



DESENVOLVIMENTO
E MEIO AMBIENTE

SISTEMA
ELETRÔNICO
DE REVISTAS
SER | UFPR

www.ser.ufpr.br

Eletricidade para o bombeamento de água subterrânea: limitações e oportunidades para respostas adaptativas às mudanças climáticas*

Electricity for Groundwater Use: Constraints and Opportunities for Adaptive Response to Climate Change

Christopher A. SCOTT¹

¹ Ph.D. in Hydrology (Cornell University). University of Arizona, Udall Center for Studies in Public Policy/School of Geography & Development. E-mail: cascott@email.arizona.edu

Artigo: Recebido em: 5 de março de 2014; Versão final aceita em: 5 de março de 2014.

RESUMO

Globalmente, o uso de água subterrânea tem se intensificado para suprir as demandas de irrigação, abastecimento urbano, industrialização e, em alguns casos, geração de energia elétrica. Em resposta à variabilidade hidroclimática, a água superficial vem sendo substituída por água subterrânea, o que deve ser visto como um recurso estratégico para a adaptação climática. Nesse sentido, o abastecimento de eletricidade para o bombeamento de água seria uma ferramenta política de adaptação. O presente trabalho examina a influência do abastecimento e dos preços da eletricidade sobre a irrigação com água subterrânea e as emissões resultantes, referindo-se mais especificamente ao caso do México – uma “tempestade perfeita” na relação entre clima, água e energia. O abastecimento de energia no período da noite, com tarifas abaixo das taxas já subsidiadas para o uso agrícola de água subterrânea, levou os produtores mexicanos a intensificarem o bombeamento, revertendo os efeitos de avanços importantes no condizente à conservação de água e eletricidade. O bombeamento indiscriminado de água subterrânea, incluindo exportação de água virtual na produção agrícola, ameaça a sustentabilidade dos aquíferos a longo prazo, bem como dos usos não agrícolas da água e das interações entre rios e aquíferos que mantêm os ecossistemas ribeirinhos. Estima-se que as emissões resultantes da extração de água subterrânea para uso agrícola no México represente 3,6% das emissões nacionais totais e sejam equivalentes às emissões para o transporte dessa mesma produção agrícola ao mercado. O artigo conclui com uma avaliação das tendências em energia, água e clima, combinadas com políticas futuras para tratar desses desafios.

Palavras-chave: mudanças climáticas; adaptação; política; água subterrânea;nexo água-energia; água virtual; México.

* Artigo originalmente publicado em *Environmental Research Letters*, 8(3), 8, 2007. Tradução: Adriano Scandolara. Revisão técnica: Janaina Camile Pasqual.

ABSTRACT Globally, groundwater use is intensifying to meet demands for irrigation, urban supply, industrialization, and, in some instances, electrical power generation. In response to hydroclimatic variability, surface water is being substituted with groundwater, which must be viewed as a strategic resource for climate adaptation. In this sense, the supply of electricity for pumping is an adaptation policy tool. Additionally, planning for climate-change mitigation must consider CO₂ emissions resulting from pumping. This paper examines the influence of electricity supply and pricing on groundwater irrigation and resulting emissions, with specific reference to Mexico – a climate-water-energy ‘perfect storm’. Night-time power supply at tariffs below the already-subsidized rates for agricultural groundwater use has caused Mexican farmers to increase pumping, reversing important water and electricity conservation gains achieved. Indiscriminate groundwater pumping, including for virtual-water exports of agricultural produce, threatens the long-term sustainability of aquifers, non-agricultural water uses, and stream-aquifer interactions that sustain riparian ecosystems. Emissions resulting from agricultural groundwater pumping in Mexico are estimated to be 3.6% of total national emissions and are equivalent to emissions from transporting the same agricultural produce to market. The paper concludes with an assessment of energy, water, and climate trends coupled with policy futures to address these challenges.

Keywords: climate change; adaptation; policy; groundwater; water-energy nexus; virtual water; Mexico.

1. Introdução

A combinação dos efeitos das mudanças climáticas, dos desvios dos canais de água superficial e da exploração das águas subterrâneas para uso humano ameaça a segurança hídrica em um número cada vez maior de regiões em todo o mundo (Vörösmarty *et al.*, 2010). Os seres humanos vêm exercendo impactos crescentes sobre os sistemas da Terra, sobretudo nos recursos hídricos (Sivapalan *et al.*, 2012). Uma das principais preocupações é com o futuro da disponibilidade e da qualidade dos recursos hídricos para o desenvolvimento energético (Hightower & Pierce, 2008, King *et al.*, 2008), especialmente para a geração de energia elétrica (Grubert *et al.*, 2012). Em contrapartida, as demandas energéticas para a extração, transporte, tratamento e recuperação de água tendem a continuar crescendo no futuro. As tendências temporais e a distribuição espacial do nexo água-energia pelas regiões de todo o mundo têm profundas implicações para a urbanização, para a agricultura e a segurança alimentar e para a prestação de serviços ecossistêmicos. Além da pesquisa para as avaliações em conjunto dos recursos água e energia e das dimensões biofísicas desse nexo, há um reconhecimento cada vez maior dos desafios e das oportunidades para a criação de políticas que a junção desses dois recursos apresenta (Scott *et al.*, 2011), sobretudo para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas (Bazilian *et al.*, 2011).

O presente artigo é uma versão modificada de uma análise anterior publicada no *Environmental Research Letters* (Scott, 2013), que examinou as conexões entre eletricidade, água e clima, com referência específica às águas subterrâneas – um recurso de importância global estratégica e econômica cada vez maior e mais vulnerável às mudanças climáticas (Döll, 2009; Treidel *et al.*, 2012) e à sobre-exploração, que pode levar ao esgotamento (Aeschbach-Hertig & Gleeson, 2012). As mudanças climáticas são um multiplicador de forças para as águas subterrâneas (Shah, 2009), ou seja, elas tendem a aumentar a demanda ao mesmo tempo em que reduzem a reposição. Em todo o mundo, a água subterrânea é responsável por uma cota cada vez maior do fornecimento de água para irrigação na agricultura que, de todos os usos humanos, é o que requer o maior volume de uso de água (Siebert *et al.*, 2010). Devido ao bombeamento de água subterrânea ser uma atividade de alto consumo energético, representa uma forma especial do nexo água-energia, em que a água é necessária para gerar a maioria das formas de eletricidade usadas para bombear a água subterrânea. Um outro ponto em que esse nexo ocorre é quando a água subterrânea é usada para o resfriamento termelétrico ou para a geração solar concentrada – práticas cada vez mais adotadas em regiões em que a água é escassa (King *et al.*, 2008; Siddiqi & Anadon, 2011; CONAGUA, 2013).

Tais manifestações do nexo eletricidade-águas subterrâneas trazem à tona perguntas importantes para

a adaptação aos processos simultâneos da mudança ambiental global, incluindo as mudanças climáticas, a globalização dos sistemas alimentícios e os serviços ecossistêmicos dependentes de recursos hídricos, entre outros (Scott *et al.*, 2013). A abordagem conceitual e a análise empírica apresentadas neste artigo baseiam-se em trabalhos anteriores (Scott, 2011, que explorava os impactos do esgotamento das águas subterrâneas nos cenários do clima e de fornecimento de energia), em particular no avanço da compreensão científica e política das interconexões entre fornecimento energético, exploração de águas subterrâneas e respostas adaptativas às mudanças climáticas. O caso do México é apresentado como um exemplo especialmente convincente e instrutivo, dada sua dependência de combustíveis fósseis para a geração de energia, a imensa dependência de águas subterrâneas para a irrigação e outras demandas hídricas, e a localização geográfica e vulnerabilidade aos impactos causados pelas mudanças climáticas. Primeiramente, os motivadores hidroclimáticos e humanos do uso das águas subterrâneas são apresentados brevemente. A isso se segue uma avaliação do nexo eletricidade-águas subterrâneas e os padrões de demanda de recursos, incluindo a exportação virtual de água e eletricidade consumidas na produção de *commodities* agrícolas, transportadas além das fronteiras nacionais. Por fim, é apresentado e avaliado um conjunto mais amplo de implicações políticas e opções de resposta adaptativa.

2. Mudanças climáticas e variabilidade hidrológica afetam a demanda de água subterrânea

As mudanças climáticas influenciam os processos hidrológicos a curto e longo prazos e causam impactos diretos sobre os recursos hídricos em uma ampla gama de escalas espaciais (Milly *et al.*, 2008; Loáiciga, 2009; Roy *et al.*, 2012). Apesar de eventos extremos emblemáticos, como o furacão Sandy, em 2012, a escassez e a degradação da qualidade da água estarão entre os

desafios crônicos dos recursos hídricos no futuro, sobretudo nas regiões áridas e semiáridas. Longos períodos de seca, ondas de calor, incêndios florestais e quedas nos níveis d'água nos reservatórios são apenas alguns dos sintomas mais visíveis. Somadas a esses fatores e impactos biofísicos, as demandas hídricas humanas estão em crescimento em resposta à mudança e à variabilidade hidroclimáticas, bem como por consequência do crescimento populacional, do desenvolvimento econômico e dos imperativos da conservação do ecossistema.

2.1. Projeções do clima

As projeções de modelos climáticos de temperatura e precipitação são muito semelhantes em várias regiões de todo o globo que já sofrem de escassez de água. Ainda que os impactos específicos variem de acordo com cada local, a combinação do aumento das temperaturas e a maior variabilidade das precipitações terão um efeito negativo sobre a disponibilidade física da água (Bovololo *et al.*, 2009). A precipitação sobre as latitudes médias, segundo projeções, deverá sofrer variações e entrar em declínio ao longo do século 21, frente a um cenário de maior emissão de carbono, agravando ainda mais a disponibilidade da água para fins humanos e ecossistêmicos (Burkett *et al.*, 2005).

Diffenbaugh e Giorgi (2012) avaliaram as simulações RCP8.5 do grupo CMIP5¹ (com concentrações de gases do efeito estufa excedendo 1.370 ppm CO₂ e em 2100, forçamento radiativo de ~8.5 W/m² e aquecimento global médio de 4,9°C acima dos níveis pré-industriais). Os autores identificaram a América Central e o oeste da América do Norte, dentre outras regiões, como os principais focos de tensão das mudanças climáticas. Segundo as projeções, deve-se esperar aumentos de 4-5°C na temperatura, comparando o período de 2080-2099 com o período de referência 1986-2005, considerando os meses de Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e Junho-Julho-Agosto (JJA). Com base nessa mesma referência e períodos de tempo futuro, foram calculadas

¹ CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5) significa Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 5, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPPC).

quedas de precipitação de 10-30% para DJF e 0-20% para JJA. Knutti e Sedláček (2013) compararam as projeções CMIP5 e IPCC AR4, levando em consideração as diferenças nos quadros de emissão, e concluíram que as projeções de temperatura e precipitação entre os dois modelos apresentavam um grau semelhante de magnitude, tempo de surgimento e distribuição espacial ao longo da América Central e do oeste da América do Norte. Essas descobertas reforçam as implicações dos estudos de recursos hídricos baseados no modelo AR4 (Scott, 2011, sobre o qual este artigo se baseia), além de registros observacionais (Matías & Magaña, 2010; Brito-Castillo, 2012) e indicam que, sob as projeções CMIP5, as regiões áridas e semiáridas do norte e centro do México enfrentarão maiores motivadores climáticos de escassez de água.

2.2. Variabilidade e resposta adaptativa

Em termos hidrológicos, reagir à variabilidade da precipitação e mudanças na sazonalidade com processos de captação e escoamento resultaria em um nível fluvial mais variável no noroeste do México (Gochis *et al.*, 2006), o que, por sua vez, faz com que a água superficial seja um recurso menos confiável como fonte para irrigação e outros usos humanos, mesmo com reservatórios de armazenamento de superfície. Como resultado, tem sido documentada uma maior exploração de águas subterrâneas (CONAGUA, 2011). Ao mesmo tempo, é provável que a reposição das águas subterrâneas diminua, com base nas projeções de quedas de precipitação no inverno, que é quando ocorre boa parte da reposição em regiões áridas (Flint & Flint, 2007). Portanto, os efeitos combinados de aumentos de temperatura, queda e maior variabilidade da precipitação e reduções nas precipitações hibernais (Gutierrez-Ruacho *et al.*, 2010) levarão a um aumento do uso de água subterrânea nas regiões centro e norte do México.

A intensificação do uso das águas subterrâneas traz à tona dúvidas importantes sobre a questão da adaptação. A substituição do uso da água superficial pela subterrânea é uma estratégia de abastecimento importante a curto prazo. No entanto, o aumento da demanda, somado à queda e à variabilidade da reposição ao longo do tempo,

pode enfraquecer essa abordagem. Os principais desafios são a confiabilidade da disponibilidade de água a longo prazo, na medida em que a captura de água superficial e o consumo dos níveis fluviais resultam da queda dos níveis já baixos dos aquíferos (Barlow & Leake, 2012), do fornecimento de energia e das emissões associadas ao abastecimento de energia (abastecimento de energia e questões de preço serão apresentados e discutidos na seção 3.1, a seguir), sobretudo em relação à viabilidade da agricultura de irrigação e à importância central das águas subterrâneas para a produtividade agrícola e vida rural. Nesse contexto, o uso sustentável de água subterrânea pode representar uma estratégia de adaptação, se os sistemas de gestão apropriados forem utilizados para restringir o uso e o consumo excessivo, ao mesmo tempo em que suprem a dependência humana (sobretudo para segurança alimentar) e ecossistêmica. Abordagens eficazes para a gestão as águas subterrâneas, em termos mais gerais, estão além do escopo deste artigo, mas já foram tratadas em outros trabalhos (Aeschbach-Hertig & Gleeson, 2012; Shah, 2009, entre outros).

3. O nexa eletricidade-água subterrânea

Há milênios os humanos extraem água subterrânea por meio de poços abertos e minas escoadas, utilizando uma grande variedade de dispositivos de elevação e fontes de energia. Com as inovações da tecnologia a vapor e o advento das bombas elétricas, por volta do final do século XIX, os humanos possuíam tanto a tecnologia quanto a energia necessárias para exercer impactos consideráveis sobre as águas subterrâneas (Wescoat, 2013). Com a eletrificação rural, que ocorreu entre o começo e a metade do século XX, os países que hoje extraem os maiores volumes de água subterrânea (Índia, China, Estados Unidos e México, para citar só alguns) acabaram transformando seus setores de irrigação. Nas regiões afetadas por escassez de água, no entanto, o uso de bombas elétricas para exploração de águas subterrâneas tem levado a uma série de desafios para o planejamento do uso de recursos hídricos, dinâmicas de ecossistemas ribeirinhos e a viabilidade social e econômica da agricultura dependente dessas águas. Essas questões serão exploradas brevemente neste artigo, levando em

consideração as experiências do México no passado, a situação atual e a trajetória futura.

3.1. México – “tempestade perfeita”

Três fatores centrais fazem com que a região centro-norte do México seja especialmente sensível às interações entre o clima, água e energia. Em primeiro lugar, essa região sofre de escassez de água, causada pelas mudanças climáticas, pela variabilidade hidrológica e pelas demandas humanas de água, conforme citado anteriormente. Em segundo lugar, há pelo menos três décadas o uso de água subterrânea para irrigação tem sido uma constante na produção agropecuária. Dados oficiais de janeiro de 2013 estimam um uso nacional agropecuário de água subterrânea em 18,91 km³ por ano (de um total de 31,23 km³ de água subterrânea usada para todas as finalidades), uma quantidade elevada se comparada aos 49,44 km³ de água superficial utilizada para todas as finalidades em geral, exceto geração de energia hidrelétrica, considerada um uso não consuntivo (CONAGUA, 2013). A Comissão Nacional da Água (Comisión Nacional del Agua, ou CONAGUA) busca ativamente reduzir o volume total de água subterrânea concessionado para irrigação em aquíferos sobre-explorados e ceder novas concessões a aquíferos atualmente considerados como dotados de disponibilidade. Em teoria, as concessões para uso de água subterrânea reduziram 1,96 km³ no período entre 2009-2013; no entanto, as águas subterrâneas continuam representando mais de um terço da água total (55,41 km³) destinada à agropecuária e geram uma parcela ainda maior de retornos econômicos nesse setor. Em terceiro lugar, a matriz de geração elétrica do México é dominada por combustíveis fósseis (Santoyo-Castelazo *et al.*, 2011; Sheinbaum-Pardo *et al.*, 2012; CFE, 2013), o que faz com que as relações entre eletricidade, água e clima ganhem um destaque especial. O uso de água subterrânea para geração de eletricidade, mencionado na Introdução, é evidenciado pelos quatro títulos de concessão para esse propósito nos estados de Baja California Sur, Nuevo Leon e o Distrito Federal.

Com base nos dados presentes na Tabela 1, a extração de água subterrânea no México, em 2009, resultou em um total de emissões estimado em 4,7 milhões de

toneladas métricas de CO₂, equivalentes a 3,6% dos 129,8 milhões de toneladas de emissões nacionais totais de combustíveis fósseis em 2008 (Boden *et al.*, 2011). Em locais com profundas bombas dinâmicas, até 0,22 kg de CO₂ foram emitidos por m³ de água subterrânea extraído.

TABELA 1 – Emissões de CO₂ por fonte de energia e a matriz de geração de energia no México.

Fonte de Energia	Ton. CO ₂ por MWh*	Matriz de geração no México**
Carvão	0,9485	7%
Gás Natural	0,5091	47%
Petróleo	0,7318	27%
Hidrelétrica, geotérmica, eólica, solar		19%
Matriz composta ao longo da geração	0,5017	100%

FONTES: * <<http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=74&t=11>>;

** Compilado a partir de CFE 2013.

Os estados com os maiores volumes de água subterrânea extraída para irrigação foram Chihuahua e Sonora, na região noroeste, e Guanajuato, na região central do país (ver Figura 1). Na análise e discussão subsequentes será dado enfoque a esses estados, por serem especialmente ilustrativos sobre as conexões entre eletricidade, água e clima. Novos poços estão declarados como proibidos nos aquíferos listados pela CONAGUA, por sofrerem de sobre-exploração. Isso se aplica a 100 aquíferos a nível nacional (do total de 653 avaliados), 11 em Chihuahua (do total de 61), 11 em Guanajuato (18 ao todo) e 12 em Sonora (total 60).

As tarifas sobre o consumo de energia variam de acordo com o tipo de conexão, período do dia e região. Uma tarifa subsidiada (conhecida como tarifa 09) é disponibilizada “para bombeamento de água para irrigação agrícola” (CFE, 2013). Uma tarifa noturna especial “para incentivar o bombeamento de água para irrigação agrícola” (09-N, disponível para bombeamento entre meia-noite e 8 da manhã) foi apresentada em 2003 e entrou em vigor em 2004. Deve-se notar que uma quantidade insignificante de água superficial é bombeada para irrigação, por isso as tarifas 09 e 09-N fornecem



FIGURA 1 – Mapa do México com os estados que extraem as maiores quantidades de água subterrânea.

estimativas excelentes para o uso agrícola de águas subterrâneas (Muñoz *et al.*, 2006). A tarifa diurna 09 média é de US\$ 0,048/kWh, enquanto a 09-N é de US\$ 0,039/kWh, tarifas baixas se comparadas às de US\$ 0,227/kWh para serviços públicos, US\$ 0,234/kWh para uso geral de baixa tensão e US\$ 0,093 para conexões gerais de média tensão. Em outras palavras, a eletricidade para bombeamento de água subterrânea tem subsídios de um fator de duas ou quatro vezes maiores em comparação com as taxas comerciais, enquanto a extração durante o período noturno tem subsídios adicionais de 20% a mais, além dos que se aplicam às taxas diurnas.

O efeito de “incentivo” da 09-N, para induzir uma mudança da extração diurna para a noturna, se deu em todo o país (Figura 2a) e é evidente nos três estados de interesse (Figuras 2b-d, que também mostram as tendências no fracionamento da eletricidade para o bombeamento de água para uso agrícola em relação

ao abastecimento total de energia). A irrigação noturna muitas vezes envolve custos adicionais para a construção de lagos dentro da fazenda, com objetivo de armazenar a água bombeada até que a mão de obra agrícola esteja disponível para operações durante o dia, o que pode exigir um bombeamento adicional subsequente para pressurizar o equipamento de irrigação, incluindo os sistemas de gotejamento e aspersão. Em alguns casos, bombas à base de energia solar são utilizadas para aplicações de baixa pressão, como no caso da irrigação de gotejamento, mas a rede de eletricidade continua essencial para a extração de águas profundas.

Essa mudança nos horários de operação, em 2004, resultou em aumentos nas extrações de água subterrânea a nível nacional, mesmo levando em consideração os efeitos da queda dos níveis de água que exigem mais eletricidade para se extrair um determinado volume de água (Scott, 2011). O uso contínuo das bombas é

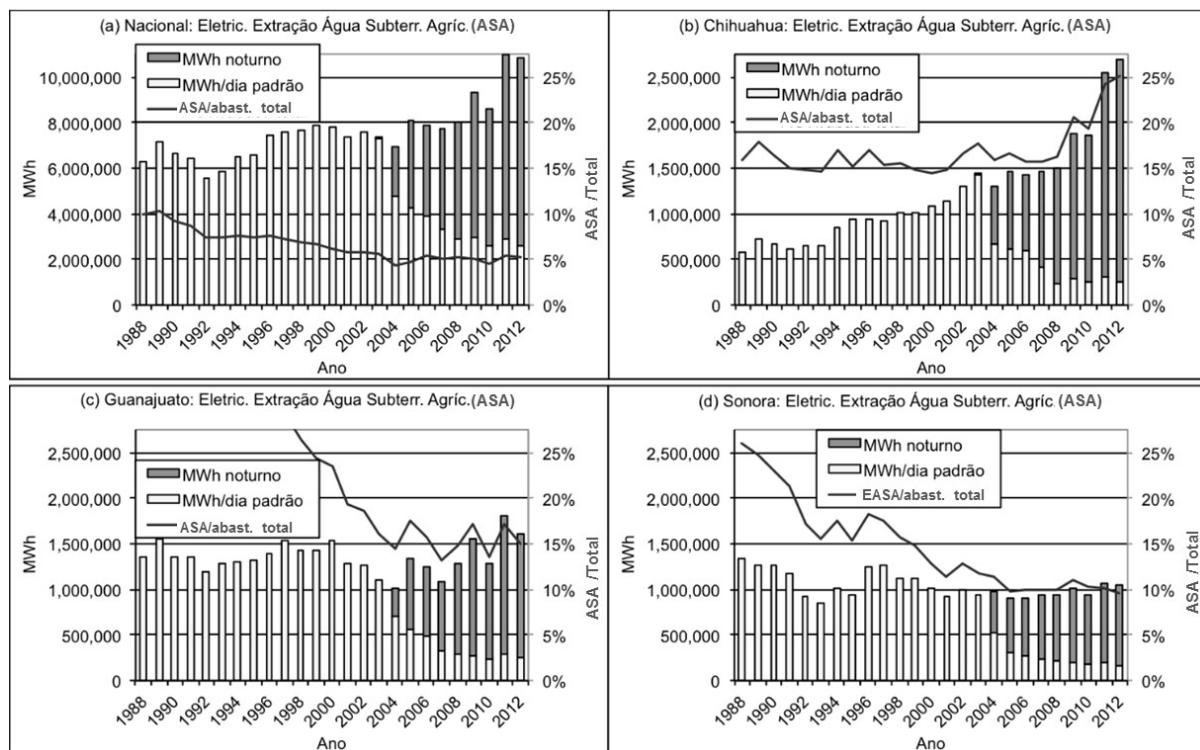


FIGURA 2 – Eletricidade necessária para extração de água subterrânea para uso agrícola (ASA) para (a) México, a nível nacional, e os estados de (b) Chihuahua, (c) Guanajuato e (d) Sonora, 1988-2012, demonstrando a mudança para a extração noturna e a fração da eletricidade usada na extração de água subterrânea para uso agrícola em relação ao abastecimento de energia.

ainda mais pronunciado no estado de Chihuahua, onde a irrigação, que atualmente consome mais de um quarto de toda a eletricidade no estado, extrai quase 6 km³ de água subterrânea por ano – um aumento de 44% em apenas três anos, entre 2010-2012. Aqui a eletricidade para a extração de águas subterrâneas para a agricultura aumentou 9,6% ao ano ao longo dos últimos oito anos após 2004, um valor elevado se comparado aos 4% ao ano dos oito anos anteriores (mesmo que, para todos os propósitos, tenha havido uma desaceleração do crescimento do abastecimento total de energia após 2004). E, o que é mais sério – mas, ao contrário, mais direto de se abordar a partir de uma perspectiva de criação de políticas –, Chihuahua continuou a receber novos usuários de águas subterrâneas para a agricultura (novas conexões elétricas), em um ritmo composto de 3,3% por ano após 2004. Sonora e Guanajuato receberam novos

usuários (2,0% e 0,9% ao ano, respectivamente), após 2004. Adicionalmente, para mitigar as condições áridas em Chihuahua (INE, 2013), categorizadas pelo governador como “catastróficas” (Milenio, 2012), os governos estadual e federal responderam aos *lobbies* dos grandes fazendeiros e perdoaram suas dívidas de contas de eletricidade, em um custo total estimado de mais de US\$ 200 milhões só em Chihuahua (Jornada, 2012). Essas tendências têm implicações importantes para a sustentabilidade no uso de recursos (vide Figura 3) e, conforme será discutido a seguir, oferecem oportunidades para a adaptação às mudanças climáticas.

Uma avaliação mais profunda do mecanismo primário de criação de políticas para gerir a exploração das águas subterrâneas no México – a concessão de títulos – indica que, em 2009, os volumes de água subterrânea extraída para uso agrícola excederam os

volumes concessionados, por uma estimativa de 1,36 vezes, como pode ser visto na Figura 3. De fato, muitas dúvidas surgiram quanto à possibilidade de a soma total de títulos de concessão, para um dado aquífero, serem, de fato, determinadas em níveis sustentáveis com reposição (Moreno Vázquez, 2006) e levando em consideração as mudanças climáticas futuras (Scott, 2011). Sonora é um exemplo ilustrativo do desafio de se revisar os volumes concessionados, sem o controle efetivo sobre a extração. Ainda que esse estado tenha feito um progresso considerável na estabilização da extração de água sub-

terrânea para uso agrícola (vide Figura 2b), as reduções 2009-2012 nos volumes concessionados (mostrados na Figura 3) parecem não ter sido acompanhados por uma redução na eletricidade utilizada para extração.

3.2. Exportações virtuais de água e energia

Boa parte da água subterrânea para uso agrícola nos três estados de interesse (e outros na região centro-norte do México) é utilizada para produzir vegetais de

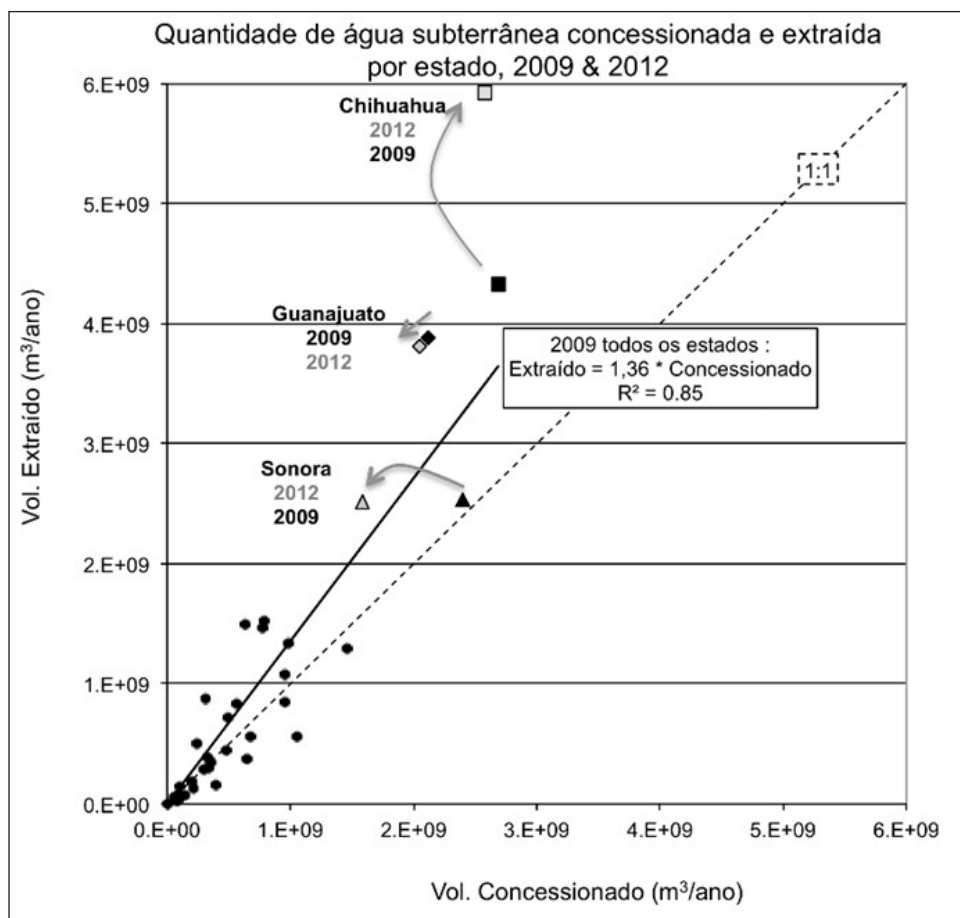


FIGURA 3 – Relação entre volume de água subterrânea extraída para uso agrícola (derivado da medição do consumo de eletricidade) e os volumes relatados no México em 2009, mostrando as mudanças nos estados de Chihuahua, Guanajuato e Sonora, entre 2009-2012.

NOTA: Volume extraído [m³] = energia [kWh] * eficiência/ sustentação [m] / 0.0026 [constante de conversão]

alto valor e, em menor escala, frutas. Por sua vez, uma porção significativa da produção é exportada, em grande parte, para os EUA, mas também para mercados na Europa e na Ásia. A água virtual, que representa os volumes necessários para irrigar lavouras que são importadas e exportadas através das fronteiras nacionais, pode representar uma compensação importante para o uso local ou regional da água (Konar *et al.*, 2012). As importações líquidas anuais de água virtual do México contabilizam 12,5 km³ em produtos agrícolas e 10,6 km³ em produtos animais (CONAGUA, 2011). Deve-se notar que essas importações de água virtual advêm, em sua maioria, do maior parceiro comercial do México, os EUA, onde a produção de algumas das *commodities* em questão deriva-se principalmente de “água verde” (pluvial), mas também de “água azul” (água superficial e subterrânea). As exportações de água virtual do México, em contraste, são, sobretudo, de água subterrânea, para a produção de frutas e vegetais, que contribuem para o consumo dos aquíferos. Devido ao fato de as águas subterrâneas terem um alto valor estratégico para futuras reservas de água potável e outros propósitos de adaptação climática, se comparados com as águas pluviais, deve-se ter cautela no uso racional, para equilibrar a balança entre importações e exportações de água virtual.

O comércio de água virtual, a níveis global e regional, acelera o consumo dos aquíferos em certos lugares no México que também estão passando por um rápido crescimento urbano e demonstram maiores demandas por água subterrânea. Nesse sentido, esse tipo de uso hídrico está preso em uma armadilha de equidade intergeracional, isto é, os ganhos com a agricultura tipo exportação, a curto prazo, contra o valor estratégico das águas subterrâneas, a longo prazo, para múltiplas demandas da sociedade, incluindo o abastecimento urbano de água.

Estimativas do total de água virtual necessária para a produção das frutas e vegetais tipo exportação, do México para os Estados Unidos, têm como base as estatísticas do Departamento de Agricultura dos EUA sobre produtos importados do México. Os recentes aumentos nas águas subterrâneas virtuais e as exportações totais de água virtual são mostrados na Figura 4, em que aproximadamente 1 km³ de água subterrânea virtual foi exportado do México para os EUA, em 2009. A eletricidade usada para a extração desse volume de água gerou

aproximadamente 0,19 milhão de toneladas métricas de emissões de CO₂, uma quantidade que se encontra na mesma ordem de magnitude do CO₂ emitido com o transporte rodoviário da produção ao longo de uma distância média estimada de 300 km, para os mercados de exportação nos EUA.

Também é bastante considerável a água subterrânea extraída para irrigar parte da produção que não é exportada além das fronteiras do México, mas, em vez disso, consumida dentro do próprio país, por exemplo, em grandes mercados urbanos, como a Cidade do México. Uma quantidade adicional de água subterrânea precisa ser extraída para irrigar a produção de baixo valor (como cereais essenciais), que poderia ser irrigada sob condições de irrigação esporádica (apesar de ter maior risco e menores resultados) ou usando água superficial (com os desafios inerentes à variabilidade do abastecimento), ou que poderia ser importada. De fato, as três alternativas ocorrem no México, mas o apoio político inadequado (particularmente no tocante ao seguro das lavouras, o balanceamento dos riscos e o planejamento de segurança alimentar a longo prazo) manterão a pressão sobre a extração de água subterrânea (Wester, 2008).

3.3. Uma ferramenta política para adaptação e mitigação

O potencial para aproveitar o nexo eletricidade-água subterrânea para a gestão sustentável depende de os usuários das águas subterrâneas e de os criadores de políticas identificarem intervenções eficazes no abastecimento e taxação da energia elétrica (Scott & Shah, 2004; Shah, 2009) e outros mecanismos de apoio, que sejam ao mesmo tempo viáveis politicamente e aceitáveis para todos os produtores rurais, de modo a poder contrabalancear os impactos prejudiciais para os usuários, incluindo transferências de renda e incentivos para alterar os padrões de plantação, reduzir a área irrigada e adotar tecnologias de economia de água (Muñoz *et al.*, 2006). Esse nexo também pode representar uma das várias ferramentas para elaborar uma resposta de adaptação às mudanças climáticas globais, sobretudo por meio da adaptação ao clima e ações de mitigação. Oportunidades reais podem surgir com a coordenação de políticas para

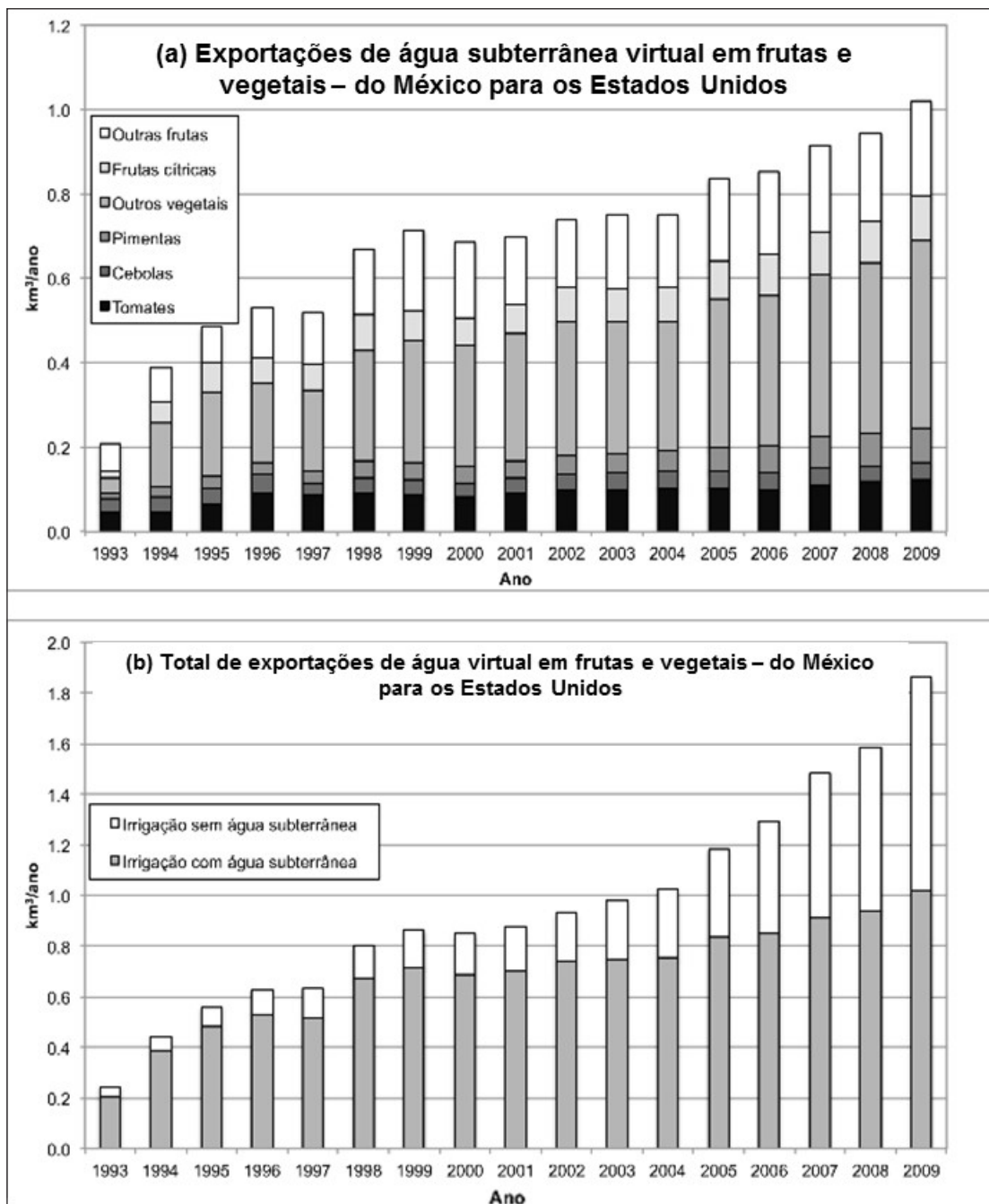


FIGURA 4 – (a) Quantidade de água subterrânea virtual e (b) o total de água virtual incorporado à exportação de frutas e vegetais do México para o seu principal parceiro comercial, os Estados Unidos, 1993-2009.

gestão de recursos hídricos (como manter os volumes de água concessionados em linha com o abastecimento renovável, mantendo reservas estratégicas de água para as contingências futuras, que ocorrerão como resultado inevitável das mudanças climáticas, e investir na gestão de reposição dos aquíferos), bem como de recursos energéticos (como a remoção, em etapas, dos subsídios para as tarifas, conforme analisado por Scott (2011), com gestão de demanda e limites sobre consumo de energia para limitar as emissões). No México, programas estatais de ação climática atualmente não empregam essas alavancas políticas (Landa *et al.*, 2012), ainda que cada vez mais se reconheça que o nexos eletricidade-água subterrânea seja, ao mesmo tempo, tanto uma causa quanto uma resposta de adaptação às mudanças climáticas.

4. Conclusões

Os processos naturais e humanos, em conjunto, são algo central para a crise hidrográfica global, bem como suas manifestações regionais (Srinivasan *et al.*, 2012), que se interligam ainda a um conjunto de desafios energéticos (Hightower & Pierce, 2008) e futuros climáticos (Scott, 2011). O nexos água-energia, explorado na presente edição especial da revista *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, é uma imensa oportunidade para a gestão de recursos e políticas. Ainda que exemplos de casos como o México, apresentado neste artigo, ofereçam revelações específicas sobre as relações entre eletricidade, água e clima, elas também podem ser utilizadas para identificar um conjunto mais amplo de padrões de uso de recursos, implicações para criação de políticas e opções de respostas adaptativas. A discussão anterior demonstrou que os processos climáticos, que resultam numa disponibilidade variável de água superficial, tendem a alterar o enfoque das demandas humanas, de modo a substituí-la pela água subterrânea como uma fonte mais confiável de abastecimento. O uso a curto prazo, que contribui para o consumo ou para a degradação de qualidade, pode debilitar o valor estratégico das águas subterrâneas como um recurso para a adaptação aos efeitos cada vez mais extremos da seca, resultante das mudanças climáticas, sobretudo para a agricultura, que

passará a exigir mais água para manter a produção por unidade de terra e valor. Por trás da rápida expansão do uso de águas subterrâneas, há o sucesso dos programas de disponibilização de energia, que transformaram a paisagem rural, tanto biofísica quanto social e economicamente. No entanto, regiões dependentes de águas subterrâneas, como o centro-norte do México, estão rapidamente se aproximando ou ultrapassando níveis sustentáveis de uso desta água. Uma vez esgotada ou com a qualidade da água significativamente afetada, a degradação do aquífero é essencialmente irreversível, embora a recuperação ainda seja possível a longo prazo e com mudanças significativas no uso da água.

A sobre-exploração contínua e a forte dependência da eletricidade gerada por combustíveis fósseis para a extração de água subterrânea não são adaptáveis a longo prazo, tampouco representam abordagens sadias para a mitigação de emissões. Ao contrário, o uso sustentável das águas subterrâneas pode representar uma resposta adaptativa às mudanças climáticas se os recursos hídricos e energéticos forem geridos em conjunto, incluindo a anulação judiciosa de subsídios para a eletricidade usada para bombear água subterrânea. Essas medidas fortaleceriam os três objetivos centrais de 1) manter ou melhorar o bem-estar humano, resguardando as águas subterrâneas para o abastecimento de água potável e de suporte à vida, 2) proteger a integridade dos serviços dos ecossistemas, garantindo o fluxo para *habitats* ribeirinhos e valores de amenidade humana, e 3) diminuir as emissões.

Agradecimentos

Parte do apoio financeiro para esta pesquisa foi fornecido pelo Inter-American Institute for Global Change Research (projeto SGP-CRA #005, apoiado pela National Science Foundation, Bolsa NSF No. GEO-1138881) e pelas bolsas NSF Nos. PASI-1242209, DEB-1010495 e EFRI-0835930. Também houve apoio financeiro do Centro Internacional de Hidroinformática (parceria entre Itaipu Binacional e Programa Hidrológico Internacional da Unesco). Agradeço a América Lutz pelo apoio com a aquisição de dados e a Janaina Pasqual e Adriano Scandolara pela tradução inglês-português.

Referências

- Aeschbach-Hertig, W.; Gleeson, T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. *Nature Geoscience*, 5, 853-861, 2012.
- Barlow, P. M.; Leake, S. A. Streamflow depletion by wells – understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. *USGS Circular 1376*. Reston VA: US Geological Survey, 2012. p. 84. Available in: <<http://pubs.usgs.gov/circ/1376/>>.
- Bazilian, M.; Rogner, H.; Howells, M.; Hermann, S.; Arent, D.; Gielen, D.; Steduto, P.; Mueller, A.; Komor, P.; Tol, R. S. J.; Yumkella, K. K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896-7906, 2011.
- Boden, T. A.; Marland, G.; Andres, R. J. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tenn., USA: US Department of Energy, 2011. doi: 10.3334/CDIAC/00001_V2011.
- Bovolo, C. I.; Parkin, G.; Sophocleous, M. Groundwater resources, climate and vulnerability. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035001, 2009.
- Brito-Castillo, L. Regional pattern of trends in long-term precipitation and stream flow observations: singularities in a changing climate in Mexico. In: Lin, G. (Ed.). *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management* 387-412. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. p. 504.
- Burkett, V. R.; Wilcox, D. A.; Stottlemeyer, R.; Barrowa, W.; Fagre, D.; Baron, J.; Price, J.; Nielsen, J. L.; Allen, C. D.; Peterson, D. L.; Ruggerone, G.; Doyle, T. Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: case studies and policy implications. *Ecological Complexity*, 2, 357-394, 2005.
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). *Estadísticas de Ventas*. 2013. Disponible en: <<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/QCFE/EstVtas/Default.aspx>>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). *Estadísticas del agua en México*. Mexico City: CONAGUA, 2011. p. 181. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>>.
- _____. *Registro Público de Derechos de Agua*. 2013. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx>>.
- Diffenbaugh, N. S.; Giorgi, F. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114, 813-822, 2012.
- Döll, P. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035006, 2009.
- Flint, L. E.; Flint, A. L. *Regional analysis of ground-water recharge*. US Geological Survey Professional Paper 1703-B, 2007. Available in: <<http://pubs.usgs.gov/pp/pp1703/b/>>.
- Gochis, D. J.; Brito-Castillo, L.; Shuttleworth, W. J. Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *J. Hydrol.*, 316, 53-70, 2006.
- Grubert, E. A.; Beach, F. C.; Webber, M. E. Can switching fuels save water? A life cycle quantification of freshwater consumption for Texas coal – and natural gas – fired electricity. *Environ. Res. Lett.*, 7, 045801, 2012.
- Gutierrez-Ruacho, O. G.; Brito-Castillo, L.; Díaz, C. S. C.; Watts, C. Trends in rainfall and extreme temperatures in North-western Mexico. *Climate Research*, 42(2), 133-142, 2010.
- Hightower, M.; Pierce, S. A. The energy challenge. *Nature*, 452(20), 285-286, 2008.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). *El Cambio Climático en México, Información por Estado y Sector*, 2013. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/estados/chihuahua.html>.
- Jornada La 2012. Disponible en: <<http://www.jornada.unam.mx/2012/04/17/estados/032n2est>>.
- King, C. W.; Holman, A. S.; Webber, M. E. Thirst for energy. *Nature Geoscience*, 1, 283-286, 2008. doi: 10.1038/ngeo195.
- Knutti, R.; Sedláček, R. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 2012. DOI: 10.1038/nclimate1716.
- Konar, M.; Dalin, C.; Hanasaki, N.; Rinaldo, A.; Rodriguez-Iturbe, I. Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks. *Water Resour. Res.*, 48, W07509, 2012. doi: 10.1029/2012WR011959.
- Landa, R.; Magaña, V.; Neri, C. *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Mexico City: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012. p. 129.

- Loáiciga, H. A. Long-term climatic change and sustainable ground water resources management. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035004, 2009.
- Matías, M.; Magaña, V. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188, 2010.
- Milenio El 2012. Disponible en: <<http://www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/215cf5be355aeb0b371d1f895d4e84e4>>.
- Milly, P. C. D.; Betancourt, J.; Falkenmark, M.; Hirsch, R. M.; Kundzewicz, Z. W.; Lettenmaier, D. P.; Stouffer, R. J. Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319(5863), 573-574, 2008.
- Moreno Vázquez, J. L. *Por debajo del agua*. Hermosillo: El Colegio de Sonora, 2006.
- Muñoz, C.; Avila, S.; Jaramillo, L. A.; Sainz, J.; Martínez, A.; Guevara, A.; Stabridis, O. *Agriculture demand for groundwater in Mexico: impact of water right enforcement and electricity user-fee on groundwater level and quality*. INE-DGIPEA/0306. Mexico City: Instituto Nacional de Ecología, 2006. p. 48.
- Roy, S. B.; Chen, L.; Girvetz, E. H.; Maurer, E. P.; Mills, W. B.; Grieb, T. M. Projecting water withdrawal and supply for future decades in the U.S. under climate change scenarios. *Environ. Sci. Technol.*, 46(5), 2545-2556, 2012.
- Santoyo-Castelazo, E.; Gujba, H.; Azapagic, A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), 1488-1499, 2011.
- Scott C. A. The water-energy-climate nexus: resources and policy outlook for aquifers in Mexico. *Water Resour. Res.*, 47, W00L04, 2011.
- _____. Electricity for groundwater use: constraints and opportunities for adaptive response to climate change. *Environmental Research Letters*, 8, 035005, 2013. doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035005.
- _____; Shah, T. Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: insights from India and Mexico. *Internat. J. Water Resour. Develop.*, 20(2), 149-164, 2004.
- _____; Pierce, S. A.; Pasqualetti, M. J.; Jones, A. L.; Montz, B. E.; Hoover, J. H. Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus. *Energy Policy*, 39, 6622-6630, 2011. doi: 10.1016/j.enpol.2011.08.013
- _____; Meza, F. J.; Varady, R. G.; Tiessen, H.; McEvoy, J.; Garfin, G. M.; Wilder, M.; Farfán, L. M.; Pineda Pablos, N.; Montaña, E. Water security and adaptive management in the arid Americas *Annals Assoc. Amer. Geographers*, 103(2), 280-289, 2013. doi: 10.1080/00045608.2013.754660.
- Shah, T. Climate change and groundwater: India's opportunities for mitigation and adaptation. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035005, 2009.
- Sheinbaum-Pardo, C.; Ruiz-Mendoza, B. J.; Rodríguez-Padilla, V. Mexican energy policy and sustainability indicators. *Energy Policy*, 46, 278-283, 2012.
- Siddiqi, A.; Anadon, L. D. The water energy nexus in Middle East and North Africa. *Energy Policy*, 39(6), 4529-4540, 2011. doi: 10.1016/j.enpol.2011.04.023.
- Siebert, S.; Burke, J.; Faures, J. M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Döll, P.; Portmann, F. T. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1863-1880, 2010.
- Sivapalan, M.; Savenije, H. H. G.; Blöschl, G. Socio-hydrology: a new science of people and water. *Hydrol. Process.*, 26, 1270-1276, 2012. doi: 10.1002/hyp.8426.
- Srinivasan, V.; Lambin, E. F.; Gorelick, S. M.; Thompson, B. H.; Rozelle, S. The nature and causes of the global water crisis: syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water Resour. Res.*, 48, WR011087, 2012.
- Treidel, H.; Martin-Bordes, J. L.; Gurdak, J. *Climate change effects on groundwater resources: a global synthesis of findings and recommendations*. Leiden: CRC Press/Balkema, 2012. p. 401.
- Vörösmarty C. J.; McIntyre, P. B.; Gessner, M. O.; Dudgeon, D.; Prusevich, A.; Green, P.; Glidden, S.; Bunn, S. E.; Sullivan, C. A.; Reidy Liermann, C.; Davies, P. M. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561, 2010.
- Wescoat, J. *Personal communication*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- Wester, P. When the pumps run dry: arresting groundwater depletion in Guanajuato. *Shedding the Waters*, 173-207. PhD Dissertation, Wageningen University, The Netherlands, 2008. p. 293.