

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

APLICAÇÃO DE MODELOS SWAT, WEAP E GAMS PARA OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DE DEMANDAS AGRÍCOLAS SUJEITAS A RESTRIÇÕES AMBIENTAIS

Danielle de Almeida Bressiani¹; Jory Hecht², Lei “Charlie” Cheng,² Sherif Abdou², Aaron Thomas², David Newburn³, Ximing Cai⁴ & Eduardo Mario Mendiondo⁵

RESUMO – Em resposta às recentes mortes de peixes durante períodos de baixa vazão, associados à derivação de água para a irrigação, restrições de vazão ambiental têm sido propostas para a Bacia Hidrográfica do rio Russian, norte da Califórnia. Existem preocupações sobre o impacto econômico das restrições de vazão aos agricultores, que armazenam água de córregos em reservatórios *on-stream* e *off-stream*. Essa pesquisa analisa o abastecimento de água e os impactos econômicos das regulações na bacia do Rio Maacama, tributária do Rio Russian, de 120 km². Analisa-se o impacto do bombeamento de águas subterrâneas no fluxo dos rios. Utiliza-se o modelo SWAT para estimar vazões de entrada ao modelo WEAP, empregado para comparar os impactos das regulações em um ano hidrológico normal e em um seco. O modelo WEAP foi utilizado para geração de modelo de interface entre água subterrânea e superficial para prover ideia geral dos impactos do bombeamento de água subterrânea nos fluxos dos rios. O modelo GAMS, foi também desenvolvido para identificar soluções ótimas de alocação de água. Os resultados mostram que irrigantes com fontes de água superficial também requerem bombeamentos subterrâneos, e, como os reservatórios *off-stream* estão sujeitos a regulações são, portanto, mais vulneráveis à seca.

ABSTRACT – Environmental flow requirements have been proposed in northern California’s Russian River Basin in response to recent fish kill events during low flow periods, which have been linked to withdrawals for irrigation. There have been concerns about the economic impact of these flow requirements to agricultures, which commonly store water from small tributary streams in reservoirs. This research examines the possible water supply and economic impacts of the proposed regulations in the basin’s 46 square-mile Maacama sub-watershed. In addition, it analyzes the impact of groundwater pumping for irrigation on streamflow. A SWAT model is employed to estimate streamflow at ungauged locations used in the WEAP model, which is used to compare the impacts of proposed regulations during a normal and dry water year. A head-differential “wedge” groundwater model is developed within WEAP to acquire a general sense of the impacts of pumping on groundwater-surface water exchanges. A GAMS model is also devised to identify optimal water allocation solutions. Findings reveal that farmers with surface water sources also must rely on extensive groundwater pumping to fully meet their demand. Since the diversions into off-stream reservoirs are subject to regulations, they are more vulnerable to drought than their on-stream counterparts.

PALAVRAS CHAVE: VAZÕES AMBIENTAIS, ALOCAÇÃO DE ÁGUA, MODELOS HIDRO-ECONÔMICOS.

¹ Doutoranda em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos -USP, Av. Trabalhador são-carlense, 400, S.Carlos/SP, Brasil. E-mail: danielbressiani@gmail.com;

² Alunos de Pós-Graduação do Civil and Engineering Department, University of Illinois, 301 N. Mathews Ave., Urbana, Illinois,USA

³ Professor, Department of Agricultural Economics, Texas A&M University, Blocker Building 352B, College Station, TX 77843-2124

⁴ Professor, Civil and Engineering Department, University of Illinois, 301 N. Mathews Ave., Urbana, Illinois,USA

⁵ Professor, Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC-USP. Av. Trabalhador são-carlense, 400, S.Carlos/SP, Brasil

1 – INTRODUÇÃO

A rápida expansão da agricultura (de uvas para vinho) na Bacia do Rio Russian, no norte da Califórnia, reduziu substancialmente a vazão dos rios devido à derivação de água superficial para reservatórios particulares fora do rio (*offstream*), à detenção de água em reservatórios nos córregos (que extravasam ao encherem) (*onstream*) e ao bombeamento de águas subterrâneas, que são hidraulicamente conectadas aos córregos. Esta redução na vazão dos rios durante a estação chuvosa (inverno) levou à mortandade de peixes, especialmente de salmonídeos, nos eventos de 2008 e 2009 (Center for Biological Diversity, 2009).

Como resposta a estes eventos de mortandade de salmões, o Conselho de Controle de Recursos Hídricos do Estado da Califórnia (California's State Water Resources Control Board - SWRCB) restringiu a alocação de outorgas de água superficial para os agricultores e propôs duas novas regulações de vazões no inverno (Merenlender et al., 2008). Estas regulações foram propostas de maneira a assegurar a passagem de uma vazão mínima, Q_{min} , e estabelecer uma vazão máxima de derivação; critério de derivação máxima acumulativa, Q_{cdma} , que limita as retiradas durante o período de vazões altas para garantir os benéficos efeitos ecológicos de picos vazão (Merenlender et al., 2008). Estas regulações se aplicam a todos os córregos que podem ser considerados ambientes de migração de peixes.

A vazão mínima, Q_{min} , assegura descarga suficiente para sustentar a migração de salmonídeos adultos durante a estação chuvosa de outubro a março (Merenlender et al., 2008). Assume-se que esta vazão mínima corresponde a aproximadamente 0,30 metros de altura de água no córrego (1 pé), e pode ser calculada em qualquer ponto pela fórmula empírica (1) abaixo:

$$Q_{min} = 9,4Q_{medio}AD^{-0.48} \quad (1)$$

onde, Q_{medio} corresponde à vazão média diária e AD à área de drenagem a montante do ponto de interesse. O “critério de derivação máxima acumulativa”, Q_{cdma} , restringe a derivação máxima em 5% da vazão de pico diário de tempo de retorno de 1,5 anos para assegurar que as vazões de pico consigam realizar sua função de carreamento, que é essencial para sustentabilidade ecológica de longo prazo. Todos os pontos onde há derivação de água foram considerados suscetíveis às regulações (Merenlender et al., 2008).

$$Q_{cdma} = 0,05Q_{pico,1.5ano} \quad (2)$$

No entanto, estas regulações destinadas a proteger o habitat dos salmonídeos no inverno, não produziram o efeito esperado (Newburn et al., 2009). Muitos agricultores que não possuem

outorga dos direitos de água, ou que possuem quantidades outorgadas insuficientes em anos secos, iniciaram o bombeamento de água subterrânea para compensar este déficit. Este bombeamento reduziu a vazão de base que sustenta salmonídeos juvenis em pequenos córregos durante o verão.

Modelar esta dinâmica na escala da Bacia do Rio Russian é uma tarefa difícil, devido à natureza altamente distribuída da rede hidrológica, assim como à heterogeneidade geológica da região, no qual depósitos aluvionares permeáveis se localizam espalhados entre as formações vulcânicas franciscanas e outros estratos altamente consolidados, caracterizando relações entre água subterrâneas-superficiais complexas. No entanto, a realização de um estudo detalhado sobre uma pequena sub-bacia da Bacia do Rio Russian (Bacia do Rio Maacama, Figura 1), para qual a criação da rede hidrográfica e caracterização geológica são relativamente possíveis, possibilita que muitas das dinâmicas comuns a sub-bacias do Rio Russian sejam elucidadas.

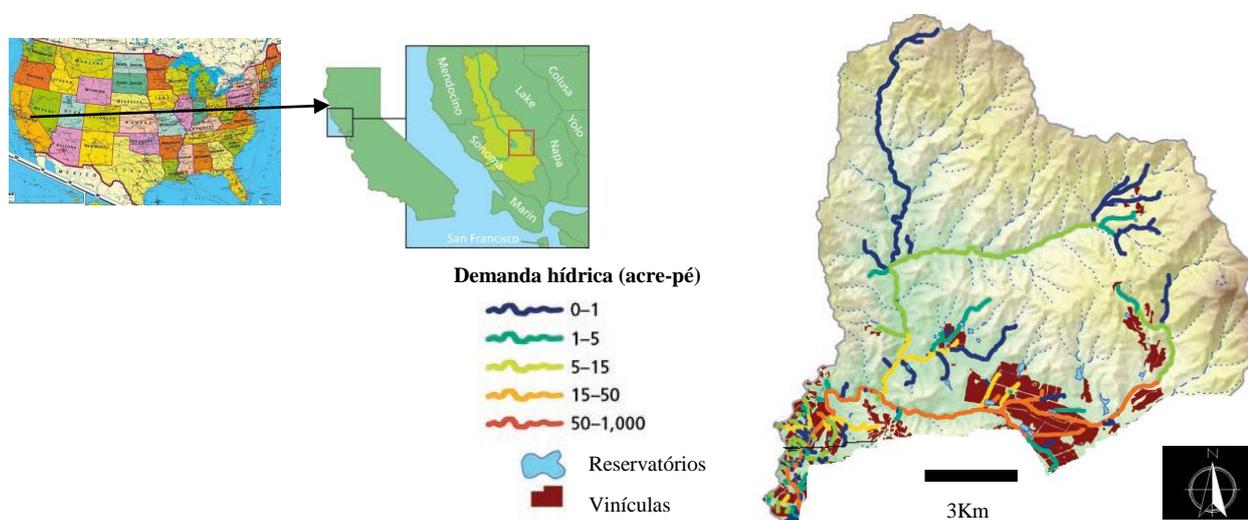


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Rio Maacama e demandas hídricas Fonte: Merenlender et al, 2008

2 – OBJETIVOS PRINCIPAIS

Os objetivos principais desta pesquisa são:

- Avaliar em que medida a demanda de água não seria atendida durante um ano normal e um seco, se as regulações de vazão propostas fossem implementadas.
- Avaliar a redução da rentabilidade da produção de uva na Bacia Maacama em anos normais e secos, devido às restrições ambientais de vazão propostas.
- Estudar a influência do bombeamento das águas subterrâneas na redução das vazões dos rios no verão e no inverno para um ano seco e um normal.

É importante notar que a rentabilidade foi avaliada apenas em termos da diferença entre a receita e custos de operação. A troca entre água superficial e subterrânea foi realizada a partir de uma diferença entre potenciais dos aquíferos pelo Water Evaluation and Planning System® (WEAP), produzido pelo Stockholm Environment Institute.

2 – MÉTODOS

2.1 – Diagrama Unifilar

Um diagrama unifilar foi desenvolvido para catalogar as trocas entre córregos, reservatórios de nível nos córregos e reservatórios fora dos rios, aquíferos e locais de demanda (vinhedos) na Bacia Maacama. Primeiramente, foram identificados os vinhedos que utilizam água subterrânea, e água superficial, vinículas muito pequenas e sem dados não fizeram parte da análise. Os reservatórios possuem identificação sobre os donos e área dos vinhedos aos quais servem. O *layer* relativo aos vinhedos possui o nome dos donos e, em alguns casos, a área dos vinhedos, áreas sem identificação foram presumidas ser servidas por um determinado reservatório. Na Tabela 1 abaixo segue uma lista dos reservatórios considerados na área de estudo e a área servida. Assumiu-se abastecimento suplementar por bombeamento de água subterrânea nos vinhedos onde a demanda não é suprida.

Tabela 1 – Reservatórios da Bacia do Rio Maacama

Reservatório	Tipo	Área superficial (hectares)	Volume de Armazenamento (1000 m ³)	Área do vinhedo servido (hectares)
off_rev1	Off-stream	1,46	54,62	26,20
on_rev1	On-stream	1,24	50,88	24,89
on_rev2	On-stream	4,88	219,98	10,85
on_rev3	On-stream	4,29	153,86	
off_rev2	Off-stream	1,29	53,27	140,59
off_rev4	Off-stream	2,85	131,18	
off_rev3	Off-stream	5,00	221,34	47,92
on_rev4	On-stream	3,11	144,60	92,71
on_rev5	On-stream	3,16	129,79	33,79
off_rev5	Off-stream	0,61	22,70	7,45
off_rev6	Off-stream	0,17	5,34	2,95

Presumiu-se que a derivação de água para os reservatórios *off-stream* é realizada a partir de um córrego específico, este córrego foi definido a partir da proximidade do reservatório com o córrego, topografia e porte do rio a montante do ponto de diversão. Reservatórios próximos e utilizados pelo mesmo agricultor foram agregados. Uma curva genérica de profundidade-área de

armazenamento foi desenvolvida e aplicada a cada reservatório *on-stream* (Tabela 1), para os reservatórios *off-stream*, assumiu-se área superficial constante para qualquer altura.

Estimativas mensais de evaporação líquida foram calculadas a partir da diferença de médias aritméticas de longo prazo (1975-2005) de medições de evaporação de Tanque Classe A tomadas no Lago Berryessa e no Lago Solano (ajustadas com um coeficiente de lago 0,7). Obteve-se registros de precipitação medidas em estações cooperativas de Healdsburg e Calistoga.

Para a criação do diagrama unifilar um canal principal foi determinado, tendo seu início no córrego Kellog, continuando à jusante no córrego Redwood, o diagrama segue na Figura 2:

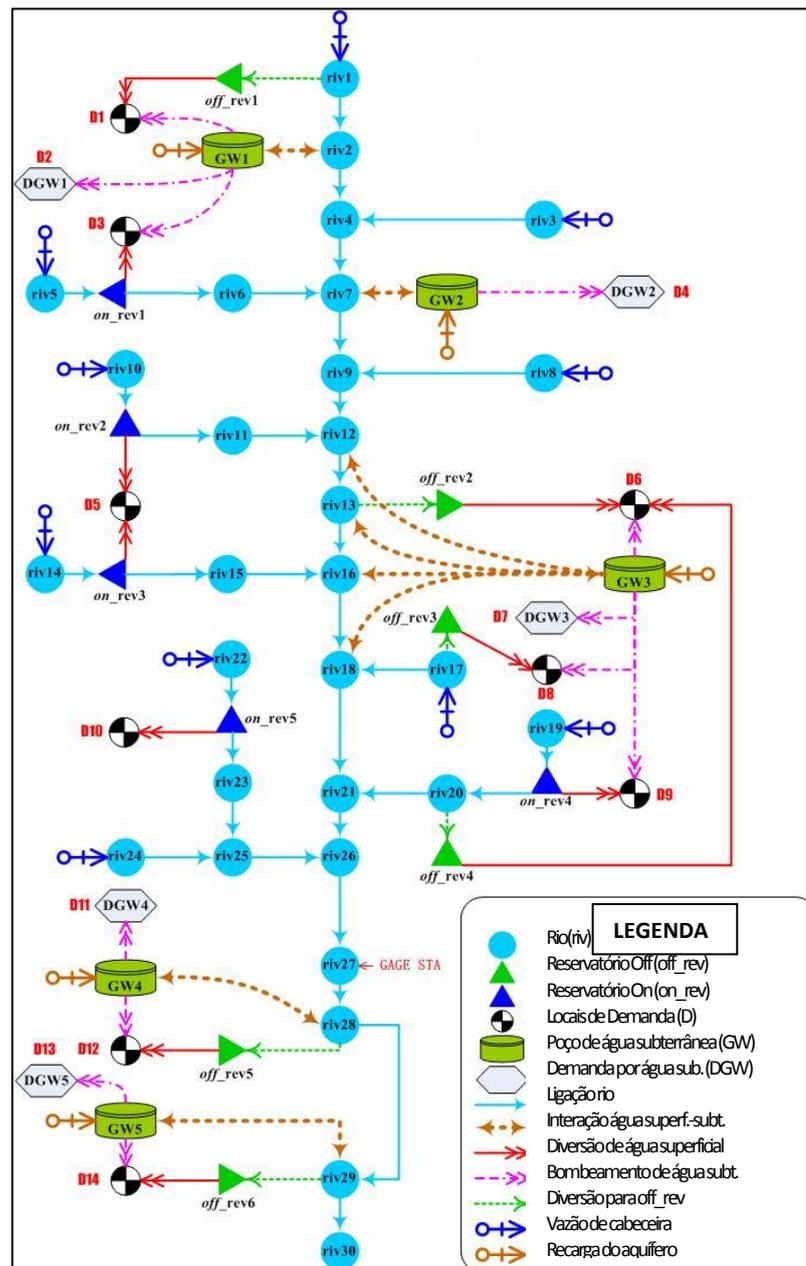


Figura 2 – Diagrama Unifilar

2.2 – Estimativa das Demandas

A bacia do Maacama é quase exclusivamente coberta por vinhedos, ranchos, florestas, e espaços abertos. Não há usos municipais ou industriais e apenas poucas residências rurais (Google Maps, 2010). Portanto foi necessário estimar apenas a demanda para aos vinhedos (além da demanda de vazões ambientais).

Apesar da precipitação média anual na bacia ser aproximadamente 1016 mm, a sazonalidade da precipitação combinada com temperaturas quentes do verão, tornam irrigação pré-requisito para a cultura das uvas. As uvas para vinho necessitam de água para três propósitos; precisam de $0,20\text{m}^3$ de água por metro quadrado de plantação, para irrigação e proteção contra o calor no verão, e aproximadamente $0,10\text{ m}^3$ de água $/\text{m}^2$ de plantação para proteção contra o congelamento no início da safra, normalmente em março e abril. O total desta demanda por ano é de $0,30\text{ m}^3$ de água $/\text{m}^2$ de plantação.

Desta forma foi desenvolvida a demanda temporal para os vinhedos, para tal assumiu-se que todos os vinhedos possuem a mesma necessidade de água por área, e que esta demanda deveria ser cumprida para os dois cenários (seco e normal), embora a demanda para a cultura provavelmente seja superior durante o ano seco. E, como os vinhedos utilizam irrigação por gotejamento, considerou-se a vazão de retorno insignificante.

2.3 – Modelagem da Água Superficial

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), um modelo hidrológico de bacias hidrográficas, foi utilizado para estimar as vazões diárias utilizadas. Para o estudo foi necessária uma resolução temporal diária para estimar o volume de água disponível para bombeamento aos reservatórios *off-stream*. A vazão dos rios foi calculada em função da precipitação, temperatura, uso da terra, solo e altitude e foi calibrada automaticamente o modelo para vazão observada em estação do USGS (United States Geological Survey) no Rio Maacama (Kellogg gage-11463900) entre 1961 e 1981. As fontes dos dados para cada variável seguem na Tabela 2. O modelo SWAT proporcionou as médias diárias acumuladas no ponto de jusante de 150 sub-bacias, Figura 3.

Tabela 2 – Fontes de Dados de entrada para o SWAT

Dados	Fonte
Mapa Digital de Terreno (MDT)	USGS (United States Geological Survey)
Uso da Terra	Base de Dados do USGS, Land Use and Land Cover-LULC (Uso e Cobertura do solo)
Mapa de Solos	Base de dados do STATSGO – Mapas de solo, do Natural Resources Conservation Service (NRCS)
Precipitação	Base de Dados do SWAT EUA
Temperaturas mínimas e máximas	Base de Dados SWAT EUA
Vazão medida Rio Maacama	USGS (U.S. Geological Survey)

O balanço hídrico foi realizado por seção da rede, tanto no WEAP, quanto no GAMS. De forma que cada montante da seção corresponda com o exutório de uma sub-bacia do SWAT. Todas as vazões de cabeceira foram inseridas no WEAP manualmente, assim como as vazões de água superficial de cada sub-bacia. Foi necessário ajustar as vazões de água superficial geradas no SWAT, pois estas contêm um componente de vazão de base, como o trabalho visava modelar o componente de base e sua interação com a água superficial no WEAP. Um filtro de vazão de base foi utilizado para estimar a vazão, a partir da metodologia de Arnold et al. (1999) e Arnold et al. (1995), chamada de Algoritmo Digital Recursivo de vazão de base (Nathan et al, 1990). Este foi aplicado utilizando um, dois e três passos para determinar o percentual médio da vazão superficial total composta pela vazão de base, resultando em 27, 15 e 12%, respectivamente. Utilizou-se o valor de dois passos, portanto toda a vazão superficial de entrada foi reduzida em 15% (85% da estimativa do SWAT). As vazões de cabeceira não foram reduzidas devido a pequena contribuição de vazão de base que chega aos córregos como vazão de cabeceira.

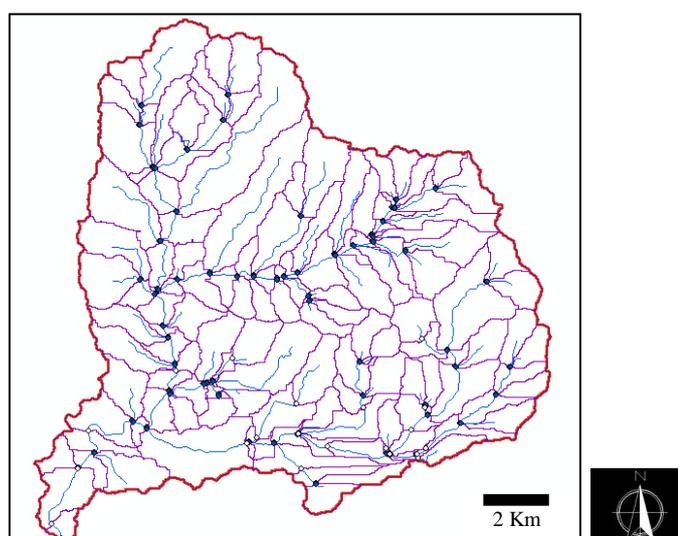


Figura 3 – Bacia Hidrográfica do Rio Maacama e sub-bacias utilizadas no modelo SWAT

Os valores de vazão foram utilizados para o cálculo das regulações das vazões ambientais. A vazão mínima, Q_{\min} , foi calculada a partir das áreas de drenagem do SWAT e a vazão média entre Outubro 1961 e Setembro 1981 (anos hidrológicos de 1962 a 1981-dados observados na estação). Para a estimativa da derivação máxima acumulativa, Q_{cdma} , calculou-se a vazão de pico, para tempo de retorno de 1,5 anos, através da distribuição simples de probabilidade Weibull para a vazão máxima anual diária, estes valores foram multiplicados por 0,05 (equação 2) para cada ponto de diversão. Embora a Q_{cdma} deva indicar um valor instantâneo de vazão, acima do qual a água não pode ser bombeada (Merenlender et al., 2008), vazões diárias foram utilizadas (SWAT). Para cada dia, a vazão total disponível para bombeamento para reservatórios *off-stream* segue:

$$Q_{\text{bombeado},t} = \text{mín}[(Q - Q_{\min}), Q_{cdma}], 0 \leq Q_{\text{bombeado},t} \leq S_{\text{capacidade}} - S_{t-1} \quad (3)$$

A água que pode ser bombeada aos reservatórios *off-stream* corresponde ao mínimo entre (1) a diferença entre a vazão no córrego, Q , e a vazão mínima ambiental, Q_{\min} , e (2) a derivação máxima permitida, Q_{cdma} , e a diferença entre a capacidade de armazenamento do reservatório e a capacidade disponível no fim do dia anterior. Assumiu-se que os viticultores possuem bombas com capacidade para retirar toda água que lhes é legalmente permitida.

A restrição de capacidade de armazenamento foi implementada com sucesso no GAMS, no entanto no WEAP foi difícil incorporar. Para minimizar o extravasamento de reservatório *off-stream* no WEAP, que foi considerado uma perda do sistema e que não retornava à rede hidrológica ou ao aquífero, definiu-se a seguinte restrição mensal:

$$Q_{\text{bombeado},\text{mês}} = \text{mín}[S_{\text{capacidade}}, \sum Q_{\text{bombeado},\text{dia}}] \quad (4)$$

Onde o volume bombeado por mês, $Q_{\text{bombeado},\text{mês}}$, é igual ao mínimo entre a capacidade do reservatório e a soma de água disponível para ser bombeada por dia, em determinado mês. O impacto principal dos extravasamentos que estavam ocorrendo no WEAP é que estes reduziam a disponibilidade de água para os consumidores à jusante, no entanto, restringindo o extravasamento pela capacidade total dos reservatórios reduziu-se substancialmente estes extravasamentos.

2.4 – Modelagem da interação entre água superficial-subterrânea

O Water Evaluation and Planning System (WEAP) ® foi utilizado para modelar a troca entre rios conectados hidraulicamente com aquíferos, nesta pesquisa. Parcelas dos vinhedos que não estavam associadas a reservatórios de água superficial, nem possuíam armazenamento suficiente para suprir sua demanda, foram agregadas em cinco distintas unidades de aquífero. O método “*wedge*” do WEAP foi selecionado dentre três outros métodos devido a disponibilidade de valores plausíveis para parâmetros de relatórios anteriores sobre os aquíferos próximos; Bauer (2008) e

Farrar et al. (2006). Este método estima a troca entre dois corpos de água com base no diferencial de potencial entre eles.

O comprimento molhado, lw , e a distância horizontal, Hd , foram obtidos com base na localização das parcelas dos vinhedos de cada aquífero-*wedge*. A profundidade do aquífero no nível do rio, Ad , condutividade hidráulica horizontal saturada, $k_{h,sat}$, rendimento específico, SY , de cada unidade do aquífero foram medidos através de um mapa geológico superficial, que mostrava depósitos aluviais e formações franciscanas, assim como valores associados desses parâmetros obtidos a partir de Bauer (2008). A recarga do aquífero foi estimada com base em um valor anual de 183 mm, em 1966, e 91 mm, em 1976 (Bauer, 2008). Assumiu-se a distribuição mensal da recarga do aquífero proporcional à distribuição mensal de precipitação para cada ano. Assumiu-se também que os agricultores possuíam infra-estrutura necessária para bombear a quantidade de água suficiente para suprir a demanda.

As trocas entre rios e aquíferos adjacentes foram modelados com base no pressuposto de que o lençol freático estava no mesmo nível que o leito dos corpos d'água no início da estação chuvosa. Adimitiu-se a percolação nos córregos proporcional à diferença de potencial entre os dois corpos de água e da profundidade molhada estimada do córrego, que varia mensalmente e foi calculada a partir de vazões estimadas com o $Q_{mín}$ (vazão de 1 Pé de profundidade) e assumindo todos os canais retangulares. A Figura 4 é o esquema da simulação no modelo WEAP.

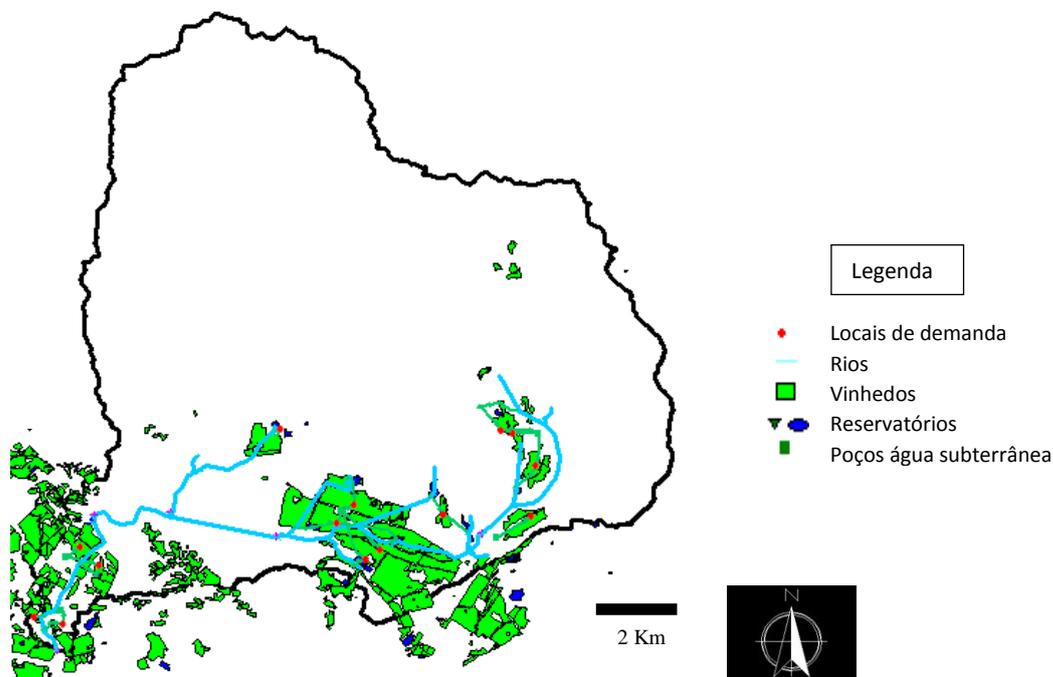


Figura 4 – Bacia do Rio Maacama, locais de demanda (vinhedos) e reservatórios no WEAP

2.5 – Modelos de Simulação do Balanço Hídrico

Os modelos de balanço hídrico realizados no WEAP e GAMS foram executados para dois cenários, um ano normal (1966) e um seco (1976). Assumiu-se que o armazenamento de água nos reservatórios no início de cada ano hidrológico se iguala a 10% da capacidade do reservatório. Considerou-se que vitivicultores com acesso a água subterrânea e superficial priorizam o uso de água dos reservatórios superficiais, devido a perdas por evaporação nos reservatórios e custos inferiores pela água. O texto abaixo descreve a simulação nos (i) reservatórios *off-stream*, (ii) reservatórios *on-stream* e (iii) locais de demanda apenas por água subterrânea.

Reservatório *off-stream*:

No início do ano hidrológico, 1º de Outubro, o armazenamento é igual a 10% da capacidade total. O bombeamento de água para os reservatórios *off-stream* ocorrem de outubro a março (estação chuvosa), mantendo a vazão ambiental. Bombeamento só pode ocorrer se a vazão ambiental for mantida. A temporada de demanda se inicia em março (irrigação para proteção contra congelamento em março e abril), e então muda para irrigação e proteção contra o calor entre maio e setembro. A cultura é irrigada prioritariamente com água armazenada no reservatório, quando este fica vazio, e caso, ainda seja necessária água, a irrigação passa a ocorrer por bombeamento de água subterrânea.

Reservatório *on-stream*:

No início do ano hidrológico o armazenamento é considerado igual a 10% da capacidade total. Os reservatórios *on-stream* são reservatórios de nível, e portanto extravasam ao encherem. Estes reservatórios possuem pequena área de drenagem (menor que 5Km²), no entanto um problema é que eles não são sujeitos às regulações ambientais e podem impedir os usuários à jusante de um abastecimento de água adequado. A operação em relação a demanda e mudança para bombeamento de água subterrânea ocorre da mesma forma em que nos reservatórios *off-stream*.

Bombeamento de água subterrânea:

Assumiu-se que vinhedos que dependem exclusivamente de água subterrânea não possuem infra-estrutura para armazenamento de água, portanto o bombeamento ocorre diretamente às culturas, entre março a setembro. Não há restrições a este bombeamento.

2.6 – Desenvolvimento do Modelo Hidrológico-Econômico

Desenvolver um modelo hidrológico-econômico integrado para examinar os impactos desta regulação na rentabilidade da produção de uva na bacia é um desafio, considerando a natureza distribuída das diversões e dos vinhedos. Modelos de simulação e otimização podem examinar o

lucro em cenários de regulação de vazões diferentes. A função objetivo utilizada, abaixo, adaptada de Cai et al. (2003), identifica o lucro total máximo que pode ser obtido nos 14 locais de demanda:

$$\max \sum_{d=1}^{14} \{A_d Y_d p_d - (wps_{on} * ws_{on,d} + wps_{off} * ws_{off,d} + wpg * wg_d) - A_d(tc + fc)\} \quad (5)$$

Esta função afirma que o objetivo é maximizar o lucro líquido em cada um dos 14 pontos de demanda (Figura 2). A função é o balanço entre a receita, $A_d Y_d p_d$, os custos de produção da água, $(wps_{on} * ws_{on,d} + wps_{off} * ws_{off,d} + wgs * wg_d)$, e outros insumos agrícolas, $A_d(fc + tc)$. A receita é produto da área do vinhedo, A_d , a produção por área, Y_d , em toneladas, e o preço da cultura, p_d , em dolares por tonelada (\$/ton). O custo da água para cada local de demanda é a soma do custo unitário da água superficial em reservatórios *on* e *off-line* (wps_{on} e wps_{off}), multiplicada pela quantidade de água consumida, ws_d , e o custo unitário do bombeamento de água subterrânea, wpg , multiplicado pela quantidade total de água subterrânea consumida, wg_d . Outros insumos agrícolas incluem, tc , custo da tecnologia de irrigação, e fc , custo fixo anual de operação de outros insumos agrícolas, como máquinas e trabalho.

O preço de uvas, \$1,838/ton, foi obtido através de preços para uvas para vinho da região da costa norte da Califórnia publicados por Smith et al. (2004). Os custos para a captação de água para cada tipo de fonte foram assumidos constantes para toda a bacia. Os custos de captação de água subterrânea foram derivados dos custos para irrigação e proteção contra o congelamento de Smith et al. (2004) e somam U\$ 0,062/m³. Os custos da água superficial para reservatórios *on-stream* compreendem 30% dos custos de bombeamento de águas subterrâneas, U\$ 0,021/m³. Custos para reservatórios *off-stream* (U\$ 0,026/m³) foram estimados como sendo cerca de 25% acima dos valores dos reservatórios *on-stream*, já que exige o bombeamento de água do rio ao reservatório e deste à cultura. No entanto, os custos não foram dobrados, já que muitos reservatórios *off-stream* se localizam ao lado dos campos das culturas e/ou em locais de cotas altas, de forma a facilitar a distribuição de água. O custo da tecnologia para irrigação foi baseado em valor publicado de estudo de uva no estado de Nova Iorque (U\$223) (Cuykendal et al. 1999), que foi multiplicado por dois, para considerar o custo da irrigação por aspersão utilizada durante a proteção contra congelamento e calor (U\$446). O custo de outros insumos agrícolas, fc , foi baseado no trabalho de Cai et al. (2003) para a Bacia do Rio Maipo no Chile (U\$0,24/m²).

Outra função foi necessária para estimar a produção de uva, Y_d , por acre. Cai et al. (2003) estimou a produção em função da necessidade de água para a cultura em suas diferentes etapas de crescimento, srw , tecnologia de irrigação, tek , e salinidade, $salt$, para a Bacia do Rio Maipo no Chile, baseado no modelo de simulação desenvolvido por Letey e Dinar (1986 e 1996). Como as duas bacias estão situadas em zonas de clima mediterrâneo, a aplicação desta função foi

considerada razoável nesta pesquisa preliminar. Assumiu-se salinidade e tecnologia de irrigação iguais para todos os vinhedos, desta forma a produtividade variou apenas em relação a satisfação de água, srw. Este valor varia de 0 a 1, onde em zero a cultura não recebe água e 1 indica demanda satisfeita. A função de produtividade segue abaixo, Yd, assim como os coeficientes adotados:

$$Yd = pm * (b1 + b2 * tek + b3 * srw + b4 * salt + b5 * tek * srw + b6 * salt * srw + b7 * \ln(srw) + b8 * \ln(srw) * tek + b9 * \ln(srw) * salt) \quad (6)$$

Tabela 3 – Coeficientes da função de produtividade, de Cai et al. (2003)

Coeficiente	Valor
b1	0.425
b2	0.940
b3	0.092
b4	-0.137
b5	-0.623
b6	0.072
b7	0.272
b8	0.875
b9	-0.089

Os benefícios líquidos totais foram utilizados através da alocação de água do WEAP. Não foi necessário incluir a porção econômica no WEAP, pois a preferência econômica entre o uso da água superficial em relação à subterrânea já havia sido incluída no modelo. Assim, foi possível calcular o lucro de cada local de demanda encontrado e somá-los para obter o lucro líquido da bacia. A principal razão para que a atribuição de direitos de água superficial não emerge como uma questão mais controversa é porque assumiu-se que viticultores poderiam ter acesso irrestrito a aquíferos locais. Entre todos os locais de demanda, apenas um não teve sua demanda completamente atendida, por não estar em local próprio para utilização de poço de bombeamento de água subterrânea. Uma tentativa para calcular a alocação ótima de água entre os locais de demanda foi realizada no GAMS, a partir da equação objetivo proposta.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção contém os resultados das análises realizadas para responder aos objetivos propostos. Comparações entre o ano normal (1966) e ano de seco (1976) são enfatizadas.

3.1 – Abastecimento e Uso da Água

Em ambos cenários (seco e normal) a maioria dos vitivinicultores utilizou água subterrânea para suplementar ao uso da água superficial e evitar o déficit. Apenas um dos locais de demanda, que depende exclusivamente de reservatório para seu abastecimento, registrou déficit. No cenário

do ano normal este local registrou déficit de 4%, enquanto que no ano seco, este aumentou apenas para 7%. O abastecimento por água subterrânea em vinículas que possuíam também acesso a abastecimento de água superficial aumentou de 60%, no cenário normal, para 66%, no cenário de ano seco. O cumprimento da demanda através de bombeamento de água subterrânea é atribuída a falta de regulações e restrições à este respeito na bacia. Caso regulações fossem instituídas para assegurar uma vazão mínima nos rios, ou para assegurar que as retiradas dos aquíferos na bacia fossem limitadas à recarga média anual, a susceptibilidade dos vitivinicultores à secas seria diferente, e mais crítica.

A redução do abastecimento de água superficial para os locais de demanda com reservatórios *off-stream* foi superior aos com reservatórios *on-stream*, pois as vazões baixas no ano seco foram reservadas à vazões ambientais, devido a regulação proposta de vazão ambiental mínima, Q_{\min} , e, levando em consideração que os reservatório *on-stream* não estão susceptíveis a esta regulação. O abastecimento de água através dos reservatórios *off-stream* reduziu em 47% do ano normal ao seco, enquanto que o abastecimento por reservatórios *on-stream* sofreu redução de apenas 3%. Duas possíveis razões para esta variação de abastecimento pelos reservatórios *on-stream* ter sido tão pequena são: que como no inverno há precipitação suficiente para que estes reservatórios normalmente encham e extravasem as diferenças de precipitação não influem muito, pois mesmo no ano seco estes reservatórios encheram; e o verão do ano seco foi mais molhado do que o do ano normal, reduzindo desta forma os efeitos de evaporação nos reservatórios.

Os impactos da estiagem no cenário do ano seco foram pronunciados em locais de demanda com reservatórios *off-stream*, por exemplo para o local de demanda 1 (D1), aproximadamente 12.335m^3 foram bombeados ao reservatório *off-stream* no ano normal de 1966, enquanto no ano seco apenas 1.233 m^3 (cerca de 10%) pôde ser bombeado. Nesta área a vazão de base influi muito pouco nas vazões dos rios, visto que a região à montante do local de demanda 1 possui formação Franciscana, impermeável. Similarmente, no local de demanda 8 (D8), cuja área de drenagem também possui a formação Franciscana, a vazão de água superficial reduziu 87,5%, de 19.736 m^3 no ano normal (1966) a 2.467 m^3 no ano seco de 1976.

Um dos reservatórios *off-stream* (*off_rev4*), que serve o local de demanda 6 (D6), não recebeu água durante o ano seco, este reservatório está situado imediatamente à jusante do reservatório *on-stream* (*on_rev4*) que dá suporte ao local de demanda 9 (D9). Apenas $1,3\text{ Km}^2$ de área gera escoamento entre o reservatório *on_rev4* e o ponto de retirada para o *off_rev4*, o enchimento do reservatório *on-stream* à montante restringe o bombeamento de água ao reservatório

off-stream à jusante. Os impactos de reservatórios *on-stream* exercem às vazões a jusante, que poderiam ser utilizadas por outros agricultores na bacia, devem ser estudados com maior atenção.

Por outro lado, a estiagem teve baixo impacto sobre os dois pequenos reservatórios *off-stream* situados na parte inferior da bacia, locais de demanda D12 e D14, pois uma grande porção da vazão que alimenta estes reservatórios é proveniente da parte superior da bacia, que não possui locais de demanda.

Finalmente, é importante notar que se assumiu que os viticultores da bacia utilizam a política de operação padrão (*standard operating policy*) para orientar o uso da água. Esta política libera a quantidade total de água a um local de demanda durante um determinado período, independente do risco de escassez num período futuro, o que pode resultar em déficits em períodos futuros da produção. Assumiu-se também, que a produtividade das uvas depende apenas da satisfação da sua demanda de água ao longo de toda a temporada de crescimento, independente da distribuição temporal de água durante cada período deste, no entanto a não satisfação de água durante um estágio de crescimento da cultura pode resultar no murchamento desta. A integração de outras pesquisas sobre a importância de satisfação da demanda em cada estágio de crescimento das uvas é necessária para melhor compreender a operação dos reservatórios e o crescimento da cultura.

3.2 – Benefícios Líquidos da Bacia

Como este estudo comparou apenas a receita e os custos de operação anuais da produção de uvas para vinho, os vinhedos apresentaram lucros muito altos (>800%), nos dois cenários. Vinhedos com fontes de água mais baratas obtiveram lucros superiores; vinhedos com fontes de reservatórios *on-stream* obtiveram lucros superiores aos com reservatórios *off-stream*, e estes, superiores aos vinhedos alimentados apenas por água subterrânea.

Esta simulação de benefício líquido não incorporou preocupações de equidade entre os vitivinicultores. Dada a alta disponibilidade hídrica (relacionada a possibilidade de bombeamento de água subterrânea) alocação não foi um problema. No entanto, em momentos de escassez, em especial no caso do estabelecimento de regulações do uso de águas subterrâneas, decisões justas de alocação devem ser feitas, de forma a evitar conflitos entre os usuários.

Mas, a forma côncava da função de produção (exceto com atendimento de demanda inferiores a 50%) faz com que os benefícios marginais da água sejam maiores em níveis baixos de satisfação de água. Portanto, fornecer água para vitivinicultores com baixo suprimento de água é de interesse dos vitivinicultores individuais e na produção de uvas para vinho na bacia como um todo.

A solução ótima para cada vitivinicultor é utilizar o máximo possível de água superficial e então completar a demanda remanescente com água subterrânea. Dadas as restrições do balanço hídrico e a falta de considerações de equidade as simulações representam as soluções ótimas para os dois cenários testados: ano seco e normal. Utilizar funções de produção e custos de bombeamento variáveis a diferentes usuários tornariam a simulação e a otimização mais interessantes.

3.3 – Interações entre água superficial e subterrânea

Como discutido, o uso das águas subterrâneas têm aumentado na bacia do Rio Maacama nos últimos anos devido à expansão da vitivinicultura e das restrições à aquisição de novas outorgas de água. A aplicação das regulações de vazão ambientais, estudadas neste trabalho, iria aumentar ainda mais a utilização de água subterrânea. Esta dependência pela água subterrânea estabelece riscos potenciais para horizontes de curto e longo prazo.

Em um horizonte de curto prazo, o bombeamento de águas subterrâneas pode ser particularmente problemático em períodos de estiagem, quando devido a baixas precipitações as vazões disponíveis nos rios são pequenas, limitando a quantidade de água nos reservatórios on-stream, assim como o bombeamento a reservatórios off-stream, gerando um aumento na demanda por água subterrânea. Combinando este aumento de demanda a diminuição da recarga do aquífero (ano seco), têm-se uma situação potencialmente complicada.

Uma comparação entre a recarga natural do aquífero e a taxa de bombeamento apresenta uma preocupação sobre a influência da agricultura no aquífero. Embora o total de água bombeada compreenda apenas 55% da recarga natural em um ano normal (1966), no cenário de escassez hídrica (1976) bombeia-se um valor superior em 15% á recarga anual do aquífero, provocando déficit no aquífero. A extensão deste déficit varia ao longo da bacia, nos aquíferos 3 e 5 bombeia-se 172% e 275% da recarga, respectivamente. As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados encontrados. Este estudo excluiu alguns vinhedos por falta de informações, esta exclusão torna esta situação de excesso de bombeamento de águas subterrâneas ainda mais preocupante.

Tabela 4 – Recarga e demanda de águas subterrâneas durante ano normal (1966)

Aquífero	Recarga (m ³)	Demanda (m ³)	Uso Percentual (%)
1	748.230	119.771	16
2	168.247	92.881	55
3	1.326.856	1.068.812	80
4	906.486	400.882	44
5	66.485	91.031	137
Total	3.216.304	1.773.377	55

Tabela 5 – Recarga e demanda de águas subterrâneas durante ano seco (1976)

Aquífero	Recarga (m ³)	Demanda (m ³)	Uso Percentual (%)
1	373.745	114.467	31
2	84.000	92.881	111
3	662.750	1.142.081	172
4	452.935	401.252	89
5	33.057	91.031	275
Total	1.606.487	1.841.712	114

É muito provável que em um horizonte de longo prazo os vinhedos se expandam, assim como mais agricultores venham à região devido a rentabilidade da cultura. Desta forma, considerando efeitos de longo prazo, o bombeamento de águas subterrâneas deve ser cuidadosamente analisado e estudado, pois caso a demanda continue a exceder a recarga implicações graves podem ocorrer como diminuições no nível dos aquíferos, lençóis freáticos e na vazão dos rios.

O estudo demonstra que há fluxo de água superficial para as águas subterrâneas. Estes valores variam, sendo mais preocupantes em aquíferos pequenos, onde a recarga não é alta, assim como mostra que onde há bastante bombeamento a troca do rio ao aquífero é mais alta. Os resultados devem ser observados com cautela, devido a imprecisão de alguns parâmetros utilizados e limitações do próprio modelo de interações do WEAP, como o destino dos excessos de saturação para fora do sistema.

Embora, os valores não sejam muito acurados, este modelo foi bem sucedido em demonstrar que houve fluxo de água do rio para as águas subterrâneas, devido ao bombeamento excessivo de água subterrânea, reduzindo desta forma a vazão dos rios da qual os salmonídeos e outras espécies ribeirinhas dependem. Estes resultados mostram que as regulações de vazões ambientais que possuem o propósito de proteger estas espécies, reduzindo a quantidade de água superficial que pode ser divertida, criam um estímulo para o bombeamento de águas subterrâneas e reduzem, ou até eliminam, por sua vez a vazão de base que alimenta pequenos afluentes durante o verão. Estes efeitos podem se propagar para o início da estação chuvosa, onde o gradiente hidráulico direcionando o fluxo dos rios aos aquíferos irá reduzir a vazão dos rios. As Figuras 5 e 6 mostram dois gráficos da troca de fluxo de água entre as águas subterrâneas e córregos.

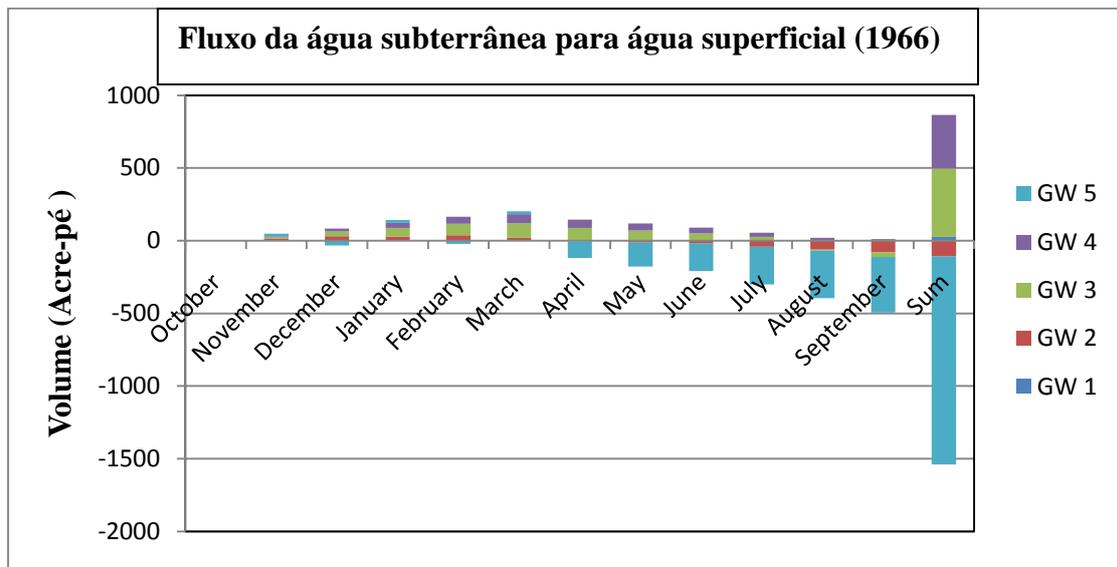


Figura 5 – Fluxo de água subterrânea para água superficial no cenário normal

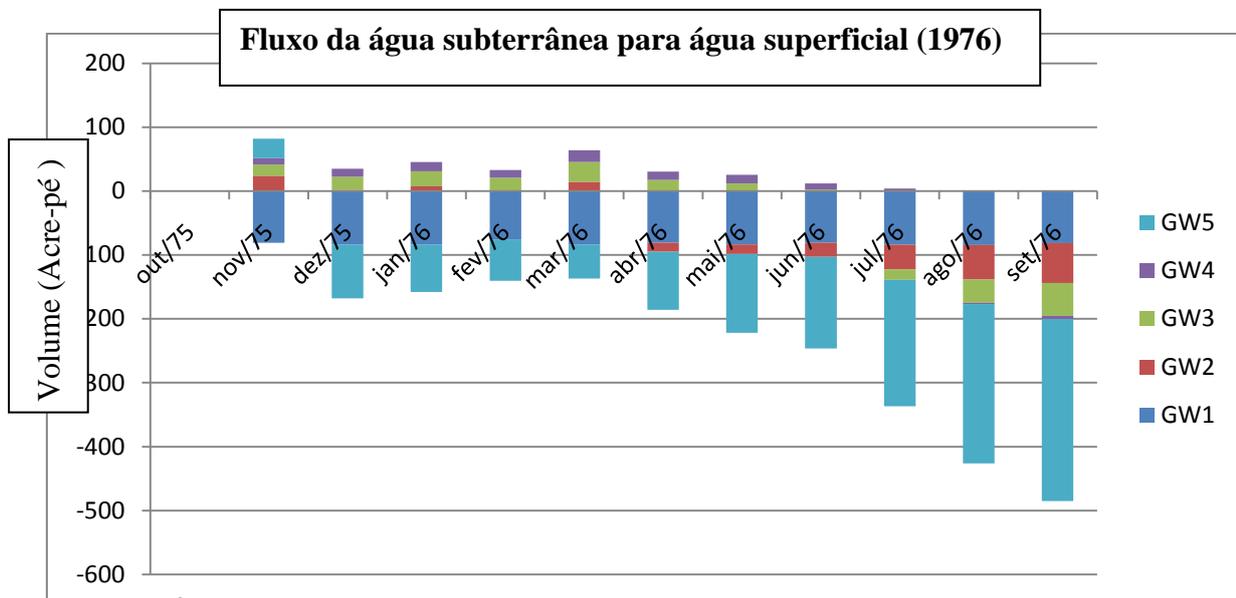


Figura 6 – Fluxo de água subterrânea para água superficial para o cenário seco

Esta análise de troca entre água superficial e subterrânea do WEAP sugere uma necessidade para estudos mais precisos destas trocas na bacia hidrográfica. Esta informação, por sua vez, deveria guiar a formulação de política para melhor gerenciar os impactos econômicos do bombeamento de águas superficiais e subterrâneas na bacia hidrográfica.

4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A falta de regulamentação para retirada das águas subterrâneas de aquíferos amortece os efeitos negativos da estiagem na bacia do Rio Maacama. Apenas um vinhedo, que não possui acesso a água subterrânea, sofreu escassez na simulação. No entanto, o início da seca faz com que os vitivinicultores busquem água que é aproximadamente três vezes mais cara do que a água superficial, dependendo se a fonte de água superficial é através de reservatórios *on-stream* ou *off-stream*. A análise de vulnerabilidade conduzida neste estudo revela também que vinhedos que possuem reservatórios *on-stream* são menos vulneráveis à seca, do que aqueles dependentes de reservatórios *off-stream*, que são sujeitos às regulações de vazões ambientais. Além disso, a detenção e evaporação da vazão do córrego/rio nos reservatórios *on-stream* podem diretamente impactar o abastecimento disponível para vinhedos à jusante.

Embora retiradas de água subterrânea não regulamentadas amenizem os efeitos da estiagem e os efeitos das regulamentações de vazões ambientais aos vitivinicultores, é necessário levar em conta os impactos destas retiradas tanto na vazão de base, que alimenta pequenos córregos habitados por salmonídeos juvenis durante o verão, quanto na sustentabilidade de longo prazo da produção de uva na bacia. Um possível padrão para a retirada de água subterrânea da bacia é a restrição do bombeamento para a recarga média anual. Estudos futuros sobre a recarga de aquíferos e a interação entre água subterrânea-superficial são necessários na bacia, para guiar o desenvolvimento desta regulamentação, ou outra, que restrinja o bombeamento de água subterrânea de forma a proteger vazões mínimas durante o verão ou atrasar a intermitência em córregos pequenos. Alguns problemas foram encontrados na modelagem do WEAP, pois ele assume perdas ao sistema, que deveriam ser incorporadas como trocas entre as águas superficial e subterrânea. No entanto, o modelo utilizado apresenta uma simulação dos impactos de fenômenos sazonais na bacia e se mostrou importante como uma ferramenta preliminar para indicar a importância de estudos futuros a respeito do tema.

Finalmente, os resultados da análise econômica mostraram que a ocorrência de secas geralmente resulta em preços de operação mais altos e, conseqüentemente menores benefícios líquidos, para os vinicultores da bacia. No entanto, os lucros altos obtidos para os vitivinicultores neste estudo não incorporaram os altos capitais necessários para iniciar um vinhedo. Recomenda-se um estudo mais aprofundado combinando os custos-benefícios de longo prazo aos agricultores e preocupações sobre a redução sazonal da vazão de base, assim como análise de longo prazo sobre diminuição do nível do aquífero, uma preocupação que está crescendo devido à instituição de

requisitos de vazões ambientais, a limitação de outorgas de água superficial e o crescimento da vitivinicultura na bacia.

6 – BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, J.G. e ALLEN, P.M. (1999). “*Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records*”. Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 411-424.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M.; MUTTIAH, R. e BERNHARDT, G. (1995). “*Automated base flow separation and recession analysis techniques*”. Ground Water 33 (6), 1010-1018.

BAUER, J.P. (2008). “*Update to Regional Groundwater Flow Simulation of Sonoma Valley Including a New Model for Recharge and Three Future Scenarios*”. Tese de Mestrado, Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University.

CAI, X.; RINGLER, C. e ROSEGRANT, M.W. (2003). “*Modeling Water Resource Management at the Basin Level: Methodology and Application to the Maipo River Basin*”. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute, Research Report 149.

CENTER FOR BIOLOGICAL DIVERSITY. (2009). “*Lawsuit Imminent Over Water Diversions Killing Salmon and Steelhead in Russian and Gualala Rivers*”. Disponível em http://www.biologicaldiversity.org/news/press_releases/2009/russian-river-11-17-2009.html.

Acesso em Maio, 2010.

CUYKENDALL, C.H.; WHITE, G.B.; SHAFFER, B.E.; LAKSO, A.N. e DUNST, R.M. (1999). “*Economics of Drip Irrigation for Juice Grape Vineyards in New York State*”. R.B. 99-01. Department of Agricultural, Resource, and Managerial Economics, Cornell University, Ithaca, New York.

DEITCH, M.J.; KONDOLF, G.M. e MERENLENDER, A.M. (2009). “*Surface water balance to evaluate the hydrologic impacts of instream diversion and application to the Russian River Basin*”, California, USA. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 19, 274-284.

DINAR, A. e LETEY, J. (1996). “*Modeling economic management and policy issues of water in irrigated agriculture*”. Westport, Conn.: Praeger Publishers.

FARRAR, C.D.; METZGER, L.F., NISHIKAWA, T.; KOCZOT, K.M. e RICHARD, E.G. (2006). “*Geohydrologic Characterization, Water-Chemistry, and Ground-Water Flow Simulation Model of the Sonoma Valley Area, Sonoma County, California*”. United States Geological Survey, Scientific Investigations Report 2006-5092.

- GOOGLE MAPS. (2010). Disponível em <<http://maps.google.com>>. Acesso em Maio, 2010.
- LETEY, J., e DINAR, A.. (1986). “*Simulated crop-production functions for several crops when irrigated with saline waters*”. *Hilgardia* 54: 1–32.
- MERENLENDER, A.M.; DEITCH, M.J. e FEIRER, S. (2008). “*Decision support tool seeks to aid streamflow recovery and enhance water security*”. *California Agriculture*, October-December 2008, 148-155.
- NATHAN, R.J. e MACMAHON, T.A. (1990). “*Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis*”. *Water Resources Research*, v. 26, no. 7, pp. 1465-1473.
- NEITCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2005). “*Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation – Version 2005*”. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 2005.
- SMITH, R.J; KLONSKY, K.M.; LIVINGSTON, P. e De Moura, R.L. (2004). “*Sample Costs to Produce Organic Wine Grape North Coast Region –Sonoma County 2004*”. Disponível em: <http://coststudies.ucdavis.edu/files/grapeorgnc2004.pdf>. Acesso em Maio, 2010.