

CAPACIDADE DE SUPORTE HÍDRICA DAS UNIDADES DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Silas Volpon de Mello^{1}; Ilza Machado Kaiser²; Anna Silvia Palcheco Peixoto³
Gustavo Garcia Manzato⁴*

Resumo – Este trabalho propõe um modelo para calcular a Capacidade de Suporte Hídrica (CSH) de regiões urbanizadas visando a preservação dos recursos naturais, neste caso, os recursos hídricos. Utilizando as Análises Estocásticas de Fronteira como técnica de modelagem de capacidade de suporte, juntamente com o auxílio de sistemas de informações geográficas (SIG), pretendeu-se criar um método para calcular a carga antrópica no meio ambiente, ou seja, calcular a intensidade de solicitação ou estresse sobre os recursos naturais que uma dada região exerce sobre seu meio. Além disso, por meio de uma metodologia de regionalização de vazões, utilizada para a obtenção e inserção de variáveis de natureza hídrica, o modelo resulta no cálculo da CSH. Os objetos de estudo foram as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Estado de São Paulo. O modelo apontou regiões que estão sob estresse hídrico, ou seja, que não conseguem fornecer de maneira sustentável a quantidade de água requerida por seus habitantes.

Palavras-Chave – Capacidade de Suporte Hídrica; Análises Estocásticas de Fronteira, Modelagem Ambiental.

HYDRIC CARRYING CAPACITY OF WATER RESOURCES MANAGEMENT UNITS OF THE STATE OF SÃO PAULO

Abstract – This study proposes a model to calculate the Environmental Carrying Capacity (ECC) of urbanized areas aiming at the preservation of natural resources, in this case, given by water resources. Using Stochastic Frontier Analysis (SFA) as the carrying capacity modeling technique, along with Geographic Information Systems (GIS), we intended to create a method for calculating the anthropic load in the environment, that is, to calculate the intensity of solicitation or stress on the natural resources that a given region exercises over its environment. In addition, through a flow regionalization methodology used to obtain and insert variables of hydric nature, the model results in the calculation of the Hydric Carrying Capacity (HCC). The objects of study were the Water Resources Management Units of the State of São Paulo. The model pointed to regions that are under hydric stress, that is, regions that cannot provide the amount of water required by its inhabitants in a sustainable way.

Keywords – Hydric Carrying Capacity, Stochastic Frontier Analysis, Environmental Modeling.

¹ Universidade Estadual Paulista UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, Doutorando em Eng. Civil e Ambiental - silasmelloo@gmail.com

² Universidade Estadual Paulista UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, Professora Assistente Dra. - ilzakaiser@feb.unesp.br

³ Universidade Estadual Paulista UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, Professora Assistente Dra - anna@feb.unesp.br

⁴ Universidade Estadual Paulista UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, Professor Assistente Dr. - gusmanzato@feb.unesp.br

INTRODUÇÃO

Promover o desenvolvimento econômico, social e humano aliado à preservação do meio ambiente, denominado Desenvolvimento Sustentável é uma das principais metas traçadas para o século XXI. Diversas conferências mundiais relacionadas a este tema ocorreram nas últimas cinco décadas, dentre elas destacam-se a Conferência de Estocolmo em 1972, a ECO 92 e recentemente a COP 21. O Desenvolvimento Sustentável traz consigo a ideia de que os recursos naturais são finitos e precisam ser preservados para as gerações futuras. Diante dessa perspectiva, a preocupação vigente no campo da Ecologia se define por conhecer o atual estado de solicitação que o ser humano impõe sobre a natureza no que diz respeito ao consumo de recursos naturais e sua preservação. Para isso, diversos modelos que calculam a intensidade de solicitação do homem sobre os recursos naturais foram e vem sendo desenvolvidos e aprimorados. Alguns modelos ficaram mais conhecidos e se destacaram como o da Pegada Ecológica (Wackernagel e Rees, 1998) e as Análises de Energia (Odum, 1996). No Brasil, recentes acontecimentos de escassez de água em várias regiões do país demonstraram a necessidade do aprimoramento na gestão e gerenciamento dos recursos naturais.

Este estudo pretende colaborar com essa abordagem na medida em que tenta desenvolver um método para a criação de um indicador de estresse ambiental denominado Capacidade de Suporte Hídrica (CSH). Para elaborar esse modelo, um estudo de viabilidade da proposta foi desenvolvido anteriormente (de Mello *et al.*, 2016). Os autores analisaram a aplicabilidade desta proposta através de uma análise exploratória, elaborando um modelo protótipo contendo somente uma variável de entrada, a densidade de drenagem. Considerando os resultados promissores dessa abordagem metodológica, o presente artigo compreende uma segunda fase. Neste caso, buscou-se incrementar o modelo inicial por meio da inclusão de mais variáveis de natureza hídrica como a disponibilidade hídrica e qualidade da água. Os objetos de estudo foram as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Estado de São Paulo.

Este artigo é estruturado da seguinte maneira: na próxima seção são apresentados a metodologia e modelo de cálculo propostos. Na sequência são apresentados os resultados dos cálculos obtidos e de mapas gerados com um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Em seguida é apresentada a conclusão dos resultados e ao final do artigo estão os agradecimentos e a lista das referências bibliográficas citadas neste trabalho.

METODOLOGIA

O método desenvolvido nesse trabalho contempla três etapas principais: i) a aplicação de um método de regionalização de vazões para se determinar as vazões na área de estudo; ii) a descrição da técnica de modelagem utilizada, a saber: a Análise Estocástica de Fronteira e iii) a elaboração do modelo para estimar a capacidade de suporte hídrica e ambiental.

Regionalização de Vazões

A Metodologia de Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo foi desenvolvida por Liazi *et al.* (1988) e está em uso até hoje. Para fins de atualização, melhor confiabilidade e precisão, Wolff *et al.* (2014) propuseram um novo modelo de regionalização de vazões para o Estado de São Paulo. Utilizando uma base de dados atualizada e novos modelos matemáticos para interpolações de vazões bem como ferramentas computacionais modernas, este novo modelo apresentou índice de confiança (proposto por Allen *et al.*, 1998) superior que o seu antecessor, evidenciando o seu melhor desempenho. Algumas vantagens deste novo modelo são: i) não necessita da precipitação média anual para efetuar seus cálculos, diferentemente do método antigo; ii) não necessita

estabelecer vínculo entre regiões hidrologicamente homogêneas, facilitando os cálculos; iii) pode ser utilizado para todos os tamanhos de bacias. Para utilizar o modelo e obter as vazões de uma região, basta inserir sua área em km² e as coordenadas geográficas do ponto em que se deseja conhecer as vazões da bacia em análise. O modelo pode ser acessado através de um aplicativo computacional no endereço <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/wolff/rv/> (acessado em 05/09/2017). No caso deste estudo, os pontos em questão são os exutórios das UGRHIs, uma vez que estes correspondem aos pontos para onde converge toda a descarga hídrica das bacias em análise. Portanto, na intenção de obter as vazões $Q_{7,10}$; Q_{95} e Q_m para as 22 UGRHIs afim de se calcular a disponibilidade hídrica, foi necessário estudar e localizar os seus pontos exutórios. A figura 1 ilustra esta etapa e os cálculos completos estão disponíveis nos resultados deste trabalho.

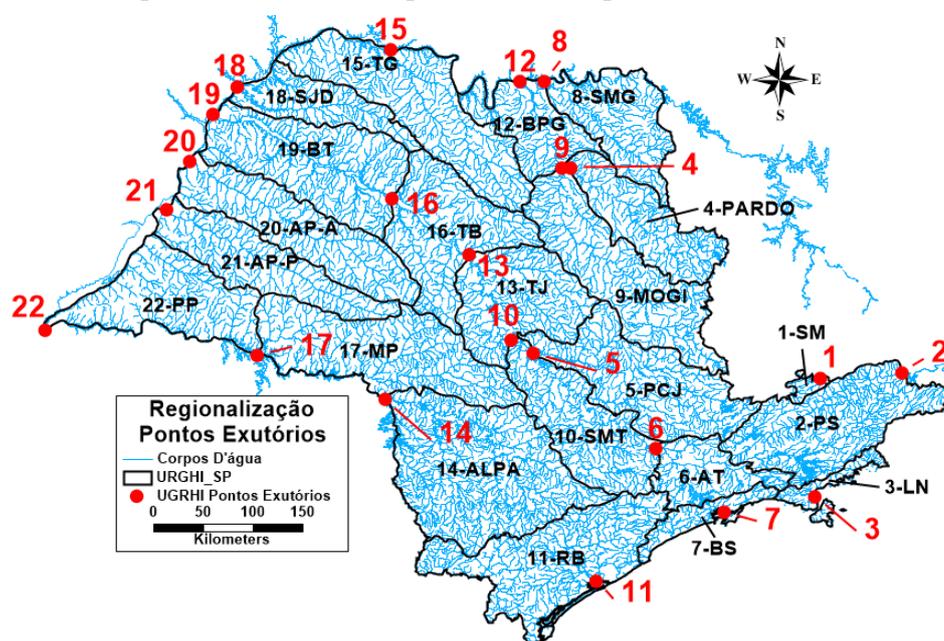


Figura 1 – Estudo dos pontos exutórios das Bacias das UGRHIs do Estado de São Paulo, para o cálculo da regionalização de vazões

Análises Estocásticas de Fronteira

O modelo estocástico de fronteira ou *Stochastic Frontier Analysis* (SFA) foi desenvolvido por Aigner *et al.* (1977) e Meeusen e van den Broeck (1977). Com raízes na Econometria, o modelo estocástico de fronteira tem o objetivo de calcular a eficiência de uma cadeia de produção ou de um sistema de produção e, posteriormente, foi aprimorado para o cálculo de ineficiências dentro dessas cadeias (Schmidt e Lovell, 1979; Jondrow *et al.*, 1982; Battese e Coelli, 1995). Ao calcular eficiências e ineficiências de produção, o modelo consequentemente pode estimar a fronteira de custo (*cost frontier*) ou a fronteira produção (*production frontier*) de um bem. Ao utilizar a equação de fronteira de produção, o modelo calcula a máxima produção possível (*output*) de um determinado bem, em função de suas variáveis de entrada (*input*) (Kumbhakar e Lovell, 2000). Em casos específicos, como em Manzato *et al.* (2011), quando a fronteira de produção é atingida, obtém-se a capacidade de suporte do sistema. Em geral, o modelo estocástico de fronteira é aplicado utilizando-se a forma de Cobb-Douglas na base log (Meeusen e Van Den Broeck, 1977; Coelli *et al.*, 1999), expresso na equação (1).

$$\log y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^N (\beta_n + \log X_{ni}) + v_i - u_i \quad (1)$$

Onde: β_0 e β_n = Parâmetros estimados pelo modelo
 y_i = Variável de Saída/Fronteira de produção (*output*) v_i = termo de erro randômico
 x_{ni} = Variáveis de Entrada (*input*) u_i = ineficiência técnica

Elaboração do modelo de Capacidade de Suporte Hídrica

A ideia aqui desenvolvida se baseia na utilização do modelo SFA com o propósito de se criar um método para calcular a capacidade de suporte ambiental de uma região. Em outras palavras, o objetivo é calcular o nível de estresse ou excedente ambiental no qual esses locais estão submetidos.

Considerando variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*output*), o modelo calcula a fronteira de produção, que expressa a produção mais eficiente possível da variável de saída. Isto é, o valor máximo de solicitação suportado pelo meio ambiente, em função das variáveis de entrada. Por exemplo, adotando como *input* a disponibilidade hídrica de uma região e como *output* a densidade populacional dessa mesma região, o modelo retornará a máxima densidade populacional suportada em função da oferta de água.

Mais especificamente, na sequência do trabalho desenvolvido por de Mello *et al.* (2016), a proposta aqui concebida considera três variáveis de entrada, a saber: (1) a disponibilidade hídrica superficial, obtida através da nova proposta de regionalização de vazões; (2) a disponibilidade hídrica subterrânea, obtida através do relatório de situação dos recursos hídricos (São Paulo, 2016); (3) a qualidade da água, dada pela proporção de redução da carga orgânica poluidora doméstica, ou seja, a eficiência do sistema de tratamento de esgotos (São Paulo, 2016). Como variável de saída, foi considerada a densidade populacional, assim como já empregada no estudo anterior, por ser de fácil compreensão na mensuração do nível de suporte (ou estresse) ambiental. Todos os dados referem-se ao ano de 2010.

Segundo Tucci (2002), a variável que representa a disponibilidade hídrica superficial máxima é a vazão média de longo período (Q_m) e, conseqüentemente, deveria ser utilizada na estimativa da máxima população suportada. Porém, como alertam Wolff *et al.* (2014), a nova metodologia de regionalização de vazões, utilizada neste estudo, é menos conservadora do que sua antecessora, resultando em cálculos de vazões maiores. Ou seja, por ser mais precisa, ela trabalha em menor grau de segurança no sentido da preservação dos recursos hídricos. Sob essa perspectiva, a vazão Q_{95} (e não a Q_m) foi adotada como disponibilidade hídrica superficial máxima, colocando o modelo proposto em favor da conservação dos recursos hídricos. Com a soma da Q_{95} (superficial) e da Vazão Explotável (Q_{ex} , subterrânea) foi calculado a disponibilidade hídrica total adotada e utilizada para este estudo conforme a equação (2).

$$\text{Disponibilidade Hídrica Total} = \text{Disp. Hídrica Superficial } (Q_{95}) + \text{Disp. Hídrica Subterrânea } (Q_{ex}) \quad (2)$$

Com o cálculo do valor máximo de solicitação suportado pelo meio ambiente (fronteira de produção), expresso neste estudo pela densidade populacional em habitantes/km², pode-se compará-lo com o valor da densidade populacional real da região em análise para se chegar ao valor da Capacidade de Suporte Hídrica (CSH), conforme a equação (3).

$$\text{Capacidade de Suporte Hídrica (CSH)} = \text{Fronteira de Produção} - \text{Densidade Populacional Real} \quad (3)$$

Assim, o resultado da Capacidade de Suporte Hídrica (CSH) expressa o nível de estresse ou excedente hídrico que uma dada população exerce sobre uma região. Se o seu valor for negativo (fronteira de produção menor que a densidade populacional), estará indicado uma situação de estresse hídrico. Por outro lado, se o resultado da CSH for positivo (fronteira de produção maior que a densidade populacional), significará uma situação de excedente hídrico. A partir deste modelo, pode-se determinar a carga antrópica que uma região urbanizada impõe sobre o seu ecossistema e verificar se este suporta o nível de consumo da população sem que ocorram degradações ao meio ambiente e dos recursos naturais. A figura 2 ilustra o resumo do método proposto, conforme as variáveis adotadas.

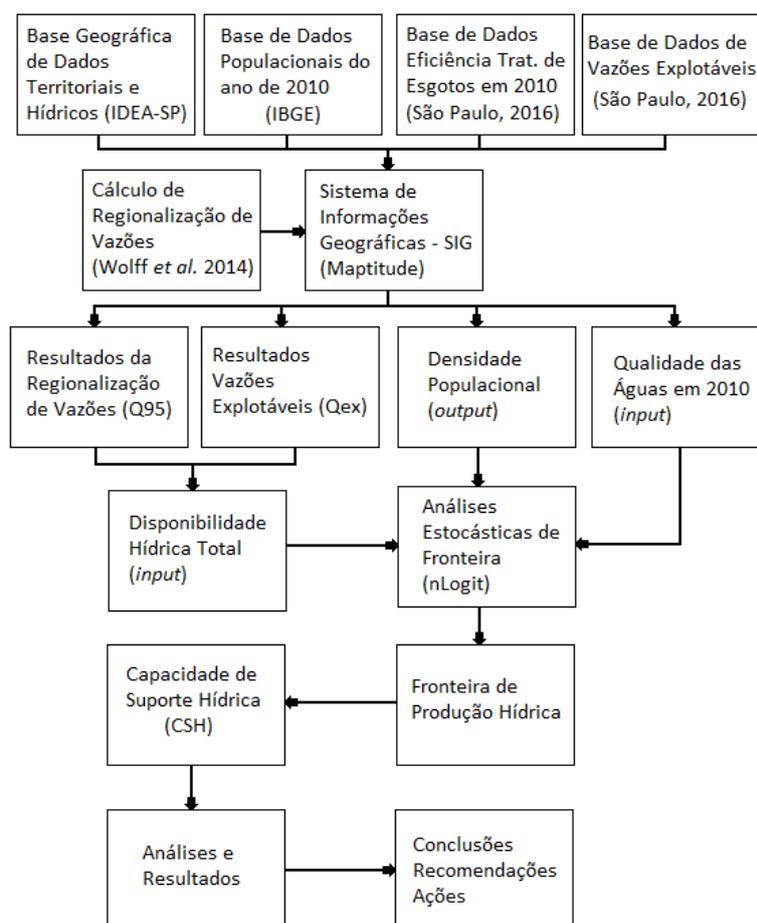


Figura 2 – Fluxograma do método proposto utilizando as variáveis adotadas neste estudo.

RESULTADOS

A seguir são disponibilizados os resultados da coleta de variáveis para realizar o cálculo de regionalização de vazões e demais variáveis para alimentar o modelo. Em seguida, são exibidos os resultados da CSH para as UGRHIs do Estado de São Paulo.

Cálculo das Vazões $Q_{7,10}$; Q_{95} ; Q_m através da Nova Proposta de Regionalização do Estado de São Paulo

A tabela a seguir apresenta a planilha dos resultados do cálculo de vazões para a nova proposta de regionalização de vazões (Wolff *et al.*, 2014), da vazão Explotável e da eficiência dos sistemas de tratamento de esgotos, no ano de 2010, das UGRHIs do Estado de São Paulo.

Tabela 1: Características Populacionais e Hídricas das UGRHIs

ID	Sigla ^a	Dens. Pop. 2010 ^b (hab/km ²)	ÁREA ^c (km ²)	LAT ^d	LONG ^d	Q _{7,10} ^d (m ³ /s)	Q ₉₅ ^d (m ³ /s)	Q _m ^d (m ³ /s)	Q _{ex} ^a (m ³ /s)	Eficiência do Trat. de Esgotos 2010 ^a (%)
1	SM	95,52	677,82	-22.6309	-45.4890	6,58	8,73	18,24	3	3,2
2	PS	138,31	14419,29	-22.5180	-44.6939	85,36	116,31	239,49	21	42,3
3	LN	143,21	1967,57	-23.7088	-45.4276	7,03	10,06	26,14	12	30,6
4	PARDO	122,80	9022,45	-20.9148	-48.0857	55,01	72,38	150,37	14	71,6
5	PCJ	352,93	14394,18	-22.6180	-48.3184	57,88	79,11	196,80	22	39,1
6	AT	3238,11	5935,77	-23.3924	-47.0363	16,03	23,40	67,33	11	33,6
7	BS	578,32	2877,56	-23.9192	-46.3026	20,89	32,54	108,91	20	7,9
8	SMG	73,63	9106,63	-20.1431	-48.3946	35,15	51,53	153,89	18	73,8
9	MOGI	116,05	15093,67	-20.9194	-48.1712	76,50	102,72	226,54	24	32,4
10	SMT	159,28	11585,86	-22.5142	-48.5386	45,54	62,64	141,39	17	58,7
11	RB	21,64	16872,93	-24.6416	-47.5096	147,69	197,94	404,14	67	41,3
12	BPG	45,75	7279,55	-20.1567	-48.6316	28,85	40,46	104,53	10	58,5
13	TJ	125,61	11787,29	-21.7645	-49.0052	43,11	58,14	129,31	10	42,7
14	ALPA	31,75	22738,79	-23.1276	-49.7319	75,61	102,55	237,39	30	61,9
15	TG	75,82	16274,88	-19.9448	-49.8989	37,18	53,54	154,32	13	65,0
16	TB	38,89	13161,68	-21.2948	-49.7932	31,41	44,19	124,35	9	63,7
17	MP	39,59	16821,52	-22.7912	-51.0060	79,71	107,97	189,39	17	61,2
18	SJD	33,99	6594,12	-20.3618	-51.3433	18,42	24,76	58,68	4	84,4
19	BT	47,83	15752,34	-20.6220	-51.5679	39,24	52,11	127,68	9	65,0
20	AP-A	27,78	13112,73	-21.0597	-51.7712	28,96	38,32	97,09	13	75,0
21	AP-P	41,53	10782,74	-21.5151	-51.9723	37,66	27,99	91,94	9	37,6
22	PP	38,64	12389,16	-22.6572	-53.0915	56,82	76,53	147,02	13	78,0
TOTAL SP		165,95	248648,5			1030,6	1383,9	3194,9	366	62,51

Fonte dos dados: ^a Relatório de situação das UGRHIs (São Paulo, 2016); ^b Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); ^c Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (IDEA-SP); ^d Nova Proposta de Regionalização – Pontos Exutórios (Wolff *et al.*, 2014)

Capacidade de Suporte Hídrica para as UGRHIs do Estado de São Paulo

A figura 3 apresenta os resultados obtidos segundo o método da CSH. A partir do modelo aqui elaborado, foi possível observar cinco UGRHIs em déficit hídrico, diferenciando-as pelo seu nível de estresse. Três foram apontadas com um grau menor de estresse hídrico, até 150 hab/km². Essas UGRHIs são: Baixada Santista, Tietê/Sorocaba e Pardo. Em nível intermediário de estresse, de 150 a 300 hab/km², foi apontada a UGRHI Piracicaba/Capivari/Jundiaí. Em maior grau de estresse, acima de 300 hab/km², foi apontada a UGRHI Alto Tietê.

Em contrapartida dezessete UGRHIs foram apontadas em situação de excedente hídrico. Dentre elas, três estão com menor nível de excedente, ou seja, até 50 hab/km². Essas UGRHIs são: Paraíba do Sul, Tietê/Jacaré e Sapucaí/Grande. Na sequência, dez encontram-se com nível intermediário de excedente, entre 50 e 100 hab/km², compreendendo as UGRHIs Litoral Norte, Mogi-Guaçu, Turvo/Grande, São José dos Dourados, Baixo Tietê, Tietê/Batalha, Aguapeí, Pontal do Paranapanema, Médio e Alto Paranapanema. Finalmente quatro foram apontadas com máximo nível de excedente, acima dos 100 hab/km². Essas UGRHIs são Mantiqueira, Ribeira do Iguapé/Litoral Sul, Peixe e Baixo Pardo/Grande.

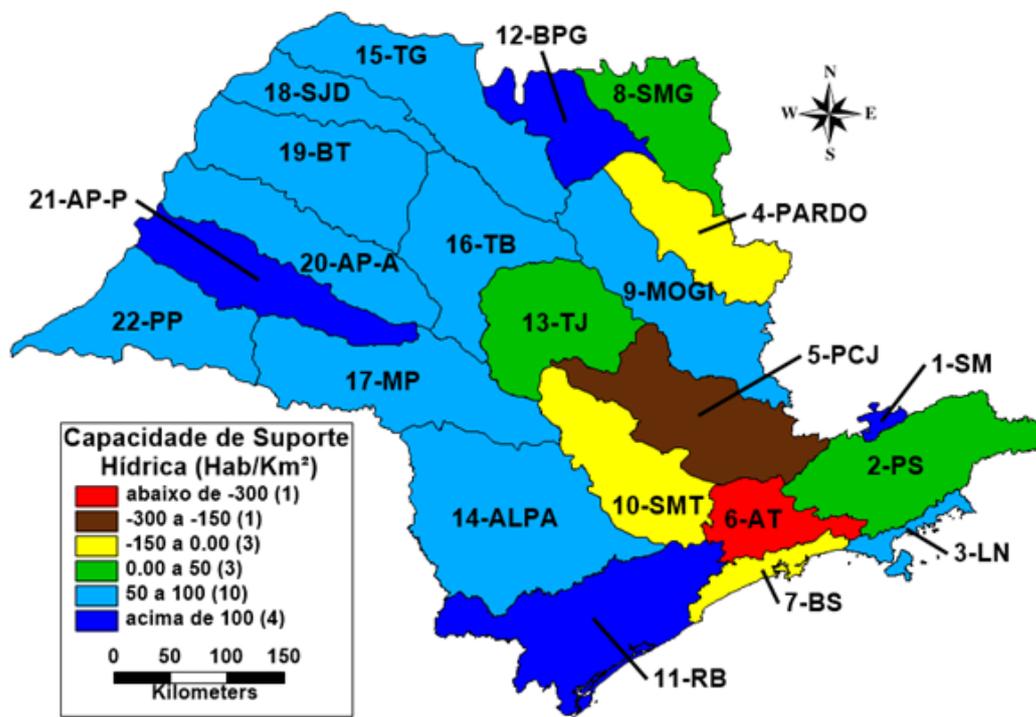


Figura 3 – Resultados da Análise da Capacidade de Suporte Hídrico para as UGRHIs de SP

CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi desenvolver um método para realizar uma modelagem de capacidade de suporte hídrico utilizando as Análises Estocásticas de Fronteira (SFA). Um modelo protótipo foi desenvolvido anteriormente e dispunha somente da densidade de drenagem, representando a oferta de cursos d'água como variável de entrada para efetuar seus cálculos. Neste segundo estudo, o modelo foi aprimorado para considerar a quantidade e qualidade da água, aumentando a confiabilidade dos seus resultados.

Foi utilizado a nova proposta de regionalização de vazões para o Estado de São Paulo, a fim de se obter a disponibilidade hídrica superficial das UGRHIs do Estado. Com os dados da disponibilidade hídrica total e da eficiência do tratamento de esgotos, foi desenvolvido um modelo chamado Capacidade de Suporte Hídrica (CSH). Os primeiros resultados da CSH evidenciam regiões do Estado que estão submetidas ao estresse dos recursos hídricos em níveis baixos, intermediários e intensos. Essas regiões podem ser consideradas como as mais vulneráveis em períodos de seca, podendo ter prioridade nas políticas públicas de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Em contrapartida, foram apontadas também regiões onde existe excedente hídrico, possuindo margem para a exploração da água.

Assim, pretende-se disponibilizar um modelo de fácil uso e manuseio, bem como de fácil leitura dos seus resultados, para auxiliar na questão da preservação dos recursos hídricos na escala regional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à agência CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio concedido em diferentes fases deste trabalho. Agradecem também à *Caliper Corporation* pela doação de uma licença educacional do software *Maptitude* utilizado neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIGNER, D.; LOVELL, C.A.K.; SCHMIDT, P. (1977) Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6, pp. 21-37.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- BATTESE, G. E. e COELLI, T.J. (1995) A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data. *Empirical Economics*, 20, pp. 325–332.
- COELLI, T., PERELMAN, S. e ROMANO, E. (1999) Accounting for Environmental Influences in Stochastic Frontier Models: With Application to International Airlines. *Journal of Productivity Analysis*, 11(3), pp. 251–273.
- DE MELLO, S. V.; KAISER, I. M.; PEIXOTO, A. S. P.; MANZATO, G. G. (2016) Uma análise exploratória da capacidade de suporte ambiental em áreas urbanizadas. 7º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, PLURIS 2016, Maceió - AL. Livro de Resumos. Maceió: Viva, 2016. v. 1. pp. 515-516.
- JONDROW, J., I. MATEROV, K. LOVELL e P. SCHMIDT, (1982) “On the Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model,” *Journal of Econometrics*, 19, pp. 233-238.
- KUMBHAKAR, S.C. e LOVELL, C. a. K. (2000) *Stochastic frontier analysis*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 14, pp. 5-22, 343 p.
- LIAZI, A.; CONEJO, J. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. (1988) Regionalização hidrológica no estado de São Paulo. *Revista Águas e Energia Elétrica*, 14(5), pp. 4-10.
- MANZATO, G. G., ARENTZE, T. A., TIMMERMANS, H. J., e ETTEMA, D. (2011). Spatial Attributes Mediating Regional Carrying Capacity for Office Firm Sectors: A Stochastic Frontier Approach. In *Transportation Research Board 90th Annual Meeting* (No. 11-1811).
- MEEUSEN, W.; VAN DEN BROECK, J. (1977). Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. *International economic review*, 18(2), pp. 435-444.
- ODUM, H.T. (1996) *Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making*. New York, Wiley & Sons. 384 p.
- SÃO PAULO (2016) Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, *Situação dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo: Ano Base 2014*. – 5. ed. – São Paulo. pp. 27, 31, 76-78, 98, 99, 126-131, 153, 176-181, 184, 202, 220-222, 303.
- SCHMIDT, P. e LOVELL, C.A.K. (1979) Estimating technical and allocative inefficiency relative to stochastic production and cost frontiers. *Journal of Econometrics*, 9(3), pp. 343–366.
- TUCCI, C. E. M. (2002) *Regionalização de vazões*. Porto Alegre, ABRH e Editora da Universidade/UFRGS, pp. 13-17, 116-117.
- WACKERNAGEL, M.; REES, W. (1998) *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers. Gabriola Island, British Columbia, Canada. 160 p.
- WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; & MINGOTI, R. (2014) Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(4), pp. 21-33.