
PEGADA HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAPEMIRIM

Water footprint on Itapemirim watershed

Ana Paula Porto Neves Leal¹, Roberto Avelino Cecílio^{2*}, Sidney Sara Zanetti³

¹Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Universidade Federal do Espírito Santo: anaportonl@gmail.com

²Doutor em Engenharia Agrícola; Professor em Universidade Federal do Espírito Santo: roberto.cecilio@ufes.br

³Doutor em Produção Vegetal; Professor em Universidade Federal do Espírito Santo: sidney.zanetti@ufes.br

*Autor para correspondência

Artigo enviado em 18/05/2017, aceito em 24/04/2018 e publicado em 17/07/2018.

Resumo – A pegada hídrica é um indicador abrangente da apropriação de recursos hídricos e, além disso, avalia a sustentabilidade do uso da água. O presente trabalho teve o objetivo de avaliar a pegada hídrica da bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Consideraram-se os principais setores usuários da água na bacia: agricultura, pecuária, florestas, abastecimento e saneamento urbanos. A pegada hídrica total estimada foi igual a 6,4 bilhões de m³ ano⁻¹, sendo que a maior contribuição foi dada pela água verde com 92% do total. Quanto às classes de setores usuários da bacia, a classe agrícola (agricultura e pecuária) foi aquela que mais consumiu água na bacia. A pegada verde foi insustentável do ponto de vista ambiental em metade do ano, chegando a altos índices de escassez de água verde no mês de julho.

Palavras-chave – gestão da água, pegada hídrica, indicador de consumo.

Abstract – Water footprint is a comprehensive indicator of the appropriation of water resources, and also assesses water use sustainability. This study aimed to evaluate the water footprint of Itapemirim Watershed, Espírito Santo, Brazil. The main water user sectors in the Itapemirim Watershed were considered: agriculture, livestock, forestry, supply, and urban sanitation. The total water footprint of the basin was 6.4 billion m³ year⁻¹, considering that the largest contribution was given by the green water, with 92% of the total. Regarding the classes of the basin user sectors, the agricultural class (crops and pasture) was the class that consumed more freshwater in the basin. The green water footprint is unsustainable from an environmental point of view for half of the year, reaching high levels of green water scarcity on July.

Keywords – Water management, water footprint, consumption indicator.

Figura 2. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Tabela 1. Usos do solo e sistemas de produção na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Classe	Área (km ²)	Sistema
Pastagem	291.992	não-irrigado
Mata nativa	129.408	-
Café	84.384	irrigado
Afloramento rochoso	21.883	-
Eucalipto	12.179	não-irrigado
Cultivos temporários	8.330	não-irrigado
Solo exposto	6.034	-
Cana-de-açúcar	5.348	irrigado
Área edificada	4.114	-
Campo rupestre/altitude	3.854	-
Cultivos permanentes	2.690	não-irrigado
Massa d'água	2.597	-
Pinus	2.209	não-irrigado
Banana	1.108	irrigado
Extração mineração	666	-
Abacaxi	336	irrigado
Coco-da-baía	197	irrigado
Seringueira	173	-
Mangue	135	-
Restinga	73	-

Os dados meteorológicos, inclusive a evapotranspiração potencial (ET_0) calculada pelo método de Penman-Monteith, foram obtidos de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 3), disponibilizados por XAVIER; KING; SCANLON (2015), localizadas na BHRI e adjacências. Tais dados são referentes à rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Utilizaram-se os registros mensais disponíveis, entre o período de 2007 e 2012, das variáveis precipitação e ET_0 . Devido à grande extensão da bacia, foi necessário realizar uma divisão da zona de influência de cada estação meteorológica, por intermédio de Polígonos de Thiessen (Figura 3).

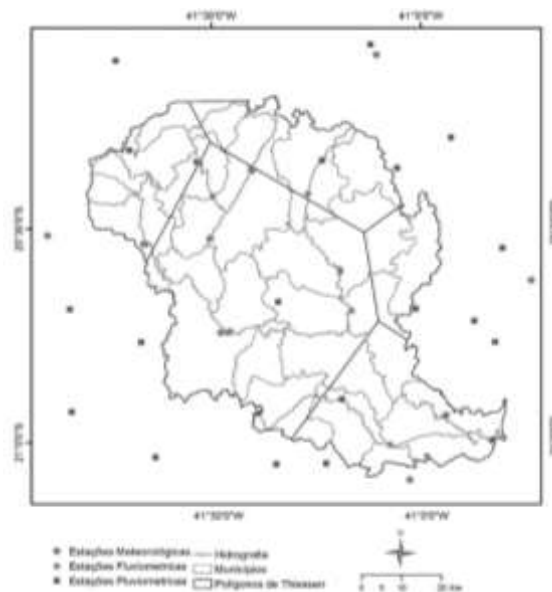


Figura 3. Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas usadas no estudo.

Também se utilizaram dos dados pluviométricos diários considerando o mesmo período (2007 a 2012), obtidos pelas estações meteorológicas do Instituto Capixaba de Pesquisa, da Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional das Águas (ANA) localizadas na BHRI e adjacências.

Os dados fluviométricos utilizados foram obtidos portal Hidroweb (ANA – Agência Nacional das Águas), referentes às estações presentes dentro da BHRI, com registros entre os anos de 2007 a 2012 (Figura 3).

Pegada hídrica

A contabilização da pegada hídrica realizada no presente trabalho foi baseada no Manual de Avaliação de Pegada Hídrica (HOEKSTRA et al., 2011). O período de dados deste trabalho foi dos anos de 2007 a 2012. Calcularam-se as três componentes da PH (azul, verde e cinza) para toda a BHRI, subdividindo-a entre os setores usuários e municípios integrantes da bacia.

Contabilização da Pegada Hídrica Verde (PHverde)

A pegada hídrica verde foi igual ao somatório das pegadas hídricas verde da agricultura ($PH_{verde_{agricultura}}$), das florestas ($PH_{verde_{floresta}}$) e das pastagens ($PH_{verde_{pastagem}}$)

No cálculo da $PH_{verde_{agricultura}}$, para cada cultivo agrícola existente na BHRI, em cada município, a pegada hídrica verde foi calculada a partir da demanda hídrica da cultura (DHC) dividida pela sua produtividade, por intermédio da equação 1. A produtividade de cada cultivo agrícola foi obtida localmente, junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2012), para cada município inserido na BHRI.

$$PH_{verde_{cultivo}} = \frac{DHC_{verde}}{Produtividade} \quad (1)$$

em que: $PH_{verde_{cultivo}}$ = pegada hídrica verde de um cultivo específico, $m^3 \text{ ton}^{-1}$; DHC_{verde} = demanda hídrica verde da cultura, $m^3 \text{ ha}^{-1}$; $Produtividade$ = produtividade da cultura, ton ha^{-1} .

A DHC_{verde} de cada cultura foi obtida a partir da contabilização da evapotranspiração real anual (ETR) e dos respectivos coeficientes de cultivo (K_c), conforme descrito na equação 2. Os K_c de cada cultura foram obtidos a partir de dados e do Boletim 24 da FAO (DOORENBOS; PRUITT, 1977), considerando a variabilidade climática e de altitude.

$$DHC_{verde} = 10 \text{ ETR } K_c \quad (2)$$

em que: 10 = constante para transformação de unidades (mm para $m^3 \text{ ha}^{-1}$); ETR = evapotranspiração real anual, em mm; e K_c = coeficiente de cultivo, adimensional.

A pegada hídrica verde da agricultura foi calculada pela equação 3.

$$PH_{verde_{agricultura}} = \sum (PH_{verde_{cultivo}} \text{ Prod}_{cultivo}) \quad (3)$$

em que: $PH_{verde_{agricultura}}$ = pegada hídrica verde da agricultura, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; e $Prod_{cultivo}$ = produção anual de cada cultivo específico, ton ano^{-1} .

A $PH_{verde_{pastagem}}$ (equação 4) e a $PH_{verde_{floresta}}$ (equação 5) foram estimadas através do balanço hídrico normal (THORNTHWAITE; MATHER, 1955) nas cinco subáreas delimitadas pelos polígonos de Thiessen. Para este trabalho, o valor da capacidade de água disponível CAD adotado foi de 100 mm para a pastagem e 300 mm para florestas (PEZZOPANE et al., 2012). As equações 9 e 10 foram utilizadas para as estimativas:

$$PH_{verde_{pastagem}} = 10 \text{ ETR}_{pastagem} A_{pastagem} \quad (4)$$

$$PH_{verde_{floresta}} = 10 \text{ ETR}_{floresta} A_{floresta} \quad (5)$$

em que: $PH_{verde_{pastagem}}$ = pegada hídrica verde da área de pastagem, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; $ETR_{pastagem}$ = evapotranspiração real anual da área de pastagem, mm; $A_{pastagem}$ = área de pastagem, ha; $PH_{verde_{floresta}}$ = pegada hídrica verde da área de floresta, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; $ETR_{floresta}$ = evapotranspiração real anual da área de floresta, mm; e $A_{floresta}$ = área de floresta, ha;

Contabilização da Pegada Hídrica Azul (PHazul)

A pegada hídrica azul é a água captada diretamente nos corpos hídricos. Neste trabalho, a água azul foi representada nos usos pela agricultura irrigada ($PH_{azul_{agricultura}}$), consumo animal ($PH_{azul_{animal}}$),

abastecimentos urbano ($PH_{azul_{urbano}}$) e rural ($PH_{azul_{rural}}$), sendo igual à soma dos quatro componentes. A $PH_{azul_{agricultura}}$ foi contabilizada de forma semelhante à $PH_{verde_{agricultura}}$, descrita no item 2.2.1, pelas equações 1 a 3. Todavia, na equação 2, a DHC_{verde} foi substituída pela demanda hídrica azul da cultura (DHC_{azul}), a qual foi calculada substituindo-se a ETR por pela diferença entre a evapotranspiração potencial (ET0) e a ETR de cada cultivo.

A $PH_{azul_{urbano}}$ (equação 6) foi estimada para cada cidade da bacia de acordo com a quantidade de água fornecida pela companhia de água, seja para uso doméstico ou industrial, sendo este o volume total captado por dia nas estações de tratamento de água. Os dados referentes à quantidade de água fornecida para as cidades foram obtidos pelo Atlas de Abastecimento Urbano de Água (ANA, 2015). A $PH_{azul_{rural}}$ (equação 7) foi calculada pela demanda hídrica média por habitante (DH_{hab}) e o número de habitantes da zona rural em cada município. Os dados de população foram obtidos junto a estimativa populacional do IBGE (IBGE, 2012). A DH_{hab} foi obtida a partir do consumo médio per capita em função do porte da comunidade e da população abastecida (VON SPERLING, 2005), apresentada na Tabela 2.

$$PH_{azul_{urbano}} = \sum \left(\frac{365}{1000} Q_{ETA} \right) \quad (6)$$

$$PH_{azul_{rural}} = \sum \left(\frac{365}{1000} DH_{hab} Hab_{rural} \right) \quad (7)$$

em que: $PH_{azul_{urbano}}$ = pegada hídrica azul para abastecimento urbano, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; $365/1000$ = constante para transformação de unidades ($L \text{ dia}^{-1}$ para $m^3 \text{ ano}^{-1}$); Q_{ETA} = vazão de captação de cada estação de tratamento de água, $L \text{ dia}^{-1}$; $PH_{azul_{rural}}$ = pegada hídrica azul para abastecimento urbano, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; DH_{hab} = demanda hídrica por habitante da zona rural, $L \text{ habitante}^{-1} \text{ dia}^{-1}$; e Hab_{rural} = número de habitantes na zona rural, habitante.

Tabela 2. Consumo de água médio per capita em função da comunidade e tamanho da população (VON SPERLING, 2005; HELLER; PÁDUA, 2006).

Comunidade	População (habitantes)	Consumo ($L \text{ hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)
Povoado rural	< 5.000	90 a 140
Vila	5.000 a 10.000	100 a 160
Pequena localidade	10.000 a 50.000	110 a 180

A $PH_{azul_{animal}}$ (equação 8) foi estimada com relação à criação de bovinos, bubalinos, caprinos, equinos, suínos e aves. Para seu cálculo foram utilizados dados do rebanho municipal e consumo médio diário por animal (CMD_{animal}) (Tabela 3). As informações referentes ao rebanho foram obtidas pelo censo agropecuário do IBGE e os dados sobre consumo de água a partir de estudos da EMBRAPA (PALHARES, 2005, 2013).

$$PH_{\text{azul}}_{\text{animal}} = \sum \left(\frac{365}{1000} \text{CMD}_{\text{animal}} n_{\text{rebanho}} \right) \quad (8)$$

em que: $PH_{\text{azul}}_{\text{urbano}}$ = pegada hídrica azul para o consumo animal, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$; $\text{CMD}_{\text{animal}}$ = consumo média diário por animal, em $\text{L animal}^{-1} \text{dia}^{-1}$; e n_{rebanho} = quantidade de animais por rebanho, animal.

Tabela 3. Demanda hídrica diária por rebanho (PALHARES, 2005, 2013).

Rebanho	CMD _{ANIMAL} (L animal ⁻¹ dia ⁻¹)
Bovinos de corte	32
Bovinos de leite	62
Bubalinos	46
Caprinos	15
Equinos	25
Suínos	16
Aves	19

Contabilização da Pegada Hídrica Cinza (PHcinza)

A pegada hídrica cinza foi igual ao somatório da água cinza proveniente da agricultura ($PH_{\text{cinza}}_{\text{agricultura}}$) e do saneamento ($PH_{\text{cinza}}_{\text{saneamento}}$), uma vez que essas possuem atividades potencialmente poluidoras dos corpos hídricos.

Para a $PH_{\text{cinza}}_{\text{agricultura}}$ optou-se por considerar somente a poluição causada pelos fertilizantes nitrogenados, devido a sua alta taxa de lixiviação, por serem amplamente usados nas principais culturas agrícolas da BHRI, e pelo seu potencial poluidor de rios e lagos. Sendo assim, a $PH_{\text{cinza}}_{\text{agricultura}}$ foi estimada, para cada cultivo agrícola, somente a partir da carga de poluente de nitrogênio lançada anualmente no corpo d'água, do padrão de qualidade da água em seu estado natural para o nitrogênio e de sua concentração natural no corpo d'água receptor, por intermédio das equações 9 e 10.

$$PH_{\text{cinza}}_{\text{agricultura}} = \sum (PH_{\text{cinza}}_{\text{cultivo}} \text{Prod}_{\text{cultivo}}) \quad (9)$$

$$PH_{\text{cinza}}_{\text{cultivo}} = \frac{\left(\frac{L_N}{CN_{\text{max}} - CN_{\text{nat}}} \right)}{\text{Produtividade}} \quad (10)$$

em que: $PH_{\text{cinza}}_{\text{agricultura}}$ = pegada hídrica cinza da agricultura, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$; $PH_{\text{cinza}}_{\text{cultivo}}$ = pegada hídrica cinza de um cultivo específico, $\text{m}^3 \text{ton}^{-1}$; L = carga de poluente de nitrogênio, kg ano^{-1} ; CN_{max} = concentração máxima aceitável de nitrogênio no corpo hídrico, igual a $2,18 \text{kg m}^{-3}$, determinada com base na legislação vigente enquadrada na classe 2, que segue a resolução do CONAMA n° 357/2005; e CN_{nat} = concentração natural de nitrogênio no corpo hídrico, igual a $1,0 \text{kg m}^{-3}$, encontrada em microbacias da BHRI (PASTRO, 2015).

A carga de poluente foi obtida conforme a equação 11, sendo a quantidade de nitrogênio aplicado em cada

cultivo estimada de acordo com a recomendação básica anual por este nutriente de cada cultura (PREZOTTI, 2014).

$$L_N = \alpha \text{ TA} \quad (11)$$

em que: α = fração total anual aplicado que atinge os corpos hídricos, igual a 0,1 (HOEKSTRA et al., 2011); e TA = taxa de aplicação do nitrogênio, kg ano^{-1} .

A $PH_{\text{cinza}}_{\text{saneamento}}$ (equação 12) foi calculada baseada nos efluentes lançados nos corpos hídricos, sendo a carga de poluente estimada com base no parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO foi escolhida por demandar a maior quantidade de água para sua diluição em concentrações aceitáveis nos corpos hídricos (VIEIRA, 2012).

$$PH_{\text{cinza}}_{\text{saneamento}} = \sum \frac{365 L_{\text{DBO}} n_{\text{hab}} (1 - \text{ef})}{\text{CDBO}_{\text{max}} - \text{CDBO}_{\text{nat}}} \quad (12)$$

em que: $PH_{\text{cinza}}_{\text{saneamento}}$ = pegada hídrica cinza do saneamento, $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$; L_{DBO} = carga poluente de DBO por habitante lançada diariamente, igual a $0,054 \text{kg habitante}^{-1} \text{dia}^{-1}$ (VON SPERLING, 2005); n_{hab} = número de habitantes; ef = eficiência da remoção da carga de DBO, adimensional; CDBO_{max} = concentração máxima de DBO permitida em um corpo hídrico, igual a $5,0 \text{kg m}^{-3}$, de acordo com a as Resoluções n° 357/2005 e n° 430/2011 do CONAMA; e CDBO_{nat} = concentração natural de DBO no corpo hídrico, igual a $2,0 \text{kg m}^{-3}$, (VON SPERLING, 2005).

O sistema de esgotamento sanitário dos municípios da bacia do rio Itapemirim é gerido pelas instituições CESAN, SAAE e Odebrecht Ambiental, que juntas coletam e tratam o esgoto de 73% da população da BHRI (CESAN, 2012). Os outros 27% foram considerados como esgoto não tratado. Para a carga de poluentes não tratados, foi considerado o uso de fossas, comum em comunidades rurais, e o lançamento do esgoto *in natura* nos rios. Para calcular este volume de esgoto, utilizou-se o valor do consumo per capita de água dos municípios e o percentual da população não atendida pela rede de esgotamento sanitário (27%), sendo que na ausência de dados concretos, nesse trabalho estipulou-se que 13,5% foi considerado esgoto proveniente de fossas e 13,5% não passou por nenhum tratamento. Ainda considerou-se que o uso de fossas pode remover cerca de 50% da DBO (VIEIRA; SOUSA JUNIOR, 2015).

Avaliação da sustentabilidade

A avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica foi feita em escala mensal, baseando-se no Manual de Avaliação de Pegada Hídrica (HOEKSTRA et al., 2011). A avaliação da sustentabilidade da PHverde e da PHazul foi feita com base nos indicadores de escassez de água (EA).

Para a análise de sustentabilidade da PHcinza, o indicador utilizado foi o nível de poluição da água (NPA).

Sustentabilidade da PHazul

A PHazul dentro de um mês específico, em uma dada bacia, torna-se um ponto crítico quando ela excede a disponibilidade de água azul (DAazul). Esta disponibilidade (DAazul), em uma bacia, é definida como o escoamento natural na bacia (Q_{nat}) menos a chamada demanda de vazão ambiental (DVA).

$$DA_{azul} = Q_{nat} - DVA \quad (13)$$

em que: DAazul = disponibilidade de água azul na bacia, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; Q_{nat} = escoamento natural da bacia, calculado pelas somas da vazão médias da cada sub-bacia com a PHazul, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; e DVA = demanda de vazão ambiental da bacia, igual à vazão de permanência em 90% do tempo (Q_{90}) (VIEIRA, 2012), $m^3 \text{ ano}^{-1}$.

A escassez de água azul em uma bacia (EAazul) é a divisão entre as pegadas hídricas azuis totais na bacia (PHazul) e a DAazul. Uma escassez de água azul superior à unidade não é sustentável.

Sustentabilidade da PHverde

A PHverde de uma bacia torna-se crítica ambientalmente quando ela excede disponibilidade da água verde (DAverde). A DAverde em uma bacia, num determinado período, é definida pela equação 14.

$$DA_{verde} = ET_{verde} - ET_{amb} - ET_{improd} \quad (14)$$

em que: DAverde = disponibilidade de água verde, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; ET_{verde} = evapotranspiração da água da chuva, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; ET_{amb} = evapotranspiração da cobertura vegetal natural, $m^3 \text{ ano}^{-1}$; e ET_{improd} = evapotranspiração das áreas improdutivas, $m^3 \text{ ano}^{-1}$.

A ET_{verde} foi considerada como o total médio precipitado mensalmente ou anualmente em cada município

da BHRI. A ET_{amb} foi igual ao somatório da evapotranspiração das áreas de coberturas florestais nativas quantificadas na bacia. Para o cálculo da ET_{improd} foram considerados as áreas edificadas, as áreas sob solo exposto, as estradas e os afloramentos rochosos.

A escassez de água verde em uma bacia (EAverde) é obtida pela quociente entre as pegadas hídricas verdes totais na bacia (PHverde) e a DAverde. A EAverde deve-se manter entre zero e 0,9 para ser considerada sustentável ambientalmente. Uma escassez maior ou igual a 1,0 significa que toda a água disponível foi consumida e então a pegada é insustentável.

Sustentabilidade da PHcinza

Como indicador da sustentabilidade da PHcinza usa-se o nível de poluição da água (NPA) (equação 15) em uma bacia. Valores de NPA superiores à unidade indicam que a capacidade de assimilação de resíduos foi totalmente utilizada.

$$NPA = \frac{PH_{cinza}}{Q_{real}} \quad (15)$$

em que: NPA = nível de poluição da água na bacia, adimensional; e Q_{real} = escoamento real da bacia, considerado com a vazão média, $m^3 \text{ ano}^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Contabilização da pegada hídrica

Na Tabela 4 apresentam-se os valores da pegada hídrica calculados para a bacia hidrográfica do Rio Itapemirim, divididas conforme o componente (verde, azul ou cinza) e os tipos de usos em cada componente. A pegada hídrica total para a BHRI, no período estudado, foi de aproximadamente 6,4 bilhões $m^3 \text{ ano}^{-1}$. Conforme pode ser observado, a maior contribuição para a PH total da bacia foi o componente verde, representado 89,8% desta, seguido pelos componentes cinza e azul, com 6,4% e 3,6%, respectivamente.

Tabela 4. Distribuição da pegada hídrica (PH) segundo os componentes (verde, azul e cinza) e setores usuários na bacia hidrográfica do rio Itapemirim

Componente	Tipos de usos	PH _{setor} (10 ⁶ m ³ ano ⁻¹)	Percentual da PH	PH (10 ⁶ m ³ ano ⁻¹)	Percentual da PH total
PH _{azul}	Agricultura	165,43	69%	241,17	3,6%
	Pecuária	23,61	10%		
	Abastecimento Rural	5,42	2%		
	Abastecimento Urbano	46,71	19%		
PH _{verde}	Agricultura	1.003,58	17%	5.958,89	89,8%
	Pastagem (pecuária)	3.220,17	54%		
	Floresta	1.735,14	29%		
PH _{cinza}	Agricultura	36,70	8%	434,14	6,4%
	Saneamento	397,44	92%		
Total				6.634,19	100%

Em termos de valores médios globais, a pegada hídrica da Terra, entre os anos de 1996 a 2005, foi distribuída entre seus três componentes da seguinte forma: PHverde com 73% do total, seguida da PHcinza com 15% e apenas 11% para a PHazul (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011). No presente trabalho, a distribuição da pegada hídrica na BHRI é diferente da avaliação global das bacias, uma vez que a densidade populacional e industrialização são reduzidas, refletindo em uma menor participação da PHcinza e maior da PHverde.

A PHazul total da BHRI foi contabilizada considerando-se o abastecimento dos núcleos urbanos, dos núcleos populacionais rurais e o consumo do rebanho, sendo igual a 75,73 milhões m^3 ano⁻¹. A PHazul dos núcleos urbanos (abastecimento urbano) foi de 46,71 milhões de m^3 ano⁻¹, sendo que o município de Cachoeiro de Itapemirim obteve o maior valor, correspondendo a 55,5% do total (

Tabela 5). Esse resultado justifica-se, pois, a cidade de Cachoeiro de Itapemirim é a maior e mais populosa da BHRI, possuindo o maior complexo de distribuição de água tratada, com 100% da população urbana atendida. Ainda com relação à

Tabela 5, a PHazul do abastecimento urbano do município de Presidente Kennedy foi igual a zero, devido ao fato de não haver núcleos urbanos do município dentro da BHRI.

Ainda avaliando os dados apresentados na Tabela 4, observa-se que os dois tipos de usos que a zona rural (abastecimento rural e pecuária) detém apenas 21% da PHazul. De modo semelhante ao observado na BHRI, uma avaliação da PHazul na bacia do rio Amarelo, na China (FENG et al., 2012), mostrou que o uso da água no abastecimento urbano consome um volume duas vezes maior do que no setor rural. A maior pegada para a área urbana está ligada não apenas ao tamanho da população, como também ao maior consumo de bens e serviços nestas, que aumentam a demanda hídrica da população.

Com relação à PHverde, observa-se que, dos mais de 5,9 bilhões $m^3 \text{ ano}^{-1}$ que são apropriados, 54% referem-se ao consumo das pastagens, 29% à evapotranspiração das florestas (Mata Atlântica, Campo de Altitude, Restinga, Mangue, Reflorestamento com eucalipto, seringueira ou pinus) e 17% são pertinentes à agricultura. A PHverde das pastagens é, portanto, superior à soma pegadas da agricultura e das florestas. Isso pode ser atribuído pela vasta área que esse tipo de vegetação ocupa na bacia, cerca de 50% do território, enquanto as florestas e agricultura ocupam apenas 25% e 17%, respectivamente.

Tabela 5. Pegada hídrica azul (PHazul) do abastecimento urbano em cada município da bacia hidrográficas do rio Itapemirim

Município	PHazul ($m^3 \text{ ano}^{-1}$)	Fração da PHazul do abast. urbano (%)
Alegre	3.542.120,6	7,6
Atílio Vivacqua	440.558,6	0,9
Cachoeiro de Itapemirim	25.912.992,5	55,5
Castelo	3.128.688,7	6,7
Conceição do Castelo	621.173,4	1,3
Ibatiba	1.922.535,3	4,1
Ibitirama	747.191,5	1,6
Irupi	936.549,8	2,0
Itapemirim*	4.038.097,3	8,6
Marataízes*		
Iúna	819.417,7	1,8
Jerônimo Monteiro	791.761,6	1,7
Muniz Freire	723.650,8	1,5
Muqui*	1.159.606,8	2,5
Presidente Kennedy*	0,00	0,0
Vargem Alta*	710.041,8	1,5
Venda Nova do Imigrante	1.214.271,0	2,6
Total	46.708.657,7	100

* Municípios apenas parcialmente inseridos dentro da BHRI

Na Tabela 6 apresenta-se a relação percentual entre o volume de chuva precipitado e o volume apropriado na PHverde, em cada município da BHRI. Observa-se que, em média, na BHRI, 74% da precipitação anual é apropriada pela vegetação constituindo a PHverde total, ou seja, 74% da chuva é evapotranspirada pela vegetação nativa ou plantada. Os municípios em que os valores foram mais discrepantes destes 74% (Marataízes, Presidente Kennedy e Vargem Alta) não possuem a totalidade de sua área dentro da BRHI, sendo que os valores encontrados na Tabela 6 podem não ser representativos da realidade do município inteiro.

Nos municípios de Alegre, Atílio Vivacqua, Itapemirim, Jerônimo Monteiro e Presidente Kennedy as áreas de pastagem foram responsáveis pelas maiores frações de consumo da água proveniente da chuva (mais que 50% do volume precipitado). Com relação ao município de Presidente Kennedy, convém deixar claro que apenas uma pequena área deste, na qual predominam as pastagens, está dentro da BHRI. Desta forma justifica-se o alto percentual de chuva convertido em consumo das pastagens (72%), o qual não é representativo do município inteiro, mas apenas da fração de sua área inserida na bacia do Itapemirim.

Considerando as florestas, Conceição do Castelo, Ibitirama, Marataízes, Vargem Alta e Venda Nova do Imigrante são municípios que concentram grandes áreas de

mata ainda preservadas e/ou reflorestadas. Em vista disso, essas áreas consomem mais que 30% do volume precipitado.

Já em relação à agricultura, os municípios de Ibatiba, Irupi e Iúna, que tem suas economias baseadas na produção agrícola, em especial da cafeicultura, detêm o percentual de chuva absorvido apenas pela agricultura superior a 30% do volume precipitado.

Tabela 6. Relação percentual entre o volume de chuva precipitado e a pegada hídrica verde na bacia hidrográfica do rio Itapemirim

Município	Relação entre a PHverde e o volume precipitado (%)			
	Total	Pastagem	Floresta	Agricultura
Alegre	75	54	14	7
Atilio Vivacqua	81	54	17	11
Cachoeiro de Itapemirim	73	48	18	8
Castelo	72	30	25	17
Conceição do Castelo	70	23	33	14
Ibatiba	71	23	15	34
Ibitirama	73	29	31	13
Irupi	72	24	14	34
Itapemirim*	78	55	10	13
Iúna	77	29	17	31
Jerônimo Monteiro	78	51	13	14
Marataízes*	46	3	30	13
Muniz Freire	73	39	21	12
Muqui*	78	45	22	11
Presidente Kennedy*	86	72	12	2
Vargem Alta*	85	18	48	19
Venda Nova do Imigrante	71	12	35	24

* Municípios apenas parcialmente inseridos dentro da BHRI

Com relação à PHcinza da BHRI (Tabela 4), observa-se que o saneamento urbano foi responsável por 92% desta. Esses resultados são semelhantes, em termos percentuais, aos de Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), em estudo realizado para a bacia do rio Segura, Espanha, onde a maior parte da pegada hídrica cinza foi proveniente das demandas urbanas, sendo a concentração dos poluentes geradas no meio urbano mais sensível para o cálculo da pegada hídrica cinza. Observa-se que a PHcinza do saneamento urbano ($397,44 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$) teve participação muito superior à PHazul do abastecimento humano ($52,12 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$), sendo cerca de 7,5 vezes superior e demonstrando a alta demanda hídrica do sistema de esgotamento sanitário. Ainda de acordo esses resultados, e corroborando com afirmativa de outro estudo (VIEIRA; SOUSA JUNIOR, 2015), considera-se que a contaminação

dos cursos d'água contabilizada na PHcinza representa uma importante pressão sobre os recursos hídricos regionais, visto o grande volume de água necessário para assimilar a poluição do esgotamento sanitário.

A PHcinza da agricultura, calculada pela fração do uso de fertilizantes nitrogenados que atinge os mananciais, totalizou somente 8% da PHcinza da BHRI. O nitrogênio é um dos principais fertilizantes usados na agricultura e a fração deste que chega nos mananciais causa a degradação da qualidade da água (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2015). Ainda segundo estes autores, ao analisar somente o volume necessário para a assimilação de fertilizantes nitrogenados escoados, desconsiderando-se poluentes relevantes, tais como pesticidas, pode-se obter uma pegada cinza subestimada. Todavia, a falta de informação com respeito ao uso de pesticidas na BHRI levou a não consideração deste poluente no cálculo da PHcinza no presente trabalho.

Dividindo-se as pegadas hídricas expressas na Tabela 4 entre os setores usuários na BHRI (agricultura, pecuária, florestal e humano) têm-se as participações relativas expostas na Figura 4.

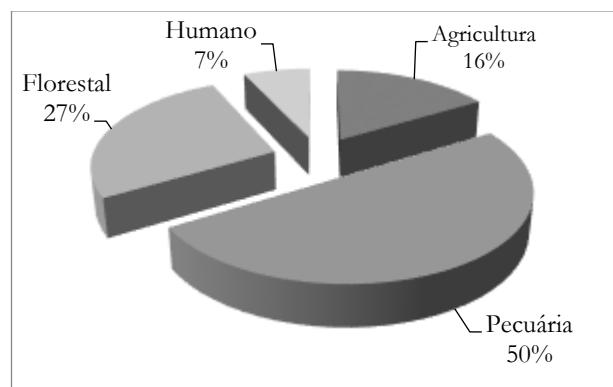


Figura 4. Participação relativa de cada setor usuário de água na pegada hídrica anual da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Observa-se que o setor pecuário, constituído pela PHverde das pastagens e pela PHazul da pecuária (dessedentação animal) é responsável por 50% da PHtotal da bacia. Como a agricultura, principal atividade da BHRI, é responsável por 16% de sua PH, tem-se que o setor agrícola (agricultura e pecuária em conjunto) apropria-se de 66% da água da BHRI. O setor humano (abastecimento humano e saneamento) é aquele que apresenta a menor PH, apropriando-se de apenas 7% da água. Na bacia do rio Heihe (China), estimativas mostram situação semelhante, no qual o setor humano contribui com apenas 4% da pegada hídrica (ZENG et al., 2012).

A classe florestal constituída em conjunto, pelas florestas nativas e plantadas, apropria-se de apenas 27% da água. A cobertura florestal ocupa cerca de 25% da área total da bacia, e o consumo e incorporação da água verde é o necessário apenas para a manutenção desse ecossistema, não se mostrando um dos maiores responsáveis por uma

possível diminuição da disponibilidade de água doce na bacia.

Da pegada hídrica total da BHRI, 93% da água é apropriada para a produção de alimento e fibras (setores agricultura, pecuária e florestal). De forma semelhante, dados médios para o planeta mostram que a produção de alimentos é responsável por 92% da PH (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011).

Isso posto, nota-se que as principais atividades que se apropriam da água doce BHRI são aquelas desenvolvidas no meio rural (agricultura, pecuária e florestas), principalmente devido ao consumo da água da chuva (água verde). Portanto, o consumo de água doce pelo setor urbano nem sempre pode ser responsabilizado pela escassez hídrica do abastecimento, comum em alguns meses, visto que representa o menor consumo dentre os setores.

Análise de sustentabilidade

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise de sustentabilidade da PH nas sub-bacias que compõem a BHRI, com seus respectivos índices de escassez de água azul (EA_{azul}). Para cada sub-bacia e cada mês, foi obtido um EA_{azul} , com base na relação entre a PH_{azul} e a sua

disponibilidade (escoamento natural menos a demanda de vazão ambiental). Em todas as sub-bacias e para todos os meses a PH_{azul} foi inferior a 79% do escoamento natural daquele mês. Isso significa que existe pouca ou nenhuma escassez de água azul e a bacia satisfaz plenamente a exigência da demanda de vazão ambiental daquele mês, ou seja, a pegada azul pode ser considerada sustentável ambientalmente.

No entanto, nota-se que as sub-bacias de Castelo, Fazenda Lajinha e Usina São Miguel, todas na bacia do rio Castelo, apresentam EA_{azul} mais elevados do que as demais, sobretudo ao final da estação seca (julho a setembro). Provavelmente, por serem sub-bacias menores, com menores valores de vazão, estas estejam sujeitas a uma maior pressão sob os recursos hídricos disponíveis. Considerando-se que as vazões mínimas normalmente ocorrem no mês de setembro, e que a vazão de captação outorgável no Espírito Santo limita-se a 50% das vazões mínimas de referência em uma seção específica (Instrução Normativa IEMA nº 019, de 04 de outubro de 2015), valores de EA_{azul} superiores a 0,5 são preocupantes com relação à manutenção do abastecimento.

Tabela 7. Índices de escassez de água azul, em escala mensal, nas diferentes sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim.

Mês	Índice de escassez da água azul por sub-bacia (entre 0 e 1)										
	UFO	FLA	IBI	IUN	TCM	CAS	ITA	USM	RIV	FCA	UPA
Jan.	< 0,01	0,03	< 0,01	0,01	0,01	0,02	< 0,01	0,04	< 0,01	0,01	0,01
Fev.	< 0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,06	0,01	0,01	0,02
Mar.	< 0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02
Abr.	< 0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02
Mai	0,01	0,08	0,02	0,03	0,02	0,06	0,01	0,11	0,02	0,02	0,04
Jun.	0,01	0,13	0,04	0,04	0,03	0,11	0,03	0,17	0,03	0,03	0,07
Jul.	0,02	0,19	0,07	0,05	0,05	0,16	0,05	0,26	0,04	0,05	0,11
Ago.	0,11	0,35	0,15	0,08	0,08	0,23	0,09	0,47	0,07	0,08	0,20
Set.	0,12	0,58	0,10	0,09	0,09	0,35	0,15	0,79	0,09	0,09	0,31
Out.	0,03	0,20	0,02	0,06	0,06	0,14	0,05	0,28	0,04	0,06	0,11
Nov.	< 0,01	0,05	< 0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,01	0,01	0,02
Dez.	< 0,01	0,03	< 0,01	0,01	0,01	0,02	< 0,01	0,05	< 0,01	0,01	0,01

UFO – Usina Fortaleza; FLA – Fazenda Lajinha; IBI – Ibitirama; IUN – Iúna; TCM – Terra Corrida Montante; CAS – Castelo; ITA – Itaici; USM – Usina São Miguel; RIV – Rive; FCA – Fazenda Caixeta; UPA – Usina Paineiras

Os resultados para a sustentabilidade ambiental verde são apresentados na Figura 5, apenas para a BHRI como um todo, e não em nível de sub-bacias. Observa-se que a PH_{verde} se mostrou insustentável ($EA_{verde} > 1,0$) em mais da metade do ano, especificamente nos meses de fevereiro e de abril a setembro. No mês de junho o EA_{verde} atingiu seu valor máximo (2,87). Nos meses de meados no ano, ocorre a estação seca, com uma menor quantidade de chuva disponível para as atividades agrícolas e florestais, quando muitas vezes os requisitos hídricos das culturas não são atendidos, causando redução na produção agrícola e prejuízos econômicos.

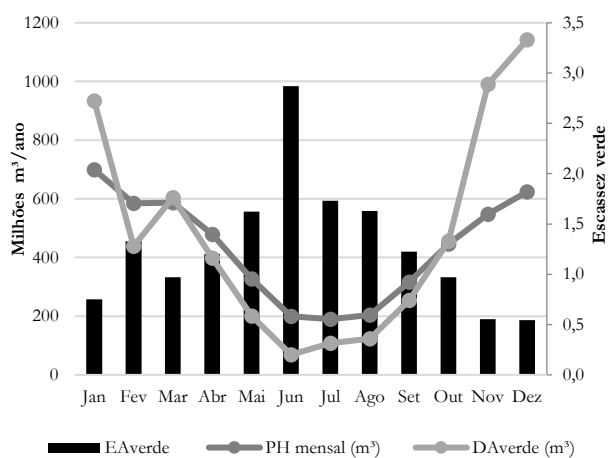


Figura 5. Sustentabilidade da pegada verde da bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

Assim como na sustentabilidade da PH_{azul} , avaliou-se mensalmente a sustentabilidade da PH_{cinza} em nível de sub-bacias, sendo os resultados apresentados na

. Observa-se que em todas as sub-bacias a PH_{cinza} foi sustentável. Nas sub-bacias de Ibitirama, Terra Corrida Montante, Castelo, Usina São Miguel, Fazenda Caixeta e Usina Paineiras a pegada cinza apresentou, em alguns meses, nível de poluição da água (NPA) próximo ou até mesmo maior que 0,30. Isso é devido ao período de seca da região, quando a vazão disponível para a diluição dos poluentes é reduzida. Ainda assim, nem toda a água disponível foi utilizada para a diluição da poluição causada pelo esgoto lançados nos rios. Nos meses chuvosos para a região da bacia, em que normalmente ocorre um aumento da vazão, que vai de outubro a março, o índice NPA fica abaixo de 0,20 em todas as sub-bacias.

A sustentabilidade cinza se mostra estável, em todas as sub-bacias, devido ao lançamento de poluentes urbanos ser constante durante o ano, bem como a variabilidade nas taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados e sazonalidade do período em que são aplicadas as culturas. Em relação à distribuição espacial, observa-se que mesmo as sub-bacias próximas à foz, também apresentam maiores índices no nível de poluição das águas apesar do maior volume em vazão. Isso está relacionado à carga de poluente que se acumula ao longo dos afluentes que compõem a bacia e não são capazes de serem totalmente assimilados.

Tabela 8. Níveis de poluição da água (NPA), em escala mensal, nas diferentes sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim.

Mês	Nível de poluição da água por sub-bacia (entre 0 e 1)										
	UFO	FLA	IBI	IUN	TCM	CAS	ITA	USM	RIV	FCA	UPA
Jan.	0,02	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,04	0,07	0,03	0,06	0,08
Fev.	0,02	0,06	0,07	0,10	0,10	0,10	0,06	0,10	0,05	0,10	0,12
Mar.	0,02	0,05	0,07	0,09	0,09	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,11
Abr.	0,03	0,07	0,11	0,11	0,12	0,11	0,07	0,10	0,07	0,12	0,14
Mai	0,04	0,11	0,18	0,14	0,17	0,17	0,10	0,15	0,10	0,17	0,21
Jun.	0,05	0,14	0,25	0,17	0,20	0,22	0,13	0,20	0,12	0,20	0,28
Jul.	0,06	0,17	0,31	0,19	0,23	0,26	0,15	0,24	0,15	0,23	0,34
Ago.	0,07	0,20	0,36	0,20	0,26	0,29	0,17	0,26	0,17	0,26	0,39
Set.	0,07	0,19	0,29	0,19	0,26	0,29	0,17	0,26	0,16	0,26	0,38
Out.	0,05	0,15	0,16	0,17	0,22	0,22	0,14	0,21	0,12	0,22	0,29
Nov.	0,02	0,06	0,06	0,11	0,12	0,10	0,07	0,10	0,06	0,12	0,13
Dez.	0,02	0,04	0,04	0,07	0,08	0,07	0,04	0,07	0,04	0,08	0,09

UFO – Usina Fortaleza; FLA – Fazenda Laginha; IBI – Ibitirama; IUN – Iúna; TCM – Terra Corrida Montante; CAS – Castelo; ITA – Itaici; USM – Usina São Miguel; RIV – Rive; FCA – Fazenda Caixeta; UPA – Usina Paineira

Relacionando-se os resultados apresentados na Tabela 7 com aqueles da

, pode-se inferir sobre um cenário preocupante nos meses de agosto e setembro para as sub-bacias inseridas na bacia do rio Castelo (Fazenda Lajinha, Castelo e Usina São Miguel). Nestas sub-bacias, a EA_{verde} é relativamente alta (entre 0,23 e 0,79), embora sustentável, nestes meses. O NPA nos mesmos meses e nas mesmas sub-bacias também é relativamente alto (entre 0,19 e 0,29), o que pode acarretar em insustentabilidade das duas pegadas em conjunto, especialmente para USM, no mês de setembro.

CONCLUSÕES

Tomando como base os resultados deste trabalho pode-se concluir que:

- A maior contribuição para a pegada hídrica na bacia foi relacionada à PH_{verde} , com 89,8% do total.
- Em média, 74% do volume anual precipitado na BHRI é convertido em evapotranspiração dos cultivos (PH_{verde}).
- O setor usuário relacionado à produção agropecuária é o maior apropriador de água na BHRI, impulsionado pela componente água verde.
- A PH_{verde} apresentou-se insustentável do ponto de vista ambiental durante parte do ano, principalmente nos meses de abril a setembro, caracterizado pelo inverno seco na região da bacia.
- Tanto a PH_{azul} quanto a PH_{cinza} foram sustentáveis, embora evidenciando situações preocupantes na bacia hidrográfica do rio Castelo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água**.
- CESAN. **Relatório Anual & de Sustentabilidade 2012**. [s.l: s.n.].
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-f2430e.pdf>>.
- FENG, K. et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography*, v. 32, n. 2, p. 691–701, 2012.
- GEOBASES. **Sistema integrado de bases geoespaciais do Estado do Espírito Santo**. Disponível em: <<http://www.geobases.es.gov.br/>>. Acesso em: 7 jul. 2012.
- HOEKSTRA, A. Y. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**, 2011.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 28 abr. 2016.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50**. Delft: [s.n.]. Disponível em: <<http://doc.utwente.nl/76913/1/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf>>.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Global Gray Water Footprint and Water Pollution Levels Related to Anthropogenic Nitrogen Loads to Fresh Water. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 21, p. 12860–12868, nov. 2015.
- PALHARES, J. C. P. **Estimando consumo de água de suínos, aves e bovinos em uma propriedade**. [s.l: s.n.].
- PALHARES, J. C. P. **Consumo de água na produção animal**. São Carlos, SP: [s.n.].
- PASTRO, M. S. **Qualidade da água em microbacias hidrográficas com diferentes coberturas vegetais**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.
- PELLICER-MARTÍNEZ, F.; MARTÍNEZ-PAZ, J. M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 1173–1183, 2016.
- PEZZOPANE, J. E. M. et al. **Agrometeorologia: Aplicações para o Espírito Santo**. Alegre, ES: [s.n.].
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Publications in Climatology*, v. 8, n. 1, 1955.
- VIEIRA, B. C. **Pegada Hídrica Sob Cenários de Expansão Urbana e Mudanças Climáticas Em Um Município do Litoral Norte de São Paulo**. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2012.
- VIEIRA, B.; SOUSA JUNIOR, W. Contribuições para abordagem municipal da pegada hídrica: estudo de caso no litoral de São Paulo. *Ambiente & Sociedade*, v. 18, n. 3, p. 231–252, 2015.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte:

DESA/UFMG, 2005.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World**. Paris: UNESCO, and London: Earthscan.: [s.n.].

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, p. n/a-n/a, out. 2015.

ZENG, Z. et al. Assessing water footprint at river basin level: A case study for the Heihe River Basin in northwest China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 8, p. 2771–2781, 2012.

ZHAO, X.; CHEN, B.; YANG, Z. F. Applying the Input-Output Method to Account for Water Footprint and Virtual Water Trade in the Haihe River Basin in China. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 23, p. 9150–9156, 2010.

