SISPRED 2023
XV SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS
BOAS PRÁTICAS, INOVAÇÃO, DESEMPENHO E SUSTENTABILIDADE
19 E 20 DE OUTUBRO DE 2023 - JOINVILLE - SC

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM FLORIANÓPOLIS POR MEIO DE POLÍTICAS DE CONSCIENTIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL

Water consumption reduction scenarios simulated in Florianópolis through awareness policies and rainwater harvesting

Diego Antônio Custódio[1]; Thayane Lodete Bilésimo[2]; Enedir Ghisi[3]; Maurício Uriona Maldonado[4]

Recebido em 10 de junho de 2023, aprovado em 27 de julho de 2023, publicado em 19 de outubro de 2023

Palavras-chave:
Consumo de água
Dinâmica de sistemas
Simulação computacional

Keywords:
Water consumption
System Dynamics
Computer simulation

RESUMO: A água tem impactos no desenvolvimento econômico e social dos países. A escassez de água já é observada em diversas partes do mundo, o que pode comprometer a vida no planeta. Este trabalho utiliza a dinâmica de sistemas (DS) como ferramenta para estimar o consumo de água na cidade de Florianópolis, no sul do Brasil. Com o uso de dados históricos de população, economia e consumo de água, propõe-se um modelo de DS para prever o consumo de água até 2050. Por meio do programa computacional Stella, foram testadas políticas para redução do consumo de água em Florianópolis. O modelo prevê reduções do consumo de água de 37% (por meio do aproveitamento de água pluvial) e de 4% (por meio de campanhas de conscientização) para o ano de 2050. O modelo proposto pode ser usado como uma ferramenta de apoio a decisões para controlar e reduzir o consumo de água nas grandes cidades.

ABSTRACT: Water scarcity is already observed in several parts of the world, which can compromise life on the planet. This work uses system dynamics (SD) as a tool to estimate water consumption in the city of Florianópolis, southern Brazil. Using historical population, economy and water consumption data, a DS model is proposed to predict water consumption up to 2050. Through the Stella computer programme, policies to reduce water consumption in Florianópolis were tested. The model predicts reductions in water consumption of 37% (through the use of rainwater) and 4% (through awareness campaigns) for the year 2050. The model proposed can be used as a tool to support decisions to control and reduce water consumption in large cities.

CONTATO DOS AUTORES:

[1] **CUSTÓDIO, DIEGO ANTÔNIO**: Universidade Federal de Santa Catarina, diego.custodio@udesc.br
[4] **BILÉSIMO, THAYANE LODETE**: Universidade Federal de Santa Catarina, thayanebilesimo@gmail.com
[3] **GHISI, ENEDIR**: Universidade Federal de Santa Catarina, enedir.ghisi@ufsc.br
[4] **MALDONADO, MAURICIO URIONA**: Universidade Federal de Santa Catarina, m.uriona@ufsc.br

1 INTRODUÇÃO

Usando o modelo de dinâmica de sistemas, Dawadi e Ahmad (2013) avaliaram o impacto das mudanças climáticas e do aumento da população na demanda de recursos hídricos na região de Las Vegas Valley. A partir disso, os autores puderam propor alternativas que sugerem redução de até 30,6% na demanda até 2035. No Irã, Ahmadi e Zarghami (2019) avaliaram diferentes cenários de abastecimento de água utilizando o mesmo método. Os autores puderam concluir que os esforços de economia de água deveriam se concentrar nos recursos internos da cidade em vez dos externos. Tianhong et al. (2019) utilizaram a dinâmica de sistemas para simular fornecimento e demanda de água entre 2015 e 2030 na cidade de Shenzhen, em Hong Kong. A análise indicou a necessidade de propor medidas para evitar a escassez dos recursos hídricos no local.

O objetivo deste artigo é propor um modelo de dinâmica de sistema para simular cenários de redução do consumo de água por meio do aproveitamento de água pluvial e conscientização dos usuários em Florianópolis, no sul do Brasil. O modelo é utilizado para testar políticas de redução do consumo de água a fim de visualizar seus efeitos em médio e longo prazo.

2 MÉTODO

O modelo de simulação foi dividido em submodelos mostrados nesta seção. Foram utilizadas séries históricas de dados do Produto Interno Bruto (PIB) e dos sistemas de abastecimento da cidade, obtidos nas bases de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os coeficientes dos modelos apresentados foram obtidos a partir de regressão linear com os dados do IBGE e do SNIS.

2.1 Submodelo da economia

O crescimento da economia é dado pela Equação 1. O coeficiente de determinação (R^2) foi 0,9943.

$$PIB(t) = 10^{-107} \times e^{0,1237t} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Sendo:
PIB é o valor que o estoque do submodelo da economia assume no tempo t (bilhões de reais);
t é o ano.

A demanda de água não residencial foi expressa como uma função linear do PIB (WEI *et al.,* 2016) como mostra a Equação 2.

$$CNR(t) = a \times PIB + b \quad \text{(Eq. 2)}$$

Sendo:
CNR é o consumo de água não residencial no tempo t (L);
a é um parâmetro a ser determinado pela relação linear entre o PIB e o consumo de água (L/R$);
b é um parâmetro a ser determinado pela relação linear entre o PIB e o consumo de água (L).

O consumo de água não residencial foi estimado por meio da Equação 3.

$$CNR_i = CT_i \times \frac{q_{tot} - q_{res}}{q_{tot}} \quad \text{(Eq. 3)}$$

Sendo:
CNR_i é o consumo de água não residencial para o i-ésimo ano (L);
CT_i é o consumo de água total para o i-ésimo ano (L);
q_{tot} é a quantidade total de ligações de água;
q_{res} é a quantidade de ligações residenciais de água.

2.2 Submodelo da população

Segundo Harris et al. (2018), a equação logística foi usada pela primeira vez para modelar a população na França. A Equação 4 representa o crescimento logístico adaptada para a população de Florianópolis.

$$\frac{dP(t)}{dt} = t_p \times P(t)\left(1 - \frac{P(t)}{U}\right) \quad \text{(Eq. 4)}$$

Sendo:
$P(t)$ é a população para um determinado tempo em anos (pessoas);
t_p é a taxa de crescimento da população, obtida por meio de regressão logística ($t_p = 0{,}0194$). O valor desta taxa foi obtido por meio de regressão não linear;
U é o limite de crescimento da população (pessoas).

O valor do limite de crescimento foi definido em função da área da cidade de Florianópolis como um limitante populacional. Foram simulados diversos valores de limite de crescimento até que o modelo assumisse um comportamento similar aos dados do IBGE. Ao final, o limite de crescimento populacional adotado foi de 600.000 pessoas.

O consumo de água residencial foi estimado por meio da Equação 5.

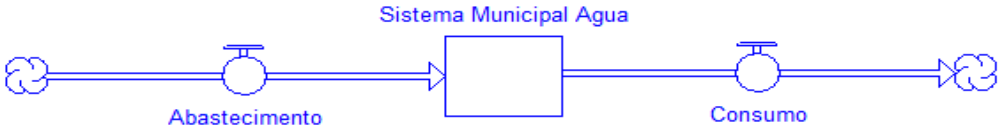
$$CR(t) = CR_{pc} \times P(t) \times 365 \quad \text{(Eq. 5)}$$

Sendo:
$CR(t)$ é o consumo residencial no tempo t (L);
CR_{pc} é o consumo per capita (L/pessoa/dia);
$P(t)$ é a população para um determinado tempo em anos (pessoas).

2.3 Submodelo do abastecimento de água

O abastecimento de água municipal foi modelado como um estoque com um fluxo de saída e um de entrada, de acordo com a Figura 1.

Figura 1. Sistema de abastecimento de água.



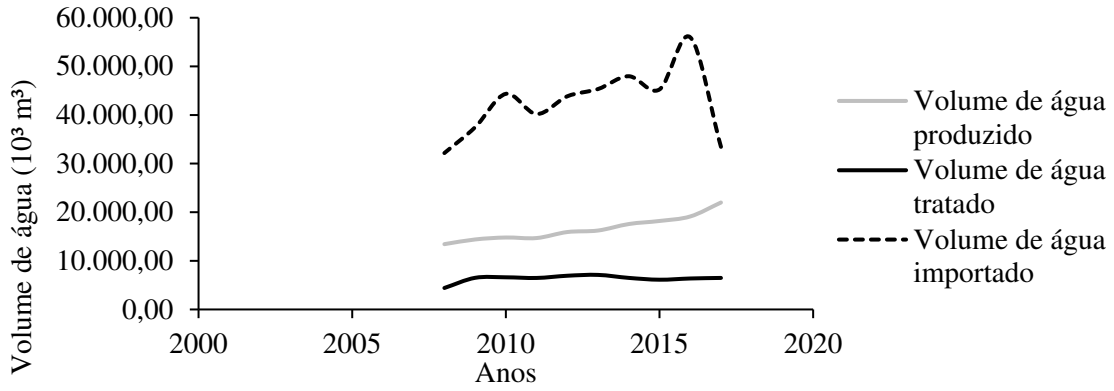
O fluxo de abastecimento foi obtido com os dados do SNIS, de acordo com a Equação 6.

$$AB(t) = AP(t) + AT(t) + AI(t) \quad \text{(Eq. 6)}$$

Sendo:
$AB(t)$ é o volume total de água para abastecimento municipal no tempo t em anos (litros);
$AP(t)$ é o volume total de água produzida no tempo t em anos (litros);
$AT(t)$ é o volume total de água tratada no tempo t em anos (litros);
$AI(t)$ é o volume total de água importada de outras concessionárias no tempo t em anos (litros).

Os volumes tratado e produzido de água apresentaram tendência linear quase constante enquanto o volume de água importado apresentou variabilidade maior. A variabilidade do volume de água importado diz respeito à necessidade maior ou menor de importar água em função do consumo. A Figura 2 mostra a série histórica dessas variáveis para os anos de 2008 a 2017.

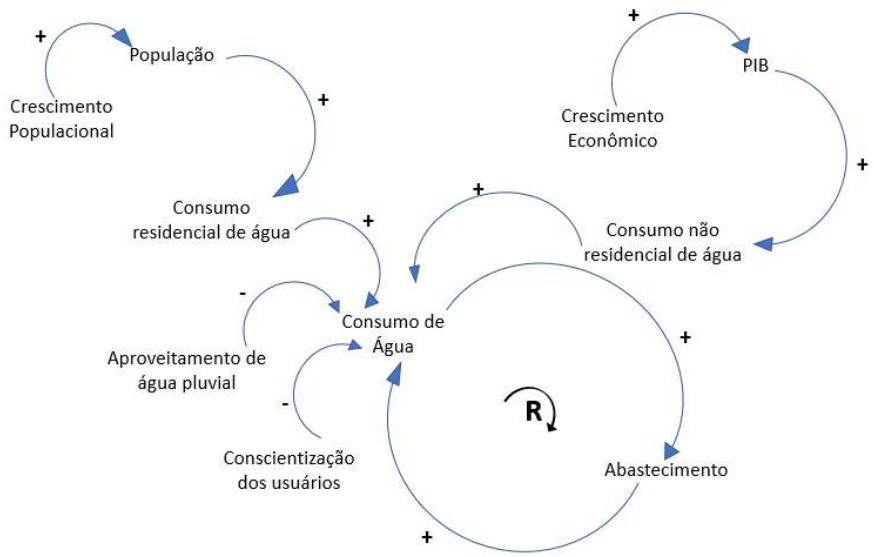
Figura 2. Volumes de água produzido, tratado e importado em Florianópolis entre 2008 e 2017.



2.4 Modelo do consumo de água

Uma hipótese importante para formulação do sistema é feita: quanto maior o consumo, maior o volume de água importado, pois os volumes tratados e produzidos de água são praticamente o limite do que a concessionária municipal tem capacidade de produzir. O aumento do consumo de água aumenta a capacidade do abastecimento e isso faz aumentar o consumo. Destaca-se a relação de reforço entre consumo e abastecimento de água, mostrado na Figura 3.

Figura 3. Diagrama de laços causais do modelo.



A Tabela 1 apresenta os parâmetros, valores e considerações adotados para os estoques do modelo. A Tabela 2 mostra os parâmetros e valores adotados para as variáveis e fluxos do modelo.

Tabela 1 - Estoques do modelo de consumo de água.

Descrição	Notação	Valor inicial	Unidade	Fonte
População	$P(t)$	352.446	Pessoas	IGBE (2016)
PIB	PIB	4.025.976.000	R$	IBGE (2016)
Sistema municipal de Água	SMA	47.712.000.000	Litros	SNIS (2017)

Tabela 2 - Variáveis e fluxos do modelo de consumo de água.

Descrição	Notação	Função (Dados Históricos)	Unidade	Fonte
Taxa de cresc. populacional	ip	0,0194	%	IBGE (2016)
Fluxo líquido	FLp	$P(t) \times ip \times E$	Pessoas	-
Efeito da saturação	E	$\frac{P(t)}{c}$	Adimensional	-
Capacidade de carga	c	600.000	Pessoas	Limite
Taxa de cresc. econômico	ie	0,124	%	IBGE (2016)
Crescimento Econômico	FLe	$ie \times PIB$	R$	-
Consumo residencial	CR	$CPC \times P(t)$	Litros	-
Consumo per capita	CPC	140 a 180	L/pessoa/dia	SNIS (2017)
Conscientização R	CSR	20	%	Stewart *et al* (2013)
Consumo não residencial	CNR	$18 \times 10^8(PIB + 1)$	Litros	Regressão
Conscientização NR	$CSNR$	30	%	Stewart *et al* (2013)
Período de conscientização	PCS	2	Anos	Teste
Aprov. de água pluvial residencial	APR	34	%	Ghisi (2006)
Aprov. de água pluvial não residencial	$APNR$	50	%	Ghisi (2006)
Consumo total	CT	$CR + CNR$	Litros	-
Abastecimento	ABS	$\overline{AP} + \overline{AT} + f(CT)^*$	Litros	Regressão
Volume de água produzido	$\overline{AP}$	16.634.000.000**	Litros	SNIS (2017)
Volume de água tratado	$\overline{AT}$	6.351.000.000**	Litros	SNIS (2017)
Consumo	CSM	CT	Litros	-

*$f(CT) = 8 \times 10^{-21}CT^3 - 8 \times 10^{-2}CT^2 + 27{,}464CT - \times 10^{11}$

** Valores médios da série histórica do Sistema Nacional de Informações de Saneamento.

2.5 Cenários de simulação

Este trabalho envolveu um cenário crítico que é a escassez de água nos grandes centros urbanos. O aumento da população e o crescimento da economia têm influência no aumento do consumo de água. Medidas devem ser tomadas para reduzir o crescimento do consumo e

garantir possibilidades para as gerações futuras.

Com a formulação do modelo e diante do problema de escassez de água relatado por diversos autores (DISTEFANO e KELLY, 2017; HADADIN et al., 2010; MÁÑES et al., 2012; WU e TAN, 2012), foram propostas políticas de redução do consumo para verificar seus efeitos futuros. As simulações foram realizadas por meio do programa computacional Stella com cenários até o ano de 2050. Os cenários propostos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cenários de redução do consumo de água.

Cenário	Política	Hipótese	Variáveis	Parâmetro
1	Conscientização dos usuários residenciais	Redução do consumo per capita de água por meio de campanhas de conscientização.	Consumo per capita	Redução de 20%
			Consumo não residencial	Redução de 20%
2	Aproveitamento de água pluvial em edificações residenciais e não residenciais	Redução do consumo per capita por meio do aproveitamento de água pluvial em residências para fins não potáveis (uso em bacias sanitárias).	Consumo per capita	Redução de 30%
		Redução do consumo per capita por meio do aproveitamento de água pluvial em residências para fins não potáveis (uso em bacias sanitárias, limpeza e irrigação de jardins).	Consumo não residencial	Redução de 50%
3	Aproveitamento de água pluvial e campanhas de conscientização (cenários 1 e 2 juntos).			

Para o teste no modelo proposto, admitiu-se que as campanhas de conscientização poderiam reduzir o consumo de água em 20% (Cenário 1). Katz *et al.* (2016) desenvolveram um estudo com monitoramento do consumo de água em residências no Japão e estimaram redução de 7,6% no consumo de água por meio de campanhas de conscientização. Tortajada *et al.* (2019) estimaram redução de 25,0% no consumo de água por meio de campanhas de conscientização na Espanha. De acordo com Stewart *et al.* (2013), as campanhas de conscientização têm efeitos nos usuários durante um certo tempo. Passado o período de campanha, os usuários tendem a "esquecer" e voltam a desperdiçar água.

No cenário 2 foi admitido o uso de água pluvial em residências e edificações não residenciais. A redução de consumo neste cenário será função da quantidade de água precipitada. No estudo de Ghisi (2006) foram estimados potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial de 34% a 92% em residências. Em edificações residenciais, Custódio e Ghisi (2019) estimaram o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial entre 18,5% e 40,8%. Ghisi *et al.* (2009) estimaram o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de água pluvial em edificação não residencial (posto de gasolina) entre 9,2% e 57,2%. Para esta pesquisa, considerou-se 30% de redução do consumo de água por meio do aproveitamento de água pluvial em prédios residenciais e 50% em prédios não residenciais.

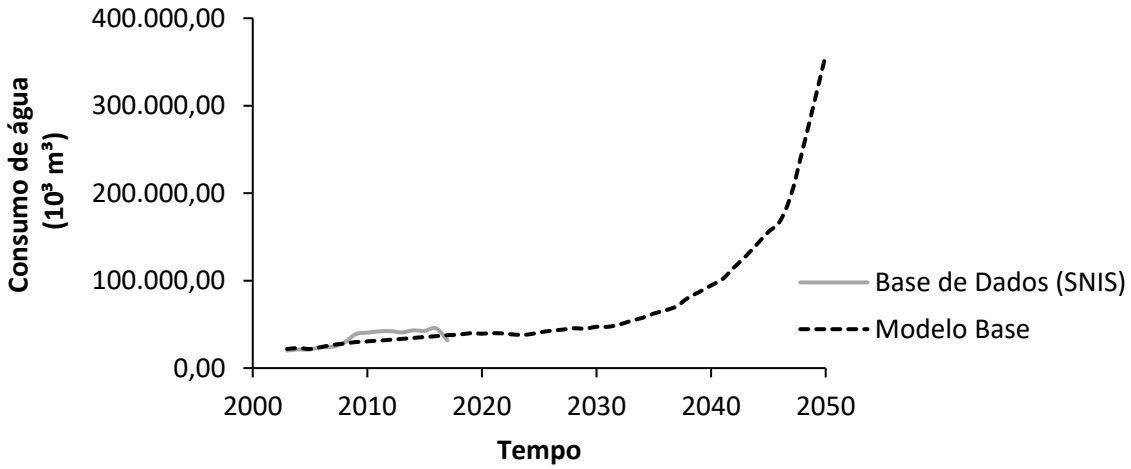
Evidentemente o potencial de economia de água potável por meio do aproveitamento de

água pluvial depende do volume de água precipitado, das áreas de cobertura das edificações, dos tamanhos dos reservatórios, do material componente das coberturas etc. Neste estudo, essas variáveis são consideradas exógenas, e, portanto, não integram o modelo.

2.6 Validação do modelo

O processo de validação do modelo se deu por meio da análise do comportamento das curvas em relação à série histórica dos dados disponíveis como mostra a Figura 4.

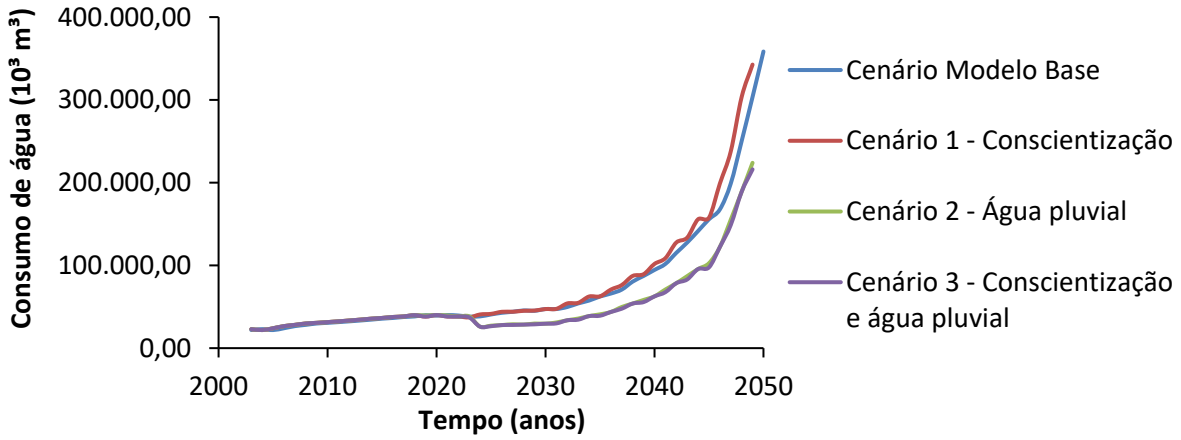
Figura 4. Comportamento simulado do modelo e modo de referência do consumo de água.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta a expectativa do aumento do consumo de água em Florianópolis. O aproveitamento de água pluvial teria efeitos mais significativos na redução do consumo de água em Florianópolis até 2050.

Figura 5. Consumo de água em Florianópolis para os cenários definidos.



O consumo de água estimado para 2050, sem a inclusão de nenhuma política de redução, foi de 358.418 m^3. Quando simulados os cenários 1, 2 e 3 para o ano de 2050, os consumos previstos foram, respectivamente, 342.598 m^3, 223.900 m^3 e 215.990 m^3. A partir da simulação foram previstas, para 2050, reduções do consumo de água de 4,4% com campanhas de conscientização, 37,5% com o aproveitamento de água pluvial e 39,7% com as duas

políticas simultâneas. Bao e He (2019) elaboraram um modelo de dinâmica de sistema para a aglomeração urbana de Pequim-Tianjin-Hebei e consideraram os cenários possíveis de redução do consumo de água para 2030. Se adotadas medidas de uso eficiente de água, o consumo de água em 2030 poderia reduzir entre 6,0% e 7,3%. No entanto, diferente deste estudo, Bao e He (2019) não consideraram em seu modelo o aproveitamento de água pluvial.

4 CONCLUSÕES

Como esperado, os cenários simulados mostram que o consumo de água é mais afetado por políticas que incentivem o aproveitamento de água pluvial nas edificações quando comparado aos efeitos de campanhas de conscientização de usuários. É importante destacar que o modelo de dinâmica de sistemas desenvolvido não tem como objetivo prever com exatidão o consumo de água futuro, mas servir como ferramenta para testar políticas e seus prováveis efeitos no consumo de água a longo prazo. O modelo também pode servir para testes de outras políticas não mencionadas neste trabalho como o reúso de água ou os incentivos financeiros. Constatou-se que há necessidade de aperfeiçoar o modelo com a inclusão de variáveis que foram consideradas exógenas neste estudo, como: características das edificações, hábitos de consumo, mudanças climáticas que podem ter efeitos na precipitação local.

REFERÊNCIAS

Ahmadi, M. H., Zarghami, M. (2019). Should water supply for megacities depend on outside resources? A Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz, Iran. Sustainable Cities and Society

44, 163-170

Bao, C., He, D. (2019). Scenario Modeling of Urbanization Development and Water Scarcity Based on System Dynamics: A Case Study of Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration, China. International Journal Environmental Research Public Health, 16 (20), 3834.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto: 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto: 2017.

Custódio, D. A., Ghisi, E. (2019). Assessing the Potential for Potable Water Savings in the Residential Sector of a City: A Case Study of Joinville City. Water, 11 (10), 2074.

Dawadi, S., Ahmad, S. (2013). Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. Journal of Environmental Management, 15, 261-275.

Dias, T. F., Kalbusch, A., Henning, E. (2018). Factors influencing water consumption in buildings in southern Brazil. Journal of Cleaner Production, 184, 160-167.

Distefano, T., Kelly, S. (2017). Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. Ecological Economics, 142, 130-147.

Domene, E., Sauri, D., Huelin, S., Boada, M., Marti, X., Garriga, N., Molina, J. Estudi Del Consum D'aigua Als Edificis De Laregió Metropolitana De Barcelona. Relatório Técnico, Universitat Autònoma de Barcelona, 2004. Disponível em: http://www.fundacioabertis.org/rcs_est/estudi_complet.pdf

EPE (2016). Balanço Energético Nacional. Disponível em: http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2016. (Acesso em 19 jun. 2019).

Forrester, J. W. (1991). System Dynamics and the Lessons of 35 Years. In: FORRESTER, Jay W.. The Systemic Basis of Policy Making in the 1990s. Cambridge: Kenyon B. de Greene, 5-32.

Ghisi, E. (2006). Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. Building and Environment, 41, 11, 1544-1550.

Ghisi, E., Oliveira, S. M. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. Building and Environment, 42, 4, 1731-1742.

Ghisi, E., Tavares, D. F., Rocha, V. L. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. Resources, Conservation and Recycling, 54, 79-85.

Hadadin, N., Qaqish, M., Akawwi, E., Bdour, A. (2010). Water shortage in Jordan - Sustainable solutions. Desalination, 250, 197-202.

Jones A. P., Homer, J. B., Murphy, D. L., Essien, J. D., Milstein, B., Sevilha D. A. (2006). Understanding Diabetes Population Dynamics Through Simulation Modeling and Experimentation. American Journal of Public Health. 96, 3, 488-494.

Katz, D., Grinstein, A., Kronrod, A., Nisan, U. (2016). Evaluating the effectiveness of a water conservation campaign: Combining experimental and field methods. Journal of Environmental Management, 180, 335-343.

Kim, J. Lee, D. Jung, N. (2006). Analysis Of Household Water Demand Patterns By Meters Recording. In: ANNUAL WATER DISTRIBUTION SYSTEMS ANALYSIS SYMPOSIUM, 8th, Cincinnati, Ohio, USA

Lyneis, J. M. (2000). System dynamics for market forecasting and structural analysis. System Dynamics. 16, 3-25.

Máñes, K. S., Husain, S., Ferse, S. C. A., Costa, M. M. (2012). Water scarcity in the Spermonde Archipelago, Sulawesi, Indonesia: Past, present and future. Environmental Science & Policy, 23, 78-84.

Matos, C., Teixeira, C. A., Duarte, A. A. L. S., Bentes, I. (2013). Domestic water uses: Characterization of daily cycles in the north region of Portugal. Science of The Total Environment, 1, 458-460.

Mereu, S., Susnik, J., Trabucco, A., Daccache, A., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Renoldi, S., Virdis, A., Savic, D., Assimacopoulos, D. (2016). Operational resilience of reservoirs to climate change, agricultural demand, and tourism: A case study from Sardinia. Science of The Total Environment, 1, 1028-1038.

Qi, C., Chang, N. (2011). System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. Journal of Environmental Management, 92, 1628-1641.

Park, S., Sahleh, V., Jung, S. (2015). A system dynamics computer model to assess the effects of developing an alternate water source on the water supply systems management. Procedia Engineering, 119, 753-760.

Schleich, J., Hillenbrand, T. (2009). Determinants of residential water demand in Germany. Ecological Economics, 68, 6, 1756-1769.

Sterman, J.D. (2000) Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin McGraw-Hill, Boston.

Stewart, R. A., Willis, R. M., Panuwatwanich, K. S. O. (2013). Showering behavioural response to alarming visual display monitors: longitudinal mixed method study. Behaviour & Information Technology. 32. 695-711.

Tako, A. A., Robinson, S. (2012). The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. Decision Support Systems, 52, 802-815.

Tianhong, L., Songnan, Y., Mingxin, T. (2019). Simulation and optimization of water supply and demand balance in Shenzhen: A system dynamics approach. Journal of Cleaner Production, 207, 882-893.

Tortajada, C., González-Gómez, F., Biswas, A. K., Buurman, J. (2019). Water demand management strategies for water-scarce cities: The case of Spain. Sustainable Cities and Society, 45, 649-656.

UNESCO (2019). Relatório mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. Disponível em: http://www.unesco.org/new/pt/brasilia/natural sciences/environment/wwdr/ (acesso em 18 jun. 2019).

Wei, T., Lou, I., Yang, Z., Li, Y. (2016). A system dynamics urban water management model for Macau, China. Journal of Environmental Sciences, 50, 117-126.

Wu, P., Tan, M. (2012). Challenges for sustainable urbanization: a case study of water shortage and water environment changes in Shandong, China. Procedia Environmental Sciences, 13, 919-927.