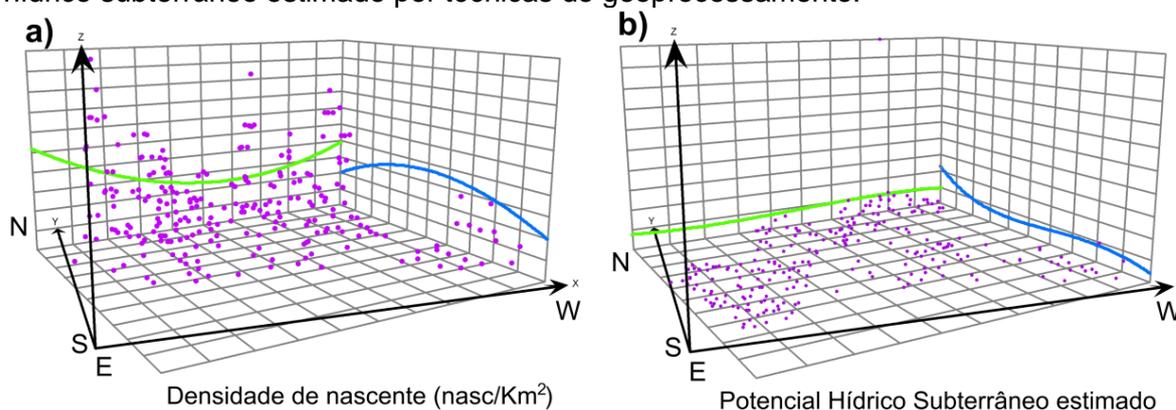
$$NEs = -40,84 + 0,97 * Z - 5,51 * PHS_sig \quad \text{Equação (22)}$$

$$NEu = -86,92 + 0,89 * Z - 0,75 PHS_sig + 0,13 Spl \quad \text{Equação (23)}$$

A variabilidade dos dados produzidos pelo mapa de potencial hídrico subterrâneo em relação aos dados de densidade de nascentes é muito baixa, o que impede uma associação preditiva quantitativa entre estas variáveis. Não é possível fazer, portanto uma associação entre estas componentes, visto que variam em taxas distintas e em ordens de grandeza discrepantes. A densidade de nascentes é maior

nos extremos leste e oeste da área e na parte central no sentido norte sul, enquanto que o potencial hídrico subterrâneo é maior á na porção extremo nordeste da área, tal como mostra a Figura 22.

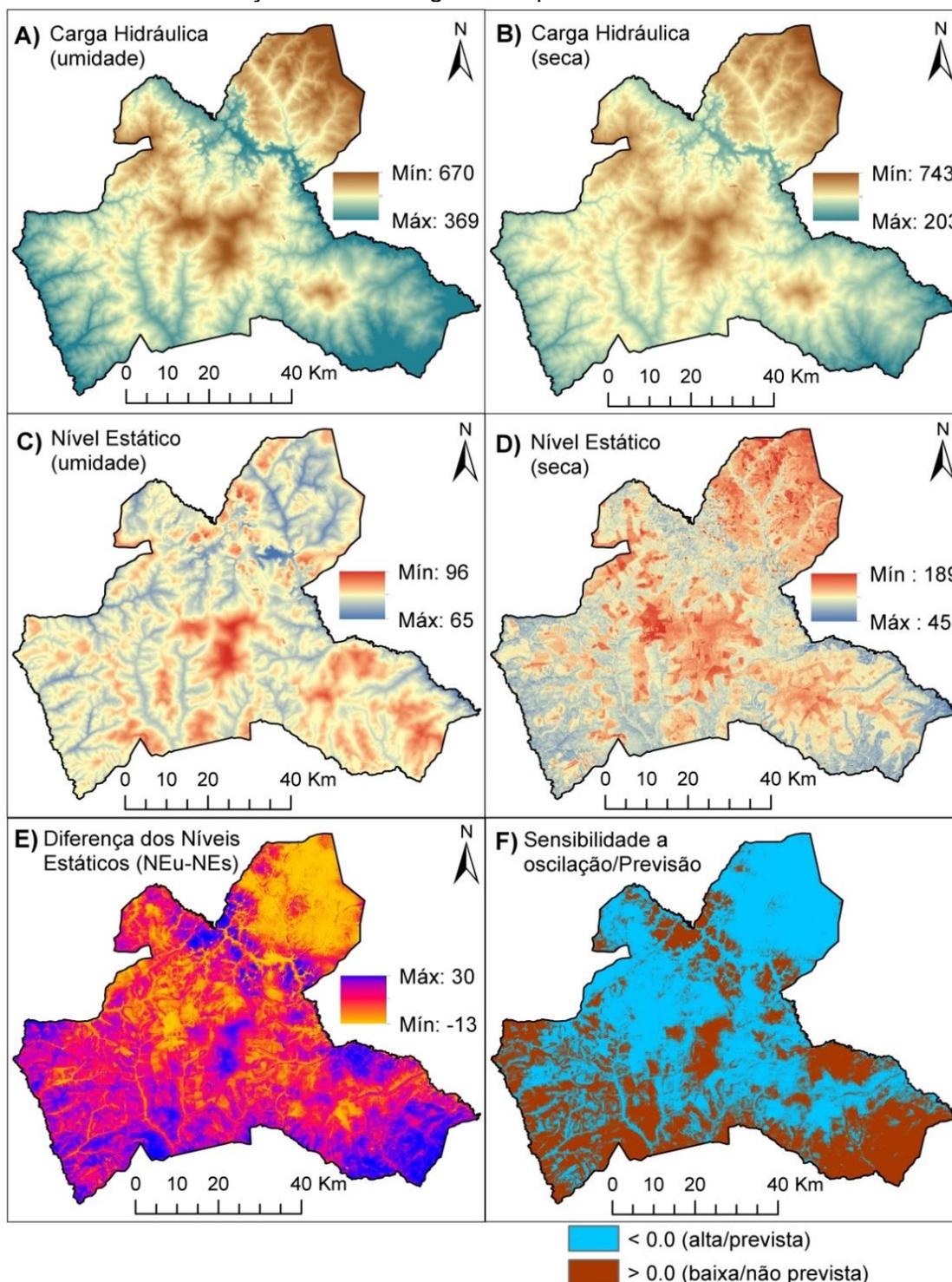
Figura 22 – Análise de tendência espacial para a densidade de nascentes e o potencia hídrico subterrâneo estimado por técnicas de geoprocessamento.



De posse das equações obtidas e utilizando o método de álgebra de mapas, especializou-se a carga hidráulica, o nível estático, tanto para estação seca (desconsiderando o efeito das nascentes), quanto para estação úmida (considerando o efeito das nascentes). A diferença entre os níveis estáticos para estação úmida e seca e a medida da sensibilidade do método em prever essa oscilação considera que na estação úmida o nível estático necessariamente deverá ser mais raso do que durante a estação seca. Para as regiões onde não foi satisfeito esse pressuposto anterior foi considerado que o modelo não teve sensibilidade à esta oscilação ou não pode prever (Figura 23).

Figura 23 – Estimativas baseadas em regressão linear múltipla considerando duas e três variáveis, sem e com a influência de nascentes, respectivamente e a identificação

das diferenças entre estimativas para o período seco e úmido, informando a sensibilidade de oscilação do nível d'água e/ou previsão do modelo.



6.3.6 Sobre os aspectos geológicos dos sistemas aquíferos

A Formação Santo Anastácio, embora de ocorrência restrita nos Estados de Paraná e São Paulo, pode apresentar em termos de cobertura, áreas mais expressivas no

Estado de Mato Grosso do Sul, constituindo importante sistema aquífero. A Formação Santo Anastácio nesta região é constituída por arenitos finos a médios, quartzosos, com alguns níveis impuros ou silicificados. São pobremente selecionados, com pequena quantidade de matriz siltico-argilosa. Apresenta contato abrupto na forma de inconformidade erosiva com a Formação Serra Geral na base e com depósitos cenozoicos no topo. Dados as características do SASA nesta região é provável que em sua maior parte se constitua em um aquífero livre, podendo em alguns locais está confinado devido a horizontes ou camadas de sílex, sobretudo próximo ao contato com o basalto.

As condições de relevo plano a pouco ondulado e o nível freático relativamente raso em algumas porções do SASA viabiliza em grande parte a perfuração de poços do tipo cacimba, tendo em vista que as formações sedimentares suprabasáltica são aflorantes e sem confinamento (CELLIGOI; DUARTE, 2002).

O Aquífero Caiuá consiste em seu pacote sedimentar um meio poroso, com características relativamente heterogêneas em termos de granulometria ao longo dos estratos, variando desde grossa, podendo ocorrer nível de sílex ou de camadas mais bem compactadas, o que imprime maior complexidade no entendimento da circulação da água subterrânea nesta porção do Mato Grosso do Sul, diferentemente do que ocorre em São Paulo e Paraná, onde o aquífero é considerado mais homogêneo. Este fato impede afirmar que o Aquífero Caiuá, representado nesta porção pelo SASA seja livre em toda sua extensão. A reserva potencial explotável (RPE) medida em m^3/s , significa a recarga potencial direta da chuva, que poder ser utilizada, de forma a não interferir nas vazões mínimas ambientais superficiais e de referência para outorga (KRÜGER et al., 2019) e para ao aquífero Caiuá, onde há maior heterogeneidade entre os estratos pode sofrer variações significativas.

Com os métodos AIC (Akaike Information Criterion) e BIC (Bayesian Information Criterion), em contexto geológico semelhante à desta área de estudo, na Bacia do Paraná, verificou-se que há uma relação linear aproximada de 0,31 mm no nível d'água subterrânea para cada milímetro de chuva, ou seja, 31% do total precipitado retornam ao ambiente subterrâneo (LUIZ, SCHRÖDER; SILVA, 2017). A Tabela 11 sintetiza as informações compiladas sobre os aquíferos da região estudada.

Tabela 11 – Proposta de classificação dos tipos de aquíferos em Paraíso das Águas (MS).

Adaptado de Almeida et al., (2006).

GRUPO	DOMÍNIO	SISTEMA AQUÍFERO	SÍMBOLO	Litologia/Solo Predominante
Freático	Intergranular	Freático I	F ₁	Neossolo Flúvico, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico, Gleissolo Háplico
		Freático II	F ₂	Latossolo Vermelho
		Freático III	F ₃	Nitossolo Bruno
Profundo	Poroso	Santo Anastácio	SASA	Arenitos subarcoseanos
	Fraturado	Serra Geral	SASG	Basaltos
	Dupla Porosidade	Pré-Basalto	SAPB	Arenitos

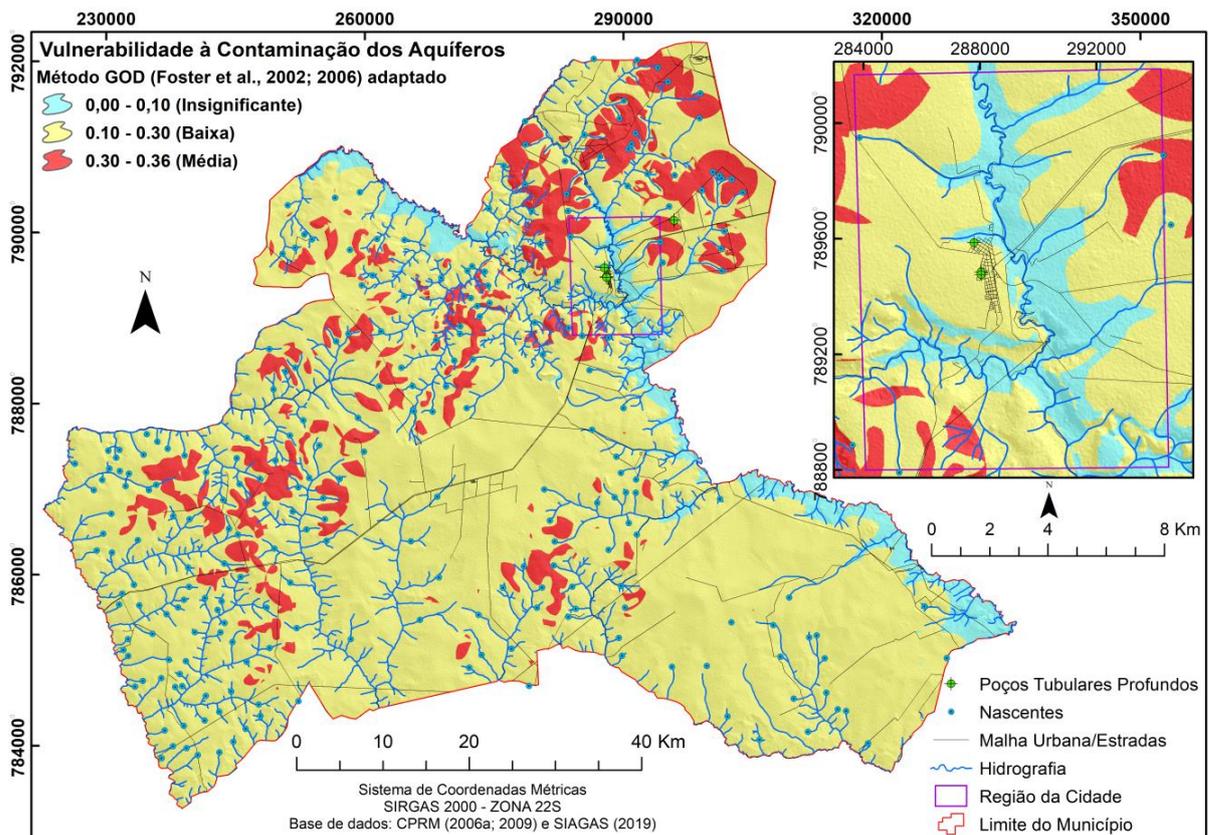
6.3.7 Sobre a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos determinada pelo método GOD

Os valores do índice de vulnerabilidade situaram-se entre classe de vulnerabilidade insignificante a média (Figura 24). Dentre as 5 classes possíveis de vulnerabilidade natural, esta área de estudo apresentou 3 (insignificante, baixa e média). Sendo que para as regiões onde estão locados poços tubulares a vulnerabilidade é baixa. Isto se deve principalmente ao fato de que o nível estático da água subterrânea ser mais profundo do que a distância segura de 50 metros (variando em torno de 65 a 96 metros). Os valores mais elevados do índice GOD (média vulnerabilidade) situam-se, sobretudo nas cabeceiras de drenagens ou nas áreas mais planas que exercem função de recarga de aquífero. Próximo à área urbana há fontes potenciais pontuais de contaminação, entre elas: cemitério, postos de gasolina, áreas de deposição de resíduos e esgoto doméstico. Apesar de o SASG ter sido avaliado com insignificante vulnerabilidade à contaminação pelo método GOD, ressalta-se que as condições de fraturamento podem favorecer a chegada e ou a dispersão de contaminantes para o aquífero, tal como apontado no Mapa de Potencial Hídrico Subterrâneo deste estudo.

De modo geral, a localização das áreas e dos pontos centroides com maior potencial hídrico subterrâneo, determinadas pelo método MEPHS, coincidem com áreas com baixa vulnerabilidade à contaminação de aquíferos pelo método GOD. Entretanto, para a bacia hidrográfica do rio Sucuriú, setor centro-norte do município, localizado na zona rural, observa-se que além de concentrar o maior número de pontos

centroides de alto potencial hídrico subterrâneo também há os valores mais elevados de vulnerabilidade à contaminação (acima de 3,0), no nível de baixa vulnerabilidade. Isso implica que as atividades com potenciais fontes de contaminação a montante das drenagens e das nascentes podem repercutir de em curto e médio prazo na qualidade da água dos cursos d'água superficiais, tendo em vista que os aquíferos da superfície paleogênica não são confinados. Estes domínios estão relacionados à classe intergranular freática, onde a água flui com maior facilidade e conseqüentemente pode disseminar contaminantes com maior facilidade.

Figura 24 – Mapa do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos do município de Paraíso das Águas (MS) com detalhe para a região da malha urbana consolidada.



O SASA neste município possui mais de 140 metros de unidade hidroestratigráfica com de baixo índice de fraturamento. A espessura do manto de intemperismo nesta unidade varia de 5 a 30 metros a depender da posição no relevo, porém situa-se preferencialmente em domínio menos dissecados em comparação à unidade subjacente (SASG), a qual está confinada preferencialmente e vales fluviais interplanálticos. A vazão do SASA é em torno de 10 a 25 m³/h, a vazão específica é

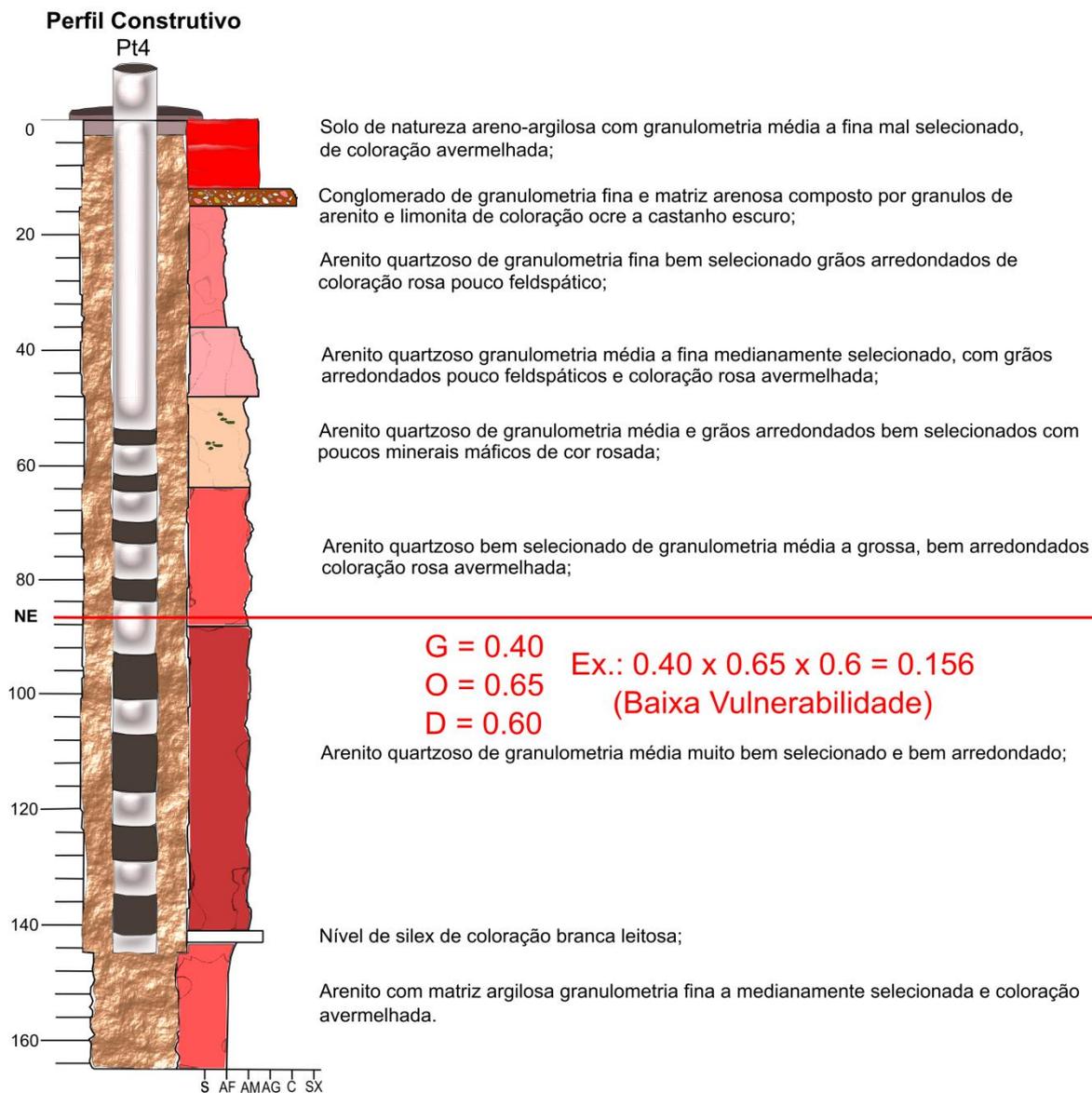
de cerca de 0,4 m³/h/m, a transmissividade hidráulica opera na ordem de 10⁻⁵ e 10⁻⁴ m²/s e a condutividade hidráulica é em torno de 10⁻⁷ a 10⁻⁶ m/s (DINIZ et al., 2014).

O sistema de porosidade intergranular é constituído por arenitos com porosidade primária e secundária entre os grãos constituindo aquíferos com potencial armazenamento em camadas espessas e saturadas em períodos de maior taxa de precipitação. O potencial dos sistemas de dupla porosidade é caracterizado pela ampliação da porosidade secundária e pelo contraste de litificação entre as camadas à medida que aumenta a profundidade de soterramento (ALMEIDA et al., 2006).

O SASG em Paraíso das Águas possui de 10 a 35 metros de unidade litológica aflorante com grau de fraturamento considerado de média densidade. A unidade hidroestratigráfica subjacente (arenito pré-basalto) pode variar de 100 a 500 metros de espessura. A espessura do manto de intemperismo sobre essas rochas é em média de 5 a 15 metros. Em termos de vazão essa unidade registra entre 10 e 25 m³/h, com produtividade considerada baixa, porém moderada quando instalada sobre sistemas de falhas e/ou fraturas de maior densidade (DINIZ et al., 2014). De acordo este mesmo autor, a unidade litológica subjacente aos basaltos (arenito pré-basalto) possui vazões superiores a 100 m³/h, com produtividade avaliada como muito alta.

Níveis de arenito silicificado (sílex) ocorrem geralmente na base do arenito pós-basalto (Figura 25) e podem servir como marcador cronoestratigráfico, determinando também a proximidade com os derrames basálticos sotopostos. Os registros de nível de sílex no arenito pós-basalto, tanto em perfil construtivo de poço (SIAGAS, 2019), quanto em afloramentos próximos aos fundos de vale (CARVALHO, 2018), sugere certa continuidade lateral na estratigrafia.

pertencente ao arenito pós-basalto e os parâmetros resultantes da aplicação do método GOD.

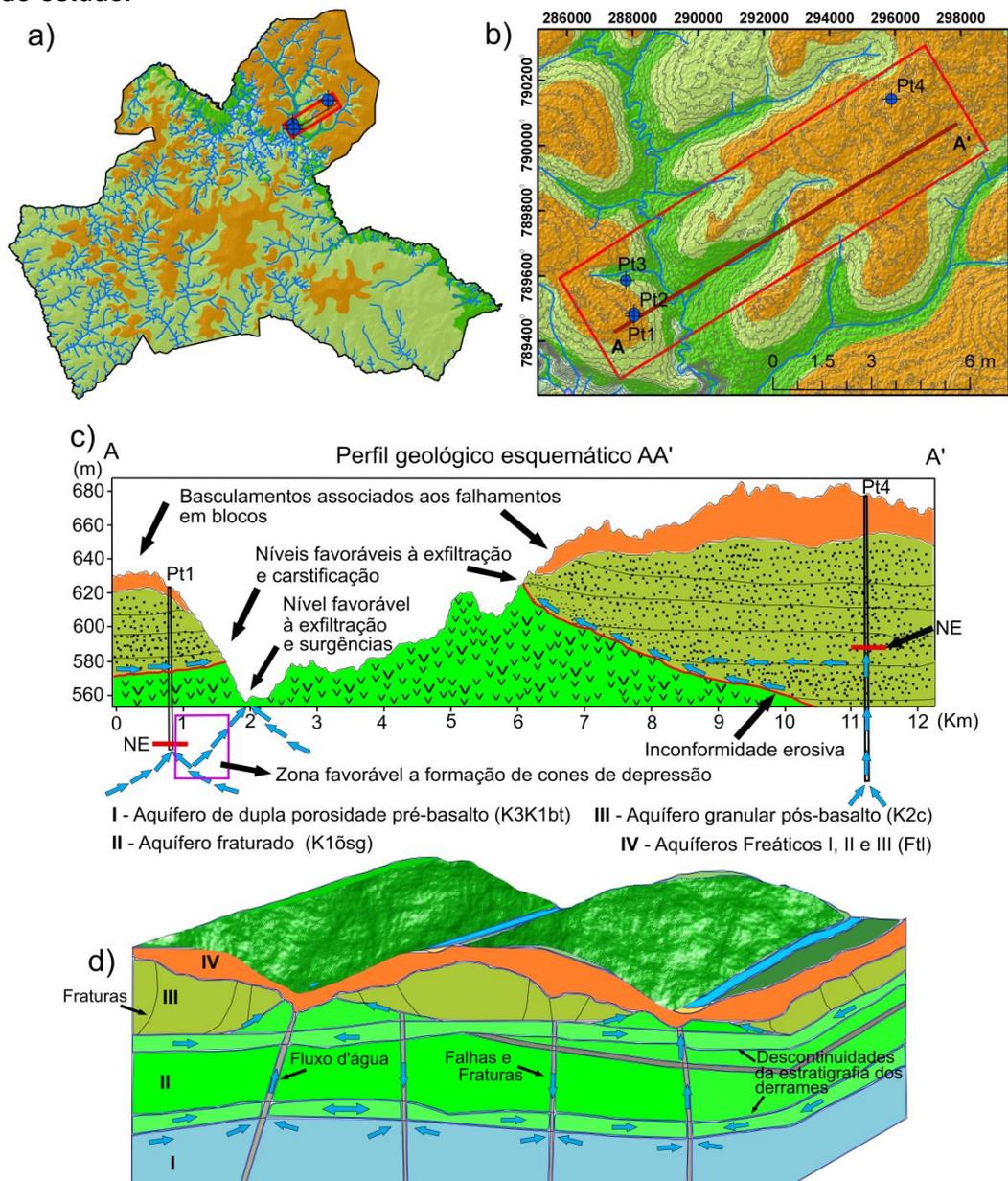


Caso seja, confirmada esta hipótese, o nível de sílex pode desempenhar um rol como camada selante, promovendo heterogeneidade entre as camadas, o que condiciona a formação de uma unidade aquífera semiconfinada mais profunda do que aquela onde se explota água atualmente, conforme sugere o modelo conceitual em bloco diagrama (Figura 26 A, B, C e D).

As exfiltrações na forma de nascentes perenes conforme mostra a Figura 26 estão relacionadas ou à zona de contato entre o arenito com o basalto, ou a discontinuidades no basalto. Enquanto que as ressurgências estariam mais próximas do contexto de exfiltração por discontinuidades no basalto, dado o quimismo e a temperatura destas águas, e a configuração dos sistemas aquíferos

nesta região. Outra fonte secundária de exfiltrações é o contato entre o arenito e a superfície paleogênica, representada por diversos tipos de solos, tendo em vista sua potencialidade no armazenamento de água dados suas características de espessura, porosidade e permeabilidade favoráveis. Sendo assim, o arenito pode funcionar com uma barreira para a infiltração em algumas porções do terreno, sobretudo nos níveis de maior silicificação.

Figura 26 – A) Mapa litológico com indicação dos locais com poços tubulares cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (B); C) Perfil geológico AA'; D) Bloco diagrama com a classificação dos tipos de aquíferos da área de estudo.



6.3.8 Sobre os fatores hidrogeoquímicos

A água do SASA tende a ser menos mineralizadas que as dos basaltos da Formação Serra Geral, sendo os padrões hidrogeoquímicos significativamente variado a depender da distribuição espacial do substrato basáltico em contato com o aquífero Caiuá em função da sua variação litológica, cimentação calcífera, de dissolução de feldspatos em argilominerais ou de halita (CELLIGOI; DUARTE, 2002). Os teores salinos das águas do aquífero Caiuá, pouco mineralizadas a desmineralizadas apresentam taxas entre 14 a 57 mg/l, sendo fracamente bicarbonatadas cálcico-magnesianas e pH ácido entre 5,5 a 6,5 (CAMPOS, 2004).

Um dos fatos que pode favorecer a baixa mineralização destas águas é o curto trajeto que a água percorre entre a zona de carga e de descarga, onde os planaltos interioranos recortados por vales encaixados expondo rochas basálticas permitiram esse controle. A hidrogeoquímica é, portanto consistente com as características diagenéticas desenvolvidas no arenito Caiuá, sendo enriquecidas em conteúdo de cimento carbonático conforme se aproxima do centro da Bacia do Paraná (GASTMANS; CHANG, HUTCHEON, 2010).

No geral, as águas subterrâneas da porção central e oeste da Bacia do Paraná apresentam-se enriquecidas em íons de carbonato, as quais estariam associadas a eventos de dissolução e precipitação, conforma a variação da temperatura, bem como apresentam pH e Eh que definem na maior parte padrões de oxidação (BONOTTO, 2012).

Dentre as atividades econômicas desenvolvidas sobre o Aquífero Bauru-Caiuá, que ocupa o equivalente a 37% do Estado de Mato Grosso do Sul (CPRM, 2012), se destacam o uso da vinhaça na fertirrigação na cultura de cana de açúcar, o uso de herbicidas e o curtimento mineral do couro como potenciais fontes contaminantes (UECHI; GABAS; LASTORIA, 2017). Dentre os elementos químicos que se apresentam fora dos limites de potabilidade estabelecidos na legislação o manganês (Mn) e o ferro (Fe) tendem a valores fora dos padrões organolépticos de potabilidade e há falta de estudos sobre os possíveis impactos de contaminação da indústria de celulose (UECHI; GABAS; LASTORIA, 2017).

6.3.9 Sobre as fontes termais

Na Bacia Sedimentar do Paraná, há vários relatos de fontes de águas termais (ARBOIT et al., 2013; VIEIRA, HAMZA; ALEXANDRINO, 2014; GODOY; CONCEIÇÃO; GODOY, 2016; TONDO et al., 2016), ou também chamadas de nascentes termais, oriundas de processos de ressurgências. O hidrodermalismo atual desta província de águas termais ainda é pouco conhecido, sendo que os autores atribuem a diversos fatores na contribuição desse processo, dentre eles: flexuras regionais, anomalias gravimétricas, proximidade com o embasamento granítico, rochas altamente porosas ou fraturadas que facilitam a infiltração de água e a ressurgência após o contato com a fonte de calor (GODOY, CONCEIÇÃO; GODOY, 2016). Ressurgências com temperaturas diferentes das fontes de exfiltração da região em que ocorrem, podem estar associadas ao fluxo geotérmico de baixa temperatura (máximo de 70°C) localizado preferencialmente na região centro-oeste do Brasil, inserida na Bacia Sedimentar do Paraná. Fontes geotérmicas vêm sendo aproveitados em usos diretos como lazer e recreação, havendo poucas ocorrências de uso industrial (ARBOIT et al., 2013).

É evidenciada uma associação entre a distribuição geográfica de fontes termais e áreas de ocorrência de fluxos laterais de águas subterrâneas, sendo encontradas onde há ausência de fluxos laterais (VIEIRA; HAMZA; ALEXANDRINO, 2014). Porém neste trabalho verificamos que o limite geográfico, com ausência de fluxo lateral de água subterrânea, determinado pelos autores anteriormente citados, pode apresentar fontes termais, tal como é o caso das duas ressurgências mapeadas no município de Paraíso das Águas (CARVALHO, 2018). Isso implica na existência de possíveis anomalias térmicas locais interagindo com águas subterrâneas semiconfinadas. Além disso, as águas termais poderiam estar circulando entre diferentes níveis de derrames basálticos, o que permite maior tempo de residência do fluxo subterrâneo e menor transmissividade entre as camadas, permitindo o aumento expressivo da temperatura dessas águas (TONDO et al.; 2016).

6.4 CONCLUSÕES

O modelo empírico do potencial hídrico subterrâneo (MEPHS) elaborado em sistemas de informação geográfica gratuitos pode servir para explorar áreas favoráveis à ocorrência de ressurgências e processos de carstificação ativos, porém, não é viável para aquíferos porosos afetados por baixa intensidade de lineamentos.

Os pontos de nascentes como base para determinar áreas de influência por polígonos de Thiessen ou Voronoi e a contagem de centroides com potencial hídrico subterrâneo elevado fornecem critérios de apoio à exploração de novas áreas propícias a fenômenos de ressurgência ou processos de carstificação ativos. Entretanto, a densidade de nascentes perenes ou intermitentes não pode ser prevista pelo MEPHS, uma vez que o principal mecanismo de exfiltração advém do aquífero granular poroso pós-basalto e dos domínios freáticos com índices de fraturamento nulo ou muito baixo e o modelo conceitual assume forte influência para lineamentos morfoestruturais.

O nível estático estimado por regressão linear múltipla, usando o MEPHS, a cota dos poços e a superfície interpolada do nível d'água das nascentes, regionaliza uma média próxima ao do nível estático dos poços cadastrados, resultando numa variância baixa e que não exprime a heterogeneidade das unidades aquíferas envolvidas. Porém o método *Slipe* de interpolação foi o que melhor estimou o nível estático a partir dos dados de nascentes, seguido pela Krigagem e Inverso da Distância, sendo de baixa precisão e descartados para esta finalidade os interpoladores de Vizinhança Natural, Topo to Raster e Tendência.

O controle estrutural das drenagens não repercutiu em alta incidência de lineamentos sobre os arenitos pós-basaltos, mas funcionou como mecanismo de entalhamento dos vales, expondo rochas mais antigas, sobretudo os níveis com maior índice de fraturamento dos derrames basálticos.

O refinamento dos dados de entrada para o modelo, usando imagens de satélite e modelos digitais de elevação, dados coletados em campo e a revisão da geologia regional foram fundamentais para se chegar num modelo hidrogeológico conceitual mais coerente para área de estudo, tendo em vista as escalas de mapeamento pouco detalhadas e disponíveis para esta região.

O método GOD adaptado em parte neste estudo leva em conta a densidade de nascentes e informações de poços tubulares profundos, sendo estes fatores importantes para delimitação do nível freático, permitir menor conflito entre informações hidrogeológicas e atenuar a falta de dados de poços regularmente cadastrados. A vulnerabilidade baixa deve-se principalmente ao fator (D), sendo o nível estático superior a 50 metros de profundidade.

As estruturas rúpteis incidem em vários níveis de profundidade nesta porção centro-norte bacia da Bacia Sedimentar do Paraná, onde o controle do embasamento é

bem demarcado por métodos geofísicos regionais integrados, sendo estas estruturas responsáveis por influenciar tanto o quimismo quanto as anomalias termais de algumas fontes de ressurgência.

Os métodos aqui propostos são de baixo custo e poderão servir para suprir limitações de acesso a dados hidrogeológicos corretamente consistidos, dando suporte a decisões de gestão e planejamento dos recursos hídricos.

6.5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PGTA/UFMS (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos ainda a CAPES pelo acesso ao Portal de Periódicos. Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro e bolsas. A bolsa de produtividade em pesquisa de A. C. Paranhos Filho (CNPq Processo 305013/2018-1). O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

6.6 REFERÊNCIAS

ALBREZ EA. Geotecnologias e controle estrutural sobre o Pantanal. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 2013. 44p.

ALMEIDA L, RESENDE L, RODRIGUES, AP et al. 2006. Ensaio de Permeabilidade *in situ*. In: ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A.P. & CAMPOS, J.E.G. (eds.). Hidrogeologia do Estado de Goiás. Secretaria de Indústria e Comércio & Superintendência de Geologia e Mineração, p.129-136.

ALVARES CA, et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift.v. 22; p.711-728, 2013.

AN, M. & ASSUMPÇÃO, M.S. Effect of lateral variation and model parameterization on surface wave dispersion inversion to estimate the average shallow structure in the Paraná Basin. Journal of Seismology, v. 9, p. 449-462, 2005.

ASF, ALASKA SATELLITE FACILITY. Imagem de Satellite ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) - JAXA Japan Aerospace Exploration Agency. Modo FBD (Fine Beam Dual polarization: HH + HV ou VV + VH). 2020. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/> Acesso em: 14/07/2018.

ANA, Agência Nacional das Águas. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/> Acesso em: 23/06/2020.

ARBOIT N.K.S et al. Potencialidade De Utilização Da Energia Geotérmica No Brasil – Uma Revisão De Literatura. Revista do Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, v.26, p. 155–168, 2013.

BERNINI TA. Utilização de Imagens do ALOS/PALSAR no Mapeamento Digital de Atributos Físicos dos Solos. Tese de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária. 2016. 101p.

BONGIOLO, A.de.B.e.S.; FERREIRA, F.J.F.; BITTENCOURT, A.V.L. & SALAMUNI, E. Connectivity and magnetic-structural compartmentalization of the Serra Geral and Guarani Aquifer Systems in central state of Paraná (Paraná Basin, Brazil). Revista Brasileira de Geofísica, v. 32, n. 1, p. 141-160, 2014.

BONOTTO, D.M. A comparative study of aquifer systems occurring at the Paraná sedimentary basin, Brasil: major hydrochemical trends. Environ Earth Sci, v. 67, p. 2285-2300, 2012.

BOSQUILIA; R.W.D, et al. Comparação entre diferentes imagens de satélite no mapeamento visual de drenagem e nascentes em amostras circulares. Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBRS, João Pessoa, Brasil, 2015:1-8.

BRANDÃO, R.L, GOMES, F.E.M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação do potencial hidrogeológico da folha Irauçuba. Revista de Geologia. 2003;1:

CAMOLEZI BA. Controle estrutural da rede de drenagem com base Na Correlação De Dados Morfométricos E Morfoestruturais : O Caso Da Bacia Do Ribeirão São Pedro - Paraná. Revista Brasileira de Geomorfologia. 2012:2;201–211.

CAMPOS, H.C.N.S. Águas subterrâneas na Bacia do Paraná. Geosul, v. 19, n. 37, p. 47-65, 2004.

CAMPOS, F.A.P. Evidências do Lineamento Transbrasiliano na região nordeste de Mato Grosso do Sul: Aspectos lito-estruturais e aerogeofísicos (magnetometria e gravimetria). Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFMT. 2015. 99p.

CARMO EJ, RODRIGUES DD, DOS SANTOS GR. Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. Boletim de Ciencias Geodesicas. v.21; p. 674–690, 2015.

CARVALHO, I.S. 2018. O fenômeno da Água Santa no município de Paraíso das Águas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 30p.

CELLIGOI, A. & DUARTE, U. Hidrogeoquímica do aquífero Caiuá no Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, n. 1, p. 19-32, 2002.

CELLIGOI, A. & SANTOS, M.M. dos. Avaliação das reservas subterrâneas do aquífero Caiuá na sub-bacia do rio dos Índios - PR. Geografia, v. 10, n. 2, p. 257-269, 2001.

COUTINHO, J.V.; PORSANI, J.L.; ELIS, V.R.; SANTOS, V.R.N.; USTRA, A.T.; WENDLAND, E. Applications of geophysical techniques to improve a groundwater conceptual model in the outcrop area of the Guarani Aquifer System, in Brazil. Environmental Earth Sciences, v. 79. n. 417. p.1-11, 2020.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Bacia do Paraná. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF_RIMAS/VOLUME14_Sistema_Aquifero_Bauru_Caiua_SP_PR_MS.pdf Acesso em: 23 de janeiro de 2020.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geodiversidade de Mato Grosso do Sul (1:1.000.000). Campo Grande, 2009. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/> Acesso em: 15/03/ 2019.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Mato Grosso do Sul (Texto Explicativo). Campo Grande, 2006a.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado do Mato Grosso do Sul (1:1.000.000). Campo Grande, 2006b.

COSTA FAF, et al. Avaliação do potencial de produtividade hídrica de poços na bacia do rio Verde Grande/MG. Anais... Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2018:1-4.

DA SILVA ASA. Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional. Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada. Tese de Doutorado em Biometria e Estatística, 2015:121p.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. 2016. ArcGIS Desktop Help 10.5 Geostatistical Analyst

FELIPPE MF, MAGALHÃES JÚNIOR AP. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. Revista Geografias. 2013:9;70–81.

FERNANDES, L. A. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema: os grupos Bauru e Caiuá.1992. Dissertação de Mestrado – IG/USP, São Paulo.

FERNANDES, L.A., COIMBRA, A.M. O Grupo Caiuá: revisão estratigráfica e contexto deposicional. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SBG, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FOSTER, S; HIRATA, R; GOMES, D; D'ELIA, M; PARIS, M. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo, Servemar. 2006.

GASTMANS, D.; CHANG, H.K. & HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features, v. 25, p. 16-33, 2010.

GODOY, L.P.; CONCEIÇÃO, F.T. & GODOY, A.M. Aspectos geológicos da região do polo turístico das águas termais de São Lourenço, MT. Geociências, v. 35, n. 1, p. 110-125, 2016.

GOMES, .F.E.M. Geoprocessamento em ambiente SIG aplicado a hidrogeologia. In: FEITOSA FAC (org.), Hidrologia: Conceitos e Aplicações, 3ed. rev e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABID, 2008:293-319.

HERNANDEZ, P.G.L. Definição de áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no estado do Paraná. Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná. 122 p.

HORN, B.K.P. Hill shading and the relectance map. Proceedings of the IEEE, v. 69, p.14-47, 1981.

JACQUES, J. M. A tectonostratigraphic synthesis of the Sub-Andean basins: Inferences on the position of South American intraplate accommodation zones and their control on South Atlantic opening. Journal of the Geological Society, v. 160, n. 5, p. 703–717, 2003.

KRÜGER, M.M.; KRÜGER, C.M.; PACHECO, R.P. & SILVA, M.C.S. da. Estimativa de potencial hídrico subterrâneo na região norte do Estado do Paraná. In: Capítulo 4. SILVA, H.C.da (Org.). Engenharia Ambiental e Sanitária: Interfaces do Conhecimento 2. p. 37-50.

KUME, I.J.A.; BOLOGNA, M.de.S. & ASSUMPÇÃO, M. Constraints from magnetotelluric on the geological structure across a seismic area associated with water wells in the Paraná basin, Brazil. Brazilian Journal of Geology, v. 49, n. 4, p. 1-10, 2019.

LUIZ, T.B.P.; SCHRÖDER, T. & SILVA, J.L.S.da. Previsão de Níveis Estáticos de Água Subterrânea em Poço de Monitoramento Utilizando Metodologia Estocástica. Anuário de Geociências, v. 40, n. 2, p. 53-60. 2017.

MILANI EJ. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MIOTO CL et al. Neotectonics as a structural control of the boundaries of the pantanal matogrossense sub-regions. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, p. 1–12, 2019.

OLIVEIRA, BS de. 2018. Modelo de suscetibilidade a erosão linear em pastagem baseado em índices de sensoriamento remoto. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 37p.

OLIVEIRA APG. et al. The expression of neotectonics in the Pantanal da Nhecolândia, State of Mato Grosso do Sul - Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, n. 2, p. 1293–1308, 2018.

PINHEIRO MR, CIANFARRA P, VILLLELA FNJ, et al. 2019. Tectonics of the Northeastern border of the Parana Basin (Southeastern Brazil) revealed by lineament domain analysis. *Journal of South American Earth Sciences*. 2019:94:1-15.

PINHEIRO, R.J.B.; RAUBER, A.C.C.; NUMMER, A.V. & SILVA, J.L.S. Aplicação dos métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS. v, 12, n. 2, p. 61-79, 2015.

PINTO ML, VIDOTTI RM. Tectonic framework of the Paraná basin unveiled from gravity and magnetic data. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 90, p. 216–232, 2019.

POTT VJ, POTT A, MOREIRA SN. Vegetação da Unidade de Planejamento e Gerenciamento da Bacia do Rio Sucuriú. *Revista GeoPantanal*. UFMS/AGB. Corumbá/MS. 2014:16;221-233.

QGIS Development Team. 2017. QGIS Geographic Information System versão 2.18. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>> . Acessado em: 17/03/2018.

RIGHI E, BASSO, L.A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. *Ambiência*. v. 12; p. 101-107, 2016.

SANO EE, SANTOS EM, MENESES, PP. Análise de imagens do satélite ALOS PALSAR para o mapeamento de uso e cobertura da Terra do Distrito Federal. *Geociências*. v. 28 p. 441-451. 2009.

SEPLAN, Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral. Projeto Estudos Integrados do Potencial de Recursos Naturais – Solos (1:1.000.000). Campo Grande, 1988.

SIAGAS, Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 21/07/2019.

SICAR, Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural Disponível em: <http://www.car.gov.br/publico/municipios/downloads?sigla=MS> Acesso em: 19/06/2019

SGB, Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php> Acesso em: 23/07/2020.

TEODORO PE, et al. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Mato Grosso do Sul State, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 128;p. 197-209. 2016.

THIESSEN AH. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, v. 39, n.7, p. 1082-1089, 1911.

TONDO, R.; DEBONI.; H.L.; GEDOZ, S.C. Água mineral termal em poço tubular profundo na Bacia do Paraná, Pinto Bandeira-RS. *Anais... XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.*:v. 54; p.1–16, 2016.

UECHI, D.A.; GABAS, S.G. & LASTORIA, G. Análise de metais pesados no Sistema Aquífero Bauru em Mato Grosso do Sul. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 1, p. 155-167, 2017.

USGS, United States Geological Survey - EarthExplorer. Washington, DC, 2020. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em: 06/03/2018.

VAN DER MEER F.D, VAN DER WERFF H.M.A.; VAN RUITENBEEK F.J.A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, :v. 148, p.124–133, 2014.

VIEIRA, F.P.; HANZA, V.M.; ALEXANDRINO, C.H. Obliteration of termal spring by gorundwater flows in sedimentar basins of Brazil. *Hydrogeology Journal*. v. 22, p. 69-86, 2014.

VOLKMER, SAJ. (2020). Selective Enhancement based on Indices. *Git Hub Repository*. Porto Alegre. Recuperado de https://github.com/smaphs/sel_enh_index/blob/master/script.js

CONCLUSÃO GERAL

A integração de métodos de geoprocessamento, sensoriamento remoto e geoestatística se mostrou eficaz, sobretudo, no aprimoramento de modelos ambientais, refinando mapas preliminares em escalas pequenas, auxiliando na estimativa de processos pontuais (ex: cavidades naturais, nascentes) e na seleção de variáveis preditivas que efetivamente apresentam casualidade com a variável resposta.

Os estudos de revisão bibliométrica foram fundamentais para verificar o estado da arte sobre os temas de planejamento urbano usando geotecnologias e também sobre as cavidades naturais do Mato Grosso do Sul.

Os recursos hídricos superficiais e subterrâneos foram abordados de forma holística, considerando tanto as variáveis do meio físico, quanto os impactos induzidos pelas mudanças de uso e cobertura do solo. Foi possível aplicar métodos já disponíveis na literatura especializada, adaptando e aprimorando-os para se chegar a um diagnóstico mais coerente e atualizado.

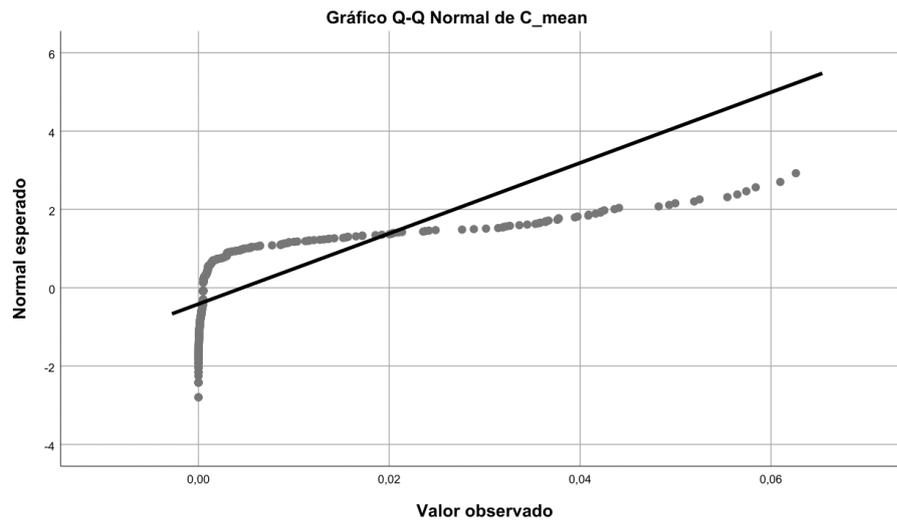
Os métodos aqui abordados demonstram a necessidade de integração de um vasto banco de dados geográficos consistente para viabilizar a elaboração de análises e diagnósticos, os quais pela qualidade, confiabilidade e acessibilidade trouxeram economia de tempo e dinheiro na execução dos estudos. A utilização de sistemas de informações geográficas de código livre e aberto também contribui para a replicação destes estudos. Os resultados destas pesquisas poderão ser aproveitados para a realização de outras pesquisas de cunho ambiental, sobretudo aquelas que tratam de recursos hídricos.

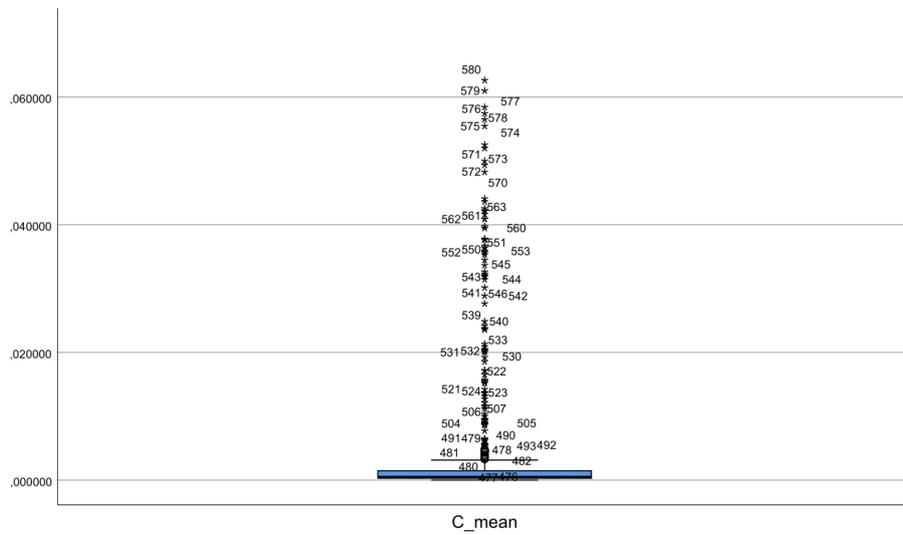
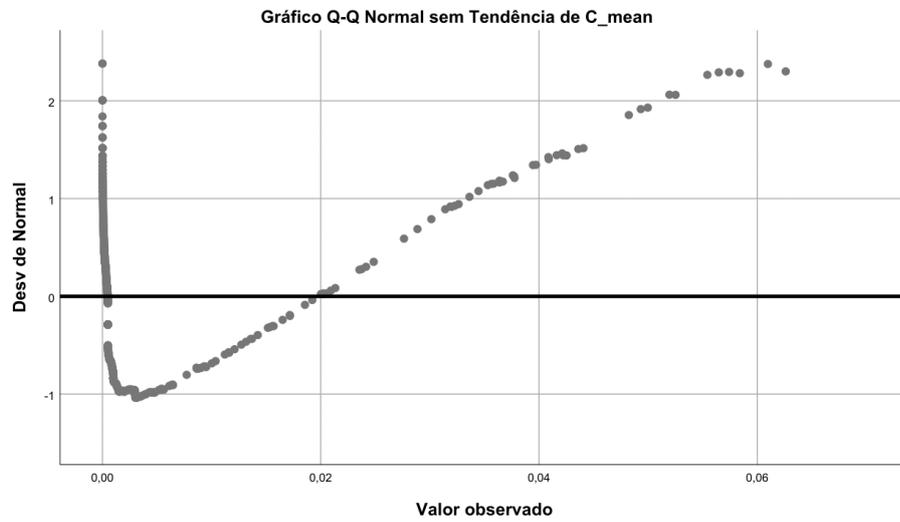
APÊNDICES

4.00 2 . 67
15.00 2 . 9999999&
3.00 3 . 0&
105.00 Extremos (>=.0033)

Largura do ramo: .001000
Cada folha: 2 caso(s)

& denotes fractional leaves.





APÊNDICE B – Teste de normalidade para número de cavidades por área com transformada logarítmica.

Descritivos

		Estatística	Erro Erro	
Log_C_mean	Média	-3,19036293	,037105455	
	95% Intervalo de Confiança para Média	Limite inferior	-3,26324063	
		Limite superior	-3,11748523	
	5% da média aparada	-3,17747295		
	Mediana	-3,30277066		
	Variância	,799		
	Erro Desvio	,893617703		
	Mínimo	-6,000000		
	Máximo	-1,203349		
	Intervalo	4,796651		
	Amplitude interquartil	,697663		
	Assimetria	-,041	,101	
	Curtose	,610	,203	

Testes de Normalidade

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estatística	df	Sig.	Estatística	df	Sig.
Log_C_mean	,122	580	,000	,952	580	,000

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Log_C_mean

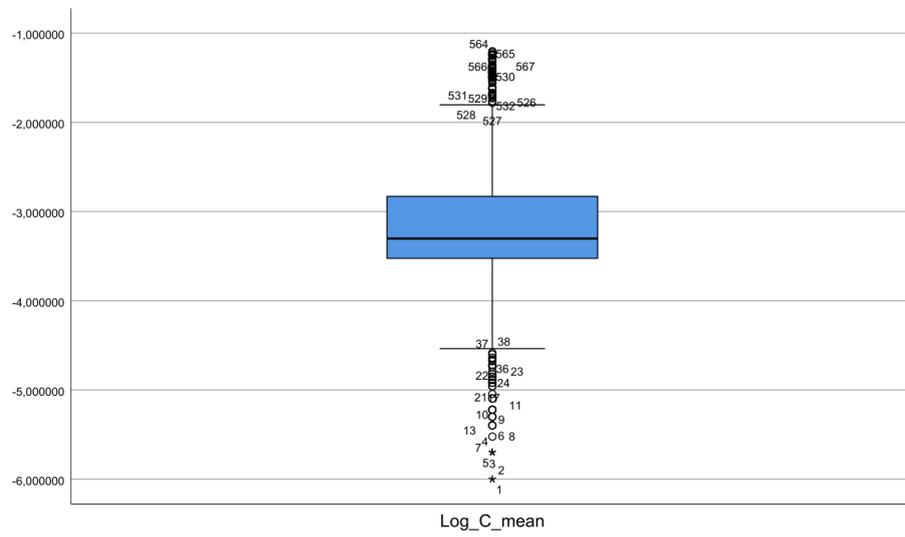
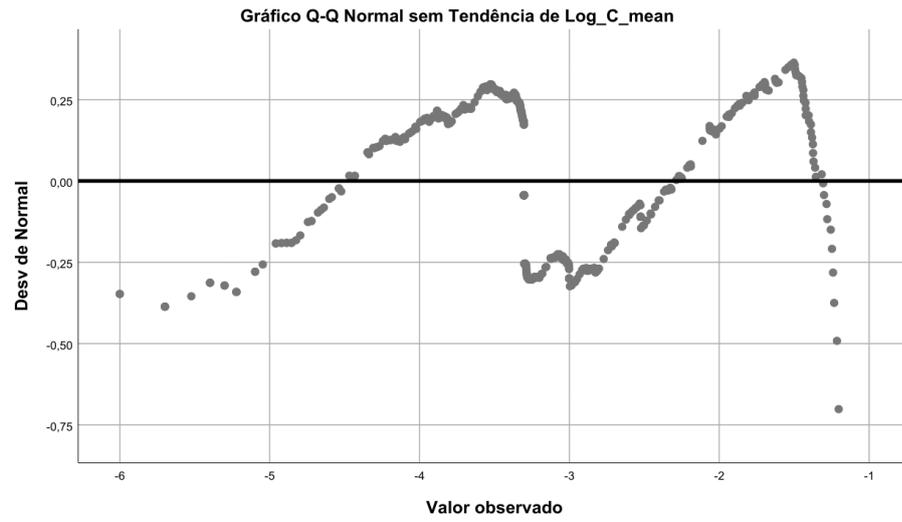
Log_C_mean Gráfico de Ramos e Folhas

Frequência Raiz & Folha

```

38.00 Extremes (=<-4.6)
9.00  -4 . 4455
13.00  -4 . 222233
20.00  -4 . 0000111111
32.00  -3 . 888888888899999
23.00  -3 . 6666677777
46.00  -3 . 4444444444444445555555

```

APÊNDICE C – Verificação da normalidade dos resíduos da regressão linear simples por histograma e gráfico Q-Q Plot para os previsores de cavidades. E gráfico dos resíduos padronizados para verificação da homocedasticidade. Ordem: CxHC, CxLC e CxHL.

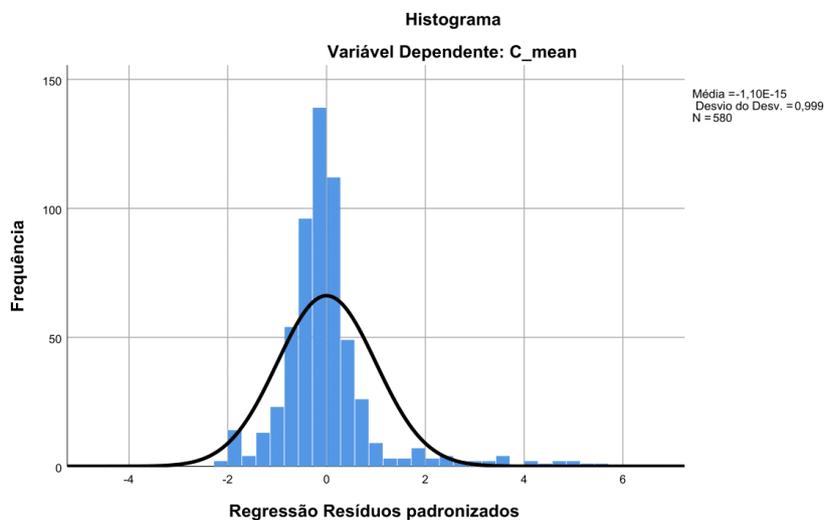


Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

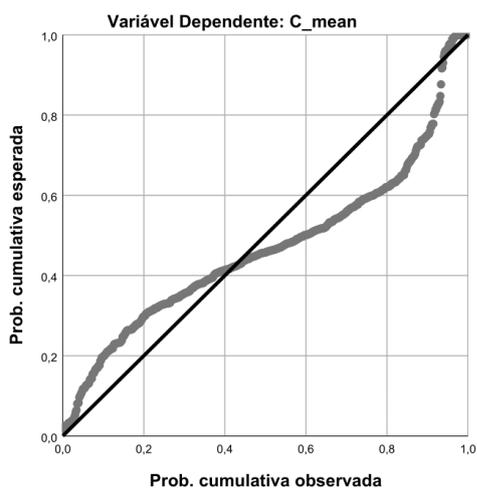
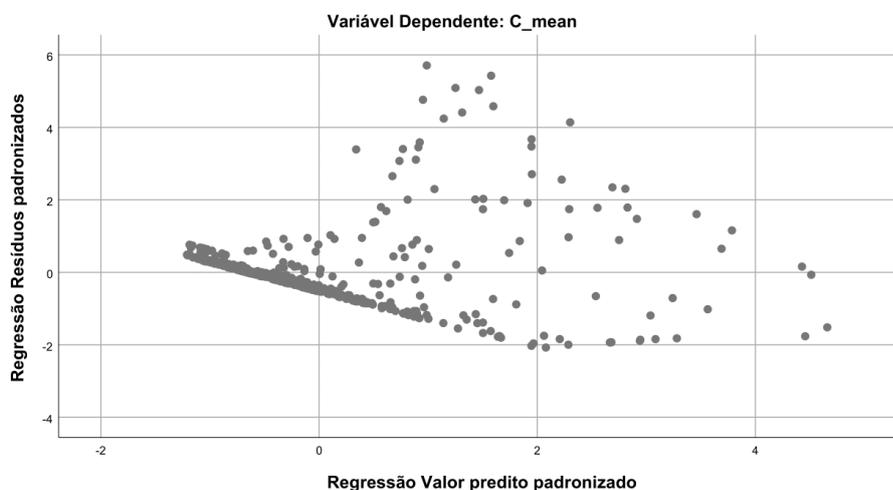


Gráfico de dispersão



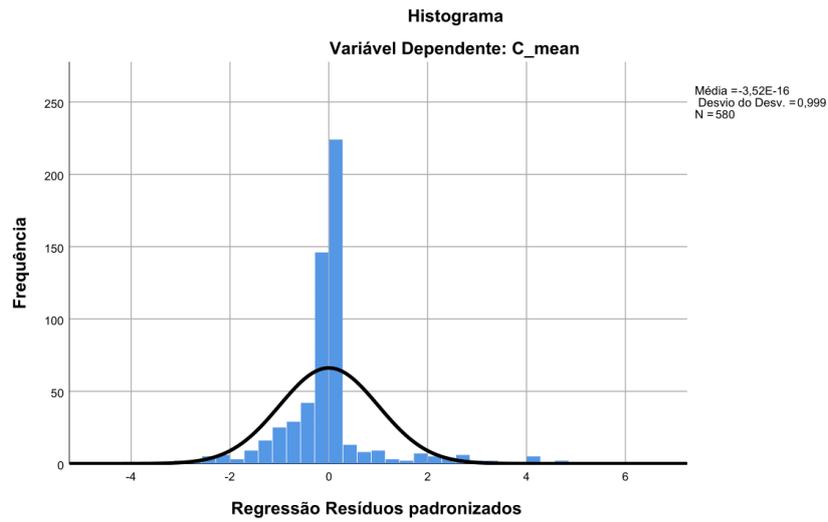


Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

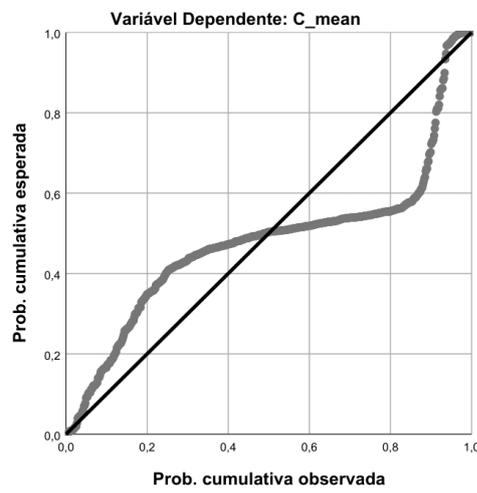
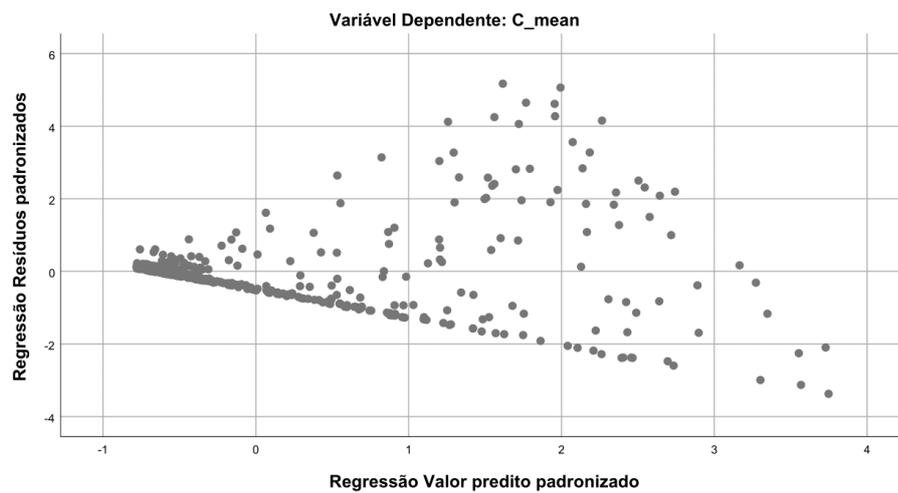


Gráfico de dispersão



Gráficos

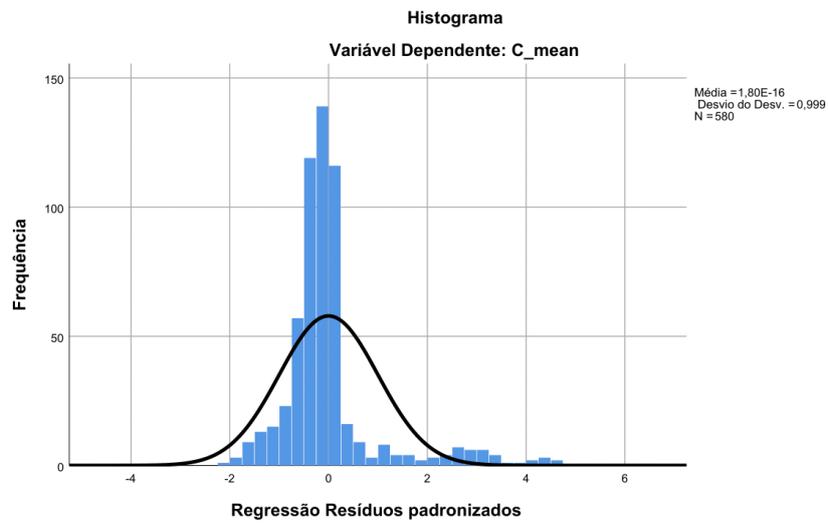


Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

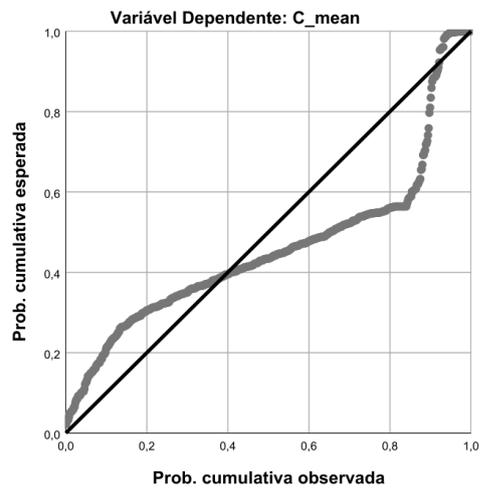
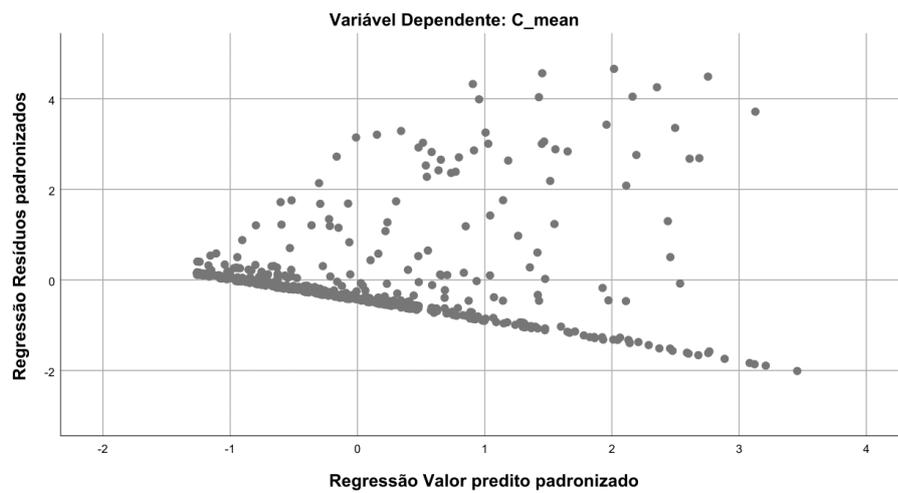


Gráfico de dispersão



APÊNDICE D – Verificação da normalidade dos resíduos da regressão linear múltipla por histograma e gráfico Q-Q Plot para os previsores de cavidade combinados entre si (HC, LC, HL).

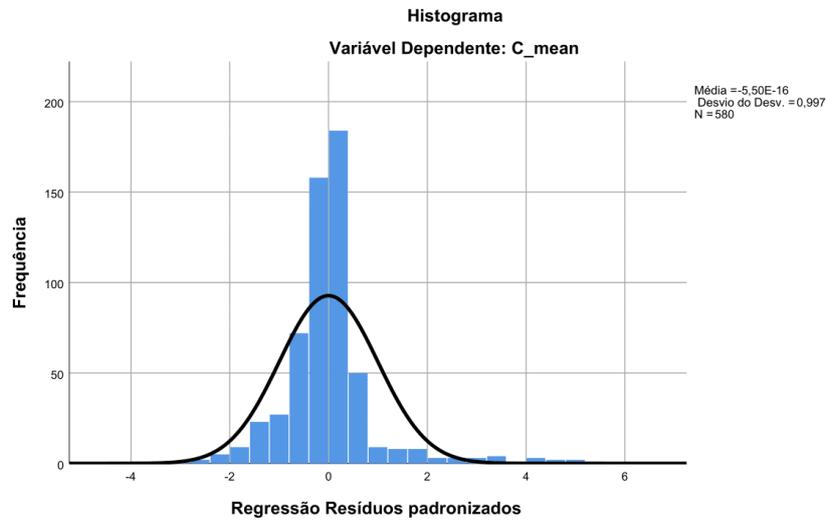


Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

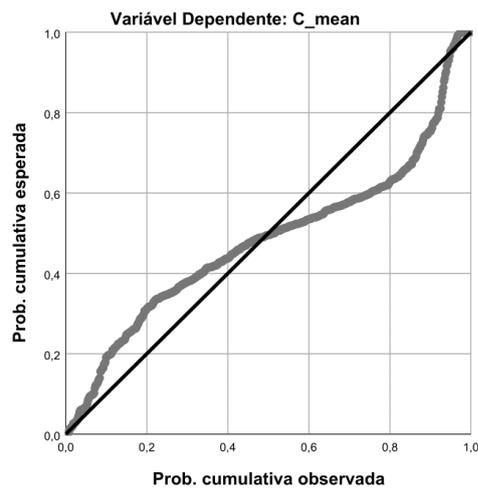
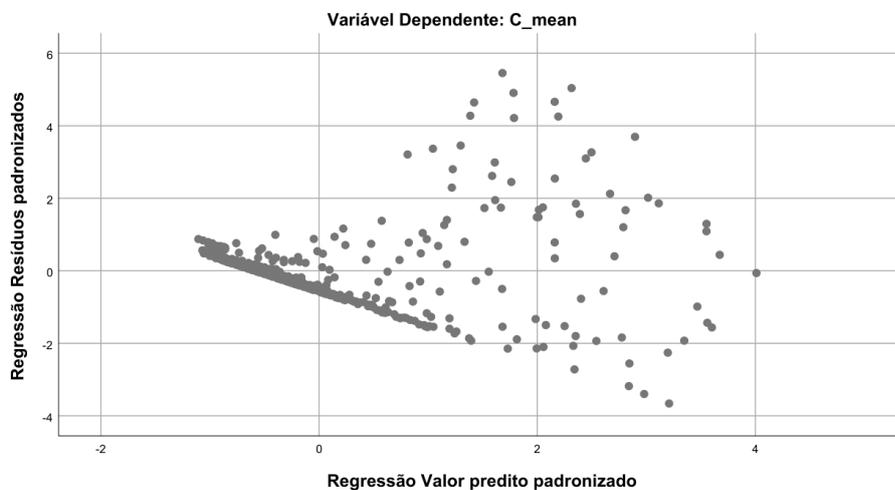


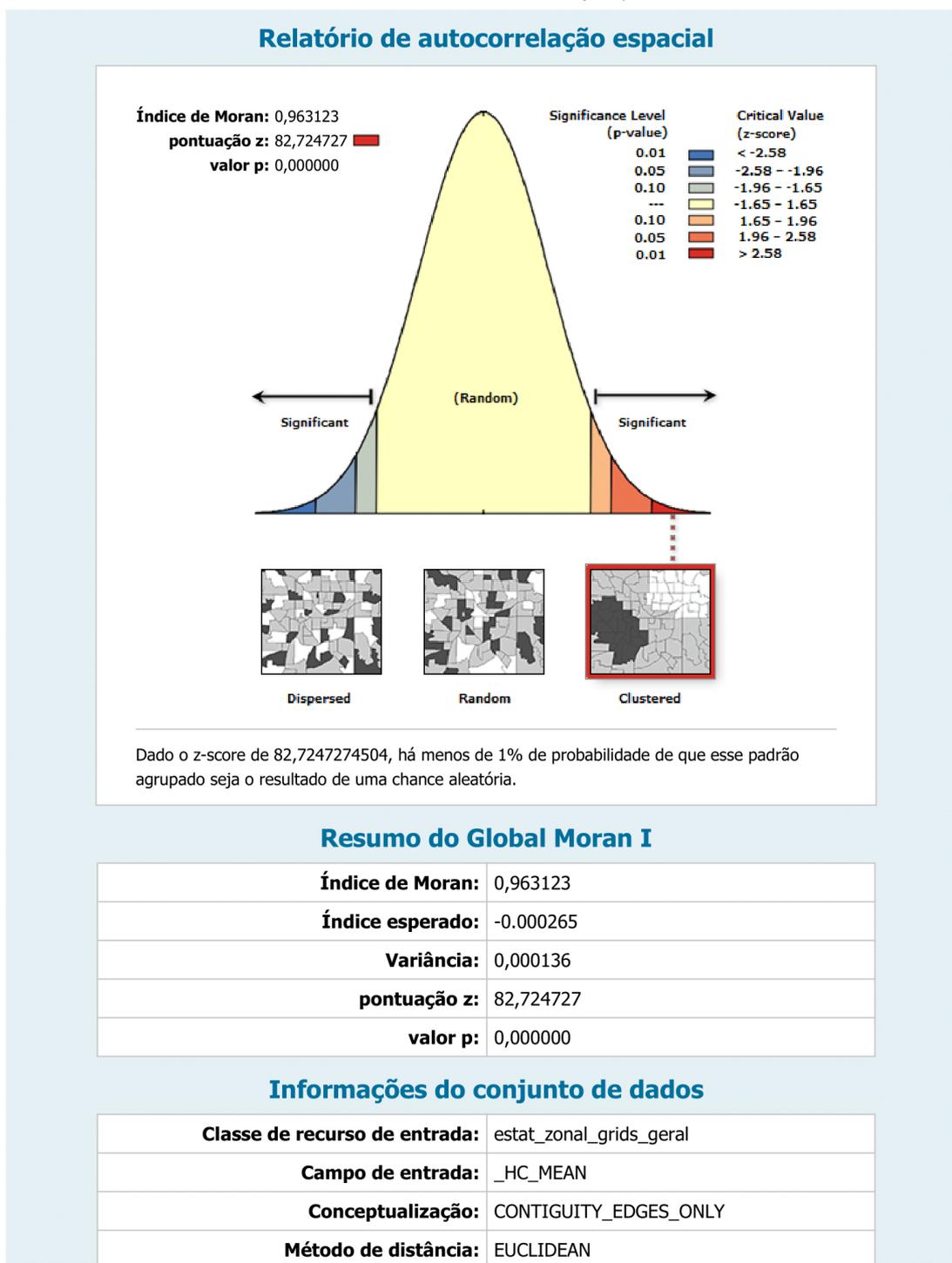
Gráfico de dispersão



APÊNDICE E – Resumo estatístico do índice de Moran (relatório e gráfico de dispersão em relação aos eixos de autocorrelação espacial). Ordem: CxHC, CxLC e CxHL.

21/12/2020

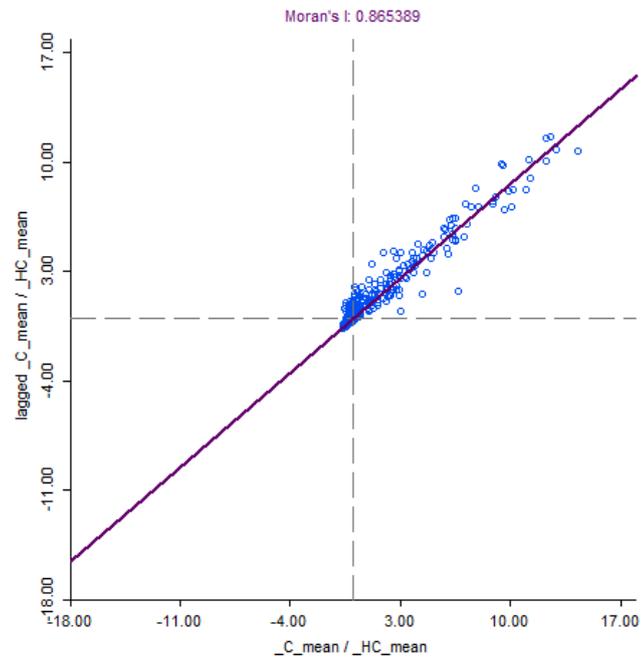
Relatório de autocorrelação espacial



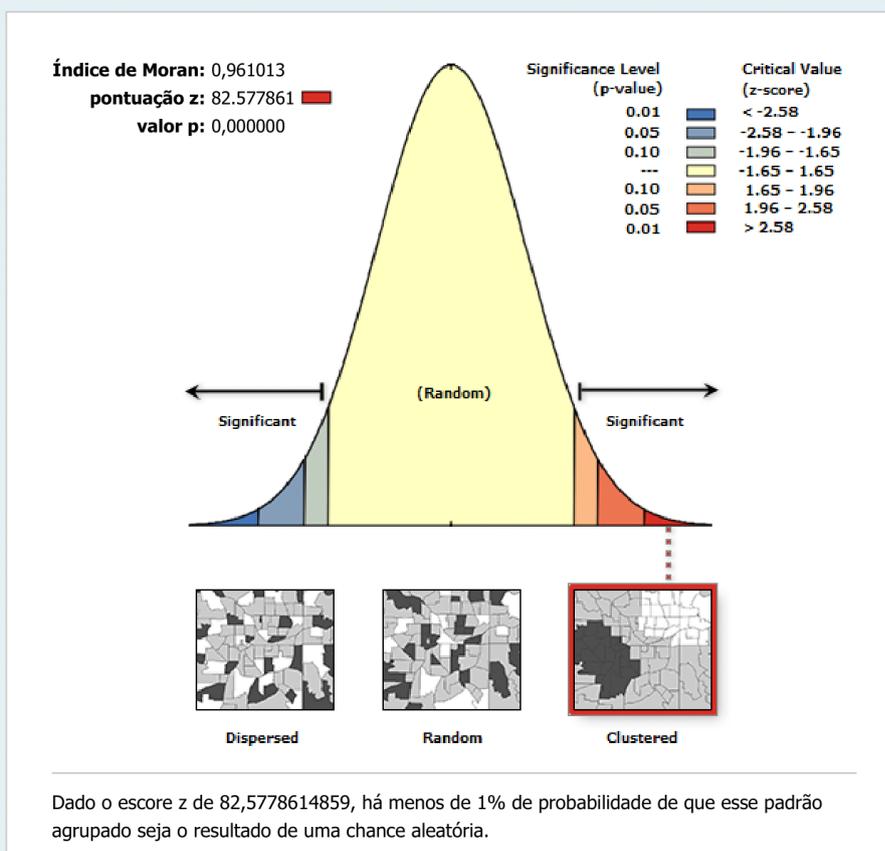
21/12/2020

Relatório de autocorrelação espacial

Padronização de linha:	Falso
Limiar de distância:	Nenhum
Arquivo de matriz de pesos:	Nenhum
Conjunto de seleção:	Falso



Relatório de autocorrelação espacial



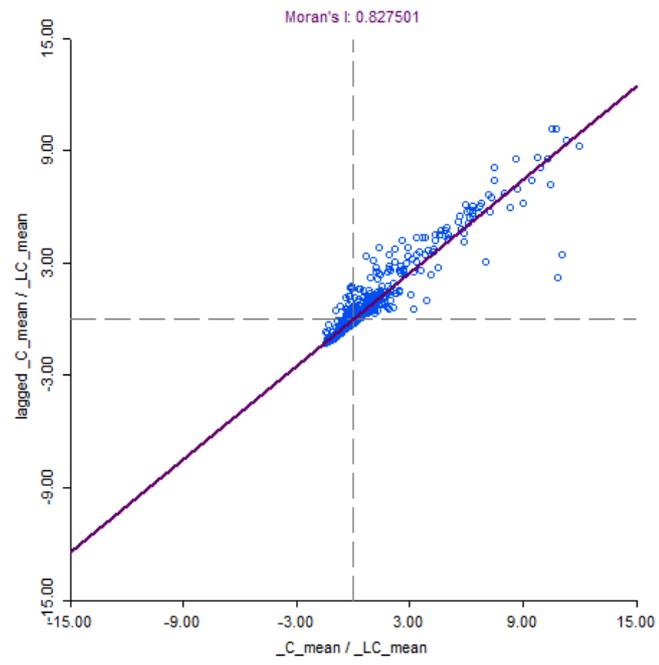
Resumo do Global Moran I

Índice de Moran:	0,961013
Índice esperado:	-0.000265
Variância:	0,000136
pontuação z:	82.577861
valor p:	0,000000

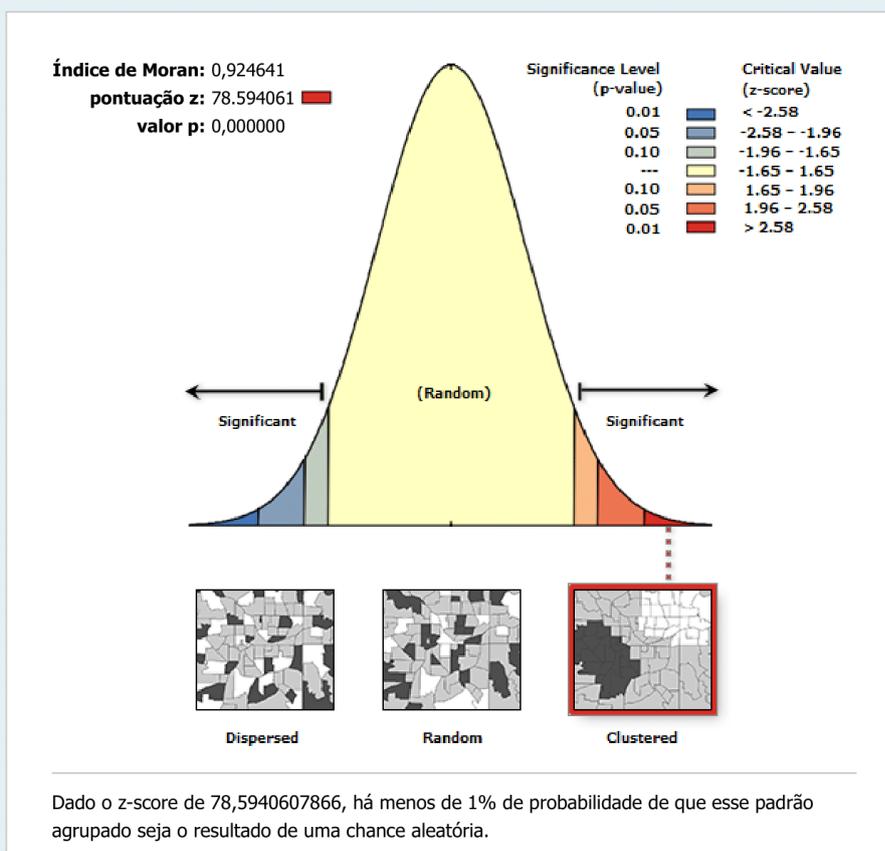
Informações do conjunto de dados

Classe de recurso de entrada:	estat_zonal_grids_geral
Campo de entrada:	_LC_MEAN
Conceptualização:	CONTIGUITY_EDGES_ONLY
Método de distância:	EUCLIDEAN

Padronização de linha:	Falso
Limiar de distância:	Nenhum
Arquivo de matriz de pesos:	Nenhum
Conjunto de seleção:	Falso



Relatório de autocorrelação espacial



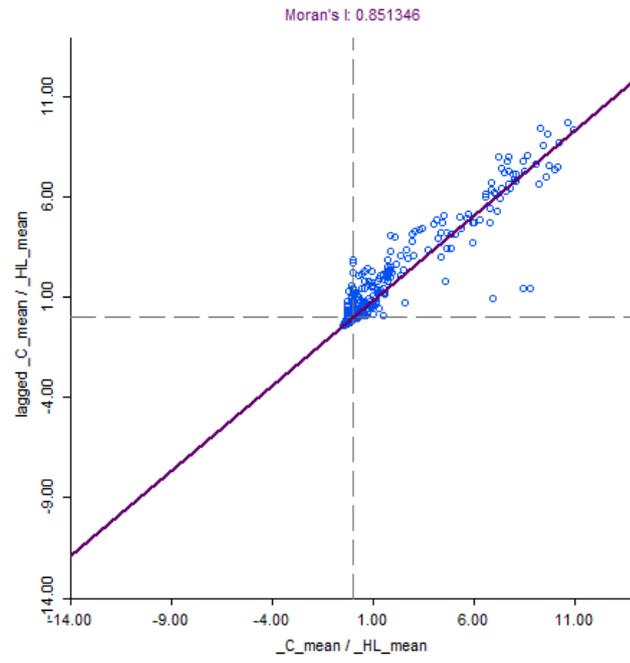
Resumo do Global Moran I

Índice de Moran:	0,924641
Índice esperado:	-0.000265
Variância:	0,000138
pontuação z:	78.594061
valor p:	0,000000

Informações do conjunto de dados

Classe de recurso de entrada:	estat_zonal_grids_geral
Campo de entrada:	_HL_MEAN
Conceptualização:	INVERSE_DISTANCE
Método de distância:	EUCLIDEAN

Padronização de linha:	Falso
Limiar de distância:	10001,0000 metros
Arquivo de matriz de pesos:	Nenhum
Conjunto de seleção:	Falso



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE F – Resumo estatístico da regressão linear múltipla para estimar o nível estático a partir do MEPHS, carga hidráulica dos poços e nível d'água interpolada pelo método Spline.

Estadística Descritiva

	Média	Erro Desvio	N
NE	85,7425	1,86437	4
Z	641,25	47,542	4
mphs_pocos	4,9125	,18875	4

Correlações

		NE	Z	mphs_pocos
Correlação de Pearson	NE	1,000	,314	,056
	Z	,314	1,000	-,708
	mphs_pocos	,056	-,708	1,000
Sig. (1 extremidade)	NE	.	,343	,472
	Z	,343	.	,146
	mphs_pocos	,472	,146	.
N	NE	4	4	4
	Z	4	4	4
	mphs_pocos	4	4	4

Variáveis Inseridas/Removidas^a

Modelo	Variáveis inseridas	Variáveis removidas	Método
1	Z ^b	.	Inserir
2	mphs_pocos ^b	.	Inserir

a. Variável Dependente: NE

b. Todas as variáveis solicitadas inseridas.

Resumo do modelo^c

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatísticas de mudança	
					Mudança de R quadrado	Mudança F
1	,314 ^a	,099	-,352	2,16755	,099	,219
2	,504 ^b	,254	-1,237	2,78837	,156	,209

Resumo do modelo^c

Modelo	Estatísticas de mudança			Durbin-Watson
	df1	df2	Sig. Mudança F	
1	1	2	,686	
2	1	1	,727	2,675

- a. Preditores: (Constante), Z
 b. Preditores: (Constante), Z, mphs_pocos
 c. Variável Dependente: NE

ANOVA^a

Modelo		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	Regressão	1,031	1	1,031	,219	,686 ^b
	Resíduo	9,397	2	4,698		
	Total	10,428	3			
2	Regressão	2,653	2	1,326	,171	,863 ^c
	Resíduo	7,775	1	7,775		
	Total	10,428	3			

- a. Variável Dependente: NE
 b. Preditores: (Constante), Z
 c. Preditores: (Constante), Z, mphs_pocos

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients não padronizados		Coefficients padronizados	t	Sig.
		B	Erro Erro	Beta		
1	(Constante)	77,835	16,914		4,602	,044
	Z	,012	,026	,314	,468	,686
2	(Constante)	40,791	83,984		,486	,712
	Z	,028	,048	,710	,581	,665
	mphs_pocos	5,516	12,079	,558	,457	,727

Coefficientes^a

Modelo		Estatísticas de colinearidade	
		Tolerância	VIF
1	(Constante)		
	Z	1,000	1,000
2	(Constante)		
	Z	,499	2,006
	mphs_pocos	,499	2,006

- a. Variável Dependente: NE

Variáveis excluídas^a

Modelo	Beta In	t	Sig.	Correlação parcial	Estatísticas de ...		
					Tolerância	VIF	
1	mphs_pocos	,558 ^b	,457	,727	,415	,499	2,006

Variáveis excluídas^a

Modelo	Estatísticas de ...	
	Tolerância mínima	
1	mphs_pocos	,499

a. Variável Dependente: NE

b. Preditores no Modelo: (Constante), Z

Diagnóstico de colinearidade^a

Modelo	Dimensão	Autovalor	Índice de condição	Proporções de variância		
				(Constante)	Z	mphs_pocos
1	1	1,998	1,000	,00	,00	
	2	,002	31,181	1,00	1,00	
2	1	2,996	1,000	,00	,00	,00
	2	,004	26,374	,00	,29	,05
	3	,000	130,649	1,00	,71	,95

a. Variável Dependente: NE

Estatísticas de resíduos^a

	Mínimo	Máximo	Média	Erro Desvio	N
Valor previsto	84,9123	86,6003	85,7425	,94033	4
Resíduo	-1,89233	1,95468	,00000	1,60986	4
Erro Valor previsto	-,883	,912	,000	1,000	4
Erro Resíduo	-,679	,701	,000	,577	4

a. Variável Dependente: NE

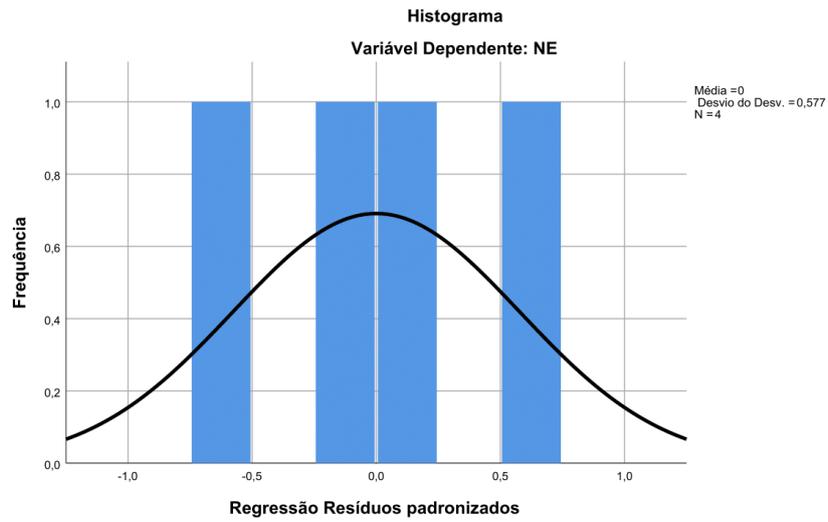


Gráfico P-P Normal de Regressão Resíduos padronizados

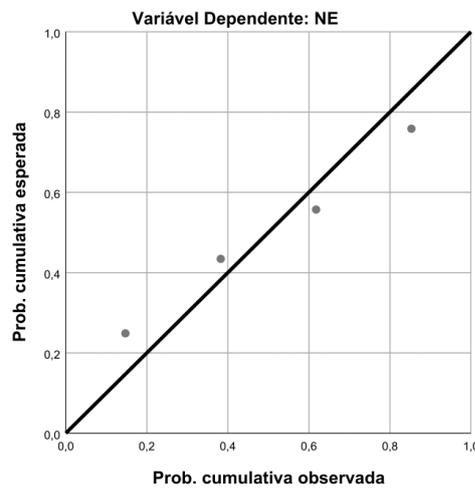
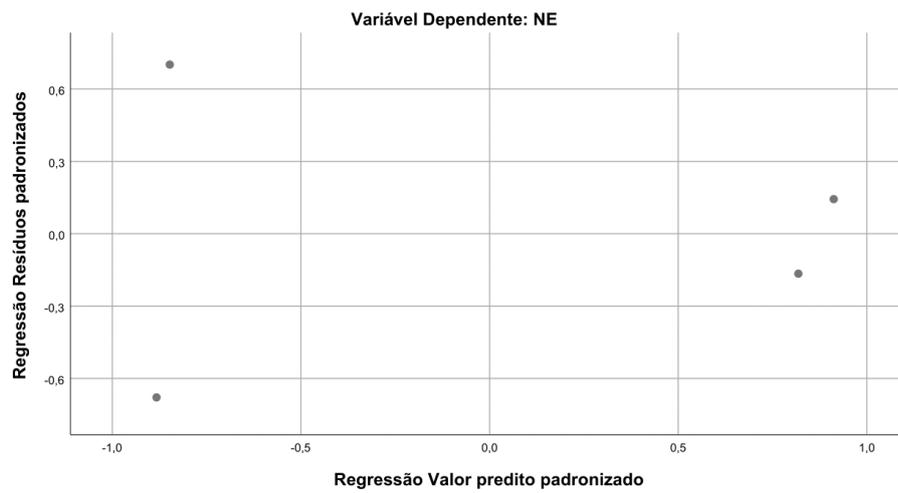


Gráfico de dispersão



Estatística Descritiva

	Média	Erro Desvio	N
NE	85,7425	1,86437	4
Z	641,25	47,542	4
CARGA_hidr	555,5075	46,98916	4
Spl	607,6542825	39,28701780	4

Correlações

		NE	Z	CARGA_hidr	Spl
Correlação de Pearson	NE	1,000	,314	,278	-,033
	Z	,314	1,000	,999	,938
	CARGA_hidr	,278	,999	1,000	,950
	Spl	-,033	,938	,950	1,000
Sig. (1 extremidade)	NE	.	,343	,361	,483
	Z	,343	.	,000	,031
	CARGA_hidr	,361	,000	.	,025
	Spl	,483	,031	,025	.
N	NE	4	4	4	4
	Z	4	4	4	4
	CARGA_hidr	4	4	4	4
	Spl	4	4	4	4

Variáveis Inseridas/Removidas^a

Modelo	Variáveis inseridas	Variáveis removidas	Método
1	Z ^b	.	Inserir
2	CARGA_hidr ^b	.	Inserir

a. Variável Dependente: NE

b. Todas as variáveis solicitadas inseridas.

Resumo do modelo^c

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatísticas de mudança	
					Mudança de R quadrado	Mudança F
1	,314 ^a	,099	-,352	2,16755	,099	,219
2	1,000 ^b	1,000	1,000	,00000	,901	.

Resumo do modelo^c

Modelo	Estatísticas de mudança			Durbin-Watson
	df1	df2	Sig. Mudança F	
1	1	2	,686	
2	1	1	.	1,679

a. Preditores: (Constante), Z

b. Preditores: (Constante), Z, CARGA_hidr

c. Variável Dependente: NE

ANOVA^a

Modelo		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	Regressão	1,031	1	1,031	,219	,686 ^b
	Resíduo	9,397	2	4,698		
	Total	10,428	3			
2	Regressão	10,428	2	5,214	.	. ^c
	Resíduo	,000	1	,000		
	Total	10,428	3			

a. Variável Dependente: NE

b. Preditores: (Constante), Z

c. Preditores: (Constante), Z, CARGA_hidr

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients não padronizados		Coefficients padronizados	t	Sig.
		B	Erro Erro	Beta		
1	(Constante)	77,835	16,914		4,602	,044
	Z	,012	,026	,314	,468	,686
2	(Constante)	-4,661E-12	,000		.	.
	Z	1,000	,000	25,500	.	.
	CARGA_hidr	-1,000	,000	-25,204	.	.

Coefficientes^a

Modelo		Estatísticas de colinearidade	
		Tolerância	VIF
1	(Constante)		
	Z	1,000	1,000
2	(Constante)		
	Z	,001	704,934
	CARGA_hidr	,001	704,934

a. Variável Dependente: NE

Variáveis excluídas^a

Modelo		Beta In	t	Sig.	Correlação parcial	Estatísticas de ...	
						Tolerância	VIF
1	CARGA_hidr	-25,204 ^b	.	.	-1,000	,001	704,934
	Spl	-2,736 ^b	-18,933	,034	-,999	,120	8,332
2	Spl	,000 ^c	.	.	.	,000	2994,953

Variáveis excluídas^a

Modelo		Estatísticas de ...
		Tolerância mínima
1	CARGA_hidr	,001
	Spl	,120
2	Spl	3,946E-6

a. Variável Dependente: NE

b. Preditores no Modelo: (Constante), Z

c. Preditores no Modelo: (Constante), Z, CARGA_hidr

Correlações de coeficiente^a

Modelo		Z	CARGA_hidr
1	Correlações	Z	1,000
	Covariâncias	Z	,001
2	Correlações	Z	-,999
		CARGA_hidr	-,999
	Covariâncias	Z	,000
		CARGA_hidr	,000

a. Variável Dependente: NE

Diagnóstico de colinearidade^a

Modelo	Dimensão	Autovalor	Índice de condição	Proporções de variância		
				(Constante)	Z	CARGA_hidr
1	1	1,998	1,000	,00	,00	
	2	,002	31,181	1,00	1,00	
2	1	2,997	1,000	,00	,00	,00
	2	,003	30,712	,07	,00	,00
	3	3,265E-6	958,047	,93	1,00	1,00

a. Variável Dependente: NE

Estatísticas de resíduos^a

	Mínimo	Máximo	Média	Erro Desvio	N
Valor previsto	83,0200	87,0000	85,7425	1,86437	4
Resíduo	,00000	,00000	,00000	,00000	4
Erro Valor previsto	-1,460	,674	,000	1,000	4
Erro Resíduo	0

a. Variável Dependente: NE

Fonte: Autoria própria.