

INVESTIGAÇÃO HIDROGEOLÓGICA: UM ESTUDO DE CASO PARA VERIFICAÇÃO DE SURGÊNCIAS DE ÁGUA EM ÁREA DE EXPANSÃO URBANA

Hydrogeological investigation: a case study to verify flood zones in areas of urban expansion

Maurício Moreira dos Santos*
Marcia Regina Lopez Arantes**

***Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR / Londrina, Paraná**
mmsantos.geo@gmail.com

****Universidade Estadual de Londrina - UEL / Londrina, Paraná**
marcia.arantes3@yahoo.com.br

RESUMO

As alterações ocorridas no uso e ocupação do solo interferem diretamente na qualidade ambiental local, especialmente em áreas de expansão urbana, quando a terra, até então utilizada para práticas agrícolas, passa a receber a infraestrutura necessária à implantação de loteamentos. Neste contexto, a investigação hidrogeológica de surgências torna-se fundamental, uma vez que norteará a definição da existência ou não de nascentes e conseqüentemente a delimitação das áreas de preservação permanente ou a implantação de infraestrutura adequada para destinar a água subsuperficial. A área de estudo localiza-se no norte do estado do Paraná, em loteamento urbano inserido nos limites da cidade de Ibiporã, onde se desenvolvem solos residuais de rochas basálticas pertencentes à Formação Serra Geral. Nesta localidade, existem registros de ocorrência pontuais de surgências sazonais de água com formação de redes de drenagens temporárias, podendo assim, órgãos ambientais impedirem parcialmente o uso e ocupação do solo em caso dessa condição seja considerada nascente. Dessa forma, estudos geotécnicos e hidrogeológicos se fazem necessário determinando se esses pontos são originários de surgências naturais das águas subterrâneas ou se formam por saturação do meio poroso via escoamento superficial, nesse último caso, não havendo impedimento legislativo para a ocupação total do loteamento. Para este estudo foram executados 9 furos de sondagem a trado mecânico e avaliações históricas de imagens orbitais, que resultou na confecção de 4 seções hidrogeológicas e análises baseadas na potencialidade hidráulica, integradas aos condicionantes morfológicos e de evolução do uso do solo. Os resultados apontaram que a existência de drenagens intermitentes no local originou-se por modificações mecânicas no terreno e as surgências sazonais são decorrentes de saturação por águas pluviais, claramente evidenciadas pela direção de fluxo subterrâneo influenciado, por sua vez, pelo potencial hidráulico do meio poroso onde ocorre saturação.

Palavras-chave: Hidrogeologia. Surgência. Potencialidade hidráulica. Área de preservação permanente.

ABSTRACT

The alterations that occurred by the use and occupation of the soil interfere directly in the local environmental quality, especially in urban expansion areas, when the soil, which has been used only for agricultural practices until then, starts receiving the necessary infrastructure to implement allotments. In this sense, the hydrogeological investigation of flood zones becomes fundamental, since it orientates the establishment of the existence or non-existence of water sources and therefore of the delineation of permanent preservation areas or the deployment of proper infrastructure to allocate subsurface water. The study area is located in the north of the state of Paraná in the city of Ibiporã, where residual soils of basaltic rocks belonging to the Serra Geral Formation. In this locality, there are occasional records of seasonal occurrences of water with the formation of temporary drainage networks, thus allowing environmental agencies to partially prevent the use and occupation of the soil. Thus, geotechnical and hydrogeological studies are needed to determine whether these points come from natural groundwater or form by saturating the porous medium via surface runoff, in this latter case, there is no legal impediment to the occupation of the settlement. For this study 9 drill shafting

boreholes were performed and historical sensor imaging, that originated in the making of 4 hydrogeological sections and analysis based on the hydrological potentials. For this study, 9 drill holes were drilled using mechanical auger and historical evaluations of orbital images, which resulted in the making of 4 hydrogeological sections and analyzes based on hydraulic potential, integrated with the morphological conditions and evolution of land use. The results showed that the existence of intermittent drains in the place originated by mechanical modifications in the terrain and the occasional water appearances are due to rainwater saturation, evidenced by the direction of groundwater flow influenced by the hydraulic potential of the porous medium.

Keywords: Hydrogeology. Flood. Hydraulic potential. Permanent preservation area.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento urbano possui como pré-requisito a avaliação prévia das áreas que serão adensadas devido às diferentes formas de uso e ocupação adotadas, com o objetivo de garantir a gestão sustentada das cidades. Neste contexto, a investigação hidrogeológica de surgências torna-se fundamental, uma vez que norteará a definição da existência ou não de nascentes e conseqüentemente da delimitação das Áreas de Preservação Permanente (APP) ou da implantação de infraestrutura adequada para o adequado planejamento urbano e ambiental.

Trabalhos como de Rebouças (2008), Cabral (2008) destacam a importância de estudos hidrogeológicos em meio urbano, mas a maior parte tem seu enfoque em estudos que envolvam a captação e a distribuição das águas subterrâneas para a população, ou pesquisas que proponham a investigação ambiental ou de contaminação de aquíferos em áreas urbanas como os desenvolvidos por Mello (1995), Soldera (2017) e Voisin *et al.* (2018).

Domingo *et al.* (2010) destacam a importância do entendimento e gerenciamento aprofundados do movimento das águas subterrâneas em meio urbano e o emprego de métodos de modelagem capaz de refletir as interações do sistema hidrodinâmico e inundações.

Contudo, poucos estudos, como o realizado por Celligoi, Santos e Vianna (2001), envolvem a dinâmica da interação hidráulica entre aquíferos e águas superficiais, de zonas de ocorrências cíclicas de inundações e/ou surgências de água em áreas urbanas, o que destaca a importância da problemática abordada no presente artigo relativa aos problemas socioambientais e de zoneamento urbano que podem ser encontrados nesta condição.

Nesse sentido, a justificativa desse estudo está na necessidade da avaliação das condições de ocorrência da água subterrânea verificadas para uma área de expansão urbana localizada no município de Ibiporã/PR, uma vez que a porção central da área até a confluência de um curso d'água local está sujeito à ocorrência de surgências sazonais de água e formação de redes de drenagens temporárias verificadas ao longo de períodos curtos e de maior precipitação ao longo do ano, fato este que pode ser atribuído a parcelas do loteamento como APP (BRASIL, 2012) e, conseqüentemente, acarretando o impedimento ou a limitação do uso e ocupação solo e o desenvolvimento urbano residencial da cidade para esta localidade.

Levantamentos geotécnicos a partir de furos de sondagens a trado mecânico também foram executados na área de estudo e tiveram como objetivo a determinação do perfil geológico do manto de alteração até a profundidade da rocha semi-alterada, bem como a identificação da profundidade dos níveis de água subterrânea.

Para os estudos hidrogeológicos, foram aplicados os princípios da hidrodinâmica para os meios porosos. De acordo com Cabral (2008) o engenheiro hidráulico Henry Darcy demonstrou em 1856 por meio de uma série de experimentos, a relação da existência entre o fluxo de água que atravessa uma camada porosa e o gradiente hidráulico.

Segundo esses experimentos, a velocidade de descarga de um fluido através de um meio poroso varia linearmente com o gradiente hidráulico seguindo uma constante de proporcionalidade, denominada como condutividade hidráulica (FREEZE; CHERRY, 1979).

Neste contexto, o objetivo deste estudo é apresentar os resultados do conjunto de estudos multidisciplinares efetuados para investigação hidrogeológica em área de expansão urbana no município de Ibiporã/PR para determinar a hipótese se as surgências sazonais de água no local são nascentes, ou seja, afloramento natural aquífero, ou não, se apresentam como surgências subsuperficiais de acúmulo de água por escoamento pluvial.

A investigação hidrogeológica na área de estudo partiu de um modelo hidrogeológico conceitual, permitindo a construção de uma série de 4 seções hidrogeológicas para determinação do comportamento hidráulico ou potencial em água subterrânea das surgências temporárias *in loco*.

Estudos que visam os processos de uso e ocupação do solo são de suma importância para compreensão dos impactos no meio antrópico e sua interação com o caminho percorrido pelas águas que moldam a paisagem durante o seu escoamento superficial, fenômenos esses integrantes do domínio das bacias hidrográficas. Dessa forma, a utilização de imagens de satélite temporais e a definição da morfometria do relevo são imprescindíveis para compreensão dos fenômenos atuantes, ou seja, as investigações adicionais do meio físico podem contribuir para compreensão do comportamento morfogenético e hidrológico do escoamento das águas em sua origem pluvial.

2. METODOLOGIA

O estudo inicial para a avaliação dos condicionantes hidrogeológicos foi realizado por meio de levantamentos prévios de campanhas de campo, o primeiro realizado em fevereiro de 2013 e com acompanhamento de agentes do Instituto Ambiental do estado do Paraná, tinha como objetivo a identificação da área, entrevista com residentes próximos ao loteamento estudado, observações físicas da paisagem, inclusive a presença ou ausência das surgências, registros fotográficos e levantamento de coordenadas geográficas através da utilização de *Global Positions System* (GPS).

As entrevistas buscaram a pesquisa empírica em relação do reconhecimento ou não, com base em observações por parte dos moradores, da presença de surgências de água e de drenagens sazonais na área de estudo. Em relação aos entrevistados, buscavam-se residentes com idade superior a 18 anos e que já possuíam domicílio na vizinhança da área de estudo há pelo menos 3 anos, o que levou a seleção de 8 indivíduos.

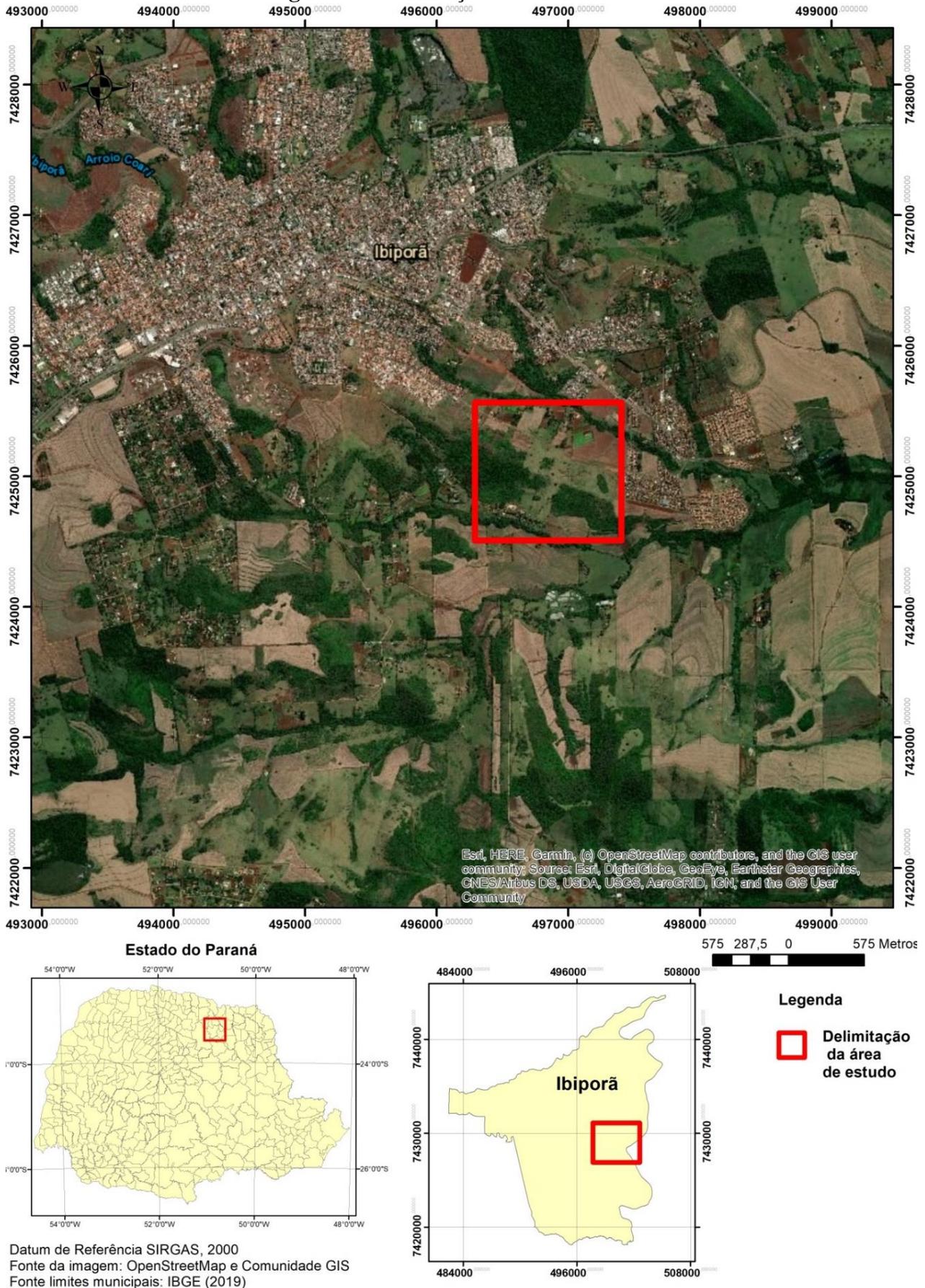
Outros 3 trabalhos de campo foram realizados em 5, 14 e 17 agosto de 2013 na área de estudo, para além das observações já mencionadas, tiveram como escopo: locação dos furos de sondagem pré-determinados em gabinete como base no modelo conceitual hidrogeológico da área de estudo; as perfurações do solo, o que permitiu a análise tátil e visual das amostras coletadas, determinando a sequência e descrição das camadas do perfil do manto de alteração e a medição dos níveis da água subsuperficial, quando presente nos furos de sondagem, que permitiu determinar o potencial em água subterrânea, respectivamente.

Para fins de avaliação do uso e ocupação do solo na área e da dinâmica geomorfológica e geológica local, foi levantada uma série de imagens de alta resolução orbitais históricas (26/07/2006, 13/10/2009 e 26/03/2013) utilizando o *software Google Earth* e suas funcionalidades, bem como a utilização de mapa topográfico¹. Como forma de complementação da análise morfologia do terreno e altimetria, foi realizada a dados de imagem da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (USGS, 2020) com Modelos de Elevação do Terreno (MNT) disponíveis em rede (NASA, 2020).

2.1. Localização da Área de Estudo

O local da investigação hidrogeológica está inserido na zona sul da área urbana do município de Ibiporã, no norte do Estado do Paraná, Região Metropolitana de Londrina (RML), com área total de 108.900 m² e limites entre as coordenadas geográficas de 23° 16' 41" S e 23° 16' 54" S e 51° 02' 21" O e 51° 02' 03" O (Figura 1), com altitudes variando entre 618 e 540 m.

Figura 1 – Localização da área de estudo



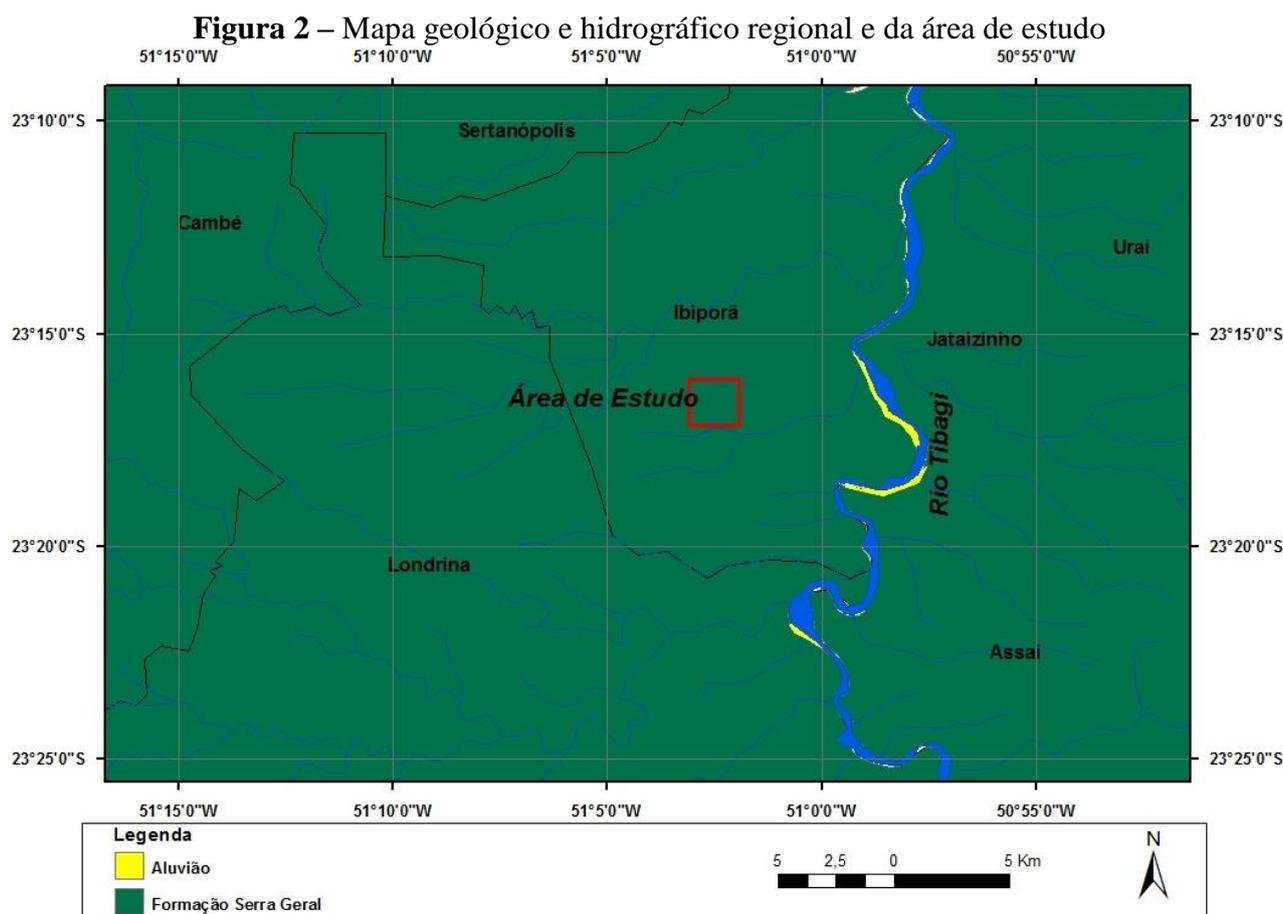
2.2. Caracterização geral da área

Metodologicamente, a classificação geral da área assume papel relevante conceitual no reconhecimento dos diversos atributos meio físico atuante sobre os condicionantes sistêmicos da natureza. Desse modo, os itens a seguir apresentam referencialmente esses aspectos de modo a criar conexão da reprodução metodológica e do desenvolvimento da pesquisa sobre os condicionantes da natureza especificamente para a área de estudo.

2.2.1. Contexto geológico

O município de Ibiporã/PR, mais especificamente o loteamento estudado encontra-se totalmente inserido sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral, como mostra a Figura 2.

A Formação Serra Geral, de maneira generalizada, é composta principalmente por rochas vulcânicas básicas, toleíticas e andesitos basálticos subordinadas a quantidades de riocacitos e riolitos, de textura afanítica, coloração cinza e negra. Nos topos dos derrames o basalto é geralmente amigdaloidal, apresentando grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais com intrusões alcalinas e de pequenas lentes de arenito (MILANI, 1997). A formação apresenta manto de intemperismo pouco espesso em algumas localidades e de até 30 m nas regiões mais elevadas topograficamente, que se caracterizam pelas principais zonas de recarga aquífera.



Fonte: Adaptado de Mineropar (2001).

Segundo Lastoria (2002), nos basaltos são comuns as fraturas de resfriamento, podendo até mesmo estabelecer-se certa “estratigrafia” de derrames basálticos com base nas fraturas encontradas. Assim, as fraturas horizontais predominam no topo e na base do derrame, enquanto as fraturas

verticais dominam em sua parte central. Um outro tipo de fratura esperado é o originado pelo alívio de carga. Conforme a erosão vai desgastando as rochas e retirando o solo, o peso sobre as rochas mais profundas vai diminuindo e as juntas que são geradas por este processo são abertas, o que facilita a percolação de solutos.

Os basaltos geralmente exibem coloração cinza esverdeada, rosada a ocre amarelada quando alteradas; textura afanítica e geralmente intenso padrão de acebolamento comumente próximo ao contato entre a rocha e o solo, formando os saprolitos.

Assim, de acordo com Pastore e Fontes (1998) o horizonte saprolítico ou saprolito é a transição entre o maciço de solo e o maciço rochoso. É composto basicamente por blocos ou camadas rochosas de vários estágios de alteração, com dimensões variáveis, envolvidos por solo saprolítico. O solo tende a se desenvolver ao longo de descontinuidades remanescentes do maciço rochoso, onde a percolação da água é mais facilitada e em zonas de rochas mais sensíveis a alteração.

2.2.2. Contexto hidrogeológico

Segundo Celligoi, Santos e Vianna (2001), na área de ocorrência dos basaltos da Formação Serra Geral existem duas formas principais de armazenamento e transmissão das águas subterrâneas: o aquífero freático e o sistema aquífero Serra Geral.

O aquífero freático, representado pelas camadas de solo e rocha alterada (saprolito) é produto direto do intemperismo das rochas vulcânicas basálticas. Dessa forma, esse aquífero constitui-se em um meio poroso intergranular, relativamente homogêneo, geralmente pouco espesso próximo às drenagens e com baixa profundidade do nível saturado. Tem características essenciais de aquífero livre ou não-confinado. Dessa forma, a recarga se dá diretamente a partir de águas pluviais nas áreas mais elevadas topograficamente, o que o torna mais vulnerável em relação à contaminação ou poluição das águas subterrâneas.

Já o sistema aquífero Serra Geral, pelas suas características litológicas de rochas de origem vulcânicas efusivas, se constitui em um meio que apresenta condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas, originando assim ocorrência da água subterrânea em zonas de descontinuidades das rochas, as quais se constituem principalmente em estruturas tectônicas do tipo fratura e/ou falhamento (FREEZE; CHERRY, 1979).

Para este trabalho, todavia, o objeto de estudo foi o aquífero freático, uma vez que as surgências e a ocorrência drenagens intermitentes identificados na área de estudo são constituídas de águas subsuperficiais aflorantes.

2.2.3. Aspectos climáticos

Segundo Nimer (1989), as condições médias da atmosfera que identificam o clima de uma dada região são definidas, principalmente, segundo sua situação geográfica. Desse modo, situado no Hemisfério Sul e cortado pelo Trópico de Capricórnio, o estado do Paraná sofre influências de alguns fatores macroclimáticos que lhe garantem o predomínio do clima subtropical.

Especificamente, o clima do município de Ibiporã/PR, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cfa (Subtropical Úmido Mesotérmico), com a ocorrência de chuvas em todas as estações, porém podendo ocorrer diminuição da quantidade de chuvas no período de inverno.

Segundo Mendonça (2007), o tipo climático predominante na área de estudo tem no verão sua estação mais úmida, período que concentra grande parte das chuvas que ocorrem ao longo do ano, e cujas temperaturas médias máximas podem atingir os 28°C. O autor ainda destaca que a estação de inverno representa um período de estiagem relativa na área do município de Ibiporã/PR, sendo os meses de julho e agosto os mais secos do ano, com médias mensais em torno de 50 mm. Com temperaturas médias de cerca de 18°C, essa época é onde pode ocorrer incidências de geadas, especialmente no mês de julho, quando as temperaturas mínimas médias podem chegar até 10°C.

2.2.4. Aspectos geomorfológicos

Segundo Maack (1981) o norte paranaense, onde se encontra a área de estudo, possui evolução geomorfológica sobre a bacia sedimentar do Paraná, inserida no Terceiro Planalto Paranaense, onde se desenvolve a estrutura geomorfológica das Cuestas Areníticas Basálticas caracterizada pela sucessão de camadas sedimentares e basálticas de desigual resistência, trabalhadas pela erosão.

Maack (1981) afirma que os vales dos rios Tibagi, Ivaí, Piquiri e Iguaçu dividem o Terceiro Planalto em regiões geográficas naturais, sendo a porção norte, no denominado Planalto de Apucarana, a escarpa declina a partir da Serra do Cadeado numa extensão de 150 Km, cuja superfície apresenta, ao lado de pequenos espigões, apenas suaves colinas e platôs com vales mais profundos em direção ao rio Ivaí. A porção nordeste está o planalto de Araiporanga, prolonga-se dos rios Tibagi e Itararé, sendo baixa e cortada em platôs isolados e mesetas pelos rios Cinza, Laranjinha e Congonhas.

A área de estudo possui vertentes longas e com baixa declividade, com altitudes variando entre 540 a 575 metros acima do nível do mar. A exceção, como será tratado adiante, é um maciço rochoso que fica na divisa da área de estudo, que possui cotas acima de 580 metros e acentuado declive até a zona mais baixa e de baixa declividade na área. De modo geral, a conformação topográfica da área de pesquisa possui inclinação suave no sentido NE, obedecendo à drenagem do córrego Forquilha, cuja direção SE converge em direção ao rio Tibagi.

2.2.5. Quadro regional dos solos

A principal unidade pedológica do município de Ibiporã/PR é constituída por camada de solo relativamente espessa, em torno de 15 metros, mas podendo chegar a 30 metros em algumas localidades, trata-se de um solo residual argiloso, resultado do alto grau de intemperismo sofrido pela rocha basáltica (BRANCO *et al.*, 1998). A região em questão a classificação pedológica predominante é o Latossolo Vermelho e Nitossolo.

Segundo Santos *et al.* (2018), o Latossolo Vermelho é um dos mais importantes solos do ponto de vista agrícola por sua fertilidade natural; destacando avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Nestes tipos de solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo.

O acréscimo de argila do horizonte A para o B é pouco expressivo, muitas vezes inexistente, e a relação textural B/A não satisfaz aos requisitos para B textural. De um modo geral, os teores da fração argila no solo aumentam gradativamente com a profundidade ou permanecem constantes ao longo do perfil. A cerosidade, se presente, é pouca e fraca. Tipicamente, é baixa a mobilidade das argilas no horizonte B, ressaltados comportamentos atípicos de solos desenvolvidos de material com textura mais leve (de composição arenoquartzosa) (SANTOS *et al.*, 2018).

Segundo Stipp (2002), o Latossolo Vermelho apresenta teor de argila superior a 60%, portanto, tem textura muito argilosa, consistência muito friável, é poroso e, muitas vezes apresenta-se acentuadamente drenado.

Segundo a Santos *et al.* (2018), os Nitossolos possuem avançada evolução pedogenética, pela atuação de ferralitização com intensa hidrólise, originando composição caulínico-oxídica ou virtualmente caulínica. São solos, possui coloração que se assemelha ao Latossolo Vermelho, porém, com um horizonte B nítico com espessura de mais ou menos 2 metros, com pequeno gradiente textural, porém apresentando estrutura em blocos subangulares ou angulares ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva.

Têm textura muito argilosa (60% ou mais de argila na maior parte dos horizontes) estrutura mineral subangular bem desenvolvida (STIPP, 2002).

2.3. Potencial hidráulico

Para o presente estudo, as determinações do potencial de água subterrânea para a área de estudo se aplicará metodologia utilizada por Celligoi, Santos e Vianna (2001) para análise e interpretação do gradiente hidráulico do aquífero freático em localidade sobre o mesmo domínio geológico.

Em estudos bidimensionais, para o entendimento de uma rede de fluxo subsuperficial do escoamento, costuma se traçar redes de fluxo mostrando a direção e o sentido da velocidade ao longo da região analisada. Para Cabral (2008) a regra do escoamento potencial perpendicular às linhas equipotenciais é aplicada para aquíferos livres isotrópicos, como é o caso do aquífero freático, quando existente, para a área de estudo, tornando-se assim a base do modelo conceitual hidrogeológico para a presente pesquisa.

Assim, a relação de potencialidade da água subterrânea está intimamente ligada à carga hidráulica, pois indica o nível de energia em que a água se encontra, ou a expressão da energia mecânica total.

Desse modo, Cabral (2008) destaca que a energia mecânica de um líquido em movimento pode ser descrita como o somatório das energias cinética, potencial gravitacional e de pressão.

Hubbert (1940) definiu potencial hidráulico como uma grandeza, que pode ser medida em qualquer ponto do escoamento, cujas propriedades são tais que o escoamento sempre ocorre do ponto com maior potencial para o de menor potencial, independente da direção no espaço.

Conseqüentemente, o potencial hidráulico em qualquer ponto do fluido é o produto da carga hidráulica (h) pela aceleração da gravidade (g). Como a aceleração gravitacional é praticamente constante por todo o globo, ϕ e h são relacionáveis e a carga hidráulica pode ser considerada como um potencial, física e matematicamente. Dessa forma, igualando as equações (1) e (3), obtém-se a expressão da carga hidráulica apresentada na equação 1:

$$h = z + \frac{P}{\gamma} \quad (1)$$

Em que:

P = Pressão (energia mecânica total da água pode ser expressa em mm);

γ = carga potencial (m);

h = Carga hidráulica (m).

Logo, a carga hidráulica é representada pela soma de duas parcelas: a cota ou elevação (z) e a carga de pressão ($\frac{P}{\gamma}$), em metros de coluna d'água. Ou seja, no caso de aquíferos não confinados, a carga na superfície livre é o próprio nível d'água ($h = z$), pois a pressão P é nula, por ser a pressão atmosférica. No caso de aquíferos confinados, a carga superior (tomada como referência) é dada pela carga de pressão ($\frac{P}{\gamma}$), que é correspondente à altura em que a água se elevaria, acima do topo do aquífero, se um poço fosse perfurado (CABRAL, 2008).

2.4. Sondagens investigativas

Segundo Fetter (1988) o sentido de escoamento da água subterrânea em aquíferos livres ocorre a partir dos pontos altos, em direção aos vales, até alimentar os rios como fluxo de base, normalmente subparalelos à direção de maior declividade do terreno concorrendo para formação das

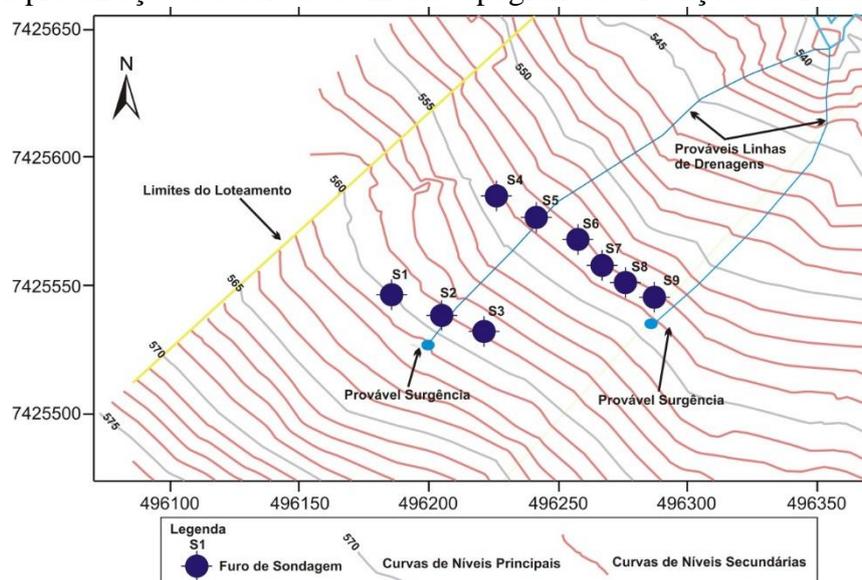
drenagens efluentes, que por definição, é todo corpo de água superficial que é alimentado por água subterrânea, proveniente de descarga do lençol freático.

Para responder de forma positiva a hipótese formulada no presente trabalho, espera-se que a superfície do lençol freático analisado deva seguir a topografia do terreno, apresentando-se comumente suavizada em relação à topografia local, alimentando, por sua vez, o fluxo de base das drenagens intermitentes identificadas no local, ou a própria surgência, quando do nível de água mais elevada em épocas de médias de precipitação mais elevadas.

Nesse sentido, como mostra a Figura 3, os furos foram dispostos em 2 sequências, ou transectos, perpendiculares às curvas de níveis do terreno de modo que ocorra a intersecção das linhas de drenagens intermitentes, ou seja, direcionado das zonas mais elevadas, a fim de se obter o comportamento no nível d'água, ou freático, uma vez que as direções de fluxo subterrâneo são perpendiculares às linhas equipotenciais, possibilitando a avaliação do potencial hidráulico na área (FETTER, 1988; CELLIGOI; SANTOS; VIANNA, 2001; BOSCOV, 2008).

Foram executadas nove sondagens a trado mecânico e todas as perfurações atingiram a rocha semi-alterada ou saprolito (Figura 4).

Figura 3 – Representação das curvas de níveis topográficas e localização dos furos de sondagens



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 4 – Foto evidenciando material saprolítico recuperado da perfuração em sondagem a trado mecânico realizado no local de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

A investigação geotécnica a partir das sondagens executadas na área de estudo foi determinante para a caracterização da ocorrência das águas subterrâneas, pois possibilitou a determinação da espessura do solo e da rocha alterada, bem como a medição dos níveis saturados para determinação da profundidade dos níveis de água.

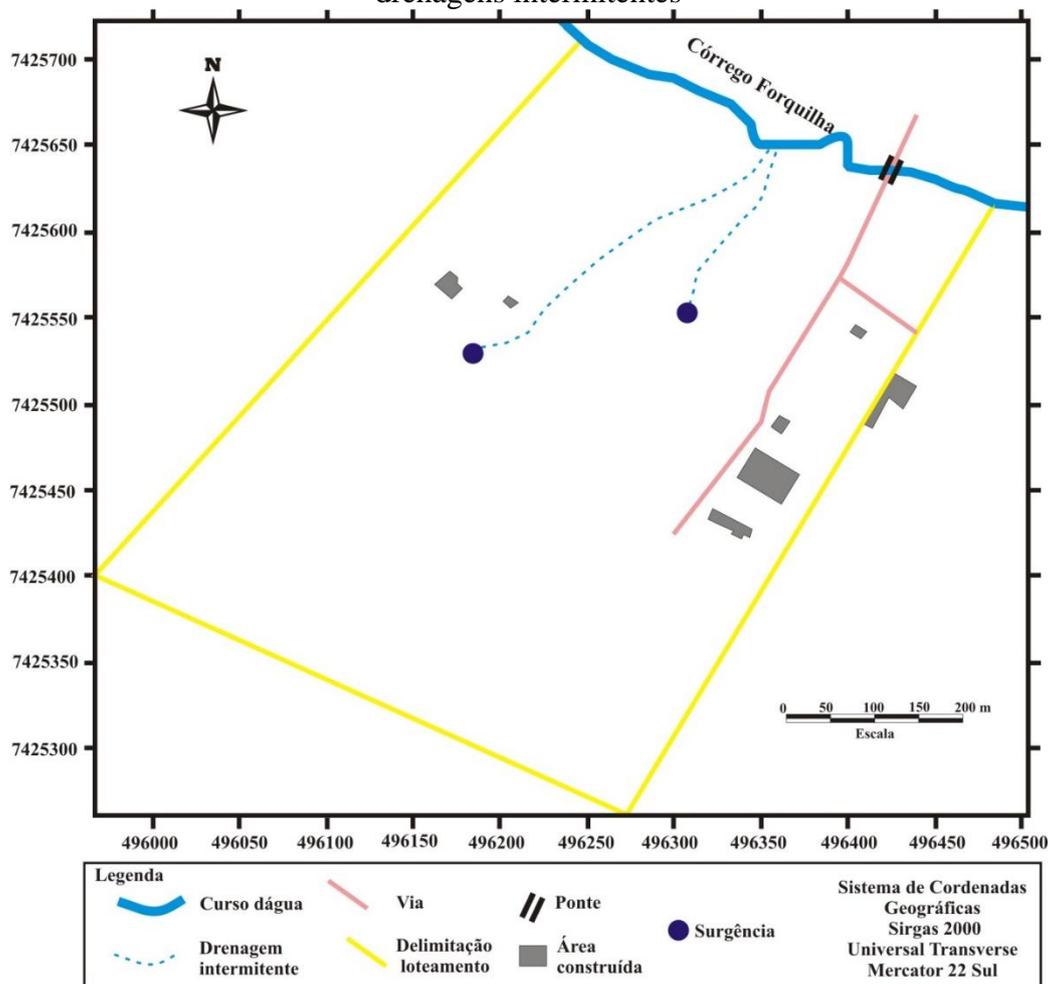
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Mapeamentos de surgências e drenagens intermitentes

Na primeira campanha de campo realizado em fevereiro de 2013 foi possível identificar e georreferenciar, com a presença de técnicos do instituto ambiental do estado, a existências de linhas de escoamento superficial de água na área de estudo. Tais escoamentos originavam a partir de pontos mais elevados topograficamente e específicos do terreno, até a confluência de um corpo d'água próximo, denominado córrego forquilha. Além disso, em entrevistas com 8 moradores vizinhos a área, foi possível identificar que tais escoamentos eram sazonais, apenas observados em determinados épocas do ano, especialmente nos meses de maior precipitação.

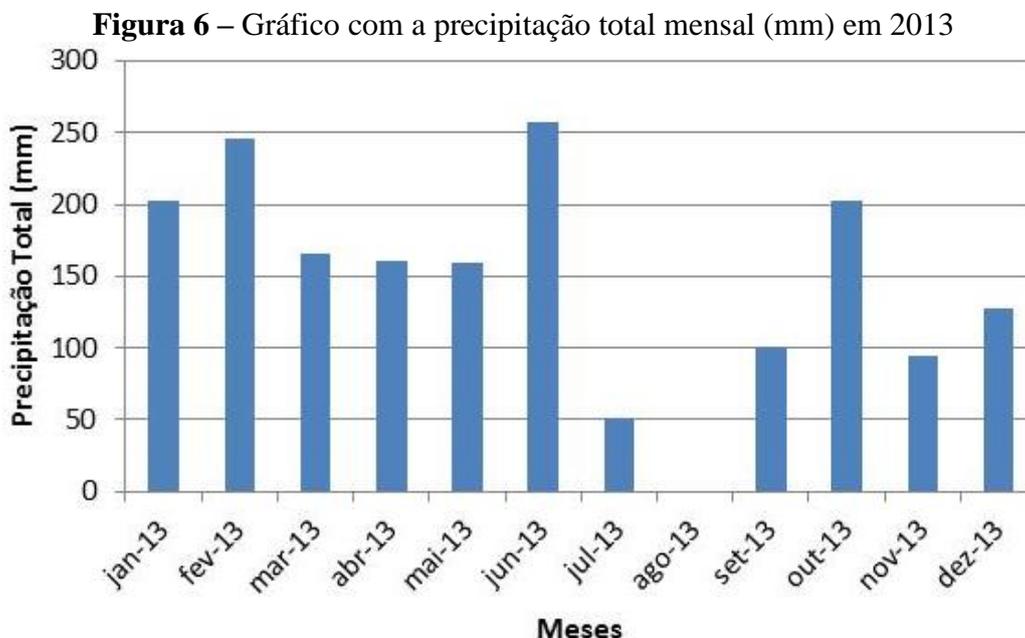
Na segunda campanha de campo, realizado em agosto de 2013, os escoamentos superficiais já não eram mais visíveis, mas com a identificação de ravinamentos foi possível complementar o mapeamento, porém, devido a incertezas sobre sua origem levou a denominação de surgências sazonais de água e drenagens intermitentes, como se apresenta na Figura 5.

Figura 5 – Delimitação do loteamento e mapeamento dos pontos prováveis de surgência sazonais e drenagens intermitentes



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A interpretação dos resultados das entrevistas e as demais observações durante as campanhas de campo foram fundamentais para a definição: “surgências sazonais” e “drenagens intermitentes”, algo que pode ser corroborado pelas características climáticas para a região de estudo, como foi apresentado na caracterização geral e a partir do levantamento da precipitação total mensal para o ano de 2013 na Figura 6.



Fonte: IAPAR (2019), organizado pelo autor (2020).

A Figura 6 evidencia a distribuição total mensal da precipitação com maior incidência nos meses de janeiro e fevereiro de 2013, somando os dois meses de maior pluviosidade o índice é superior a 446 mm, em conformidade com a primeira campanha de campo, onde se identificaram os pontos de surgências e escoamento da água. Em comparação, os meses de julho e agosto para o mesmo ano, a soma do índice de precipitação para esses meses mais secos, alcançou 51 mm, sendo o mês de agosto ausente de chuvas.

3.2. Investigação geotécnica

Como já salientado, durante toda a segunda campanha de campo que se realizou no mês de agosto/2013, não foram evidenciadas quaisquer surgências de água, o que favoreceria, inclusive, o aparecimento das drenagens intermitentes, que se encontravam também ocultas à época, como evidenciam a Figura 7.

O trabalho de campo de 14 de agosto de 2013 contou ainda com o processo de acompanhamento das perfurações. Como já ressaltado, todos os furos atingiram o limite da rocha matriz, representado pelo horizonte saprolítico. Além disso, as amostras deformadas recuperadas nos primeiros centímetros de perfuração (Figura 8), a partir da análise táctil visual, são representadas por solo residual, intergranular, de textura argiloso, plástico, de coloração vermelho escuro, típico de origem basáltica.

Figura 7 – Foto evidenciando vista geral da área e ausência de pontos de surgência de água e/ou drenagens superficiais em agosto de 2013



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 8 – Processo de perfuração a trado mecânico e recuperação de amostras deformadas, no detalhe, solo de coloração vermelha e textura argilosa em agosto de 2013



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

3.3. Avaliação das imagens orbitais

Foram analisadas 3 (três) imagens orbitais sobrepostas com série temporal em 2006, 2009 e 2013 (figuras de 9 a 11, respectivamente). De acordo com a Figura 9, a área apresentou-se sem modificações superficiais nas micro-feições do relevo. A exceção são linhas visíveis paralelas à declinação do loteamento, que representam, provavelmente, estruturas de manejo que visam à redução da velocidade do escoamento superficial da água, com o objetivo de evitar perdas de solo durante a prática agrícola, que se observa, nesse caso, com aparente cultivo de hortaliças.

Em 2009 (Figura 10) é possível observar a presença de linhas tangenciais à declinação do terreno, localizadas no limite oeste do loteamento e que anteriormente não estavam presentes, como pode ser visto na Figura 9. Tais linhas, por possuir formas retilíneas levemente encurvadas para leste, em direção à área mais baixa e plana à jusante, representam trincheiras ou valas escavadas, supostamente para fins de drenagem de águas pluviais que saturavam superficialmente e constantemente os solos durante períodos chuvosos, além de uma área sujeita a alagamentos periódicos, mostrado na Figura 10, mas também identificada em campo.

Figura 9 – Imagem orbital de julho de 2006 da área de estudo mostrando a área do futuro loteamento ocupada por cultivo agrícola, provavelmente hortaliças, sem grandes modificações no relevo

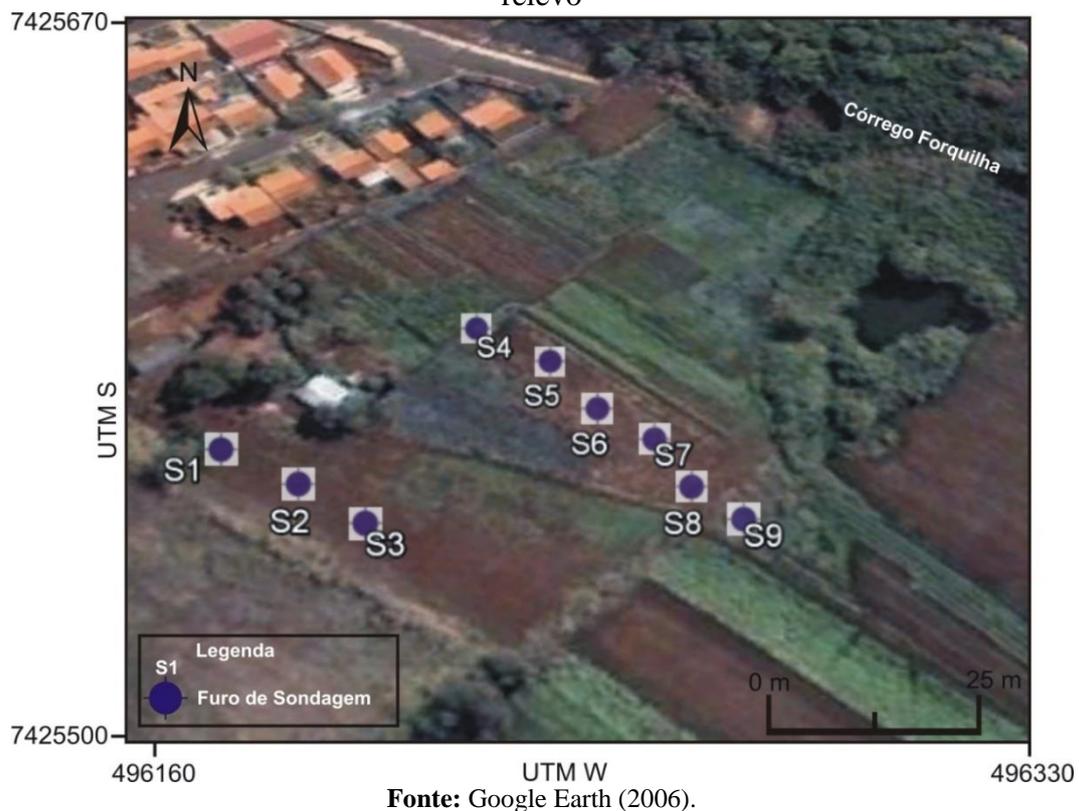
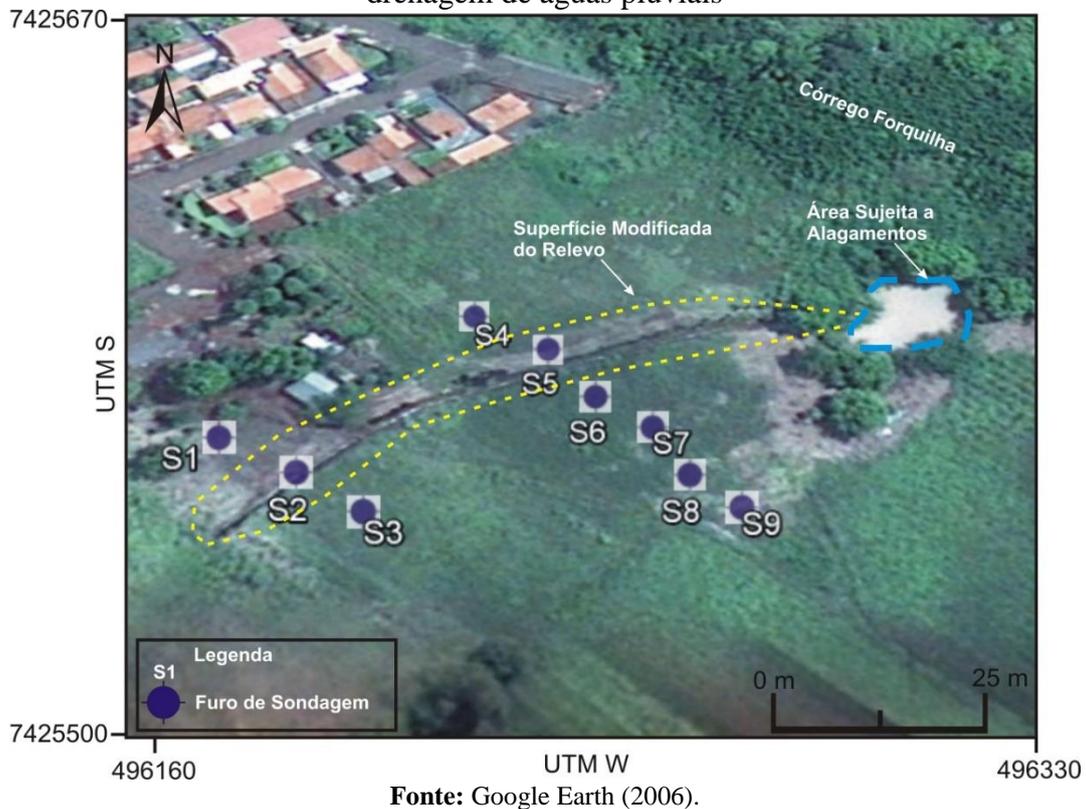
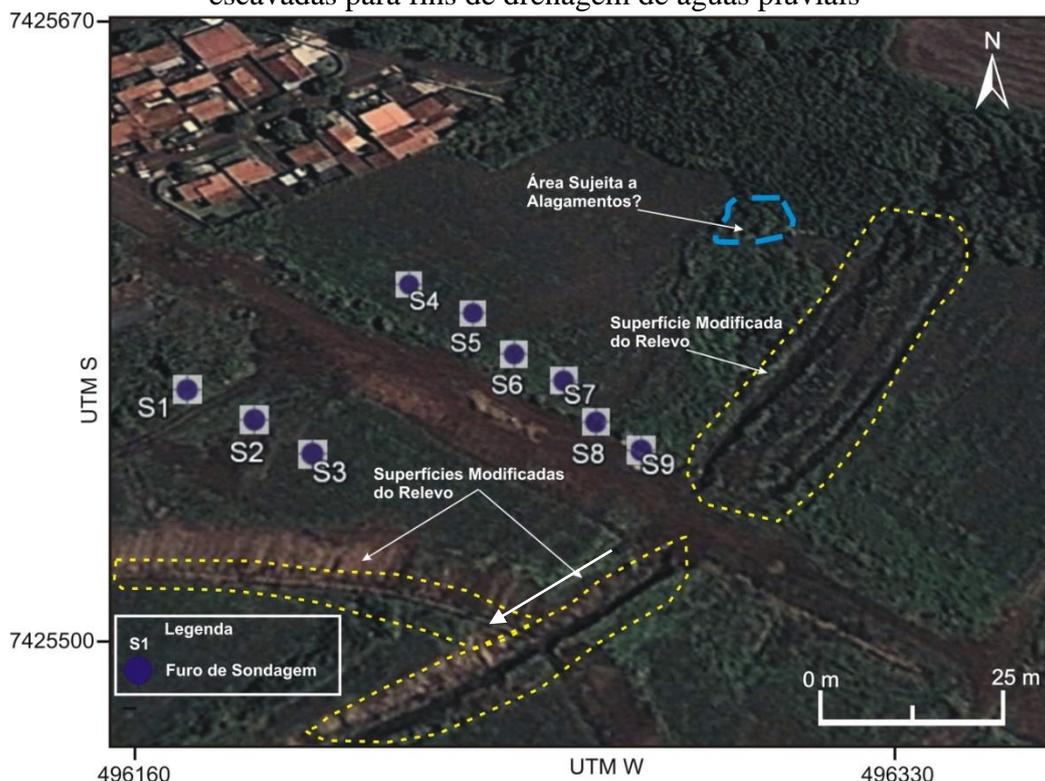


Figura 10 – Imagem orbital da área de estudo de outubro de 2009 com modificações no relevo, com destaque para trincheira ou valas escavadas (linhas pontilhadas em amarelo) para fins de drenagem de águas pluviais



Na análise efetuada para o ano de 2013, observaram-se novas modificações do terreno (Figura 5). Desta vez, as trincheiras localizadas no limite oeste da superfície não estão mais visíveis, como constatou-se na Figura 10, provavelmente aterradas mecanicamente, enquanto surgem novas trincheiras na parte central do terreno, que visam, provavelmente, assim como anteriormente citado, a drenagem das águas pluviais. Além das trincheiras tangenciais, também foram constatadas escarificações subparalelas e seguindo a declinação do terreno, de modo a conduzir às águas pluviais para a trincheira à jusante.

Figura 11 – Imagem orbital de março de 2013 mostrando a área de estudo com modificações acentuadas no relevo. Em destaque, escarificações e trincheiras (linhas pontilhadas em amarelo) escavadas para fins de drenagem de águas pluviais



Fonte: Google Earth (2013).

O relevo a montante da área avaliada possui elevação proeminente, devido a presença de maciço rochoso, apresentando reduzida ou ausência total de camadas de solo até seu limite nordeste. Este maciço, composto por rochas basálticas, é resultante do processo de resistência ao intemperismo que atingiu o entorno, ocasionando as diferenças de cotas, que podem atingir cerca 40 m entre o topo do maciço e os locais próximos às drenagens, segundo dados retirados do SRTM MNT disponíveis em rede (NASA, 2020).

Este condicionante morfológico provoca o rápido escoamento superficial das águas pluviais e em períodos de elevada precipitação, leva à rápida saturação subsuperficial dos solos à jusante do maciço rochoso.

A Figura 12 mostra as linhas indicativas, em azul, de direção do fluxo superficial da água, o talude formado pelo grande gradiente altimétrico entre as cotas e o afloramento basáltico, identificado nesse caso a partir das campanhas de campo e pela diferença de cor entre os atributos do solo na imagem orbital. Também é possível observar a ausência de vegetação arbórea em toda a extensão do maciço, que poderia minimizar o processo descrito anteriormente.

Figura 12 – Imagem com a delimitação em vermelho do maciço rochoso e ilustrações do sentido de fluxo superficial e exposição da rocha basáltica

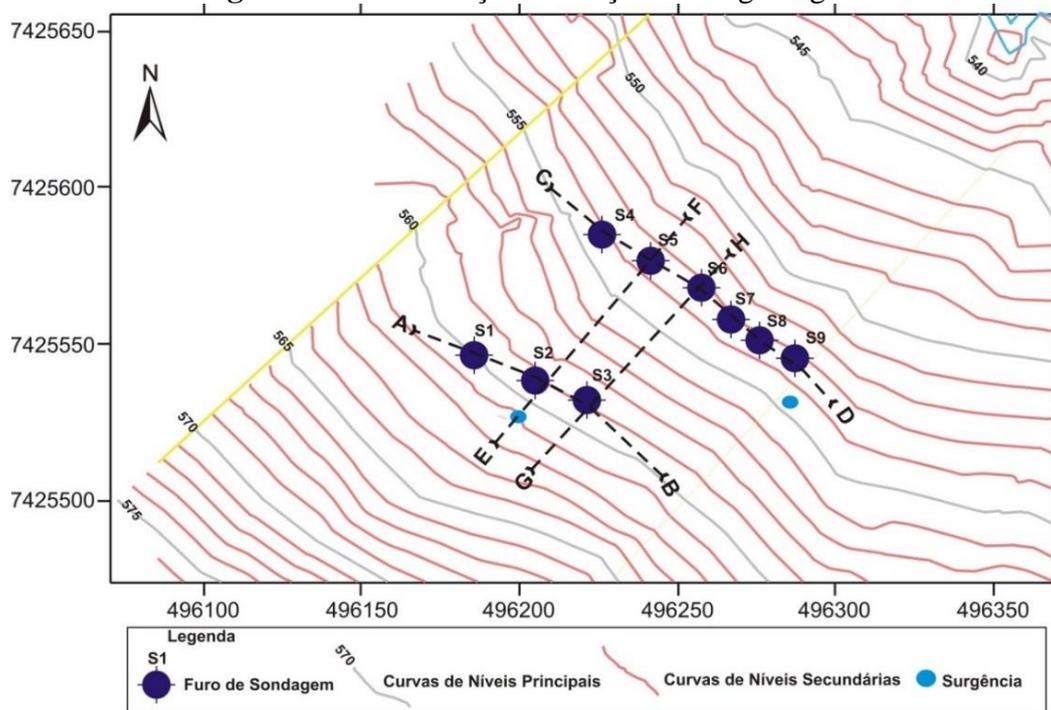


Fonte: Google Earth (2013).

3.4. Avaliação hidrogeológica

Os dados geotécnicos das sondagens e o modelo conceitual hidrogeológico do terreno envolvendo o cálculo do potencial hidráulico, permitiram a confecção de 4 seções hidrogeológicas, demonstradas na Figura 13, divididas em A-B, C-D, E-F e G-H.

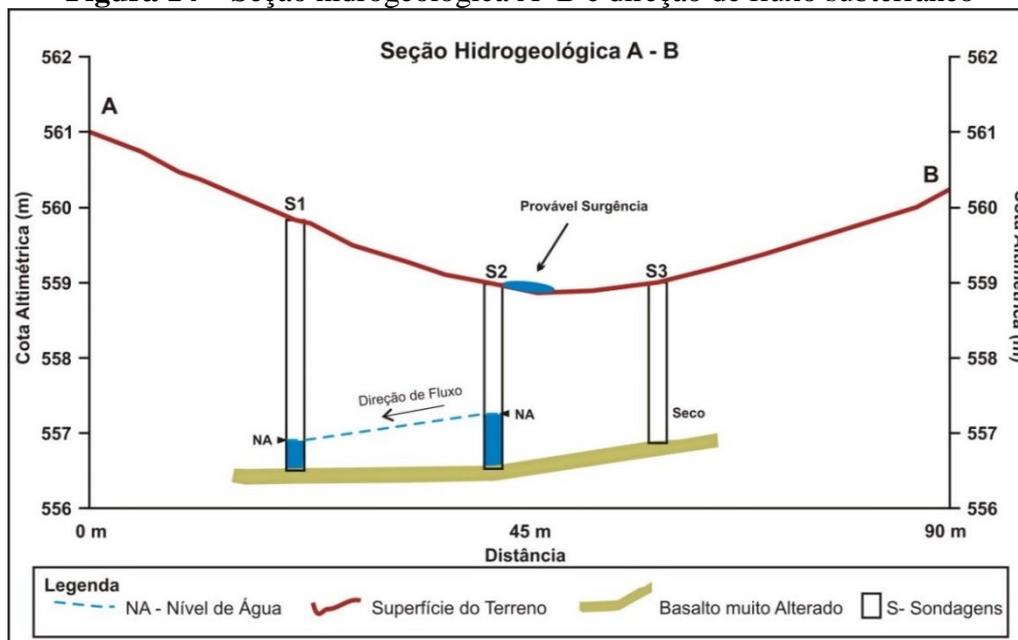
Figura 13 – Localização das seções hidrogeológicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

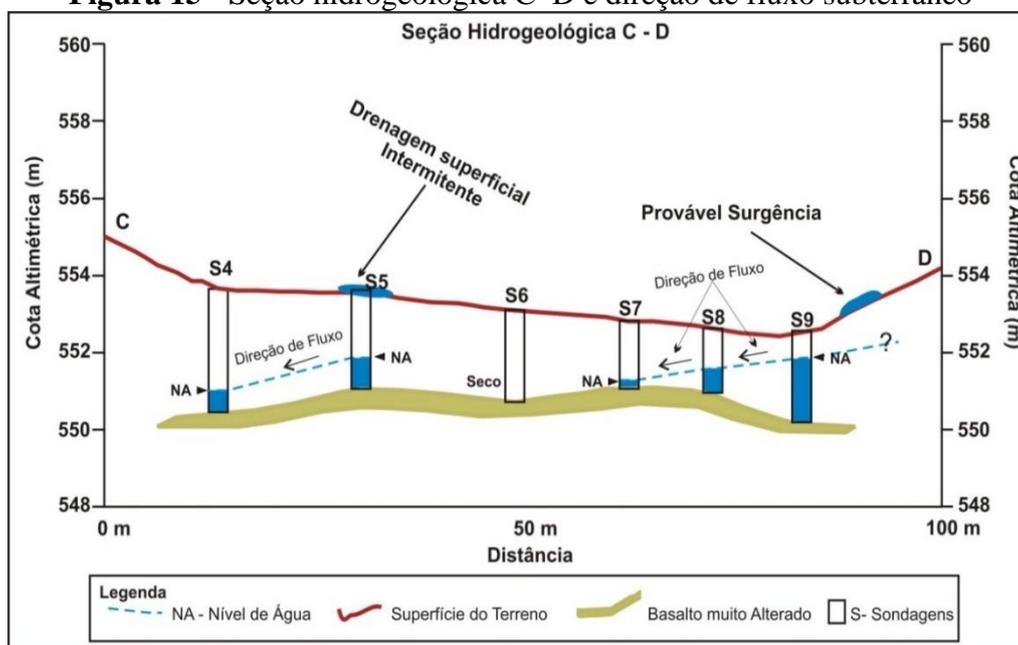
As Figuras 14 e 15 mostram o comportamento do potencial hidráulico da superfície freática, ao longo das seções hidrogeológicas de sentido aproximado NW-SE.

Figura 14 – Seção hidrogeológica A-B e direção de fluxo subterrâneo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 15 - Seção hidrogeológica C-D e direção de fluxo subterrâneo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Na seção hidrogeológica A-B (Figura 14) *a priori*, é possível observar a sondagem S3 sem a presença de água (seco) enquanto o furo S2, mais próximo da provável surgência subsuperficial de água, encontra-se com potencial hidráulico mais elevado, provocando o direcionamento do fluxo subterrâneo para a sondagem S1, ao contrário dos modelos hidrogeológicos conceituais aplicados para aquíferos livres que apresentam porosidade intergranular.

Portanto, em aquíferos livres, em um processo natural, era esperado que a superfície freática acompanhasse a conformação da superfície do terreno e dessa forma, o fluxo subterrâneo se orientaria

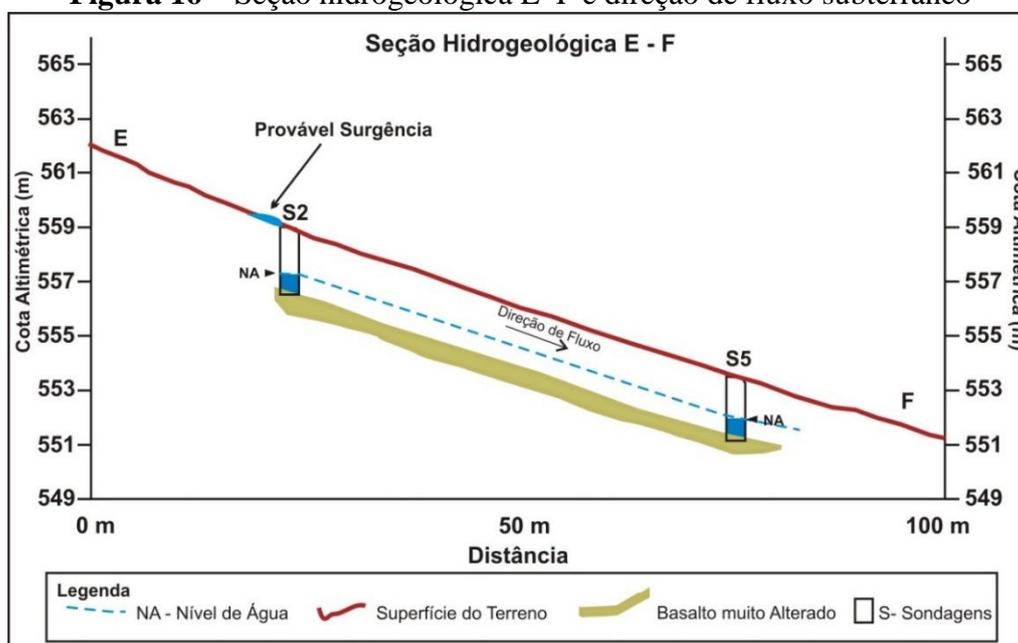
da parte mais elevada topograficamente (maior potencial) para a de menor elevação (menor potencial), ou seja, o sentido original natural de fluxo subterrâneo seria de S1 para S2.

O mesmo fenômeno pode ser observado na seção C-D (Figura 15) para o alinhamento das sondagens de S4 a S9, onde a direção de fluxo subterrâneo orienta-se: primeiro, do furo S5 para S4 e segundo, da sondagem S9 para S7. Nota-se ainda que S9 está localizado a jusante do segundo ponto provável de surgência de água e encontra-se praticamente na mesma elevação que S8; porém o nível de água orienta-se para o furo S7, com maior elevação topográfica, até desaparecer por completo na sondagem S6 (seco).

A conformação apresentada nestas seções hidrogeológicas (Figuras 14 e 15) sugere a influência das águas oriundas da saturação subsuperficial do terreno como sendo determinantes para as surgências de água verificadas em determinados períodos do ano na área. Em períodos de precipitação mais elevada, o fluxo de água superficial orientado pelas drenagens intermitentes infiltra-se na área do terreno elevando o potencial hidráulico.

Com o objetivo de melhorar a análise de alguns dos processos descritos anteriormente, foram traçadas ainda as seções E-F e G-H apresentadas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 – Seção hidrogeológica E-F e direção de fluxo subterrâneo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

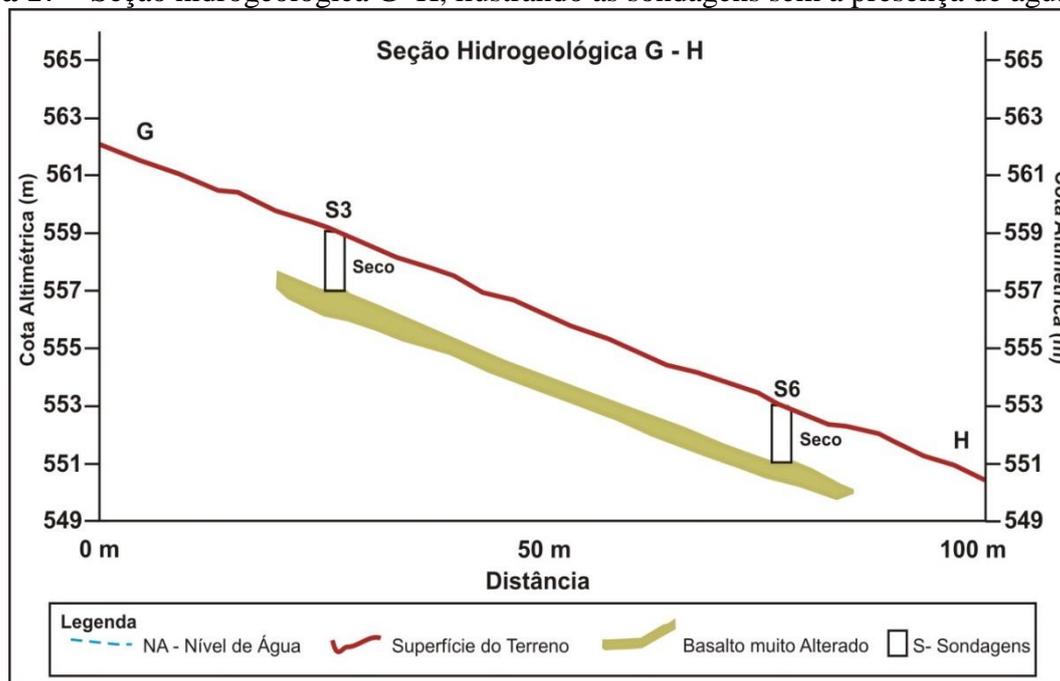
A seção E-F (Figura 16) demonstra que o sentido de fluxo subterrâneo é direcionado da cota de 557 m para a cota 552 m, o que poderia supor a existência de área de recarga nas porções mais elevadas do terreno, conseqüentemente suprindo o aquífero com água provida de infiltração. Contudo, a mesma seção mostra que o fluxo segue de forma suave a conformação do terreno, sem evidenciar áreas de intersecção do fluxo subterrâneo de água com o relevo, o que levaria à surgências naturais de água ou nascentes, compondo o fluxo de base do aquífero.

A Figura 17 mostra a seção hidrogeológica G-H, localizada paralela e distante apenas 18 metros (máximo) da seção E-F (Figura 16) formada pelo alinhamento das sondagens S3 e S6, ambas secas.

Tal situação demonstra a inexistência de conexão hidráulica entre as seções, o que não condiz com sistemas hidrogeológicos formados por aquíferos livres de porosidade intergranular, relativamente homogêneos e isotrópicos. Desta forma, a seção E-F (Figura 16), representa o fluxo da drenagem intermitente, que após sua saturação, libera lentamente a água que se acumula em períodos de precipitação elevada para o material poroso argiloso do entorno das linhas de drenagem mapeadas

e identificadas através de imagens orbitais como possíveis trincheiras e/ou cavas escavadas no passado e aterradas em 2013, como foi constatado em campo.

Figura 17 – Seção hidrogeológica G–H, ilustrando as sondagens sem a presença de água (seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

4. CONCLUSÕES

A imagem orbital de 2006 mostra que na área de estudo ocorriam atividades agrícolas e que em períodos de maior precipitação, o fluxo contínuo de escoamento superficial provavelmente afetava a produtividade com prejuízos econômicos além de impactos ambientais devido à constante perda do solo.

Assim, com o levantamento histórico das imagens orbitais foi possível verificar tentativas de se promover alterações superficiais para drenar a saturação superficial do terreno provocado pelo rápido acúmulo de águas oriundas de precipitação nas porções mais elevadas topograficamente, onde se observou a existência de afloramento rochoso que direciona rapidamente o acúmulo de águas pluviais para as partes mais baixas do relevo.

Dessa forma, a água subterrânea acumulada nas drenagens subsuperficiais aterradas foi condicionada às modificações realizadas ao longo do tempo histórico na superfície do relevo, provavelmente na tentativa de drenar o terreno devido à saturação superficial pluvial, não havendo qualquer ligação com os fluxos ou surgências naturais de sistemas aquíferos, como também ficou comprovado a partir dos estudos do potencial hidráulico apresentado nas seções hidrogeológicas.

O estudo da potencialidade hidráulica mostrou que a direção de fluxo das águas subterrâneas é oposta as equipotenciais, não condizente com os modelos hidrogeológicos para aquíferos livres de porosidade intergranular. Desse modo, a inversão de potencial se dá pelo acúmulo de água ao longo das linhas de drenagens artificiais, que após saturadas, liberam lentamente seu fluxo lateralmente, no sentido NW e parcialmente em direção às cotas mais baixas do terreno, em sentido NE.

A partir das análises apresentadas, conclui-se que as surgências sazonais de água subsuperficial e a ocorrência de drenagens intermitentes no local estudado não são de origem de aquífera, mas representam a saturação do terreno provocada por águas pluviais e por modificações do relevo e, portanto, de origem superficial, condicionada diretamente às ocorrências de precipitações que atingem sazonalmente a área investigada.

NOTAS

¹ O levantamento topográfico na área de estudo foi realizado por empresa especializada em agrimensura.

REFERÊNCIAS

- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.
- BRANCO, C. J. M da C.; MIGUEL, M. G.; PINESE, P. P.; TEIXEIRA, R S. Implantação do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica no Campus da UEL. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 11, 1998, Brasília. **Anais [...]**. Brasília/DF: ABPV, v. II, 1998.
- BRASIL. **Lei n° 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n°s 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n°s 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória n° 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 28 abr. 2017.
- CABRAL, J. P. S. Movimento das águas subterrâneas. *In: FEITOSA A. C. et al. (Org.) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 77-91.
- CELLIGOI, A.; SANTOS, M. M.; VIANNA, T. R. Análise e interpretação do gradiente hidráulico do aquífero freático em uma área na região sul de Londrina-PR. **Geografia**, Londrina, v. 10, n. 1, 2001, p.79-87.
- DOMINGO, N. D. S.; REFSGAARD, A.; O. PALUDAN, M. B. Flood analysis in mixed-urban areas reflecting interactions with the complete water cycle through coupled hydrologic-hydraulic modelling. **Water Science & Technology**, v. 62, n. 6, 2010, p. 1386–1392. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2010.365>.
- FETTER, C. W. **Applied Hidrogeology**. 3 ed. Prentice Hall: New Jersey, 1988. 691 p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall inc., 1979. 604 p.
- HUBBERT, M.K. The Theory of Ground Water Motion. **Journal of Geology**, v. 48, n. 8, p. 785-944, 1940. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/30057101>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. **Atlas Climático do Paraná**. 2019. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=595>. Acesso em: 16 mai. 2020.
- ITCG - INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS. **Limites Municipais do Estado do Paraná**. Material Vetorizado com base nas Cartas Topográficas na escala de 1:250.000. 2013. Disponível em: <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=47>. Acesso em: 28 jul. 2013.
- LASTORIA, G. **Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul**. 2002. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002. 133 p.
- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro/Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981. 450 p.

MELLO, J. S. **Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal, RN**. 1995. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. 220 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental**. 1997. 2 v. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997. 255 p.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná. **Mapa geológico do Estado do Paraná na escala de 1:250.000**. Curitiba-PR: MME / DNPM / Gov. do Estado do Paraná, 2001.

NASA. **Shuttle Radar Topography Mission**, 2020. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>. Acesso em: 15 mai. 2013.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421 p.

PASTORE, E. L.; FONTES, R. M. Caracterização e classificação de solos. *In*: OLIVEIRA, S.A. M.; BRITO, N. A. (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 197-210.

REBOUÇAS, A. C. Importância da água subterrânea. *In*: FEITOSA A. C. *et al.* (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM/ LABHID, 2008, p. 13-29.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B, CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa. 356 p.

SOLDERA, B. C. **Monitoramento dos níveis freáticos do aquífero Bauru (Formação Adamantina) no município de Assis – SP**. Rio Claro: ABAS, 2017. 88 p.

STIPP, N. A. F. Principais tipos de solos da bacia do rio Tibagi. *In*: MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E.; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. (Ed.). **A bacia do rio Tibagi**. Londrina: UEL, 2002, p. 39-44.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Shuttle Radar Topography Mission**. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/>. Acesso em: 15 mai. 2020.

VOISIN, J.; COURNOYER, B.; VIENNEY, A.; MERMILLOD-BLONDIN, F. Aquifer recharge with stormwater runoff in urban areas: Influence of vadose zone thickness on nutrient and bacterial transfers from the surface of infiltration basins to groundwater. **Science of The Total Environment**, v. 1, 2018, p. 637-638. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.094>.

Data de submissão: 29.06.2018

Data de aceite: 10.06.2020

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.