

# SISTEMA ALTERNATIVO PARA O DESAGUAMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS DE BAIXA PERMEABILIDADE

Ana Carolina Ferreira Xavier<sup>1</sup>; Antônio Carlos Bertachini<sup>1</sup>; Daniel Perez Bertachini<sup>1</sup>; Milton Pereira Filho<sup>2</sup>

**Resumo** – O desaguamento de materiais de baixa condutividade hidráulica é um desafio recorrente para o desenvolvimento de minas abaixo do nível d'água subterrâneo. Nesse contexto, os estudos hidrogeológicos aqui apresentados buscaram fornecer subsídios para a execução de um sistema de drenagem para o talude leste da Mina Várzea do Lopes, no município de Itabirito, MG. Devido sua composição de baixa condutividade hidráulica, esse talude, representado principalmente por MDD, apresenta grande dificuldade de desaguamento, acarretando problemas de estabilidade geotécnica. Com intuito de aprimorar o rebaixamento do nível d'água na mina, foi proposto um projeto alternativo, utilizando-se da elevada condutividade hidráulica do aquífero Cauê para o desaguamento das unidades de baixa condutividade hidráulica. O princípio básico desse sistema foi criar zonas de conexão entre o aquífero Cauê subjacente e o aquífero MDD, através de drenos no talude os quais alimentariam o Cauê, cujo nível d'água é rebaixado por poços tubulares de alta vazão. Para seu dimensionamento, foi utilizado o software Visual ModFlow, no qual realizou-se simulações numéricas do projeto proposto. Com base nos resultados foi realizada a instalação de baterias de drenos, sendo obtidos resultados satisfatórios para o rebaixamento do aquífero, deixando o talude leste em melhores condições de drenagem e estabilidade geotécnica.

**Abstract** – The dewatering in low hydraulic conductivity materials it is a recurrent challenge for the development of mines under the water table. In this context, the hydrogeological studies here presented seek subsidies for the development of a drainage system for the east slope of the Várzea do Lopes mine, in the city of Itabirito, MG. Due to its low hydraulic conductivity composition the east slope, represented mainly by MDD, shows great difficulty for dewatering, leading to countless problems of geotechnical stability. To improve the mine dewatering, an alternative dewatering project was proposed, using up the high hydraulic conductivity of Cauê aquifer for the dewatering of low hydraulic conductivity units. The basic principle of this system was create connection zones between the Cauê aquifer and the MDD aquitard, by the installation of drains in the slope that lead the water to Cauê underlying, which dewatering its done by high flow rate wells. For its design,

<sup>1</sup> MDGEO – Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda, Rua Gararu, 389, Sagrada Família, Belo Horizonte – MG, (31)3482-9959, www.mdgeo.com.br, ana.carolina@mdgeo.com.br, berta@mdgeo.com.br, daniel@mdgeo.com.br

<sup>2</sup> GERDAU, Rodovia BR-040 – Km 579, Itabirito - MG, milton.pereira1@gerdau.com.br

numerical flow simulations for the proposed project was done, using the software Visual MODFlow. The results of the installation of the drains battery was very satisfactory for the dewatering of the aquitard, leaving the east slope in better drainage and geotechnical stability conditions.

**Palavras-Chave** – Simulação, desaguamento, drenos.

## 1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho resume os resultados obtidos com os estudos hidrogeológicos desenvolvidos na Mina Várzea do Lopes, de propriedade da Gerdau, localizada no município de Itabirito, estado de Minas Gerais. O estudo foi desenvolvido com o intuito de fornecer alternativas para o processo de rebaixamento do nível d'água subterrâneo na mina, tanto na formação ferrífera quanto nas rochas encaixantes, com vistas a otimizar tais atividades minerárias e garantir a manutenção e estabilidade dos taludes.

## 2 - CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

No contexto geológico regional, a área estudada insere-se na província mineral do Quadrilátero Ferrífero, que compreende no alinhamento de várias serras mineralizadas em ferro.

A Mina Várzea do Lopes encontra-se numa região de elevada complexidade geológico-estrutural, no flanco normal do Sinclinal da Moeda, na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1).

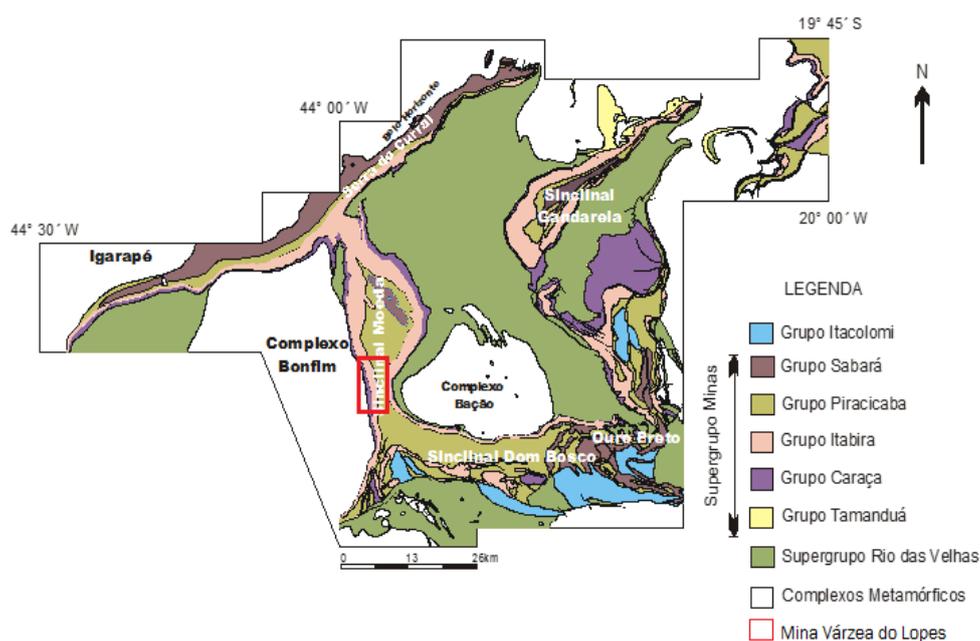


Figura 1. Geologia do QF, com destaque para Mina Várzea do Lopes (modificado de Dorr, 1969).

A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero apresenta algumas interpretações diferentes conforme o autor considerado. Segundo Alkmim e Marshak (1998), o Quadrilátero Ferrífero é composto por rochas cristalinas arqueanas do embasamento circundados por depressões sinformais preenchidas por rochas metassedimentares precambrianas. Em ordem decrescente de idade, estas unidades são descritas como: 1) infracrustais dos Complexos Metamórficos, com idades de até 3,2 Ga; 2) talco-xistos, dolomita-talco-xistos, com intercalações de komatiítos e basaltos, pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas, de idade entre 2,78-2,61 Ga; 3) filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos do Supergrupo Minas, de idades entre 2,78-2,61 Ga; e, 4) quartzitos brancos e ferruginosos do Grupo Itacolomi, de idade da ordem de 1,75 Ga; 5) diques máficos, predominantemente brasilianos, que cortam toda a sequência supracrustal; 6) coberturas cenozóicas terciárias e quaternárias, representadas preferencialmente por colúvios, aluviões e cangas. Esta sequência é apresentada na Figura 2, adiante.

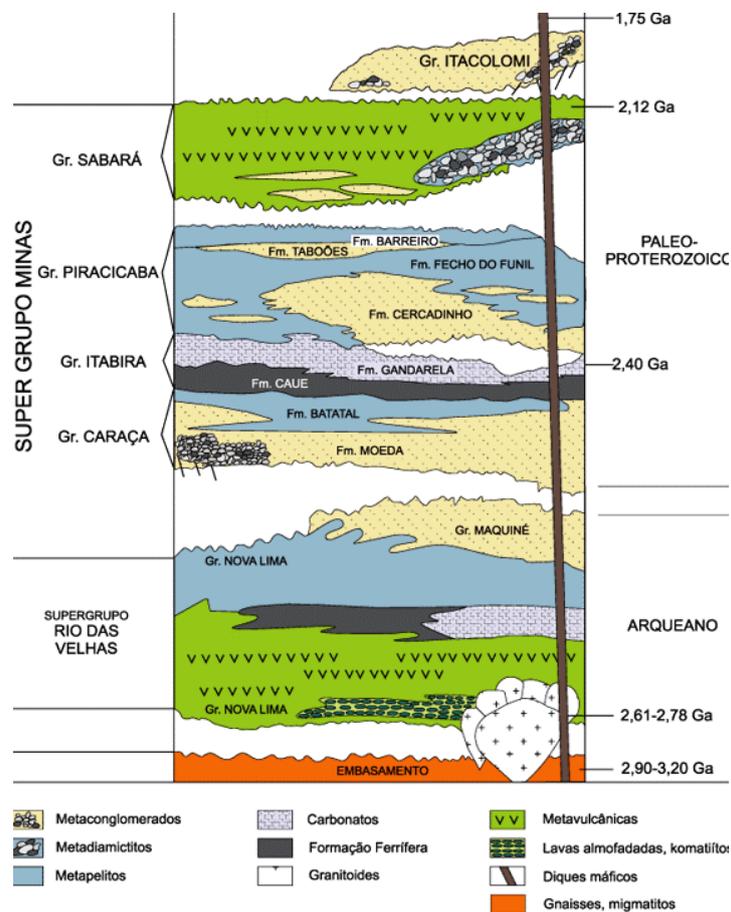


Figura 2. Coluna estratigráfica simplificada do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim e Marshak, 1998).

Especificamente no entorno da área abordada são encontrados litotipos pertencentes ao Complexo Metamórfico Bonfim, Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba, além de coberturas recentes, representadas principalmente pelas cangas. Todas essas unidades serão descritas a seguir.

## **2.1 - Complexo Metamórfico Bonfim**

Na área da Mina Várzea do Lopes, o Complexo Bonfim aflora na vertente oeste da Serra da Moeda. Segundo Alkmim & Marshak (1998), este complexo possui idade arqueana e é formado por unidades neoarqueanas, como gnaisses de composição trondjemítica a granítica, granitóides intrusivos e diques anfibolíticos.

Do ponto de vista textural e estrutural, as rochas dos complexos metamórficos podem apresentar-se isótropas ou foliadas, como resultado da superposição de processos tectonometamórficos. Em geral, a foliação principal é produto de transposição, sendo resultado de processos de cisalhamento dúctil não-coaxial. Orienta-se, com mergulhos elevados, segundo as direções principais N-S, NE-SW e E-W e, subordinadamente, NW-SE. São comuns rochas básicas tardi a pós-tectônicas preenchendo descontinuidades produzidas por distensão crustal.

Na vertente oeste da Serra da Moeda, na região do empreendimento, o Complexo Bonfim encontra-se diretamente sob o Grupo Caraça (Formação Moeda), evidenciando a ausência do Supergrupo Rio das Velhas. Esse contato se dá através de uma falha de movimento normal.

## **2.2 - Grupo Caraça**

O Grupo Caraça representa a base do Supergrupo Minas, que engloba uma espessa sequência depositada em margem continental. Sua litologia possui origem aluvial com transição para depósitos marinhos e divide-se em duas formações distintas: Moeda e Batatal. Na área de estudo, as camadas possuem orientação NW-SE, mergulhando para NE.

De acordo com Dorr (1969), a Formação Moeda apresenta uma espessura de aproximadamente 300 metros na área do projeto. É representada por quartzitos sericíticos, mal selecionados, mostrando estratificações cruzadas e intercalações de lâminas e camadas de metapelitos. Os litotipos da Formação Batatal são geralmente encontrados com elevado grau de intemperismo, com predominância dos filitos sericíticos.

## **2.3 - Grupo Itabira**

O Grupo Itabira corresponde a maior porção da área estudada, dividindo-se, da base para o topo, nas formações Cauê e Gandarela.

A Formação Cauê, em sua porção basal, é, em geral, marcada pela ocorrência de formações ferríferas bandadas argilosas e carbonáticas. A porção média desta unidade envolve espesso pacote de itabiritos carbonáticos e silicosos que, quando influenciados pelo intemperismo diferencial, perdem sílica e as fases carbonáticas. Os resíduos deste processo, corpos acamadados de hematita porosa e permeável, vêm a constituir, simultaneamente, aquíferos e minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Sua porção superior é dominada pela ocorrência de um pacote de rochas

ferríferas bandadas, nas quais lâminas e camadas de hematita/magnetita e hidróxidos de ferro se alternam com material argiloso, alterado, friável, de coloração ocre intensa. A saber, toda a mineralização ferrífera da Mina Várzea do Lopes encontra-se alojada nas rochas dessa unidade geológica.

No que diz respeito à Formação Gandarela, em sua porção basal, esta é caracterizada por intercalações centimétricas de carbonatos e filitos dolomíticos. A porção média à superior contém espessas camadas (espessura de dezenas de metros) de dolomitos puros ou com intercalações de finas lâminas de filitos cinza, além da presença de itabiritos dolomíticos e zonas manganésíferas.

## **2.4 - Grupo Piracicaba**

O Grupo Piracicaba compõe-se de um espesso pacote de sedimentos terrígenos deltáicos e plataformais, intercalados na base com grandes lentes de carbonato.

A Formação Cercadinho, base deste grupo, está em contato com a Formação Gandarela por meio de um pacote de filitos alternado a lentes de quartzitos. Acompanha a direção estrutural SE/NW, sendo representada por quartzitos, quartzitos ferruginosos de coloração cinza, que contêm, na base, uma camada decimétrica de conglomerado intraclástico, além de filitos ferruginosos.

Na base do Grupo Piracicaba, através de um contato com gradacional com a unidade anteriormente descrita, encontra-se a Formação Fecho do Funil, constituída, da base para o topo, por filitos dolomíticos e filitos carbonáticos. O acamamento observado é definido pela alternância das distintas bandas composicionais.

## **2.5 - Coberturas Recentes**

As coberturas recentes são representadas por depósitos elúvio-coluviais e depósitos residuais e detríticos, incluindo majoritariamente cangas e laterias. As cangas, de acordo com as interpretações de Dorr (1969), são as unidades de cobertura mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, remontando, talvez, ao período Cretáceo. Suas ocorrências estão relacionadas à presença da Formação Cauê e aos pontos culminantes da porção setentrional do Platô da Moeda. Na área em questão é comum encontrar as coberturas de canga cobrindo os litotipos da Formação Gandarela.

## **3 - CONTEXTUALIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA**

Os distintos litotipos encontrados no entorno da Mina Várzea do Lopes, em face de sua extrema variedade composicional, potencializam tipologias aquíferas também bastante diferenciadas entre si (Figura 3). Tratam-se dos sistemas aquíferos Bonfim, Caraça, Itabira, Piracicaba e de Cobertura.

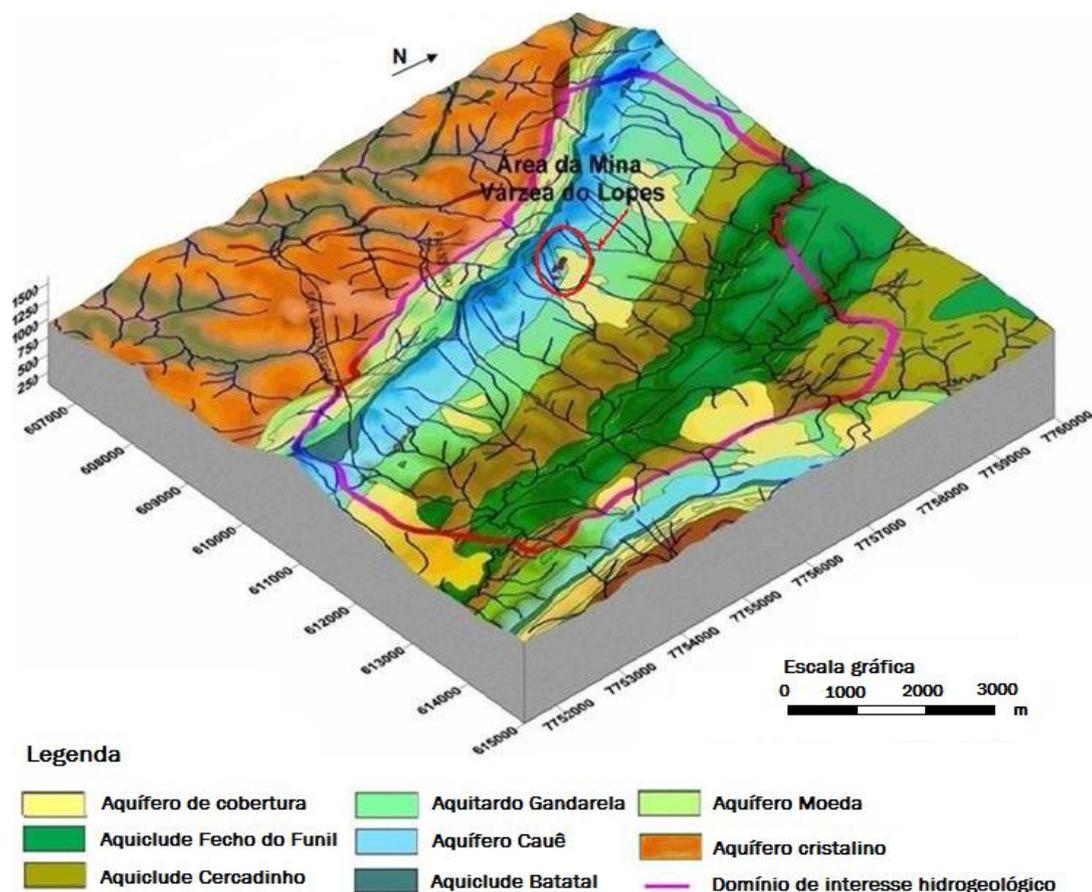


Figura 3. Unidades aquíferas no domínio hidrogeológico do entorno da Mina Várzea do Lopes (De Filippo, 2009).

Localmente, estão presentes apenas os sistemas Itabira e de cobertura na área da mina, por isso, serão os únicos abordados na sequência.

### 3.1 - Sistema Itabira

O sistema Itabira compõe-se do aquífero Cauê e aquífero Gandarela, os quais abrigam, em conjunto, quase a totalidade dos pontos de água observados na área.

O aquífero Cauê, o principal do Quadrilátero Ferrífero, é constituído por itabiritos (formações ferríferas bandadas - BIF's) e hematitas de diferentes composições. Na área da mina, como em todo o Quadrilátero Ferrífero, estas rochas apresentam-se tanto compactas como friáveis, caracterizando-o como um sistema aquífero misto, ou seja, com dupla porosidade (fissural e intersticial).

A porosidade fissural predomina nos itabiritos e hematitas mais compactas, enquanto a porosidade granular é mais comum nas litologias friáveis, assim como na porção mais superficial do aquífero, onde as rochas encontram-se mais intemperizadas. A porosidade granular neste tipo de rocha está associada à concentração do minério de ferro, sendo comum em porções do aquífero onde a lixiviação dos itabiritos foi mais forte.

De acordo com MDGEO (2011), ensaios laboratoriais em amostras de formações ferríferas de outras minas do Quadrilátero Ferrífero tem, em média, os valores de porosidade efetiva entre 2 e 5% para itabiritos e entre 10 e 15% para a hematita, em consistência com os valores de armazenamento em aquíferos livres, apresentados por De Filippo (2009).

Também é importante citar que o aquífero Cauê é fortemente anisotrópico, com a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas associada às estruturas planares (foliação, bandamento, fraturamento), apresentando valores de condutividade hidráulica mais elevados ao longo da direção de máximo declive da foliação e valores menores na direção perpendicular a essas estruturas. Assim, de forma geral, pode-se dizer que a direção de maior condutividade hidráulica corresponde à direção paralela às estruturas do aquífero, predominantemente NW-SE, enquanto que, na direção perpendicular, E-W/NE-SW, a condutividade hidráulica é menor. No entanto, de acordo com os trabalhos de mapeamento da região, há a presença de uma rede de fraturamento perpendicular à estrutura principal, o que favorece localmente a condutividade hidráulica na direção EW/NE-SW.

Na Mina Várzea do Lopes, o aquífero Cauê está confinado lateralmente, na base, pelo aquíclode Batatal e, no topo, pelo aquícardo Gandarela, o que faz com que os níveis de água deste sistema estejam mais elevados que no entorno.

O aquícardo Gandarela constitui-se basicamente pelos dolomitos intemperizados, localmente denominados de material dolomítico decomposto (MDD).

De maneira geral, suas características hidrodinâmicas são pouco conhecidas. Entretanto, o predomínio de rochas mais pelíticas, permitem considerar este sistema como um aquícardo ou aquíclode. Quando predominam rochas carbonáticas são (calcários dolomíticos), esse sistema tende a se comportar como um aquífugo. As feições cársticas na formação Gandarela são pouco expressivas, constituindo zonas aquíferas localizadas.

Segundo o mapeamento geotécnico realizado pela BVP (BVP, 2014) na Mina Várzea Lopes, localmente, o aquícardo Gandarela é constituído por rochas dolomíticas compactas e decompostas, intercaladas a lentes de itabirito dolomítico são e itabiritos friáveis, as quais comportam-se como zonas aquíferas localizadas e semi-confinadas pelos demais materiais de baixa condutividade hidráulica.

Tal contexto confere ao aquícardo uma elevada anisotropia, com condutividade hidráulica ortogonal à camada muito baixa paralelamente ao acamamento encontramos condutividade hidráulica mais elevada nas lentes de itabirito friável. Lembrando que os litotipos que constituem o sistema Itabira apresentam o acamamento com atitude NW-SE e mergulho na ordem de 45° para sudeste.

### **3.2 - Aquífero de cobertura**

Cobrindo a formação ferrífera e suas adjacências, com espessuras de até 50 metros, destacam-se os depósitos de canga e rolado. Tratam-se aquíferos granulares, livres, descontínuos, muito heterogêneos e anisotrópicos. Apresentam elevada permeabilidade e capacidade de armazenamento.

Devido a sua pequena espessura não são considerados propriamente como aquíferos, sendo comumente denominados como aquíferos rasos. Têm um papel muito importante na recarga dos aquíferos sotopostos, dada à capacidade de infiltração rápida. Na maioria das vezes, sequer chegam a se manter saturados no período seco, pois ocupam zonas de topografia mais elevada e, devido à alta permeabilidade, são rapidamente drenadas. Representam um fluxo hipodérmico, gerando nascentes no período chuvoso.

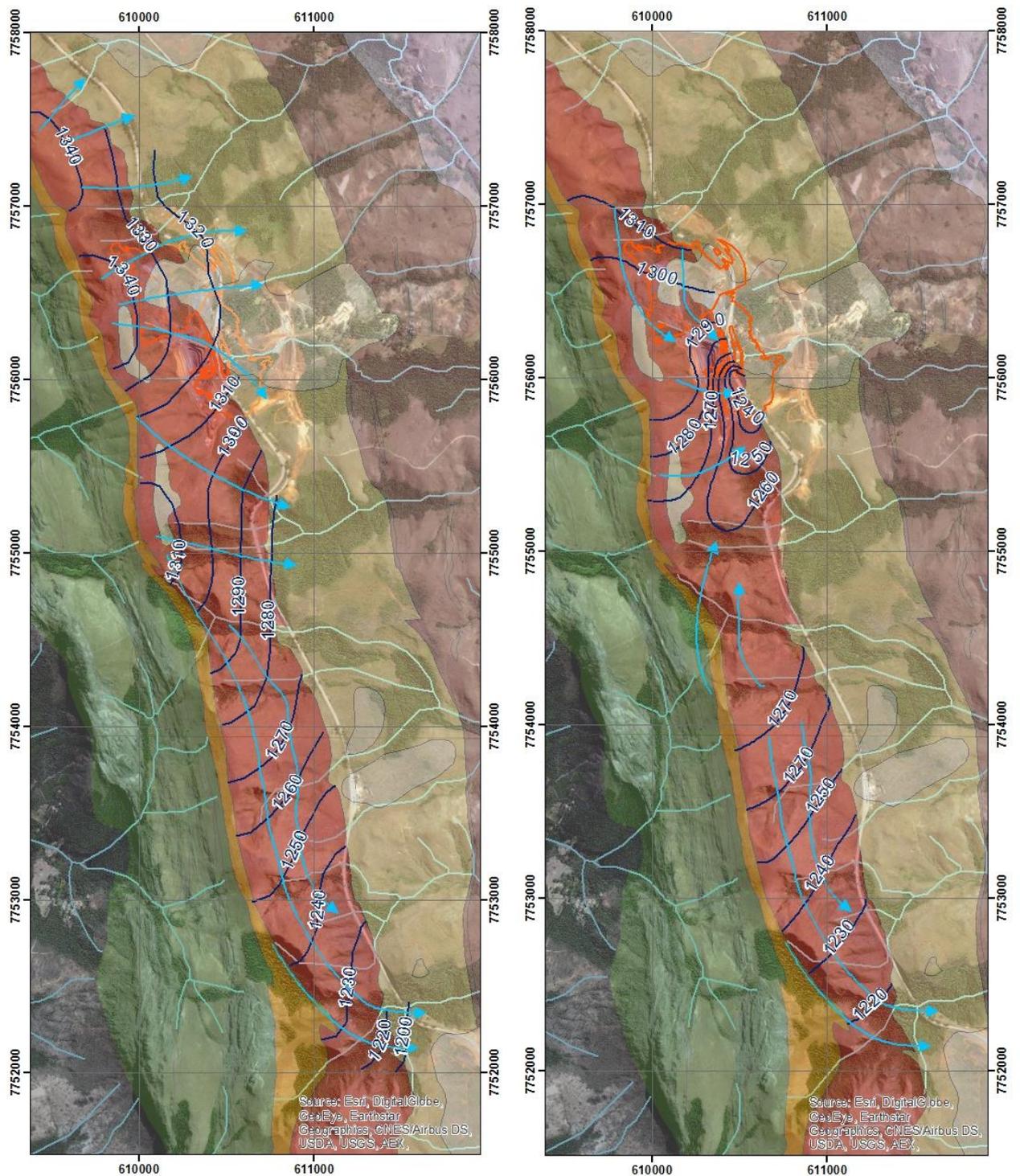
A unidade hidrogeológica das coberturas engloba também os aluviões, elúvios, colúvios, tálus e solos em geral. São heterogêneos, variando de composição e características hidrodinâmicas. Regiões mais argilosas possuem menor capacidade de armazenamento e permeabilidade

### **3.3 - Fluxo subterrâneo**

Para avaliação do fluxo d'água subterrâneo no entorno da Mina Várzea do Lopes, foram comparadas duas superfícies equipotenciais elaboradas em diferentes períodos de tempo, conforme mostra a Figura 4.

A primeira imagem da Figura 4 (esquerda) refere-se à potenciometria elaborada a partir de dados de nascentes e instrumentos de monitoramento de nível obtidos entre os anos de 2007 e 2009 (De Filippo, 2009), quando ainda não foi dado o início do bombeamento na mina. Nela, na região a sul da Mina Várzea do Lopes, foi evidenciado um fluxo preferencial para SE, acompanhando a topografia, enquanto que na região a norte da mina, verificou-se que o escoamento subterrâneo ocorre para E e NE.

A segunda superfície equipotencial, a direita (MDGEO, 2014), gerada a partir de dados de monitoramento do ano de 2014, mostrou que o fluxo regional permaneceu semelhante ao comportamento anteriormente descrito. Entretanto, na área da mina, foi possível constatar alterações no escoamento subterrâneo, que apresentou-se de forma radial, convergindo para o interior da cava, comportamento esperado para uma área onde opera um sistema de rebaixamento do nível d'água.



**LEGENDA**

**Litologias**

**Coberturas**

Aluvião/ canga

**Supergrupo Minas**

**Grupo Piracicaba**

Formação Fecho do Funil

Filito dolomítico e argiloso

Formação Cercadinho

Filito, quartzo e quartzo ferruginoso

**Grupo Itabira**

Formação Gandarela

Itabirito dolomítico, filito dolomítico argiloso

Formação Cauê

Itabirito com lentes de hematita

**Grupo Caraça**

Formação Batatal

Filito cinza a marrom

Formação Moeda

Quartzito com lentes de conglomerado

**Complexo Bonfim**

Gnaiss e granito

**Convenções Cartográficas**

Mina Várzea do Lopes

Hidrografia

**Potenciometria**

Linhas equipotenciais

Direção do fluxo subterrâneo

Figura 4. Unidades aquíferas no domínio hidrogeológico do entorno da Mina Várzea do Lopes.

#### 4 - DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Conforme mencionado, o talude leste da Mina Várzea do Lopes, devido à presença de material dolomito decomposto saturado, apresenta baixa estabilidade geotécnica. Diante disso, para o avanço da mina, torna-se essencial sua drenagem.

No caso do aquífero Cauê, devido sua elevada condutividade hidráulica, este permite, de maneira bastante favorável, a atividade de rebaixamento de nível d'água através de poços tubulares. Em contrapartida, o aquitardo Gandarela, por sua heterogeneidade composicional, ora possibilita a ocorrência de aquíferos suspensos, e ora comporta-se como uma unidade de baixa condutividade hidráulica. Apresenta taxas de rebaixamento muito lentas, fazendo com que as atividades de rebaixamento de nível d'água por meio de poços de bombeamento não sejam eficientes, implicando na necessária avaliação e concepção de um sistema de drenagem alternativo.

No intuito de gerar novos meios de desaguamento para o talude leste foi, a princípio, elaborado um projeto conceitual contemplando a locação de drenos verticais (Figura 5), os quais estabeleceriam uma região de conexão entre unidades hidrogeológicas de diferentes cargas hidráulicas. O conceito básico desta metodologia consiste em estabelecer zonas de fluxo contínuo através dos drenos sem o uso de bombas, desde que o nível d'água no material menos permeável (dolomitos) estivesse superior ao nível da unidade de maior permeabilidade (formação ferrífera). Como na unidade dolomítica existem materiais de diferentes condutividades hidráulicas, buscou-se construir os drenos conectando as lentes de itabirito friável, presentes na unidade dolomítica, as quais captariam a água dos materiais menos permeáveis, alimentando os drenos e, conseqüentemente, a formação ferrífera.

Construtivamente, uma alternativa para viabilizar a instalação dos drenos na Mina Várzea do Lopes consistiu na perfuração de estruturas inclinadas (Figura 5), as quais, além de interceptar uma espessura maior de hematita, poderiam ser construídas em menor profundidade.

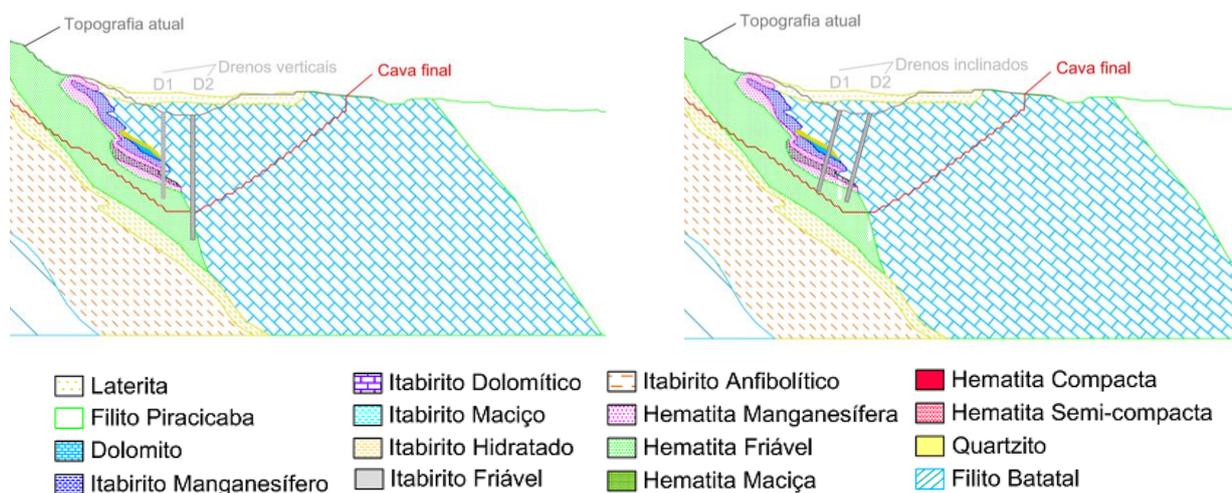


Figura 5. Esquema dos drenos propostos em seções geológicas da Mina Várzea do Lopes.

De posse de informações quanto à geologia e hidrogeologia da área acrescidas ao projeto conceitual, foi possível elaborar um modelo numérico de água subterrânea que possibilitou a avaliação do sistema de drenagem proposto.

O software empregado na modelagem foi o “Visual MODFLOW”, em sua versão 2011.1. Seu algoritmo trabalha com o método das diferenças finitas, o qual simula condições de fluxo d’água subterrânea em aquíferos livres, confinados e semi-confinados, bem como a combinação ou associação destes três tipos de aquíferos.

## 5 - MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

O modelo numérico foi construído com 130 linhas, 104 colunas e 13 camadas, resultando em um total de 175.761 células. Compreende cerca de 11 km<sup>2</sup>, possuindo uma extensão de 3 km na direção leste-oeste e 4 km na direção norte-sul. A área modelada procurou abranger todo o sistema aquífero Itabira, envolvendo o Aquífero Cauê e o Aquicludo Gandarela (Figura 6).

Para os limites oeste e leste do modelo foram inseridas células de fluxo nulo (células inativas), representando as rochas impermeáveis das formações Batatal e Cercadinho, respectivamente. Os limites norte e sul foram definidos através de condições de contorno específicas que pudessem representar a continuidade dos sistemas aquíferos modelados.

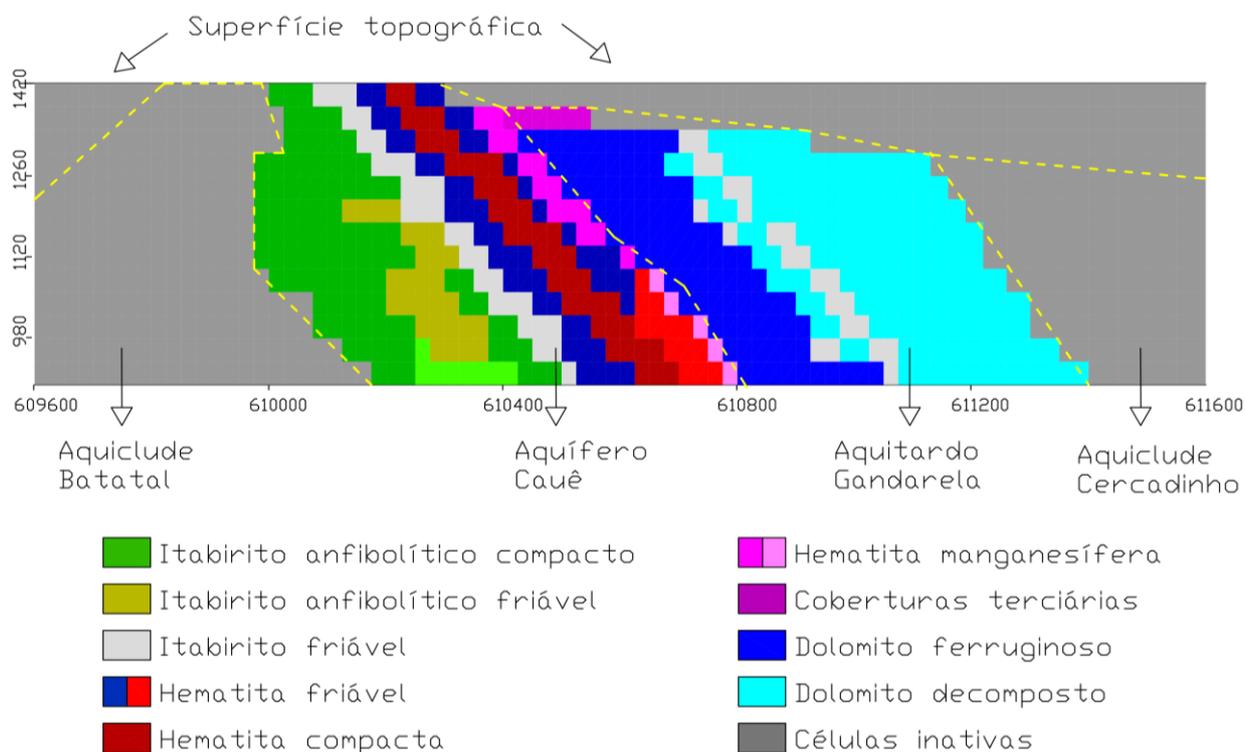


Figura 6. Unidade litológicas discretizadas no modelo numérico.

## 5.1 - Calibrações numéricas

O modelo foi calibrado no regime de escoamento permanente, com dados de monitoramento referente ao ano de 2008, antes ao bombeamento, e transiente, com informações levantadas entre o período de 2010 e 2014.

A saber, o regime permanente (*Steady State*) consiste numa simulação do fluxo d'água na qual predomina uma condição de equilíbrio para o aquífero, na qual não existe variações das propriedades hidrodinâmicas e condições de contorno com o tempo. Já, o regime transiente (*Transient*) simula-se o aquífero em seu estado de não equilíbrio, considerando as variações das propriedades hidrodinâmicas e condições de contorno ao longo do tempo (FEITOSA, 2008).

Durante a calibração procurou-se ajustar os dados calculados pelo modelo numérico aos dados monitorados. Este ajuste foi obtido a partir de um processo denominado de retroanálise, no qual são feitas sucessivas alterações nos valores dos parâmetros hidráulicos e das condições de contorno, com o objetivo de alcançar boa representatividade das condições observadas em campo, como cotas de níveis d'água dos piezômetros e vazões de descarga do aquífero (vertedouros).

Em ambas as calibrações, foram apresentados resultados satisfatórios tanto numericamente, com atendimento dos parâmetros de calibração, quanto conceitualmente, obtendo-se resultados, de forma geral, coerentes com o modelo de fluxo conceitual pré-estabelecido.

## 5.2 - Simulações numéricas

A partir do modelo calibrado, foram realizadas as simulações do rebaixamento do nível d'água, de modo a atender os planos de lavra da mina. De maneira geral, as simulações tiveram como objetivo a avaliação dos sistemas de rebaixamento propostos para o talude leste e conseqüentemente para a formação ferrífera, de modo a viabilizar a dinâmica operacional.

Nas simulações numéricas, as estruturas de drenagem utilizadas foram representadas por poços e drenos, acompanhando a geometria das cavas, de maneira a rebaixar o nível d'água nos *bottom pits* e taludes planejados em cada ano. Em geral, os poços tubulares têm como objetivo promover o rebaixamento do nível d'água nas regiões onde a lavra avança sob a superfície do nível d'água. Consistem nas principais estruturas de drenagem de cava, utilizadas quando o sistema aquífero a ser rebaixado possui potencial hídrico condizente com o funcionamento das mesmas, como é o caso da Formação Cauê.

No caso da Formação Gandarela, foram apresentadas duas alternativas principais de estruturas de drenagem para o talude leste (drenos verticais e inclinados). Devido à similaridade dos resultados numéricos ao simular drenos verticais e inclinados, optou-se no presente trabalho, a apresentação dos resultados das simulações realizadas com drenos inclinados, uma vez que estes apresentam profundidades inferiores e conseqüentemente o melhor custo-benefício.

No modelo numérico, os drenos foram projetados de acordo com as seções geológicas verticais fornecidas pela Gerdau, optando pelas regiões onde não houvesse presença de coberturas terciárias, de modo a favorecer a perfuração.

Fisicamente, foi proposto que os drenos fossem perfurados no material dolomítico até atingir a formação ferrífera, na qual avançaria por cerca de 20 metros, a fim de criar uma zona de conexão entre tais litologias.

Na Figura 7, pode-se observar a locação numérica dos drenos inclinados no talude leste para melhor compreensão de seu posicionamento em relação à geologia e à topografia das cavas projetadas.

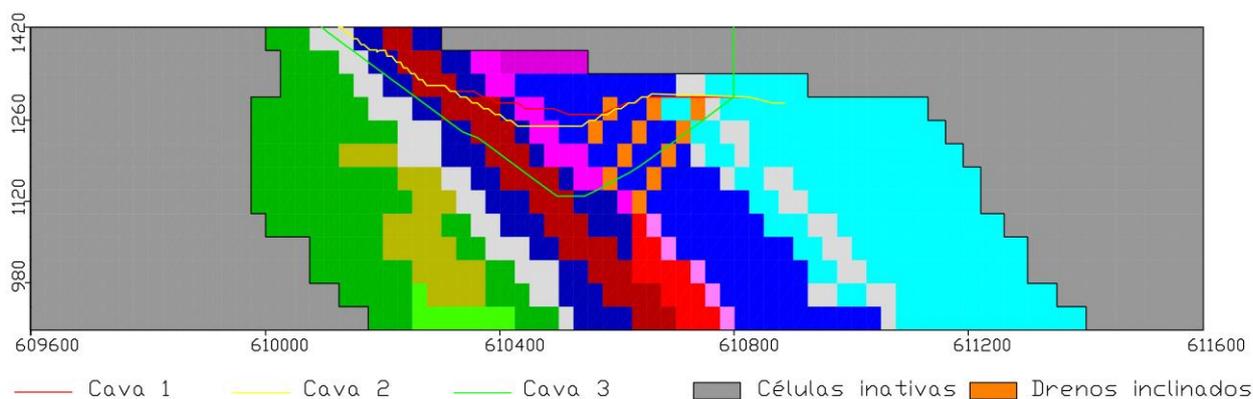


Figura 7. Localização dos drenos inclinados na seção vertical do modelo numérico.

Para verificar a eficácia do sistema de drenagem proposto foi realizada uma primeira simulação, contemplando apenas o bombeamento dos poços já instalados na Mina Várzea do Lopes, e uma segunda simulação, considerando além dos poços operantes na formação ferrífera, 22 novos drenos inclinados inseridos no MDD.

Os resultados obtidos na simulação foram avaliados sistematicamente. Para uma melhor análise referente à eficiência dos drenos inseridos no talude leste, fez-se a comparação (Figura 8) entre um cenário que contempla apenas os poços de bombeamento (à esquerda) e uma segunda situação na qual já existe a locação dos drenos inclinados (à direita).

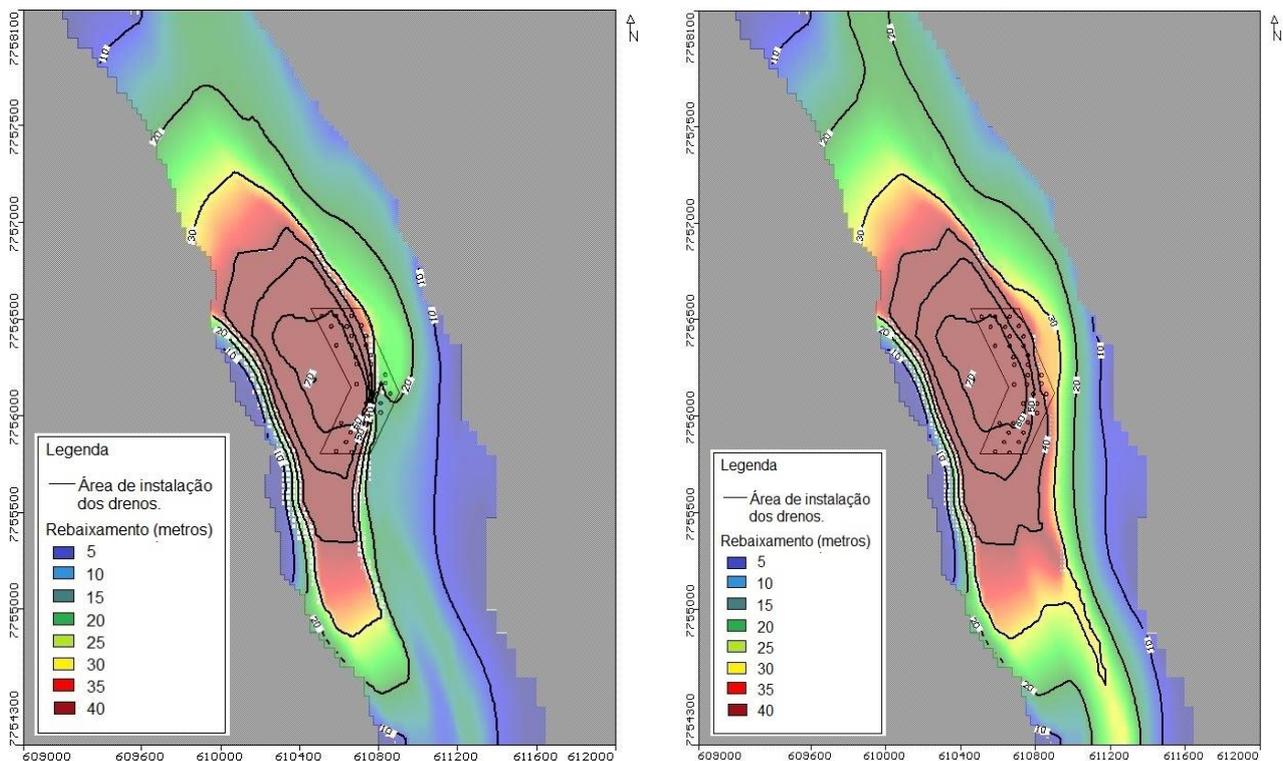


Figura 8. Cenários comparativos entre a utilização e a não utilização de drenos no talude leste.

Baseando-se nos resultados obtidos na simulação, foi possível observar que sistema de drenagem simulado para o talude leste proporcionou resultados satisfatórios, sendo considerado a alternativa mais adequada para atender a demanda de lavra planejada.

## 6 - INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE DREANGEM PROPOSTO PARA O TALUDE LESTE

Diante dos resultados apresentados e com a posterior aprovação do trabalho pela GERDAU, entre os meses de junho e dezembro de 2015, foi realizada a perfuração de 20 drenos no talude leste da Mina Várzea do Lopes, definidos entre as 22 estruturas simuladas conforme a capacidade de produção, sendo 6 deles instalados com o ângulo de  $60^\circ$  com a superfície (inclinados) e o restante com inclinação de  $90^\circ$  (vertical).

Vale mencionar que, a princípio foram definidas apenas perfurações inclinadas, visando menores profundidades. Porém, devido às dificuldades encontradas durante a perfuração, optou-se por drenos verticais. Todos os drenos foram perfurados no diâmetro de 6 polegadas e revestidos com tubos lisos e filtros de PVC geomecânico DN50. Os furos apresentaram profundidades distintas entre si, devido à disposição das camadas geológicas, uma vez que estes atravessaram todo o material dolomítico até atingir a formação ferrífera, onde avançou por mais algumas dezenas de metros.

O mapa da Figura 9 apresenta a localização em planta dos drenos instalados no talude leste da Mina Várzea do Lopes.

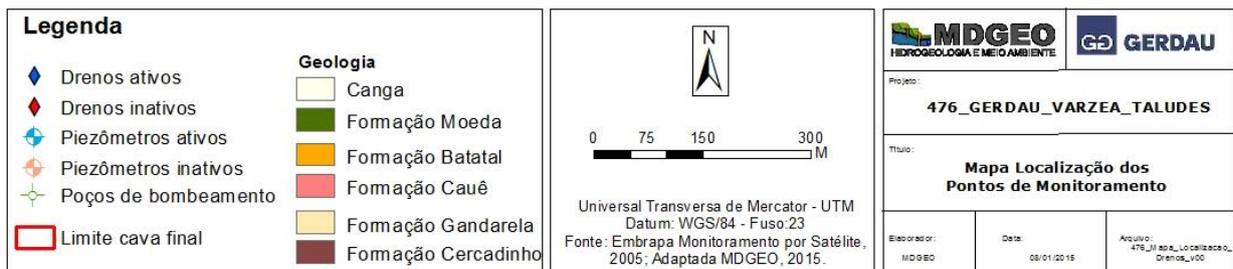
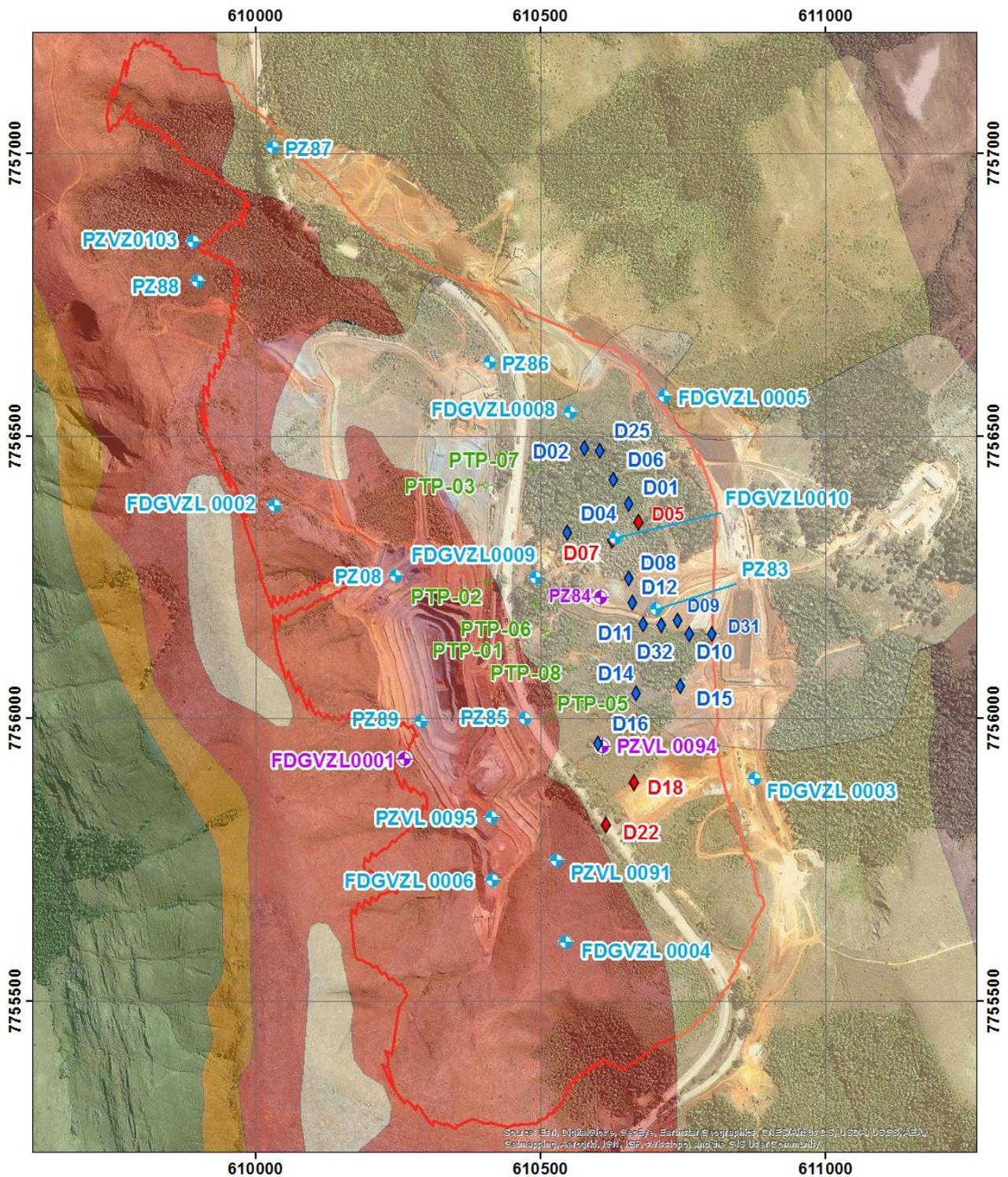


Figura 9. Mapa de localização dos drenos instalados no talude leste em base geológica local.

Durante o período de instalação dos drenos, foi realizado o monitoramento do comportamento do nível d'água subterrâneo no talude leste. A compilação desses dados pode ser verificada no gráfico da Figura 10.

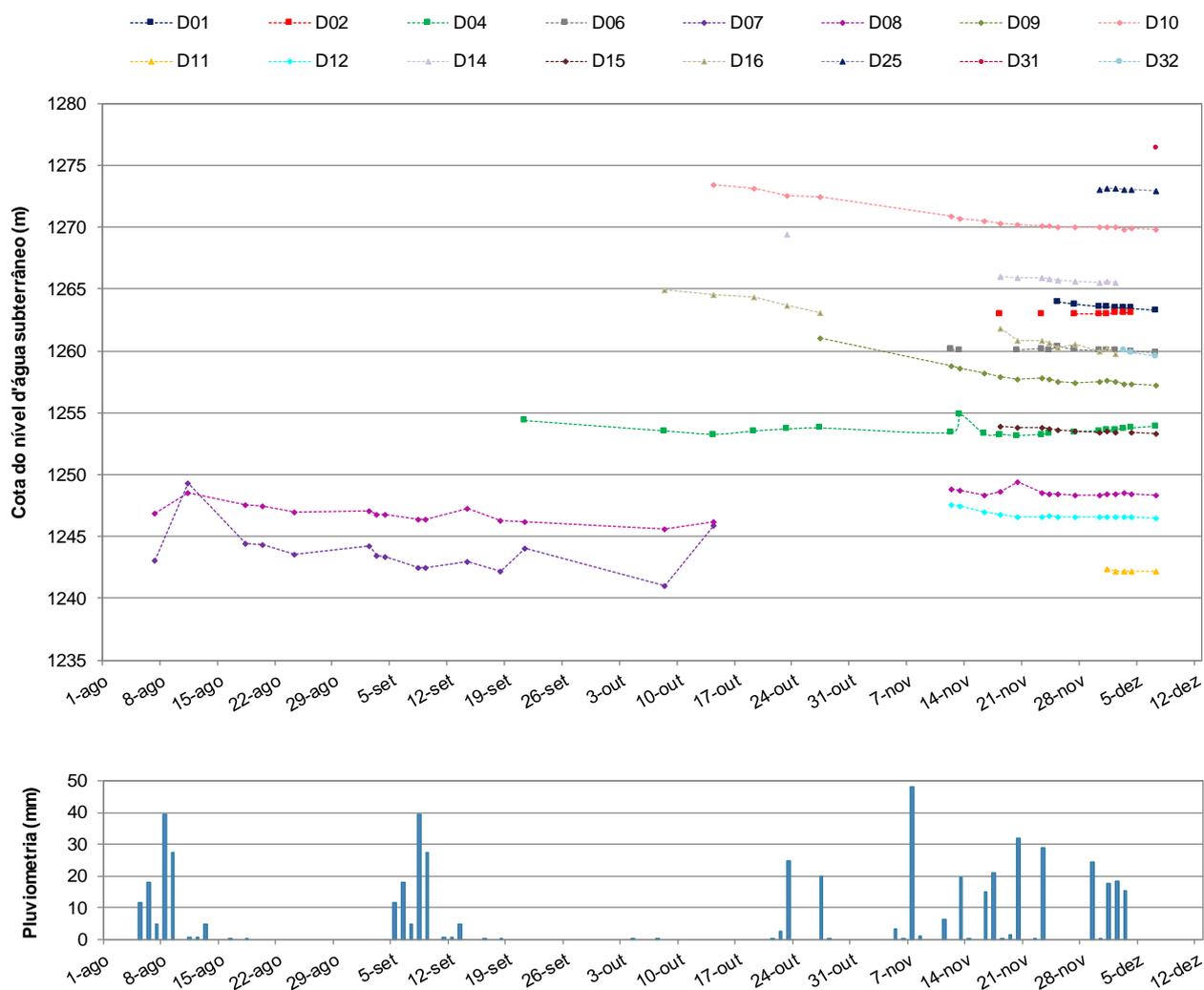


Figura 10. Evolução do nível d'água nos drenos do talude leste e registro da precipitação local (agosto a dezembro/ 2015).

Em geral, nota-se que desde o início de operação dos drenos, os dados obtidos em campo evidenciaram o rebaixamento do nível d'água no talude leste. A partir de uma análise individual do comportamento dos drenos, é possível observar que aqueles que apresentaram maior rebaixamento, com cerca de 4 metros, correspondem aos drenos D09, D10, D14 e D16 enquanto os drenos D07 e D08, além de registrarem também tal comportamento, evidenciaram grandes oscilações, aparentemente sazonais, em seus níveis. A partir dessas análises, estima-se que estes drenos atravessaram uma maior espessura de itabirito friável, resultando em uma resposta mais dinâmica de suas leituras.

Para a avaliação geral do comportamento do nível d'água na Mina Várzea do Lopes, esses dados foram acrescidos às informações do monitoramento realizado pela própria Gerdau nos demais instrumentos. Os dados consolidados podem ser visualizados nos gráficos das figuras a seguir. É importante citar que a Figura 11 refere-se ao comportamento do nível d'água na Formação Gandarela enquanto a Figura 12 apresenta a evolução do nível d'água nos piezômetros que monitoram a Formação Cauê (formação ferrífera).

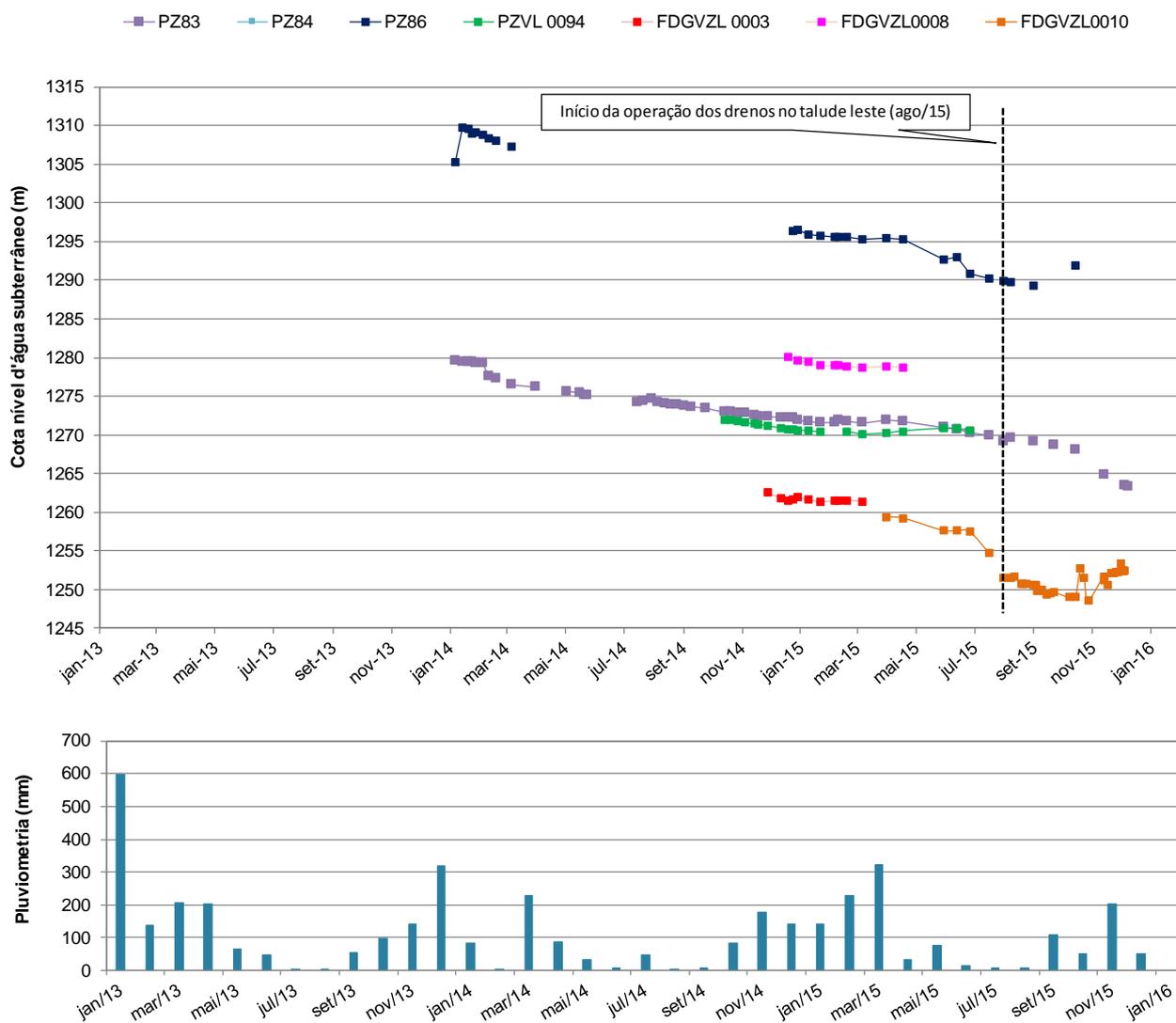


Figura 11. Evolução do nível d'água nos piezômetros instalados na Fm. Gandarela (MDD) e da precipitação pluviométrica local.

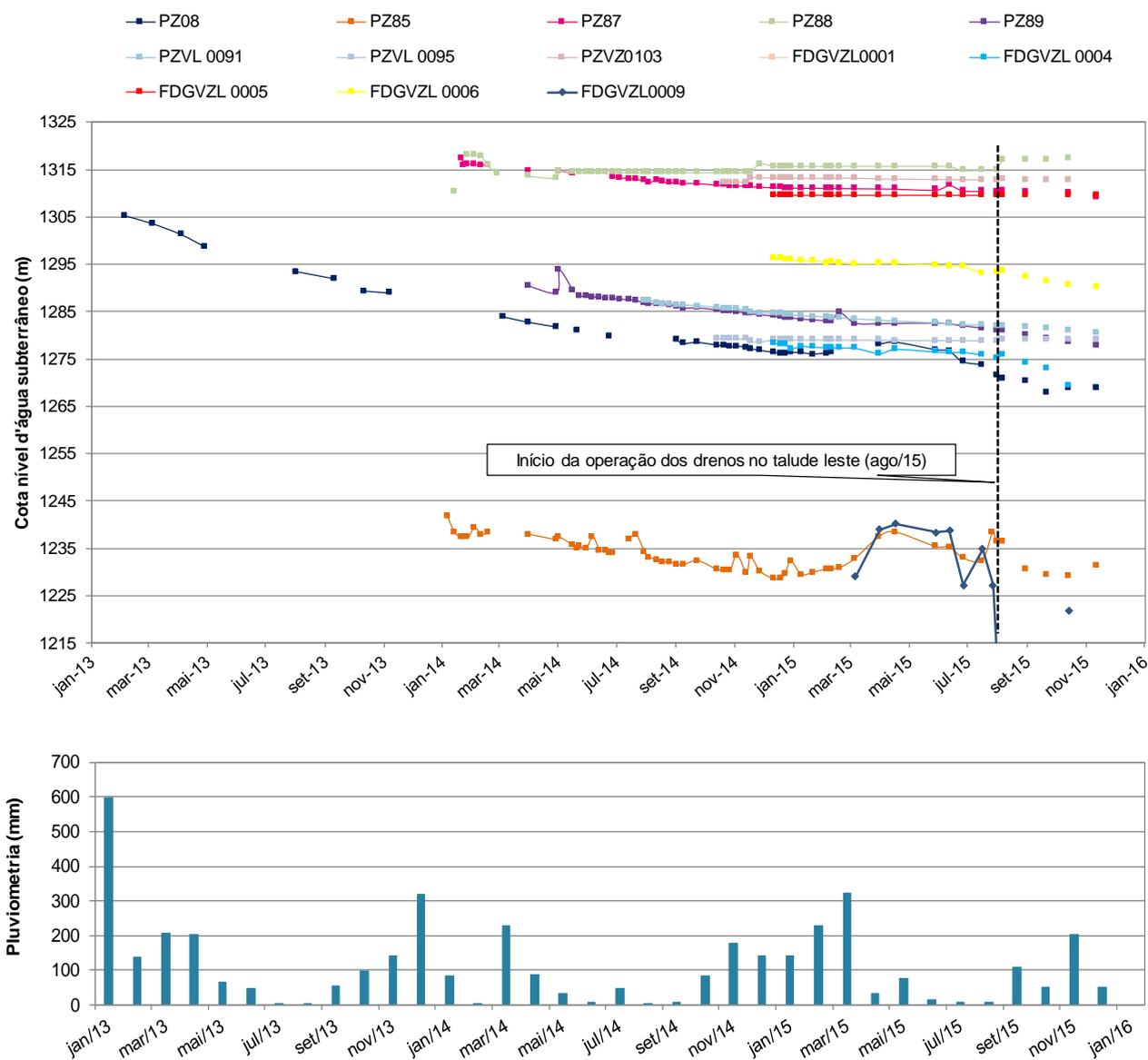


Figura 12. Evolução do nível d'água nos piezômetros instalados na Fm. Cauê (minério ferro) e da precipitação pluviométrica local.

Com base nos gráficos anteriores, nota-se que, antes da implementação dos drenos, enquanto o aquífero Cauê era muito bem drenado pelo sistema de rebaixamento do nível d'água instalado (poços), o aquífero Gandarela permanecia saturado, com níveis elevados e com uma taxa de rebaixamento muito baixa. Neste período, a drenagem do MDD era realizada apenas na face do talude, o que resultava em um baixíssimo rebaixamento e inúmeros problemas de escorregamentos localizados. Como a zona de mineralização ferrífera está sotoposta ao MDD, esses escorregamentos acarretavam na contaminação do minério por materiais estéreis, causando perdas econômicas.

Após a instalação dos drenos foi possível verificar que comportamento do nível d'água evidencia reflexos do sistema de rebaixamento não só na formação ferrífera, mas sim em toda a região da Mina Várzea do Lopes.

Como apresentado, o rebaixamento do nível d'água do aquífero Gandarela foi intensificado com a instalação dos drenos, comprovando a eficácia dos mesmos. Tal fato é facilmente observado no PZ-083, que anteriormente à implementação deste novo sistema de desaguamento evidenciou um rebaixamento de cerca de 6 metros em um prazo de ano, sendo que com o novo sistema de drenagem instalado, o mesmo rebaixamento foi atingido em apenas 5 meses.

## **7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho apresentou os estudos hidrogeológicos na Mina Várzea do Lopes, contemplando o modelo numérico, as simulações de máximo rebaixamento d'água e a avaliação dos sistemas de drenagem propostos.

Os prognósticos dessas simulações indicaram que o sistema de rebaixamento do nível d'água constituído por poços de bombeamento na formação ferrífera e bateria de drenos no material dolomítico, corresponde à alternativa mais adequada para atender a demanda de lavra planejada.

Assim como mostrado pelo modelo numérico, a implantação do sistema de drenagem composto por drenos verticais, instalados no talude leste, mostrou resultados práticos muito satisfatórios, representando uma alternativa viável para o rebaixamento de materiais de baixa condutividade hidráulica, o que permitiu o desenvolvimento da atividade de lavra de forma mais segura, com encaixantes bem drenadas e taludes com melhor estabilidade geotécnica.

## **8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALKMIM, F. F. e Marshak, S., 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research* 90: 29-58.

BVP Engenharia, 2013. Serviços de Engenharia Geotécnica na Mina Várzea do Lopes – Relatório Análise Estabilidade Cava Final. Relatório Interno, agosto de 2013, Belo Horizonte.

DE FILIPPO, M. A., 2009. Estudio hidrogeológico del acuífero Cauê y unidades hidrogeológicas adyacentes en la porción sur del flanco oeste del sinclinal Moeda, cuadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil). Dissertação. 7a Edición CIHS-d (octubre 2008 – septiembre 2009), 148p.

DORR, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, US Geol. Surv. 110 p.

FEITOSA, F, 2008. (Ed.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3a. Ed. Rio de Janeiro, Brasil: CPRM LABHID.

MDGEO, 2011. Estudos hidrogeológicos na Mina Várzea do Lopes. Relatório Interno, fevereiro de 2011, Belo Horizonte/MG.

MDGEO, 2014. Compilação de dados e modelo conceitual – Relatório Parcial. Relatório Interno, abril de 2014. Belo Horizonte/ MG.