

COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO INTEGRADO GUARANI/SERRA GERAL EM SANTA CATARINA EM BLOCOS GEOMORFOESTRUTURAIS COM USO DE GEOTECNOLOGIAS LIVRES

Leônidas Luiz Volcato Descovi Filho¹
Luiz Fernando Scheibe²
Arthur Schmidt Nanni³

Resumo: O presente artigo apresenta um estudo sobre a compartimentação de blocos tectônicos e hidrogeológicos através da interpretação de morfoestruturas em diferentes escalas, visando aprimorar o entendimento sobre a distribuição espacial dos recursos hídricos subterrâneos no Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG). A partir do uso de geotecnologias livres, pode-se definir ao menos 17 grandes blocos geomorfoestruturais que compartimentam o SAIG/SG. Os resultados demonstram que a metodologia para a definição dos blocos geomorfoestruturais, viabiliza e democratiza o conhecimento de pesquisas em gestão de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Morfoestruturas. Geotecnologias livres. SAIG/SG. Blocos geomorfoestruturais. Águas subterrâneas.

COMPARTIMENTATION OF GUARANI/SERRA GERAL INTEGRATED AQUIFER SYSTEM IN SANTA CATARINA IN GEOMORPHOSTRUCTURAL BLOCKS EVALUATED BY USING FREE GEOTECHNOLOGIES

Abstract: This paper presents a study on the compartmentalization of tectonic and hydrogeological blocks through the interpretation of morphostructures at different scales, aiming to improve the understanding of the spatial distribution of underground water resources in the Guarani / Serra Geral Integrated Aquifer System (G/SGIAS). With the use of free geotechnologies, it is possible to define at least 17 large geomorphostructural blocks that compartmentalize the G/SGIAS. The results demonstrate that the methodology for the definition of the geomorphostructural blocks, enables and democratizes the knowledge of researches in groundwater management.

Keywords: Morphostructures. Free geotechnologies. G/SGIAS. Geomorphostructural blocks. Groundwater.

COMPARTIMENTACIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE ACUÍFEROS GUARANI / SERRA GERAL EN SANTA CATARINA EN BLOQUES GEOMORFOESTRUTURALES UTILIZANDO GEOTECNOLOGÍAS LIBRES

Resumen: Este artículo presenta un estudio sobre la compartimentación de los bloques tectónicos e hidrogeológicos a través de la interpretación de las morfoestructuras a diferentes escalas, con el objetivo de mejorar la comprensión de

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Santarém, Brasil, leonprs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9245-308X>

² Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Geociências, Florianópolis, Brasil, scheibe2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5275-9671>

³ : Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Educação do Campo, Florianópolis, Brasil, arthur.nanni@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3491-265X>

la distribución espacial de los recursos hídricos subterráneos en el Sistema Acuífero Integrado Guaraní / Serra Geral (SAIG / SG). A partir del uso de geotecnologías libres, es posible definir al menos 17 grandes bloques geomorfoestructurales que compartimentan el SAIG / SG. Los resultados demuestran que la metodología para la definición de los bloques geomorfoestructurales, permite y democratiza el conocimiento de las investigaciones en gestión de aguas subterráneas.

Palabras clave: Morfoestructuras. Geotecnologías libres. SAIG / SG. Bloques geomorfoestructurales. Agua subterránea.

Introdução

O presente artigo apresenta um estudo sobre a compartimentação do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG, proposto por Scheibe e Hirata em 2008, obtida através da aplicação de geotecnologias livres⁴, visando compreender a compartimentação tectônica e hidroestratigráfica através da interpretação de blocos geomorfoestruturais, em terrenos vulcânicos do Grupo Serra Geral e formações sedimentares subjacentes, todos pertencentes à Bacia Geológica do Paraná (BGP) no Estado de Santa Catarina, Brasil.

Com um arranjo espacial resultante de deslocamentos tectônicos verticais denominados blocos tectônicos hidrogeológicos, o SAIG/SG abrange as unidades hidroestratigráficas Formação Pirambóia, Formação Botucatu e Grupo Serra Geral, que por estarem deslocadas verticalmente (falhas normais), se conectam hidráulicamente formando um único e integrado sistema aquífero. A detecção e individualização desses blocos geomorfoestruturais foi viabilizada por meio da interpretação de feições geomorfológicas, que resultam da resposta dos movimentos tectônicos e dos ataques erosivos que modelam as paisagens, confirmadas através de seções geológicas ortogonais sobre os limites dos blocos (DESCOVI FILHO, 2015).

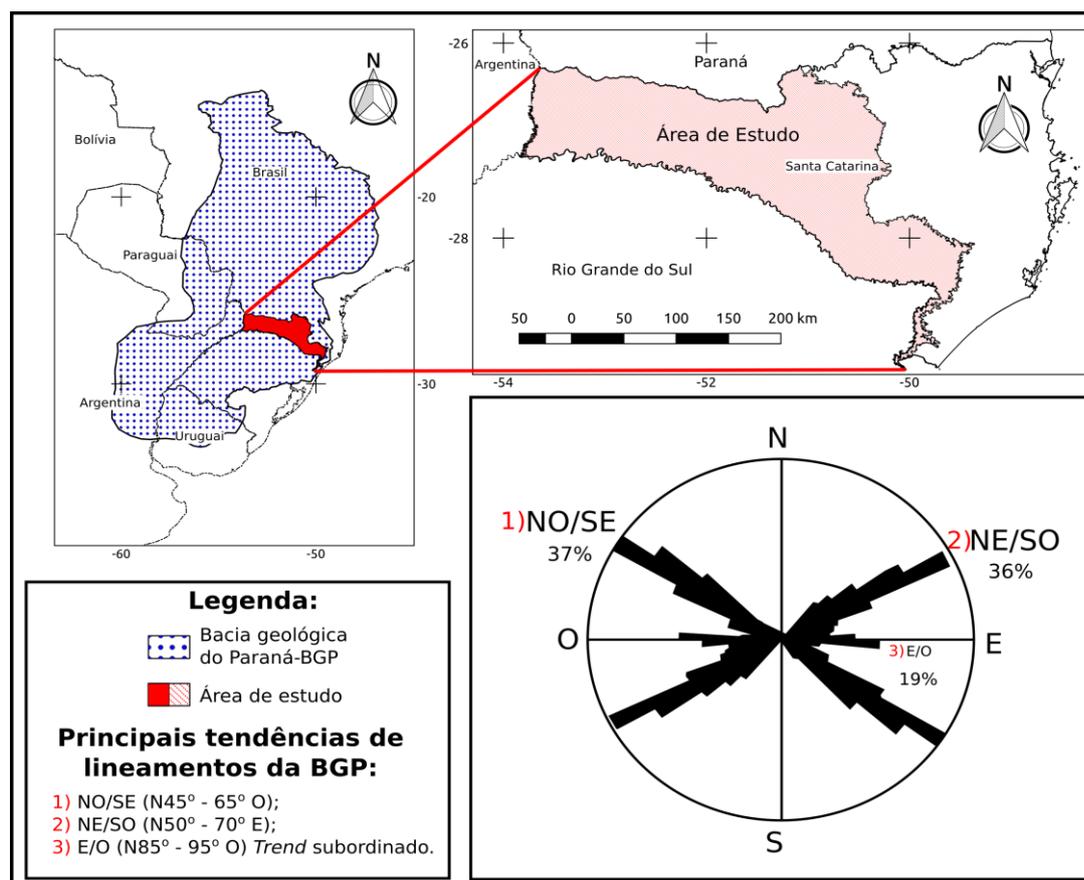
Em levantamentos realizados na BGP por Lisboa (1996), Machado (2005), Soares (2008), Nanni (2008), Descovi Filho (2015) e Amaral (2018), alinhamentos tectônicos são interpretados como delimitadores de áreas que apresentam características geomorfológicas distintas, sejam essas de ordem geológicas/estruturais, hidrogeológicas e/ou geomorfológicas, ou mesmo a partir de informações morfométricas.

⁴ Geotecnologias livres – Compreende uma ou mais tecnologias geoespaciais: cartografia digital, sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto, topografia digital e sistema global de navegação por satélite (GNSS), aplicadas sobre sistemas, plataformas e programas/software livres (ROSA, 2005).

Localização da área

A área de estudo está inserida na Bacia Geológica do Paraná, a qual apresenta lineamentos tectônicos com três direções preferenciais de acordo com Zalán *et al.* (1990): NO-SE (37%), NE-SO (36%) e E-O (19%), apresentadas no diagrama de rosetas (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo e diagrama de roseta das direções de lineamentos na BGP, obtido a partir de levantamentos aeromagnetométricos. Podem ser observados dois grupos de tendências principais e um terceiro subordinado.



Fonte: Modificado de Zalán *et al.* (1990, p.144).

Referencial teórico

O termo lineamento usado nesta pesquisa refere-se a feições geomorfológicas e tectônicas lineares. No entanto, este termo é abrangente e genérico, relacionando-se segundo Strieder e Amaro (1997) a estruturas tectônicas penetrativas (tipo 1) ou rúpteis (tipo 2). Os lineamentos do tipo 2 são os predominantes na bacia em estudo, e estão relacionados, via de regra, as drenagens retilíneas e vales encaixados, por sua vez associados a estruturas regionalmente penetrativas, que representam a erosão diferencial de feições estruturais coesivas, associadas ao tipo litológico (rochas ígneas) e que, também,

podem estar associadas a falhas do tipo normal, com ou sem rejeitos observáveis. As falhas normais podem estar relacionadas às forças distensivas responsáveis pelo rifteamento formador do Atlântico Sul (abertura do Supercontinente *Gondwana*).

Para a BGP, os principais lineamentos foram definidos por Zalán *et al.* (1990) através de levantamentos aeromagnetométricos. Alguns destes lineamentos perpassam a área de estudo no Estado de Santa Catarina. Neste estudo, observou-se duas direções principais de orientação dos lineamentos: 1) NO/SE com 37% e 2) NE/SO com 36% e uma terceira direção subsidiária 3) E/O com 19% dos lineamentos da Bacia, indicadas na figura 1.

Estudos desenvolvidos por Soares *et al.* (2007a e b, 2008), reforçam que o Sistema Aquífero Guarani, bem como os lineamentos reconhecidos, revelaram grandes blocos tectônicos que restringem o fluxo e formam células hidrogeológicas com distribuição espacial horizontal e vertical.

As três direções estruturais principais sobre a BGP são: NO, NE e E-O, sendo destas, duas mais antigas, as orientações NO e NE e uma mais nova, representada pelos lineamentos E-O (separação do *Gondwana*, ativos). (JACQUES *et al.*, 2010, p. 121).

Pesquisando estilos estruturais que contribuem decisivamente para a localização de acumulações econômicas de hidrocarbonetos, Artur e Soares (2002) definiram a ocorrência de estruturas tectônicas, relacionadas à presença de algumas feições estruturais ou feições geomórficas, com pelo menos quatro diferentes direções de lineamentos geomórficos coincidentes com as encontradas por Zalán *et al.* (1990). Elas são comparadas a seguir (A, B, C e D):

N50°±10°O direção dos enxames de diques de diabásio (coincidindo com NO de Zalán *et al.*, 1990);

N20°±10°O lineamentos sem diques (coincidindo com NO de Zalán *et al.*, 1990);

N35°±10°E direção de grandes estruturas do embasamento (coincidindo com NE de Zalán *et al.*, 1990);

N55°±10°E direção das grandes zonas de falhas do embasamento, frequentemente com pequenos diques na bacia (coincidindo com NE de Zalán *et al.*, 1990).

Através da definição de dois grandes alinhamentos (Arqueamento crustal representado pelo Arco de Rio Grande e o Cinturão Dom Feliciano), que apresentam continuidade sobre os sedimentos de cobertura da Bacia geológica do Paraná,

Lisboa (1996) estabeleceu três unidades morfotectônicas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: 1) Fachada Atlântica, 2) Abóbada Central e 3) Abóbada Oeste, além de oito unidades hidrogeológicas: ácidas aplainadas, ácidas dissecadas, básicas mamelonadas, básicas densamente dissecadas, básicas dissecadas, arenitos circundenudados, básicas aplainadas e básicas escarpadas, as quais representavam a distribuição espacial das variedades geomorfológicas e hidrogeológicas para a área de seu estudo, correlacionando-as a fim de estabelecer os controladores geológicos para compreensão da hidrogeoquímica das unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul.

Voltando na linha do tempo, recordamos a proposta do geólogo e geomorfólogo austro-hungaro Walther Penck (Influenciado pelo Ciclo da Erosão Davisiano), incorporada pelos russos Gerasimov e Mecerjakov na década de 1960, de divisão do relevo em categorias, a qual culminou no estabelecimento das unidades texturais, morfoestruturais e morfoesculturais, direcionando teórica e metodologicamente os estudos da geomorfologia (ROSS; MOROZ, 1997).

A importância das estruturas tem sido um tema recorrente em teorias clássicas acerca da evolução do relevo. Embora os modelos pioneiros tenham sido bastante detalhados e contenham informações implícitas e explícitas sobre a tectônica operando as estruturas em escalas diversas, era notável que a questão das morfoestruturas e o motor das mesmas (tectônica) não foram contemplados com maior relevância nos estudos geomorfológicos. O que se via era os autores que comumente trabalhavam com escalas maiores de processos e estudos das formas, terem dificuldade em aplicar seus trabalhos em escala regional ou continental, nas quais a tectônica seria muito mais relente (CORRÊA *et al.*, 2010).

Neste sentido, Descovi Filho (2015) realizou pesquisa que definiu a compartimentação do SAIG/SG em Santa Catarina com uso exclusivo de geotecnologias livres, as quais, mostraram-se viáveis no desempenho das tarefas em meio digital, de acesso democratizado e compatível com os diferentes sistemas computacionais. Buscou-se um entendimento sistêmico da estratigrafia, geologia estrutural, geomorfologia, hidrogeologia, SIG, fotogeologia e sensoriamento remoto, relacionando o relevo à sua gênese em estruturas tectônicas, através das seções geológicas e dos planos de informações: rede de drenagem, lineamentos morfológicos interpretados sobre camadas raster oriundas de Modelo Digital de Elevação/MDE, interpretadas em escalas regionais e semi-regionais 1:2.000.000 e 1:1.000.000.

Metodologia:

Foram preparados em SIG (QGIS, 2019a), um Sistema de Informação Geográfica livre, os planos de informações, a partir de imagens de satélite (Shutter Radar Topography Mission/SRTM) representando Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE) com resolução espacial de 90 x 90 metros de pixel.

A partir destas imagens de MDE foram geradas imagens da hipsometria, sombreado e declividade, as quais serviram de base para interpretações geomorfológicas, das quais foram definidas morfoestruturas gerais nas escalas 1:2.000.000 e 1:1.000.000.

As interpretações foram totalmente realizadas em geotecnologias livres, adotando-se como Sistema de Referência de Coordenadas/SRC EPSG⁵: WGS84⁶ no Sistema Universal Transversal de Mercator/UTM projetando o fuso 22 sul do equador e meridiano central, acrescidas as constantes 10.000 e 500 km, respectivamente.

Elaboração e interpretação dos produtos cartográficos

Os produtos cartográficos representados pelos Temas (Camadas ou plano de informações) hipsometria, sombreado, declividade e imagem combinada, foram elaborados e interpretados no Programa QGIS.

A (Tabela 1) apresenta as principais características destes produtos cartográficos (Arquitetura, Resolução/Escala/Limiar e Base/Fonte) organizados por tema.

Tabela 1 – Informações referentes às camadas temáticas ou planos de informações

Nº	Tema (Camada ou Plano de informação)	Arquitetura ⁷	Resolução /Escala/Limiar	Base/Fonte

⁵ EPSG (European Petroleum Survey Group) é uma coleção de definições de sistemas de referência de coordenadas e aplicação de transformações de coordenadas que podem ser globais, regionais, nacionais ou locais. Os parâmetros geodésicos EPSG são mantidos pela Associação Internacional de Produtores de Petróleo e Gás (IOGP) (EPSG, 2019).

⁶ O WGS 84 (World Geodetic System 1984) é um sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar qualquer ponto da Terra (sem necessitar outro de referência) por meio de três unidades dadas (x,y,z). (NIMA, 2020).

⁷ Arquitetura do dado, que no caso deste estudo poderá ser vetorial do tipo ponto, linha ou polígono e/ou raster/matricial formada por matriz de linhas e colunas, as quais constituem as células ou pixel – menor elemento da imagem);

1	Hipsometria	<i>Raster</i>	90m	MDE/SRTM ⁸
2	Sombreamento	<i>Raster</i>	90m	MDE/SRTM
3	Declividade	<i>Raster</i>	90m	MDE/SRTM
4	Imagem Combinada	<i>Raster</i>	90m	<i>Rasters</i> das linhas N ^{os} 1+ 2+ 3 (combinados ⁹)

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

Hipsometria

Como imagem *raster* da hipsometria foi utilizado o MDE puro. Nele as variações dos *pixels* do preto para o branco (passando pelos níveis de cinza), representam as variações de altitudes do terreno, respectivamente, menores e maiores.

A imagem de hipsometria da área de estudo variou desde ~ 171 metros no Município de Itapiranga até 1801 metros no Município de Urubici, apresentando amplitude altimétrica total de ~ 1630 metros. Esta imagem ressaltou especialmente as áreas altas e baixas altitudes.

Sombreamento

A imagem *raster* de relevo sombreado ou sombreamento, é elaborada a partir do MDE *raster* suportado pelo GDAL4 (QGIS, 2019a), de entrada, através do algoritmo que manipula a luz e a sombra a fim de proporcionar aparência tridimensional ao relevo.

Elaborou-se o sombreamento em três diferentes azimutes de iluminação (N0°, NO315° e NE45°), com elevação em ângulo de 30° iluminação “solar”, seguindo os *trends* observados no referencial teórico, permitindo ressaltar as principais feições

⁸ MDE/SRTM - Modelo Digital de Elevação (MDE), representado pelo dado raster de entrada contendo a elevação do terreno em relação ao nível médio dos mares. A missão SRTM representa o levantamento mais abrangente e disponibilizado gratuitamente na internet (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), dado geoespacial que compõe o ferramental das geotecnologias livres (dado de entrada em SIG) (SRTM, 2018);

⁹ Combinação de camadas raster (hipsometria, sombreamento e declividade), através da sobreposição de camadas com percentual (%) de transparência entre zero e cem.

do relevo, através da interpretação visual sobre as linhas de quebra e padrões evidenciados pela intercalação entre sombra e luz.

Declividade

Para geração da imagem *raster* de declividade, com uso do algoritmo declividade que calcula o ângulo de inclinação para cada célula em grau ou percentual (QGIS, 2019a), utilizou-se o complemento nativo GRASS¹⁰, um SIG robusto acoplado ao QGIS. O algoritmo utilizado para geração da declividade foi o *r.slope.aspect*, utilizando-se como camada *raster* de entrada o MDE SRTM, e a camada *raster* de saída ou a imagem final deste processamento geoespacial foi a declividade em percentual.

Imagem *raster* composta (Mapa composto)

A imagem *raster* composta, que constitui o mapa composto, representa a sobreposição geoespacial das três camadas *raster* na seguinte ordem: 1) sombreamento, 2) hipsometria e 3) declividade, no painel camadas do QGIS.

Nas propriedades de cada imagem são atribuídos diferentes percentuais de transparência (22,2, 33,3 e 44,4) conforme indicado na (Tabela 2).

Tabela 2 – Contribuição e transparência das camadas *raster*.

Tema (Camadas ou planos de Informações <i>raster</i>)	Transparência ¹¹ em %	Contribuição ¹² em %
Hipsometria	60	44,4
Declividade	70	33,3
Sombreamento	80	22,2

Fonte: Elaborado pelo 1º Autor, 2020.

Desta forma, a imagem *raster* composta está realçada e pronta para realização da fotointerpretação dos elementos pesquisados.

¹⁰ GRASS (Geographic Resources Analysis Support System ou Sistema de Suporte à Análise de Recursos Geográficos), é um SIG Livre, e seu desenvolvimento contínuo desde 1982 envolveu um grande número de agências federais, universidades e empresas privadas dos EUA (GRASS GIS, 2019).

¹¹ Transparência global varia de nula (totalmente transparente 0%) a preenchimento completo (100% sem transparência);

¹² Contribuição real da base de informação para a composição final.

Feições geomorfoestruturais

O termo feições geomorfoestruturais origina-se de duas palavras conjugadas: [GEOMORFO] e [ESTRUTURA]. Onde, [GEOMORFO] - reforça o aspecto geomorfológico (elementos vetoriais, linhas e polígonos, interpretados e materializados a partir de elementos *raster*, as feições geomorfológicas visíveis na imagem *raster* composta); enquanto que, [ESTRUTURA] - reforça o aspecto da gênese geotectônica e estrutural controladora dos elementos geomorfológicos presentes na paisagem.

As feições geomorfoestruturais interpretadas nesta pesquisa foram divididas em dois tipos, os quais denominamos de: feições geomorfoestruturais lineares e blocos geomorfoestruturais.

A interpretação e o mapeamento das feições geomorfoestruturais lineares e blocos geomorfoestruturais foram realizados especialmente nos programas livres QGIS, Inkscape (editor vetorial) e SPRING/INPE.

i. Feições geomorfoestruturais lineares (lineamentos)

As feições geomorfoestruturais lineares, normalmente associadas a lineamentos, foram extraídas a partir da imagem *raster* declividade. Elas representam grandes feições geológicas e geomorfológicas como alinhamentos gerais detectáveis em pequena escala (1:2.000.000 e 1:1.000.000), visualizadas e interpretadas em SIG. Estes alinhamentos podem ser expressos por vales lineares, quebras de declives lineares ou cumes alinhados, conforme Jordán *et al.*, (2005, p.164).

ii. Blocos geomorfoestruturais

Os blocos geomorfoestruturais representam a interseção das feições geomorfoestruturais lineares, que se entrecruzam em diversos ângulos, em *trends* predominantes, constituindo uma espécie de tabuleiro de xadrez em que cada quadrado representa um polígono demarcado a partir da análise e fotointerpretação do *raster* composto (Figura 4).

A delimitação dos blocos é realizada com base nas feições geomorfoestruturais lineares e imagem *raster* composta, analisadas em escalas pequenas e médias (1:2.000.000 e 1:1.000.000).

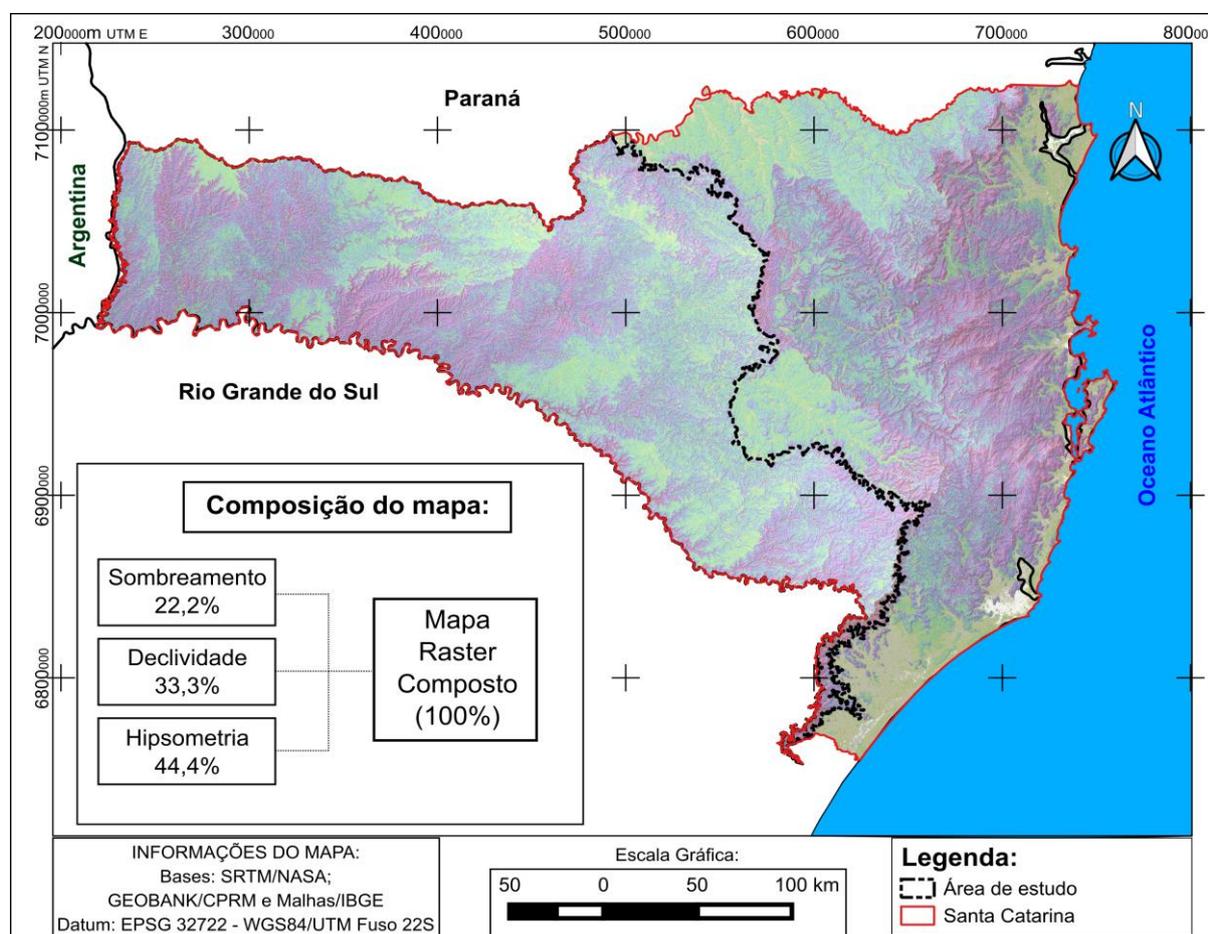
A viabilidade da metodologia utilizada (Uso das geotecnologias livres, especialmente Sistema de Informações Geográficas programa QGIS e imagens de

sensoriamento remoto), permitiu a elaboração, análise e definição dos blocos geomorfoestruturais, sendo possível sua replicação em pesquisas sobre a compartimentação em grandes bacias geológicas.

Resultados

O Mapa composto (imagem *raster* composta), proporcionou o realce ideal, possibilitando realizar-se a interpretação geomorfológica das feições do relevo e a definição das linhas limítrofes dos blocos geomorfoestruturais (Figura 2).

Figura 2 – Mapa da imagem *raster* combinada. Ordem do empilhamento, tema e percentual: 1) sombreamento (22,2%), 2) declividade (33,3%) e 3) hipsometria (44,4%).



Fonte: Elaborado pelo 1º Autor, 2020.

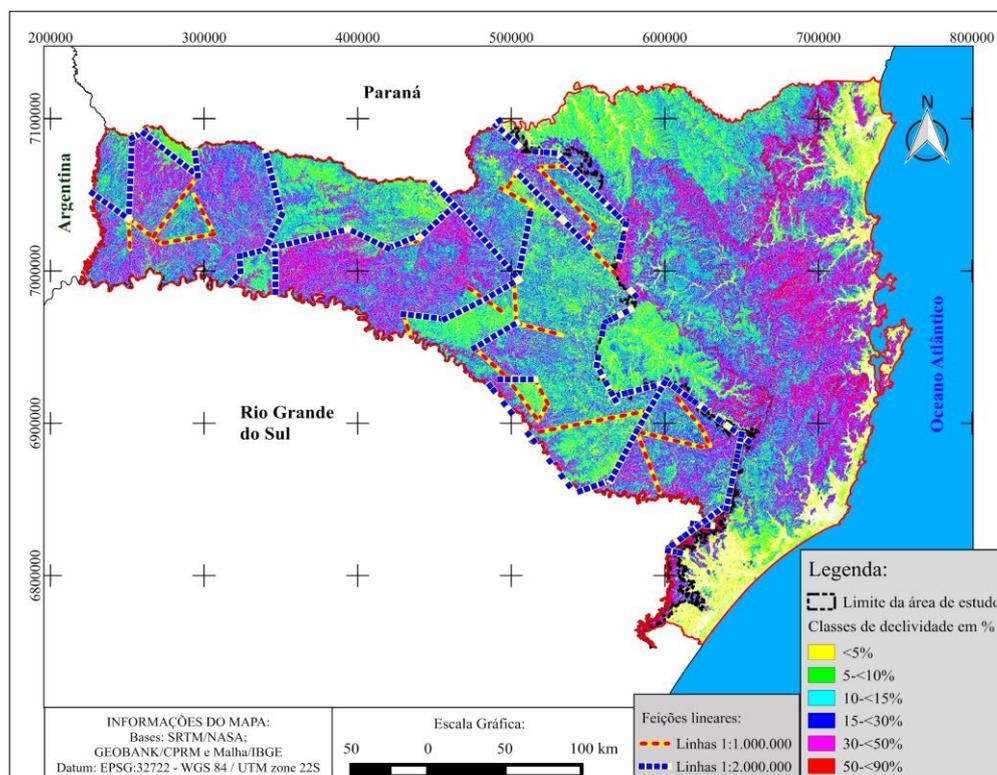
O mapa composto destacou aspectos geomorfológicos, por proporcionar uma perspectiva tridimensional (profundidade) do terreno, destacando as principais feições do relevo, entre elas: áreas planas e escarpadas, com predomínio de baixa (tons de verde) e alta (tons de roxo) declividades respectivamente. Isto possibilitou a interpretação e a delimitação das principais estruturas geológico-geomorfológicas presentes nesta região.

Na área de estudo, as estruturas geológico-geomorfológicas mais comuns observadas foram as estruturas tectônicas rúpteis, devido à ocorrência predominante de rochas ígneas vulcânicas (duras), e a elas se associam os alinhamentos tectônicos.

Essas estruturas estão geomorfologicamente associadas às escarpas declivosas, aos fundos de vales e às cristas ou cumes de serras, com seus respectivos abates/ataques erosivos. No mapa composto, estes fenômenos podem ser observados e interpretados como limites entre as áreas planas e as áreas declivosas, associados aos principais alinhamentos tectônicos regionais (limites das principais bacias hidrográficas).

O relevo da região apresenta alternância entre extensas áreas planas e declivosas. As áreas planas (declividade <10%) representadas pela cor verde no mapa (Figura 3), intercaladas por áreas declivosas (declividade >30%), na cor roxa. As linhas foram plotadas dividindo estes padrões (roxo e verde), através de extensas linhas (feições geomorfoestruturais lineares) conforme ilustrado na (Figura 3).

Figura 3 – Mapa das feições geomorfoestruturais lineares. Os vetores - linhas em escalas: 1:2.000.000 (cor azul) e 1:1.000.000 (cores amarelo e vermelho), interpretados sobre a imagem raster de declividade do terreno.



Fonte: Elaborado pelo 1º Autor, 2020.

As áreas planas (verde) predominam na região central leste de Santa Catarina, intercalando-se com as áreas declivosas (roxa) que predominam na região oeste e meio-oeste catarinense.

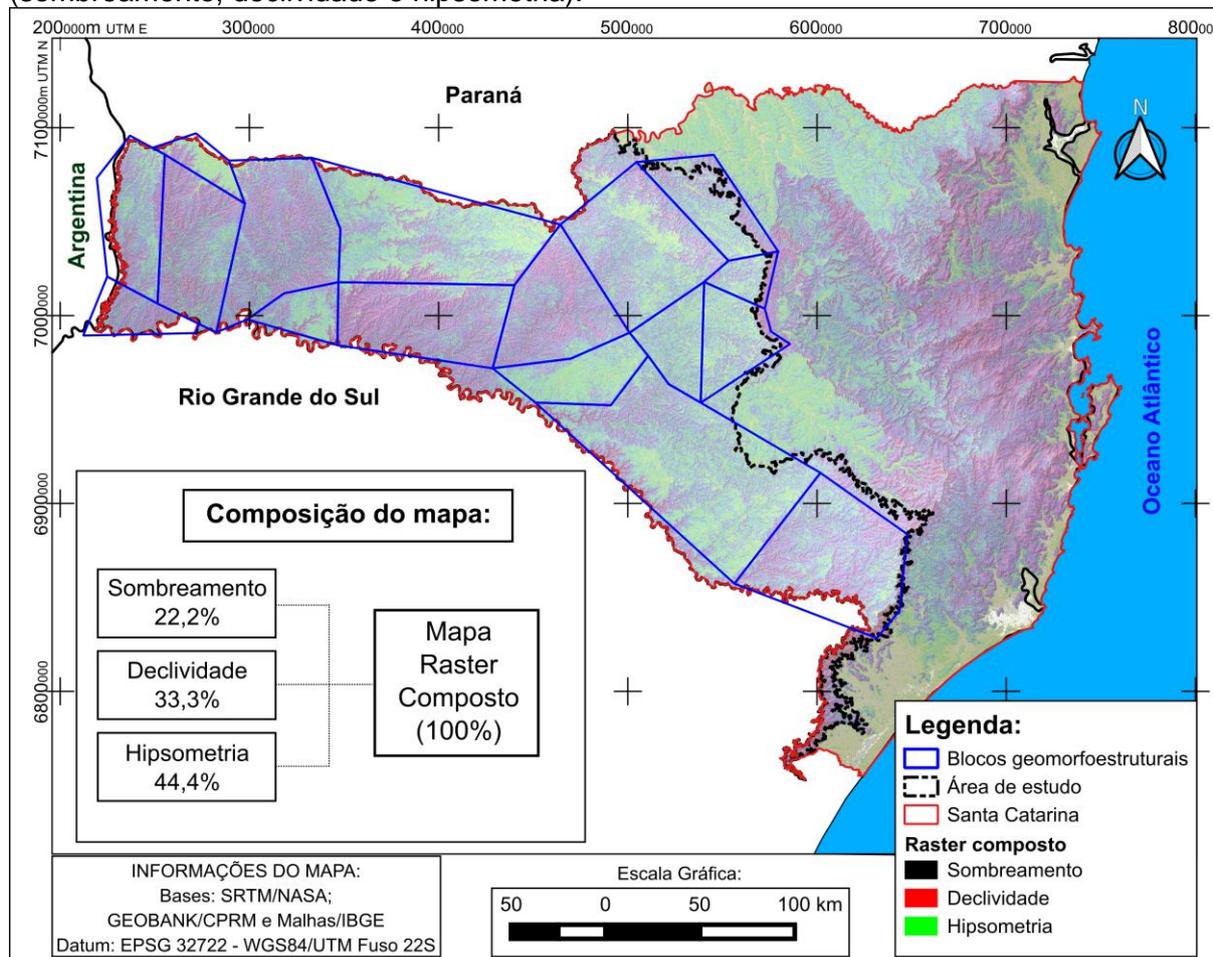
As regiões central e oeste da área pesquisada, apresentam bacias hidrográficas com contornos fortemente marcados por feições geomorfoestruturais lineares que, a rigor, possuem gênese relacionada a ativação e/ou reativação tectônica, configuradoras das fraturas em rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral.

Blocos geomorfoestruturais

Os blocos geomorfoestruturais representam a interpretação conjunta das feições geomorfoestruturais lineares, constituindo áreas poligonais, blocos fechados. Estes blocos agregam em seu interior um padrão geomorfológico, observável no mapa pela homogeneidade das cores. Estes padrões de cores estão associados às variações de: altitudes, declividades e sombreamento. Estes padrões ressaltam as direções preferenciais de alinhamentos geomorfoestruturais (NE e NO), associados aos limites do arranjo geométrico de blocos (tabuleiro de xadrez).

A definição espacial dos blocos geomorfoestruturais, buscou afirmar a correlação das feições geomorfológicas com a geologia, possibilitando a visualização e compartimentação. Um total de 17 blocos geomorfoestruturais foram estabelecidos para área de estudo, conforme (Figura 4).

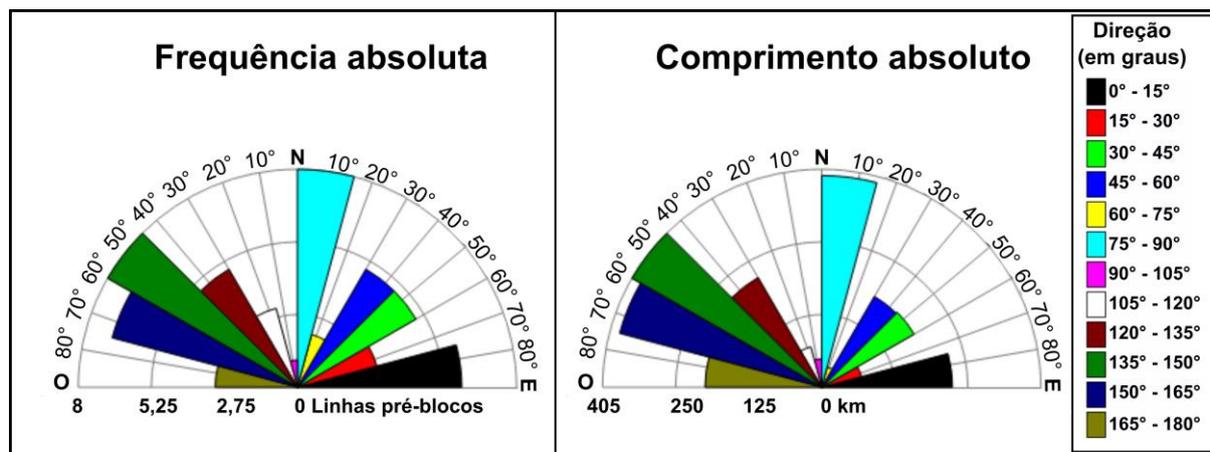
Figura 4 – Mapa dos blocos geomorfoestruturais, representados pelos polígonos sem preenchimento e linhas em cor azul, sobrepostos à imagem *raster* composta (sombreamento, declividade e hipsometria).



Fonte: Elaborado pelo 1º Autor, 2020.

Conforme a Figura 4, as linhas limitantes dos blocos apresentaram as direções NE (em 15 lados) que cruzam com alinhamentos de direção NO (10 lados, com maior extensão, podendo chegar até 400km), como tendências principais, corroborando os estudos anteriores para a Bacia Geológica do Paraná. Os blocos configuram um padrão grosseiramente retangular (tabuleiro de xadrez). Estas tendências principais se reafirmam nos diagramas de rosetas (Figura 5).

Figura 5 – Diagramas de roseta dos alinhamentos limitantes dos 17 blocos geomorfoestruturais.



Fonte: Elaborado pelo 1º Autor, 2020.

Os cruzamentos mais expressivos de geomorfoestruturas, lineamentos NE com NO, foram identificados com maior evidência em 3 locais na área de estudo: Central de Santa Catarina; Oeste e Borda Leste, até a bacia do rio do Peixe, estes locais apresentam feições do relevo fortemente dissecadas, refletindo este intenso cruzamento de estruturas tectônicas nestas duas tendências principais mapeadas na área de estudo (NO e NE).

Estes resultados corroboram e reforçam as pesquisas já realizadas na BGP e/ou no seu embasamento por Zalán *et al.* (1990), Soares *et al.* (2007) e Milani *et al.* (2007), que estabeleceram as principais estruturas geotectônicas, cinturões móveis: Apiaí e Major Gercino, no embasamento cristalino, bem como Fraga (1992), Lisboa (1996) e Nanni (2008), que utilizaram diferenças hidrogeoquímicas para interferir grandes estruturas no SAIG/SG e Amaral (2018) utilizando dados morfométricos das bacia hidrográficas de Santa Catarina.

Considerações Finais

Este trabalho demonstrou a viabilidade das geotecnologias livres, notadamente os Programa QGIS, SPRING, Inkscape, rodados em ambiente livre o Sistema Operacional Linux, o programa QGIS e bancos de dados disponibilizados de forma gratuita na rede mundial de computadores, notadamente os dados SRTM, mostram-se viáveis no desenvolvimento de metodologias, apoiando em escalas regionais e semirregionais a definição da compartimentação do Sistema Aquífero

Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) no Estado de Santa Catarina através da análise e interpretação de geomorfoestruturas.

As imagens *raster* SRTM utilizadas, processadas e interpretadas, geraram resultados vetoriais representados, em última análise pelos blocos geomorfoestruturais, e confirmam diversos estudos já realizados na BGP, corroborando com as tendências predominantes nesta região, de estruturações nas direções NO e NE, como principais formadoras de morfoestruturas.

Esta pesquisa representa um acréscimo de conhecimento sobre o SAIG/SG em Santa Catarina, importante reservatório de água subterrânea, através da definição de 17 blocos geomorfoestruturais via metodologia inovadora e que subsidia a gestão das águas subterrâneas em Santa Catarina, visto que o SAIG/SG se constitui no mais importante manancial hídrico do Estado.

Os blocos geomorfoestruturais ora definidos, representam aproximações genéricas (em pequena escala) e zoneamento inicial, necessitando de um maior detalhamento através de pesquisas hidrogeológicas, as quais orientarão a gestão das águas subterrâneas do SAIG/SG como um todo, podendo ser replicadas em outros sistemas aquíferos.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Ufsc e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa implementada e concedida viabilizando o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Leila Carolina Martoni. **Blocos Hidrogeológicos do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina**. Trabalho de conclusão de curso – Geologia – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Florianópolis, 2018. 94 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/200407>> Acesso em: 21 Fev. 2020.

ARAÚJO, Carlos César de; YAMAMOTO, Jorge Kazuo; MADRUCCI, Vanessa. Análise morfoestrutural em área de ocorrência de arenito asfáltico, Bacia do Paraná, São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 24, n. 1/2, p. 25-41, 2003.

ARCANJO, João Batista Alves. **Fotogeologia: conceitos, métodos e aplicações**. CPRM/SGB. 2011.

ARTUR, Paulo César; SOARES, Paulo César. Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32(4), p. 433-448, 2002.

CHRISMAN, Nicholas. **Exploring geographic information systems**. 2a Ed. 2001.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. p.188.

CORRÊA, Antonio Carlos de Barros; TAVARES, Bruno de Azevêdo Cavalcanti; MONTEIRO, Kleython de Araújo; CAVALCANTI, Lucas Costa de Souza; LIRA, Daniel Rodrigues de. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, p. 35-52, 2010.

DESCOVI FILHO, Leônidas Luiz Volcato; Nanni, Arthur Schmidt; Scheibe, Luiz Fernando. Definition of hydrogeological tectonic blocks into Guarani/Serra Geral Integrated Aquifer System using QGIS. **Geomatics Workbooks**. v. 12, p. 455-458. 2015.

DESCOVI FILHO, Leônidas Luiz Volcato. **Geomorfoestruturas e compartimentação tectônica do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral no estado de Santa Catarina, Brasil**. 2015. 224 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br/teses/PGCN0595-T.pdf>>

EPSG Home. (sem data) Disponível em: <<http://www.epsg.org/>> Acesso em: 31 Jul 2019.

FRAGA, Carlos G. **Origem de fluoreto em águas subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Botucatu e Serra Geral da Bacia do Paraná**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). - Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, 1992. 178p.

GONÇALVES, Rhandysson Barbosa; FONSECA, Drielly Naamma; CORREA, Antonio Carlos de Barros. Padrões de Fotolineamentos Aplicados à Análise Morfoestrutural da Bacia do Rio Mamanguape, Paraíba. **Revista do Departamento de Geografia**, V. 34 (2017) 43-54.

GRASS GIS. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/>> Acesso em: 31 Jul 2019.

JACQUES, Patrícia Düringer; MACHADO, Rômulo; NUMMER, Alexis Rosa. Lineamentos estruturais na borda leste da Bacia do Paraná em Santa Catarina: análise multiescala com base em imagens LANDSAT e SRTM. **Pesquisas em Geociências**, v. 37, p. 117-131, 2010.

JORDÁN, Gy; MEIJNINGER, Bart M. L.; HINSBERGEN, Douwe J. J. Van; MEULENKAMP, John E.; DIJK, Paul M. Van. Extraction of morphotectonic features from DEMs: development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, p. 163-182, 2005.

LANA, Cláudio Eduardo; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim. Evolução histórica e filosófica do conceito de nível de base fluvial. **TERRÆ DIDÁTICA**, v. 8, p. 51-57, 2012.

LISBOA, Nelson Amoretti. **Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 1996.

MILANI, Edson José; MELO, José Henrique Gonçalves de; SOUZA, Paulo Alves de; FERNANDES, Luiz Alberto; FRANÇA, Almério Barros. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, p. 265-287, 2007.

NANNI, Arthur Smith. **O Flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul**: origem e condicionamento geológico. Tese (doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 127p.

NANNI, Arthur Smith; ROISENBERG, Ari; FACHEL, Jandyra M.G.; MESQUITA, Gilberto; DANIELI, Cristiano . Fluoride characterization by principal component analysis in the hydrochemical facies of Serra Geral Aquifer System in Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 80, nº 4, p. 693-701, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/37645>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

NANNI, Arthur Smith; CHAVES, Alexandre de Oliveira. **Uso de aplicativos computacionais livres em disciplina de mapeamento geológico**. GeoFocus (Informes y comentarios), nº 11, p.55-65. 2011. Disponível em: <http://geofocus.rediris.es/2011/Informe4_2011.pdf> Acesso em: 24 Nov 2019.

NIMA Technical Report TR8350.2 Departamento de defesa dos EUA. Disponível em: <<https://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf> > Acesso em: 11 Jun 2020.

OPENGEOESPATIALCONSORCIUM. **OCG**. 2018. Disponível em: <<http://www.opengeoespatial.org/ocg>> Acesso em: 11 Nov 2019.

QGIS Development Team. Geographic Information System. **User Guide**. 2019a.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. 2019b.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches; MOROZ, Isabel Cristina. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, DG-FFLCH-USP, IPT, FAPESP, 1997.

ROSA, Ricardo. Geotechnologies on applied geographie. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 16, 2005. p. 81-90.

SABINO, Vanessa Cristina. **Um estudo sistemático de licenças de software livre**. Dissertação (Ciência da Computação) apresentada ao Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. 2011. Mestre em Ciências.

SCHEIBE, Luiz Fernando; HIRATA, Ricardo César Aoki. Contexto tectônico dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. Suplemento - XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23794/15859>>. Acesso em: 10 Abr 2019.

SOARES, Ana Paula; SOARES, Paulo César; BETTÚ, Daniel Fabian; HOLZ, Michael. Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. In: **Geociências UNESP**, v. 26, p. 297-311, 2007a.

SOARES, Ana Paula, SOARES, Paulo César; BETTÚ, Daniel Fabian; HOLZ, Michael. 2007b. **Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani: Controles Estruturais e Estratigráficos**. *Águas Subterrâneas* 21(1). Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/16167> > Acesso em: 11 Out 2019.

SOARES, Ana Paula; **Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani**: controles estratigráficos e estruturais. Tese (doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 196p.

SRTM. **Shuttle Radar Topography Mission.** 2018. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> Acesso em: 24 Nov 2019.

WOLKMER, Maria de Fátima Schumacher [coord.]. **Projeto REDE GUARANI/SERRA GERAL**, apresentado pela FUNJAB (Fundação José Arthur Boiteux/UFSC) à FAPESC (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina) em dezembro de 2006, inédito (46 p.).

ZALÁN, Pedro Victor; WOLFF, Sven; CONCEIÇÃO, João Claudio de Jesus; MARQUES, Airtton; ASTOLFI, Marco Antonio; VIEIRA, Inês Santos; APPI, Valéria Tiriba; ZANOTTO, Osmar Antônio. Bacia do Paraná. In: De RAJA GABAGLIA, Guilherme P. e MILANI, Edson José (Coords.). **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares.** PETROBRÁS. 1990. p. 135-169.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Leônidas Luiz Volcato Descovi Filho - Concepção. Coleta de dados, Análise de dados, Elaboração do manuscrito, revisão e aprovação da versão final do trabalho

Luiz Fernando Scheibe – Concepção e elaboração do manuscrito. Coleta de dados Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Arthur Schmidt Nanni - Concepção. Coleta de dados, Análise de dados, Elaboração do manuscrito, revisão e aprovação da versão final do trabalho

FINANCIAMENTO

Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Geografia e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pela concessão de bolsa de demanda social, Projeto Rede Guarani Serra Geral, os quais possibilitaram a realização desta pesquisa.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 30-07-2020

Aprovado em: 08-02-2023