

PROJETO DE EXTENSÃO
FAI - UFSCar 15072
Secretaria de Meio Ambiente de Franca
Contrato nº 380/2022 (Processo nº 12.183/2022)

**PROGRAMA DE GESTÃO INTEGRADA
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CANOAS
NO MUNICÍPIO DE FRANCA (SP)**

**RELATÓRIO 3
ANEXO 3.1.4.1**

**Avaliação da Mudança no Uso e Cobertura do Solo com Modelo SMAP na Bacia Hidrográfica
do Rio Canoas**

Setembro – 2023

Avaliação da Mudança no Uso e Cobertura do Solo com Modelo SMAP na Bacia Hidrográfica do Rio Canoas

1 - INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são as principais unidades de gestão dos recursos hídricos, visto que os recursos naturais, juntamente com atividades antrópicas e econômicas, interagem em conjunto, sendo influenciados pelas condições do sistema hídrico local. A crescente demanda das populações humanas por recursos naturais impactam diretamente na estrutura e função das bacias hidrográficas, reduzindo assim sua capacidade de sustentação (Randhir; Tsvetkova, 2011).

Como consequência da intensificação do crescimento populacional e da urbanização, acentua-se a demanda por recursos naturais, principalmente em virtude de mudanças no uso e ocupação do solo da região que pode englobar diversas formas de uso e cobertura, dentre elas, destaca-se o uso antrópico como fator de aceleração do processo de degradação ambiental, caso a atividade antrópica seja executada de forma desordenada (IPECE, 2018). Dessa forma, a modelagem e o monitoramento do uso e cobertura do solo (UCS) são essenciais para avaliar as principais tendências locais associadas aos usos da terra, permitindo também a definição da susceptibilidade da região a impactos ambientais negativos, como desertificação, escassez hídrica, poluição de corpos d'água e empobrecimento do solo (Tomasella et al., 2018; Vieira et al., 2021).

Nesse sentido, a simulação hidrológica pode ser utilizada para diversas aplicações como, por exemplo, a estimativa de disponibilidade hídrica, previsões de vazões de curto e médio prazo e na obtenção da resposta hidrológica em função das mudanças no uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica (Pereira, 2013). Identificar esta resposta é de extrema importância, uma vez que o crescimento acelerado e desordenado de classes de usos antrópicos acarreta sérios problemas ambientais, a citar a erosão, o desmatamento, a poluição das águas e do ar (Grostein, 2001). Além disso, a contínua expansão destas áreas acaba por provocar alterações em todo o sistema hídrico da região da bacia, o qual também é condicionado por elementos como o clima, o relevo, o tipo de solo e seu uso e ocupação, entre outras características locais (Serreti; Martins; Alves, 2015). Estas alterações ocasionadas no ciclo hidrológico, por sua vez, causam várias consequências para os ecossistemas e sociedade. Diferentes partes do globo vêm sofrendo a ação de eventos extremos tais como secas, inundações, ilhas de calor, tempestades, furacões, entre outros (Marengo et al., 2009; Serreti; Martins; Alves, 2015).

A retirada da cobertura vegetal nativa, agravada pela expansão das fronteiras agrícolas e pelo sobrepastoreio proveniente da pecuária extensiva, por exemplo, contribuem para impermeabilização dos solos, que de acordo com Marengo et al. (2009) é um dos fatores que influencia diretamente no ciclo hidrológico, gerando menos infiltração, aumento do escoamento superficial e a ocorrência dos eventos extremos supracitados. Nesse contexto, o crescimento dos estudos de processos hidrológicos em bacias hidrográficas é de grande importância para os órgãos do governo e sociedade, pois podem constituir informações que servem de suporte ao gerenciamento de uso do solo e sua conexão com os recursos hídricos e eventos extremos hidrológicos.

2 - MODELO SMAP

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, cujo modelo conceitual foi publicado originalmente em 1982 (LOPES J.E.G., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L., SMAP – A Simplified Hydrological Model). Seu nome é uma sigla do inglês “Soil Moisture Accounting Procedure” (Procedimento de contabilidade de umidade do solo) e foi elaborado para representar matematicamente a realidade.

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, cujo modelo conceitual foi publicado originalmente em 1982 (LOPES J.E.G., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L., SMAP – A Simplified Hydrological Model). Seu nome é uma sigla do inglês “Soil Moisture Accounting Procedure” (Procedimento de contabilidade de umidade do solo) e foi elaborado para representar matematicamente a realidade.

Seu funcionamento baseia-se na divisão da vazão em escoamento superficial e em escoamento subterrâneo. É utilizada a equação de runoff (curve number), do Soil Conservation Service (SCS) do US Department of Agriculture, onde cada parcela (referente a cada tipo de escoamento) é armazenada em reservatórios fictícios que são responsáveis por descrever a forma e a duração dos escoamentos. O SMAP possui versões mensal, diária e horária.

Para a etapa de modelagem foi utilizado o modelo hidrológico SMAP, versão mensal, desenvolvido por Lopes et al (1981). É um modelo do tipo concentrado por sub-bacias, que simula séries contínuas, com fins de transformação chuva-vazão, trabalhando basicamente com dados de precipitação e evapotranspiração potencial, separando o escoamento superficial a partir dos conceitos do modelo Soil Conservation Service (SCS). Por ser um modelo simples, que exige poucos dados de entrada e largamente utilizado produzindo resultados satisfatórios, o mesmo mostrou-se mais indicado para aplicação na região de interesse.

Para a versão mensal do modelo, os dados de entrada são os totais mensais de chuva, total mensal médio do período de evapotranspiração e a área de drenagem da bacia. Esta versão é constituída por dois reservatórios, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês a partir do balanço do ciclo hidrológico (Figura 1).

Para o reservatório do solo (zona aerada):

$$Rsolo(i+1) = Rsolo(i) + P - Es - Er - Rec \quad (1)$$

Para o reservatório do subterrâneo (zona saturada):

$$Rsub(i+1) = Rsub(i) + Rec - Eb \quad (2)$$

Sendo $Rsolo$, é o reservatório do solo (zona aerada); $Rsub$ é o reservatório subterrâneo (zona saturada); P é a precipitação; Es é o escoamento superficial; Er é a evapotranspiração real; Rec é a recarga subterrânea e Eb é o escoamento básico.

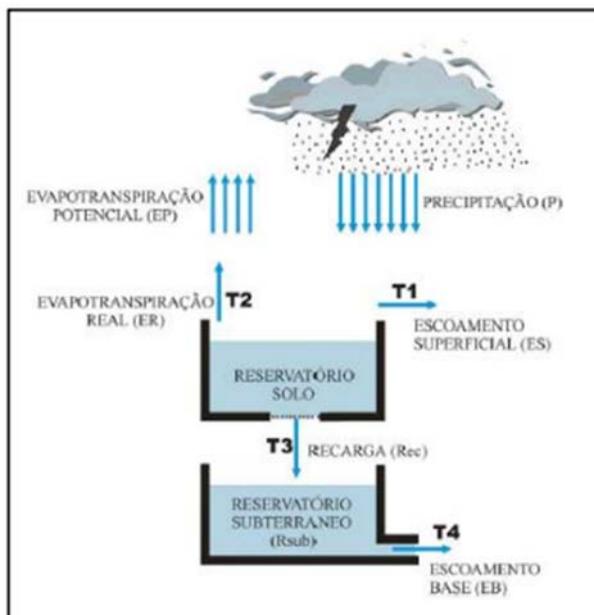


Figura 1 - Modelo SMAP na versão mensal.

O funcionamento do modelo na escala mensal consiste no tempo inicial na atribuição de valores aos parâmetros de entrada do modelo: umidade inicial do solo (SOLIN, %), vazão básica inicial (SUBIN, em m³/s), capacidade de saturação do solo (SAT, em mm), parâmetro de escoamento superficial (E2, adimensional), coeficiente de recarga (CREC, adimensional) e constante de recessão do escoamento de base (K, mês⁻¹), sendo $K = Kk = 5^{1/Kkt}$ onde Kkt é expresso em meses em que a vazão básica é a metade do seu valor.

Os valores dos parâmetros de entrada consideram a existência de água armazenada nos reservatórios, no caso, o solo, a superfície ou o subterrâneo, no início do período simulado. Por tratar-se de um modelo contínuo, em cada intervalo de tempo é incorporado um novo dado médio de chuva da bacia, fazendo com que a água contida em cada reservatório seja atualizada a partir de 4 funções matemáticas de transferência:

$$Es = f1.P = Tu.E2.P, \text{ sendo } Tu = Rsolo/SAT \quad (3)$$

$$Er = f2.Ep = Tu. Ep \quad (4)$$

$$Rec = f3.Rsolo = SAT. Tu. Rsolo \quad (5)$$

$$Eb = f4.Rsub = (1 - K). Rsub \quad (\text{umidade do reservatório de base}) \quad (6)$$

Os parâmetros CREC e Tu são multiplicados por 100.

A capacidade de saturação do solo (SAT, em mm), pode ser estimada ou relacionada de acordo com a metodologia exposta em USDA (1986). Esse órgão desenvolveu, a partir de pesquisa em muitas pequenas bacias experimentais, uma relação empírica entre o curve number e a retenção potencial máxima (S), uma medida da habilidade da bacia abstrair e reter precipitação. Essa relação está mostrada na equação abaixo.

$$S = \frac{25400 - 254.CN}{CN} \quad (7)$$

Caso ocorra o transbordo do reservatório do solo, a água em excesso é transformada em escoamento superficial. Destaca-se também no modelo a atualização do teor de umidade que a cada intervalo de tempo inclui uma parcela de chuva do mês, permitindo a utilização do teor de umidade médio do mês em análise, melhorando os resultados da modelagem (LOPES et al, 1981). Por fim, o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = \frac{(Es + Eb).Ad}{2630} \quad (7)$$

Sendo Q (m^3/s), Es (m^3/s), Eb (m^3/s) e Ad corresponde a área de drenagem, em km^2 .

Para calibrar o modelo SMAP mensal, os parâmetros SAT, PES, K e CREC sofreram uma otimização através do método SCE-UA (XXXXXX,XXXX). As variáveis precipitação ($mm/mês$), vazão (m^3/s), evapotranspiração potencial ($mm/mês$) e área da bacia (km^2) foram inseridas como dados de entrada. A função objetivo utilizada para calibração foi o Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE) que tem se mostrado um importante critério estatístico e muito usado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos, voltados para os extremos e vazões baixas (Andrade et al., 2017).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - p_i}{y_i} \right| \quad (7)$$

Onde n é o número de valores de vazão da série temporal, y_i é o valor observado i de vazão, p_i é o valor calculado i de vazão. Um valor de MAPE baixo significa que as previsões estão próximas dos valores observados (seu modelo está acertando bem), enquanto um valor alto indica que as previsões estão longe dos valores observados (o modelo precisa ser melhorado). Na prática, é importante estabelecer um valor aceitável para o erro. Normalmente um erro aceitável na hidrologia é um MAPE menor que 40%.

O modelo SMAP vem sendo aplicado satisfatoriamente em vários locais do Brasil, além de já ter sido utilizado em muitas pesquisas e trabalhos publicados. Entre eles estão Lopes e Porto (1991) e Azevedo et al. (1991) que apresentam técnicas para calibração do modelo, Alexandre et al. (2005) que apresenta uma metodologia para regionalização dos parâmetros do SMAP mensal e Souza F. e Porto (2003) que mostram o acoplamento de um modelo climático ao SMAP para previsão de vazões.

3 - MODELO SMAP E CENÁRIOS DE USO DO SOLO

A ligação entre o modelo SMAP e as mudanças do uso do solo se dá pela parametrização e associação dos diferentes cenários do parâmetro CN que refletem mudanças no uso do solo, pelo parâmetro SAT. Esse parâmetro é um dos parâmetros mais sensíveis do modelo SMAP e reflete por meio da capacidade de saturação do solo, a dinâmica de geração do escoamento superficial com os usos do solo que exercem influência nesse processo de geração.

O parâmetro SAT do modelo SMAP traduz a forma como é feito a separação do escoamento superficial e subterrâneo baseados no mecanismo de geração de escoamento superficial proposto por Horton (1933). Nesse mecanismo, o escoamento superficial ocorre como excedente da infiltração ao considerar que: A infiltração divide a precipitação em duas partes, que posteriormente prosseguem por diferentes caminhos através do ciclo hidrológico. Uma parte vai alimentar os rios como escoamento superficial durante os eventos de precipitação, a outra vai inicialmente para o solo e daí, vai alimentar os rios como escoamento subterrâneo ou retorna para a atmosfera pelos processos de evaporação (HORTON, 1933, p. 445). Desta forma, a ocorrência de escoamento superficial na bacia hidrográfica ficaria restrita apenas a eventos de grande magnitude onde a capacidade de infiltração do solo seria excedida pela intensidade da chuva. Assim, a parcela da água que infiltra no solo iria alimentar o aquífero raso e deixaria a bacia na forma de escoamento de base. Ainda segundo a teoria de infiltração-escoamento proposta por Horton, o conceito de capacidade de infiltração do solo seria constante no espaço, podendo-se considerar que o escoamento superficial provinha de todas as partes da bacia. Atualmente, a teoria de escoamento superficial hortoniano refere-se ao processo de escoamento gerado em perfis de solos alterados por ações antrópicas (p.ex. bacias agrícolas e solo urbano pavimentado) como é o caso aqui em análise.

A associação do parâmetro CN com o parâmetro SAT pode ser guiado pela relação entre o CN e a capacidade de retenção máxima (S) definida pela equação 7. Essa relação sugere que na medida que o CN aumenta, por exemplo devido ao aumento da taxa de urbanização que aumenta impermeabilização do solo, a capacidade de retenção máxima diminui, ou seja, ocorre um aumento mais brusco do escoamento superficial no momento da precipitação, o que leva a aumento das vazões máximas. Por outro lado, ocorre uma menor infiltração da água no solo, o que leva a uma menor recarga dos reservatórios subterrâneos, levando a uma diminuição nas vazões mínimas que são geradas majoritariamente pelo escoamento subterrâneo oriundos desses reservatórios subterrâneos.

De acordo com o contexto acima, deve-se mapear qual a proporção de aumento ou diminuição do parâmetro SAT na medida que ocorre mudanças no parâmetro CN. Essa proporção deve ser condizente com os limites físicos do parâmetro SAT e sua relação com outros parâmetros. Existe dentro da própria formulação do modelo limites do parâmetros SAT que são utilizados no processo de calibração. Além disso, deve-se considerar mudanças graduais nos parâmetros SAT que seja fisicamente viável na medida que ocorre mudanças no CN. Dado a inerente dificuldade em associar parâmetros de modelos hidrológicos com parâmetros físicos, deve-se também considerar as incertezas dessa relação, de modo a entregar valores mais próximos da realidade.

Para associar o parâmetro SAT do SMAP com o CN, optou-se por definir limites máximos do aumento e diminuição desse parâmetro considerando os limites do CN. Esses limites foram definidos considerando tanto os limites do SAT disponíveis na literatura quanto os limites de transição ou mudança que são possíveis fisicamente pelo modelo. Os limites máximos do SAT considerados foram os seguintes: $\pm 60\%$, $\pm 65\%$, $\pm 70\%$, $\pm 75\%$, $\pm 80\%$ e $\pm 90\%$. Essa variação nos limites possibilitou considerar as incertezas desse processo de associação.

Em termos operacionais a aplicação dos limites do SAT e seu mapeamento com o CN deu-se da seguinte maneira:

1. Obtenção do parâmetro SAT ótimo calibrado com as séries de vazões na captação dos rios Canoas e Pouso Alegre;
2. Execução do modelo SMAP para todos os todos os valores do parâmetro SAT mantendo fixo os outros parâmetros ótimos, respeitando seus limites máximos. Para cada limite máximo predefinido, executa-se 100 vezes o SMAP, onde cada execução representa um valor do SAT incrementado por LimMax/100. Por exemplo, considerando o limite máximo de mudança do SAT de $\pm 60\%$, cada mudança de unidade do CN representa 0,6% de mudança no parâmetro SAT, já para o SAT com limite máximo de $\pm 90\%$ cada mudança de unidade do CN representa 0,9% de mudança no parâmetro SAT;
3. Com base nas séries de vazões resultados dos diferentes parâmetros SAT e seu correspondente CN, obtém-se a relação de determinada variável hidrológica (ex. Qmlt ou Q95) entre dois parâmetros SAT ou CN, essa relação representa a variação esperada dessa variável com a mudança do CN. Como esse processo foi mapeado para todos os CNs, ao final tem-se uma tabela ou curva com todas as combinações possíveis de mudança de CN (seja de aumento ou diminuição) e a respectiva mudança na variável hidrológica analisada.
4. Como foram testados 6 limites máximos de mudança no parâmetro SAT, o valor final da relação de determinada variável hidrológica com a mudança do CN foi dado pela média simples dos valores obtidos para cada um dos limites considerados.

A principal vantagem em obter esse mapeamento para todos os possíveis aumentos ou diminuições do valor de CN de determinada bacia, é que possibilita ao gestor de recursos hídricos identificar eventuais impactos, seja positivo ou negativo, de determinada política pública voltada para o uso do solo. Ou seja, é possível avaliar o impacto nas vazões para qualquer mudança de uso do solo que seja traduzida para o parâmetro CN. Cabe ressaltar que as hipóteses de geração de escoamento têm inúmeras incertezas que devem ser observadas no processo de avaliação.

4 - RESULTADOS

4.1 - Resultados da Calibração do SMAP

As Figuras 2 e 3 a seguir ilustram os resultados da calibração usando o algoritmo SCE-UA considerando o MAPE como função objetivo para as estações fluviométricas localizadas na captação da Canoas e Pouso Alegre, respectivamente. Os resultados do ajuste foram bastante satisfatórios como pode ser observado nos gráficos das figuras abaixo. O MAPE obtido para ambas as estações foram menores que 35%.

Observa-se em ambas as estações uma reprodução satisfatória dos períodos de vazões altas e principalmente de vazões baixas, conseguindo também reproduzir as variabilidades interanuais. Com base nos parâmetros ótimos obtidos dessa calibração, partiu-se para etapa seguinte que foi mapeamento das mudanças das vazões devido a mudanças do uso do solo por meio do CN e do parâmetro SAT.

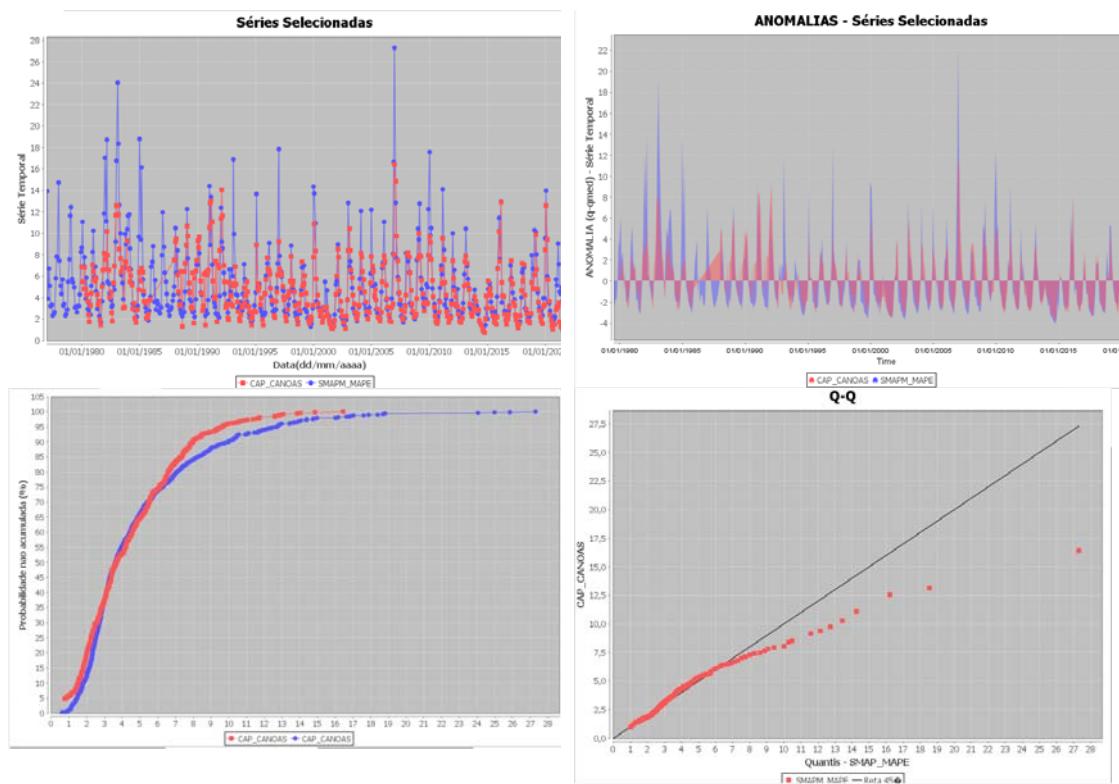


Figura 2 – Calibração com o SCE-UA do SMAP na Captação Canoas.

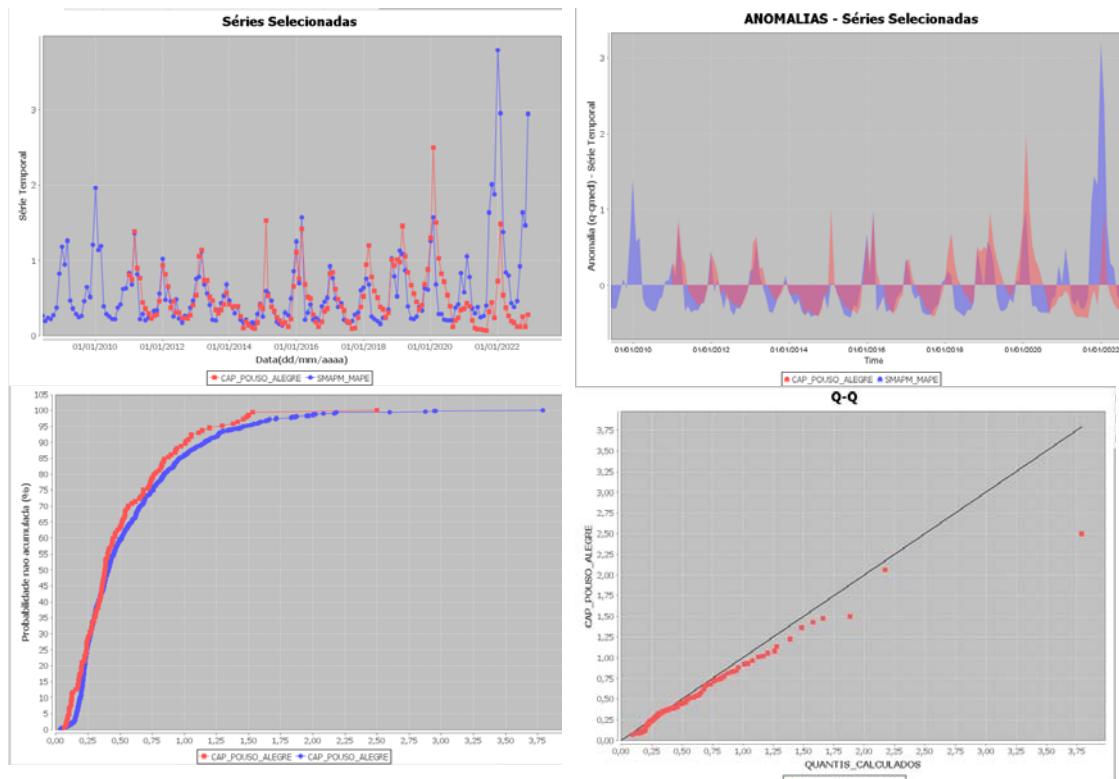


Figura 3 – Calibração com o SCE-UA do SMAP na Captação Pouso Alegre.

4.2 - Resultado da Mudança no Uso do Solo

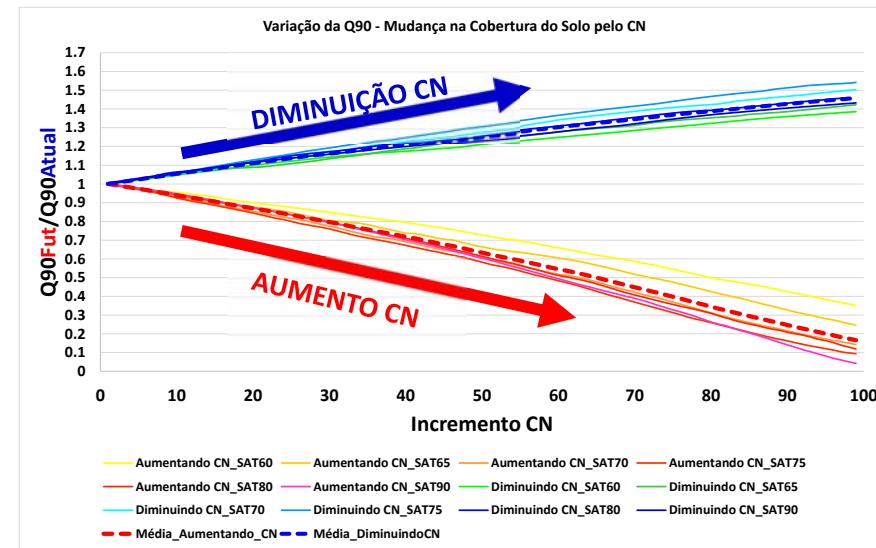
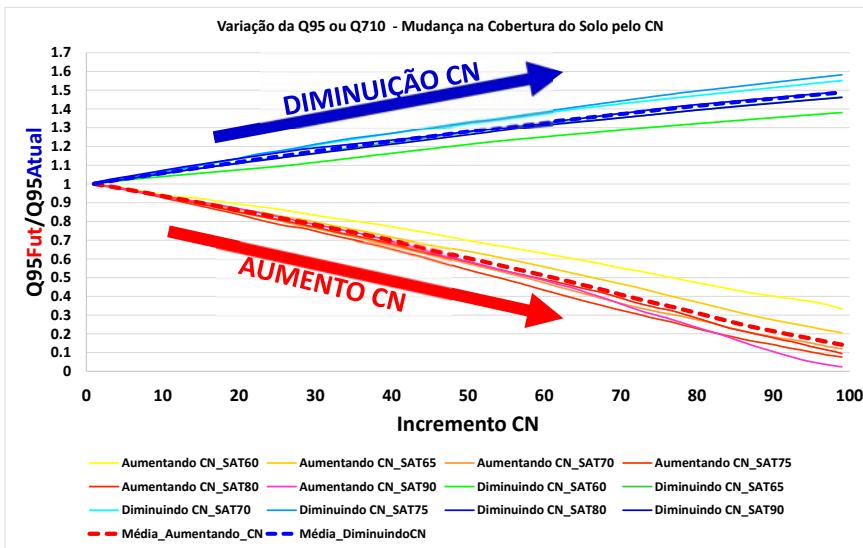
Após a aplicação dos procedimentos metodológicos do item anterior, obteve-se para as vazões $Q_{m\text{lt}}$, Q_{95} , Q_{90} e Q_{\max} as curvas e tabelas que associam mudanças no CN e a relação entre as vazões de determinado CN futuro com o CN atual (Ex. para a $Q_{m\text{lt}}$: $Q_{m\text{ltfut}}/Q_{m\text{ltAtual}}$).

As Figuras 4 e 5 apresentam cada um dos quatro gráficos, uma para cada vazão analisada, das curvas da relação mudança de CN (aumento ou diminuição) versus mudança nas vazões (representado pela relação da “nova” vazão (aqui chamada de futura) e da vazão atual) para as captações nos Rios Canoas e Pouso Alegre, respectivamente. Observa-se nesses gráficos a consideração dos diferentes limites máximos de variação do parâmetro SAT, incluindo o valor médio (representado pela linha tracejada) que representa os valores recomendados para essa análise. A exceção da vazão máxima, as curvas decrescentes (cores quentes) representam aumentos do CN e as curvas crescente (cores frias) sua diminuição. No caso das vazões máximas a relação é diretamente proporcional, quanto maior o aumento do CN maior é o aumento da vazão.

A Tabela 1 representa a forma tabular das curvas apresentadas nas Figuras 4 e 5 para a Q_{95} (que serve também para a Q_{710}). Essa Tabela está discretizada em 5 unidades de incremento (aumento ou diminuição) do CN.

Conforme esperado, aumentos no CN diminuem o parâmetro SAT que implica numa diminuição nas vazões mínimas oriundas do escoamento de base. Por outro lado, esse aumento no CN leva a um aumento bastante acentuado nas vazões máximas, o que leva a aumento de inundação e problemas de erosão do solo. Já na $Q_{m\text{lt}}$ ocorre um mecanismo de compensação, o aumento nas máximas “compensa” a diminuição das mínimas, o que faz com que a mudança não seja tão acentuada quanto aos extremos.

Esses gráficos e tabelas são curva operacionais que possibilitam avaliar a mudança nas vazões dado uma determinada mudança no CN. Por exemplo, observa-se que a Q_{95} da Captação Canoas é de 1269 l/s, caso haja um aumento de 30 unidades de CN (por exemplo, o CN médio na bacia antes era 40 e com a urbanização mudou para 70) a Q_{95} nova ou futura equivalerá a 78% da Q_{95} atual, ou seja, 993 l/s. Conforme esperado, um aumento no CN implica numa diminuição da capacidade retenção da água no solo que diminui consideravelmente a vazão de base alimentada pela água subterrânea retida no solo. Nesse caso, uma diminuição de 30 unidades de CN, resultou numa “perda” de quase 300 l/s. Por outro lado, nesse mesmo exemplo, caso haja uma diminuição do CN de 30 unidades (por exemplo, o CN médio na bacia antes era 70 e com projetos de reflorestamento mudou para 30) a Q_{95} nova ou futura aumentará em 17% da Q_{95} atual, ou seja, 1490 l/s. No anexo digital estão disponibilizadas as tabelas completas para consulta.



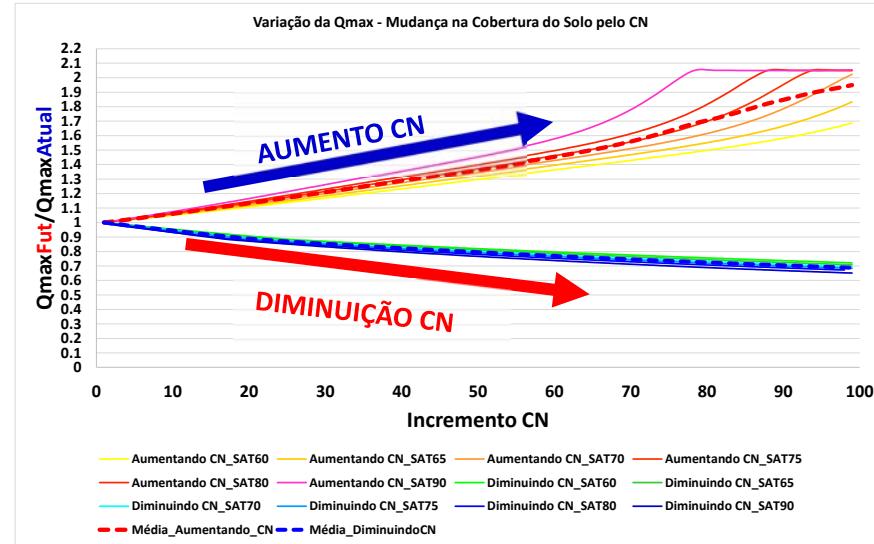
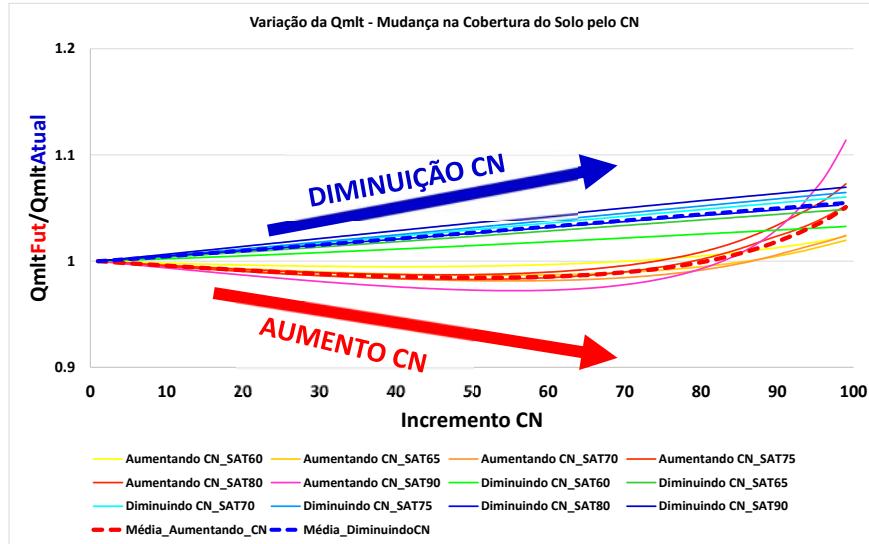
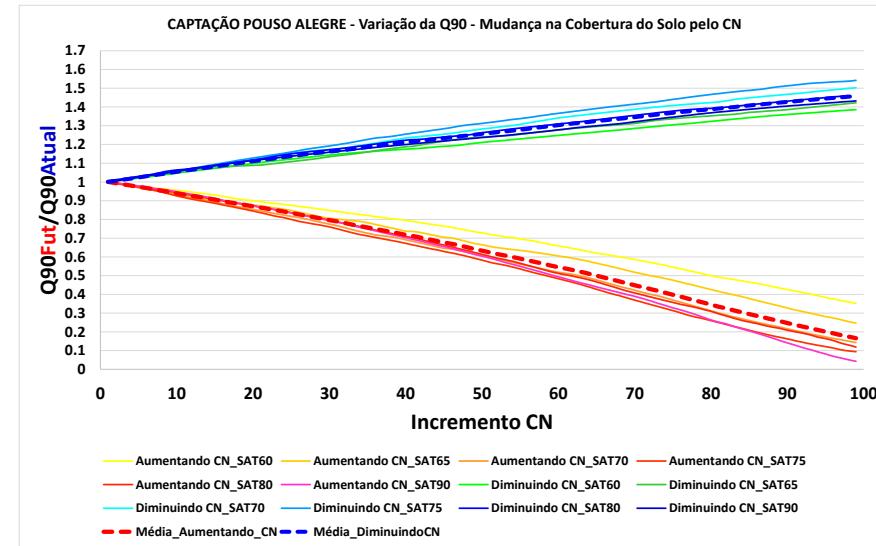
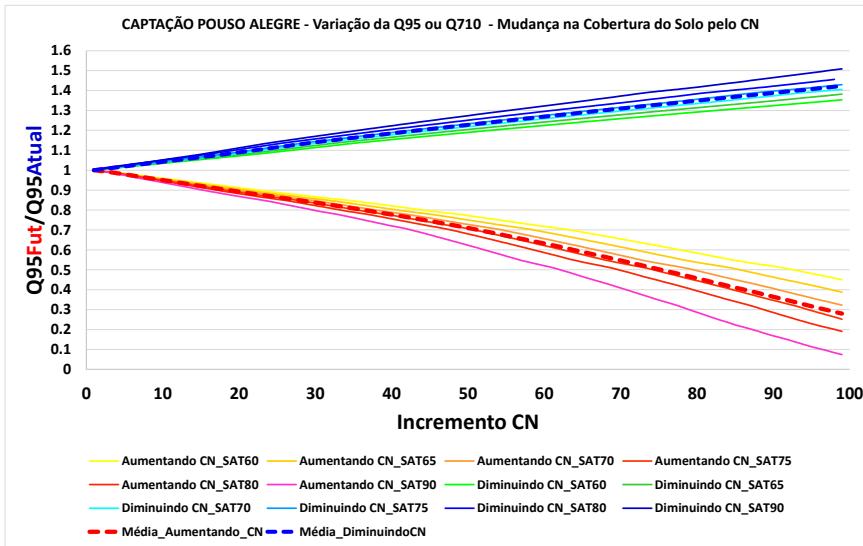


Figura 4 - Curvas da relação mudança de CN (aumento ou diminuição) versus mudança nas vazões (representado pela relação da “nova” vazão (aqui chamada de futura) e da vazão atual) para a captação no Rio Canoas



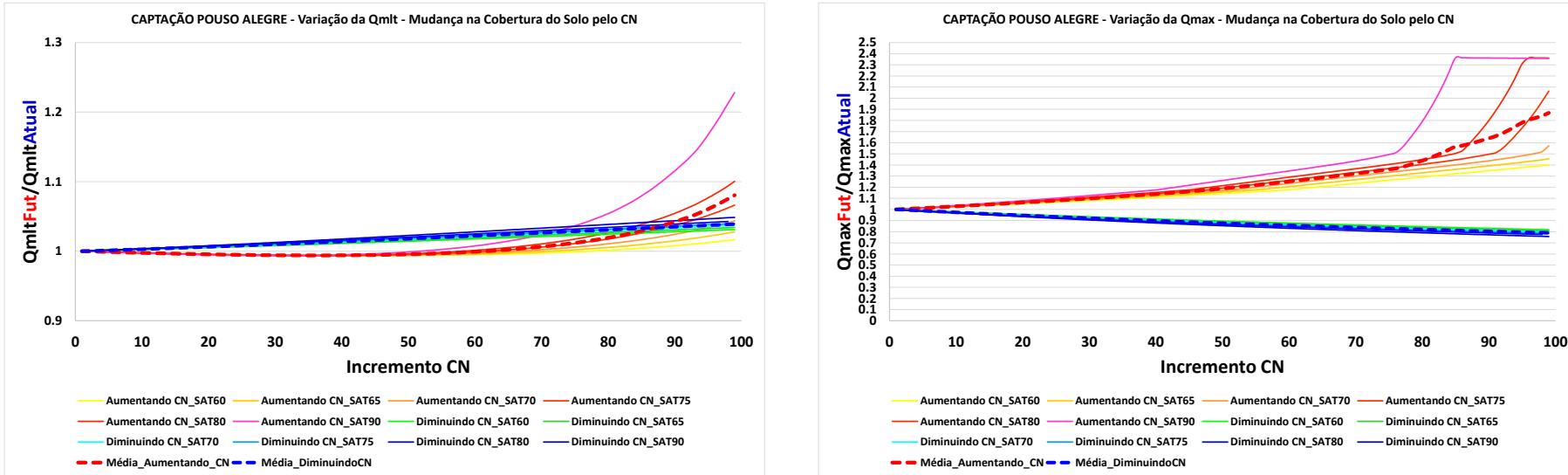


Figura 5 - Curvas da relação mudança de CN (aumento ou diminuição) versus mudança nas vazões (representado pela relação da “nova” vazão (aqui chamada de futura) e da vazão atual) para a captação no Rio Pouso Alegre

Tabela 1 - Resultado Tabular para a mudança na Q95 devido a mudança no CN (aumentado ou diminuindo) no Canoas e em Pouso Alegre

Incremento CN	Q95fut/Q95atual (Q710) de CANOAS (1269 l/s)				Q95fut/Q95atual (Q710) de POUSO ALEGRE (552 l/s)			
	Aumentando CN	Q95 (l/s)	Diminuindo CN	Q95 (l/s)	Aumentando CN	Q95 (l/s)	Diminuindo CN	Q95 (l/s)
5	0.97	1235	1.03	1303	0.98	541	1.02	562
10	0.94	1187	1.06	1341	0.95	524	1.04	575
15	0.90	1141	1.09	1380	0.92	508	1.07	588
20	0.86	1091	1.12	1417	0.89	492	1.09	601
25	0.82	1043	1.15	1453	0.87	477	1.12	615
30	0.78	993	1.17	1490	0.84	462	1.14	629
35	0.74	941	1.20	1526	0.81	446	1.16	642
40	0.70	887	1.23	1558	0.78	429	1.18	654
45	0.65	827	1.25	1590	0.74	411	1.21	666
50	0.60	767	1.28	1624	0.71	392	1.23	678
55	0.56	708	1.30	1655	0.67	371	1.25	689
60	0.51	649	1.33	1686	0.63	349	1.27	700
65	0.46	586	1.35	1714	0.59	325	1.29	712
70	0.41	520	1.37	1742	0.55	302	1.31	723
75	0.36	457	1.39	1770	0.50	277	1.33	734
80	0.31	395	1.42	1797	0.46	252	1.35	744
85	0.26	329	1.44	1822	0.41	227	1.37	755
90	0.21	272	1.45	1846	0.36	201	1.39	766
95	0.17	221	1.47	1870	0.32	175	1.41	777

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, F.; AL-BADRANIH, L. (2000). Application of rainfall-runoff model to three catchments in Iraq. *Journal des Sciences Hydrologiques*. 45(1).
- ALEXANDRE, A.M.B., MARTINS, E.S., CLARKE, R.T., REIS, D.S JR (2005). Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, João Pessoa - PB, 2005.
- ANDRADE, C. W. L., MONTENEGRO, S. M. G. L., LIMA, J. R. S., MONTENEGRO, A. A. A. E SRINIVASAN, R. (2017). Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma SubBacia da região Nordeste, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(2), 440-453.
- ASCE (1993). Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drainage Eng.*, 119, 429-442.
- BUCHIANERI, V. C. Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande Ubatuba. 2004. 124 f. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004.
- CEARÁ (2016). Manual de Operação da Sala de Situação do Ceará. Fortaleza: COGERH. 112 p.
- CEARÁ (2018). Sub-Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe Características Gerais. In: Secretaria de Recursos Hídricos, Ceará.
- CEARÁ (2021). Perfil Municipal. In: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, IPECEDATA. Acesso em: 08 de maio de 2021, Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipecedata-web/module/perfil-municipal.xhtml>
- DE NIEL, J., VERMEIR, A., TRAN, Q. Q., MOUSTAKAS, S., & WILLEMS, P. (2020). Efficient approach for impact analysis of land cover changes on hydrological extremes by means of a lumped conceptual model. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 28(100666), 100666. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100666>
- DWARAKISH, G. S., & GANASRI, B. P. (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1), 1115691. <https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691>
- GROSTEIN, M. D. (2001). Metrópole e expansão urbana: a persistência de processos "insustentáveis". *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, 15(1), 13-19. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/spp/v15n1/8585.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2021.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, [S.I.], 1(2), 96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>.

HARGREAVES, G. H. (1994). Defining and Using Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, [S.I.], 120(6), 1132-1139. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1994)120:6(1132)).

HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 14, p.446-460, 1933.

HUISMAN, J. A., BREUER, L., BORMANN, H., BRONSTERT, A., CROKE, B. F. W., FREDE, H.-G., GRÄFF, T., HUBRECHTS, L., JAKEMAN, A. J., KITE, G., LANINI, J., LEAVESLEY, G., LETTENMAIER, D. P., LINDSTRÖM, G., SEIBERT, J., SIVAPALAN, M., VINEY, N. R., & WILLEMS, P. (2009). Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM) III: Scenario analysis. *Advances in Water Resources*, 32(2), 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.06.009>

JOLLIFFE, I. E STEPHENSON, D. (2003). Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. [S.I.]: John Wiley and Sons. 247 p.

LOPES, J. E. G., BRAGA JUNIOR, B. P. F. E CONEJO, J. G. L. (1981) Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado, In Anais III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Fortaleza, Ceará, 1981.

LOPES, J. E. G. (1999). Manual do Usuário do SMAP – v.99. 18 p.

MAPBIOMAS (2020). Projeto MapBiomass – Coleção 5.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/> (acessado em: 24/05/2021).

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. 76 p.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.M.A.; NOBRE, C.A.; RIBEIRO NETO, G.G.; MAGALHAES, A.R.; TORRES, R.R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L.M.; CUARTAS, L.A.; DEUSDARÁ, K.R.L.; ÁLVALA, R.C.S. (2020). Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Nat. Hazards*, 103, 2589–2611.

MOORE, D. S. (2007). The Basic Practice of Statistics. 4th ed. New York: Freeman. 728 p.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P.D. (1999). Representing Twentieth-Century space-time climate variability. Part 1: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, [S.I.], 12, 829-856. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C0829:RTCSTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C0829:RTCSTC%3E2.0.CO;2)

PEREIRA, D. R. (2013). Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. 2013. 142 f. Tese (Doutorado em Construções rurais e ambiência) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SERRETI, M. T.; MARTINS, R.C; ALVES, F. (2015). Influência da Impermeabilização no Ciclo Hidrológico da Cidade de Belo Horizonte/MG. *Revista Petra*, 1(2), 311-327.

SILVA, P. M. O., MELLO, C. R., SILVA, A. M.; COELHO, G. (2008). Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.*, 12, 258-265.

SIVELLE, V., JOURDE, H., BITTNER, D., RICHIERI, B., LABAT, D., HARTMANN, A., & CHIOGNA, G. (2022). Considering land cover and land use (LCLU) in lumped parameter modeling in forest dominated karst catchments. *Journal of Hydrology*, 612(128264), 128264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128264>

TOMASELLA, J., SILVA PINTO VIEIRA, R. M., BARBOSA, A. A., RODRIGUEZ, D. A., DE OLIVEIRA SANTANA, M., SESTINI, M. F. (2018). Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73 (11/2017), 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>

TRAN, Q. Q., DE NIEL, J., & WILLEMS, P. (2018). Spatially distributed conceptual hydrological model building: A generic top-down approach starting from lumped models. *Water Resources Research*, 54(10), 8064–8085. <https://doi.org/10.1029/2018wr023566>

USDA United States Department of Agriculture (1986). “Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55”, 164p.

VANSTEENKISTE, T., TAVAKOLI, M., VAN STEENBERGEN, N., DE SMEDT, F., BATELAAN, O., PEREIRA, F., & WILLEMS, P. (2014). Intercomparison of five lumped and distributed models for catchment runoff and extreme flow simulation. *Journal of Hydrology*, 511, 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.050>

VIEIRA, R. M. D. S. P., TOMASELLA, J., BARBOSA, A. A., MARTINS, M. A., RODRIGUEZ, D. A., REZENDE, F. S. D., CARRIELLO, F., SANTANA, M. D. O. (2021). Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. *Land Degradation and Development*, 32(1), 224–240. DOI: 10.1002/lde.3681