

AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA REGIÃO ENTRE OS RIBEIRÕES DO TORTO E SOBRADINHO, ÀS MARGENS DA BR-020, NORDESTE DA CIDADE DE BRASÍLIA, D.F.

Rinaldo Afrânio Fernandes¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo - Na área investigada neste estudo, compreendida entre os ribeirões do Torto e Sobradinho, a nordeste de Brasília, D.F., os recursos hídricos subterrâneos representam a principal fonte para atendimento das demandas de uso da água, caracterizadas pelo modelo de ocupação urbana, predominante na forma de condomínios. A alternativa para abastecimento de água nesta área tem sido a instalação de poços tubulares profundos que, na maioria das vezes, são construídos sem qualquer controle e não contam com os cuidados técnicos necessários para a proteção dos aquíferos. Além disso, a falta de conhecimento sobre a dinâmica das águas subterrâneas contribui para que este quadro se perpetue. Neste estudo foi feita a caracterização do quadro hidrogeológico geral da área investigada, com o intuito de fornecer subsídios para estudos futuros e de promover uma estratégia sustentável de exploração e proteção dos mananciais subterrâneos locais. Foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual que, adaptado em um modelo computacional, permitiu descrever o comportamento das águas subterrâneas na área em questão, as direções de escoamento dentro das unidades aquíferas e o grau de conectividade entre elas, bem como identificar as principais áreas de recarga e descarga do sistema hidrogeológico local.

Abstract - In the area considered in this study, defined between the Torto and Sobradinho creeks, northeast of Brasilia, Distrito Federal, the groundwater resources represent the main source for attending water usage demands, characterized by the local urban occupation model, predominantly in the form of condominiums. The alternative for water supply in this area has been the installation of deep tubular wells, which, in most cases, are built without any form of control or attention to technical guidelines, necessary in order to protect the aquifers. Besides that, the lack of knowledge regarding the groundwater dynamics contributes to the perpetuation of this scenario. The objective

¹ M.Sc, Engenheiro Geólogo, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. E-mail: rinaldo@desa.ufmg.br - Endereço: DESA - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG - Av. do Contorno, 842, 7º Andar - Centro - Belo Horizonte - MG - CEP 30.110-060.

² Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. E-mail: celso@desa.ufmg.br - Endereço: DESA - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG - Av. do Contorno, 842, 7º Andar - Centro - Belo Horizonte - MG - CEP 30.110-060 - Tel.: (31) 3238-1884 - Fax.: (31) 3238-1879.

of this study was to characterize the general hydrogeological situation of the mentioned area, with the intention of providing a basis for future studies and promoting a strategy for sustainable and safe exploitation of the local groundwater resources. A conceptual hydrogeological model was developed and adapted into a respective computational model, capable of describing the hydrodynamic behavior of the groundwater in the studied area, the directions of the groundwater flow within of the aquifer units, the degree of hydraulic connection among them, as well as to identify the main areas of recharge and discharge of the local hydrogeological system.

Palavras-Chave - Modelo Hidrogeológico Computacional; *Visual-ModFlow*; Hidrogeologia da Região de Sobradinho; Distrito Federal.

INTRODUÇÃO

A área investigada neste estudo localiza-se às margens da BR-020, a nordeste da cidade de Brasília, porção oeste da cidade satélite de Sobradinho, Distrito Federal. Em termos hidrográficos, são reconhecidas duas principais bacias, quais sejam: a bacia do ribeirão Sobradinho, que drena o núcleo urbano da cidade homônima; e, a bacia do ribeirão do Torto, que drena a parte nordeste da cidade de Brasília (Figura 1). Nesta área, os recursos hídricos subterrâneos representam a principal fonte para atendimento das demandas de uso da água.

As maiores demandas são atribuídas ao modelo de ocupação urbana, predominante, na região, na forma de condomínios. Estes condomínios vêm se desenvolvendo em áreas fora do alcance do Sistema Integrado de Abastecimento da CAESB (Companhia de Águas e Esgoto de Brasília). Dessa forma, a única alternativa para abastecimento tem sido a instalação de poços tubulares profundos, que, na maioria das vezes, são construídos sem qualquer controle e não contam com os cuidados técnicos necessários. Isto reflete a falta de critérios na captação das águas subterrâneas, o que pode repercutir diretamente nas disponibilidades hídricas do sistema aquífero local.

As disponibilidades hídricas são controladas por dois fatores fundamentais, quais sejam: a qualidade e a quantidade. Em termos de qualidade, as maiores ameaças são os poços construídos sem os cuidados técnicos necessários (*i.e.* falta de revestimento, falta de proteção sanitária). Isto pode favorecer a poluição dos aquíferos pela infiltração de efluentes diversos (*i.e.* domésticos e industriais). Em termos de quantidade, as ameaças são provenientes da exploração descontrolada, como também, pelo comprometimento da área de recarga do sistema aquífero local.

O escopo deste estudo foge às considerações sobre os problemas de quantidade e qualidade do sistema aquífero local. O estudo, ora apresentado, pretende relatar o quadro hidrogeológico geral da área investigada, avaliando as condições de fluxo das águas subterrâneas e identificando as

principais zonas de recarga e descarga do sistema aquífero local, com o intuito de fornecer subsídios para estudos futuros e, quiçá, para promover uma estratégia sustentável de exploração e proteção das disponibilidades hídricas dos mananciais subterrâneos, para atendimento das demandas crescentes de uso, no local.

Para tanto, será utilizado o aplicativo computacional *Visual-ModFlow* (GUIGUER & FRANZ, 1998), o qual tem a capacidade de acomodar, numericamente, todas as condições espaciais e temporais estabelecidas, bem como, os parâmetros hidrogeológicos que caracterizam o comportamento hidrodinâmico local.

A escolha do aplicativo *Visual-ModFlow* para a realização deste estudo deve-se ao fato de se tratar de um modelo amplamente utilizado pela comunidade técnica em problemas de fluxo subterrâneo, contando com pré e pós-processadores gráficos que auxiliam na entrada e saída de dados, facilitando a interpretação de resultados.

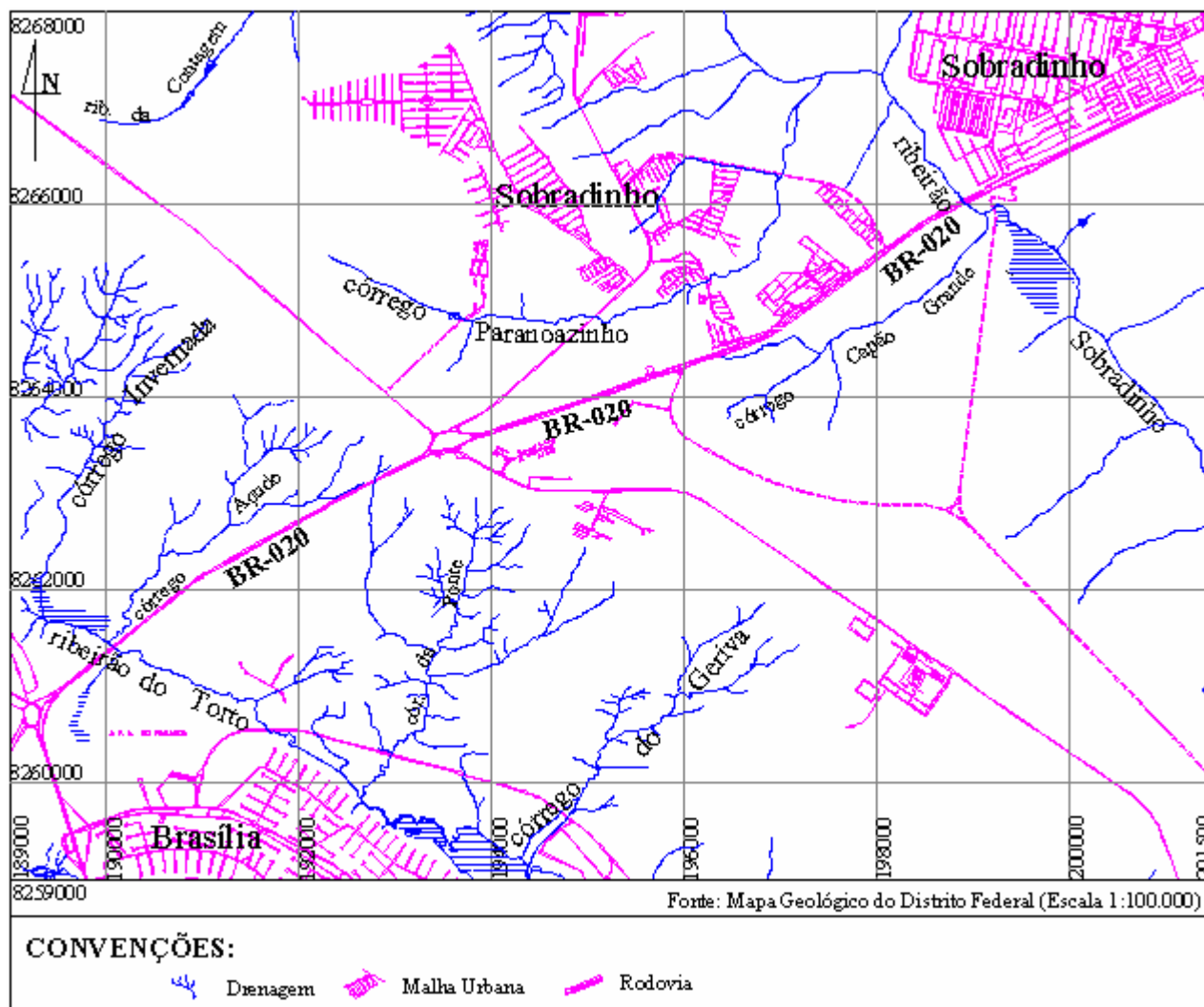


Figura 1 – Mapa de localização da área investigada (modificado de SEMATEC/IEMA, 1999).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A caracterização da área, em termos das condições geológicas, geomorfológicas e topográficas, constitui uma tarefa essencial para o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico confiável, que possa representar o comportamento hidrodinâmico do sistema aquífero local.

Sendo assim, apresenta-se, a seguir, uma breve caracterização destes elementos condicionantes, mas suficiente para dar suporte à descrição de um modelo hidrogeológico conceitual e para implementar um modelo hidrogeológico computacional.

Geologia

A área investigada neste estudo insere-se no contexto geológico regional da porção central da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília. Neste contexto, são reconhecidas quatro unidades litológicas, quais sejam: os grupos, Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí (*e.g.* SEMATEC/IEMA, 1999). Estas unidades regionais são superpostas por importantes sistemas de falhas (empurrões e cavalgamentos) e de dobramentos, com nítida vergência para leste, em direção ao Cráton do São Francisco.

A partir deste contexto regional, observa-se que a área de interesse insere-se no domínio geológico do Grupo Paranoá. Esta seqüência corresponde a um conjunto de rochas psamo-pelito-carbonatada que se estende desde o Distrito Federal até o Estado de Goiás (*e.g.* FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1998). Na região do Distrito Federal, o Grupo Paranoá engloba, como litotipos característicos, conglomerados, ardósias, metarritmitos, calcáreos e dolomitos onde, em geral, as feições sedimentares primárias estão bem preservadas.

Nesta região, a seqüência geológica é denominada, informalmente, por letras-código que representam, da base para o topo, onze unidades estratigráficas reconhecidas, quais sejam: **SM, R1, Q1, R2, Q2, S, A, R3, Q3, R4, PPC** (*e.g.* FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1998). Contudo, no âmbito da área investigada, ocorrem apenas cinco unidades, representativas do final da seqüência do Grupo Paranoá, quais sejam: as unidades **A, R3, Q3, R4 e PPC**.

Cabe dizer ainda que, recobrando esta seqüência estratigráfica local, ocorre um latossolo vermelho-amarelo de textura arenosa, e denominado de **Unidade P1**. Na área considerada, este tipo de solo é resultante da alteração dos litotipos das unidades **Q3 e R3**. A descrição litológica destas unidades estratigráficas é apresentada a seguir (*e.g.* FREITAS-SILVA & CAMPOS, 1998). Já a distribuição espacial destas unidades pode ser observada na Figura 2.

Unidade A (Ardósia): esta unidade é constituída por ardósias homogêneas, de cor cinza esverdeada, que passam a tons vermelhos característicos com a alteração intempérica. Neste conjunto, são observadas duas foliações penetrativas que representam clivagens ardosianas. Sua espessura é de difícil estimativa em virtude do intenso dobramento, sendo considerada da ordem de

70 metros. As rochas que compõem esta unidade são capeadas por um espesso latossolo argiloso. A natureza do contato entre esta unidade e a **Unidade R3** é transicional, sendo marcada por intercalações siltosas, até predominar os termos sílticos e arenosos quando se passa para a unidade superior.

Unidade R3 (Metarritmito Arenoso): esta unidade corresponde a um metarritmito arenoso, caracterizado por intercalações de bancos decimétricos a métricos de quartzitos e materiais pelíticos (compostos por metassiltitos e ardósias). Localmente são observados pacotes de até 10 metros de espessura que destacam do conjunto rítmico. A espessura total deste conjunto pode alcançar 90 metros. Esta unidade se subdivide em:

Sub-Unidade R3a - apresenta contato gradacional com a unidade que a sotopõe. Inicia-se por um pacote de metassiltitos argilosos, com níveis de metalamitos em direção ao topo. À medida que os níveis metapelíticos se tornam cada vez mais raros até desaparecem, aumentam os leitos quartzíticos, formando intercalações milimétricas a métricas, passando a predominar no topo da seção a qual termina com um nível espesso de quartzito, denominado de q_1 . O Quartzito q_1 apresenta coloração branca/ocre, granulação fina a média e espessura variável entre 8 e 20 metros.

Sub-Unidade R3b - apresenta contato gradacional sobre o quartzito q_1 , com metassiltitos areno-argilosos que passam para uma seqüência tipicamente rítmica onde se intercalam estratos argilosos, síltico-argilosos, síltico-arenosos, areno-siltosos e arenosos. Os termos mais arenosos se tornam mais importantes em direção ao topo desta subunidade, onde passam a dominar sobre os metapelíticos, culminando com outro nível de quartzito com espessura variando entre 5 e 15 metros, denominado de quartzito q_2 . Este quartzito apresenta colorações variando de branco/ocre até rosado/avermelhado, em função da presença de material pelítico, sua granulação é de fina a média.

Unidade Q3 (Quartzitos Médios): esta unidade é composta por quartzitos brancos, finos, bastante silicificados, ricos em estratificações cruzadas tabulares, acanaladas e do tipo espinha de peixe, além de marcas onduladas assimétricas. Lentes de metarritmitos, com espessuras variando de decimétricas até 10 metros (comumente interceptadas por poços tubulares profundos), ocorrem geralmente próximas à base e ao topo desta sucessão de quartzitos. A espessura deste pacote pode alcançar até 70 metros.

Unidade R4 (Metarritmito Argiloso): esta unidade corresponde a um metarritmito argiloso, composto por intercalações de materiais sílticos e argilosos além de delgados estratos de quartzitos finos rosados a avermelhados. Os níveis arenosos apresentam estruturas do tipo laminações cruzadas, laminações truncadas por ondas e *hummockys*. Esta unidade apresenta espessuras variando de 100 a 150 metros. Seu contato com a **Unidade Q3** é gradacional.

Unidade PPC (Psamo-Pelito-Carbonatada): esta unidade é predominantemente pelítica, com ardósias cinzas e metassiltitos argilosos associados com lentes de mármore finos que podem conter

estruturas algais do tipo estromatólitos colunares e cônicos. São comuns os níveis decimétricos a métricos, lenticulares ou não, de quartzitos médios, grossos e até conglomeráticos, apresentando tonalidades escuras. Apresenta contato transicional com a unidade sotoposta. Sua espessura varia de 120 a 150 metros.

Há que se ressaltar também que, em profundidade, tais unidades apresentam uma conformação angular em seus contatos, com mergulhos entre 15° e 35°, de SW para NE, resultante da tectônica regional que atuou na Faixa Brasília. Para representar estes mergulhos são apresentados dois perfis geológicos, acomodando a topografia local (com exagero de dez vezes) e a distribuição angular aproximada das unidades consideradas (Figura 3).

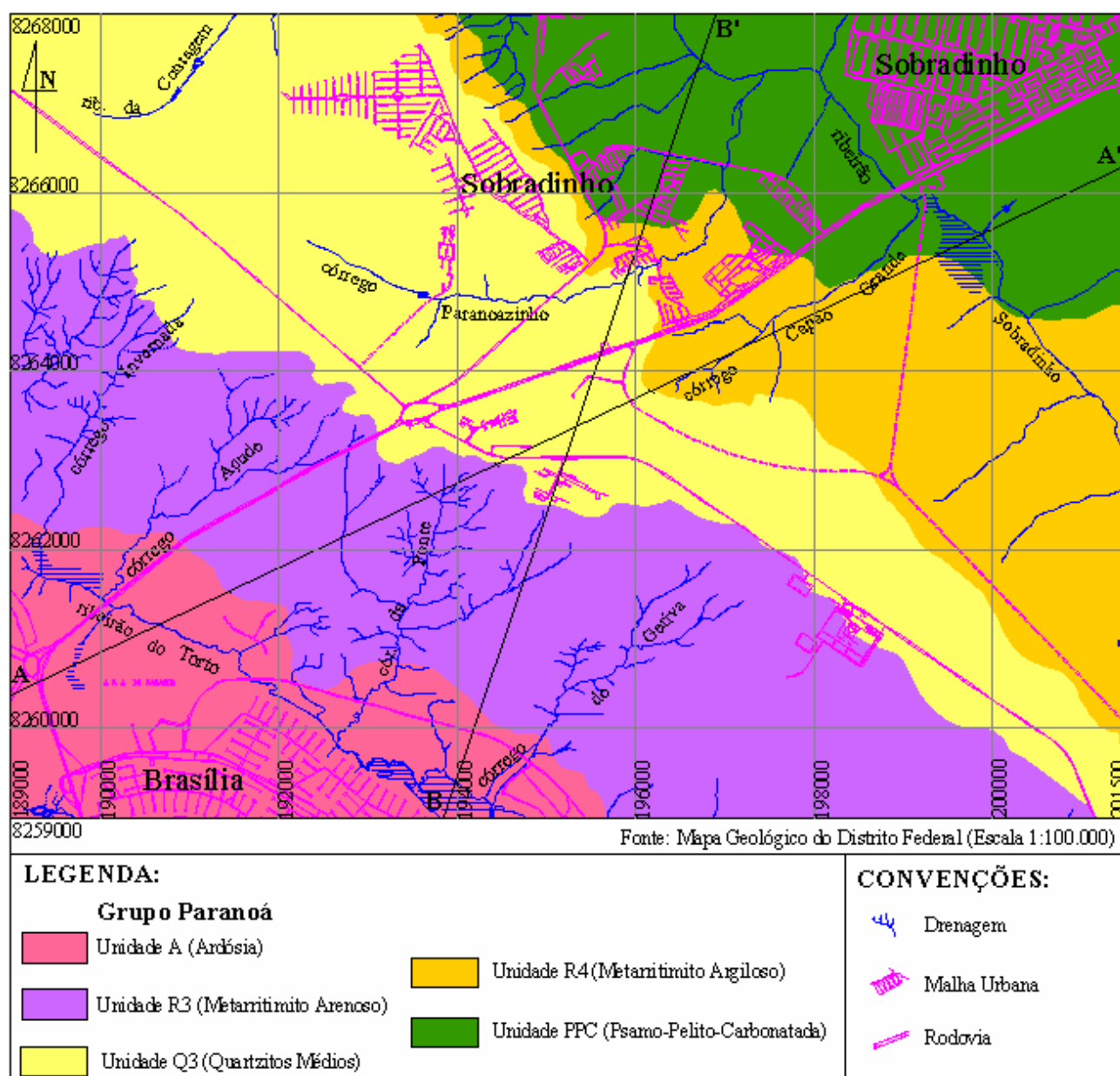


Figura 2 – distribuição espacial das unidades estratigráficas consideradas na área investigada (adaptado de SEMATEC/IEMA, 1999).

Na Figura 3, o Perfil AA' apresenta a distribuição das unidades estratigráficas no sentido de SW pra NE, mostrando a posição dos principais eixos de drenagem (*i.e.* ribeirões do Torto e Sobradinho) e o divisor natural de águas, representado pela Chapada da Contagem. Neste perfil, observa-se ainda que os ribeirões do Torto e Sobradinho correm, aproximadamente, ao longo de cotas semelhantes.

Já o Perfil BB' apresenta a distribuição das unidades estratigráficas no sentido de SSW pra NNE, mostrando o divisor natural de águas (Chapada da Contagem) e a posição do córrego Paranoazinho em relação ao ribeirão do Torto. Neste perfil, observa-se ainda que o córrego Paranoazinho corre a partir de cotas mais elevadas, pois a sua nascente localiza-se nos domínios da Unidade Q3, no alto da chapada.

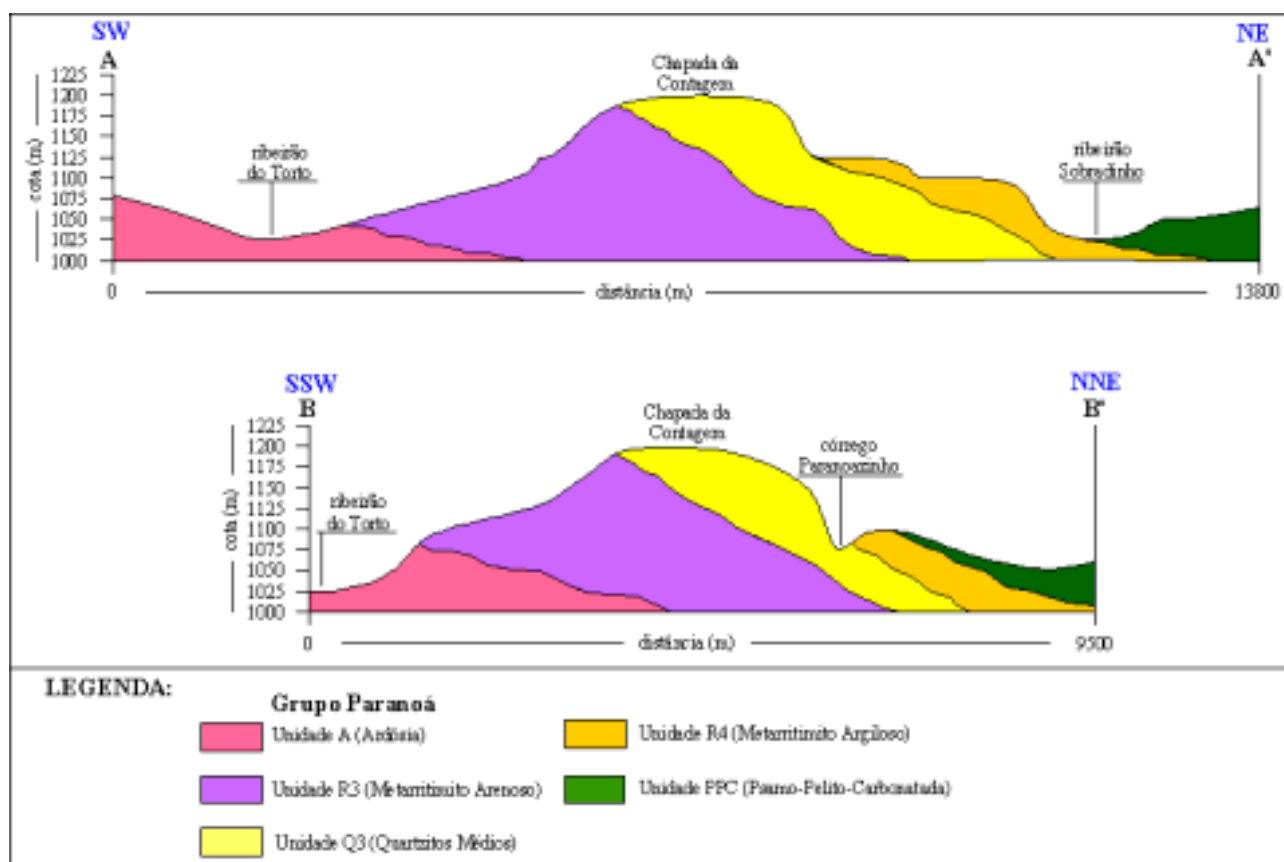


Figura 3 – Perfis geológicos AA' (sentido SW para NE) e BB' (sentido SSW para NNE), mostrando a conformação angular aproximada das unidades estratigráficas, com exagero vertical de dez vezes, e a distribuição dos principais eixos de drenagem (ribeirões do Torto e Sobradinho, e córrego Paranoazinho) e do divisor natural de águas (Chapada da Contagem).

Geomorfologia e topografia

Dentro do contexto geomorfológico da área investigada, são reconhecidas três unidades principais, quais sejam: Região de Chapada; Área de Dissecação Intermediária; e, Região Dissecada de Vale (e.g. MARTINS & BAPTISTA, 1998).

A Região de Chapada, representada na área pela Chapada da Contagem, desenvolve-se sobre os litotipos das unidades **R3** e **Q3** e é recoberta por um latossolo vermelho (**Unidade P1**). Além disso, caracteriza-se por uma topografia plana a suavemente ondulada, acima da cota de 1200 m.

Esta chapada alinha-se segundo a direção **NW/SE** e se constitui num divisor de águas natural. Neste sentido, observa-se que, a sudoeste, ocorre a bacia de drenagem do ribeirão do Torto e, a nordeste, a bacia de drenagem do ribeirão Sobradinho (Figura 4).

A Área de Dissecação Intermediária corresponde à zona fracamente dissecada, a qual é drenada por pequenos córregos, modeladas sobre os metarritimitos arenosos da **Unidade R3**, e, parcialmente, sobre os metarritimitos argilosos da **Unidade R4**. A topografia varia entre as cotas de 1050 e 1200 metros (Figura 4).

A Região Dissecada de Vale, por sua vez, corresponde às depressões com substrato representado por diferentes rochas (unidades **A** e **PPC**), situadas ao longo dos principais eixos de drenagem da área (*i.e.* ribeirões do Torto e Sobradinho). Nesta região, as cotas topográficas variam entre 1025 e 1050 metros (Figura 4).

Neste contexto, observa-se ainda que os rebordos e escarpas são controlados pelo contato brusco entre os litotipos das unidades estratigráficas presentes na área. Portanto, a geologia é o principal condicionante das variações de altitude, incisão de vales, densidade e forma da rede de drenagem, e, principalmente, da evolução morfodinâmica da área.

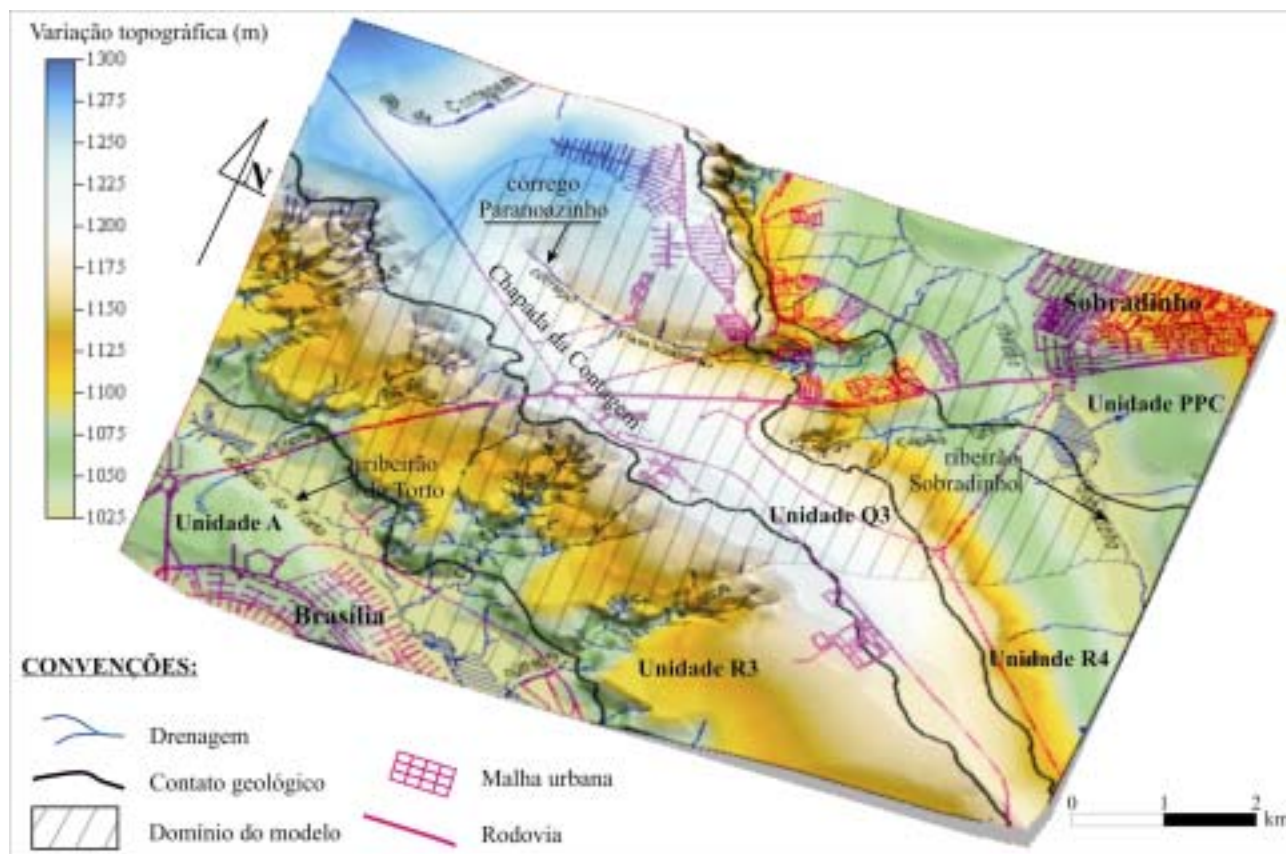


Figura 4 – Contexto geomorfológico da área investigada, mostrando a influência da geologia e a diferenciação altimétrica por cores.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

O modelo hidrogeológico conceitual tem o intuito de caracterizar, preliminarmente, o cenário hidrodinâmico da área investigada. Para tanto, torna-se necessário entender os elementos que controlam o fluxo das águas subterrâneas a partir das características geológicas, geomorfológicas, topográficas, hidrográficas e climatológicas.

Definição do modelo conceitual

Em termos regionais, os sistemas aquíferos existentes na área de influência deste estudo estão situados na Província Hidrogeológica Brasileira denominada de Escudo Central, que inclui, parcialmente, a Faixa de Dobramentos Brasília, se estendendo para Norte/Noroeste, ocupando a Faixa de Dobramentos Paraguai/Araguaia, e para Sul do Cráton Amazônico.

Assim, como em qualquer região com geologia caracterizada por rochas ígneas e/ou metamórficas recobertas por solos, esta província é amplamente dominada por aquíferos fissurados, cobertos por um manto de intemperismo, com características e espessuras variáveis. Dessa forma, na área investigada, podem ser diferenciados dois grandes domínios aquíferos, que correspondem à classificação regional dos reservatórios de água subterrânea. Quais sejam: o Domínio Aquífero Poroso e o Domínio Aquífero Fraturado (*e.g.* SEMATEC/IEMA, 1999).

Localmente, o Domínio Aquífero Poroso é representado pelos solos de alteração das rochas e pelos materiais acumulados em calhas de drenagens. A espessura pode variar de poucos centímetros a até 25 metros, com ampla predominância de espessuras entre 15 e 25 metros, grande extensão e continuidade lateral. A unidade aquífera relacionada a este domínio, denominada de **Unidade P1**, compõe o sistema de águas subterrâneas rasas e é classificado como livre e/ou suspenso.

Os aquíferos do Domínio Fraturado são caracterizados pelos meios rochosos onde os espaços ocupados pela água são representados por planos de fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Além disso, apresentam extensão lateral variável, são fortemente anisotrópicos e heterogêneos, compondo o sistema de águas subterrâneas profundas. O limite inferior deste domínio ocorre a aproximadamente 250 metros de profundidade, pois em níveis maiores há uma tendência de selamento dos planos abertos, devido à pressão litostática. Na área de interesse, os aquíferos do Domínio Fraturado são representados pelas unidades **A**, **R3**, **Q3**, **R4** e **PPC**, pertencentes ao Sistema Aquífero Paranoá e, geologicamente, correlacionáveis às unidades estratigráficas homônimas do Grupo Paranoá.

Sob o aspecto de precipitação pluviométrica a área investigada apresenta um regime de chuvas característico da região dos cerrados, ou seja, com duas estações bem definidas, o verão chuvoso e o inverno seco. A média anual da precipitação ocorre entre 1400 e 1500 mm/ano. Neste contexto, estima-se que, em média, cerca de 15% do volume de precipitação pode infiltrar na zona

vadosa dos aquíferos porosos (Recarga Superficial), sendo que cerca de 75% deste valor efetivamente alcança a zona saturada (Recarga Efetiva), recarregando os sistemas aquíferos (e.g. SEMATEC/IEMA, 1999).

Caracterização dos contornos adotados

O domínio do modelo hidrogeológico corresponde àquele apresentado na Figura 4, o qual é definido pelos seguintes contornos:

- a noroeste, pelo divisor de águas das bacias dos ribeirões do Torto e Sobradinho (Chapada da Contagem), e também, pelos eixos de drenagem do córrego Invernada, afluente do ribeirão do Torto, e de um pequeno córrego afluente do ribeirão Sobradinho;
- a sudoeste, pelo eixo de drenagem do ribeirão do Torto;
- a sudeste, pelo divisor de águas das bacias dos ribeirões do Torto e Sobradinho (Chapada da Contagem), e também, pelos eixos de drenagem do córrego do Geriva, afluente do ribeirão do Torto, e de um pequeno córrego afluente do ribeirão Sobradinho; e,
- a nordeste, pelo eixo de drenagem do ribeirão Sobradinho.
- o limite inferior é definido pela rocha sã em profundidade, pouco fraturada e com condutividade hidráulica muito pequena. Estes limites foram escolhidos por abranger as condições regionais que caracterizam o fluxo hidrodinâmico na área investigada (Figura 4).

Caracterização das unidades hidroestratigráficas

As unidades hidroestratigráficas, representativas do sistema hidrogeológico local, são definidas de acordo com a caracterização das unidades litoestratigráficas. Sendo assim, apresenta-se, na Tabela 1, as unidades hidroestratigráficas adotadas para a caracterização deste modelo hidrogeológico, onde se faz uma breve descrição das unidades aquíferas presentes na área investigada.

Tabela 1 - Caracterização das unidades hidroestratigráficas da área investigada.

Domínio	Unidade	Caracterização do Aquífero
Poroso	P1	Nesta unidade está localizada a mais importante área de recarga regional dos aquíferos fraturados, distribuída ao longo das Chapadas da Contagem. A região de distribuição dos aquíferos apresenta pequenas taxas de declividades, sendo em geral inferiores a 5% e apenas localmente, entre 5 e 10%. A espessura média dos solos pode ser considerada em torno de 20 metros, com uma espessura saturada média de 10 metros. Os aquíferos são do tipo intergranulares contínuos, livres, de grande extensão lateral, com importância hidrogeológica local relativa elevada. A condutividade hidráulica varia entre $1,7 \times 10^{-3}$ – $2,8 \times 10^{-4}$.
	A	Correspondente à maior parte das áreas de afloramentos da Unidade A. Esta unidade apresenta densidade de fraturas bastante elevada, contudo o caráter pelítico e o comportamento dúctil resultam da acomodação das estruturas abertas devido à pressão litostática. Geralmente as águas são aproveitadas por poços tubulares de profundidades entre 100 e 120 metros. Os aquíferos são descontínuos, com restrita extensão lateral, livres, com condutividade hidráulica pequena (valores estimados entre $1,0 \times 10^{-6}$ – $1,0 \times 10^{-7}$) e alta anisotropia. Sua importância local é muito pequena.
Fraturado	R3	Esta unidade hidrogeológica compõe-se de aquíferos descontínuos, com extensão lateral variável, livres ou confinados e características hidrodinâmicas muito anisotrópicas. Apresenta importância hidrogeológica relativa local muito alta. A condutividade hidráulica varia entre $4,9 \times 10^{-4}$ – $5,0 \times 10^{-5}$.
	Q3	Esta unidade hidrogeológica compõe-se de aquíferos descontínuos, com extensão lateral variável, livres ou confinados e características hidrodinâmicas muito anisotrópicas. Este subsistema aquífero apresenta importância hidrogeológica relativa local muito alta. A condutividade hidráulica varia entre $1,7 \times 10^{-3}$ – $1,3 \times 10^{-4}$.
	R4	Esta unidade é caracterizada por aquíferos restritos lateralmente, descontínuos, livres e com condutividade hidráulica baixa (valores estimados entre $1,0 \times 10^{-5}$ – $1,0 \times 10^{-6}$). Em função das vazões médias e da grande área de ocorrência, este subsistema apresenta uma importância hidrogeológica relativa local mediana.
	PPC	Esta unidade é composta por aquíferos livres, descontínuos, com alta variabilidade lateral, condutividade hidráulica baixa a elevada (valores estimados entre $1,0 \times 10^{-5}$ – $1,0 \times 10^{-6}$) e localmente com elevado grau de carstificação. Apresenta importância hidrogeológica relativa local variável, sendo a presença de carbonatos e quartzitos responsável pela maior disponibilidade de água armazenada.

MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL

Para a análise do fluxo de águas subterrâneas na área investigada utilizou-se o aplicativo computacional *Visual-ModFlow* (GUIGUER & THOMAS, 1998). Este aplicativo possibilita a simulação do comportamento hidrodinâmico tridimensional do sistema hidrogeológico, admitindo a existência de unidades hidroestratigráficas distintas, de acordo com a configuração de campo estabelecida pelo modelo hidrogeológico conceitual.

O aplicativo permite também acomodar os componentes hidrológicos e as condições de contorno do sistema (*i.e.* como rios, córregos, drenos, poços, taxas de recarga), possibilitando, assim, representar de maneira adequada os elementos reais apresentados no respectivo modelo hidrogeológico conceitual.

Para a solução numérica das equações diferenciais parciais de fluxo, adota-se no programa o Método das Diferenças Finitas, no qual o domínio de cálculo é dividido em células e as cargas hidráulicas são calculadas em cada uma delas, partindo de condições de contorno conhecidas.

Sendo assim, a implementação deste modelo computacional é apresentada nos itens que se seguem.

Configuração espacial do modelo

A configuração espacial do modelo hidrogeológico da área investigada abrange parte das bacias dos ribeirões do Torto e Sobradinho, sendo os seus limites apresentados na Figura 5.

Nestes limites foram considerados, a noroeste e sudeste, condição de contorno hidrológico de fluxo nulo, representado pelo divisor de águas das bacias vizinhas (Chapada da Contagem) e pelos eixos de drenagem de córregos afluentes aos ribeirões do Torto e Sobradinho. A nordeste e sudoeste, as condições de contorno hidrológico de fluxo nulo são representadas pelos eixos de drenagem dos ribeirões Sobradinho e do Torto, respectivamente.

O modelo regional possui limite inferior na cota 800 m. O limite superior é condicionado pela topografia, onde a cota máxima observada é de 1300 m. Sendo assim, a espessura do modelo é variável, em função da topografia natural do terreno.

Para a discretização horizontal, adotou-se uma malha regular de diferenças finitas, com células quadradas de 50 metros de lado, totalizando, na região considerada, um domínio de 250 colunas (12.500 metros) por 180 linhas (9.000 metros). Este domínio equivale a uma área de 112,5 km². Contudo, a área delimitada pelos contornos (linha vermelha) abrange, aproximadamente, 57 km² (Figura 6).

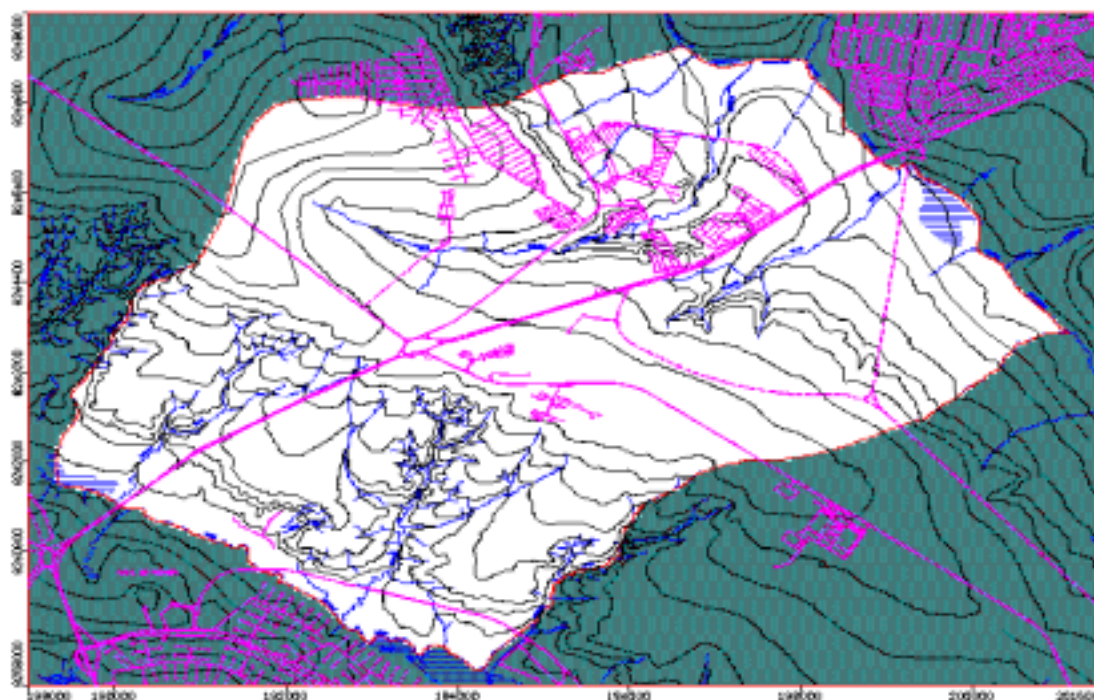


Figura 5 – Domínio de cálculo para o modelo hidrogeológico regional com destaque para a área (em branco) circunscrita pelas condições de contorno. A área em verde representa o domínio fora da área de modelagem definida pelos contornos do sistema e representada por células inativas.

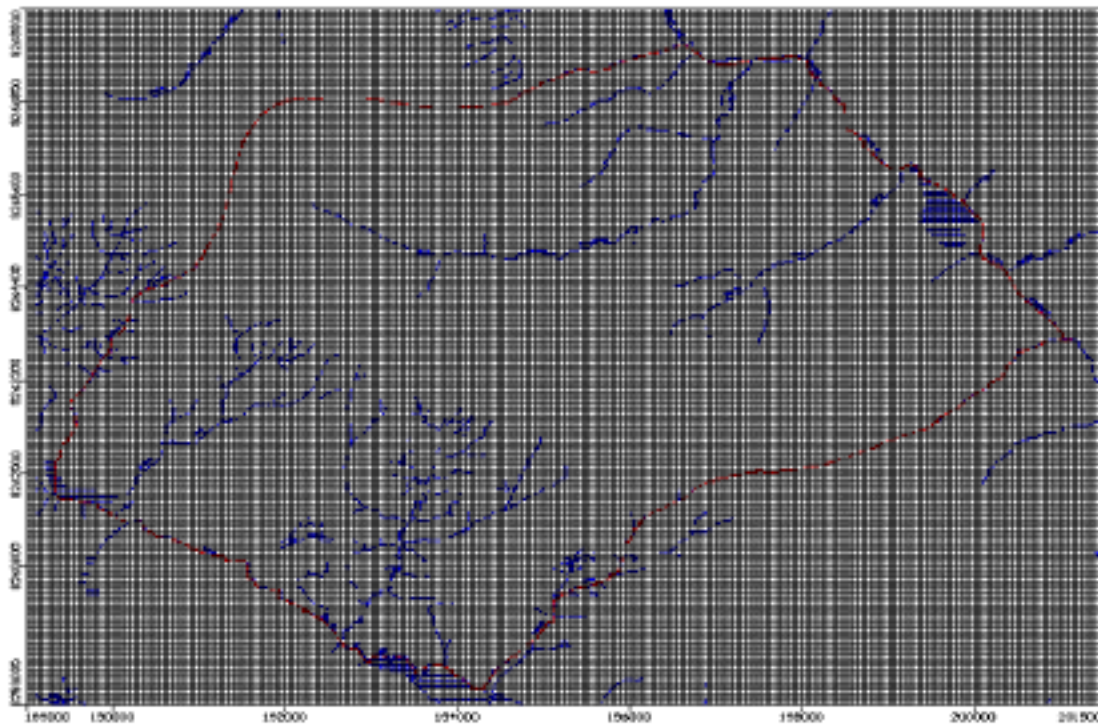


Figura 6 – Malha horizontal de cálculo do modelo hidrogeológico regional (180 linhas x 250 colunas).

Condicionantes hidrogeológicos do modelo

Os condicionantes hidrogeológicos do modelo consistem no conjunto de informações internas e externas aos sistemas aquíferos considerados, que influenciam diretamente no seu comportamento hidrodinâmico, e que, conseqüentemente, devem ser incorporados na modelagem computacional.

Definição e conformação das camadas numéricas

As camadas numéricas do modelo hidrogeológico computacional foram definidas com base nas unidades hidroestratigráficas. Dessa forma, são consideradas as seguintes camadas numéricas (Tabela 2).

Tabela 2 - Camadas numéricas definidas para o modelo regional.

Ordem	Camada	Litotipo	Espessura
1	P1	Camada de solo de cobertura	~ 20 m
2	A	Ardósia	~ 70 m
3	R3	Metarritmito arenoso	~ 60 m
4	Q3	Quartzito médio	~ 70 m
5	R4	Metarritmito argiloso	~ 50 m
6	PPC	Metassiltitos e metargilitos	~ 50 m

Cabe ressaltar que as espessuras apresentadas para as camadas acima são extremamente variáveis em função das deformações sofridas pelas rochas que as compõem. Sendo assim, elas

podem se apresentar mais espessas em alguns locais e delgadas em outros. Ademais, considerou-se que estas camadas, com exceção da **Unidade P1** (camada de solo de cobertura), apresentam um mergulho suave de acordo com a conformação geológica regional (ver Fig. 3). Esta conformação foi incorporada ao modelo computacional, conforme apresentado na Figura 7.

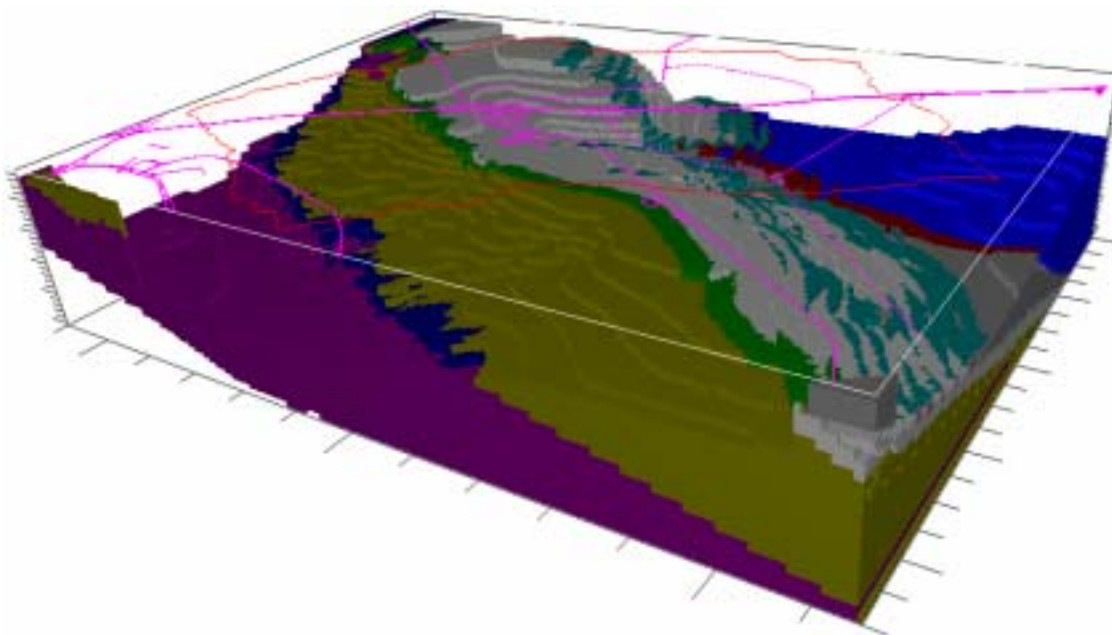


Figura 7 – Conformação do modelo computacional para as camadas hidroestratigráficas da área investigada (exagero vertical de 5 vezes).

Condutividades hidráulicas das camadas

As condutividades hidráulicas horizontais e verticais (K e K_v , respectivamente), atribuídas a algumas das camadas hidroestratigráficas do modelo computacional, representam valores médios obtidos a partir da literatura disponível (unidades **P1**, **R3** e **Q3**).

Para as demais camadas hidroestratigráficas, onde a literatura não contempla as informações necessárias, estimou-se valores médios com base em características mineralógicas dos litotipos que compõem as unidades estratigráficas homônimas, identificadas na área de modelagem (unidades **A**, **R4** e **PPC**). Sendo assim, apresenta-se, na Tabela 3, a compilação desses valores conforme as premissas estabelecidas acima. A distribuição das camadas pode ser visualizada na Figura 7.

Tabela 3 - Condutividades hidráulicas das camadas definidas para o modelo regional

Unidade	Litotipo	Variação de K (cm/s)	Valores Típicos de K (cm/s)	Valores Típicos de K_v (cm/s)
■ P1	Camada de solo de cobertura	$1,7 \times 10^{-3} - 2,8 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$
■ A	Ardósia	$1,0 \times 10^{-6} - 1,0 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-7}$	$9,0 \times 10^{-8}$
■ R3	Metarritmito arenoso	$4,9 \times 10^{-4} - 5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$
■ Q3	Quartzito médio	$1,7 \times 10^{-3} - 1,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-5}$
■ R4	Metarritmito argiloso	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-7}$
■ PPC	Metassiltitos e metargilitos	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-7}$

Recarga

Considera-se que, do ponto de vista de recarga, o principal mecanismo de alimentação do sistema aquífero da área investigada esteja representado pelas águas de precipitação pluviométrica. Estas águas se infiltram através do domínio poroso (**Unidade P1** do modelo computacional), e passam a fazer parte do sistema aquífero da região.

Como apresentado anteriormente na definição do modelo hidrogeológico conceitual, a precipitação na região investigada varia entre os 1400 e 1500 mm/ano. Dessa forma, considerando as taxas de infiltração apresentadas (*i.e.* 15% da precipitação para a recarga superficial, e, 75% da recarga superficial para a recarga efetiva), são obtidos os valores derivados, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores estimados para a recarga no modelo regional.

Precipitação mm/ano	Recarga Superficial mm/ano	Recarga Efetiva mm/ano	Valor adotado mm/ano
1400 – 1500	210 – 225	158 – 169	165

O valor médio adotado neste modelo corresponde a 165 mm/ano, o qual foi uniformemente distribuído na área.

Condições de contorno

As condições de contorno adotadas no modelo hidrogeológico computacional foram acomodadas segundo a contextualização do modelo conceitual do sistema hidrodinâmico. Estas condições de contorno, transferidas para o modelo computacional, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de contorno adotadas no modelo hidrogeológico regional conceitual.

Ordem	Contorno	Condição
1	Superior	Recarga de 165 mm/ano, uniformemente distribuída em todo o domínio de interesse.
2	Inferior	Meio absolutamente impermeável sotoposto à última camada hidroestratigráfica do modelo.
3	Nordeste	Contorno hidrológico, de fluxo nulo, representado pelo eixo de drenagem do ribeirão Sobradinho.
4	Noroeste	Contorno hidrológico, de fluxo nulo, representado pelo divisor de águas (Chapada da Contagem) e pelos córregos afluentes aos ribeirões do Torto e Sobradinho (córregos Invernada e Paranoazinho, respectivamente).
5	Sudoeste	Contorno hidrológico, de fluxo nulo, representado pelo eixo de drenagem do ribeirão do Torto.
6	Sudeste	Contorno hidrológico, de fluxo nulo, representado pelo divisor de águas (Chapada da Contagem) e pelos córregos afluentes aos ribeirões do Torto e Sobradinho.

Simulação dos cursos d'água

Os ribeirões do Torto e Sobradinho, por serem os cursos d'água de maior expressão, foram acomodados no modelo computacional adotando-se a condição de contorno de segundo tipo,

representada pelo “pacote rio” do programa *Visual-ModFlow*. Na condição de contorno adotada para os ribeirões, as cargas hidráulicas calculadas no modelo são comparadas com os valores das cotas estabelecidas ao longo do eixo de drenagem do curso d’água.

Através desta comparação, o modelo interpreta que, nos locais onde as cargas hidráulicas calculadas apresentam valores superiores às cotas de drenagem estabelecidas, houve um superávit potencial de fluxo. Este superávit é acomodado por um valor de vazão subtraído do modelo naqueles locais. Já para o caso onde as cargas hidráulicas calculadas apresentam valores inferiores às cotas de drenagem estabelecidas, o modelo interpreta que houve um déficit potencial de fluxo. Este déficit é acomodado por um valor de vazão adicionado ao modelo e disponibilizado segundo um valor definido de condutância para o meio considerado.

Com relação aos demais elementos do sistema de drenagem superficial, incluindo os principais córregos e respectivos tributários, eles foram simulados com a condição de contorno de segundo tipo, representada pelo “pacote dreno” do *Visual-ModFlow*. Na condição de drenos, o modelo também compara as cargas hidráulicas calculadas com os valores das cotas estabelecidas ao longo do eixo de drenagem, contudo, atua apenas onde as cargas hidráulicas calculadas apresentam valores superiores às cotas de drenagem estabelecidas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Calibração do modelo

Neste estudo, o modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido considerando um regime de fluxo permanente. Conseqüentemente, os resultados obtidos com a simulação do escoamento das águas subterrâneas refletem uma média de vazões durante o ano hidrológico.

Em regime permanente, os parâmetros que afetam a distribuição espacial das cargas hidráulicas são a condutividade hidráulica e a recarga. Os valores da condutividade hidráulica foram obtidos da literatura ou estimados a partir das características minerais e estruturais das unidades litoestratigráficas. Já os valores estimados de recarga foram indiretamente calculados a partir dos valores médios de precipitação anual e das taxas de infiltração.

A calibração do modelo consistiu em ajustar os parâmetros de entrada do modelo (*i.e.*, condutividade hidráulica e recarga) de modo a minimizar a diferença entre os valores de cargas hidráulicas calculadas e aqueles valores observados nos pontos de monitoramento hidrogeológico. Estes pontos de monitoramento foram traduzidos, neste modelo, pelas surgências de águas subterrâneas nas cabeceiras das drenagens existentes na área (Tabela 6).

Tabela 6 - Pontos de calibração do modelo regional.

Identificação do Ponto	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do NA (m)
Nasc_01	195385	8264650	1151,0
Nasc_02	195385	8264650	1150,0
Nasc_03	196469	8263785	1153,0
Nasc_04	192352	8265442	1208,0
Nasc_05	198084	8267313	1045,0
Nasc_06	201071	8263750	1022,0
Nasc_07	189420	8261768	1025,0
Nasc_08	194174	8259290	1000,0
Nasc_09	192843	8263249	1179,0
Nasc_10	195290	8262043	1161,0
Nasc_11	193853	8262910	1167,0
Nasc_12	191926	8263469	1152,0
Nasc_13	192466	8261190	1089,0
Nasc_14	195555	8260933	1105,0
Nasc_15	196804	8261830	1182,0
Nasc_16	191035	8264762	1217,0
Nasc_17	190313	8263475	1110,0
Nasc_18	194876	8266485	1143,0
Nasc_19	195470	8265726	1130,0
Nasc_20	197536	8263609	1144,0
Nasc_21	199406	8262565	1114,5
Nasc_22	194632	8266814	1135,0
Nasc_23	199522	8264464	1044,0
Nasc_24	193928	8260275	1081,0

Dessa maneira, durante a execução do procedimento de calibração do modelo regional, optou-se por manter um valor de recarga constante, haja vista o parco volume de informações sobre o balanço hídrico da região. Em contraposição, foi tomada a decisão de dar prioridade aos valores de condutividade hidráulica, variando K, dentro dos limites apresentados, até se obter o melhor ajuste entre os valores simulados de carga hidráulica e aqueles observados nas nascentes.

O processo de calibração do modelo computacional levou à adoção de valores típicos de condutividade hidráulica, conforme apresentado na Tabela 3. A partir destes valores típicos, os resultados da calibração são mostrados na Figura 8, representando a variação dos níveis freáticos estimados em função dos níveis medidos. Neste gráfico, pontos que se alinham perfeitamente com a reta de 45°, que passa pela origem, configuram ajuste ideal, onde o erro médio e a dispersão são nulos.

Contudo, o melhor ajuste encontrado, correspondente àquele para uma recarga de 165 mm/ano e para os valores típicos das condutividades hidráulicas (Tabela 3), mostra para o erro médio um valor de -3,14 m (Figura 8). Este nível de tolerância é considerado satisfatório para a calibração de um modelo hidrogeológico.

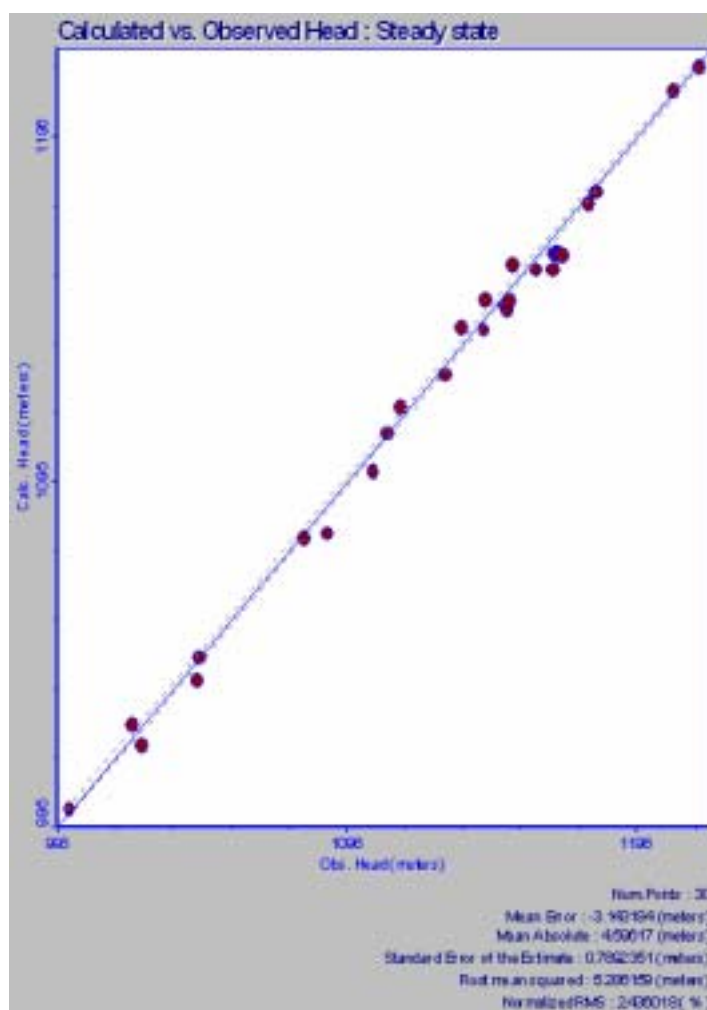


Figura 8 – Gráfico de calibração do modelo hidrogeológico computacional, correlacionando os valores de carga hidráulica calculados com os valores observados nas nascentes.

Avaliação hidrogeológica

Partindo-se do modelo calibrado, pôde-se proceder à avaliação hidrogeológica da área investigada. Assim, como resultado deste estudo, mostra-se na Figura 9 a distribuição horizontal das curvas equipotenciais e dos vetores direcionais do fluxo subterrâneo, caracterizando as condições de escoamento do sistema aquífero da área investigada.

Nesta figura, é notória a presença de um divisor de águas natural com eixo **NW/SE**, representado pela Chapada da Contagem, que condiciona a distribuição do fluxo de água subterrânea em sentidos opostos.

Dessa maneira, observa-se que o fluxo hidrodinâmico distribui-se, em parte, para a bacia do ribeirão Sobradinho, em sentido nordeste, e, em parte, para a bacia do ribeirão do Torto, em sentido sudoeste. Sendo assim, observa-se que o fluxo das águas subterrâneas se dá pelo escoamento a partir da área de cota mais elevada (Chapada da Contagem) para as áreas de cotas mais baixas (áreas de descarga) ao longo dos eixos do ribeirão Sobradinho e do ribeirão do Torto.

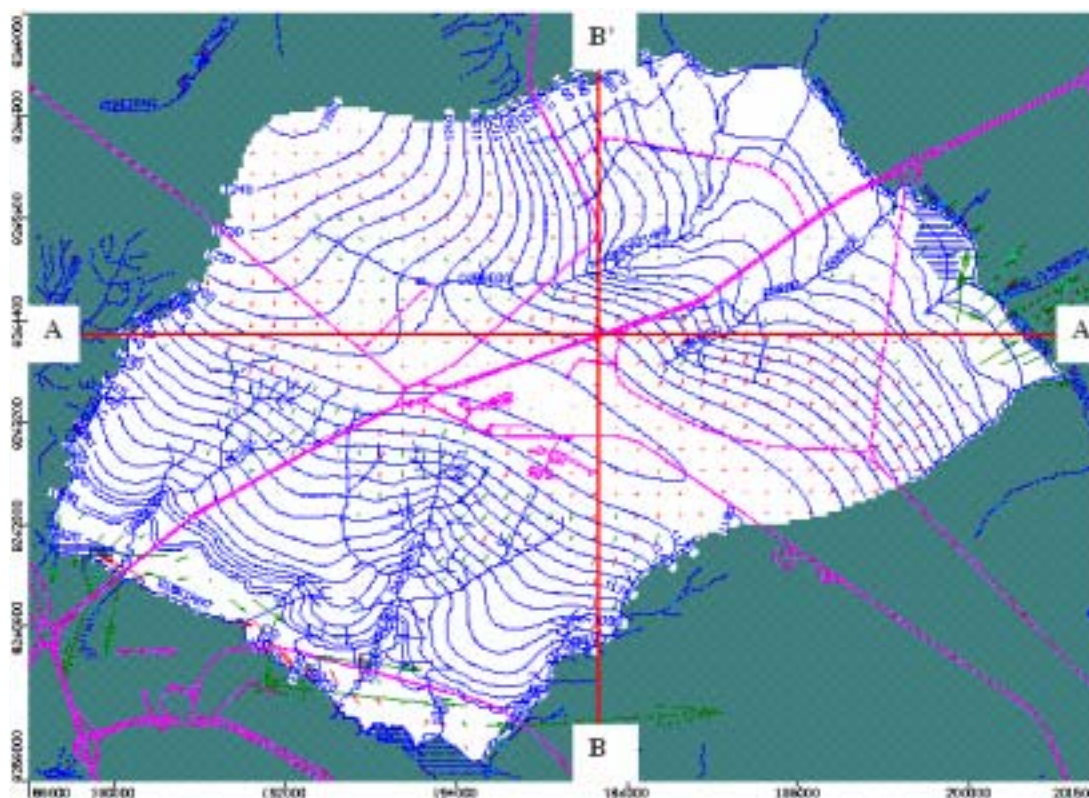


Figura 9 – Distribuição do fluxo hidrodinâmico regional com base nas curvas equipotenciais e nos vetores direcionais calculados a partir da 14ª camada do modelo computacional.

Simbologia: As setas em vermelho indicam fluxo entrando no plano;
as setas em verde indicam fluxo saindo do plano.

A Figura 10 apresenta um **Perfil WE** (Perfil AA' – conforme Figura 9), mostrando que o escoamento subterrâneo vertical não sofre influência significativa da distribuição angular das camadas hidroestratigráficas. Da mesma forma, a Figura 11 apresenta um **Perfil SN** (Perfil BB' – conforme Figura 9) mostrando a pouca influência do mergulho das camadas hidroestratigráficas no escoamento subterrâneo.

A influência pouca expressiva exercida pela distribuição angular das camadas hidroestratigráficas justifica-se pela presença de um condicionante hidrogeológico com características muito mais marcantes no contexto regional. Este condicionante é representado pela Chapada da Contagem que se constitui na principal zona de recarga do sistema, distribuindo o fluxo em sentidos opostos, para as duas bacias vizinhas (do ribeirão Sobradinho e do ribeirão do Torto), que, por sua vez, constituem as principais zonas de descarga do sistema aquífero local.

Além disso, pelos perfis apresentados, pode-se observar que existe uma conexão hidráulica entre os domínios aquíferos considerados (Poroso e Fraturado). Esta conexão pode ser variável em função dos condicionantes geológicos da região, mas permite que o sistema mais profundo seja

recarregado a partir da principal zona de recarga, identificada região da chapada (Chapada da Contagem).

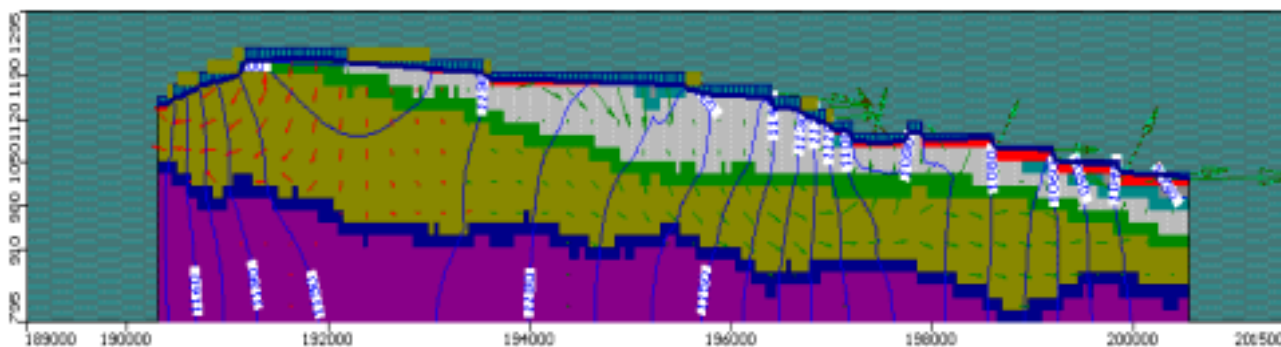


Figura 10 - Perfil EW mostrando a distribuição das camadas hidroestratigráficas e sua influência no direcionamento do escoamento subterrâneo (exagero vertical de 5 vezes). Simbologia: As setas em vermelho indicam fluxo entrando no plano; as setas em verde indicam fluxo saindo do plano.

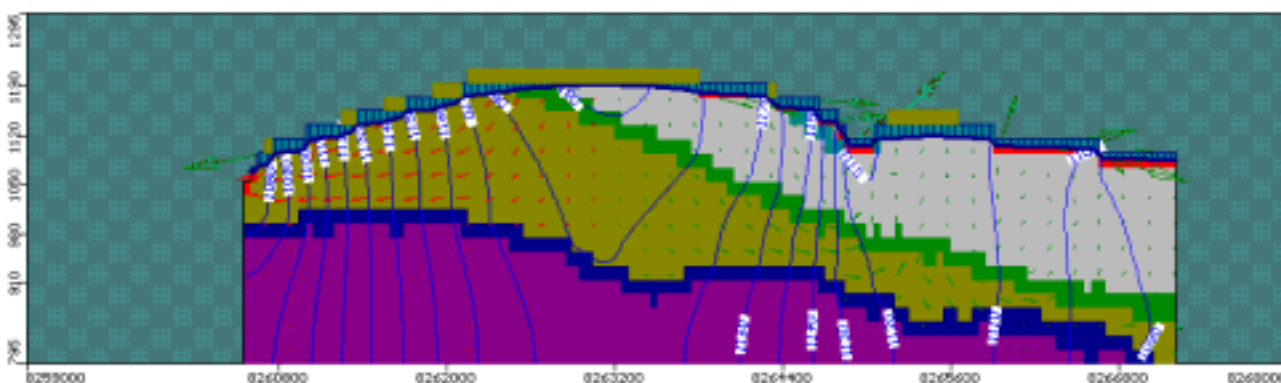


Figura 11 – Perfil SN mostrando a distribuição das camadas hidroestratigráficas e sua influência no direcionamento do escoamento subterrâneo (exagero vertical de 5 vezes). Simbologia: As setas em vermelho indicam fluxo entrando no plano; as setas em verde indicam fluxo saindo do plano.

CONCLUSÕES

Neste estudo apresentou-se uma avaliação hidrogeológica do sistema aquífero localizado às margens da BR-020, na porção oeste da cidade satélite de Sobradinho, Distrito Federal.

Para tanto, foi proposto um modelo hidrogeológico conceitual, que permitisse gerar um modelo computacional capaz de descrever o comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas na área investigada. Dessa forma, pôde-se gerar resultados que permitissem analisar, de maneira integrada, o comportamento hidrodinâmico do sistema aquífero local, e apresentar as seguintes conclusões:

- o fluxo das águas subterrâneas se dá pelo escoamento a partir da área de cota mais elevada (Chapada da Contagem) para as áreas de cotas mais baixas (áreas de descarga) ao longo dos eixos do ribeirão Sobradinho e do ribeirão do Torto;
- a Chapada da Contagem constitui a principal zona de recarga do sistema aquífero local, distribuindo o fluxo em sentidos opostos, para as duas bacias vizinhas (do ribeirão Sobradinho e do ribeirão do Torto);
- os ribeirões do Torto e Sobradinho constituem as principais zonas de descarga do sistema aquífero local; e,
- a simulação computacional de cenários hidrogeológicos mostrou que existem dois domínios distintos no sistema aquífero local, com graus variáveis de conectividade entre si, quais sejam: 1) Domínio Aquífero Poroso, na parte superior; e, 2) Domínio Aquífero Fraturado, em níveis mais profundos do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho manifestam o seu agradecimento à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pela bolsa de doutoramento concedida ao aluno do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREITAS-SILVA, F. H. & CAMPOS, J. E. G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte I. 86p.
- [2] GUIGUER, N. & FRANZ, T. 1998. *Visual-ModFlow*. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.
- [3] MARTINS, E. S. & BAPTISTA, G. M. M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte II. 53p.
- [4] SEMATEC/IEMA. 1999. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. SEMATEC/IEMA. CD-ROM.