

5

Resultados e discussões

A fim de se aplicar e testar o código computacional apresentado nessa dissertação, comparações do modelo hidrológico e mapeamento de susceptibilidade aqui gerados, para mais de uma condição inicial, foram realizadas com referências já consagradas em diversos trabalhos acadêmicos. No caso do modelo hidrológico, se utilizou como referência o programa Hydrus 1D (Simunek et al., 2006), e para o mapeamento de risco, teve-se como referência o caso das Bacias do Quitite-Papagaio.

Para as condições iniciais, tendo como base a pesquisa bibliográfica, foram consideradas três situações iniciais de sucção, sendo elas 40, 20 e 5 kPa. Inicialmente foram gerados modelos com a teoria do talude infinito 2D, sem os efeitos da vegetação. Após, mapas de susceptibilidade considerando os efeitos da vegetação e da tridimensionalidade também foram gerados e comparados com os anteriores. Todos os mapas de susceptibilidade foram gerados para as condições antes e após o período chuvoso.

Com relação à série de chuva, optou-se pelos dados pluviométricos da estação climática do Alto da Boa Vista, por serem mais elevados que a estação climática de Jacarepaguá. Optou-se pelo período entre os dias 02 a 14 de fevereiro de 1996. Antes do dia 02 observa-se uma sequência de dias sem chuva, e o dia 14 de fevereiro é o último dia com a chuva de grande intensidade, motivo da escolha.

Como não foram encontrados na literatura parâmetros de Van Genuchten para a área de estudo (n , α , θ_s , θ_r), foram adotados parâmetros utilizados por Soares (1999) em uma retroanálise de um escorregamento ocorrido em fevereiro de 1988, em um solo coluvionar da região da Vista Chinesa, Rio de Janeiro.

Sobre os parâmetros relacionados à vegetação, teve-se como base a informação de que, na época da tragédia, predominavam nas porções médias e altas da bacia a cobertura florestal (Vieira et al., 1998 *apud* Fernandes et al., 2001). Os valores de coesão de raiz partiram da Tabela 5. Com relação à profundidade das raízes Almeida e Soares (2003) apontam que tal parâmetro pode

chegar a mais de 5 metros para a mata atlântica, logo se considerou que a raiz estaria presente em todo o perfil. Para a sobrecarga, adotou-se o valor de 3 kPa, o mesmo considerado por Soares (1999).

Para o coeficiente de empuxo utilizou-se o valor de 0,5, seguindo novamente Soares (1999).

A sucção na frente de saturação, importante parâmetro da equação de Green-Ampt, foi obtida por meio da eq. 13, para cada valor de sucção inicial.

A Tabela 7 resume os parâmetros utilizados nesse trabalho:

Tabela 7 – Parâmetros adotados para o estudo.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Coesão efetiva	c'	kPa	0
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	-	31,14
Peso saturado do solo	γ_{sat}	kN/m ³	19,47
Espessura do solo	e	m	2
Coesão de raiz	c_{raiz}	kPa	7 ; 14
Profundidade da raiz	e_{raiz}	m	2
Sobrecarga da vegetação	ΔP	kPa	3
Coeficiente de empuxo	K_0	-	0,5
Permeabilidade saturada	k_{sat}	cm/s	0,0001
Van Genuchten	$n ; \alpha$	-, m ⁻¹	1,68 ; 7,0
Umidade volumétrica máxima	θ_s	-	0,53
Umidade volumétrica residual	θ_r	-	0,20
Umidade volumétrica inicial	θ_i	-	0,2342 ; 0,2546 ; 0,3344
Sucção inicial	ψ	kPa	40 ; 20 ; 5
Sucção na frente de saturação	ψ_f	mm	42,7 ; 42,7 ; 42,4

Com os parâmetros de Van Genuchten foram geradas a curva característica (Figura 22) assim como a função de permeabilidade (Figura 23). Essas curvas são de suma importância para o modelo, já que seus resultados servem de dados de entrada nas formulações apresentadas, como exemplo para o cálculo do avanço da frente de saturação, assim como para o parâmetro ψ_f .

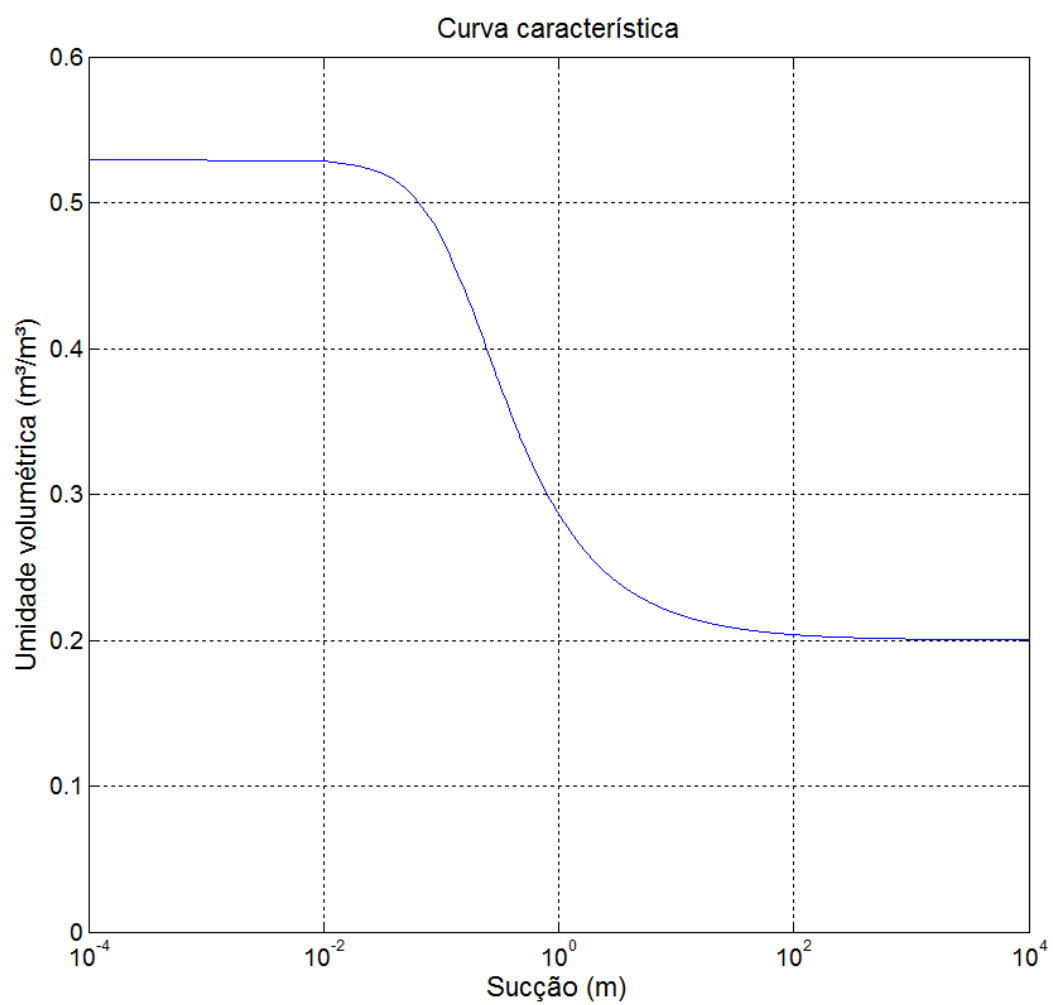


Figura 22 – Curva característica adotada no modelo.

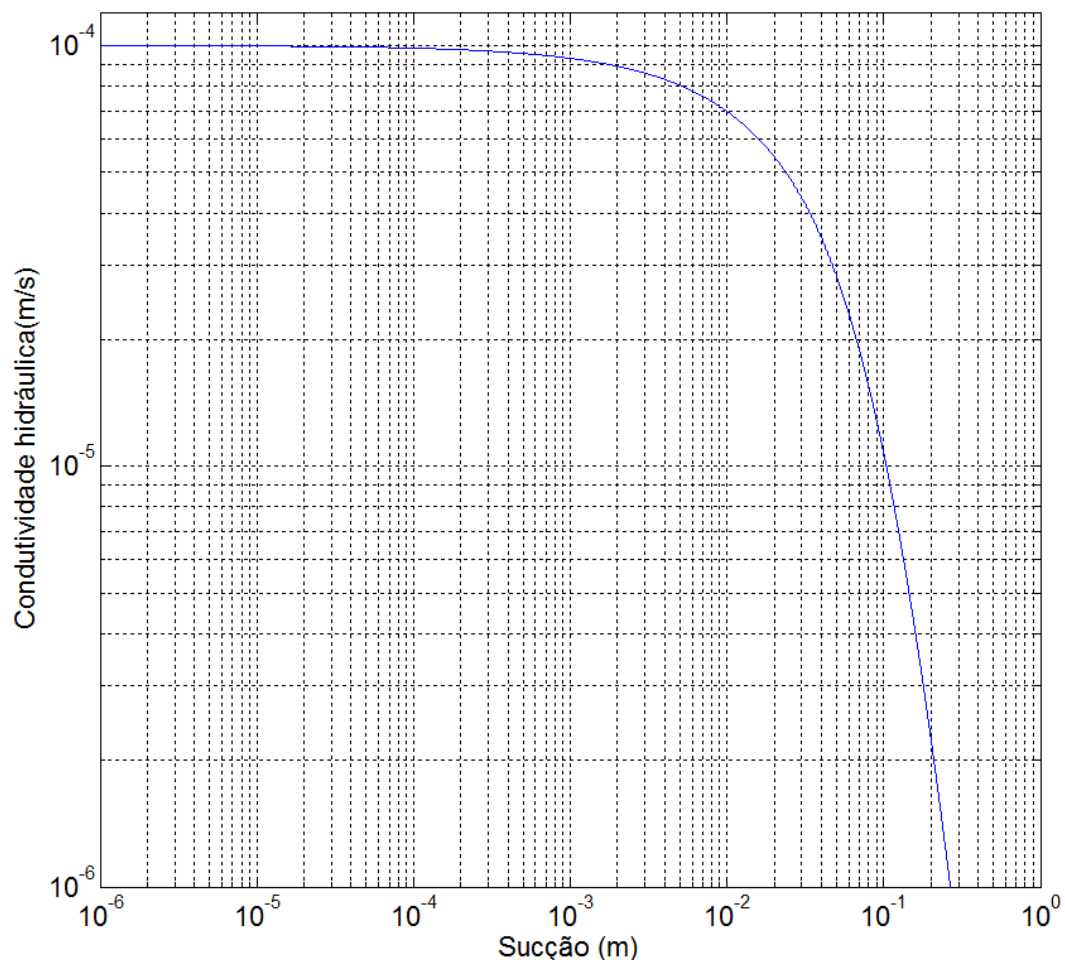


Figura 23 – Função de permeabilidade utilizada no modelo.

O programa também teve como entrada o MDE das bacias com células de dimensão de 2m x 2m (Gomes, 2006).

5.1. Aplicação do modelo hidrológico

Para se testar o modelo de Green-Ampt proposto, em termos de avanço da frente de infiltração no tempo (fluxo 1D em meio não saturado), escolheu-se o programa Hydrus 1D (Simunek et al., 2006) como referência. Tal programa já foi utilizado como código base em diversas teses no programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da PUC-Rio (Miqueletto, 2007).

O Hydrus 1D tem como método de solução os elementos finitos, em formato de barras. Também utiliza funções de interpolação lineares para

aproximação das variáveis primárias e das propriedades de interesse no interior dos elementos.

Para uma devida comparação entre os dois modelos, em ambos utilizaram-se os mesmos parâmetros de Van Genuchten, assim como a série temporal de precipitação. Foram considerados três casos, com sucção inicial de 40, 20 e 5 kPa para uma coluna de 2 metros de solo. Os parâmetros de permeabilidade e geométricos usados estão apresentados na Tabela 7. A discretização da coluna de 2m de solo no Hydrus 1D foi feita com 101 nós, espaçados 2cm entre si. Os resultados são apresentados a seguir (Figuras 24, 25 e 26).

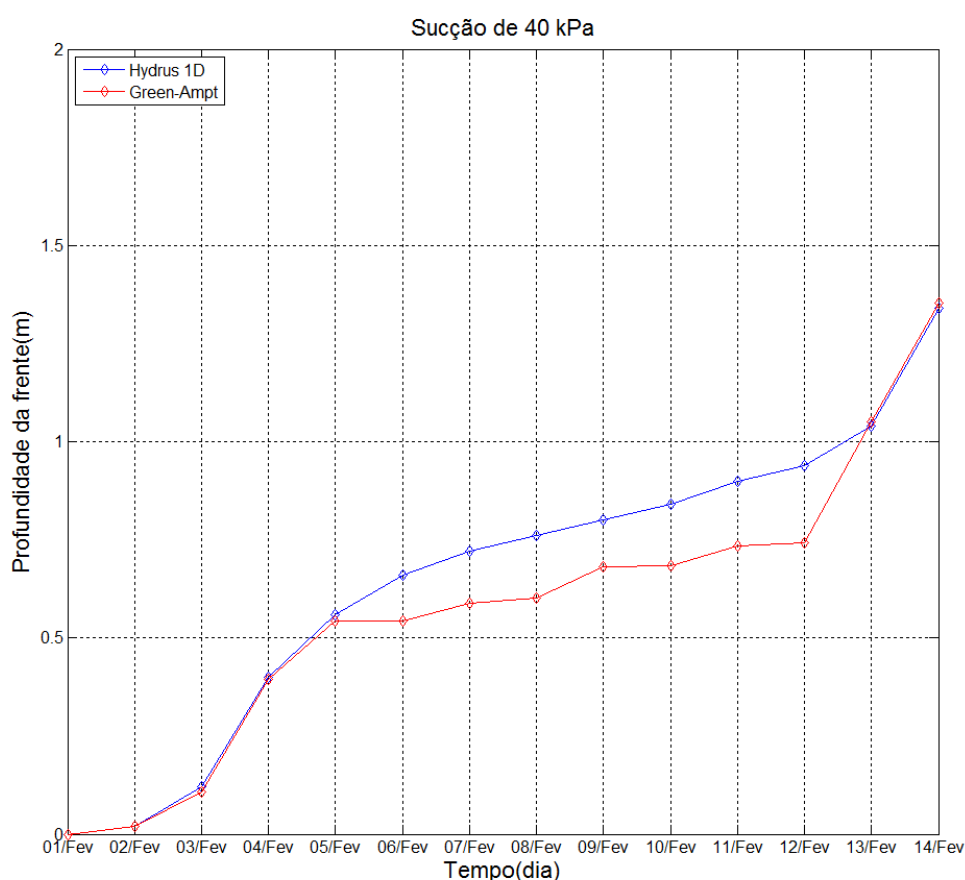


Figura 24 – Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 40 kPa.

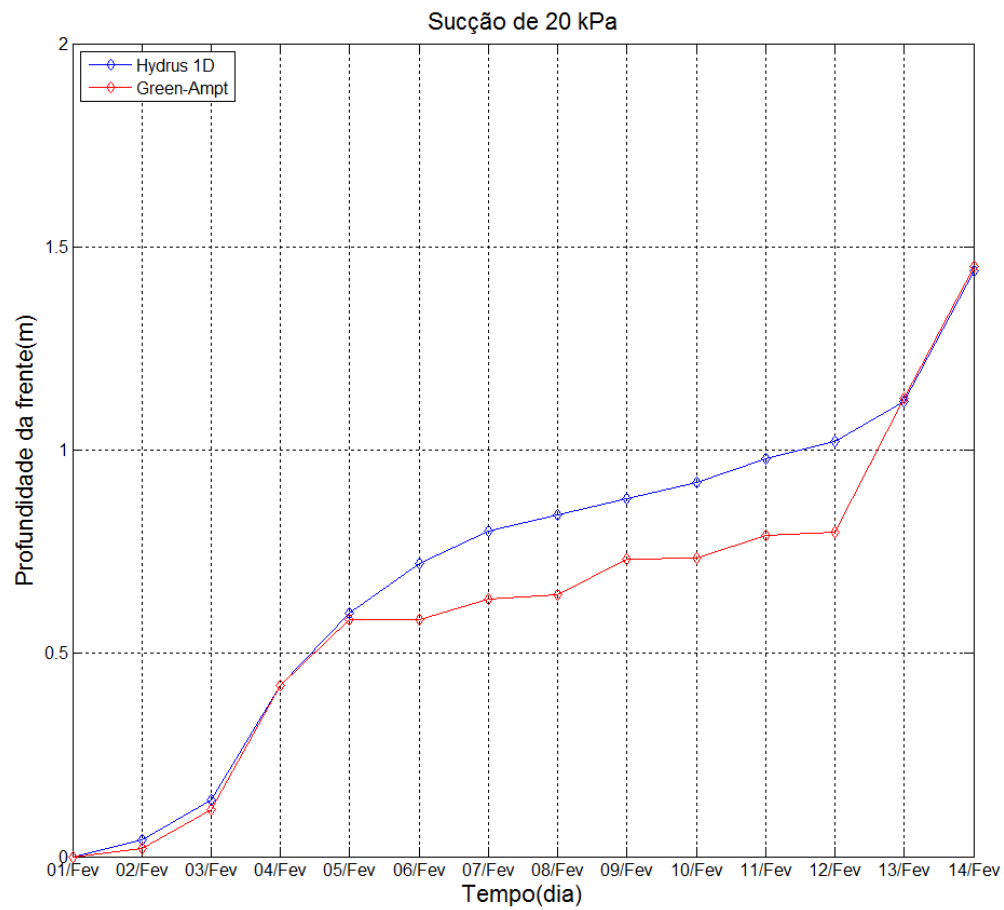


Figura 25 – Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 20 kPa.

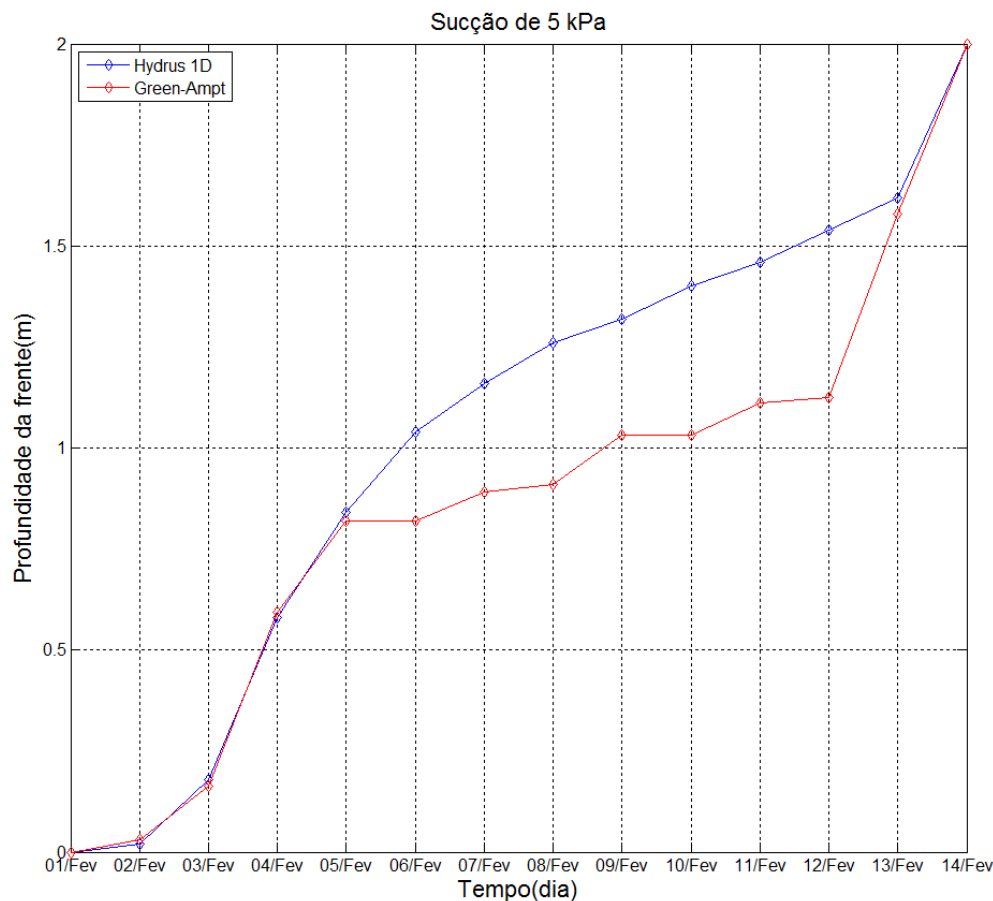


Figura 26 - Comparação do avanço da frente entre o programa Hydrus 1D e o proposto, para a sucção inicial de 5 kPa

Para o traçado da profundidade da frente de saturação pelo Hydrus 1D, representado pela curva azul nos gráficos, verificou-se no arquivo texto de saída, para cada tempo, a possível profundidade da frente. Isso foi feito com base no contraste dos valores de sucção entre nós.

Diferente do modelo proposto, que considera que na frente de saturação a poropressão é nula, no programa Hydrus 1D, o avanço da frente para chuvas de pequenas proporções ($\text{chuva} < k_{\text{sat}}$) não satura por completo o solo, o que faz com que na interface da frente de molhamento o solo apresente valores de sucção próximos a zero, mas não nulos. Pode-se dizer que o modelo de Green-Ampt está a favor da segurança ao se considerar a sucção nula na interface da frente de saturação, o que gera menores fatores de segurança.

O que se observa pelos resultados apresentados nas Figuras 24, 25 e 26 é que até o dia 05 de fevereiro há uma grande similaridade entre ambos os modelos. A partir desse dia pode-se verificar que começa a aparecer uma significativa

diferença entre as curvas. Isso pode ser explicado pelo fato de que no dia 06 de fevereiro não choveu. O programa Hydrus, a cada tempo, faz uma redistribuição de umidade entre nós, independente da ocorrência ou não de chuva, o que já não ocorre no modelo apresentado, motivo de tal discrepância. No dia 10 de fevereiro, novamente há uma precipitação quase nula, o que volta a aumentar a diferença entre a profundidade da frente de molhamento prevista pelo Hydrus 1D e pelo modelo dessa dissertação. Outro fato que chama a atenção é que quanto maior o grau de saturação inicial do solo, maior a diferença entre as curvas.

Porém é de se observar que em todos os casos, nos dias 13 e 14 de fevereiro, quando aconteceram as maiores chuvas, ambos os modelos voltam a coincidir, mostrando que a metodologia de cálculo aqui proposta utilizando-se as equações de Green-Ampt se adequa bem para o estudo da frente de infiltração, tendo em vista que se busca utiliza-la em casos de eventos com grandes precipitações.

5.2.

Aplicação do modelo de susceptibilidade

Como citado anteriormente, para a aplicação e teste do modelo de susceptibilidade foram gerados gráficos e mapas com fator de segurança e *runoff* para três condições iniciais de sucção, sem se considerar os efeitos da vegetação e da tridimensionalidade. Em um segundo momento, mapas considerando tais efeitos foram gerados.

Após, se comparou os resultados dos mapas de fator de segurança e *runoff* com as cicatrizes do evento de 1996, de forma a tentar se avaliar a adequabilidade do modelo. Todos os mapas foram gerados no sistema de projeção UTM SAD69, fuso 23S.

Como entrada para os modelos foram gerados os mapas de declividade e área de contribuição, apresentados nas Figuras 27 e 28.

Observa-se que não necessariamente as cicatrizes mapeadas se localizam nas áreas mais declivosas do terreno, representadas pela cor vermelha (Figura 27). Algumas dessas áreas correspondem a afloramentos rochosos, onde devido a grande declividade, o solo formado pela decomposição da rocha não consegue se manter estável, se depositando em áreas menos declivosas. Porém, em parte, algumas áreas com grande declividade possuem cobertura de solo, e como o

modelo apresentado tem como entrada esse parâmetro na formulação do talude infinito, quanto maior a declividade do talude, menor o fator de segurança. O fato de parte das cicatrizes estarem em áreas menos íngremes deve ser levado em conta na avaliação do modelo, já que nesses locais o mesmo irá considerar como áreas mais estáveis, porém devido talvez a alguma variabilidade nos parâmetros de resistência e hidráulicos, houve ruptura nesses pontos.

Por outro lado, observa-se que parte das cicatrizes se localiza em regiões consideradas como tendo grandes áreas de contribuição (Figura 28). Isso significa que uma das causas dos movimentos de massa no caso de estudo pode ter sido o caráter erosivo do escoamento superficial gerado nessas canaletas de drenagem. Trabalhos na literatura apontam justamente essa conexão entre o escoamento superficial e movimentos de massa (Coe, Kinner e Godt, 2008; Berti e Simoni, 2005).

Ou seja, há aí uma possível conjunção de fatores que levaram a ruptura das encostas das bacias do Quitite e Papagaio: a ruptura por perda de sucção, e a erosão causada pelo escoamento superficial.

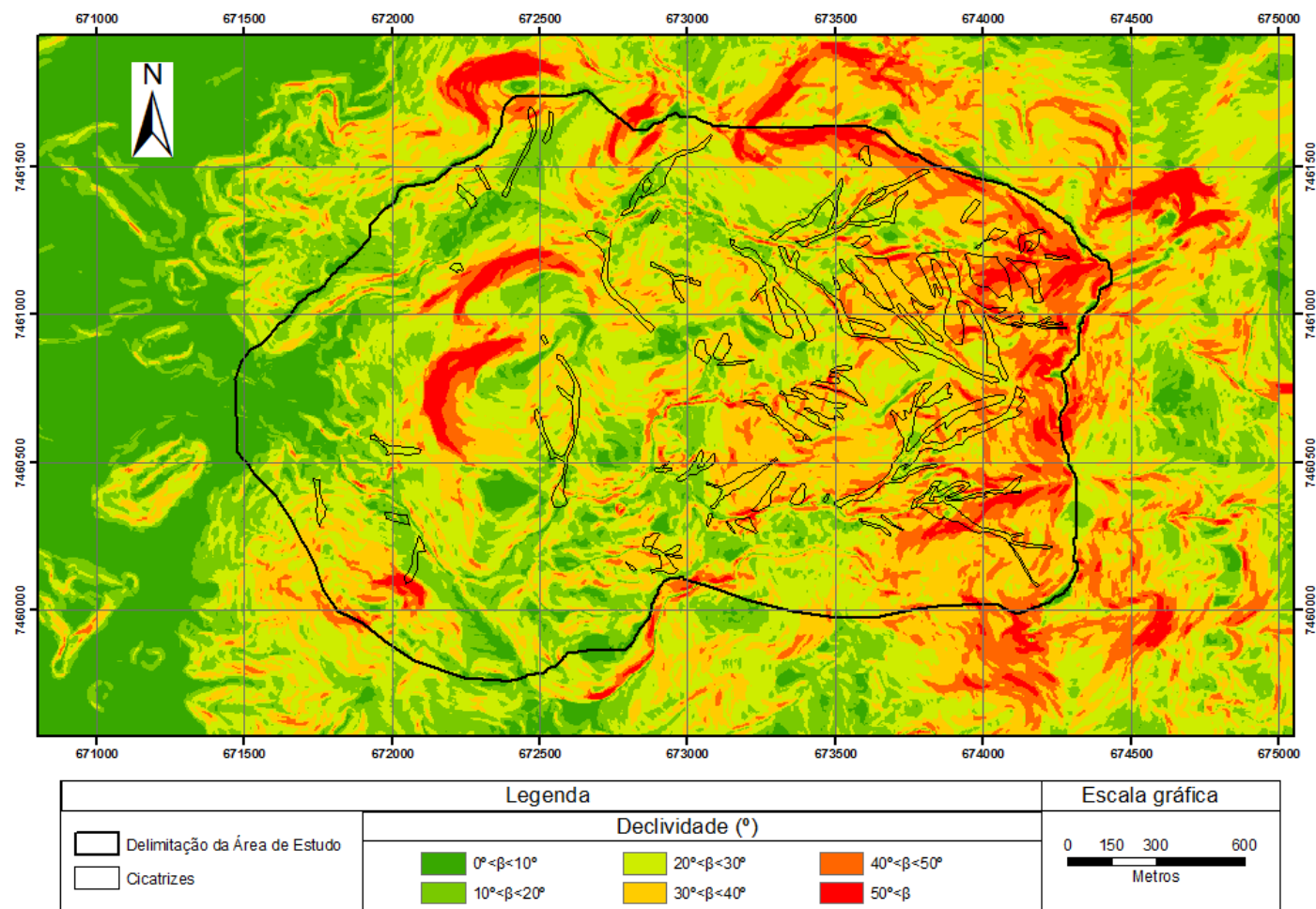


Figura 27 - Declividade das encostas nas bacias do Quitite e Papagaio.

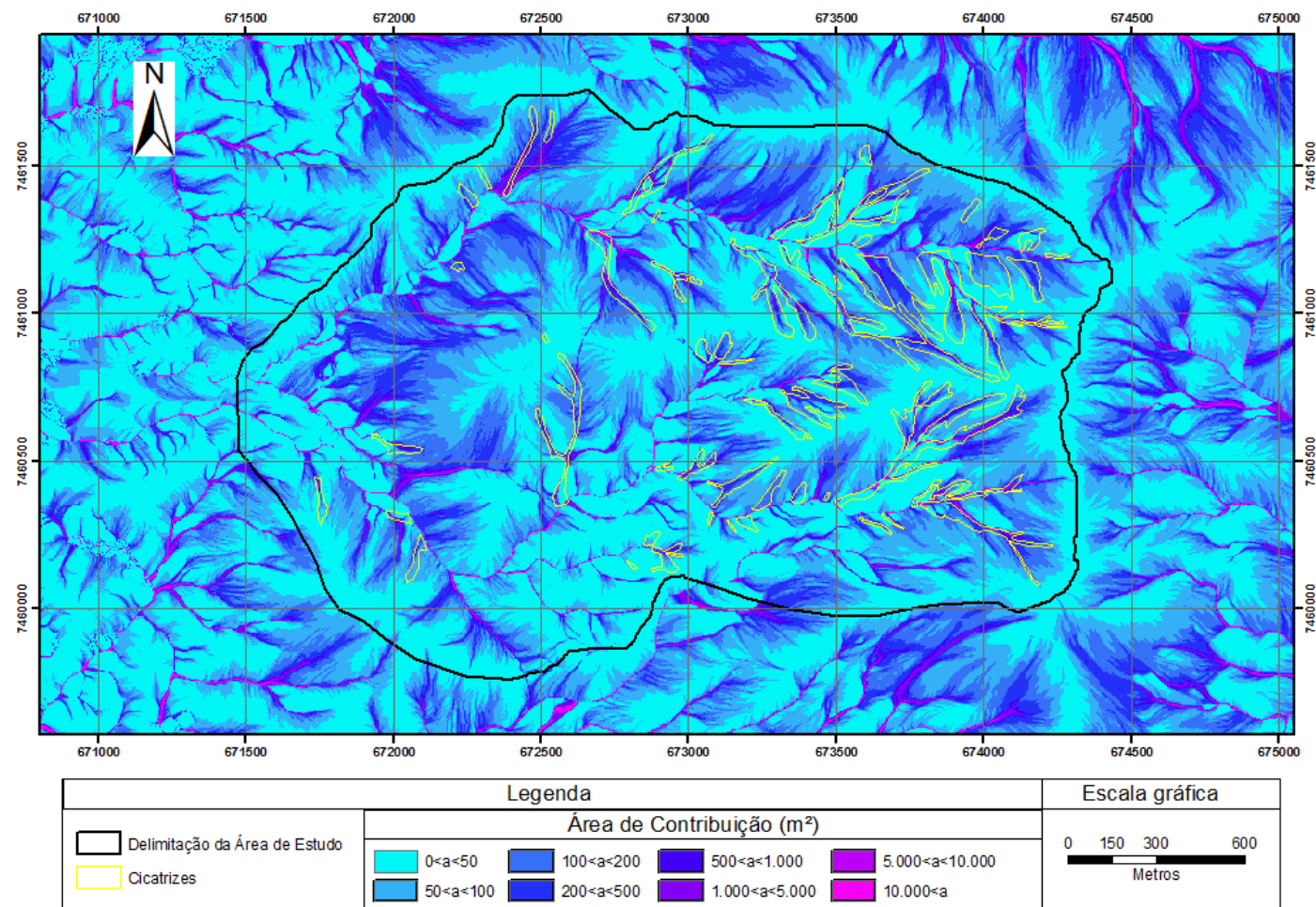


Figura 28 - Área de contribuição em m² das bacias do Quitite e Papagaio.

Para evitar possíveis erros de interpretação, os afloramentos rochosos foram mapeados através das fotografias aéreas do Google Earth e colocados sobre os modelos como um *layer* de cor cinza. Os afloramentos normalmente se encontram em áreas com grandes declividades onde são calculados pelo programa os menores fatores de segurança, o que não condiz com a realidade tendo em vista a ausência de solo nesses pontos.

A seguir será apresentado cada caso. Para a geração dos gráficos que ilustram a variação da infiltração acumulada, fator de segurança, entre outros, no tempo, foi utilizado um caso padrão com inclinação da encosta (β) de 40° e área de contribuição de 500 m^2 . Os demais parâmetros seguiram a Tabela 7.

Em termos de apresentação do fator de segurança no mapeamento de susceptibilidade, foram criadas cinco classes, sendo elas $0 < FS < 0,9$; $0,9 < FS < 1,1$; $1,1 < FS < 1,3$; $1,3 < FS < 1,5$ e $FS > 1,5$. Tais classes tiveram como intuito uma melhor interpretação e visualização dos dados. Por outro lado essas classes também traduzem faixas de incerteza do método de análise. O mesmo foi adotado para o mapeamento do *runoff*.

5.2.1. Sucção inicial de 40 kPa

Para esse primeiro caso se estimou uma sucção inicial de valor elevado, onde a umidade inicial correspondente ($\theta_i = 0,2342$) estava muito próxima da umidade residual.

Na Figura 29 se pode observar o acumulado infiltrado (399,94mm) e o acumulado de chuva (614,20mm), onde também indiretamente se obtém o escoamento superficial, fruto da diferença entre as duas curvas. Até o dia 12 de fevereiro toda chuva que cai se infiltra. Nos dias 13 e 14, quando caem as maiores chuvas, o solo não consegue absorver tudo que chove, gerando um *runoff* acumulado de 214,26 mm, um valor considerável, principalmente em se considerando o conceito de área de contribuição, onde existe a convergência do fluxo para determinados pontos.

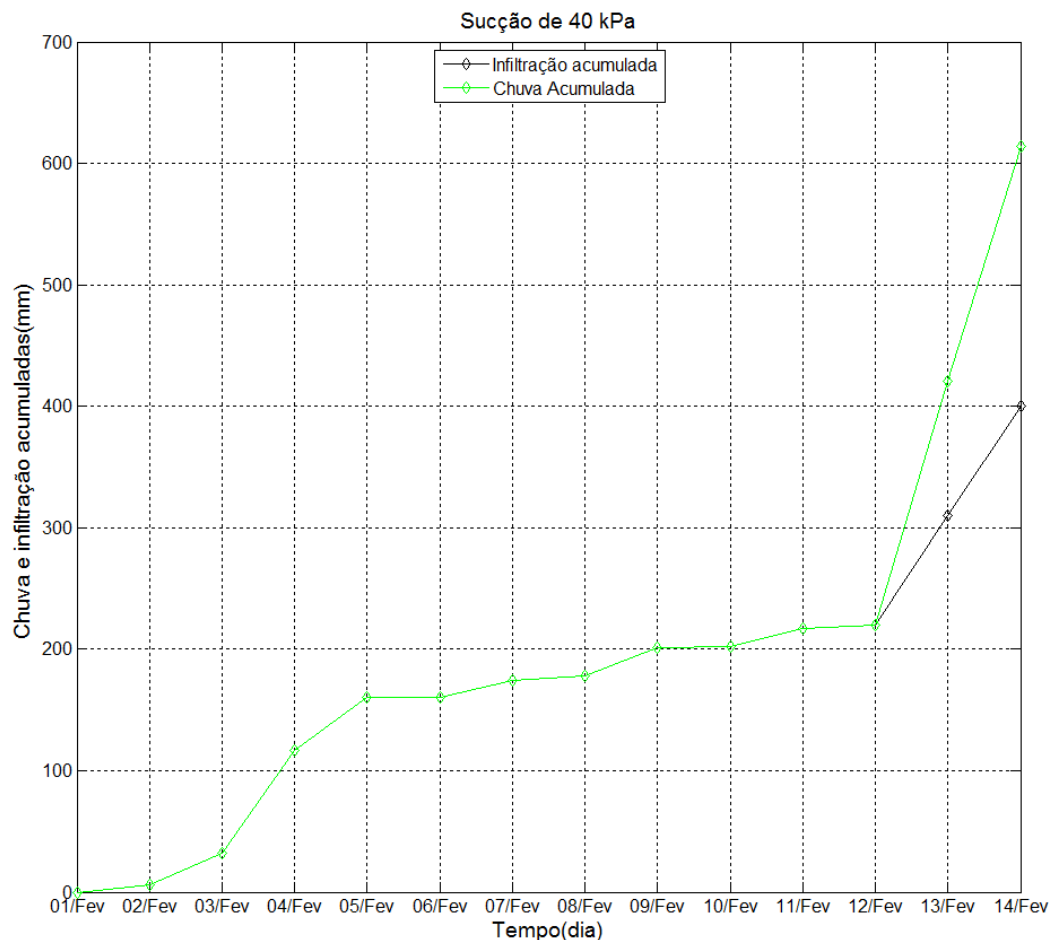


Figura 29 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 40 kPa.

A Figura 30 mostra a variação da taxa de infiltração no tempo, assim como as chuvas diárias. Como é de se observar, a partir do dia 04 de fevereiro a taxa de infiltração já começa a tender para a permeabilidade saturada do solo ($k_{sat} = 86,4$ mm/dia), decrescendo muito lentamente deste ponto em diante. Ao chegar no dia 13 de fevereiro, onde há uma grande chuva, pode-se observar uma acentuação na taxa de decrescimento da infiltração.

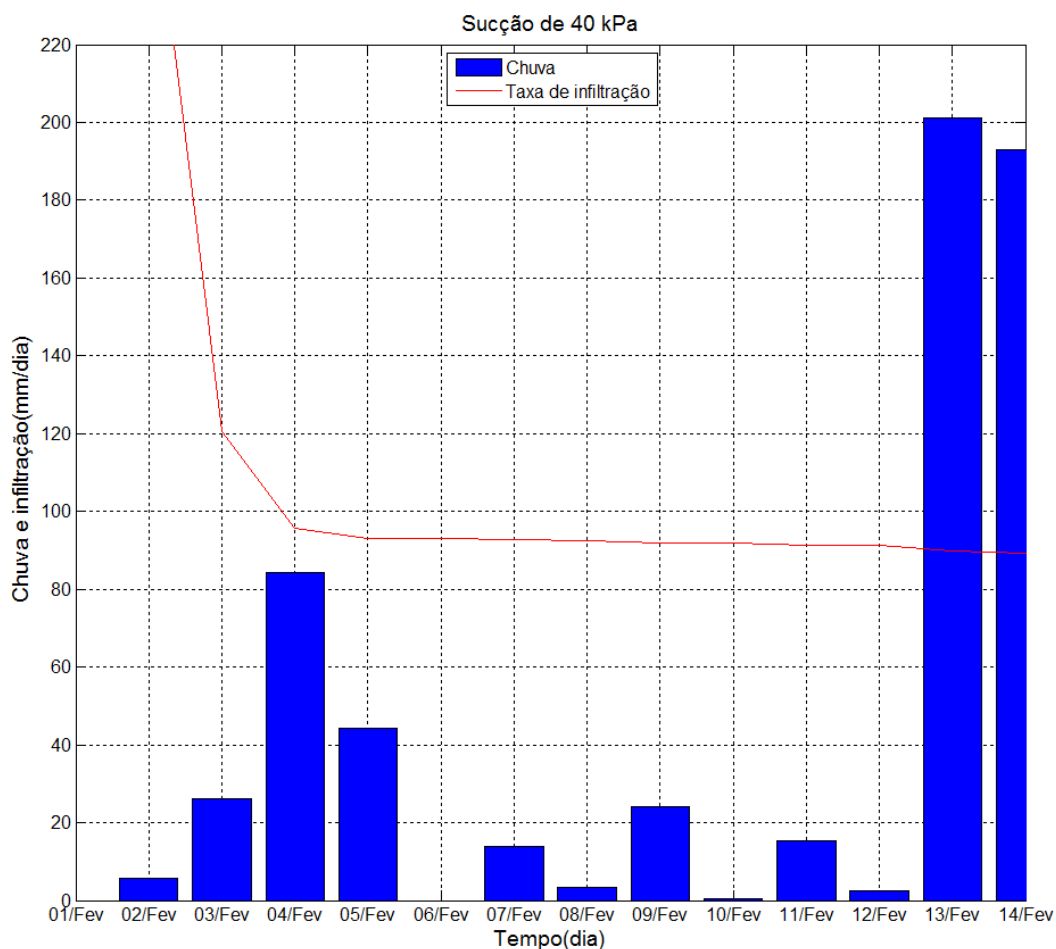


Figura 30 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 40 kPa.

A Figura 31 mostra o mapa com o *runoff* acumulado para cada célula do grid, ou seja, o escoamento superficial total, de aproximadamente 215 mm, conforme apresentado na Figura 29, multiplicado pela área de contribuição. No mapa também são apresentadas as cicatrizes do evento de 1996.

Observando o mapa, percebe-se que algumas cicatrizes estão localizadas justamente onde há uma concentração de fluxo, por vezes com valores acumulados elevados. Como dito anteriormente, acredita-se que o poder erosivo do escoamento superficial nesses pontos de concentração de fluxo podem ter ocasionado tais movimentos, de forma conjugada com a ruptura por perda de resistência do solo devido à redução da sucção e aumento da poropressão.

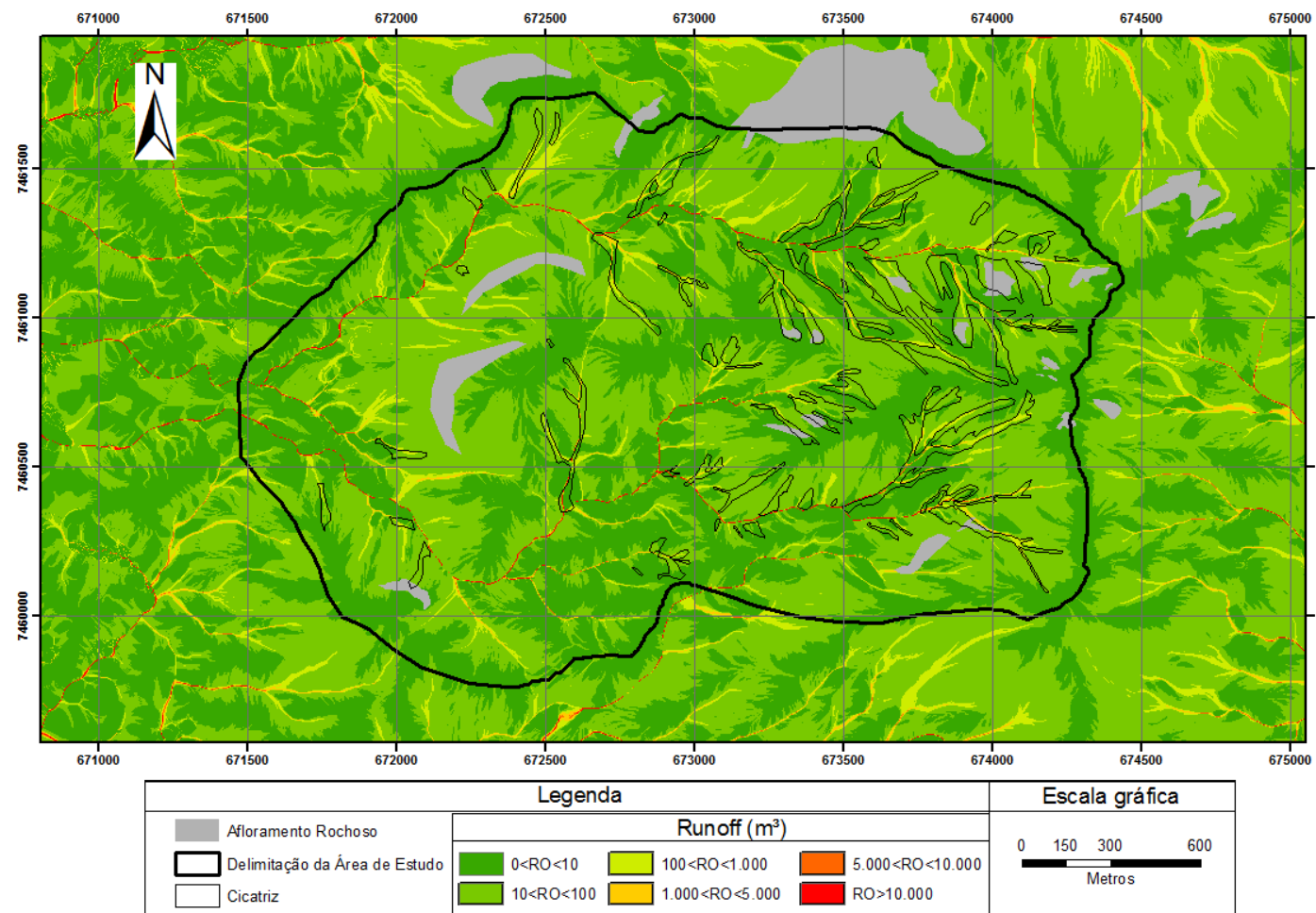


Figura 31 - Runoff acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 40 kPa.

Com relação à estabilidade das encostas das bacias antes e após o evento chuvoso, conforme se observa na Figura 32, logo após o primeiro dia de chuva, a condição inicial do fator de segurança que se encontrava próxima a 1,3, se reduz a aproximadamente 0,7, ou seja, nesse momento o talude rompe.

A frente de infiltração atinge a profundidade máxima de 1,3m. Com isso, não há a formação de poropressão positiva na base do perfil.

No caso de estudo, as rupturas se sucederam apenas nos últimos dias de chuva, e não logo após o primeiro dia de precipitação como indicado na Figura 32, logo, essa configuração inicial não está representando de forma correta o ocorrido.

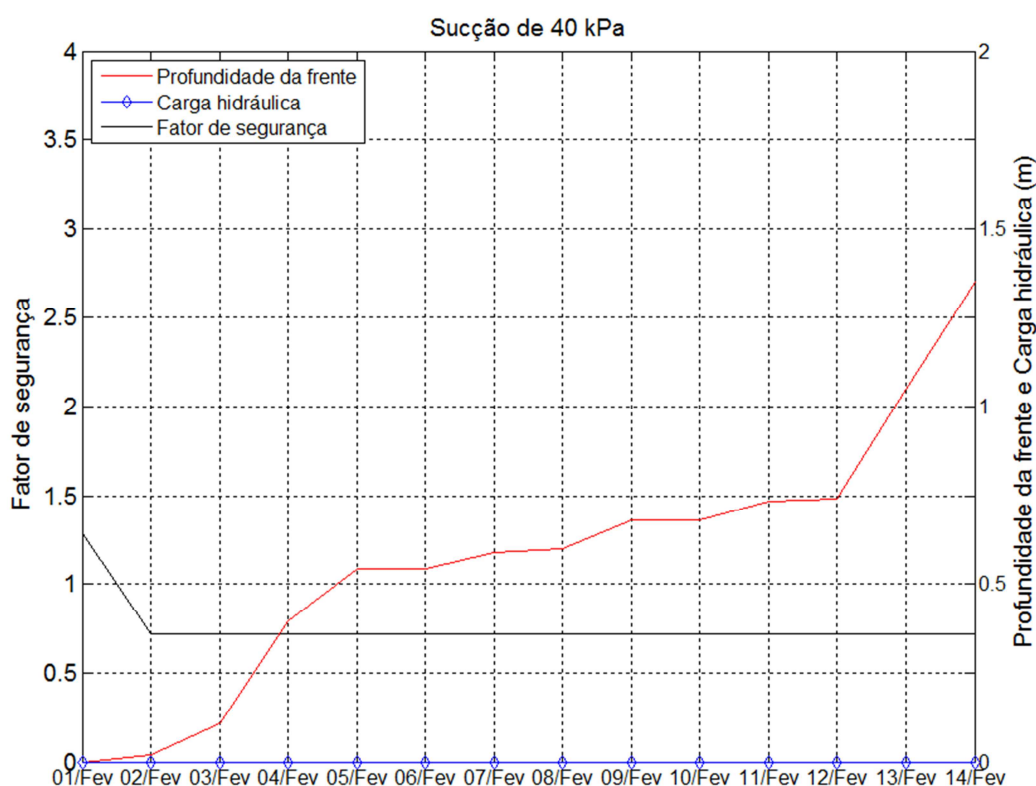


Figura 32 – Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 40 kPa.

A situação antes da chuva, apresentada na Figura 33, é de certa forma coerente. Há na figura algumas regiões com fatores de segurança críticos, porém alguns desses pontos podem representar possíveis afloramentos que não puderam ser mapeados no Google Earth.

O resultado da modelagem após o período chuvoso, ilustrada na Figura 34, apresenta uma situação muito incoerente com o mapa de cicatrizes do evento de

estudo. A área delineada como crítica toma grande parte do mapa, mostrando que provavelmente falta se considerar algum agente de reforço do solo. Conforme mostrado mais a frente nessa dissertação, acredita-se que esse reforço do solo seja realizado pelas raízes.

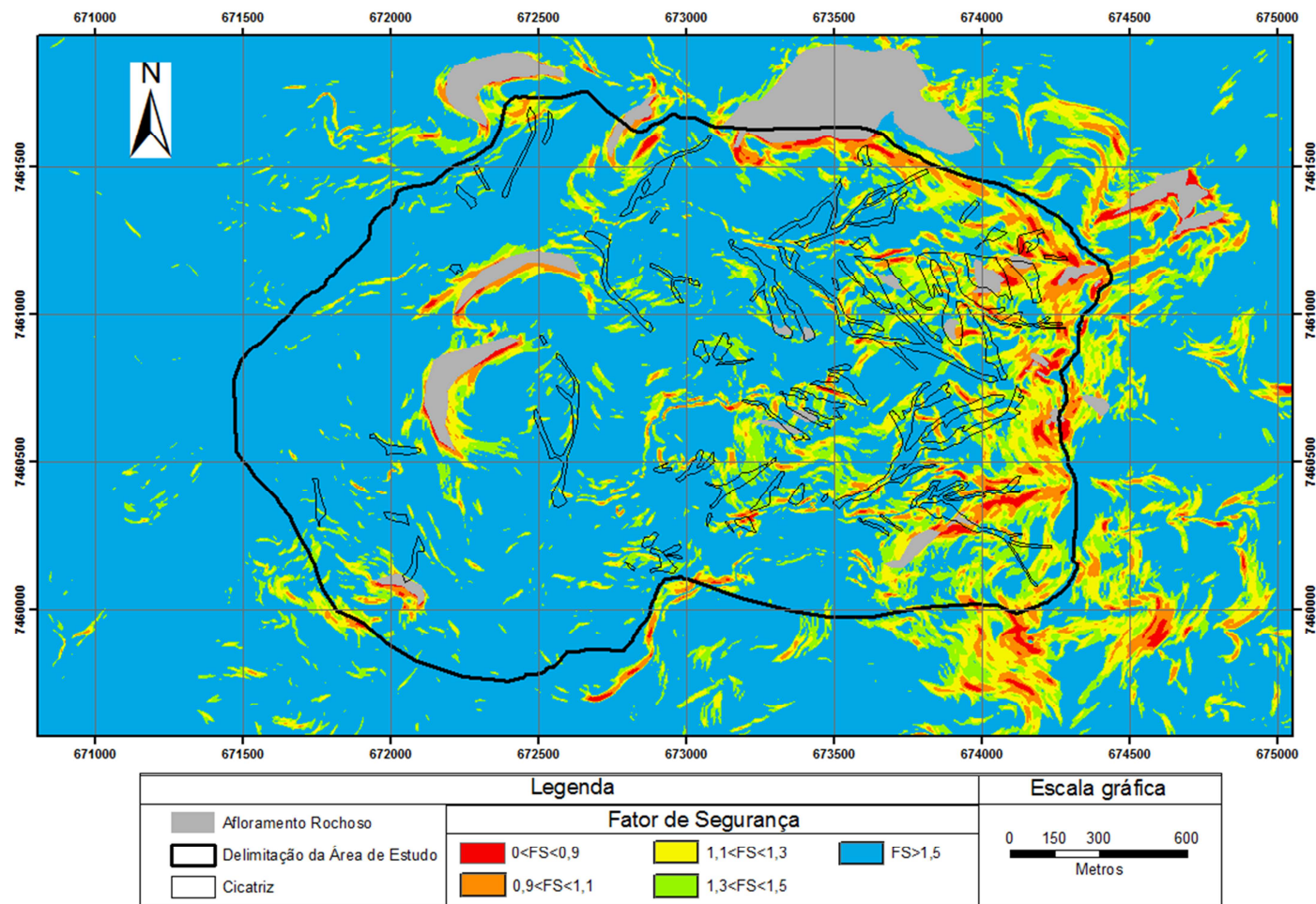


Figura 33 – Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, antes da chuva.

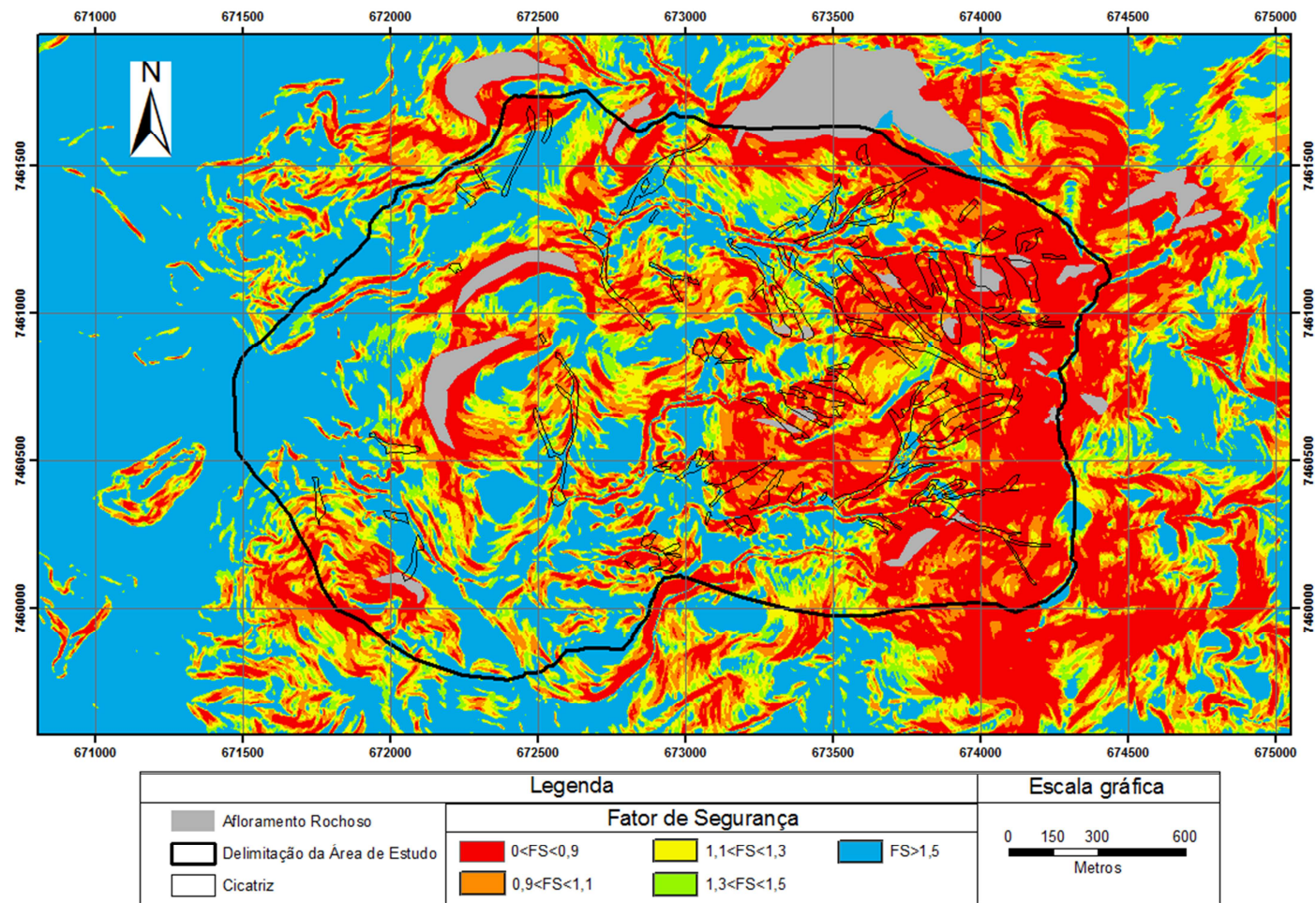


Figura 34 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, após a chuva.

5.2.2. Sucção inicial de 20 kPa

Na situação inicial de 20 kPa, onde a umidade inicial tem o valor de 0,2546, ainda próxima da umidade residual do solo, observa-se que não há uma diferença visível no que tange a infiltração acumulada (399,44mm) e por conseguinte, a quantidade de escoamento superficial gerada (214,76mm) (Figura 35) quando comparado com o caso anterior. A igualdade dos parâmetros ψ_f e a proximidade da variação de umidade para ambos os casos ($\Delta\theta$ igual a 0,2958 para 20 kPa e 0,2754 para 40 kPa) explicam tal fato. O valor infiltrado é ligeiramente menor devido a maior umidade inicial do solo.

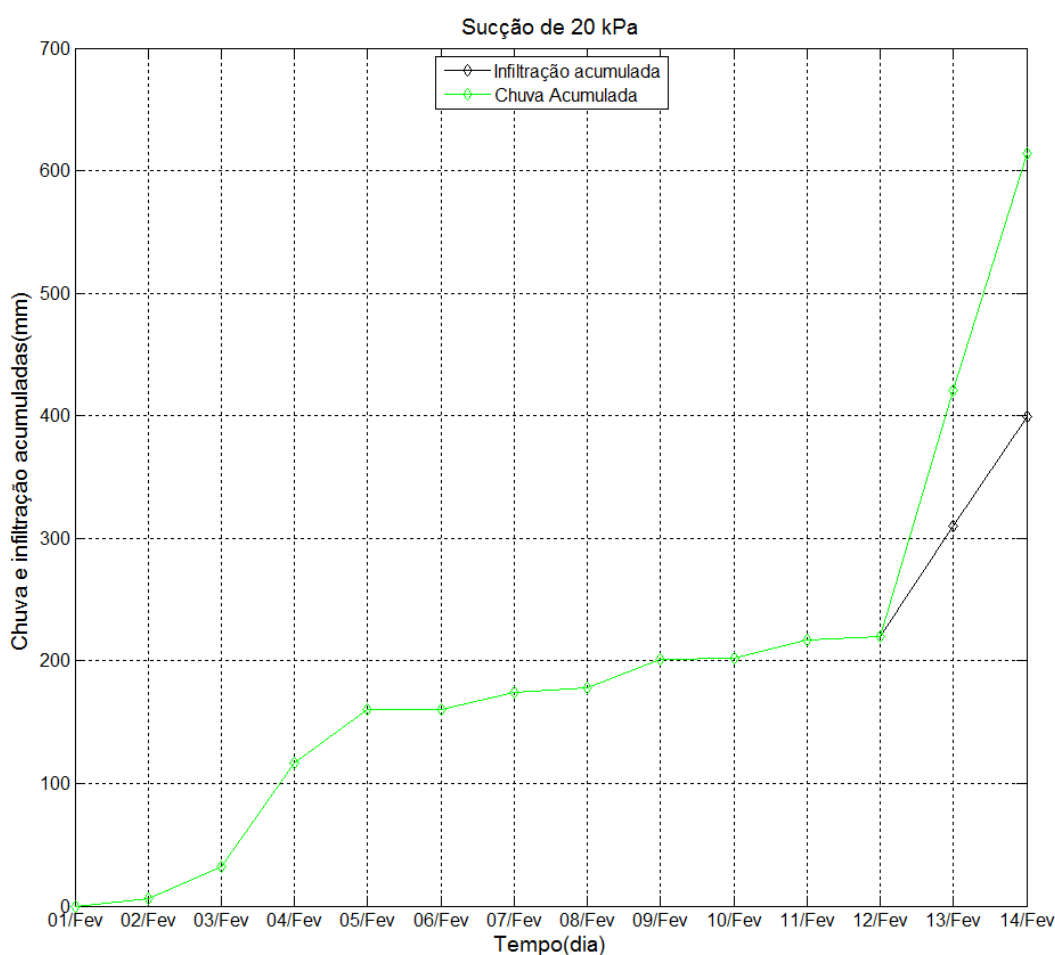


Figura 35 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 20 kPa.

Assim como no caso de 40 kPa de sucção inicial, a taxa de infiltração decai de forma acentuada até aproximadamente o dia 04 de fevereiro. A partir daí a taxa de infiltração passa a sofrer um lento decréscimo, se aproximando a

permeabilidade saturada do solo. Uma acentuação na queda da taxa de infiltração é observada durante as grandes chuvas (Figura 36).

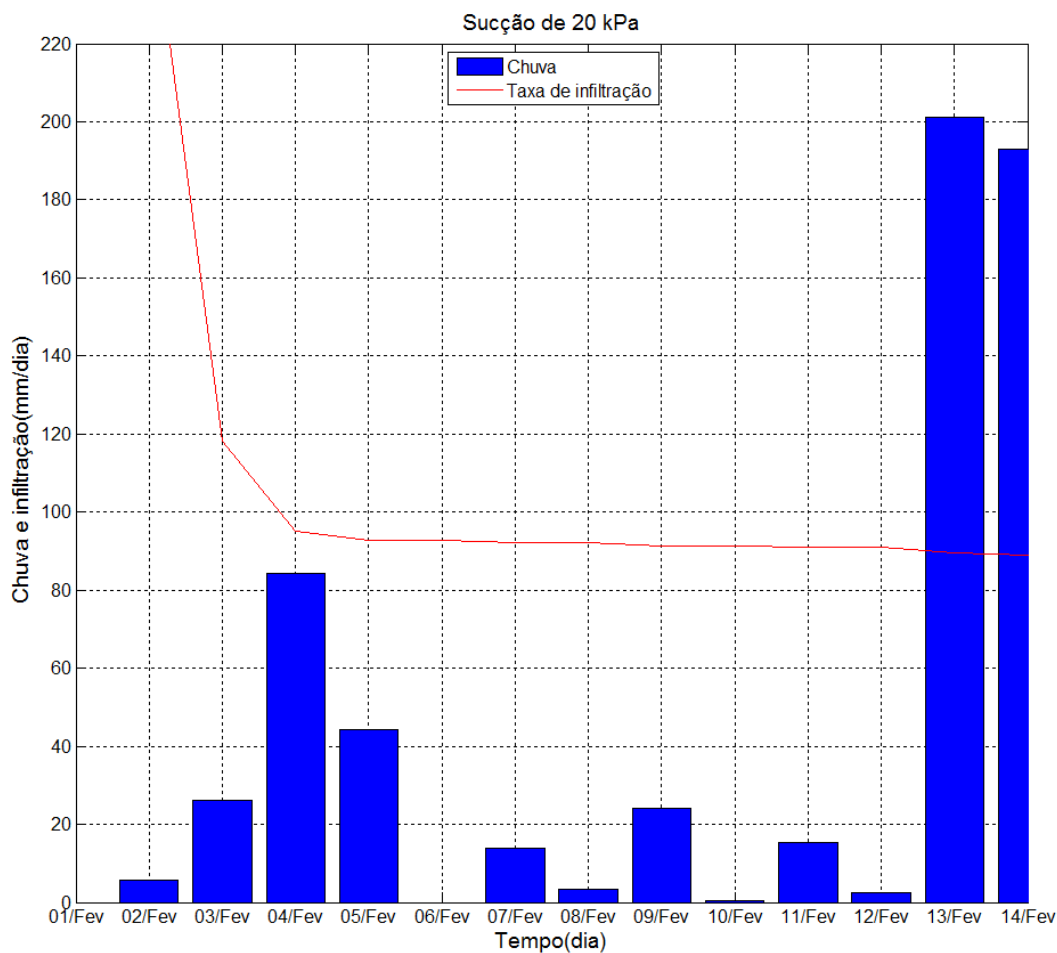


Figura 36 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 20 kPa.

Tendo em vista que quase não há diferença entre a quantidade de *runoff* gerada pela condição inicial de sucção de 20 e 40 kPa, a distribuição espacial de tal parâmetro é praticamente idêntica, como observado pela Figura 37.

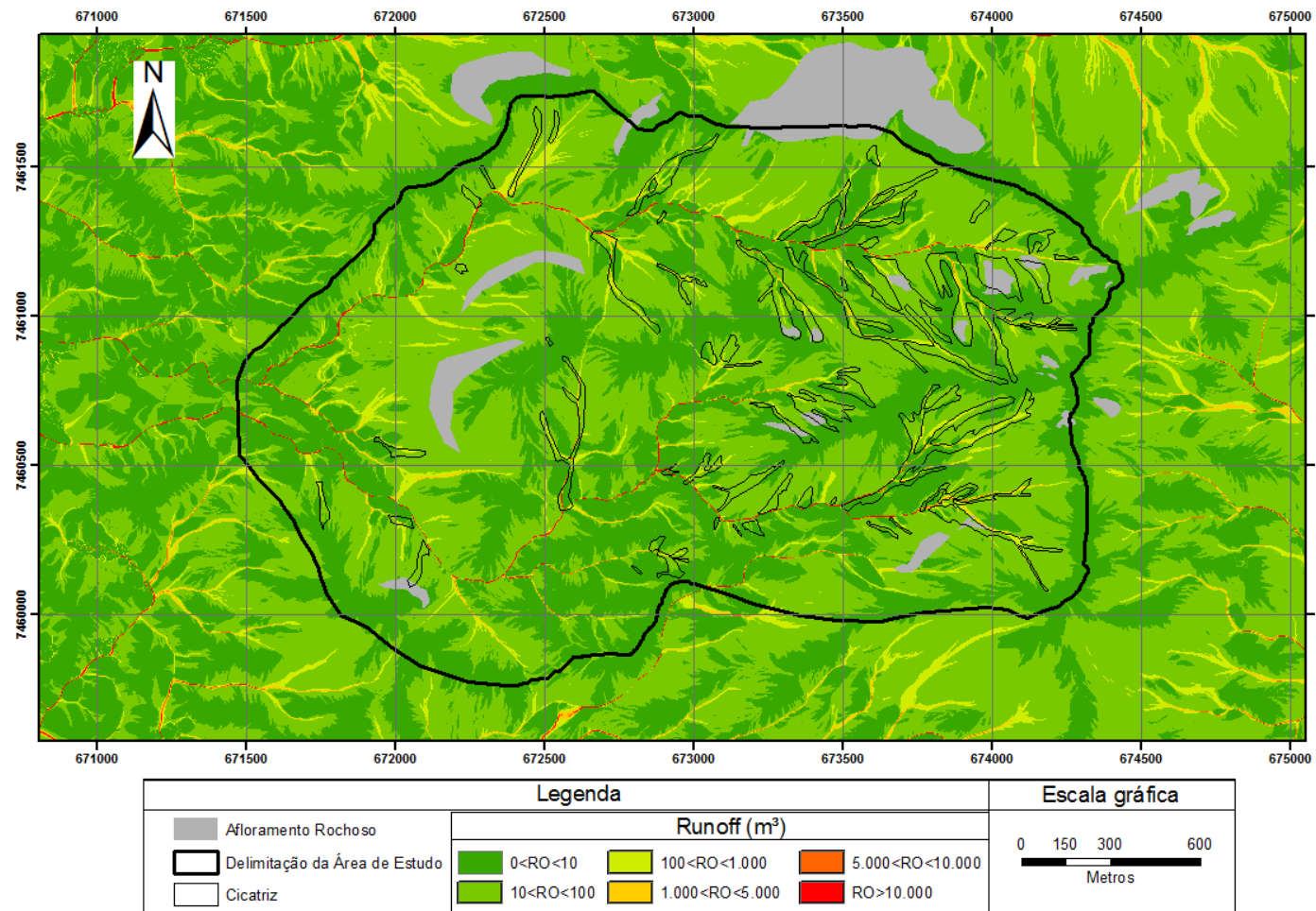


Figura 37 - Runoff acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 20 kPa.

Para esse caso, o fator de segurança inicial está próximo de 1, caindo para 0,7 no segundo dia de chuva (Figura 38), assim como para a sucção inicial de 40 kPa. Novamente, a configuração inicial não representa de forma correta o evento de estudo.

Aqui, a frente de infiltração fica próxima a 1,4m de profundidade. Assim como no caso anterior, não há geração de poropressão positiva na base do perfil.

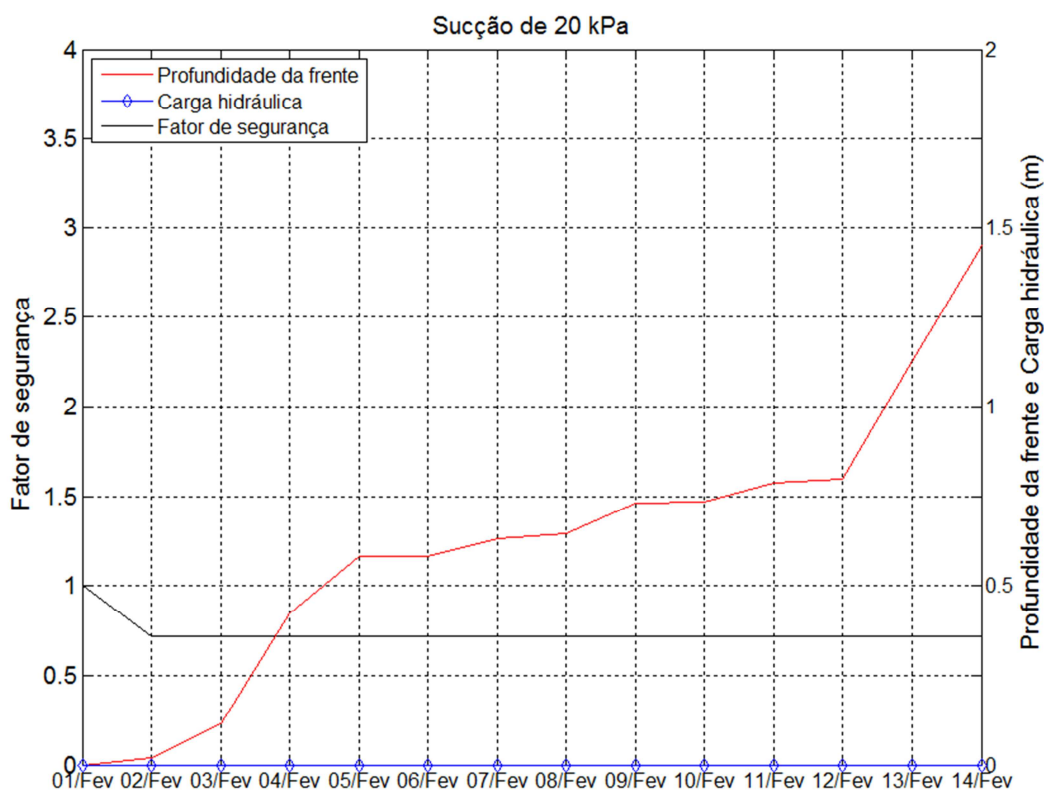


Figura 38 - Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 20 kPa.

A Figura 39 ilustra a distribuição espacial do fator de segurança antes do período chuvoso. O que se observa no mapa é que mesmo antes do período de chuva, diversos pontos já são delimitados como de alta susceptibilidade, o que está em desacordo com o caso de estudo. Essa condição inicial se mostra inadequada para representar as bacias em questão.

O mapa de susceptibilidade apresentado na Figura 40 após a chuva condena grande parte da bacia, novamente não representando de forma adequada o ocorrido.

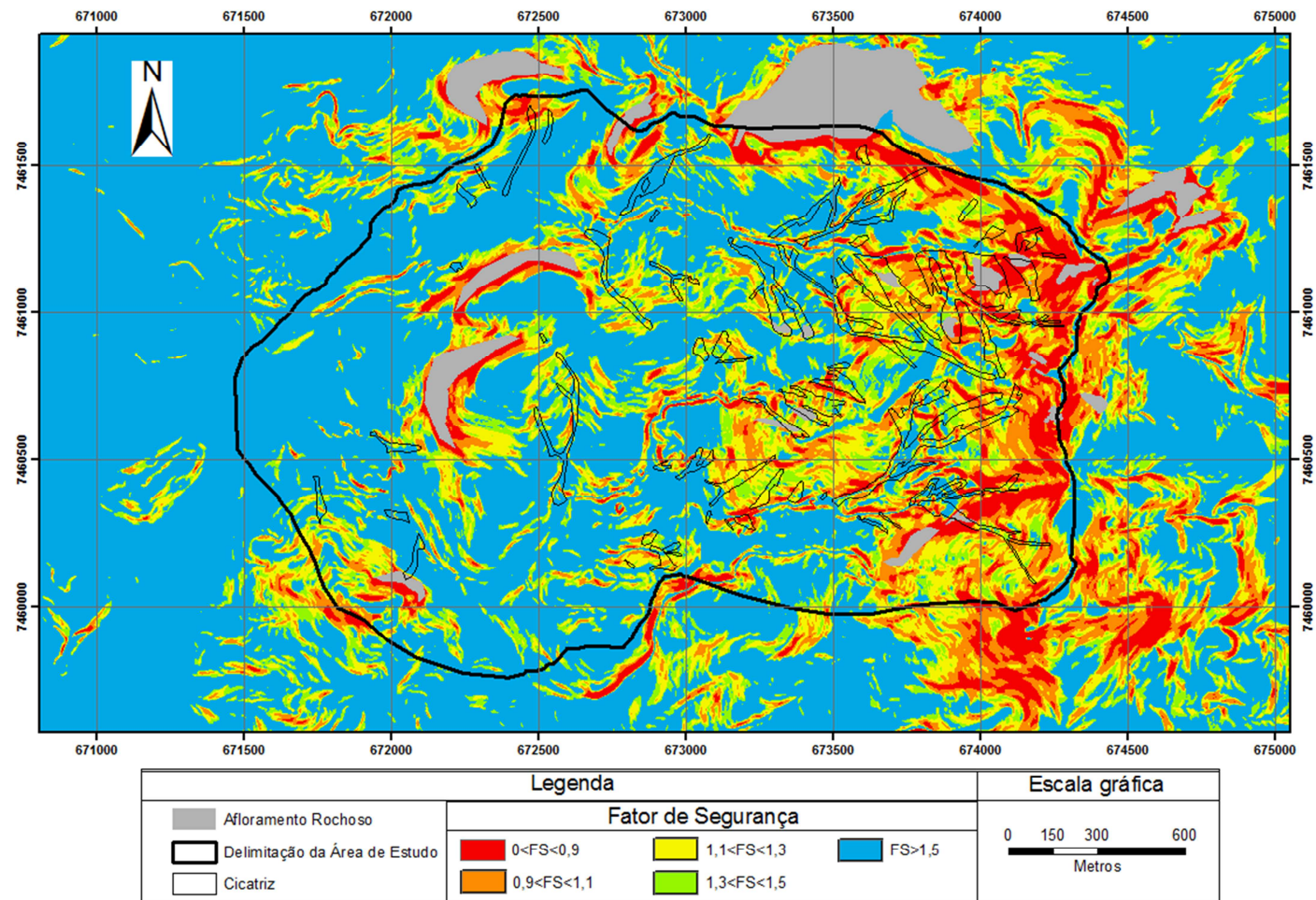


Figura 39 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 20 kPa, antes da chuva.

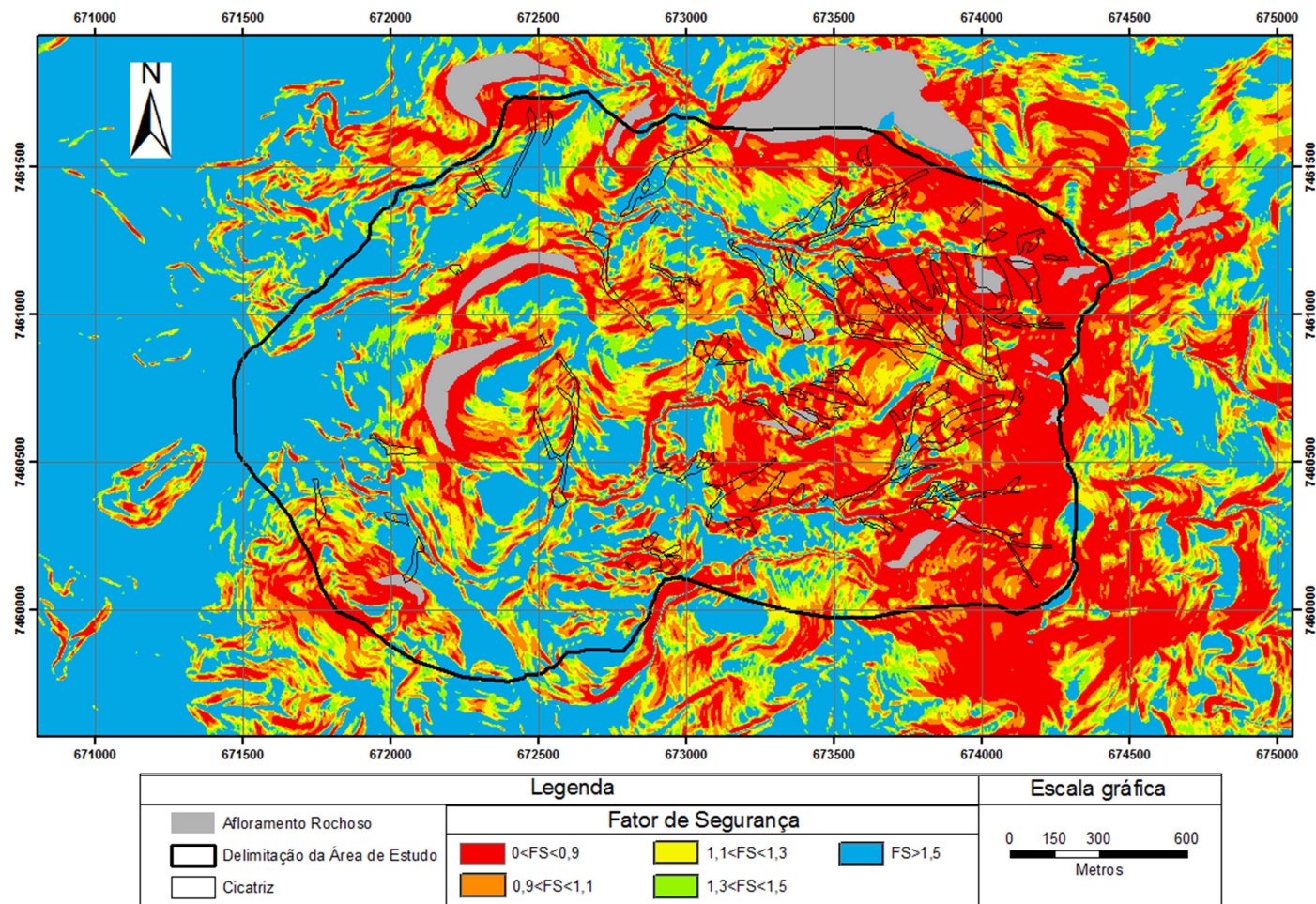


Figura 40 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 20 kPa, após a chuva.

5.2.3. Sucção inicial de 5 kPa

Para a condição inicial de sucção de 5 kPa, onde o solo está próximo a saturação ($\theta_i = 0,3344$), foi observado um leve decréscimo na infiltração total (397,35mm), e por conseguinte, um pequeno acréscimo na taxa de escoamento superficial (216,85mm) (Figura 41).

Isso se dá porque agora o solo está em uma situação de maior saturação do que nos casos anteriores, e com isso a taxa de infiltração tende mais rapidamente ao valor da permeabilidade saturada, como se pode verificar pela Figura 42, em comparação com as demais.

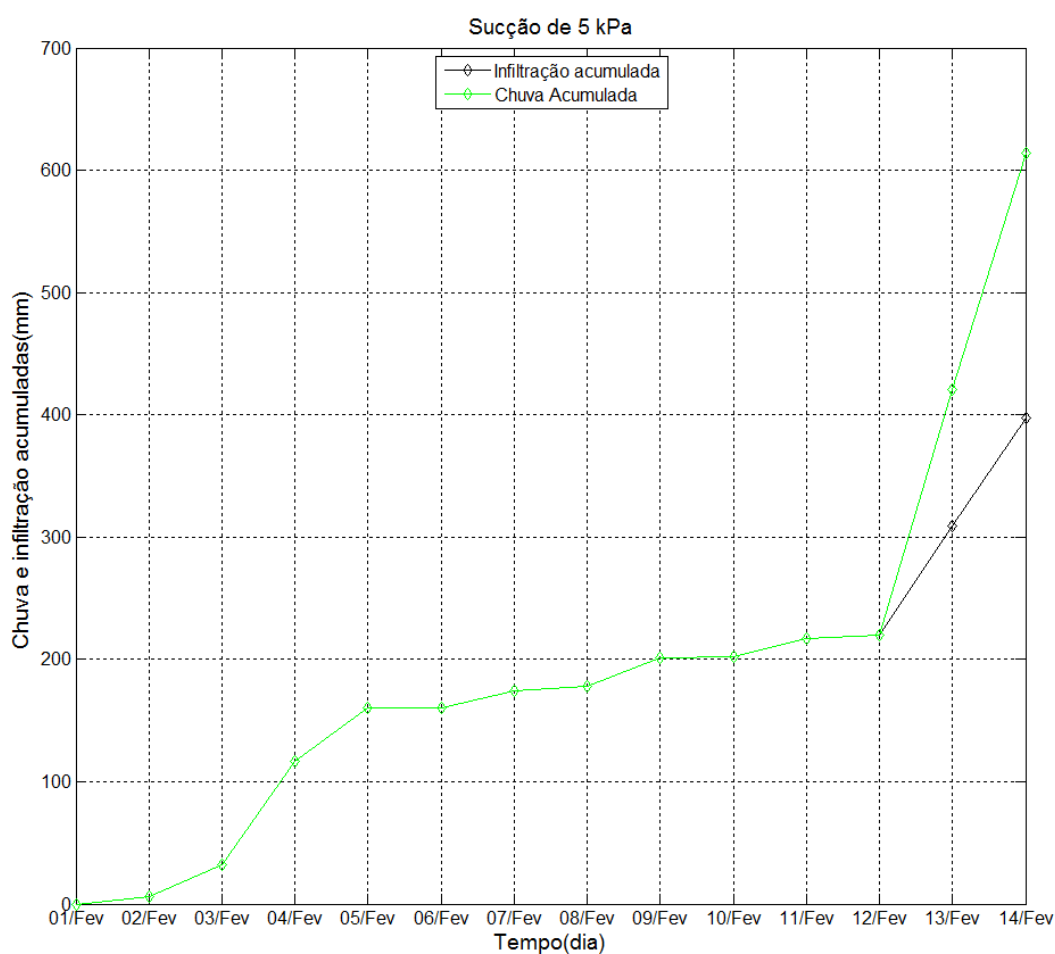


Figura 41 - Curvas de infiltração e chuva acumuladas no tempo para sucção inicial de 5 kPa.

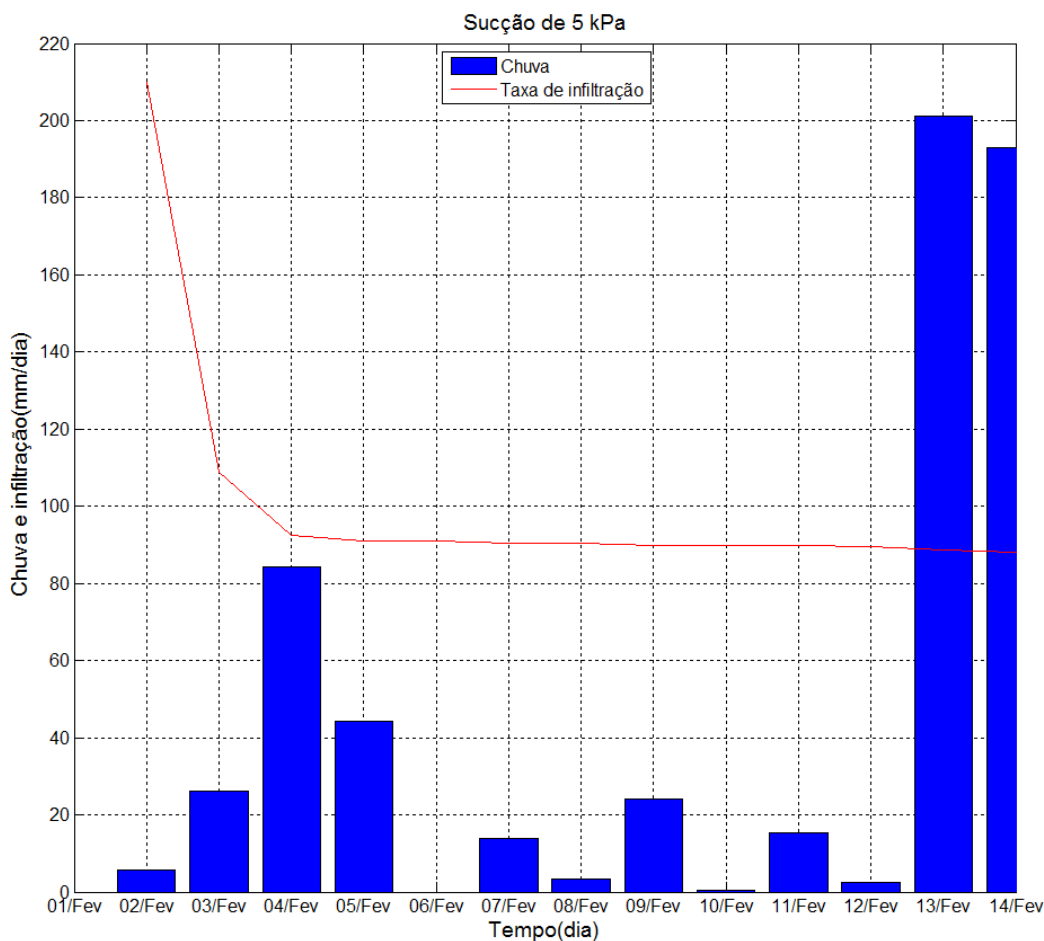


Figura 42 - Curva de taxa de infiltração e intensidade de chuva no tempo para sucção inicial de 5 kPa.

A geração de um maior escoamento superficial pode ser notada, ainda que pouco perceptível, através da Figura 43, que, quando comparada com os casos anteriores, mostra um aumento nas células do *grid* com maiores valores de fluxo acumulado.

Como nesse caso a frente de saturação atinge a interface solo/rocha antes do término do período chuvoso, aqui há uma geração de poropressão positiva na base do perfil de solo. A distribuição espacial da poropressão positiva pode ser verificada na Figura 44. Como é de se observar, os maiores valores se encontram em áreas de concentração de fluxo. Da mesma forma, percebe-se que algumas cicatrizes se encontram nessas áreas, o que mostra que de certa forma tal mapa pode servir como um indicativo de regiões potencialmente instáveis.

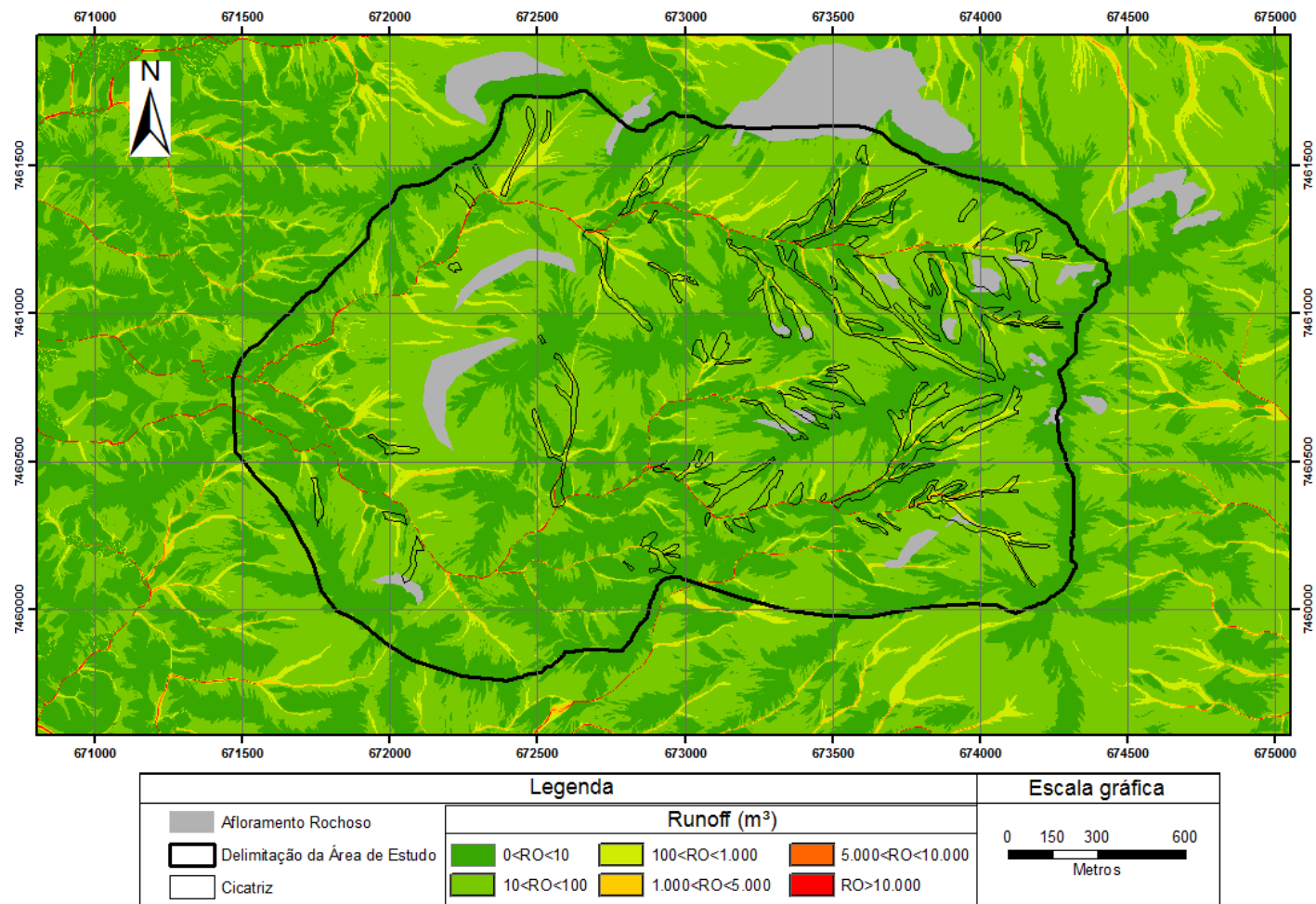


Figura 43 - Runoff acumulado no tempo por célula do grid e cicatrizes para sucção inicial de 5 kPa.

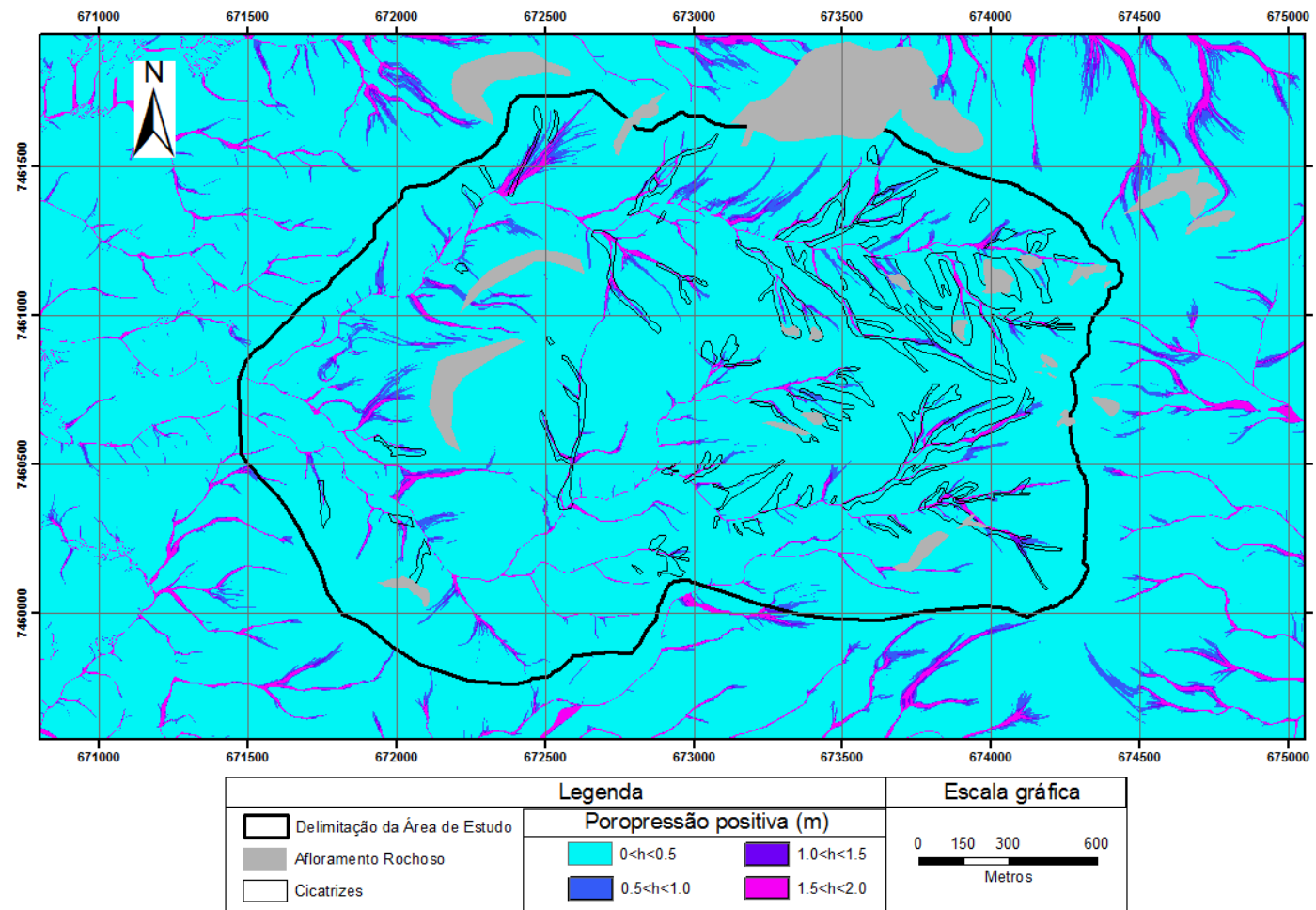


Figura 44 – Distribuição de poropressão positiva na área de estudo para a condição inicial de 5 kPa, após a chuva.

Nessa configuração inicial, como a coesão aparente proporcionada pela sucção é muito baixa, antes de se iniciar o período chuvoso, o fator de segurança já se encontra abaixo de 1, mostrando que muito provavelmente a sucção inicial estava acima desse valor.

Para esse caso, a frente de infiltração atinge a interface solo-rocha, e com isso há o surgimento de uma poropressão positiva na base do perfil. Consequentemente há uma redução do fator de segurança.

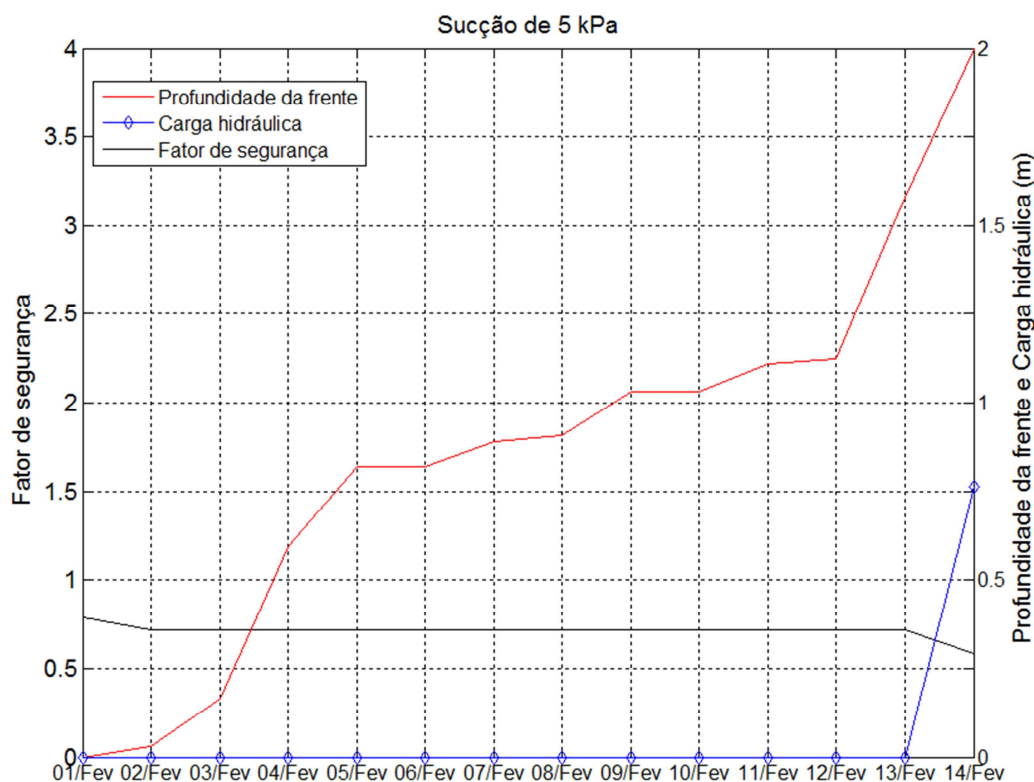


Figura 45 - Variação do fator de segurança, frente de infiltração e poropressão positiva no tempo, para sucção inicial de 5 kPa.

A Figura 46 para a condição antes do período chuvoso, e Figura 47 para a condição após o período chuvoso são muito similares, mostrando grande parte da bacia com condição crítica de estabilidade.

Essa configuração inicial não representa de forma adequada o ocorrido no caso de estudo.

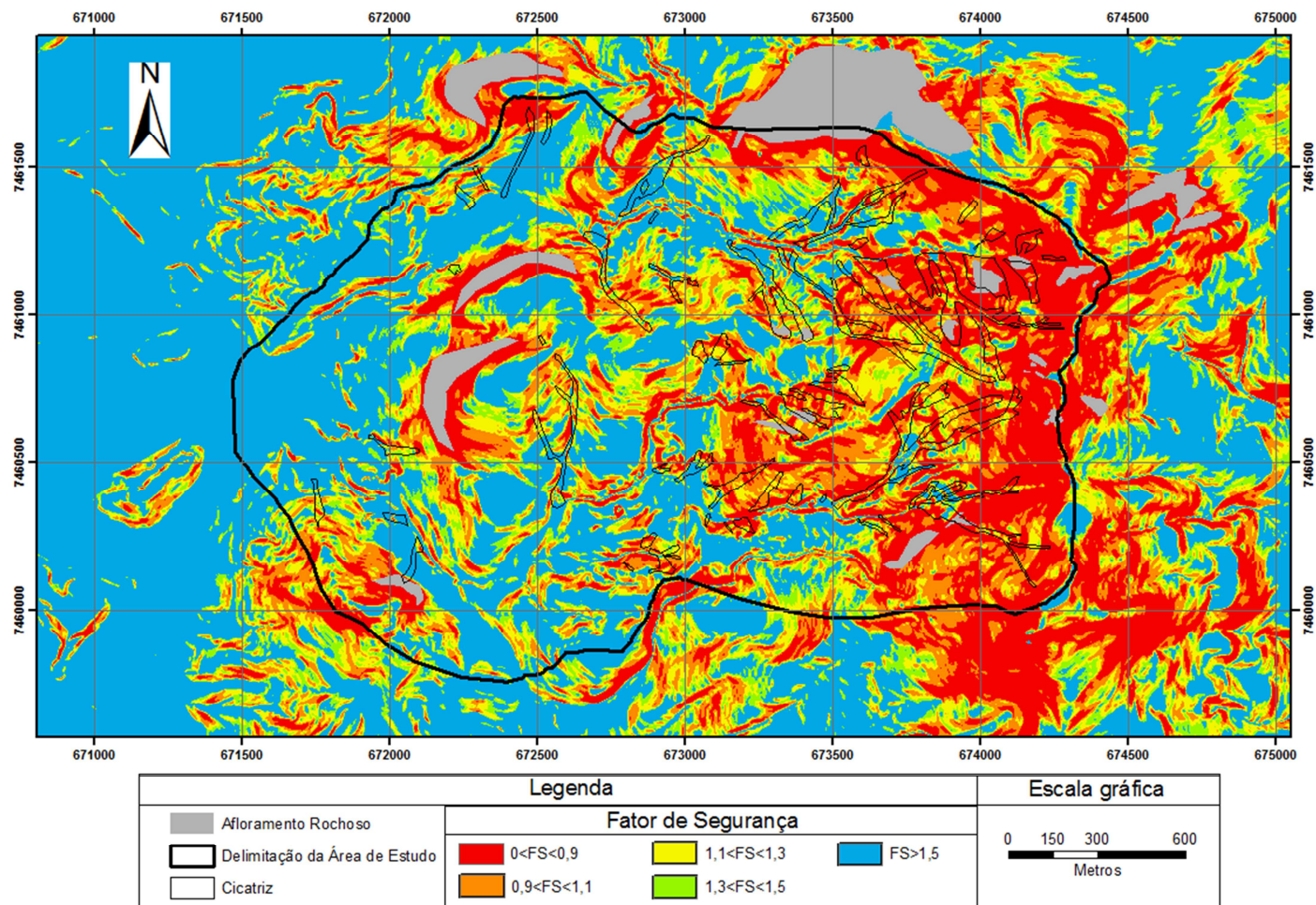


Figura 46 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 5 kPa, antes da chuva.

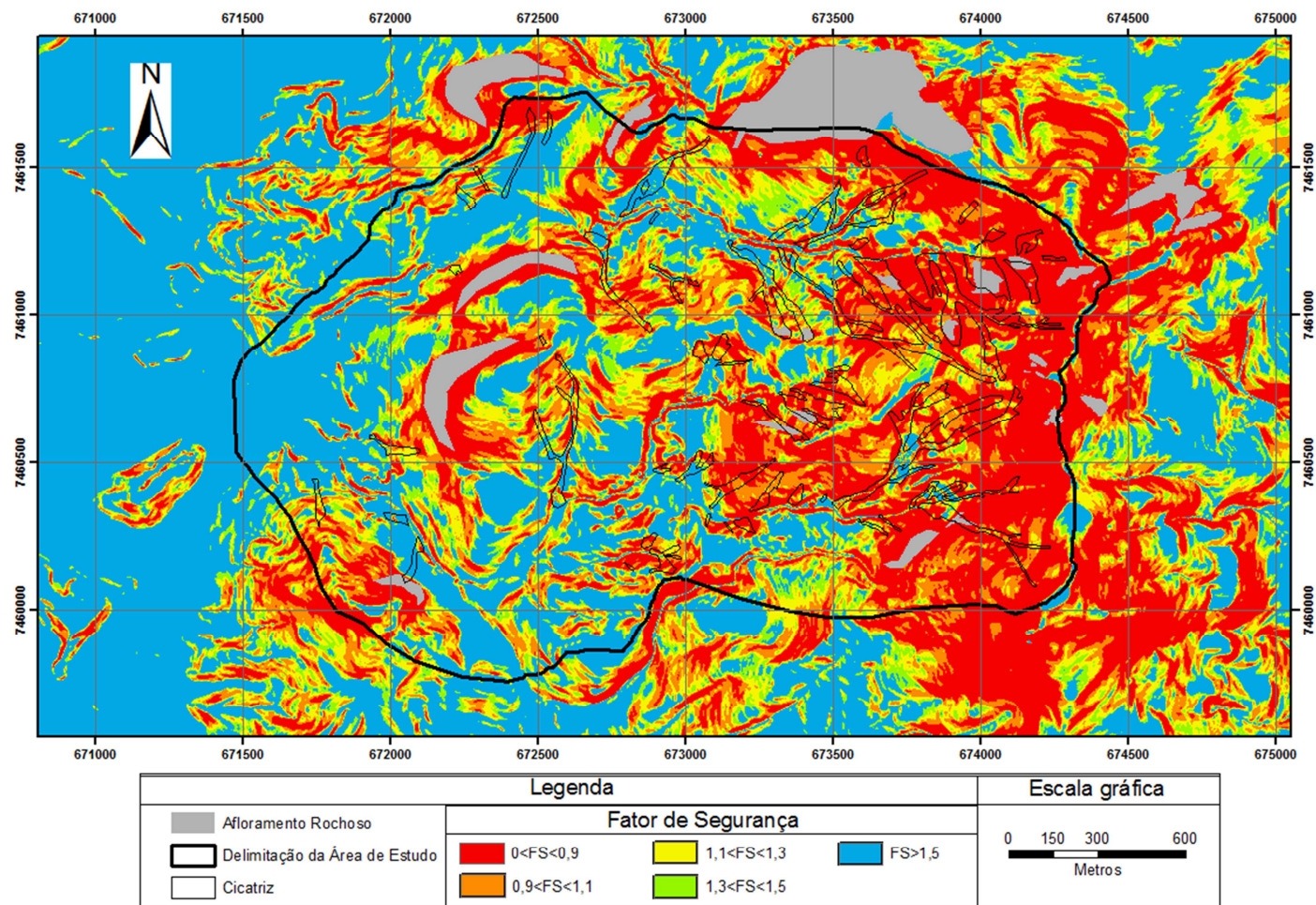


Figura 47 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 5 kPa, após a chuva.

5.2.4. Efeitos da vegetação

Como observado nos casos apresentados anteriormente, mesmo para a condição inicial de 40 kPa, o mapa de susceptibilidade pós-chuva se mostrou incoerente com o ocorrido em 1996 nas bacias do Quitite e Papagaio. Acredita-se que falta se considerar nas análises um agente de reforço, esse sendo representado pela ação das raízes no solo.

Foram modelados dois casos, para a sucção inicial de 40 kPa, onde se considerou o reforço radicular como sendo de 7 kPa e de 14 kPa.

A Figura 48 mostra a variação do fator de segurança para a condição de reforço radicular de 7 kPa. Nessa primeira configuração, observa-se que até o dia 06 de fevereiro, o fator de segurança na interface solo/rocha é o menor, se comparado com o da frente de infiltração, estando esse próximo a 1,5. A partir dessa data, quando a frente atinge a profundidade aproximada de 0,6m, o fator de segurança na frente de infiltração passa a ser menor que o da base do solo. Nos dias 13 e 14 de fevereiro, quando ocorrem as maiores chuvas, a frente de infiltração avança com grande velocidade, e o fator de segurança responde a esse avanço, decrescendo de forma acentuada.

Para a configuração apresentada, o fator de segurança fica bem próximo de 1, ou seja, próximo da ruptura.

Essa situação representa de forma adequada o ocorrido, tendo em vista que apenas nas datas próximas aos últimos dias, quando houve grandes precipitações, é que o fator de segurança se aproximou da condição de ruptura.

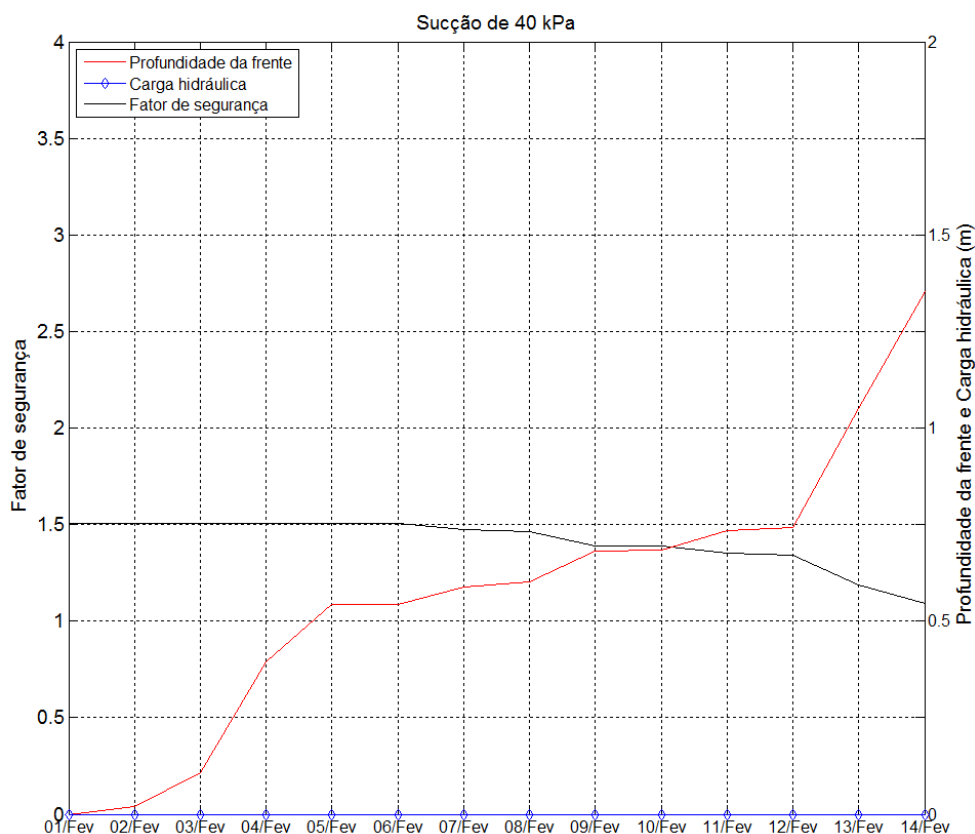


Figura 48 – Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa.

As Figuras 49 e 50 mostram a distribuição espacial do fator de segurança antes e após a série de chuva de estudo.

Na situação antes da chuva, observam-se alguns pontos onde o fator de segurança se encontra menor do que 1, e alguns na faixa de incerteza ($0,9 < FS < 1,1$), representados pela cor laranja, podendo esses pontos significarem afloramentos rochosos que não puderam ser mapeados devido a camuflagem pela cobertura vegetal, ou simplesmente devido aos parâmetros não estarem representando de forma adequada tais locais. De forma geral a configuração parece representar bem a condição inicial das bacias, tendo em vista que, como um todo, as encostas se apresentam estáveis.

Após a chuva, há um aumento das áreas com fator de segurança críticos, muitas coincidindo com as cicatrizes, mas muitas por sua vez em locais onde não foram mapeadas cicatrizes. A maior concentração de células com fatores de segurança críticos dentro da delimitação da área de estudo se encontra na parte mais elevada e declivosa das bacias, representada pela extremidade Leste.

Algumas cicatrizes se apresentam parcialmente dentro de áreas com fator de segurança crítico, o que pode significar que nesse ponto houve a ruptura e mobilização da massa na direção da canaleta de drenagem. O resultado desse mapeamento de risco juntamente com o mapeamento do escoamento superficial consegue abordar de forma significativa grande parte das cicatrizes.

Sempre se deve considerar que nessa dissertação tenta-se fazer uma aproximação dos parâmetros do solo das bacias do Quitite e Papagaio para valores médios. Sem dúvida, para uma bacia hidrográfica, a variabilidade nos parâmetros de resistência e hidráulicos do solo, além da variação de espessura, é esperada, o que pode causar diferenças consideráveis nos resultados. De qualquer forma se observa que o mapeamento do fator de segurança está de acordo com o mapa de declividade do MDE, ou seja, em áreas mais declivosas, menores os fatores de segurança.

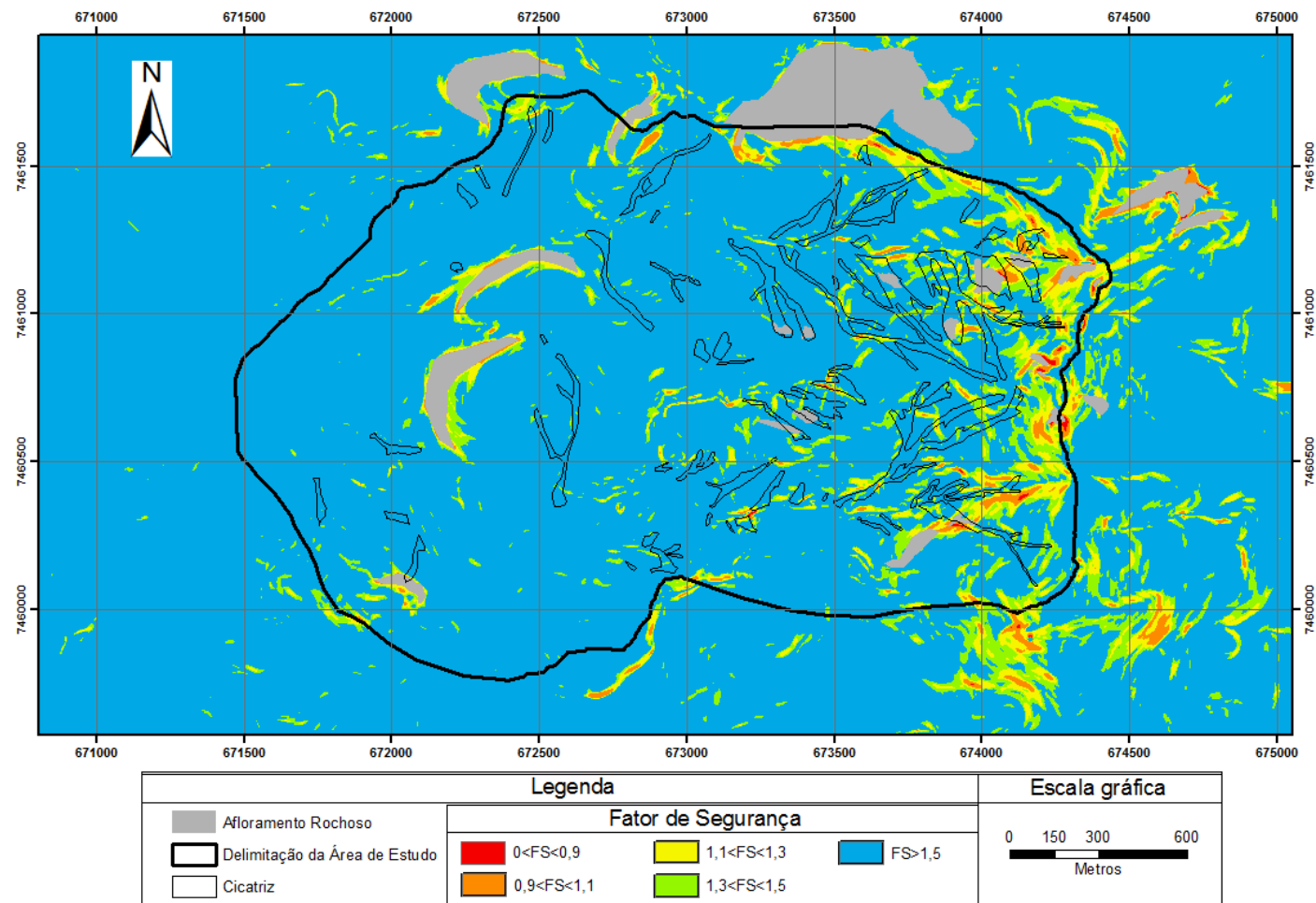


Figura 49 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, antes da chuva.

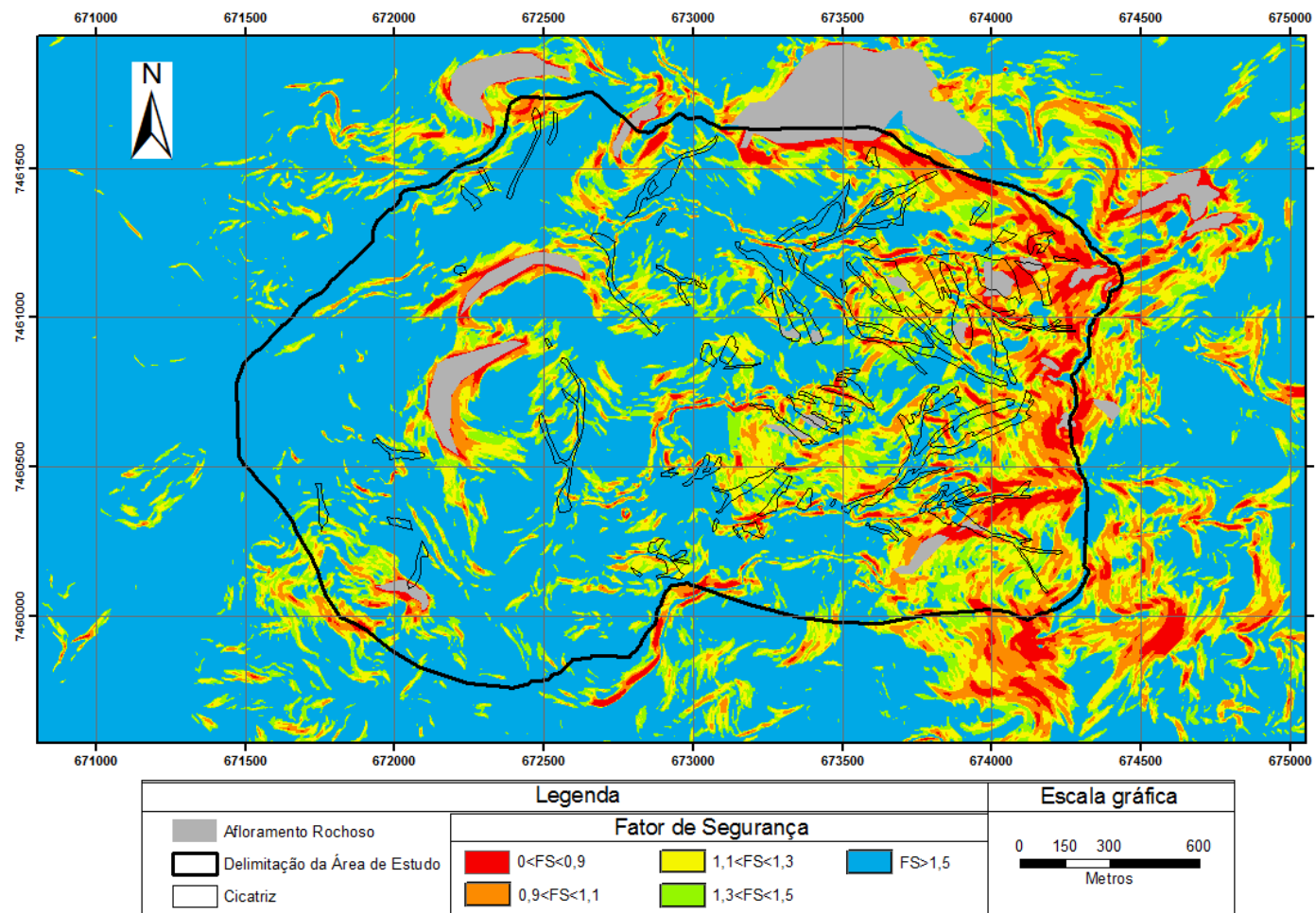


Figura 50 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, após a chuva.

Na situação com reforço radicular de 14 kPa, até o dia 12 de fevereiro, antes das grandes chuvas, o fator de segurança na base do perfil era o menor do sistema, com o valor aproximado de 1,8. Após essa data, quando a frente de saturação atinge profundidades maiores que 1m, o fator de segurança começa a decair, chegando a um mínimo de aproximadamente 1,5 (Figura 51).

Comparando-se com o caso de coesão de raiz de 7 kPa, observa-se que os fatores de segurança são consideravelmente maiores para a coesão de 14 kPa, além de o fator de segurança começar a decair apenas na ocasião das grandes chuvas, o que no caso anterior isso acontece após o dia 06 de fevereiro.

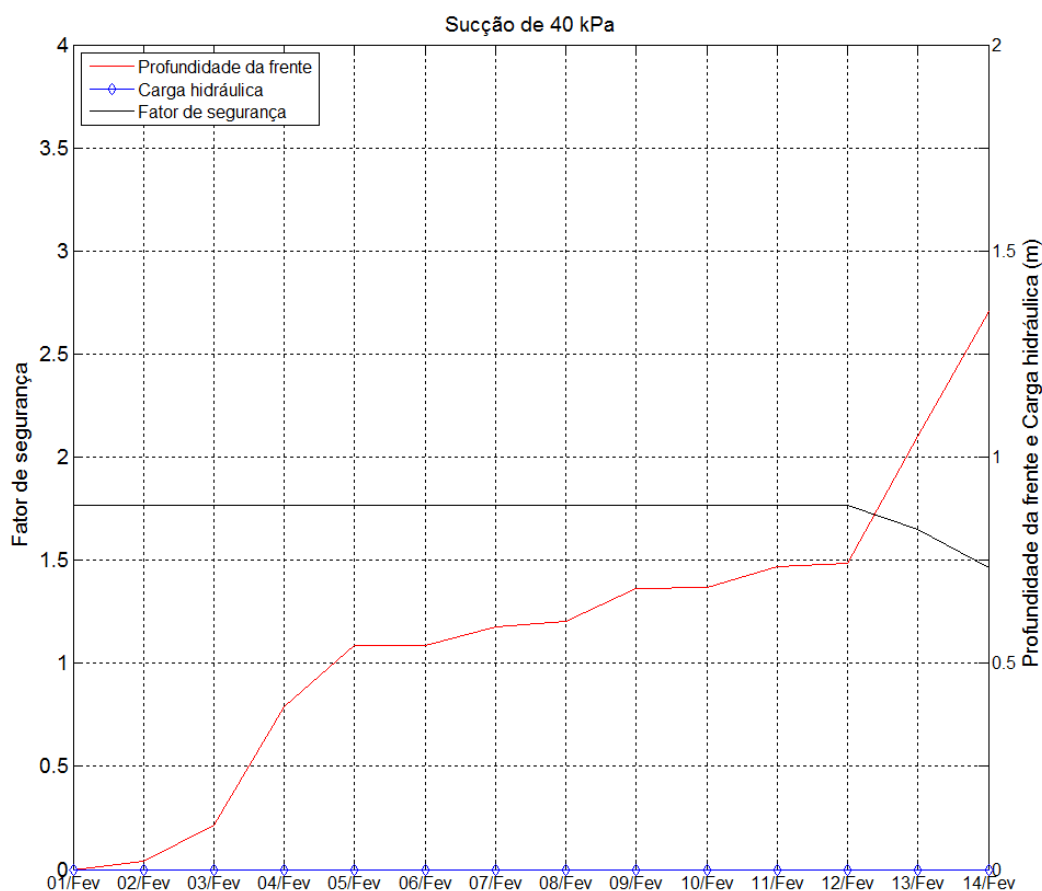


Figura 51 - Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa.

As Figuras 52 e 53 mostram a distribuição espacial do fator de segurança antes e após a série de chuva.

Na situação antes da chuva, poucos são os pontos que apresentam fator de segurança em faixa de incerteza, podendo esses significar afloramentos que não

puderam ser mapeados. As encostas então se apresentam em condições de estabilidade.

Após a chuva, pontos de possível ruptura se fazem presente, em parte coincidindo com as cicatrizes mapeadas. Por outro lado, em vários pontos considerados críticos pelo programa, não foram mapeadas cicatrizes.

A condição de reforço radicular de 14 kPa aparentemente está sobrestimando o efeito da vegetação no solo. A condição anterior representou o evento de forma mais adequada.

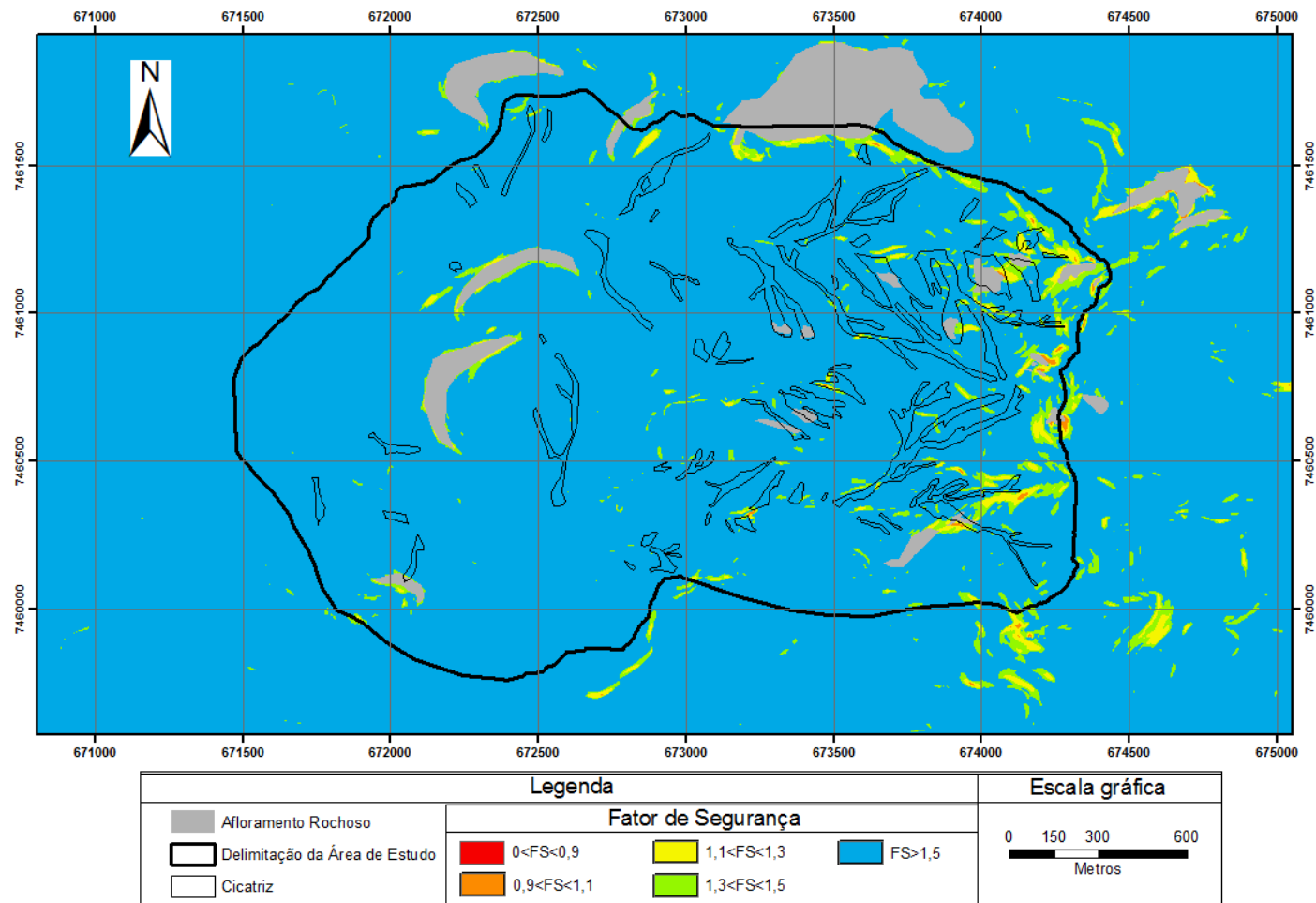


Figura 52 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa, antes da chuva.

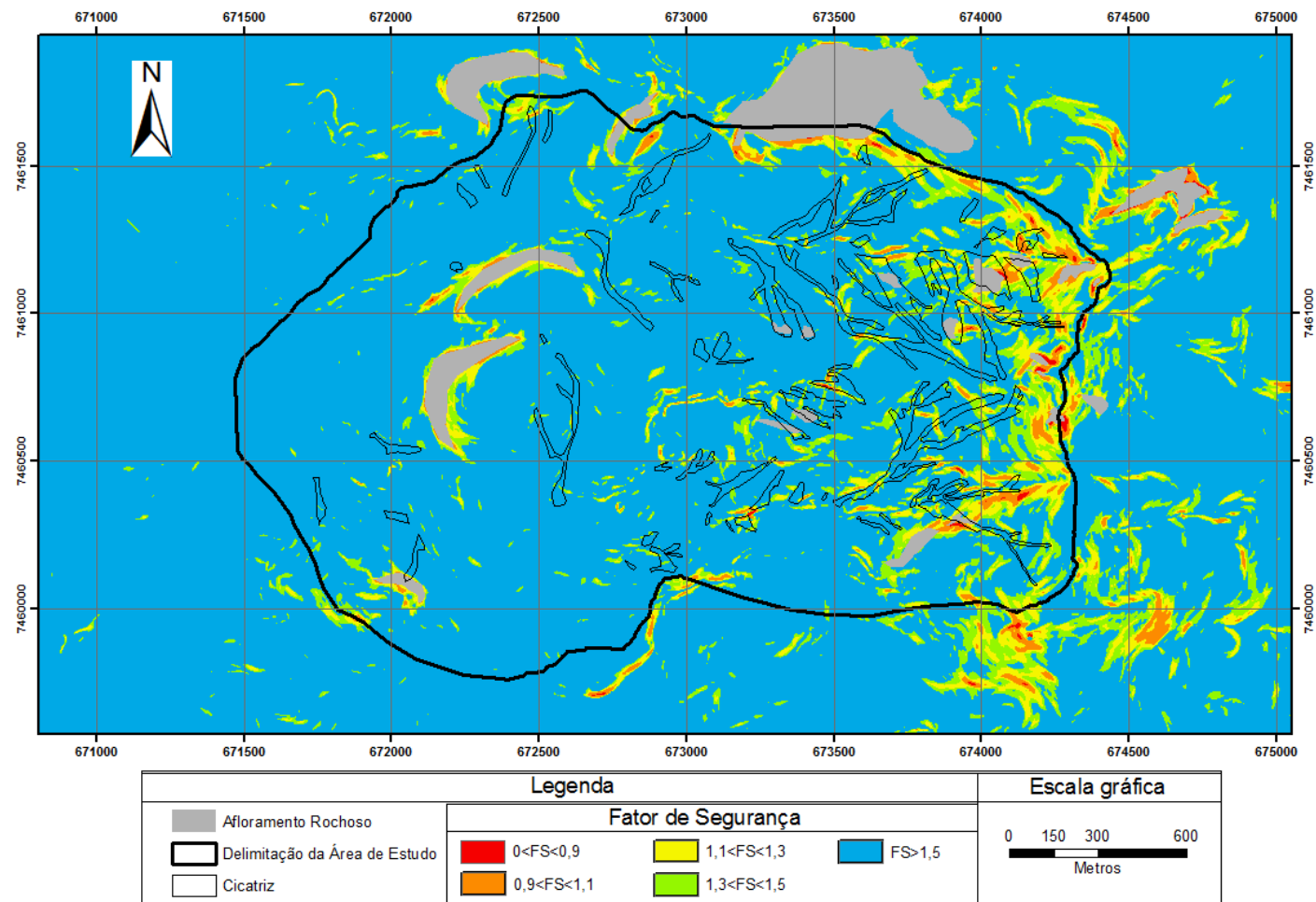


Figura 53 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 2D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 14 kPa, após a chuva.

5.2.5. Efeitos da tridimensionalidade

Por fim, foi modelada a condição onde se consideram as contribuições laterais, computadas através da formulação do talude infinito 3D, na condição inicial de 40 kPa de sucção inicial e 7 kPa de reforço radicular. O que se observa pela Figura 54 é que o fator de segurança apresenta-se bem mais elevado se comparado com os resultados do talude infinito 2D.

O fator de segurança na base é inferior ao da frente de saturação apenas nos dias 03 e 04 de fevereiro. A partir daí, quando a frente de saturação atinge a profundidade de 0,2m aproximadamente, o fator de segurança na frente de saturação passa a ser o menor do sistema. Entre os dias 03 e 04 de fevereiro há uma queda acentuada no fator de segurança, a maior para todo o período de chuva. A Figura 54 também mostra que as grandes chuvas não tiveram grandes interferências no fator de segurança.

Mesmo após todo o período chuvoso, o fator de segurança ainda se manteve acima de 2. O que explica tal situação é que a formulação do talude infinito 3D considera contribuições laterais da coesão e atrito, coesão de raiz e sucção. Além disso, como o MDE trabalha com o conceito de células, ao se utilizar tal formulação aqui proposta, automaticamente está se delimitando o movimento de massa a uma largura fixa igual à largura da célula do grid, nesse caso de apenas 2m, sendo que a largura do movimento é inversamente proporcional à influência das contribuições laterais no fator de segurança.

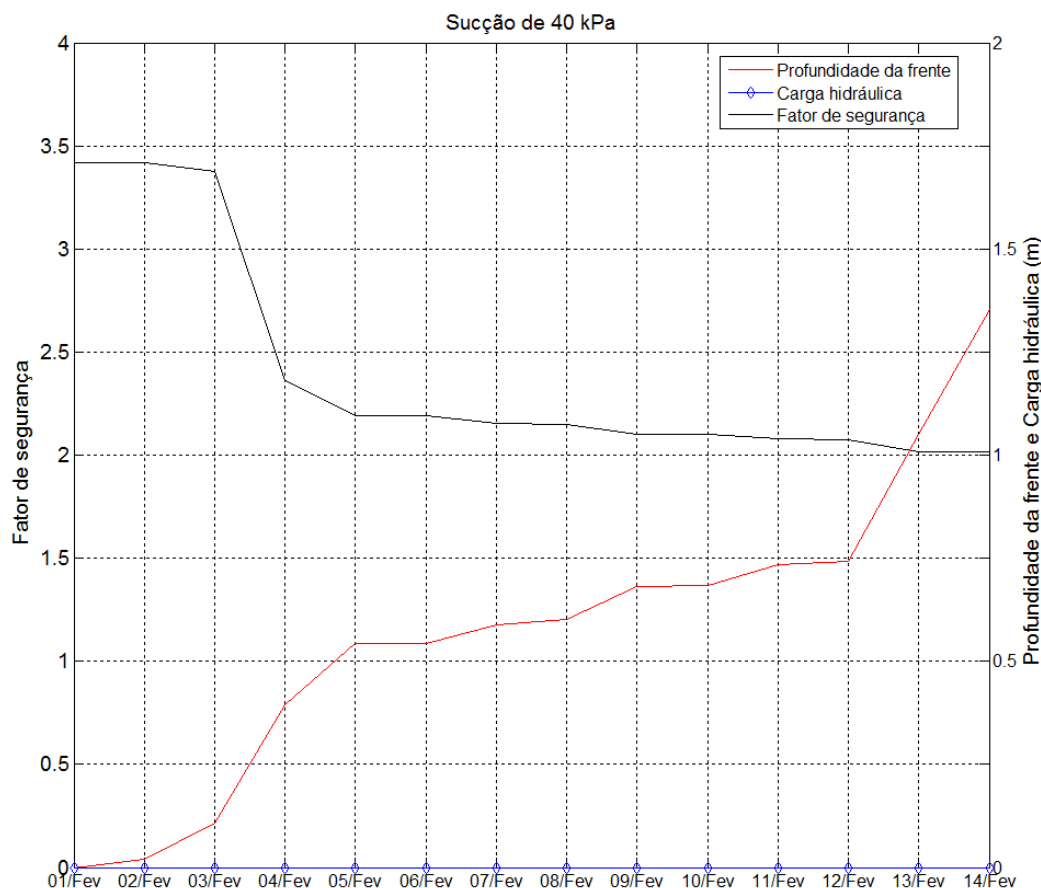


Figura 54 - Variação do Fator de segurança, frente de infiltração e poropressão no tempo, para sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, em modelagem 3D.

As Figuras 55 e 56 mostram a distribuição do fator de segurança antes e após a chuva para o programa com a formulação do talude infinito 3D, respectivamente.

O que se observa é que praticamente não houve alteração na classe do fator de segurança após a chuva, apenas aparecendo alguns pontos onde o mesmo ainda pode ser considerado como seguro (áreas verdes). Tal configuração se mostrou inadequada para o estudo de áreas susceptíveis a movimentos de massa, sobrestimando em muito o fator de segurança para as bacias.

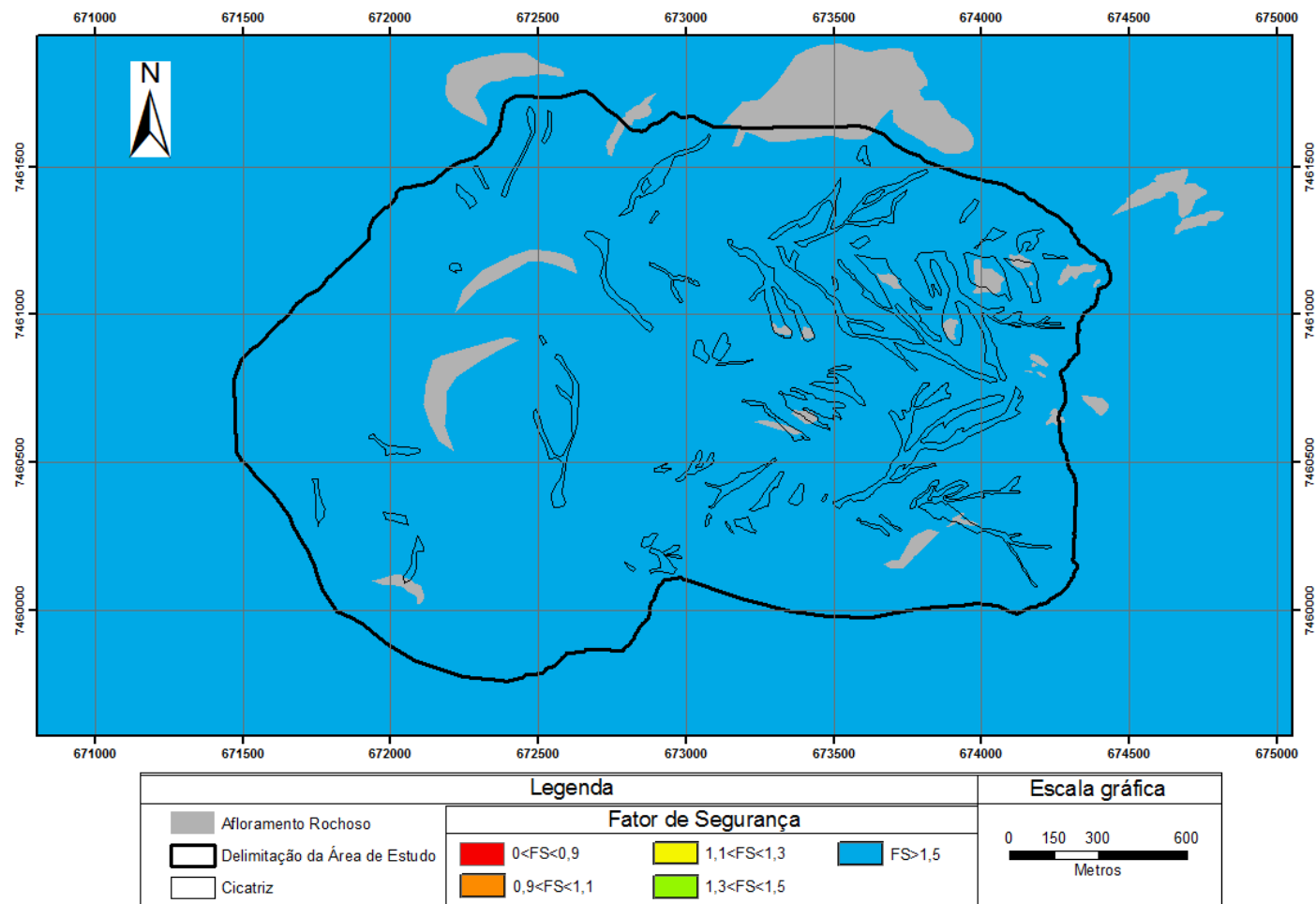


Figura 55 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 3D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa, antes da chuva.

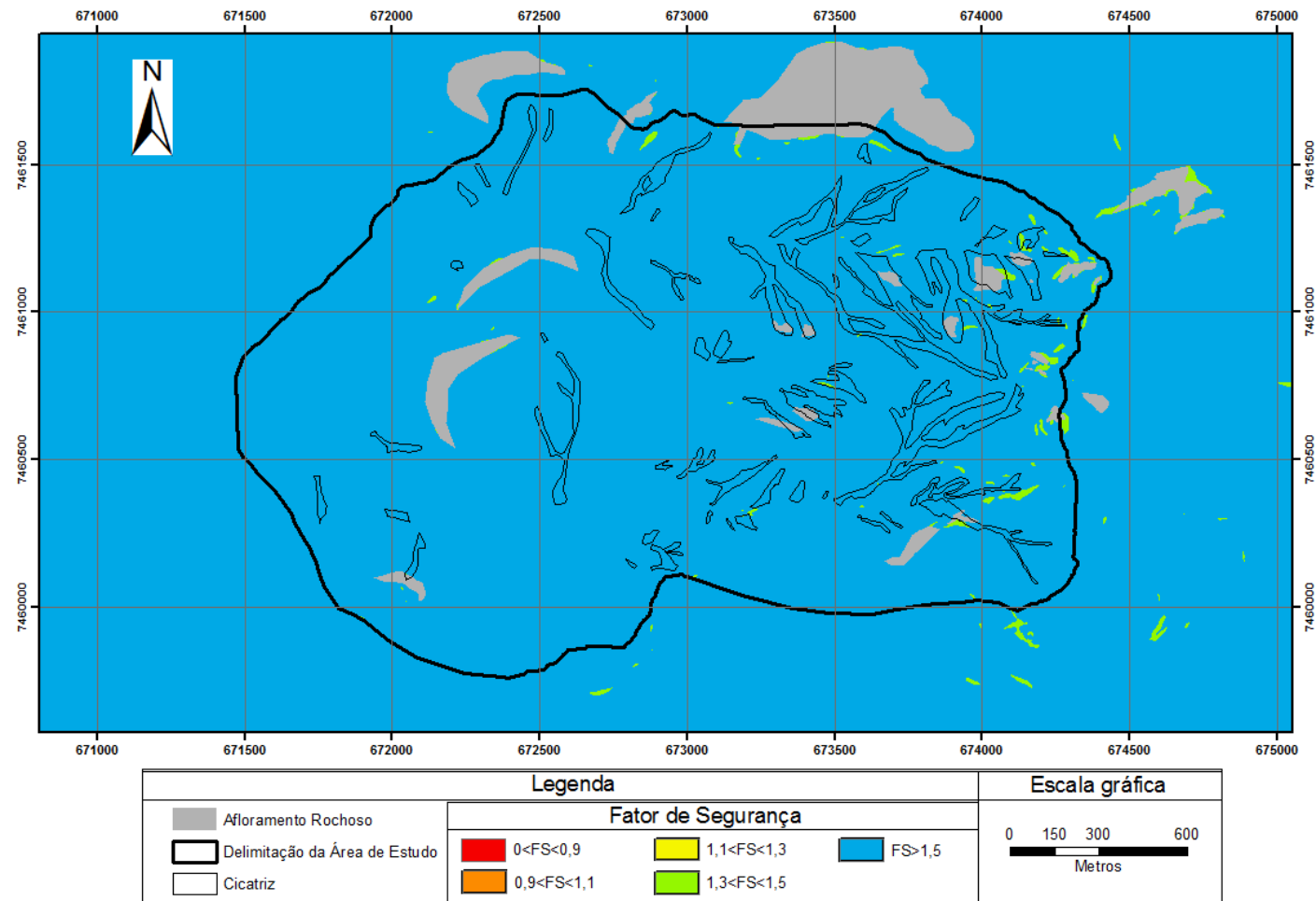


Figura 56 - Mapa do fator de segurança, em modelagem 3D, sucção inicial de 40 kPa, reforço radicular de 7 kPa após a chuva.