

## 5 Modelo Conceitual de Fluxo Subterrâneo

O modelo conceitual é uma representação esquemática simplificada do sistema de fluxo subterrâneo, devido à dificuldade de reconstrução de um cenário idêntico ao existente contendo todas as características da área estudada.

Anderson e Woessner (1992) sugerem que seja feita primeiramente uma simplificação do problema, obtendo-se uma idéia geral de como a água subterrânea se comporta no meio poroso ou fraturado. Nesta etapa de estudo é importante definir os seguintes itens: unidades hidroestratigráficas representativas; valores de recarga do aquífero; e o sistema atual de fluxo subterrâneo.

É importante ressaltar que a descrição destes itens principais que configuram o modelo conceitual da região em estudo será realizada em consonância com as sugestões de Anderson e Woessner (1992).

### 5.1. Unidades Hidroestratigráficas

O sistema aquífero referente à área de abrangência do estudo foi inicialmente compreendido a partir das observações da tipologia dos materiais perfurados pelas sondagens rotativas e exploratórias. A partir daí, a caracterização do sistema hídrico pôde ser extrapolada para o restante dos materiais, sendo definidas as unidades hidroestratigráficas da área em questão.

As unidades hidroestratigráficas representativas dos aquíferos da região foram definidas utilizando as unidades geológicas identificadas pelo reconhecimento de campo, perfis de sondagem (*logs*), testes de infiltração realizados em alguns piezômetros, mapas e modelos geológicos da mina, como também a partir de referências bibliográficas, para o caso das propriedades hidráulicas dos materiais que não foram passíveis de caracterização pelas investigações de campo.

Assim sendo, foram identificadas seis unidades hidroestratigráficas, descritas a seguir de acordo com as unidades litológicas reconhecidas na área:

**a) Unidade I: depósitos coluvionares, canga e solos residuais**

Os depósitos coluvionares e solos residuais são formados por uma espessura variável de 3 m a 20 m. Eles se encontram distribuídos principalmente nos talvegues de drenagem, sendo menos expressivos nas regiões de cotas topográficas elevadas, nas quais a rocha, para alguns casos, encontra-se aflorante. Os depósitos podem ocorrer também nas demais regiões da área em estudo. Em algumas regiões de relevo mais abatido e, conseqüentemente, de menor gradiente hidráulico, evidencia-se o surgimento de nascentes nesta unidade, devido ao acúmulo de água no contato desta unidade de pequena espessura com o topo rochoso sotoposto e impermeável.

Segundo Grandchamp (2003), esta unidade é muito sensível às taxas de precipitação pluviométrica do período chuvoso, podendo formar um sistema aquífero raso ou localizado em áreas de depressões do terreno, com restituição de águas perenizadas, mas com grande variação sazonal (Mourão, 2005). Ensaio de campo (Apêndice A) realizados neste material forneceram valores de condutividade hidráulica da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  a  $6 \times 10^{-5}$  cm/s.

**b) Unidade II: hematitas e itabiritos friáveis da formação Cauê**

A unidade estratigráfica representada pela formação Cauê é constituída por um corpo contínuo que constitui os dois flancos do sinclinal Andrade (GOLDER, 2005), formando um aquífero heterogêneo e anisotrópico (hematitas e itabiritos friáveis e compactos), em função da composição mineralógica e do nível de intemperismo sofrido nestas regiões.

As hematitas e itabiritos friáveis são rochas alteradas e de porosidade intersticial, em conseqüência dos processos de formação do minério de ferro a partir da lixiviação da sílica e dos carbonatos.

O aumento da porosidade do material, resultante do processo de lixiviação, cria ambientes favoráveis para o armazenamento e circulação de água (Grandchamp, 2003) no qual se estima haver espessuras médias de 25 m exceto para a área da cava do Pico, onde a espessura desta unidade pode chegar até 82 m (sondagem FDDE0067).

No caso das hematitas e itabiritos compactos, estes foram separados desta unidade hidroestratigráfica por possuírem características hidráulicas diferenciadas, fazendo parte da terceira unidade proposta neste modelo conceitual.

Vale ressaltar que as rochas itabiríticas friáveis da formação Cauê representam um sistema aquífero de potencial elevado. De acordo com Grandchamp (2003), para a mina de Águas Claras<sup>16</sup>, os valores de condutividade hidráulica encontrados no aquífero da formação Cauê são da ordem de  $1 \times 10^{-2}$  a  $4 \times 10^{-4}$  cm/s.

**c) Unidade III: hematita e itabiritos compactos da formação Cauê e embasamento cristalino de gnaiss**

Hematitas e itabiritos compactos pouco alterados apresentam valores de porosidade reduzida e permeabilidade secundária baixa, condicionada basicamente pelo grau de fraturamento e alteração. Acredita-se que esta unidade funcione como uma barreira impermeável ao fluxo subterrâneo, já que o elemento fundamental para o escoamento por estes materiais são as fraturas.

Em várias das sondagens exploratórias descritas, pode-se observar que os itabiritos compactos da região contemplada são rochas de baixo grau de fraturamento, não hidratadas e de porosidade praticamente inexistente.

Semelhante ao itabirito compacto, o embasamento cristalino formado por rochas duras e maciças (gnaisses) constituem a predominância de uma rocha do tipo sã, pouco fraturada ou com fraturas fechadas, o que lhes confere permeabilidade muito baixa (GOLDER, 2005). Estas rochas se encontram sotopostas aos xistos nas regiões mais elevadas, e aflorantes nas regiões mais próximas ao rio Santa Bárbara. As relações de contato desta litologia são quase sempre definidas por discordâncias erosivas e, também, por relações tectônicas de falhamentos.

---

<sup>16</sup> Mina de Águas Claras, de propriedade da MBR – Minerações Brasileiras Reunidas S/A, situada na Serra do Curral, município de Nova Lima-MG.

**d) Unidade IV: xistos indivisos**

Esta unidade é representada pelos xistos indivisos de grau de fraturamento variando entre baixo a médio. Nos xistos observam-se características de aquíferos, cujas camadas argilosas dificultam a transmissão da água subterrânea, devido à baixa permeabilidade. O xisto funciona como uma barreira física, que dificulta a comunicação da água com a camada de quartzito das formações adjacentes, como foi presenciado em algumas leituras nas quais se notou elevação do nível de água nos instrumentos de monitoramento hidrogeológico INA-AN 04/05 (N.A = 1037,0 m) e PZ-AN 07/05 (N.A = 1058,0 m), próximos às cotas topográficas do topo da serra.

Além disso, em alguns perfis de sondagem, observam-se porções mais superficiais (prof. 10,6 m) desta unidade em condições altas de hidratação, como evidenciado no furo FD-DE0013. Porém, ao contrário disso, em maiores profundidades (prof. 211,5m) e, em regiões de baixo grau de fraturamento, a hidratação neste mesmo furo é praticamente inexistente.

Pode-se supor que o escoamento é lento nesta unidade e condicionado ao grau de intemperização ou fraturamento, possuindo uma permeabilidade secundária da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s (Freeze e Cherry, 1979).

**e) Unidade V: quartzitos da formação Moeda**

Os quartzitos são representados por rochas quartzíticas associadas à formação Moeda, a qual é marcada por fraturas e falhas, sugerindo condições de percolação subterrânea profunda e eventual intercomunicação hidráulica com os demais sistemas aquíferos. Sua espessura varia entre 2,0 m e 70,0 m.

A recarga nesta unidade se faz de forma direta pelos sistemas de fratura, principalmente nas porções laterais da cava Cabral, constituídos pelos dois flancos do sinclinal Andrade e na porção SW da cava, próximos à charneira do desse sinclinal onde a rocha é aflorante (GOLDER, 2005). Em profundidade, esta unidade encontra-se confinada pela unidade IV. A percolação da água subterrânea ocorre pelos sistemas de fraturamento, não existindo grandes contribuições provenientes da unidade sobreposta a ela, formada pelos xistos e anfíbolitos.

Informações sobre as características hidrodinâmicas deste sistema quartzítico são deficientes, pois se apresentam valores de condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s (Freeze e Cherry, 1979).

#### **f) Unidade VI: material estéril**

Existem atualmente cinco pilhas de estéril na mina do Andrade, sendo que as PDE-01, PDE-04 e PDE-05 são basicamente formadas por estéril de itabirito, enquanto as pilhas PDE-02 e PDE-03 são compostas por estéril de xisto, exceto para a região do talvegue próximo à linha férrea da PDE-03, a qual contém material proveniente de itabirito.

Desta maneira, devido à heterogeneidade e à anisotropia do material estéril em relação às propriedades hidráulicas, dividiu-se esta unidade hidroestratigráfica em duas subunidades conforme apresentado a seguir:

- Subunidade formada pelo estéril de itabirito constituído principalmente de um material com granulometria arenosa com pequenas porções silto-argilosas e pedregulhos. É um material mal consolidado e de alta condutividade hidráulica, no qual foram obtidos valores da ordem de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  cm/s a partir dos resultados dos ensaios com o permeâmetro de Guelph realizados na camada superficial deste estéril (Apêndice A);
- Subunidade formada pelo estéril de xisto constituído por um material de granulometria mais argilosa e condutividade hidráulica calculada a partir de ensaios de permeabilidade (Apêndice A) variando entre  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s.

## **5.2. Recarga**

Para o cálculo da recarga optou-se por realizar um balanço hídrico simplificado a partir dos dados oriundos das estações pluviométricas locais da mina do Andrade (operada pela CVRD), Usina Peti (operada pela ANA) e duas estações climatológicas operadas pelo INMET: Belo Horizonte e Caratinga.

O balanço hídrico foi realizado mensalmente conforme proposto por Thornthwaite (1948):

$$R = P - D - Evap + \Delta V \quad (5.1)$$

Onde:

- R é a recarga média mensal, em mm;
- P é a precipitação média mensal, em mm;
- D é o deflúvio superficial médio mensal, em mm;
- Evap é a evapotranspiração real média mensal, em mm;
- $\Delta V$  é a variação média mensal do armazenamento de água no solo, em mm.

Para uma área localizada na porção leste da Austrália, Greaner (1997) estimou o valor do deflúvio para áreas íngremes como uma porcentagem do valor total da precipitação total, variável em função da estação chuvosa e de estiagem. De maneira similar ao método proposto por Greaner, adotaram-se fatores para cálculo do deflúvio, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores adotados para cálculo do deflúvio para a área em estudo a partir dos fatores sugeridos por Greaner (1997) em função dos valores de precipitação mensal.

| <b>Período</b> | <b>Fator</b> | <b>Meses</b>                      |
|----------------|--------------|-----------------------------------|
| chuvoso        | 0,6          | Nov / Dez / Jan                   |
| intermediário  | 0,5          | Fev / Mar / Abr / Mai / Set / Out |
| estiagem       | 0,2          | Jun / Jul / Ago                   |

A evapotranspiração real foi estimada em 80% do valor da evaporação total medida no tanque classe A, conforme sugerido por Reichardt e Timm (2004).

A variação média do armazenamento no solo foi negligenciada, considerando-se que esta parcela será incorporada à evapotranspiração no balanço, conforme a fase em que se encontre a pilha (solo exposto ou revegetado).

Portanto, o balanço ora utilizado é função direta da precipitação e da evaporação. Uma vez que os valores de precipitação possuem variação anual e sazonal bem mais expressiva que os valores de evaporação, o balanço foi realizado em três cenários variáveis em função da precipitação, de forma a determinar condições mínimas, médias e máximas de recarga.

Esses cenários foram determinados através da seleção da série anual (janeiro a dezembro) que apresentava:

- O menor valor de chuva média mensal, para o cenário mínimo;
- O valor médio histórico de chuva média mensal, para o cenário médio;
- O maior valor de chuva média mensal, para o cenário máximo.

A Tabela 5, exposta a seguir, apresenta os valores de precipitação, evaporação e deflúvio superficial mínimo, médio e máximo mensal, juntamente com o balanço hídrico simplificado para cálculo do valor de recarga da área modelada.

Com base na Tabela 5 apresentada, verifica-se que a linha “Excedente” (item “P - D”) apresenta o valor resultante da diferença entre precipitação e deflúvio mensal, obtidos entre os anos de 1979 e 2005. A linha “Recarga” (item “R”) e “Evapotranspiração real” (item “Evap”) foram obtidas em conjunto, procurando distribuir o excedente, tendo em vista o valor limitador da evaporação média mensal (item “Ev”).

Como se observa, o balanço para o cálculo da recarga média foi positivo entre os meses de janeiro a março e no mês de novembro. Porém, para os demais meses, isto é, de abril a outubro e em dezembro, os valores da linha “Excedente” foram menores que os calculados na linha “Evapotranspiração real”, sendo, portanto, desconsiderados os negativos de recarga.

O valor obtido para a recarga anual mínima, máxima e média foi de 48, 349 e 147 mm, respectivamente. De fato, estes valores fornecem uma estimativa preliminar para o valor da recarga do aquífero, mas aceitável tendo em vista o objetivo de apenas reproduzir as condições extremas de recarga às quais a PDE-05 está submetida através de uma faixa de valores para a recarga a ser utilizada como dado de entrada dos modelos computacionais utilizados neste trabalho.

Na Tabela 5, observa-se ainda que o balanço hídrico da região é bastante sensível às condições pluviométricas, identificando-se épocas de recarga e desaguamento dos sistemas aquíferos presentes.

Tabela 5 – Balanço hídrico simplificado para área da mina do Andrade.

| Item    | Fenômeno                                   | Série         | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Total Anual |     |
|---------|--------------------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|-----|
| P       | Precipitação (mm)                          | mínima (2001) | 105 | 1   | 173 | 4   | 85  | 1   | 6   | 1   | 6   | 51  | 208 | 248 | 889         |     |
|         |                                            | máxima (1992) | 533 | 128 | 20  | 67  | 55  | 11  | 8   | 12  | 47  | 182 | 214 | 664 | 1940        |     |
|         |                                            | média (1991)  | 382 | 189 | 200 | 28  | 47  | 6   | 6   | 8   | 121 | 75  | 246 | 31  | 1339        |     |
| D       | Deflúvio Superficial (mm)                  | mínima (2001) | 63  | 0   | 87  | 2   | 42  | 0   | 1   | 0   | 3   | 25  | 125 | 149 | 499         |     |
|         |                                            | máxima (1992) | 320 | 64  | 10  | 33  | 28  | 2   | 2   | 2   | 23  | 91  | 128 | 398 | 1101        |     |
|         |                                            | média (1991)  | 229 | 95  | 100 | 14  | 23  | 1   | 1   | 2   | 61  | 37  | 148 | 19  | 729         |     |
| (P - D) | Excedente (mm)                             | mínima (2001) | 42  | 0   | 87  | 2   | 42  | 1   | 5   | 1   | 3   | 25  | 83  | 99  | 391         |     |
|         |                                            | máxima (1992) | 213 | 64  | 10  | 33  | 28  | 9   | 7   | 10  | 23  | 91  | 85  | 265 | 838         |     |
|         |                                            | média (1991)  | 153 | 95  | 100 | 14  | 23  | 5   | 5   | 6   | 61  | 37  | 99  | 12  | 610         |     |
| Ev      | Evaporação (mm)                            | média         | 90  | 91  | 96  | 84  | 91  | 84  | 95  | 118 | 123 | 112 | 96  | 85  | 1164        |     |
| Evap    | Evapotranspiração real em mm (0,8Ev)       | média         | 72  | 73  | 77  | 67  | 73  | 67  | 76  | 94  | 98  | 89  | 76  | 68  | 931         |     |
| R       | Recarga em mm (P - D - Evap) <sup>17</sup> | mínima (2001) | 0   | 0   | 10  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 7   | 31  | 48          |     |
|         |                                            | máxima (1992) | 141 | 17  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 2   | 9   | 197         | 349 |
|         |                                            | média (1991)  | 80  | 22  | 23  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 22  | 0           | 147 |

<sup>17</sup> Os valores de recarga iguais a zero são decorrentes de situações nas quais o valor da evapotranspiração potencial (Evap) excede o valor de água disponível para infiltração (P-D), não sendo possíveis valores de recarga negativos.

### 5.3. Condições Atuais de Fluxo

A região do Quadrilátero Ferrífero foi marcada por grandes eventos tectônicos responsáveis pela formação de um relevo acidentado e escarpado, apresentando em seu substrato grandes lineamentos e zonas fraturadas (GOLDER, 2005).

No contexto da mina do Andrade, verifica-se fato semelhante, evidenciado pelas estruturas geológicas e potencial de erodibilidade de alguns litotipos que conformaram o relevo ondulado principalmente nas regiões do sinclinal e anticlinal Andrade.

Estes esforços de compressão (falhas) provenientes de épocas passadas atribuíram às rochas que estão presentes nesta região uma permeabilidade secundária, à qual o escoamento das águas subterrâneas está condicionado.

O fluxo subterrâneo da área em estudo ocorre no sentido SW-NE, em direção ao rio Santa Bárbara (elevação 560 m). A zona de recarga da área está localizada ao longo dos divisores topográficos (elevação 1100 m), formando um divisor hidráulico imaginário a partir das camadas de quartzito e itabiritos friáveis aflorantes. A água infiltrada nestas regiões contribui para o abastecimento e a manutenção dos aquíferos locais da área, os quais, de um modo geral, estão localizados nas regiões de ocorrência do sinclinal Andrade.

Há ocorrência, em menor escala, de infiltração de água por uma pequena camada de solo residual ou nos depósitos coluvionares pouco espessos encontrados, variando de espessura de 1,0 m a 11,0 m. Estas unidades funcionam como aquífero intersticial, o qual recebe a água infiltrada proveniente da precipitação direta e a redistribui através das fraturas nas rochas sotopostas a ela.

Localmente, este sistema encontra-se compartimentado em unidades aquíferas separadas por barreiras hidráulicas, constituídas por itabiritos compactos e xistos de baixo grau de fraturamento, como se verifica na região em que se encontra implantada a PDE-05. Observa-se nesta região que o nível de água subterrânea se encontra em média na elevação 810 m, valor medido no indicador de nível de água NA-ANPE5-03.

Entretanto, as leituras piezométricas da fundação da pilha realizadas no piezômetro PZ-ANPE5-01, posicionado ao lado deste instrumento, fornecem valores médios de 821 m, ou seja, indicam artesianismo e, portanto, a presença de

dois sistemas aquíferos: um livre e outro semi-confinado, no sistema hidrogeológico local.

Observa-se nas adjacências da área em estudo a presença de uma nascente localizada próxima à PDE-01. Esta nascente encontra-se protegida por manilha de concreto localizada no contato entre o solo residual e o itabirito, fornecendo água ao escritório da mina, com vazão calculada de 3,6 L/min (GOLDER, 2005). Verifica-se também no “pé” da pilha PDE-05 o surgimento de água subterrânea com vazão calculada de 141 L/min.

Esta vazão foi calculada através da construção de um pequeno barramento de terra sobre a calha da drenagem, o qual era atravessado por um tubo de PVC de 100mm, por onde a água era conduzida até um balde graduado. As medições de vazão foram realizadas aplicando método direto conforme a equação 5.2 (relação entre o volume de água escoado e o tempo correspondente), sendo realizadas pelo menos 5 medidas e adotando-se como valor final a média dos valores obtidos.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (5.2)$$

Onde:

- Q é a vazão (L/min.)
- V é o volume escoado (L)
- t é o tempo total gasto (min.)

A Figura 19 mostra uma seção típica representativa do modelo hidrogeológico conceitual proposto, indicando as unidades hidroestratigráficas mais representativas. A configuração proposta para a geologia do local foi realizada a partir da extrapolação das informações provenientes das sondagens, indicando a existência de uma barreira física para o fluxo subterrâneo. Esta barreira, formada pelo itabirito compacto, reflete a existência de um córrego ou rio na região da PDE-05, que é confirmada pela existência do córrego Derrubada.

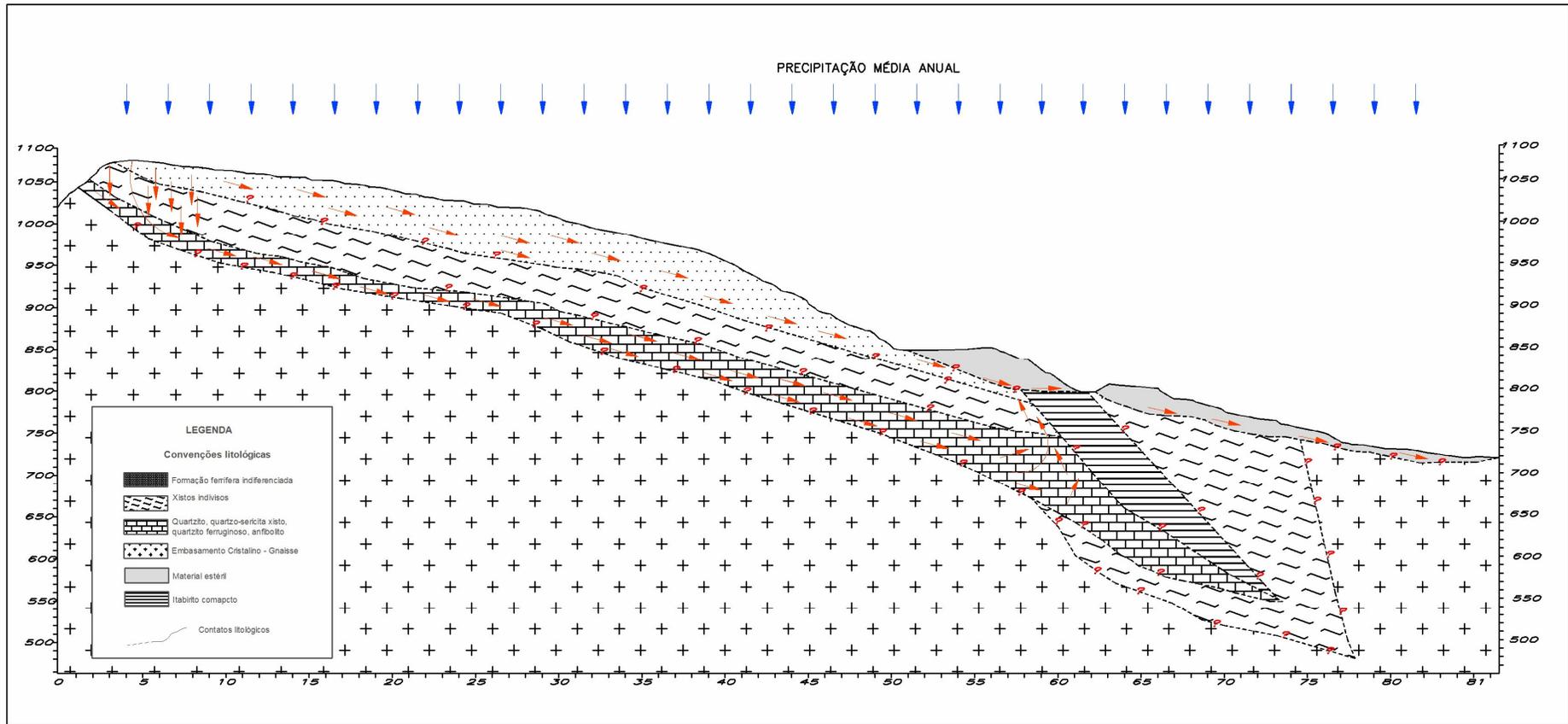


Figura 18 – Esquema representativo do modelo hidrogeológico conceitual.