

EFEITOS DE CENÁRIOS DE RECOMPOSIÇÃO FLORESTAL NA DISPONIBILIDADE DE RECURSOS HÍDRICOS NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA


MARCOS HEIL COSTA, UFV
VICTOR HUGO BENEZOLI, UFV

1. INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX pesquisadores têm utilizado experimentos com bacias pareadas para estudar o impacto da mudança no uso e cobertura do solo na vazão (Andréassian, 2004). Desde o clássico estudo de Bosch e Hewlett (1982) já é sabido que a redução da cobertura vegetal implica em aumento da produção de água (vazão média anual), o que foi confirmado para diversos ecossistemas nos trabalhos de Bruijnzeel (1990), Sahin e Hall (1996), Andréassian (2004) e Brown et al. (2005). À luz desses trabalhos, atualmente é possível inferir a magnitude dos efeitos devido à conversão da vegetação natural por culturas agrícolas no ciclo hidrológico e, de maneira geral, espera-se que a conversão da vegetação natural em pastagem ou agricultura aumente a vazão média nas redes fluviais.

Entretanto, o estudo do efeito da mudança no uso do solo sobre os recursos hídricos usando bacias pareadas é limitado micro-bacias e normalmente não pode se extrapolado para grandes bacias, onde podem haver variações no clima, na topografia, tipo de solo e até mesmo no próprio uso do solo. Neste caso, outra forma de obter a resposta da substituição da cobertura vegetal na vazão e outros componentes do balanço hídrico é por meio da utilização de modelos numéricos. Devido ao interesse em se compreender o papel da mudança na cobertura vegetal no sistema hidrológico, foram desenvolvidos modelos capazes de descrever os fluxos de água entre solo-planta-atmosfera. Dentre as vantagens em se utilizar modelos estão a possibilidade de se examinar separadamente os processos de superfície (evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem profunda) e simular as consequências, não somente históricas, mas também futuras, do desmatamento sobre o balanço regional de água.

Este relatório estima os efeitos de cenários de recomposição florestal na disponibilidade de recursos hídricos na região da Mata Atlântica. Para a região em estudo, serão considerados três parâmetros hidrológicos: a vazão média de longo prazo ($Q_{média}$), a vazão máxima num período de 23 anos (Q_{max}), e a vazão que é superada em 95% do tempo (Q_{95}). Essas três métricas indicam características relacionadas à disponibilidade média de recursos hídricos anuais, ao risco de enchentes e ao abastecimento de água.

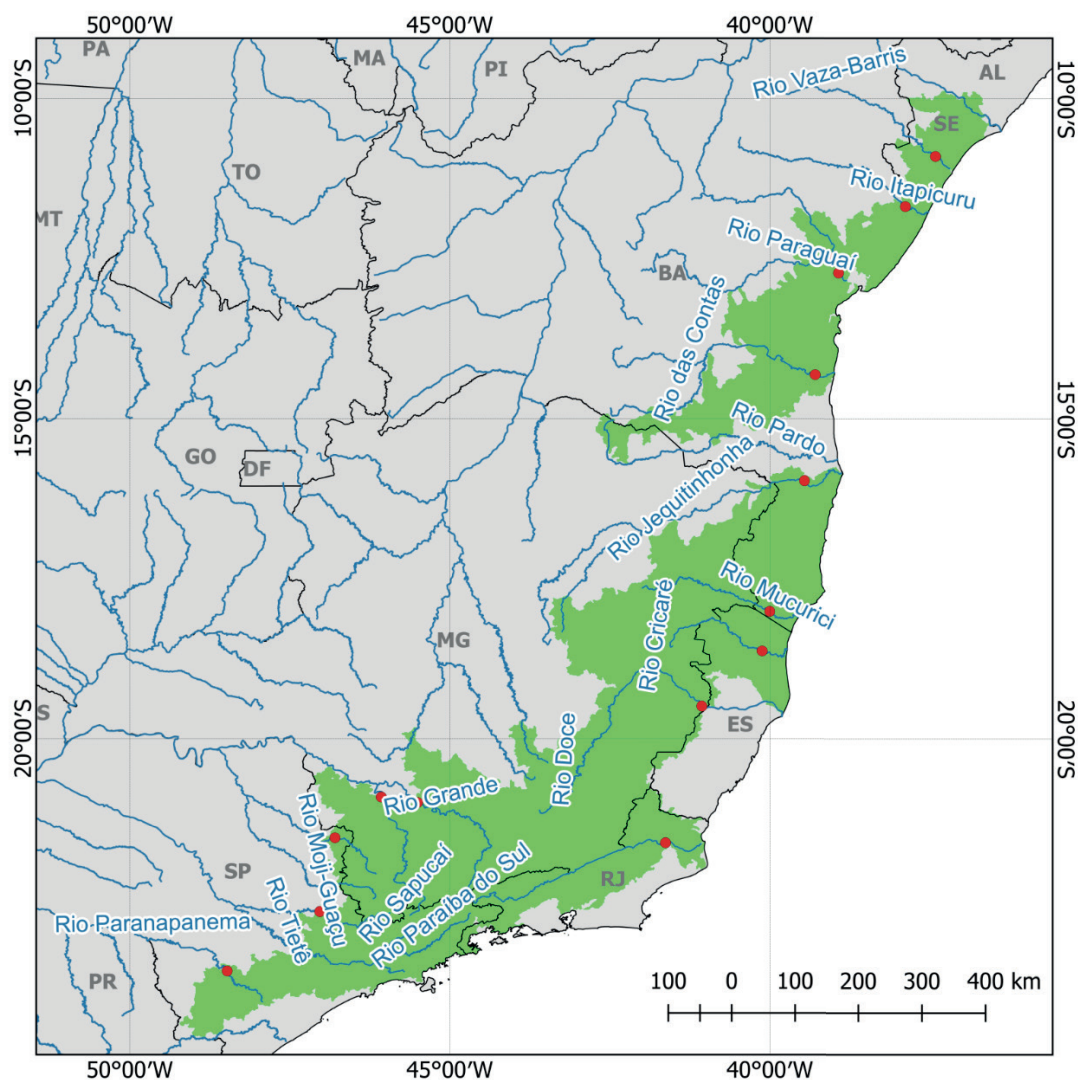


2. METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO E CENÁRIOS DE USO DO SOLO

A área de estudo compreende uma região do leste brasileiro, compreendendo parte dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Sergipe e Alagoas, numa área total de 40,4 milhões de ha, conforme **Figura 1**. As principais bacias são as do Rio Paranapanema, Camanducaia, Pardo, Sapucaí, Grande, Paraíba do Sul, Doce, Cricaré, Mucurici, Jequitinhonha, das Contas, Paraguaí, Jacuípe, Itapicuru e Vaza-Barris.

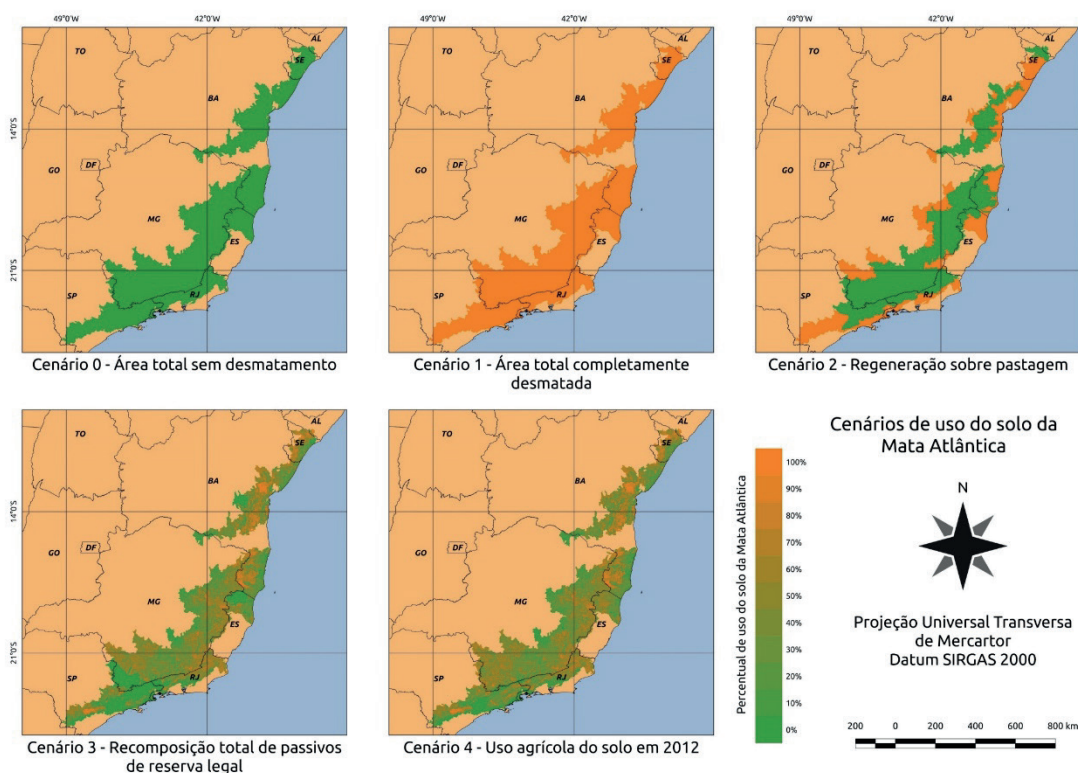
FIGURA 1. Região de estudo, mostrando as principais bacias hidrográficas envolvidas. Os pontos vermelhos indicam pontos de análise na seção de resultados.



A **Figura 2** mostra os diferentes cenários de uso do solo considerados para o estudo, que são referenciados da seguinte forma:

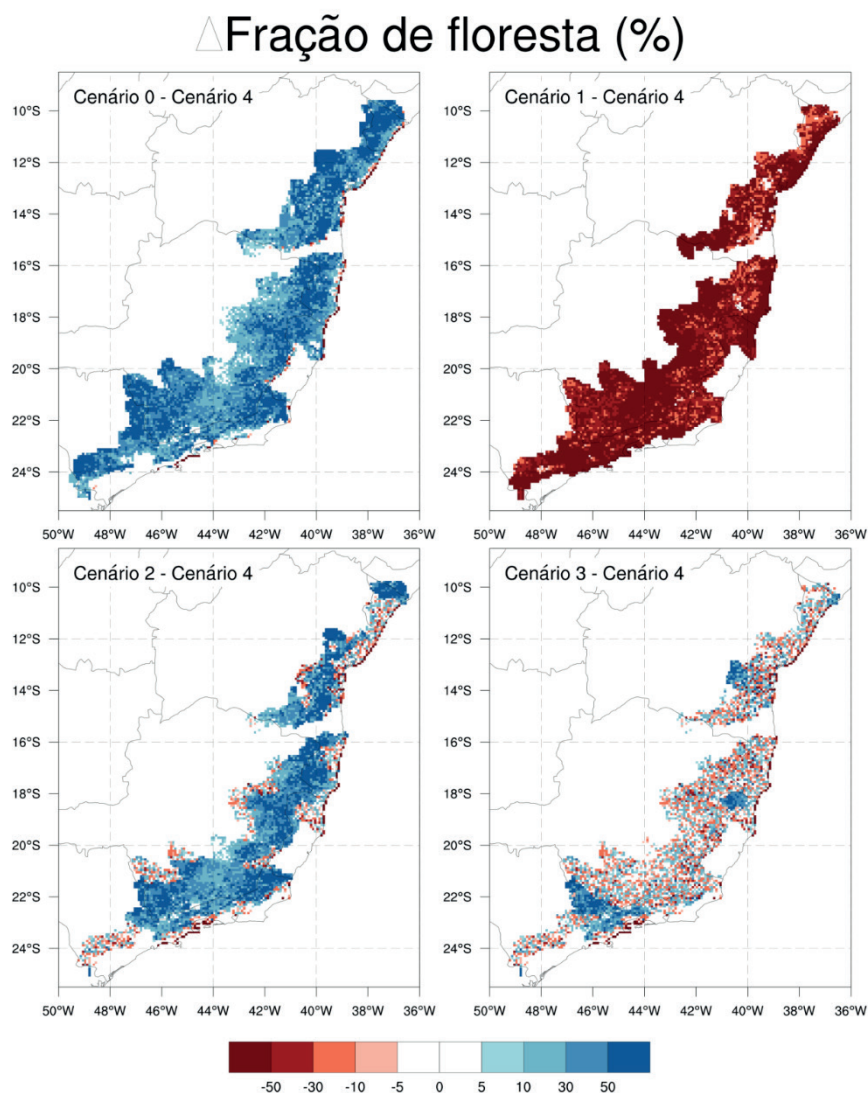
- (a) **Cenário 0:** Área total florestada
- (b) **Cenário 1:** Área total desflorestada, com zero de florestas
- (c) **Cenário 2:** Regeneração sobre pastagens apenas
- (d) **Cenário 3:** Recomposição total de passivos de reserva legal na Mata Atlântica
- (e) **Cenário 4:** Padrão atual de desmatamento

FIGURA 2. Região de estudo e cenários de desmatamento. As cores variam de verde para regiões com 100% de florestas, a laranja, pra regiões com 100% de uso agrícola.



Para a construção do cenário 4, foram usados os dados de Dias et al. (2016). Se o Cenário 4 for considerado o cenário de referência (uso atual do solo), então as diferenças entre as frações de floresta entre cada um dos cenários e o Cenário 4 estão mostrados na **Figura 3**.

FIGURA 3. Diferenças percentuais entre os diferentes cenários de uso do solo e o cenário de uso do solo atual (Cenário 4). Cores azuis indicam um aumento na cobertura de árvores, enquanto cores vermelhas indicam uma redução na cobertura de árvores.



2.2 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS

Para cada um dos cenários em estudos, foram realizadas simulações com o modelo hidrológico THMB/INLAND para o período 1981-2012. Os primeiros 10 anos de estudo (1981-1990) foram usados para inicializar o modelo, enquanto os demais anos (1991-2012) foram usados para análise dos resultados.

3. RESULTADOS

Os resultados são apresentados individualmente para cada uma das principais bacias da região em estudo (Seção 3.1), e também de forma sintética para toda a região em estudo (Seção 3.2). As principais bacias são as do Rio Paranapanema, Camanducaia, Pardo, Sapucaí, Grande, Paraíba do Sul, Doce, Cricaré, Mucurici, Jequitinhonha, das Contas, Paraguai, Jacuípe, Itapicuru e Vaza-Barris.

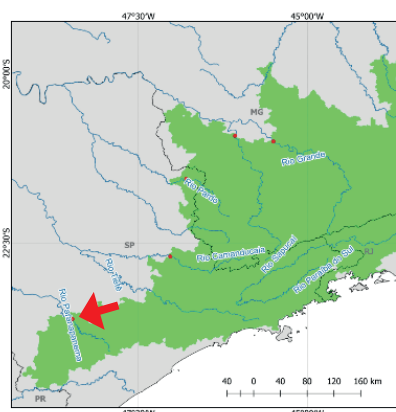
3.1 RESULTADOS POR BACIA HIDROGRÁFICA

Os resultados serão apresentados por bacia, de forma padronizada e usando uma bacia por página, para facilitar a referência. Em todos os casos em estudo, são apresentados um pequeno mapa de referência indicando o rio em estudo e o ponto de análise, um resumo dos cinco cenários estudados, a hidrógrafa simulada, isto é, a curva de vazão x tempo no período 1990-2012, e a curva de permanência para aquele ponto, ou seja, a distribuição de probabilidade das vazões. Note que as curvas de permanência são plotadas com escala logarítmica. Em destaque dentro da curva de permanência, estão os valores de Q95 para os cinco cenários. Precedendo cada figura, uma pequena análise (1-2 frases) analisando brevemente os pontos mais importantes de cada bacia.

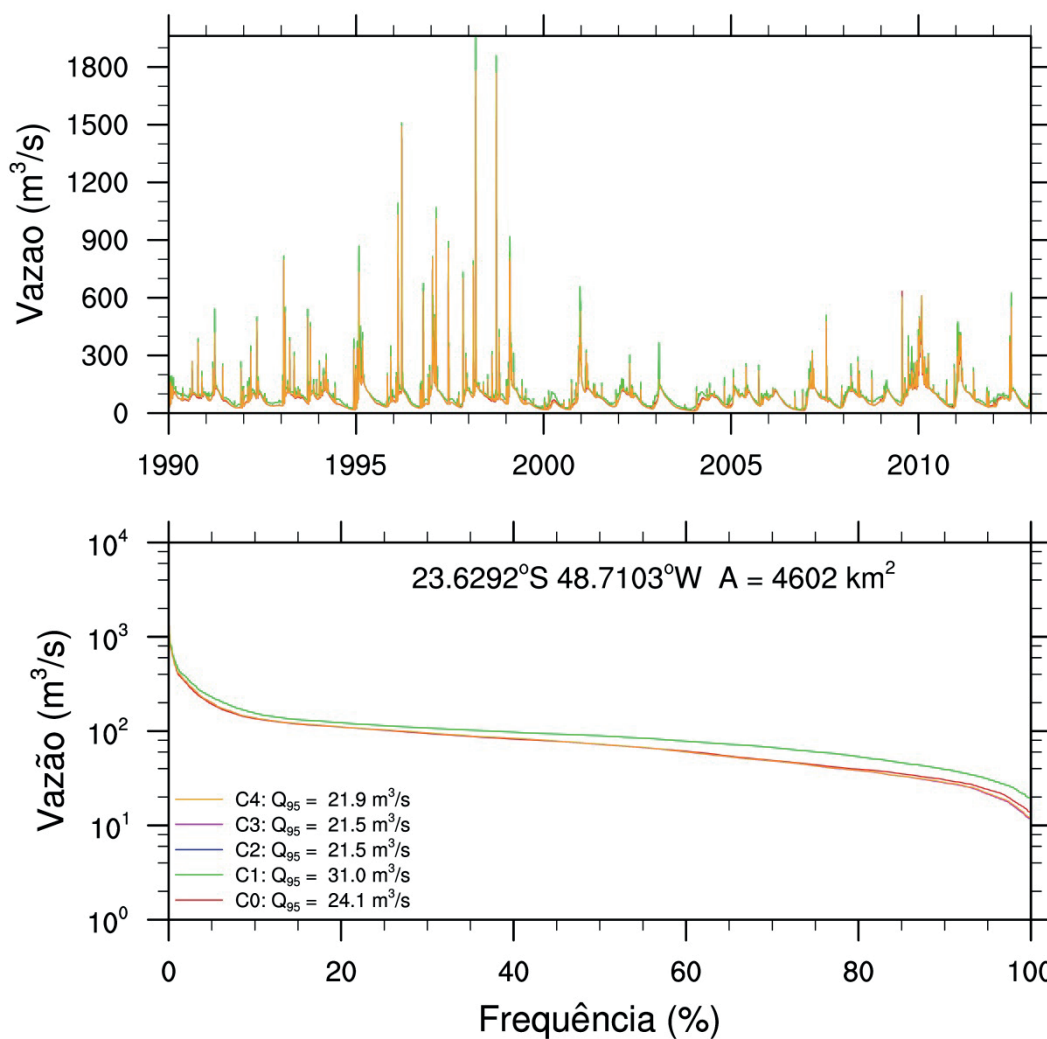
(A) RIO PARANAPANEMA

Para o Rio Paranapanema, o Cenário 1 indicou vazões mais altas em todos os níveis de probabilidade, indicando aumento em Q_{med} , Q_{max} e Q_{95} .

FIGURA 4. Localização do Rio Paranapanema e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



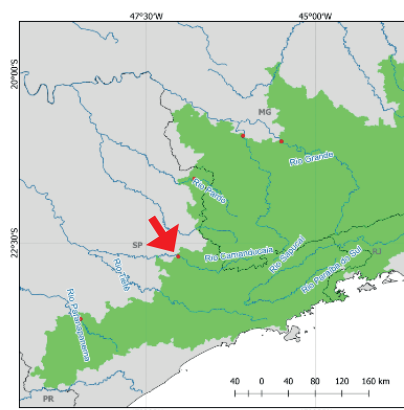
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



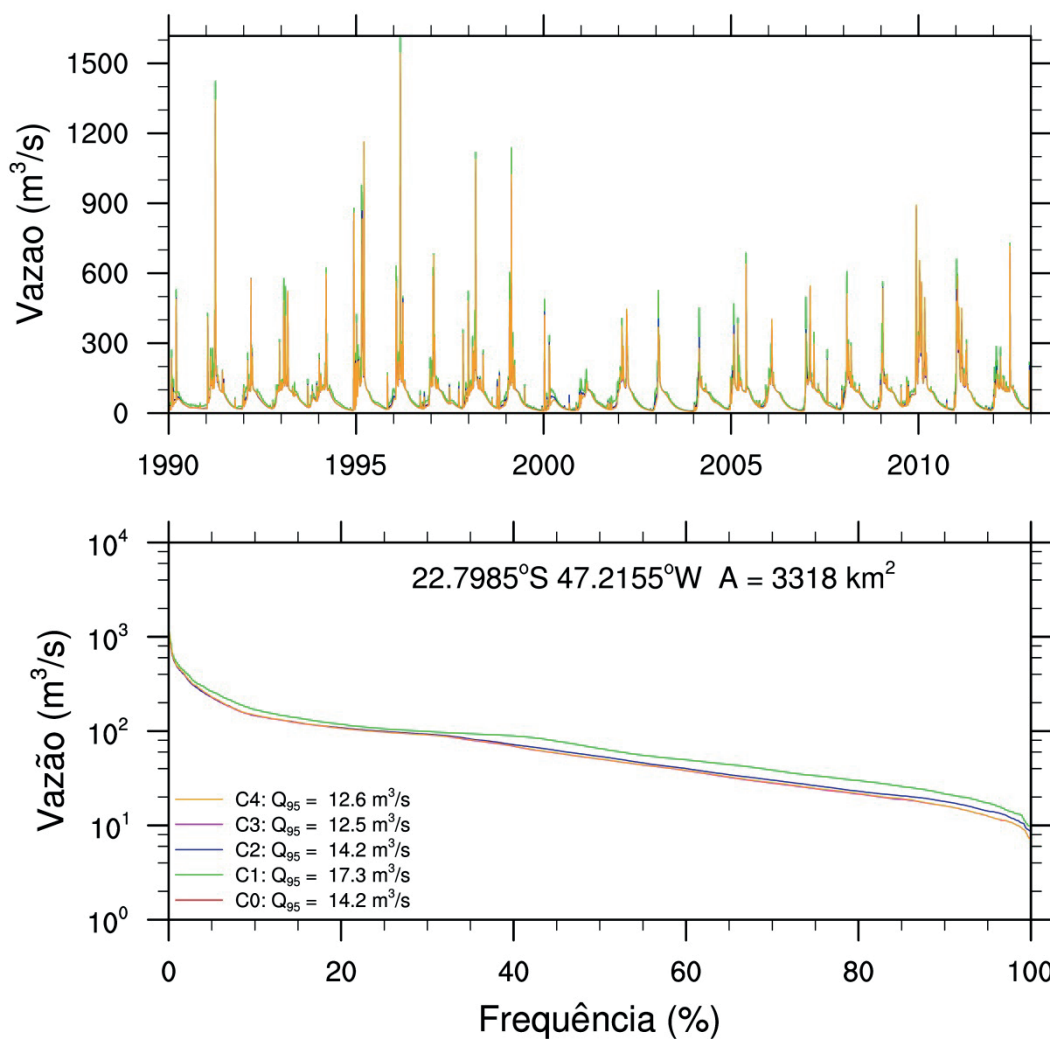
(B) RIO CAMANDUCAIA

Para o Rio Camanducaia, o Cenário 1 indicou vazões mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} .

FIGURA 5. Localização do Rio Camanducaia e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



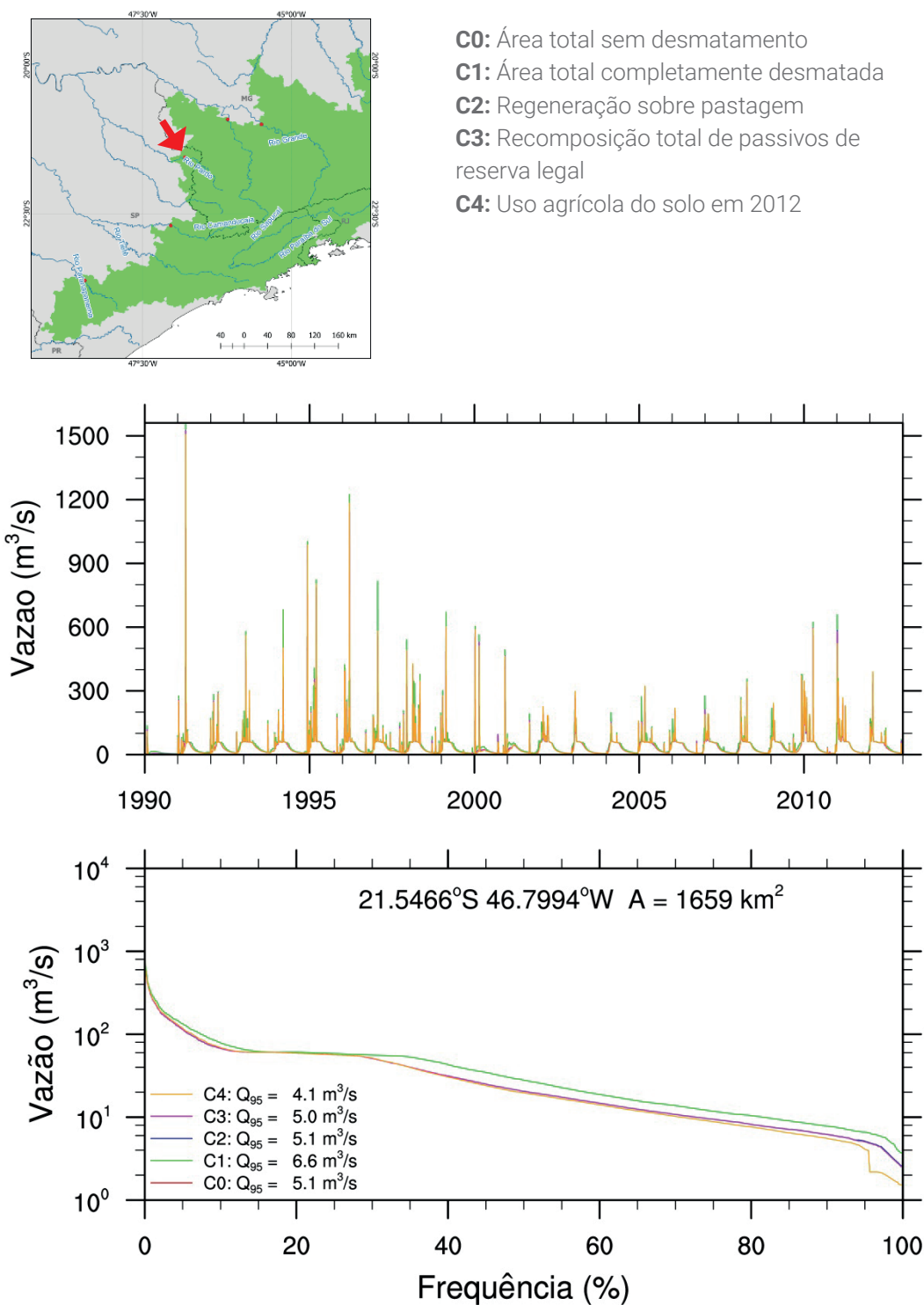
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



(C) RIO PARDO

Para o Rio Pardo, o Cenário 1 indicou vazões mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} , enquanto o Cenário C4 (atual) indicou forte queda na Q_{95} , com prejuízos para o abastecimento de água.

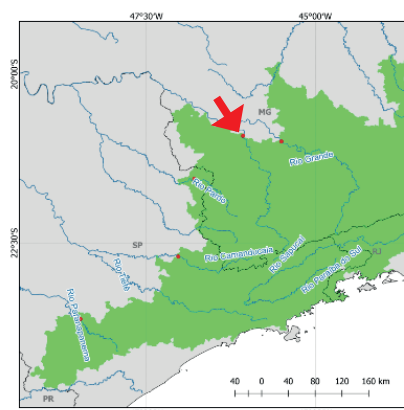
FIGURA 6. Localização do Rio Pardo e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



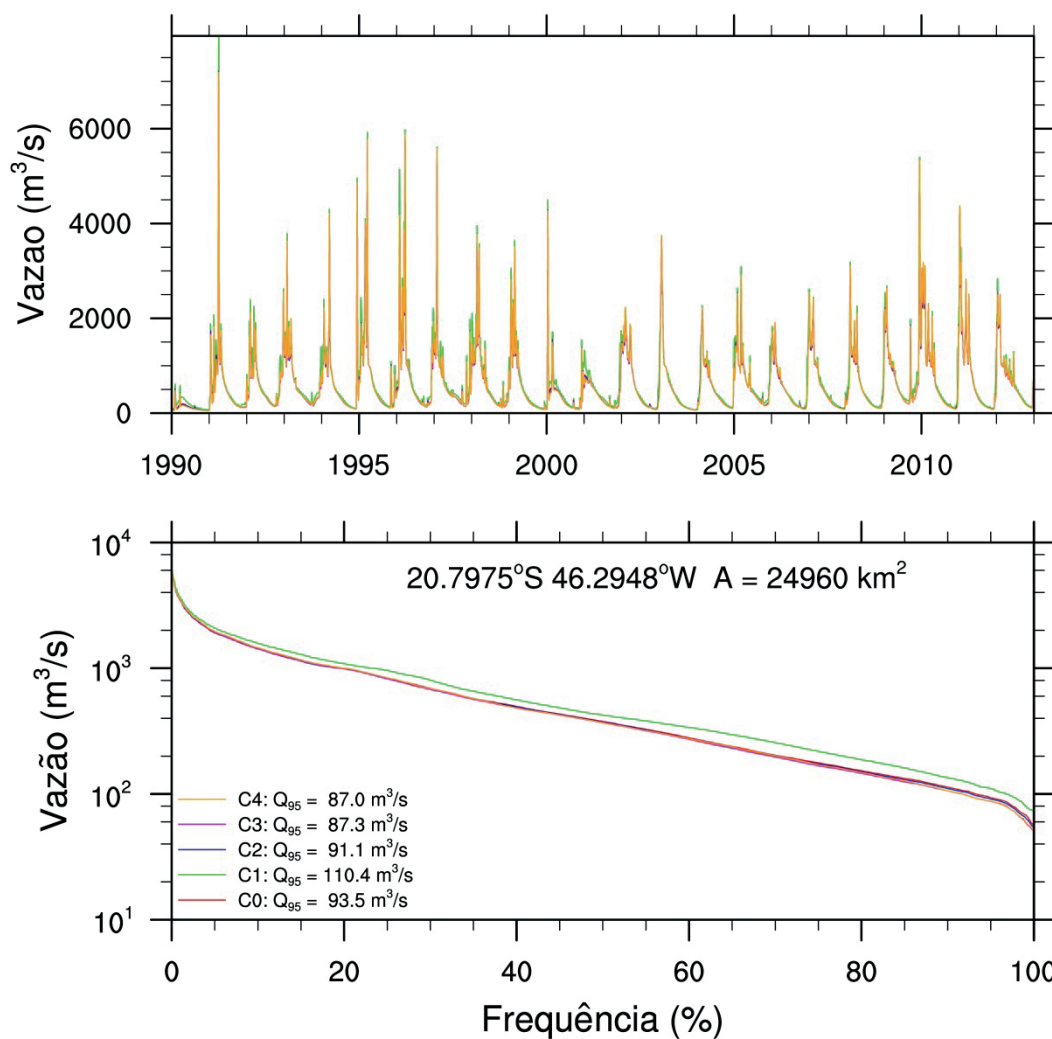
(D) RIO SAPUCAÍ

Para o Rio Sapucaí, o Cenário 1 indicou vazões mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} .

FIGURA 7. Localização do Rio Sapucaí e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



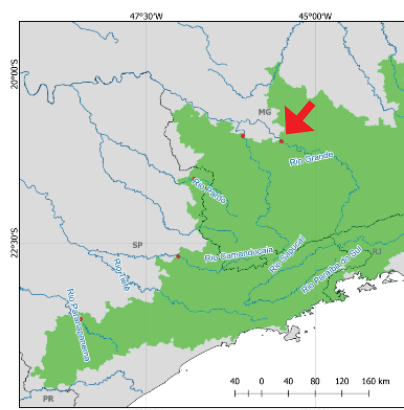
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



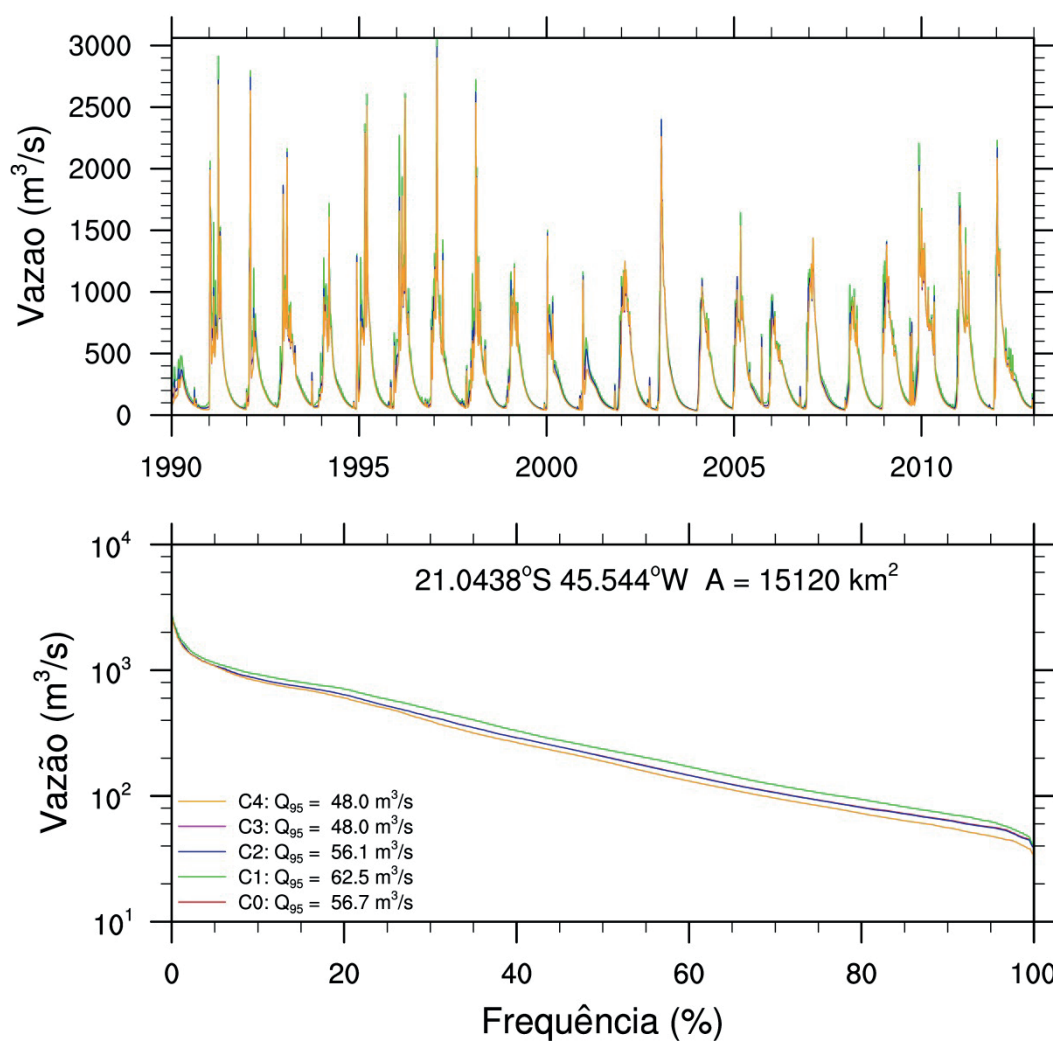
(E) RIO GRANDE

Para o Rio Grande, o Cenário 1 indicou vazões levemente mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} , enquanto o Cenário 4 indicou vazões mais reduzidas para Q_{95} .

FIGURA 8. Localização do Rio Grande e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



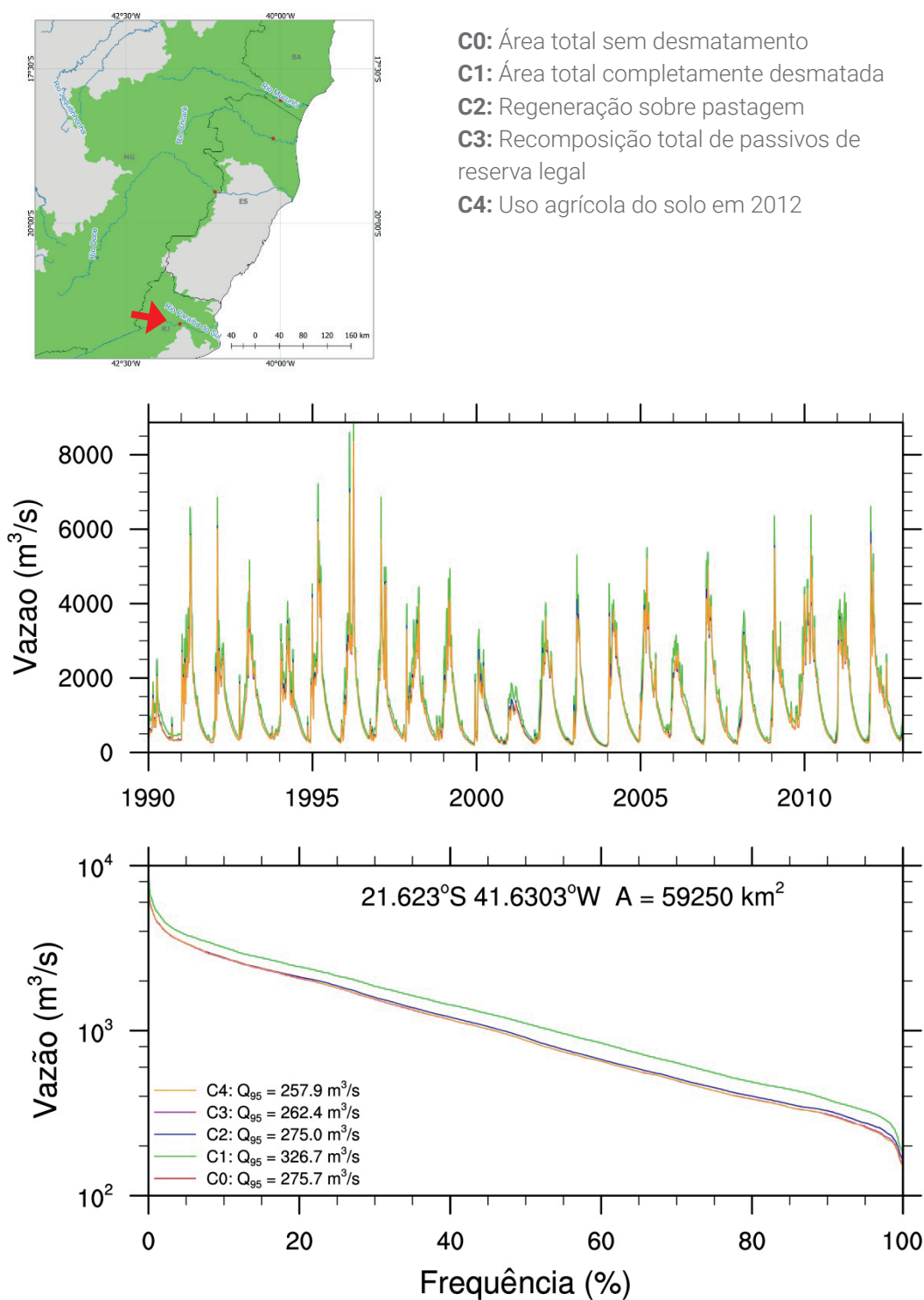
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



(F) RIO PARAÍBA DO SUL

Para o Rio Paraíba do Sul, o Cenário 1 indicou vazões significativamente mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , e pequenas alterações em Q_{max} .

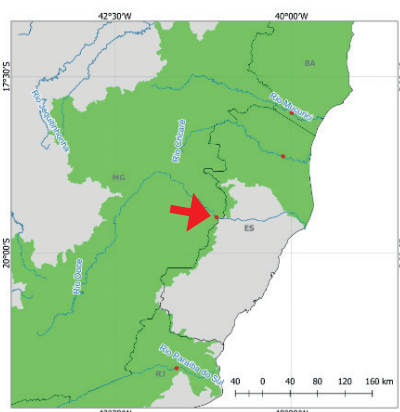
FIGURA 9. Localização do Rio Paraíba do Sul e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



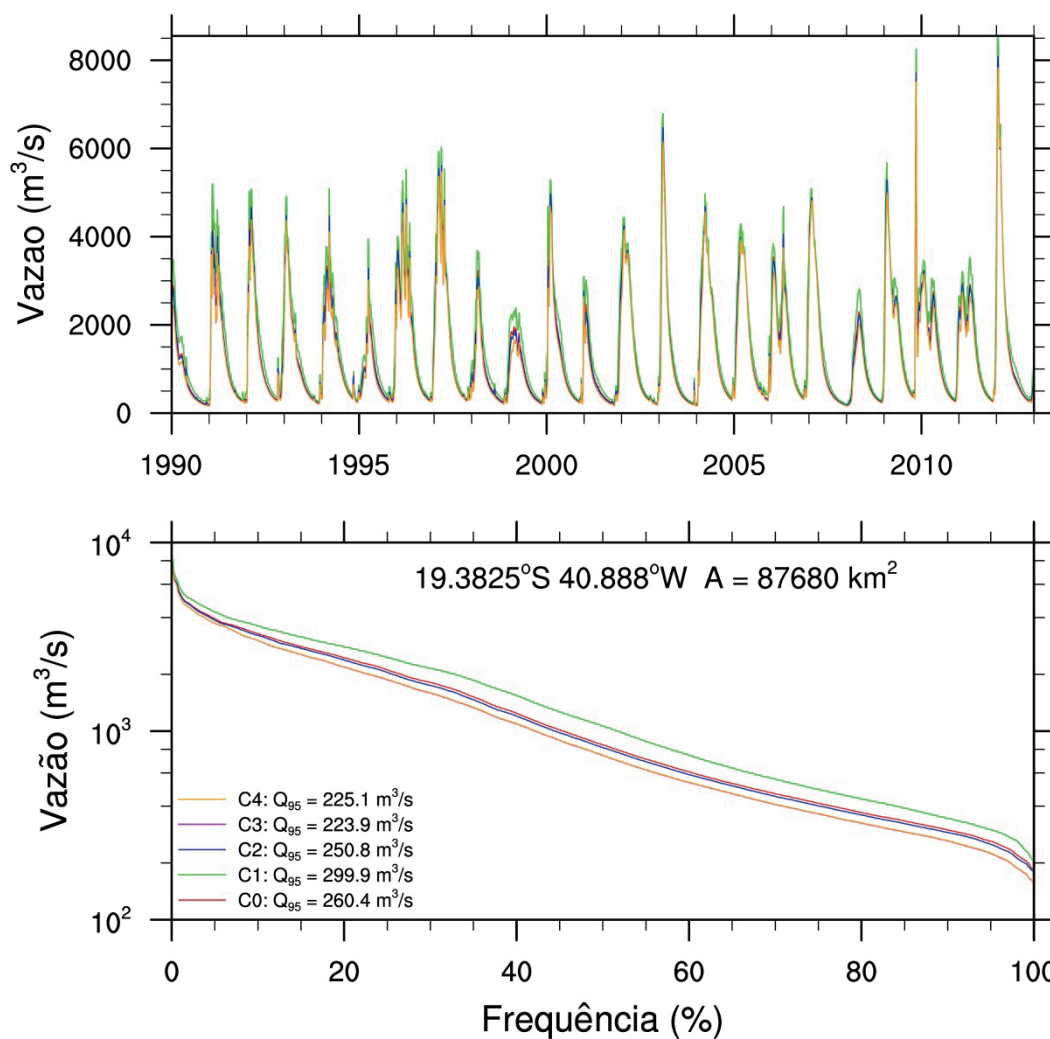
(G) RIO DOCE

Para o Rio Doce, o Cenário 1 indicou vazões significativamente mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} .

FIGURA 10. Localização do Rio Doce e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



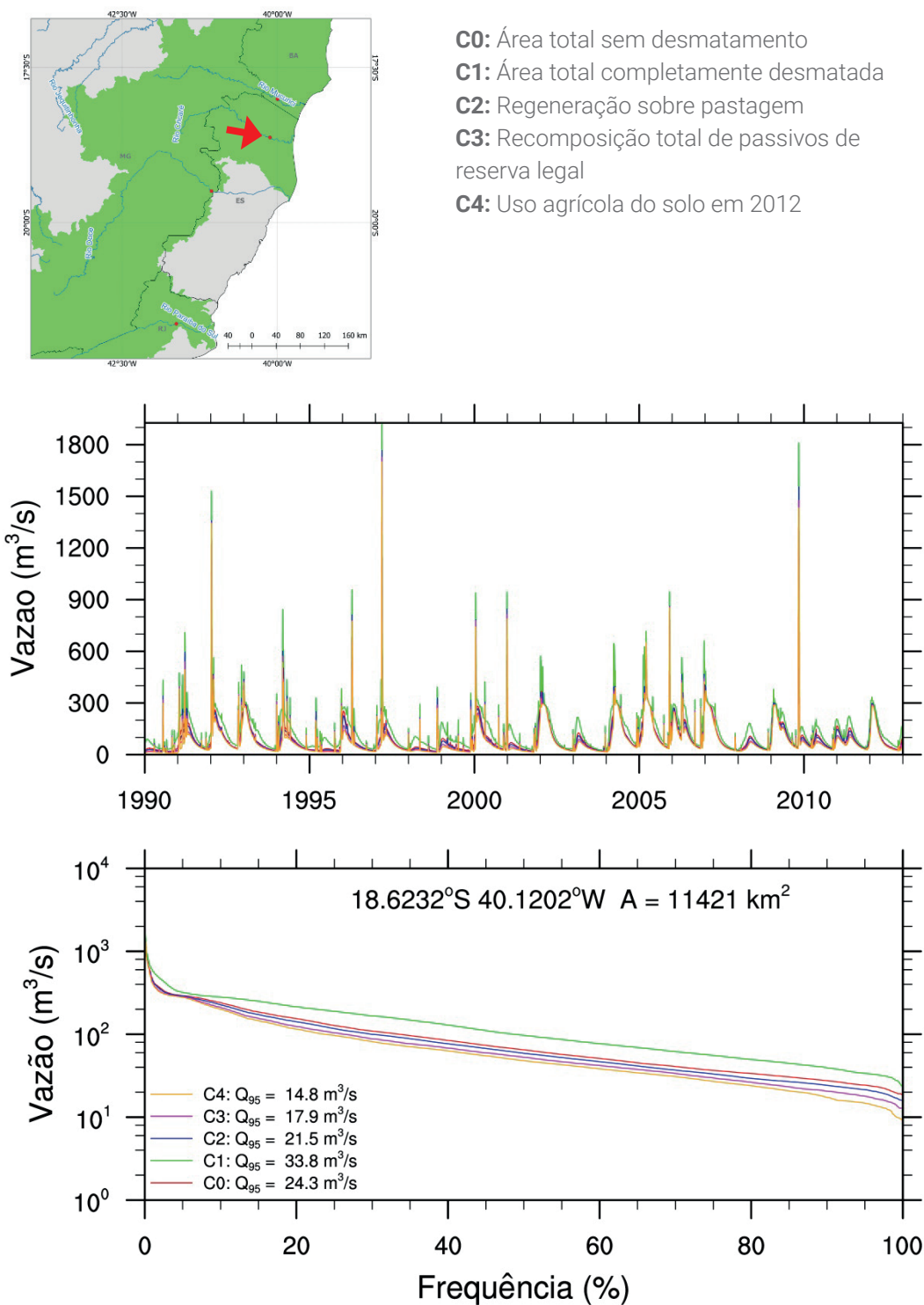
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



(H) RIO CRICARÉ

Para o Rio Cricaré, o Cenário 1 indicou vazões significativamente mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} . Por ser uma bacia menor, mostrou grandes diferenças entre os cenários de uso do solo, principalmente para vazões mínimas.

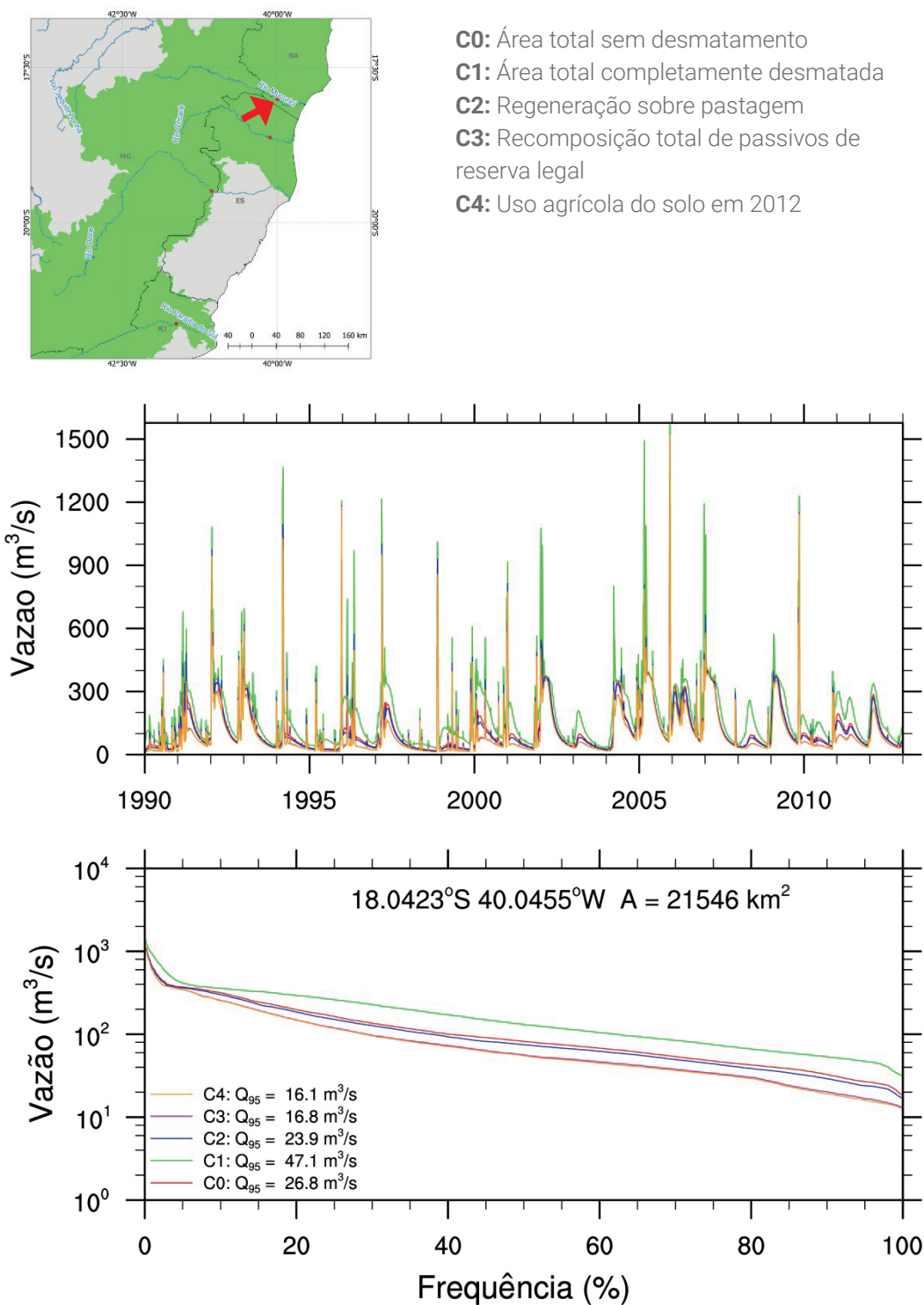
FIGURA 11. Localização do Rio Cricaré e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



(I) RIO MUCURICI

Para o Rio Mucurici, o Cenário 1 indicou vazões significativamente mais altas apenas para Q_{med} e Q_{95} , sem alterações em Q_{max} , e vazões bem inferiores para os Cenários 3 e 4. Por ser uma bacia menor, mostrou grandes diferenças entre os cenários de uso do solo, principalmente para vazões mínimas.

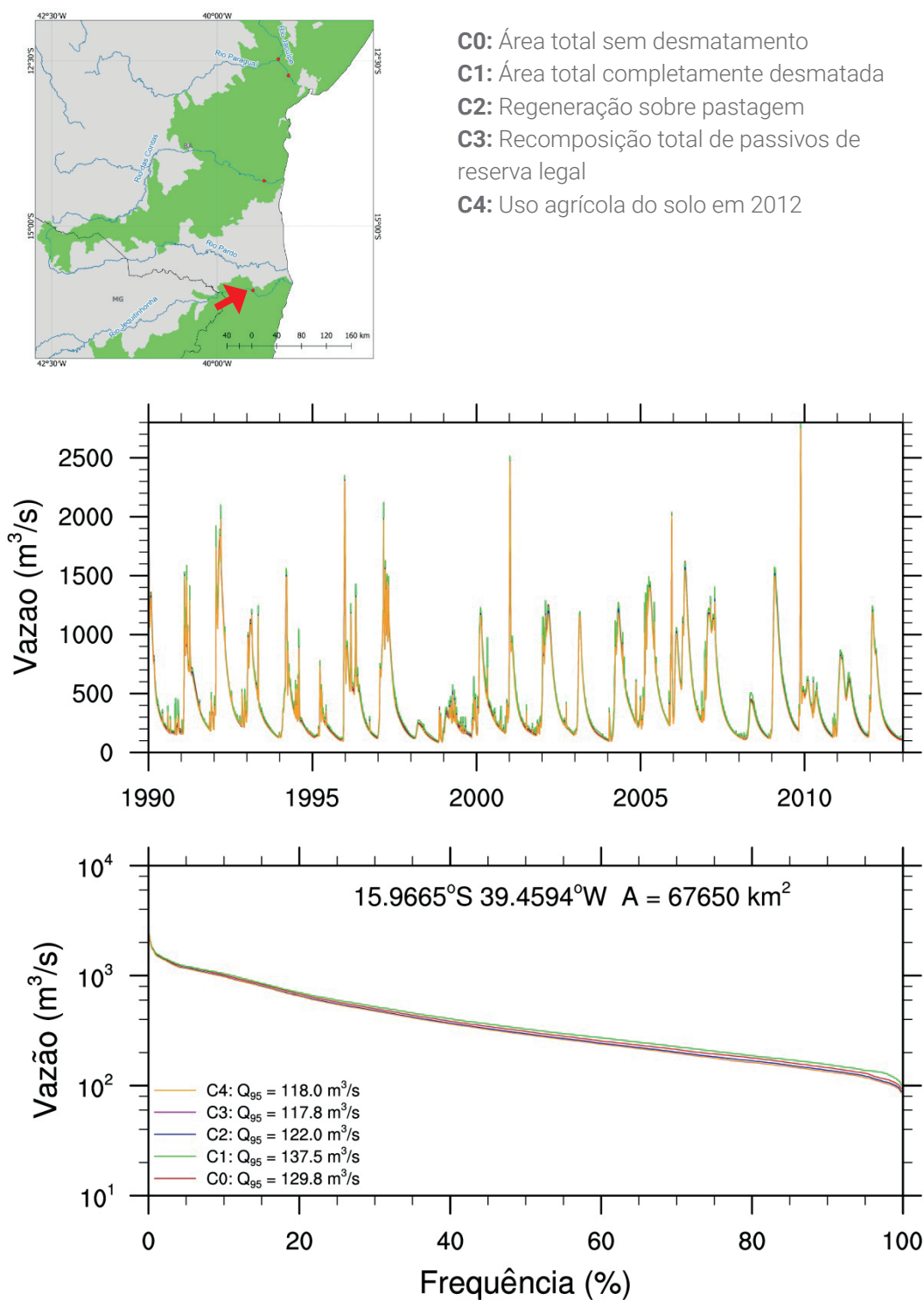
FIGURA 12. Localização do Rio Mucurici e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



(J) RIO JEQUITINHONHA

Para o Rio Jequitinhonha, as hidrógrafas e curvas de permanência foram muito semelhantes em todos os cenários de uso do solo, o que indica pouca sensibilidade a mudanças no uso do solo.

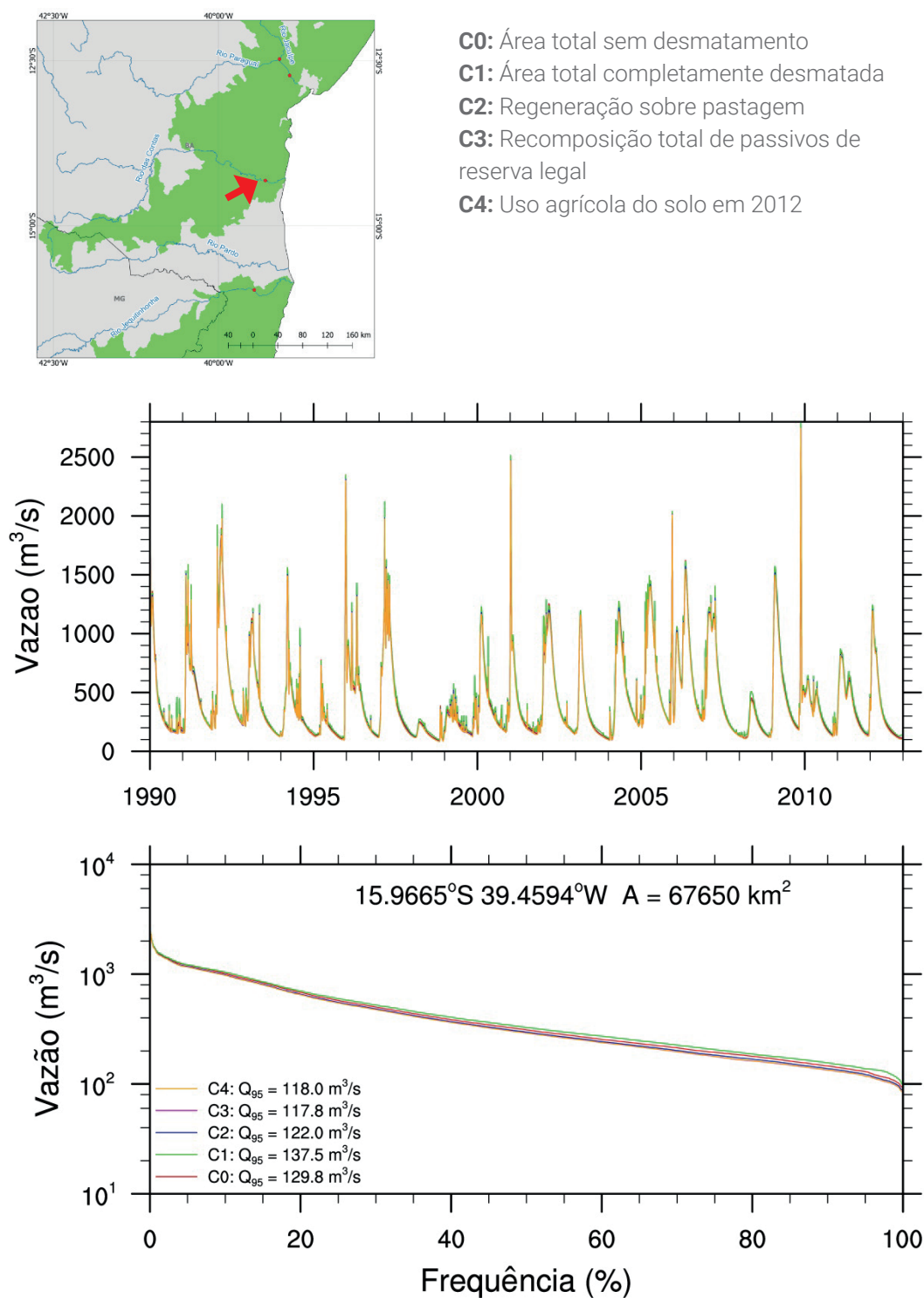
FIGURA 13. Localização do Rio Jequitinhonha e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



(K) RIO DAS CONTAS

Para o Rio das Contas, de maneira semelhante ao Jequitinhonha, as hidrógrafas e curvas de permanência foram muito semelhantes em todos os cenários de uso do solo, o que indica pouca sensibilidade a mudanças no uso do solo.

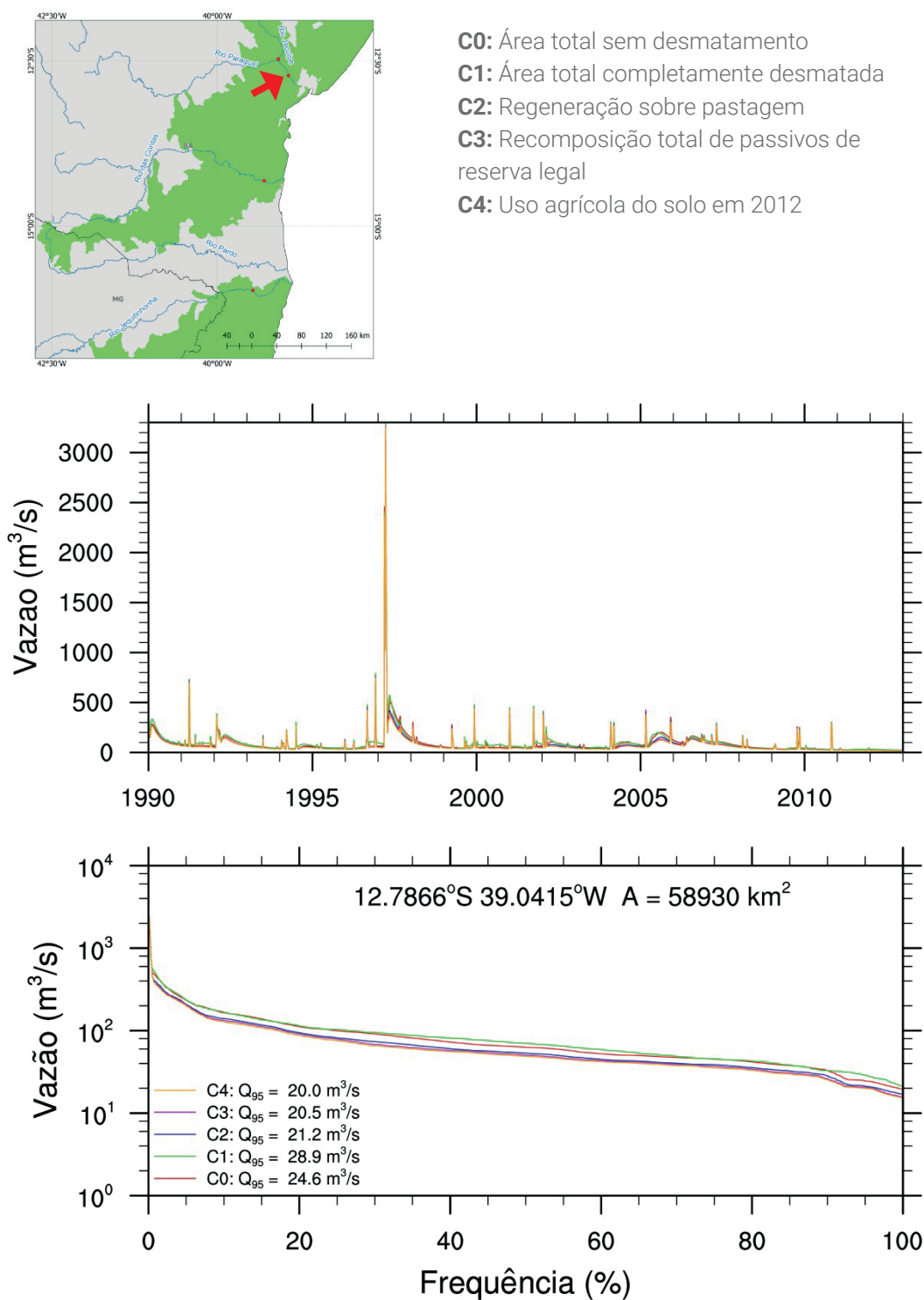
FIGURA 14. Localização do Rio das Contas e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



(L) RIO PARAGUAÍ

Para o Rio Paraguaí, de maneira semelhante ao Jequitinhonha e ao Rio das Contas, as hidrógrafas e curvas de permanência foram muito semelhantes em todos os cenários de uso do solo, o que indica pouca sensibilidade a mudanças no uso do solo.

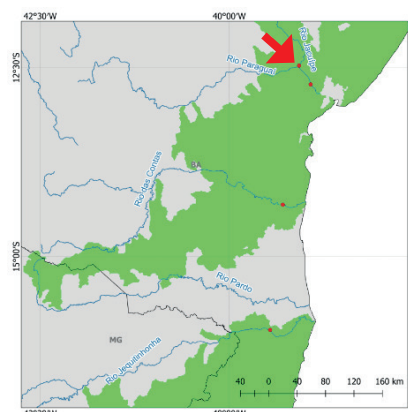
FIGURA 15. Localização do Rio Paraguaí e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



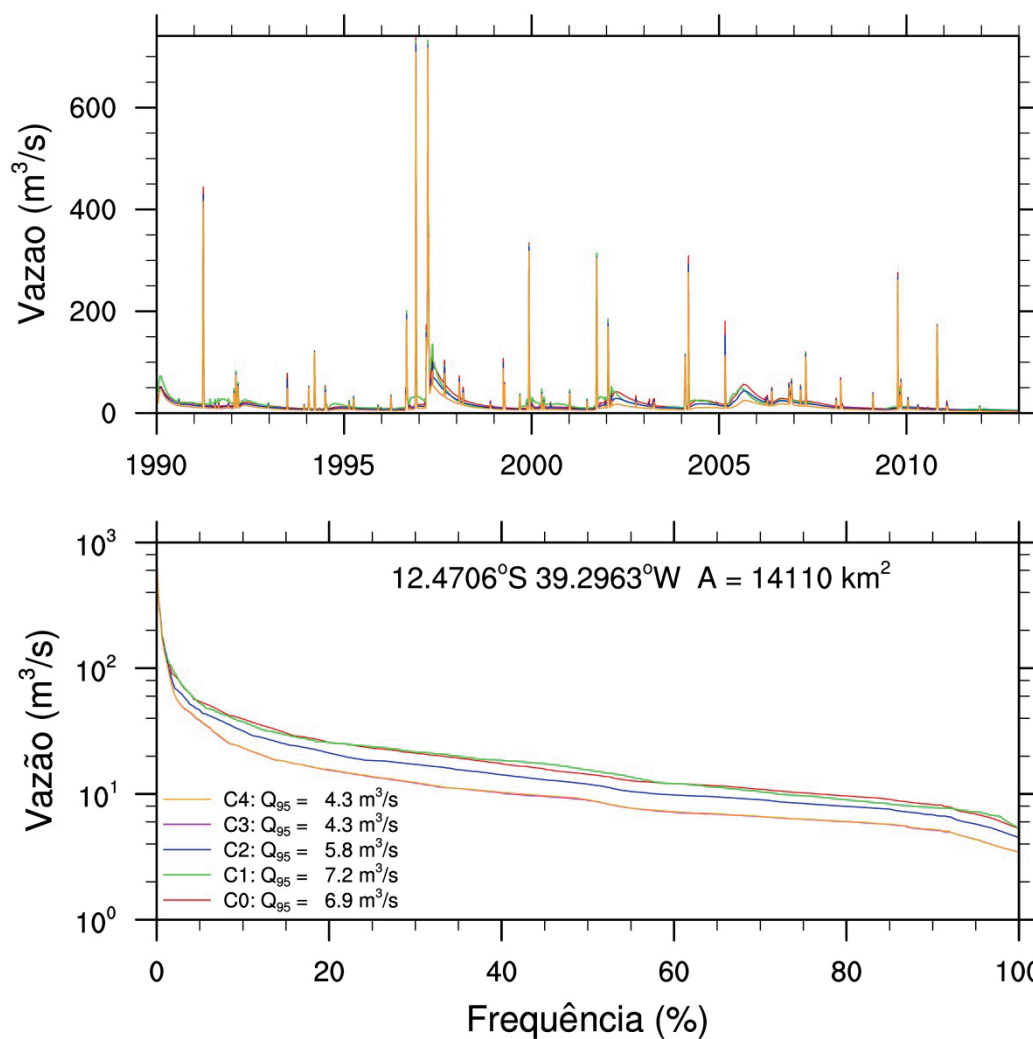
(M) RIO JACUIPE

Para o Rio Jacuípe, por ser um rio pequeno, as hidrógrafas e curvas de permanência apresentam bastante diferença entre os cenários de uso do solo, indicando muita sensibilidade a mudanças no uso do solo.

FIGURA 16. Localização do Rio Jacuípe e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



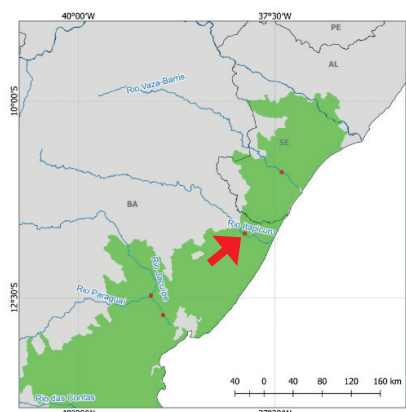
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



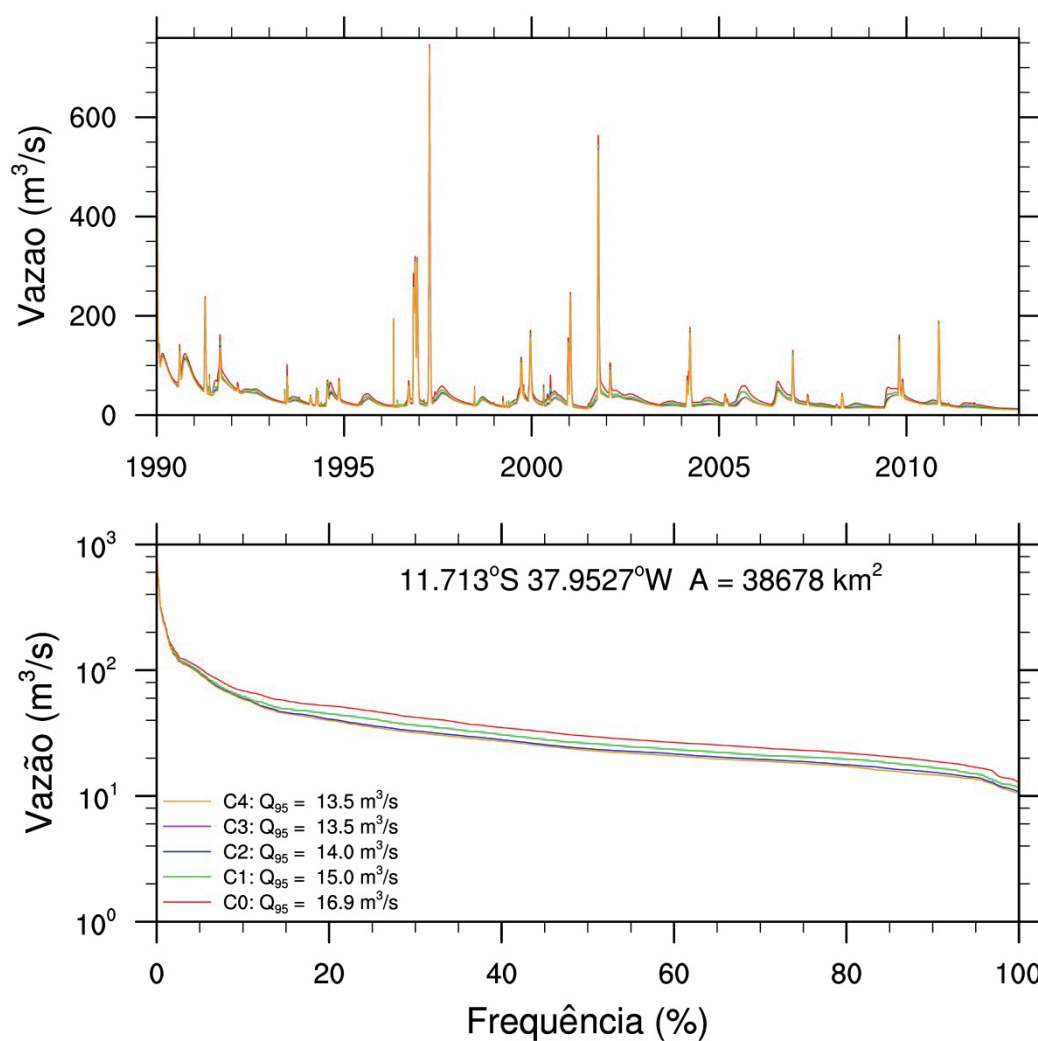
(N) RIO ITAPICURU

Para o Rio Itapicuru, as hidrógrafas e curvas de permanência são relativamente uniformes, e apresentam pouca diferença entre os cenários de uso do solo. Destaca-se aqui o fato do Cenário C0 ser o cenário com maior Q_{95} .

FIGURA 17. Localização do Rio Itapicuru e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



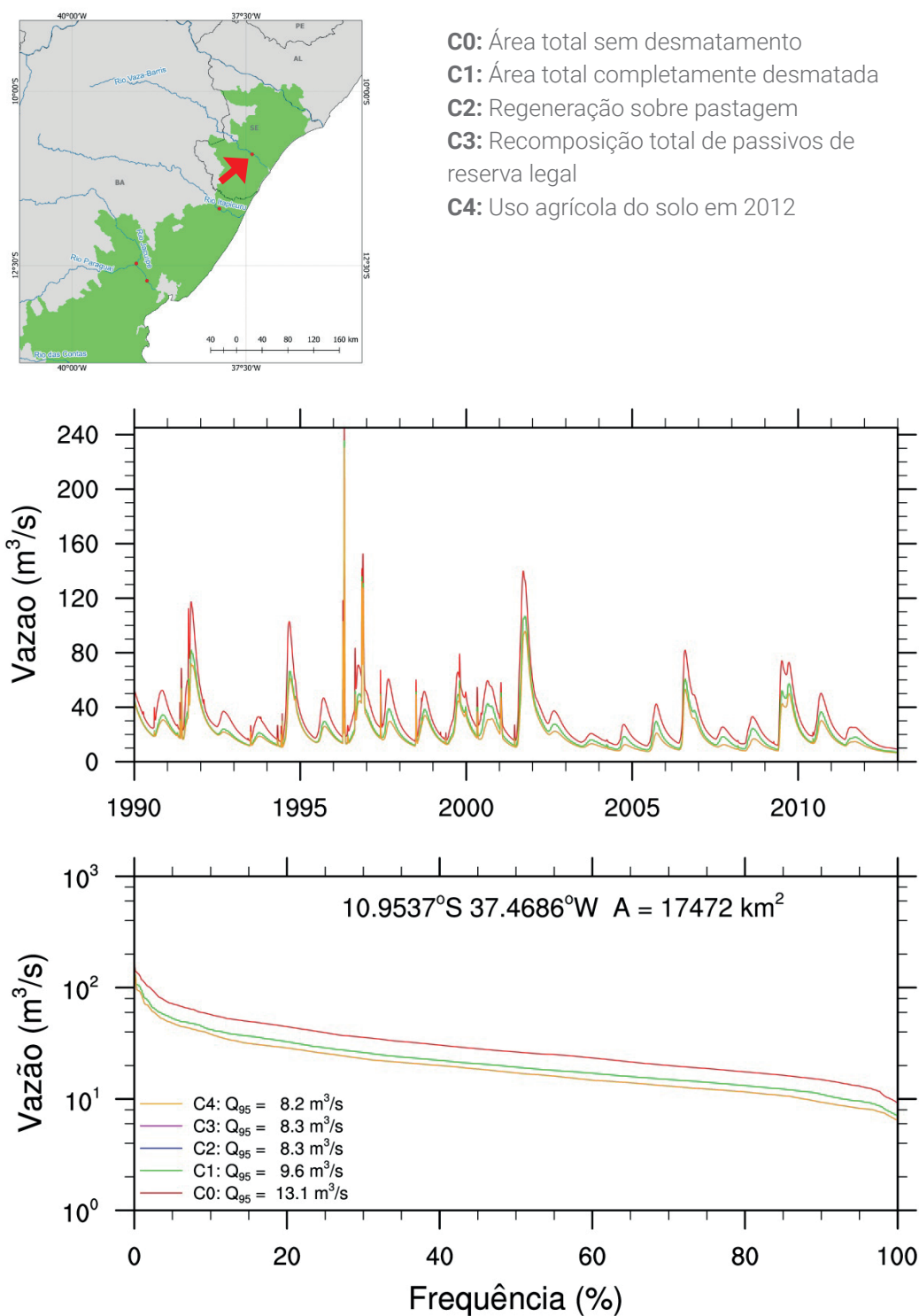
- C0:** Área total sem desmatamento
- C1:** Área total completamente desmatada
- C2:** Regeneração sobre pastagem
- C3:** Recomposição total de passivos de reserva legal
- C4:** Uso agrícola do solo em 2012



(O) RIO VAZA-BARRIS

Para o Rio Vaza-Barris, também por ser um rio pequeno, as hidrógrafas e curvas de permanência apresentam bastante diferença entre os cenários de uso do solo. Destaca-se aqui o fato do Cenário C0 ser o cenário com maior Q_{95} .

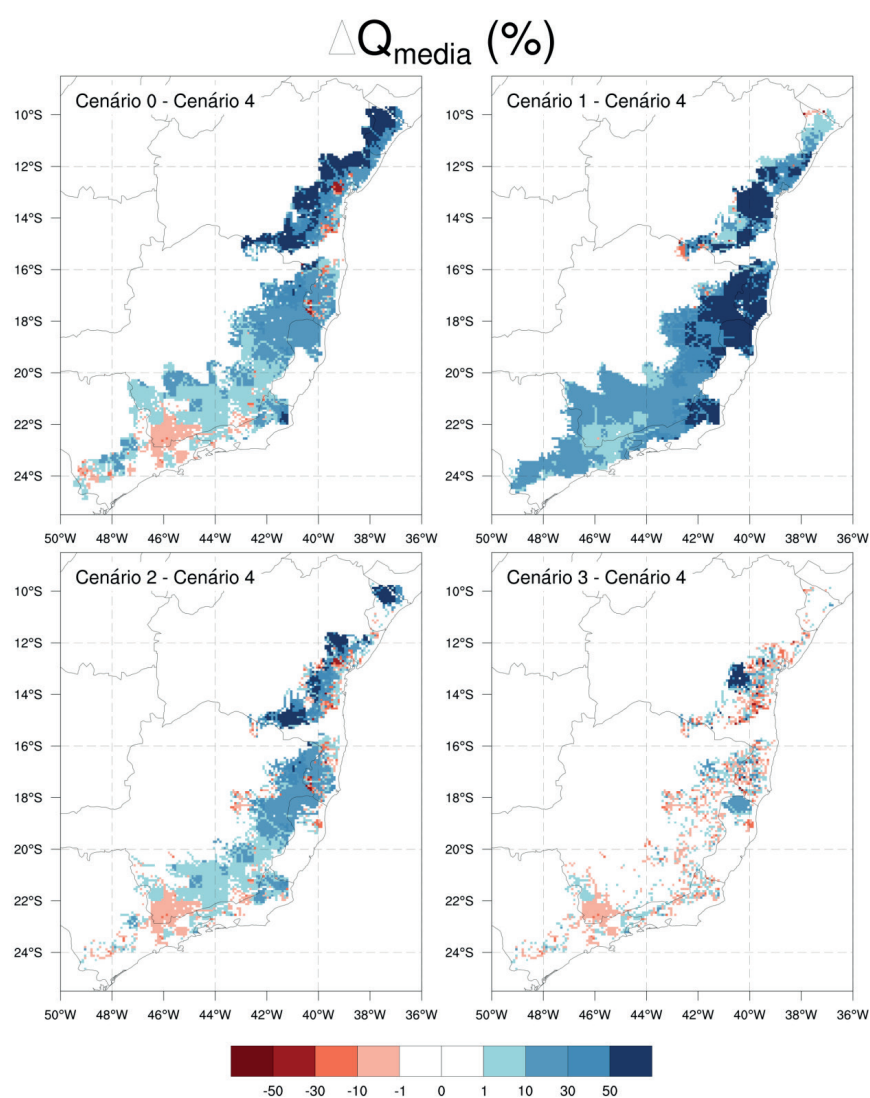
FIGURA 18. Localização do Rio Vaza-Barris e ponto de estudo, resumo dos cenários, hidrógrafa anual simulada para o período 1990-2012, e curva de permanência (note a escala logarítmica). Os valores de Q_{95} de cada cenário estão destacados dentro da curva de permanência.



3.2 RESULTADOS SINTÉTICOS

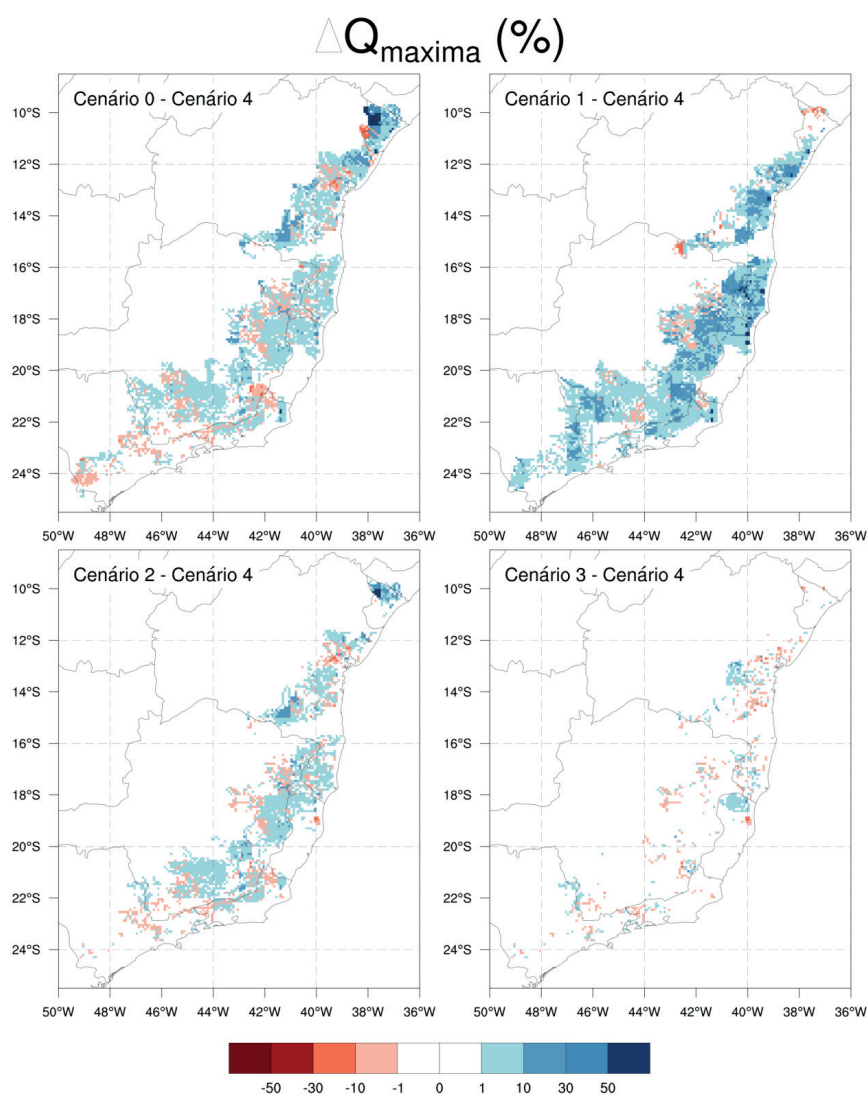
Os resultados sintéticos para a vazão média de longo prazo estão apresentados na **Figura 19**. De maneira geral, o efeito da recomposição total de passivos de reserva legal (Cenário 3) causa muita pouca diferença em relação ao cenário atual (Cenário 4). Tipicamente, o efeito da mudança de uso do solo, tanto nos cenários de desmatamento total, regeneração total e regeneração sobre áreas de pastagem (Cenários 1, 0 e 2, respectivamente) é de aumento na vazão média de longo prazo, exceto para a região do Sul de Minas em fronteira com o Estado de São Paulo, onde nos cenários de regeneração variada (Cenários 0, 2 e 3), há sempre uma redução (entre 1% e 10%) na vazão média de longo prazo.

FIGURA 19. Mudança relativa, em porcentagem, entre $Q_{média}$ dos Cenários 0 a 3 e do Cenário 4. Cores azuis indicam aumento na $Q_{média}$, enquanto cores vermelhas indicam redução na $Q_{média}$.



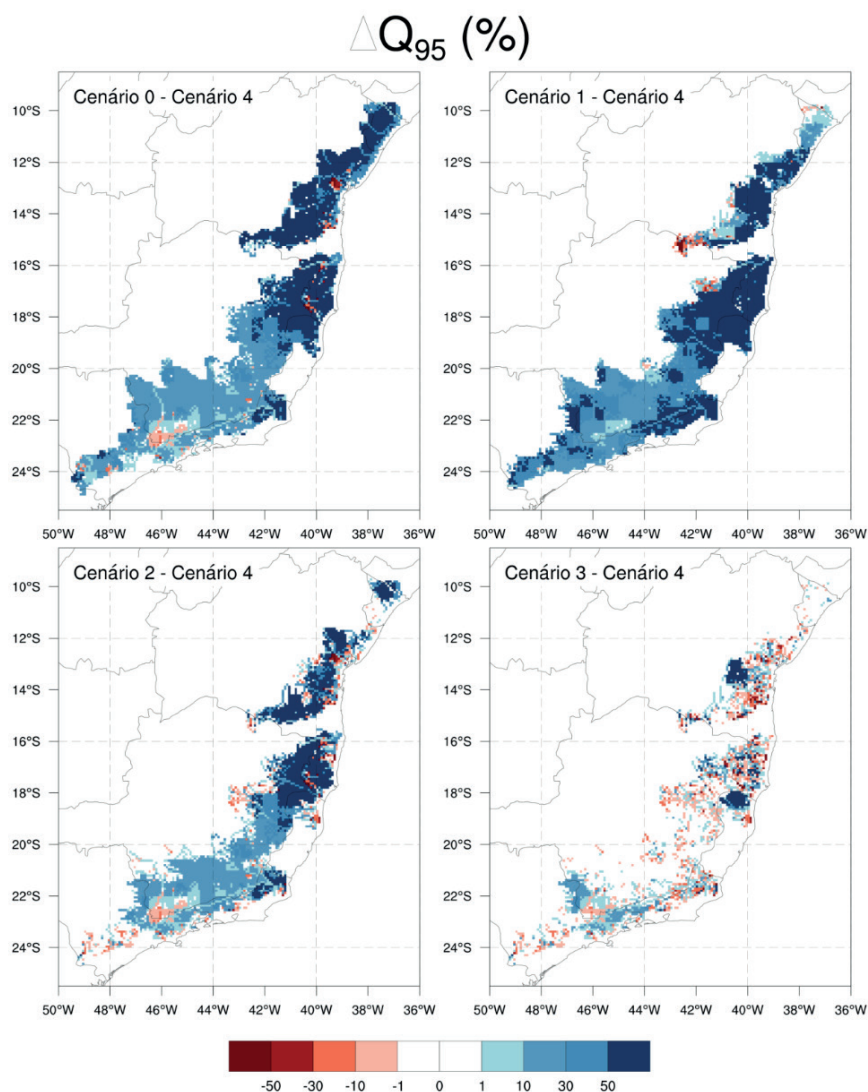
Os resultados sintéticos para a vazão máxima estão apresentados na **Figura 20**. De maneira geral, há pequenas variações na vazão máxima, tanto para mais quanto para menos, e normalmente inferiores a 10%. Como as vazões máximas tipicamente são 10 vezes maiores que as vazões médias de longo prazo, essa pequena variação não é considerada importante. De qualquer maneira, uma pequena região do oeste de Sergipe apresenta aumentos na vazão máxima superiores a 50% nos Cenários 0 e 2, que são os cenários de regeneração total e regeneração sobre pastagem. Essa região tem pequenos riachos que são afluentes do São Francisco, desembocando a montante de Canindé do São Francisco.

FIGURA 20. Mudança relativa, em percentagem, entre Q_{\max} dos Cenários 0 a 3 e do Cenário 4. Cores azuis indicam aumento na Q_{\max} , enquanto cores vermelhas indicam redução na Q_{\max} .



A análise da Q_{95} (**Figura 21**), vazão superada em 95% do tempo e principal parâmetro usado na outorga de água, é similar à vazão média de longo prazo. O efeito da recomposição total de passivos de reserva legal (Cenário 3) causa muita pouca diferença em relação ao Cenário atual (Cenário 4). As mudanças nos demais cenários parecem estar relacionadas ao clima. Para latitudes abaixo de 18°S , onde clima é mais chuvoso, os aumentos da Q_{95} são menores que 30%, refletindo provavelmente um maior efeito de recarga do aquífero superficial durante a estação chuvosa, sofrendo pouco efeito da mudança da vegetação. Entretanto, para o clima mais seco ao norte de 18°S , de maneira geral a mudança de uso no solo modifica substancialmente a Q_{95} , principalmente nas áreas restauradas nos Cenários 0 e 2, onde os aumentos na Q_{95} são maiores. Isso indica que a vegetação de Mata Atlântica nessa região de clima mais seco, é um importante contribuinte para aumentar a infiltração profunda da água, recarregar o aquífero superficial, e melhorar a disponibilidade de recursos hídricos no rio no período mais seco do ano.

FIGURA 21. Mudança relativa, em porcentagem, entre Q_{95} dos Cenários 0 a 3 e do Cenário 4. Cores azuis indicam aumento na Q_{95} , enquanto cores vermelhas indicam redução na Q_{95} .



4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apresentam grande variabilidade, e nem sempre se aproximam dos experimentos de bacias pareadas, onde normalmente só se avalia a vazão média de longo prazo. Isso provavelmente é devido a dois fatores. Em primeiro lugar, às diferentes mudanças de uso no solo que ocorrem numa mesma bacia, onde dependendo do cenário, parte da bacia pode estar sendo restaurada enquanto a outra parte pode estar sendo restaurada. Em segundo lugar, o tamanho da bacia também é importante. A mudança do uso do solo promove uma mudança da partição da água da chuva em evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem profunda, sendo que as duas últimas componentes atingem o rio e se transformam na vazão no canal do rio. Em bacias grandes, há uma certa compensação dos tempos que as águas demoram para atingir um determinado ponto, pois o tempo de viagem no canal pode ser muito longo (> 1 mês, para as maiores bacias). Em bacias pequenas, por outro lado, o tempo de viagem no canal do rio é reduzido (alguns dias), e o sinal da hidrógrafa anual e da curva de permanência é mais parecido com o sinal de pequenas bacias pareadas.

A conclusão geral é que o cenário completamente desmatado (Cenário 1) apresenta uma maior vazão média de longo prazo para a maioria das bacias, embora não haja mudança significativa na vazão máxima no período.

Já para a vazão Q_{95} , quantidade associada à outorga de água, os resultados são dependentes da latitude. Para latitudes ao sul de 18°S (tipicamente Região Sudeste), a restauração florestal implica em pequenos aumentos na Q_{95} , sempre inferiores a 50%. Por outro lado, para latitudes ao norte de 18°S (Região Nordeste), a regeneração da vegetação leva a importantes aumentos da Q_{95} , normalmente superiores a 50%, sendo que os maiores incrementos são para os menores rios. Num desses exemplos, no caso do Rio Vaza-Barris, que cruza Bahia e Sergipe, a vazão Q_{95} no Cenário 0 (sem desmatamento) é 60% superior à Q_{95} no Cenário 4 (atual).

Por fim, em bacias de mesoescala ($> 10.000 \text{ km}^2$), o sinal resultante da mudança de uso do solo depende não apenas desta, mas da interação do uso do solo com o clima (distribuição e intensidade da chuva), com o tipo de solo e a topografia local. Assim, generalizações devem ser feitas com cuidado, e os casos devem ser analisados especificamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andréassian, V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, v. 291, p. 1-27, 2004.

Bosch, J. M.; Hewlett, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 55, p. 3-23, 1982.

Brown, A.E.; Zhang, L.; McMahon, T.A.; Western, A.W.; Vertessy, R.A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, v. 310, p. 28-61, 2005.

Bruijnzeel, L.A. Hydrology of Moist Forest and the Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. UNESCO, Paris e Amsterdam, 224 pp., 1990.

Dias, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, p. 1-45, 2016.

Sahin, V.; Hall, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, v. 178, p. 293-309, 1996.

SOBRE O INPUT

O projeto INPUT - Iniciativa para o Uso da Terra, desenvolvido pela Agroicone em parceria com o Climate Policy Initiative (CPI), tem como objetivo promover a implementação do novo Código Florestal em larga escala e incentivar políticas públicas inteligentes. O trabalho de análises rigorosas das duas organizações, que contam com um grupo multidisciplinar de pesquisadores e consultores, seguirá até 2017 com a proposta de engajar o setor privado e os governos no processo de regularização perante o Código e de subsidiar políticas públicas de uso do solo no Brasil.

No INPUT, a Agroicone é responsável por gerar informações sobre as alternativas para restauração de vegetação nativa, bem como da compensação de áreas de reserva legal, e engajar o setor privado nos desafios da regularização e criar soluções setoriais que permitam a adequação em larga escala.

Saiba mais em: www.inputbrasil.org