NATALIA DIAS TADEU

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HÍDRICOS DA MONOCULTURA DE EUCALIPTO NO
TRECHO PAULISTA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL
(BRASIL)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM) da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título
de mestre em Ciência Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Antonio de Almeida
Sinisgalli

Versão Corrigida
(versão corrigida disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca
Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Tadeu, Natalia Dias.

Avaliação dos impactos hídricos da monocultura de eucalipto cultivado no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BRASIL)./ Natalia Dias Tadeu; orientador : Antonio de Almeida Sinisgalli. – São Paulo, 2014.

176 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental) – Universidade de São Paulo

1. Recursos hídricos. 2. Impactos hidrológicos 3. Monoculturas de eucalipto. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Natalia Dias Tadeu

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM) da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em Ciência Ambiental.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Professor Dr. Paulo Antonio de Almeida Sinisgalli

Profa. Dra. Ana Paula Fracalanza

Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior

Dedico às pessoa que fizeram parte deste
processo de aprendizagem.

Agradeço,

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Paulo Antônio de Almeida Sinisgalli, orientador e amigo, pois sem sua contribuição, confiança e apoio este trabalho e todo o processo de aprendizagem não seriam possíveis.

Ao prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior, à Dr^a. Vanessa Lucena Empinotti e à prof^a Dr^a Ana Paula Fracalanza por suas rigorosas avaliações e críticas sempre que necessárias.

Ao prof. Dr. Pedro Jacobi, por me acolher em seu laboratório de pesquisa GovAmb.

Aos amigos que contribuíram direta e indiretamente. Agradeço imensamente aos amigos procanianos (Renata, Marcelo, Andréa, Carol, Paulo, Felipe, Nicolás, Vinicius, Karla, Camila, prof. Gerardo e todos que compartilharam momentos de alegria e stress nesse percurso), amigos de longa data (Katia, Luiz, Aline, Vivian, Marta, Débora, Daniel e Pablo), ao Edén (que além de revisar meu trabalho, com a adversidade de ter seus próprios prazos a cumprir e não ter o português como língua pátria, me apoiou, foi amigo e proporcionou oportunidades de ampliação de aprendizagens e práticas nas questões de gestão da água e recursos hídricos associados às questões sociais) e aos novos amigos e companheiros que tive a oportunidade e o prazer de conhecer neste caminho trilhado.

A todas as pessoas queridas que me proporcionaram momentos de distração e alegria.

A todos que mesmo sem ter relação direta ao tema desta dissertação, contribuíram ao trazer momentos de inspiração.

À minha família, pelo respeito, apoio e liberdade.

Ao CEIGRAM (Centro de Estudios y Investigación para la Gestión de Riesgos Agrários y Medioambientales) pelas contribuições feitas durante meu intercambio na Universidade Politécnica de Madrid.

Ao CIGA (Centro de Investigación en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México) pela oportunidade de aprender ainda mais sobre o tema da dissertação e ampliação da minha rede de contatos e amigos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior),

Ao EXCEED (Excellence Center for Development Cooperation – Sustainable Water Management),

Ao PROCAM (Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo).

“A vida apenas, sem mistificação”
Carlos Drummond Andrade

RESUMO

TADEU, Natalia Dias. **Avaliação dos impactos hídricos da monocultura de eucalipto no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BRASIL)**. 2014. 176f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Modificações da cobertura natural dos solos podem ocasionar alterações no ciclo hidrológico, que por sua vez podem impactar a disponibilidade de água. Na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS) vem ocorrendo uma substituição de coberturas vegetais em função da expansão de monoculturas de eucalipto. O objetivo desta pesquisa foi verificar os impactos de ordem hidrológica sobre a disponibilidade hídrica (quali e quantitativa) no trecho paulista da BHPS, em decorrência da implantação da atividade de silvicultura de eucalipto para produção de celulose. Para isso, foi utilizado o método de Pegada Hídrica (PH) para avaliar a alocação de água da produção de madeira de floresta nativa e de eucalipto, método que vem sendo aplicado pelo setor silvícola. Foram empregados também métodos de Balanço Hídrico Climatológico, Balanço Hídrico Geral e a abordagem de Serviços Ecossistêmicos para avaliar a relação entre a água e as principais coberturas vegetais da bacia (pastagem, floresta nativa e eucalipto), de forma a permitir uma análise ampliada e integrada do comportamento hidrológico da bacia. Ao analisar os métodos empregados, observou-se que a PH de produtos avalia apenas a eficiência do uso da água, o que pode mascarar altos consumos de água em função de maior produtividade por hectare. Isto porque se obteve menor valor de PH da madeira, em m³ por tonelada para o caso do eucalipto, e maior alocação total de água, em m³ por hectare por ano, em comparação à floresta nativa. Os resultados obtidos pela análise de Balanço Hídrico Climatológico para as principais coberturas vegetais mostraram que o eucalipto apresentou maior evapotranspiração e menor excedente hídrico. Já o Balanço Hídrico Geral, analisado mensalmente, permitiu visualizar que as coberturas vegetais influenciam o serviço de provisão de água e concorrem pelo uso de água com os demais usuários da bacia (naturais e antrópicos) em períodos de menor precipitação. Por fim, concluiu-se que são necessárias medições locais para determinação de volumes de escoamento (superficial e subterrâneo), infiltração, bem como do processo de lixiviação e perdas de solo para apontar de forma mais precisa os impactos hídricos da monocultura de eucalipto.

Palavras Chave: Gestão de recursos hídricos. Impactos hidrológicos. Monoculturas de eucalipto.

ABSTRACT

TADEU, N. D. Assessment of water impacts of eucalyptus monoculture in the portion of the Basin of the Paraíba do Sul River in São Paulo (BRASIL). Master's Thesis. Graduate Program of Environmental Science, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Modifications in the natural land cover can change the hydrological cycle, which might have an impact on water availability. In the river basin of the Rio Paraíba do Sul (RBPS), the natural vegetation has been being replaced due to the expansion of eucalyptus monocultures. This research assessed the impacts on water availability (both qualitative and quantitative), caused by eucalyptus forestry for pulp production in the RBPS part in São Paulo. The water footprint (WF) method was applied to assess the water used on the cellulose production of native forest and eucalyptus, given the use of this method by the industry. Also, the Climatic Water Balance, General Water Balance methods and the Ecosystem Services approach were used in order to perform an extended and integrated analysis of the hydrological behavior of the basin. By analyzing these methods, it was found that the products WF only assesses the efficiency in water use, which can mask high water consumption with higher productivity per hectare. This because a smaller value for wood WF was observed, in m^3 per ton for eucalyptus, and higher total water use, in m^3 per hectare per year, compared to the native forest. The results observed by the Climatic Water Balance analysis for the main vegetation cover showed that the eucalyptus presented higher evapotranspiration and smaller water surplus. The General Water Balance, analyzed on a monthly basis, showed that the vegetation has an impact on the water provision service and competes for water with other users in the basin (natural and anthropic) in periods with less precipitation. Finally, it was concluded that local measurements are required to determine the runoff volumes (superficial and subsurface), infiltration, as well as the process of leaching and soil loss in order to have a more accurate assessment of the hydrological impacts of the eucalyptus monoculture.

Key words: Water resources management. Hydrological impacts. Eucalyptus monocultures.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1.1 – Maiores produtores mundiais de celulose e papel referente ao ano de 2010	24
Tabela 2.3.1 – Serviços ecossistêmicos oferecidos pela Mata Atlântica	82
Tabela 5.5.1.1 – Valores levantados para o serviço de provisão de água	90
Tabela 5.5.1.2 – Valores levantados para o serviço de retenção da lixiviação de nutrientes no solo	90
Tabela 5.5.1.3 – Valores levantados para o serviço de controle de erosão	91
Tabela 5.5.1.4 – Valoração do serviço de manutenção do fluxo hidrológico	91
Tabela 6.1.1 – Proporção do uso e ocupação do solo por algumas coberturas da Bacia do Rio Paraíba do Sul	96
Tabela 6.3.2.1 – Dados climáticos (Temperatura e Precipitação total) – normais climatológicas (1961-1990)	107
Tabela 7.1.1.1 – Balanço Hídrico da Bacia do rio Paraíba do Sul, com cobertura de monocultura de eucalipto – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC)	115
Tabela 7.1.2.1 – Contabilização da PHverde da silvicultura de eucalipto da BHPS em relação à produtividade de celulose	118
Tabela 7.1.2.2 – Contabilização da PHverde da silvicultura de eucalipto da BHPS em relação à produtividade da madeira	118
Tabela 7.1.2.3 – Contabilização da PHcinza da produção de madeira produzida pela silvicultura de eucalipto da BHPS	118
Tabela 7.1.2.4 – Contabilização da PHtotal da silvicultura de eucalipto da BHPS	119
Tabela 7.2.1.1 – Balanço Hídrico da Bacia do rio Paraíba do Sul, com cobertura de florestas nativas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC)	121

Tabela 7.2.2.1 – Dados para a contabilização da PHverde da madeira de floresta nativa da BHPS	124
Tabela 7.2.2.2 – Contabilização da PH da madeira de floresta nativa da BHPS	124
Tabela 7.3.1 – Balanço Hídrico da cobertura de pastagem na Bacia do rio Paraíba do Sul – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC)	126
Tabela 7.5.1 – Comparação entre os valores de PH da produção de madeira obtidos para as coberturas vegetais de floresta nativa e silvicultura de eucalipto	129
Tabela 7.6.1 – Demanda de água verde por diferentes coberturas vegetais na Bacia do rio Paraíba do Sul	131
Tabela 7.6.2 – Disponibilidade de água verde na Bacia do rio Paraíba do Sul	131
Tabela 7.6.3 – Demanda de água azul por diferentes atividades antrópicas na Bacia do rio Paraíba do Sul em seu trecho paulista	132
Tabela 7.6.4 – Disponibilidade de água verde e água azul na bacia e as demandas para cada tipo de água	132
Tabela 7.6.5 – Disponibilidade e demanda mensais de água verde da bacia	134
Tabela 7.6.6 – Disponibilidades de água verde e azul da bacia e água azul restante após usos por outros usuários	134
Tabela 7.7.1.1 – Serviços ecossistêmicos associados à alteração do balanço hídrico devido à mudança da cobertura vegetal provocada pelo cultivo do eucalipto (água verde) para a produção de celulose	141
Tabela 7.7.1.2 – Serviços ecossistêmicos associados à poluição gerada (água cinza) na fase de silvicultura, devido aplicação de nutrientes minerais e pesticidas e decorrente lixiviação	141
Tabela 7.7.2.1 – Valoração econômica do serviço ecossistêmico e ambiental de retenção de nutrientes do solo associado às coberturas vegetais da bacia	142

LISTA DE SIGLAS

AOX – Compostos Orgânicos Halogenados Adsorvíveis

APP – Área de preservação permanente

ARM - Armazenamento de água no solo

BHPS – Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

BNDE – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel

CAD – Capacidade de água disponível

CDB – Convenção sobre Diversidade Biológica

CDI – Conselho de Desenvolvimento Industrial

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CFP – Centro de Fabricantes de Papel

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEF – Deficiência hídrica

ESALQ – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

ET – Evapotranspiração

ETP – Evapotranspiração potencial

ETR – Evapotranspiração real

EXC – Excedente hídrico

FE – Função Ecológica

ETA – Estação de tratamento de água

IAC – Instituto Agrônomo

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ONG – Organização Não Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

PH – Pegada Hídrica

PND – Plano Nacional de Desenvolvimento

PNPC – Plano Nacional de Papel e Celulose

PSA – Pagamentos por serviços ambientais

RL – Reserva Legal

RH – Resposta hidrológica

RHO – Resposta Hídrica Observada

SE – Serviço Ecossistêmico

UC – Unidade de Conservação

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

WWF – World Wild Fund for Nature

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	15
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E HISTÓRICO	19
1.1. Histórico do setor econômico no Brasil	23
CAPÍTULO 2 - MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO.....	30
2.1. Equação de Penman-Monteith	30
2.2. Método de Thornthwaite & Mather (1955)	33
2.3. Balanço de massa	36
2.4. Planilhas de Balanço Hídrico (BH) desenvolvidas por Sentelhas et al (1999)	38
2.5. Considerações deste capítulo	40
CAPÍTULO 3 – A SILVICULTURA DE EUCALIPTO E SEUS IMPACTOS HÍDRICOS.....	41
3.1. Histórico da silvicultura de eucalipto no Brasil	41
3.2. Aspectos técnicos da produção da madeira de eucalipto	42
3.2.1. Plantio	42
3.2.2. Aplicação de nutrientes minerais e outros produtos químicos	43
3.2.3. Outras práticas do processo de silvicultura	44
3.3. Silvicultura de eucalipto e seus impactos	45
3.3.1. Outros impactos das monoculturas de eucalipto	57
3.4. Considerações do capítulo	58
CAPÍTULO 4 - A PEGADA HÍDRICA	60
4.1. Aplicações do método de análise de Pegada Hídrica	61
4.2. Experiências de inserção da variável econômica no indicador de Pegada Hídrica	65
4.3. Limitações do Método de Pegada Hídrica	68
4.4. Considerações do capítulo	71
CAPÍTULO 5 - FUNÇÕES E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS.....	74
5.1. Conceitos e definições	74
5.2. Relação entre cobertura florestal e processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica	78
5.3. Serviços Ecosistêmicos relacionados aos recursos hídricos fornecidos pela cobertura vegetal natural do solo	85
5.4. Áreas de floresta nativa necessárias à manutenção de alguns Serviços Ecosistêmicos relacionados direta ou indiretamente aos recursos hídricos	86
5.5. Valoração Econômica dos Serviços Ecosistêmicos e Ambientais	89
5.5.1. Valores Econômicos de SEs e SAs fornecidos pelas coberturas vegetais de florestas de mata atlântica, silvicultura de eucalipto e pastagem	93
5.6. Considerações do capítulo	95
CAPÍTULO 6 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	97
6.1. Caracterização da área de estudo	97
6.2. Características das coberturas vegetais de floresta nativa e pastagem no trecho paulista da BHPS	102
6.2.1. Características da madeira de eucalipto para a produção de celulose produzidas na região	102
6.2.2. Características da floresta nativa de Mata Atlântica	103

6.2.3. Características da pastagem na região	106
6.3. Métodos de quantificação do uso de água e impactos hidrológicos	106
6.3.1. Método aplicado para balanço hídrico	107
6.3.2. Pegada Hídrica da madeira de eucalipto e celulose	108
6.3.3. “Pegada Hídrica” da madeira de florestas nativas	113
6.3.4. Balanço Hídrico geral – Disponibilidade e demandas de água verde e azul da bacia	114
6.3.5. Valoração econômica dos serviços ecossistêmicos e ambientais prestados pelas coberturas vegetais da bacia	116
6.3.6. Integração dos métodos	117

CAPÍTULO 7 – INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA POR COBERTURAS VEGETAIS118

7.1. Silvicultura de Eucalipto na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul	118
7.1.1. Balanço Hídrico da silvicultura de eucalipto no trecho paulista da BHPS	118
7.1.2. Contabilização da Pegada Hídrica da madeira de eucalipto no trecho paulista da BHPS	120
7.2. Floresta nativa (Mata Atlântica) da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul	124
7.2.1. Balanço Hídrico da floresta nativa no trecho paulista da BHPS	124
7.2.2. Contabilização da “Pegada Hídrica” da madeira de floresta nativa no trecho paulista da BHPS	126
7.3. Balanço hídrico da pastagem no trecho paulista da BHPS	129
7.4. Análise comparativa das coberturas vegetais de monoculturas de eucalipto, floresta nativa e pastagem	131
7.5. Comparação dos usos e requerimentos hídricos das coberturas vegetais	132
7.6. Uso da água verde e disponibilidade de água azul no trecho paulista da BHPS	134
7.7. Limitações dos métodos empregados e da análise	140
7.7.1. Serviços Ecossistêmicos impactados pelas coberturas vegetais não naturais relacionados aos recursos hídricos	142
7.7.2. Valoração do Serviço Ecossistêmico e Ambiental de retenção de lixiviação de nutrientes do solo no trecho paulista da BHPS	146

CONCLUSÕES GERAIS148

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS151

APRESENTAÇÃO

Embora amplamente estudadas, as relações entre silviculturas e seus impactos de ordem hidrológica¹ ainda geram polêmica e divergência entre especialistas, setores industriais, governamentais e movimentos socioambientais. Esta divergência, decorrente de uma ampla discussão, será apresentada a seguir, com base na revisão de diversos autores que tratam desta temática, focando na natureza dos impactos decorrentes da implantação de monoculturas de eucalipto sobre a disponibilidade quali e quantitativa de água em uma dada região.

De forma geral, ocorre uma divisão deste posicionamento em três grandes linhas acerca dos impactos quali-quantitativos sobre os recursos hídricos. A primeira refere-se aos que defendem os plantios de eucalipto e alegam que estes geram impactos positivos, tais como retenção de sedimentos, aprisionamento de nutrientes no solo e diminuição da lixiviação, melhora da qualidade da água produzida na bacia hidrográfica, entre outros. Outra linha de argumentação se coloca contrária às monoculturas de eucalipto, apontando a ocorrência de impactos de ordem hídrica sobre a disponibilidade quantitativa de água, bem como piora da qualidade (contaminação devido às práticas agrícolas). Por fim, a terceira linha alega que os impactos devem ser observados com base no contexto local e histórico de uso e ocupação do solo da região, pois em áreas degradadas a implantação de monoculturas pode, comparativamente, implicar em modificações positivas principalmente em relação à qualidade da água produzida na bacia. A pergunta que decorre deste debate é justamente se existem elementos provindos de diferentes abordagens metodológicas que permitem uma análise integrada das informações existentes e uma avaliação mais consistente dos impactos de ordem hidrológica associados à monocultura de eucalipto.

Esta pesquisa, situada nesta arena de debate, busca trazer a contribuição de uma nova abordagem para análise do uso da água e avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica pelas silviculturas de eucalipto para fins de produção industrial de celulose. Esta abordagem se diferencia do que vem sendo apresentado até o momento, por propor uma associação de métodos de análise que se complementam a fim de determinar as modificações provocadas pela alteração da cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica.

¹ Quanto a impactos de ordem hidrológica, neste trabalho se refere a impactos associados a alterações do fluxo, distribuição e ciclos da água em uma bacia hidrográfica, bem como questões associadas à qualidade e quantidade de água gerada e disponibilizada (quali e quantitativamente).

Realizou-se nesta pesquisa uma revisão dos métodos que tem sido utilizados para analisar impactos hídricos do eucalipto, junto à aplicação de dois métodos de avaliação, métodos estes empregados pelo próprio setor industrial, para ajudar a compreender melhor os impactos de ordem hídrica desta cultura sobre uma bacia hidrográfica.

Para buscar responder à problemática colocada, esta dissertação está organizada em capítulos que abordam as temáticas associadas ao objetivo deste trabalho. Cada capítulo está estruturado em conceitos, métodos e resultados para o estudo de caso, para posteriormente serem associados de forma a compor uma relação de complementaridade e permitir a análise de forma mais abrangente.

Inicialmente, no Capítulo 1, apresenta-se a problemática acerca das silviculturas de eucalipto e os recursos hídricos, justificativas e objetivos deste trabalho. Ainda neste capítulo, são apresentados os principais acontecimentos históricos que marcaram a evolução da atividade deste setor produtivo de papel e celulose no país.

Já o Capítulo 2 trata da apresentação dos métodos de balanço hídrico utilizados por diversos estudos que buscaram compreender as interações entre as florestas nativas e silvicultura de eucalipto e o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Este capítulo visa apresentar métodos de modelagem das relações entre cobertura vegetal, solo e água que são comumente utilizados para o setor.

No Capítulo 3, são apresentados um breve histórico do eucalipto cultivado no Brasil e em São Paulo e as práticas empregadas nesta atividade (silvicultura), que podem gerar possíveis impactos de ordem hidrológica. Por fim, foram analisados estudos para levantamento dos impactos da silvicultura de eucalipto sobre os processos hidrológicos.

No Capítulo 4, são apresentados os conceitos e métodos da Pegada Hídrica (PH), destacando os estudos que foram realizados até o momento nesta temática. Neste capítulo, discutem-se os limites do método e a necessidade de complementações para uma avaliação mais ampla. Além disso, são pontuados os trabalhos que buscaram, até o momento, ampliar o método da PH, incluindo outras variáveis em sua análise.

No Capítulo 5, são apresentados os conceitos de funções ecossistêmicas (FE) de serviços ecossistêmicos (SE), seguido pela apresentação das relações existentes entre a cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica e seus processos hidrológicos. Em seguida, são pontuados os SE's provisionados pelo tipo de cobertura vegetal nativa da região estudada e a atual discussão acerca das áreas necessárias para que estes sejam preservados. Ainda neste

capítulo é apresentado o método de valoração econômica ambiental, como uma das formas de avaliação dos serviços ecossistêmicos e ambientais prestados pelas coberturas vegetais.

No Capítulo 6, são apresentadas as características da região estudada, no caso, o trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS), tais como localização, histórico de cobertura vegetal e de uso e ocupação do solo, bem como as características locais das principais coberturas vegetais (silvicultura de eucalipto, pastagem e florestas nativas).

Ainda neste capítulo, são apresentados os métodos selecionados para atender à proposta de abordagem desta pesquisa. Inicialmente, são abordados os métodos de contabilização da água utilizada pelas coberturas vegetais, sendo estes a Pegada Hídrica e o Balanço Hídrico Climatológico. A seguir, são apresentados os métodos de avaliação do balanço hídrico geral da bacia, a partir da classificação por tipos de água da Pegada Hídrica, para determinar os impactos dos usos da água sobre a disponibilidade hídrica. Por fim, apresenta-se o método de valoração para avaliação dos serviços ecossistêmicos e ambientais² providos pelas coberturas vegetais, a fim de determinar os impactos sobre o serviço hidrológico de retenção de lixiviação de nutrientes.

O Capítulo 7 apresenta e discute os resultados obtidos a partir do emprego dos métodos selecionados. Não obstante, com esta discussão, espera-se contribuir para a identificação das limitações dos métodos e das necessidades de aprimoramentos para que melhores avaliações e análises possam ser feitas a fim de embasar tomadas de decisão para fins de gestão da água, bem como sugerir forma e meios de superar alguns destes limites.

Na Figura 1, está apresentado o esquema da organização para integração dos temas abordados nesta dissertação.

Figura 1 – Esquema de organização da dissertação

² A diferenciação conceitual dos termos está apresentada no capítulo “Funções e Serviços Ecossistêmicos”.

Por fim, são apresentadas as conclusões gerais possibilitadas pelas análises realizadas, bem como indicações de futuras pesquisas e investigações ainda necessárias para contemplar outros aspectos que não fizeram parte do escopo desta pesquisa.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

O Brasil, no que se refere à disponibilidade dos recursos hídricos, ocupa uma posição privilegiada em relação aos outros países do mundo. A vazão média anual dos rios brasileiros é de aproximadamente 180 mil metros cúbicos por segundo ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), o que corresponde a cerca de 12% da disponibilidade hídrica mundial (ANA, 2007). Ainda segundo o relatório GEO Brasil Recursos Hídricos (ANA, 2007), em relação à distribuição per capita, a vazão média é de aproximadamente 33 mil metros cúbicos por habitante anualmente ($\text{m}^3.\text{hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$), valor 19 vezes maior que o mínimo estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), que seria de $1.700 \text{ m}^3.\text{hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Todavia, nem toda a vazão média dos rios está disponível ao longo de todo o ano, bem como sua distribuição ao longo do território não acompanha a densidade populacional. Vale lembrar ainda que, exceto o rio Amazonas, cujas nascentes provém do derretimento da neve das geleiras andinas, todos os demais rios dentro do território brasileiro são fortemente influenciados pelo regime de chuvas (ANA, 2007).

A importância da discussão sob a ótica da água se dá devido ao seu papel como fator fundamental para a realização das atividades antrópicas, bem como para a manutenção dos ecossistemas e vida no planeta (SALATI et al, 2006). Segundo Rebouças (2006) e Setti et al (2001), a qualidade e disponibilidade da água está relacionada a diversos fatores naturais e antrópicos e podem variar de acordo com o seu local de origem, armazenamento e circulação, formas de uso, ocupação do solo, atividades socioeconômicas desenvolvidas, entre outros.

Modificações realizadas na cobertura vegetal natural de uma área, sejam elas proporcionadas por ações naturais ou antrópicas, afetam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, podendo impactar também a disponibilidade quali e quantitativa da água (TUCCI & CLARKE, 1997, NEARY et al, 2009). Segundo Tucci & Clarke (1997), a cobertura vegetal de uma área possui papel fundamental no balanço hídrico. Pritchett (1979) e Neary et al (2009) apontam possíveis relações entre a quantidade de água produzida na bacia e sua cobertura vegetal, pois a capacidade de infiltração é maior, assim como o escoamento superficial é menor, em solos com cobertura florestal quando comparados a outras superfícies desmatadas. Já estudos de Reis (2004), Neary et al (2009) e Mingoti (2009) indicam a relação existente entre a qualidade da água produzida em áreas com diferentes proporções de cobertura florestal nativa, evidenciando o impacto positivo da preservação da vegetação.

Diversos estudos são realizados para avaliar o consumo de água por florestas nativas e monoculturas de eucalipto através do emprego de métodos diversos (LIMA et al, 1996; TUCCI & CLARKE, 1997; SOARES & ALMEIDA, 2001; RANZINI & LIMA, 2002; ALMEIDA & SOARES, 2003; MORRIS et al, 2004; VITAL, 2007; ALMEIDA et al, 2009; LARA et al, 2009; VAN OEL & HOEKSTRA, 2010; LARA et al, 2011; VAN OEL & HOEKSTRA, 2012), evidenciando a importância do tema. Entretanto, este trabalho se diferencia dos demais por aplicar uma associação de métodos de balanço hídrico, Pegada Hídrica e dados gerados por outras pesquisas em um estudo de caso brasileiro, o que permite a identificação do uso da água de forma diferenciada da aplicação exclusiva de análise de balanço hídrico.

Nos trabalhos de Van Oel & Hoekstra (2010) e Van Oel & Hoekstra (2012) ocorre emprego do método de PH para avaliar o uso da água para a produção de madeira para celulose. Estes trabalhos visam a comparação do uso da água para a produção de papel no mundo. No entanto, nestes estudos não estão incorporados os possíveis impactos das florestas exóticas de eucalipto sobre as bacias hidrográficas nas quais estão inseridas em comparação às florestas nativas, dentro da perspectiva de mudança de uso da terra.

Existem muitos trabalhos que realizam uma avaliação dos impactos hídricos da monocultura de eucalipto que utilizam diversos métodos de balanço hídrico, tais como Lima (1993), Lima et al (1996), Soares e Almeida (2001), Morris et al (2004), Vital (2007), Viana et al (2009) entre outros. Estes trabalhos apontam que os impactos hídricos destes cultivos devem ser analisados com base no histórico de uso do solo anterior. De uma forma geral, estes trabalhos apontam que pode ocorrer melhora de características hídricas específicas, comparadas ao uso anterior do solo. Não obstante, diversos autores consideram que em locais onde exista disponibilidade hídrica compatível à demanda hídrica pela monocultura de eucalipto, os impactos sobre a disponibilidade de água no solo e sobre o comportamento hídrico da bacia não seriam significativos (LIMA, 1993; SOARES & ALMEIDA, 2001; ALMEIDA & SOARES, 2003; VITAL, 2007; VIANA et al, 2009). Contudo, autores como Oliveira et al (2002) e Morris et al (2004) apontam casos no quais a implantação de monoculturas de eucalipto provocam impactos sobre o volume de água percolado e armazenado no solo.

Tendo em vista que atualmente o Brasil é o 4º maior produtor de celulose no mundo (BACELPA, 2011), apresentando maior produção no Estado de São Paulo, que representa certa de 30% da produção nacional e, especificamente, no trecho paulista da Bacia do Rio

Paraíba do Sul (BHPS) concentra-se cerca 15% desta produção (BRACELPA, 2010), torna-se relevante avaliar esta discussão.

As principais coberturas vegetais na BHPS são, por ordem de área, 57,6% de pastagem, 15,6% de floresta nativa e eucalipto 7,1%. No trecho paulista da BHPS vêm ocorrendo a expansão da monocultura de eucalipto de forma mais expressiva sobre áreas antes utilizadas para pastagens pela pecuária extensiva devido à instalação de empresas do ramo de produção de celulose na região (FREITAS JUNIOR & MARSON, 2009; DIAS et al, 2011). Não obstante, a bacia está inserida em uma região hidrográfica (Atlântico Sudeste) que apresenta quadro de criticidade quali-quantitativa (ANA, 2012). Este quadro de criticidade indica situação de escassez hídrica em função da alta demanda por água (em função de seu contingente populacional) e menor disponibilidade relativa (ANA, sd).

Cabe mencionar também que foi empregada a PH para avaliar a produção de celulose de eucalipto e produtos de papel por indústrias localizadas no trecho paulista na bacia do Paraíba do Sul, fatos que suscitaram a necessidade de aprofundar a discussão do emprego desta metodologia nesta região (FIBRIA, 2011; KIMBERLY-CLARK, 2012; TNC, 2012; KC-BRASIL, 2012; FIBRIA, 2013).

Neste setor econômico, existem ainda outros estudos que buscam estabelecer uma comparação entre a eficiência de uso da água entre a produção de madeira, através da silvicultura, com outras culturas e até mesmo com a eficiência de uso da água por florestas nativas, tais como o de Cândia (2013). Este trabalho não realizou uma análise de PH especificamente, mas fez a comparação dos volumes de água necessários para cada unidade de massa produzida, sendo que esta unidade é semelhante à unidade da PH de produtos.

O referido estudo (CÂNOVA, 2013) evidencia um interesse do setor de produção de papel em estabelecer comparativos entre florestas nativas e monoculturas de eucalipto referentes ao uso da água.

Uma das grandes lacunas para a melhor gestão de recursos hídricos é a falta de informação suficientemente abrangente e integrada das diversas demandas de água de uma bacia hidrográfica, bem como do comportamento hidrológico da bacia e sua dinâmica de fornecimento de serviços ecossistêmicos hidrológicos³. Por essa razão, métodos que busquem uma quantificação mais adequada do uso da água em uma bacia são fundamentais para a sua gestão. Entretanto, não somente existe uma forte relação entre o uso do solo com a quantidade e qualidade da água, e suas diversas demandas, mas também para uma gestão integrada de

³ Termo apresentado por Willaarts et al (2012).

uma bacia hidrográfica há necessidade de se observar o comportamento dinâmico de diversos serviços ecossistêmicos hidrológicos associados a estas ocupações.

Tendo isto em vista, a pergunta norteadora desta pesquisa foi: a atividade de silvicultura de eucalipto impacta negativamente a disponibilidade hídrica quali e quantitativa no trecho paulista da Bacia hidrográfica da Bacia do Rio Paraíba do Sul?

Foram testadas as seguintes hipóteses:

- Ocorre impacto negativo sobre a disponibilidade da água na bacia em decorrência do consumo de água verde⁴ que deixa de se tornar água azul, bem como pela lixiviação de nutrientes inorgânicos aplicados para fertilização, que afetam outros usos da água azul na bacia (consumo humano, dessedentação de animais, irrigação, entre outros).
- A cobertura exótica implica em perdas de serviços ecossistêmicos hidrológicos, ou seja, é esperada uma diminuição na qualidade de serviços ecossistêmicos relacionados à quantidade e qualidade de água disponibilizada na bacia em função de alterações de processos hidrológicos.

Cabe ressaltar que o método de Pegada Hídrica (HOEKSTRA & HUNG, 2002; HOEKSTRA & CHAPAGAIN, 2007) foi aplicado para avaliação do uso de água para produção de madeira pela cobertura de floresta nativa devido à sua abordagem distinta do método de balanço hídrico tradicional e por ser de interesse do setor econômico na região estudada.

É importante deixar explícito que os resultados não devem ser interpretados com base no significado conceitual original de Pegada Hídrica proposto pelos autores citados (op. cit). Isto, porque o conceito foi elaborado para analisar a apropriação da água para uso humano para a produção de bens e serviços econômicos. Desta forma, a contabilização do volume de água utilizado pela floresta nativa através do método de Pegada Hídrica será referida como “*Pegada Hídrica*” natural, pois apenas emprega a formulação de quantificação do uso direto e indireto da água para fins de análise da limitação do método.

Neste sentido, este estudo teve como objetivo verificar os impactos de ordem hidrológica da implantação da atividade de silvicultura de eucalipto para produção de celulose no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

Para isso, foi empregado os métodos de análise utilizados pelo setor econômico de papel e celulose, complementando-os para permitir a compreensão do comportamento

⁴ Através da evapotranspiração da água da chuva.

hidrológico associado à atividade de silvicultura. Sendo assim, realizou-se: análise de balanço hídrico climatológico (Sentelhas et al, 1999) das coberturas vegetais da bacia (eucalipto, pastagem e floresta nativa); análise de Pegada Hídrica da madeira (van Oel y Hoekstra, 2010) produzida pela monocultura de eucalipto e floresta nativa da bacia; balanço hídrico geral da bacia, utilizando a classificação por tipos de água do método de PH⁵, de forma a permitir identificar a disponibilidade hídrica, demandas e quadros de criticidade quantitativa; revisar os estudos acerca dos impactos da atividade da silvicultura na bacia e em outros locais; e, por fim, utilizou-se também a abordagem de serviços ecossistêmicos para permitir a compreensão do comportamento hidrológico, integrar os resultados obtidos anteriormente e avaliar a qualidade do serviço ecossistêmico ou ambiental, referente à qualidade da água produzida na bacia, associado às coberturas vegetais predominantes.

1.1. Histórico do setor de celulose no Brasil

Neste tópico serão abordados, de forma resumida, os principais aspectos e fatos que compõe o histórico de desenvolvimento do setor de celulose no Brasil. Ao final, será apresentada uma síntese esquemática demarcando alguns dos principais acontecimentos ao longo do tempo.

Sabe-se que a produção de papel no Brasil foi iniciada no século XIX (LOPES & CONTADOR, 1998; OSORIO, 2007; OLIVEIRA, 2011), especificamente em 16 de novembro 1809, no Rio de Janeiro (SICILIANO, 2003; BRACELPA, 2007). Em São Paulo, a atividade surge vinculada a produção cafeeira, impulsionada pelo desenvolvimento industrial proporcionado pela imigração europeia para trabalho na cultura de café, que trouxe também experiência e conhecimento do processo produtivo do papel (SOTO, 1992; OSORIO, 2007; BRACELPA, 2010).

A indústria brasileira de celulose teve como base capital nacional, não contando com a participação de capital estrangeiro (SOTO, 1992; HILGEMBERG, 2001), diferentemente do

5 A água azul pode ser entendida como um indicador do volume de água superficial ou subterrânea alocada para a produção de um bem ou serviço econômico. A água verde seria o indicador da água de chuva consumida pela fase de produção vegetal de uma cadeia produtiva. Por fim, a água cinza refere-se ao indicador do volume de água requerido para que a diluição de um determinado poluente lançado no corpo hídrico de forma que a qualidade deste restabeleça seus padrões máximos permitidos, ou seja, até que o poluente seja “neutralizado” (HOEKSTRA et al, 2011).

que ocorre com outras importantes indústrias manufatureiras do período. Isto porque, grande parte das indústrias organizadas com maior participação de capital estrangeiro não resistiu à crise do final da década de 1920 (SOTO, 1992).

As principais empresas iniciaram suas atividades econômicas a partir da comercialização do papel importado, migrando para a atividade gráfica e posteriormente à fabricação de papel (HILGEMBERG & BACHA, 2000). Neste período, a pasta de madeira era em sua maior parte importada (SANTANA, 1999) e a atividade florestal era, até então, desenvolvida para outros fins, tais como alimentação de caldeiras, confecção de dormentes para vias férreas, e estava completamente desvinculada da produção de celulose (SOTO, 1992).

Um dos primeiros empreendimentos de grande importância neste setor foi fundado em São Paulo, em 1883. Trata-se da Companhia Melhoramentos, do coronel Antônio Proost Rodvalho⁶, que posteriormente deu origem a uma das mais importantes empresas do setor produtivo até os dias atuais (SICILIANO, 2003).

Em 1917, surgiram as primeiras articulações entre os fabricantes de papel no Estado de São Paulo para a representação frente às disputas entre produtores e importadores, com o objetivo de influenciar o Estado na condução de suas políticas alfandegárias e de proteção ao mercado interno. Em 1919, formaliza-se a formação desta organização, e o Centro dos Fabricantes de Papel (CFP) é fundado. Com o tempo, esta associação foi transformada na Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e celulose (ANFPC) e, posteriormente, foi denominada Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA) (SICILIANO, 2003).

Devido aos efeitos da crise de 1929, o governo proibiu até 1937 a importação de máquinas para a instalação de novas fábricas de papel e criou um fundo especial para socorrer as empresas em dificuldade. Com isso, ocorreu um processo de concentração da capacidade de produção nas maiores empresas existente (CANO, 2007). No entanto, devido à elevação do preço da celulose importada, em decorrência da desvalorização da moeda nacional, é impulsionado o desenvolvimento da produção nacional de pasta de celulose (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

A produção de papel e celulose, próximos ao local da matéria prima foi incentivado pelo aumento da demanda por papel. O grupo Klabin, em Monte Alegre (PR) em 1934, iniciou a implantação de uma fábrica de papel imprensa, inaugurada em 1946, que também

⁶ Latifundiário produtor de café de grande influência em sua época. Destacou-se por sua atuação em diferentes setores industriais, que além do setor papeleiro, conta também com a fundação da primeira indústria de cimento no Brasil (SICILIANO, 2003).

produzia pasta mecânica e celulose semibranqueada, originando o processo de integração vertical na indústria (TRAJANO, 1996; SILVA & SILVA, 2005).

A partir de 1950 ocorreram investimentos no setor produtivo com a criação do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDE, passando a se chamar BNDES em 1982), em 1952, durante a era Vargas, com objetivo de promover e incentivar a atividade industrial no país. No entanto, durante seus três primeiros anos de surgimento, o banco não realizou financiamentos para a indústria de papel e celulose (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

Incentivos políticos foram fornecidos pelo governo de Juscelino Kubstcheck (1956-1961) que impulsionou a economia para a substituição de importações, beneficiando o setor de papel e celulose (JUVENAL & MATTOS, 2001; OLIVEIRA, 2011). Muitas parcerias entre empresas e instituições de pesquisa foram firmadas, bem como diversos estudos realizados, a fim de aumentar a competitividade da celulose nacional no mercado internacional (OLIVEIRA, 2011).

Neste período, ocorre a entrada de empresas de capital estrangeiro no país, em decorrência das políticas públicas implementadas, atraídos pelos benefícios fiscais sob a forma de redução de tributação ou de fornecimento de subsídios para incentivar a instalação de suas fabricas no país (SICILIANO, 2003; OLIVEIRA, 2011). Hilgemberg & Bacha (2000) apontam que o Brasil, neste período, atendia sua demanda de papel, exceto em papel imprensa, mas ainda importava mais de 70% da celulose que necessitava.

Pouco depois começou a grande preocupação acerca da disponibilidade da matéria prima para o suprimento da demanda mundial de celulose, uma vez que as florestas de coníferas das regiões temperadas claramente não seriam suficientes. No Brasil, eram utilizadas coníferas, tais como o pinheiro do Paraná, para se produzir celulose de fibra longa, de forma semelhante aos países do hemisfério norte (OLIVEIRA, 2011). Juvenal & Mattos (2001) apontam que também houve investimento de capital estrangeiro no desenvolvimento de pesquisas para produção de celulose de boa qualidade a partir do eucalipto.

Por se mostrar uma alternativa econômica e tecnicamente mais adequada às condições climáticas brasileiras, além do crescimento rápido (cerca de 6 a 7 anos), o eucalipto se tornou a principal espécie explorada para a produção de celulose de fibra curta (OLIVEIRA, 2011). O desenvolvimento da tecnologia do papel de celulose de eucalipto (fibra curta) foi obtido a partir de pesquisas realizadas principalmente pela Panamericana Textil, a Suzano e a Papel Simão. Em 1957, no Estado de São Paulo, a produção de celulose pelo processo kraft se

intensificou a partir da madeira de eucalipto (HILGEMBERG & BACHA, 2000; JUVENAL & MATTOS, 2001).

Em relação à qualidade da polpa produzida, o eucalipto representou uma revolução do processo produtivo deste setor no Brasil, pois as demais polpas testadas não mostravam o mesmo nível de qualidade obtido, exceto o pinheiro do Paraná. No entanto, a exploração desta espécie, limitada à região sul do país, já apresentava intensa exploração pelo setor produtivo madeireiro. Seu cultivo também não apresentava benefícios econômicos na época, em função do longo período de crescimento da árvore até a idade de corte (JUVENAL & MATTOS, 2001).

Em 1960 o Brasil já produzia cerca de 70% de sua demanda aparente de celulose, com uma produção baseada principalmente na celulose de fibra curta. Foi neste período que surgiram os primeiros excedentes que se destinaram a exportação, porém o país ainda não produzia a celulose de fibra longa (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

O BNDE passou a incentivar e apoiar a implantação de fábricas de celulose capazes de atingir escalas de produção que gerassem excedentes para exportação. Como resultado desta ação, em 1966 surgiu a primeira empresa de grande porte para a produção de celulose de mercado para a exportação, a Borregaard S. A., subsidiária de uma empresa norueguesa (HILGEMBERG & BACHA, 2000; SICILIANO, 2003). O projeto da Boorregaard previa a instalação de uma unidade no Rio Grande do Sul, com uma capacidade de produção de 500 t.dia⁻¹ de celulose de fibra curta a partir do eucalipto (SICILIANO, 2003).

Em 1967, o Estado decide priorizar os projetos de implantação ou ampliação da capacidade de produção de celulose e papel, bem como emite um Decreto que viabilizava a implantação e ampliação de maciços florestais, cumprindo as determinações do Código Florestal de 1965. O que se observou a partir disso foi a expansão das áreas de cultivo de eucalipto e reflorestamento. Ainda em 1967, a Aracruz (atual FIBRIA) iniciou o desenvolvimento da tecnologia de reprodução assexuada do eucalipto, o que contribuiu para uma melhoria qualitativa no setor florestal brasileiro (HILGEMBERG & BACHA, 2000; JUVENAL & MATTOS, 2001).

O BNDE, por sua vez, estabeleceu que a partir de 1968 os incentivos financeiros do banco seriam direcionados a projetos que obedecessem a determinadas escalas mínimas de produção (JUVENAL & MATTOS, 2001), de aproximadamente 100 t.dia⁻¹, e, posteriormente, exigiu também que as empresas demonstrassem capacidade de suprir ao menos 50% de sua demanda de madeira (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

Os autores apontam que o banco visava que fosse reduzido o desperdício de matéria prima e energia, desta forma passaram a exigir que o licor negro, subproduto da fabricação de celulose, fosse recuperado ao ser considerado matéria prima de energia e produtos químicos. Com isso, os projetos com produção menor de 100 t.dia⁻¹ poluíam e desperdiçavam licor negro, pois não havia justificativa ou incentivo para instalação da caldeira de recuperação do licor (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

No início da década de 1970, a resolução 11/1972 do Conselho de Desenvolvimento Industrial (CDI) fixou novas escalas mínimas para níveis de produção de celulose, papel de imprensa, “kraft”, e outros tipos, com expansão prevista para 1000 t.dia⁻¹, para que os projetos industriais de produção de celulose recebessem incentivos (BRASIL, 1972). Nesta década, três grandes empresas começam a operar – Borregaard em 1972; Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) em 1973; Aracruz Celulose em 1978 (HILGEMBERG & BACHA, 2000).

A crise de 1973 faz com que o governo, sob gestão militar de Geisel, opte por investir na indústria de base, visando à substituição de importações e ampliação da participação da agroindústria nas exportações nacionais⁷. Neste contexto, a celulose passa a ser considerada uma *commodity*, objeto do I Plano Nacional de Papel e Celulose (I PNPC). Esta política concede incentivos econômicos (isenção de impostos, créditos, financiamentos, etc) para a aquisição de equipamentos que propiciem a ampliação da atividade (SANTOS & SILVA, 2009; OLIVEIRA, 2011) .

Também ocorreu incentivo à expansão do setor pelo II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND). O Plano previa a instalação de treze grandes plantas até 1980, baseando-se num modelo tripartite com participação do Estado, capital privado nacional e capital privado estrangeiro, no entanto, somente cinco destes projetos chegaram a ser instalados com maior participação do Estado (PALADINO, 1985 apud HILGEMBERG & BACHA, 2000). Já na década de 1980, a indústria brasileira já operava com equipamentos compatíveis com a tecnologia mundial e integração com a produção florestal. Nesta época, a indústria brasileira, segundo Hilgemberg & Bacha (2000), atendia à sua demanda por produção de matéria prima florestal.

A década de 1980 representa a consolidação da indústria de celulose e papel no Brasil. Foi neste período que ocorreram em peso investimentos em modernização e ganho de produtividade, com a expansão da capacidade industrial. Com o II PNPC, foram previstos investimentos de cerca de 6 bilhões de dólares para a ampliação da produção de celulose e

⁷ Neste período, intensificou-se o apoio do Estado à produção de *commodities* e marcou uma fase de mudança da estrutura agrária do país, promovendo também a concentração da propriedade da terra (CAMPOS, 2012).

pouco mais de 3 bilhões para a ampliação da produção de papel (SOTO, 1992; JUVENAL & MATTOS, 2001).

As principais indústrias do setor de celulose instalaram-se em São Paulo a partir da década de 1980, sendo elas a Fábrica de Papel Paulista de Salto, a Companhia Melhoramentos, a Companhia Fabricadora de Papel (que originou o grupo Klabin), a fábrica de papelão Simão e Companhia (posteriormente originando o grupo Simão e adquirida pela VCP), a Indústria de Papelão Limeira S. A. (que deu origem ao grupo Ripasa), entre outras (SOTO, 1992; SANTANA, 1999; HILGEMBERG & BACHA, 2000).

Em 2001, o Brasil ocupou a posição de 11º maior produtor de papel e 10º maior consumidor, representando cerca de 2% do consumo e produção global (JUVENAL & MATTOS, 2001). Quanto às exportações de celulose, o Brasil apresentou grande crescimento, quando comparado aos demais países, dentre eles Canadá e EUA, no período de 1989 e 2002 (BIAVASCHI, 2008).

A autora (BIAVASCHI, 2008) destaca ainda que ao considerar a agregação de valor da fase de produção de papel, o Brasil, neste período analisado, pode ser caracterizado como um grande exportador de matéria prima barata para a alimentação dos parques industriais de outros países industrializados. Dados referente ao ano de 2010⁸ são apresentados a seguir na Tabela 1.1.1.

Tabela 1.1.1 – Maiores produtores mundiais de celulose e papel referente ao ano de 2010.

CELULOSE		PAPEL	
País	mil toneladas	País	mil toneladas
1º - EUA	50.351	1º - China	102.500
2º - China	18.198	2º - EUA	74.375
3º - Canadá	17.073	3º - Japão	26.083
4º - Brasil	13.977	4º - Alemanha	22.630
5º - Suécia	11.672	5º - Suécia	11.417
6º - Finlândia	10.237	6º - Coreia do Sul	11.333
7º - Japão	8.642	7º - Canadá	10.751
8º - Rússia	7.519	8º - Finlândia	10.694
9º - Indonésia	6.710	9º - Brasil	10.260
10º - Chile	5.155	10º - Indonésia	10.247

Fonte: BRACELPA (2013).

Para o ano de 2012, foram previstos no programa de investimentos do setor uma produção de 11,5 milhões de toneladas de papel e 14,4 milhões de toneladas de celulose, sendo deste total, 2 milhões de toneladas de papel e 7,4 milhões de toneladas de celulose

⁸ O mais atual até o momento da consulta em janeiro de 2014.

destinados à exportação (SOARES et al, 2010). Como se pode ver no ranking mundial de 2012, a produção estimada não foi atingida, contudo a produção destinada a exportação foi superada, pois no ano de 2012 o Brasil exportou 8.513 mil toneladas de celulose enquanto o consumo interno foi de 5.875 mil toneladas. No caso da produção de papel, a produção também não atingiu a marca estimada, contudo a previsão de destinação à exportação foi atendida, pois do total produzido 9.562 mil toneladas foi destinada ao consumo interno e 2.052 mil toneladas a exportação (BRACELPA, 2013).

Em relação ao ano de 2013, contudo o que se tem publicado até o momento pela BRACELPA (BRACELPA, 2013) seria a produção de janeiro a novembro que apontam uma produção total de 13.729 mil toneladas de celulose e 9.557 de papel, destes 8.533 mil toneladas de celulose e 1.703 mil toneladas de papel foram destinadas a exportação. Estes dados apontam um aumento da exportação de celulose, quando comparada ao mesmo período de 2012, e menor exportação de papel (BRACELPA, 2013).

Ainda segundo dados deste relatório publicado pela BRACELPA, o Brasil importou 411 mil toneladas de celulose e 1.396 mil toneladas em 2012. Comparado ao ano de 2011, se percebe que houve um aumento de importação de celulose (de 392 mil toneladas em 2011), apesar do aumento de produção e exportação, e uma redução da importação de papel (de 1.455 mil toneladas em 2011) seguidos pelo aumento de produção e redução de exportação (BRACELPA, 2013). Com isso, se percebe uma tendência do aumento de produção de celulose até os dias atuais, voltadas à exportação e a tendência brasileira de exportação de matéria prima com menor valor agregado.

Um resumo esquematizado com marcos históricos do desenvolvimento da atividade produtiva do papel e celulose no país, em forma de linha do tempo, apresentados nesta revisão pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Linha do tempo apresentando síntese de marcos do histórico do papel e celulose no Brasil (1809 a 2013).

CAPÍTULO 2 - MODELOS DE BALANÇO HÍDRICO

Tendo em vista a revisão das relações entre cobertura vegetal e comportamento hidrológico de uma bacia, a necessidade contabilização do balanço hídrico da área de estudo e de levantar dados de evapotranspiração para alimentar as fórmulas estabelecidas por Hoekstra et al (2011) para a quantificação da Pegada Hídrica verde, foram revisados uma série de métodos de quantificação do balanço hídrico. Neste capítulo serão apresentados os modelos de balanço hídrico mais empregados para análise de balanço hídrico de silviculturas, bem como suas facilidades e dificuldades para aplicação.

No manual de Pegada Hídrica (HOEKSTRA et al, 2011) é indicada a utilização do CropWat, software que realiza a quantificação do balanço hídrico de culturas utilizando, entre outros, o método de Penman-Monteith. Esta indicação não foi aplicada neste trabalho em função das limitações do software em relação ao tempo de cultivo da silvicultura do eucalipto.

Visando cobrir esta necessidade, bem como realizar uma análise comparativa dos balanços hídricos das coberturas vegetais analisadas neste trabalho, foram levantados outros métodos que permitissem a consideração de maior tempo de cultivo. Existem diversos métodos para realização de análise do balanço hídrico de um local. A seguir serão mais bem detalhados os métodos mais frequentemente utilizados para avaliação de balanço hídrico de silviculturas, tais como a equação de Penman-Montheit, Thornthwaite & Mather (1955), o método de balanço de massa⁹ e as planilhas desenvolvidas por Sentelhas et al (1999), que utiliza o método de Thornthwaite & Mather (1955).

2.1. Equação de Penman-Monteith

O método de Penman-Monteith refere-se ao uso de uma equação para computar a água evaporada por uma cobertura vegetada. Foi proposta e desenvolvida por John Monteith a partir da combinação do balanço de energia e da fórmula aerodinâmica de Howard Penman (HOWELL & HEVETT, 2004). Desta combinação (FAO, 1998; COLLISCHONN & TISSA, 2008), obteve-se a seguinte equação para a determinação da taxa de evaporação da água (evapotranspiração):

⁹ Método muito utilizado nos estudos sobre balanço hídrico de florestas nativas atlânticas e de silvicultura de eucalipto revisadas neste trabalho.

$$\lambda ET = \left(\frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \frac{1}{\lambda \rho_w}$$

(01)

Sendo,

R_n – radiação líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

$(e_s - e_a)$ – déficit de pressão do ar (kPa)

ρ_a – densidade média do ar a uma pressão constante (kg.m^{-3})

ρ_w – densidade média da água (kg.m^{-3})

c_p – calor específico do ar ($1,013.10^{-3} \text{ MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)

Δ - declividade da curva de pressão de vapor na saturação (kPa.°C^{-1})

γ - constante psicrométrica (0,66)

r_s – resistência da cultura à transferência de vapor (s.m^{-1})

r_a – resistência aerodinâmica (s.m^{-1})

λ – calor latente de vaporização (-)

Os valores das variáveis para alimentar a equação 01 podem ser obtidos a partir de:

$$\lambda = (2,501 - 0,002361 \times T)$$

(02)

Sendo,

T – Temperatura do ar a 2 m da superfície (°C)

$$\rho_a = 3,486 \frac{PA}{275 + T}$$

(03)

Sendo,

PA – pressão atmosférica (kPa)

$$\Delta = \frac{4.098 \cdot 0,6108 \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right)}{237,3 + T} \quad (04)$$

$$e_a = \left[0,6108 \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) \right] \frac{UR}{100} \quad (05)$$

Sendo,

UR = Umidade relativa do ar (%)

$$\gamma = 0,0016286 \frac{PA}{\lambda} \quad (06)$$

$$R_n = S_{sup} (1 - \alpha) \quad (07)$$

Sendo,

S_{sup} - valor medido da radiação que atinge a superfície (MJ.m-2.s-1)

α – albedo (-)

Collischonn & Tussi (2008) apontam que pode ocorrer casos nos quais existem apenas dados de horas de insolação. Neste caso, a radiação que atinge a superfície será uma fração da máxima energia, de acordo com a época do ano, latitude e o tipo de cobertura vegetal do solo. A insolação máxima em um ponto da superfície será obtido a partir de:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (08)$$

Sendo,

N – numero de horas de insolação (horas)

ω_s – ângulo do sol ao nascer (varia com a época do ano)

O ângulo de inclinação do sol ao nascer poderá ser obtido por:

$$\omega = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (09)$$

Sendo,

φ - latitude - positiva do Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul (graus)

δ - declinação solar

$$\delta = 0,4093 \sin \left(\frac{2 \pi}{365} J - 1,405 \right) \quad (10)$$

Sendo,

J – Dias contados a partir de 1º de janeiro

Segundo Collischon & Tassi (2008), a resistência aerodinâmica é inversamente proporcional à altura dos obstáculos que o vento enfrenta, sendo estes os responsáveis pela geração de turbulência. Desta forma, esta variável pode ser obtida de duas formas:

$$r_a = \frac{6,25}{U_{m,10}} \left[\ln \left(\frac{10}{Z_0} \right) \right]^2 \quad \text{para } h < 10 \text{ metros} \quad (11)$$

$$r_a = \frac{94}{u_{m,10}} \quad \text{para } h > 10 \text{ metros} \quad (12)$$

Sendo,

$u_{m,10}$ – velocidade do vento a 10 metros de altura (m.s^{-1})

Z_0 – rugosidade da superfície (m)

h – altura média da cobertura vegetal (m)

A rugosidade da superfície corresponde a um décimo (10%) da altura média da vegetação (COLLISCHONN & TISSA, 2008).

2.2. Método de Thornthwaite & Mather (1955)

O balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), determina o regime hidrológico local sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Se constituindo em uma das maneiras de monitoramento da variação de armazenamento

de água no solo (CAMARGO, 1971 apud SENTELHAS et al, 1999; PEREIRA et al., 1997 apud SENTELHAS et al, 1999).

O balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955), quando empregado de maneira sequencial possibilita ainda a quantificação das necessidades de irrigação em uma cultura (CAMARGO & PEREIRA, 1990 apud VIEIRA, 2011) e a relação do rendimento das culturas com o déficit hídrico (JENSEN, 1968; DOORENBOS & KASSAM, 1994 apud VIEIRA, 2011). O balanço hídrico climatológico é uma das ferramentas mais utilizadas na estimativa da deficiência e do excedente hídrico, da retirada e reposição de água do solo e da quantidade de água armazenada no mesmo (VIEIRA, 2011).

Para a estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do método de Thornthwaite & Mather (1955), é necessária a obtenção primeiramente da evapotranspiração potencial. Para isso, emprega-se a equação de Thornthwaite (1948) a seguir (MARTIN, 2007; COLLISCHONN & TASSI, 2008).

$$E = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \frac{n_i}{N_1} \frac{ND_i}{30} \quad (13)$$

Sendo,

E - evapotranspiração potencial mensal (mm.mês⁻¹)

T – temperatura média mensal (°C)

I – índice de calor mensal

a – função cúbica de I

n – insolação (h.dia⁻¹)

N – comprimento do dia (h.dia⁻¹)

ND – número de dias do período analisado

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \quad (14)$$

Sendo,

T_m a temperatura média de cada um dos 12 meses.

$$a = (6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3) - (7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2) + (1,792 \cdot 10^{-1} \cdot I) + 0,49239 \quad (15)$$

O Balanço Hídrico Normal de Thornthwaite & Mather (1955), por sua vez será obtido a partir da determinação de algumas variáveis apresentadas a seguir. Se a evapotranspiração potencial subtraída da precipitação diária for menor que zero, deve-se calcular o “negativo acumulado” (MARTIN, 2007). Após o calculo dos valores acumulados de precipitação menos evapotranspiração estima-se o armazenamento, dado por (PEREIRA, 2005; MARTIN, 2007):

$$ARM_1 = CAD \left| \frac{(P - ETP)_1}{CAD} \right| \quad (16)$$

Sendo,

CAD – capacidade de água disponível (mm)

P – precipitação mensal (mm)

ETP – evapotranspiração potencial (mm)

Resultando em:

$$ARM_2 = ARM_1 \left| \frac{(P - ETP)_2}{CAD} \right| \quad (17)$$

Segundo Pereira (2005), no caso de ocorrer um ou mais meses com $(P - ETP) > 0$, com valores insuficientes para levar o ARM ao valor da CAD, a equação da rotina normal será:

$$ARM_n = ARM_{n-1} + (P - ETP)_n \quad (18)$$

Porém, caso ocorra outro mês com $(P - ETP) < 0$, utiliza-se a equação 16 (Eq. 16) sem necessidade de calcular o valor acumulado do período anterior. A evapotranspiração real (ETR) será obtida a partir do cálculo de alteração do armazenamento atual subtraído do anterior (MARTINS, 2007).

$$\begin{aligned} (P - ETP) < 0, ETR &= P + |ARM_2 - ARM_1| \\ (P - ETP) \geq 0, ETR &= ETP \end{aligned} \quad (19)$$

2.3. Balanço de massa

Já o balanço hídrico de massa do solo considera as características do solo em armazenar umidade, considerando modificações em sua cobertura vegetal (BROOKS et al, 2003). A representação dos processos de entrada e saída de água de uma bacia hidrográfica apresentados por Lima (2008) pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica (LIMA, 2008).

Sendo,

P- precipitação medida no aberto = P. total

T- transpiração

Ic- interceptação pelas copas

Ip- interceptação pelo piso

Eo- evaporação do solo e de superfícies líquidas

Et- evapotranspiração (total de perdas por evaporação)

Q- deflúvio (escoamento superficial)

Δs - variação do armazenamento da água do solo

L- vazamento freático

Pp- percolação profunda (vazamento por falhas na rocha)

Rs- escoamento superficial (em canais ou para superfície)

Rss- escoamento sub-superficial

Rb- escoamento básico (água subterrânea)

f- infiltração

Pc- precipitação direta nos canais

U- vazamento (água que flui por fora do leito)

Com base na Figura 1, e de forma simplificada, para um determinado período de tempo, a equação do balanço hídrico, segundo Lima (2008) poderá ser expressa por:

$$P = (T + I_c + I_p + E_o) + Q + \Delta s \pm L + U \quad (20)$$

Considerando uma bacia hidrográfica ideal, na qual todos os fluxos positivos e negativos possam ser controlados experimentalmente e não ocorram perdas por percolação profunda (PP) ou vazamentos (L ou U), condições sob as quais, qualquer bacia pode ser utilizada como área experimental para estudos de hidrologia florestal (LIMA, 2008), a equação acima pode ser simplificada para:

$$P - ET - Q \pm \Delta s = 0 \quad (21)$$

Segundo Anido (2002), o balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes do sistema, visando o melhor entendimento de seu comportamento e baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo analisado pelos insumos, ou entradas de água, e pelas saídas de água do sistema (PEREIRA ET AL. 1997; TUCCI, 2000; ZAKIA, 1987 apud ANIDO, 2002). Isto pode ser contabilizado de forma resumida a partir da seguinte equação hidrológica fundamental:

$$Q_e - Q_s = dV/dt \quad (22)$$

Sendo,

Q_e = vazão de entrada

Q_s = vazão de saída

dV = variação de armazenamento de água

dt = intervalo de tempo

Segundo Pereira et al (1997), as possíveis entradas no sistema incluem a chuva, o orvalho, o escoamento superficial, a drenagem lateral e a ascensão capilar, enquanto que as possíveis saídas incluem a evapotranspiração, o escoamento superficial, a drenagem lateral e a drenagem profunda .

Já Donato et al (2007), aponta que para a realização do balanço hídrico pode-se considerar a ausência de vazamentos pelo substrato rochoso e que não ocorra fluxos laterais para fora ou para dentro da local de análise. Desta forma, como o balanço hídrico considera ciclos anuais, a variação de armazenamento de água no solo tende a zero (HEWLETT &

NUTTER, 1969 apud DONATO et al, 2007). Isto ocorre, pois há um equilíbrio da água armazenada no solo durante o ano, permitindo obter o balanço hídrico pela equação simplificada:

$$P = Q + ET \quad (23)$$

Sendo,

P= precipitação

Q= deflúvio

ET = evapotranspiração

Outra forma de calcular o balanço hídrico do solo seria através do método apresentado por Pereira et al, 1997:

$$P + I = Dq + ET + DP + ES \quad (24)$$

Sendo,

P- Precipitação

I- Irrigação

Dq- Variação da umidade no solo

ET- Evapotranspiração

ES- Escoamento (deflúvio)

2.4. Planilhas de Balanço Hídrico (BH) desenvolvidas por Sentelhas et al (1999)

O método de balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) foi adaptado para sua utilização de forma simplificada a partir do programa "BHnorm", que implica na utilização de planilhas elaboradas por Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999). O balanço hídrico climatológico, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), determina o regime hidrológico local sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo.

Pode ser considerado como uma das maneiras de monitoramento da variação de armazenamento de água no solo. Este balanço hídrico pode ser contabilizado a partir através consideração do suprimento natural de água ao solo da demanda atmosférica, pela

evapotranspiração potencial (ETP^{10}), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão. Para a alimentação do modelo são requeridos dados de Precipitação total mensal (P), temperatura média (T) e CAD apropriado para a cultura ou cobertura florestal. Este balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR^{11}), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (CAMARGO, 1971 apud SENTELHAS et al, 1999; PEREIRA et al., 1997 apud SENTELHAS et al, 1999).

Este método é uma das ferramentas mais utilizadas para a estimativa do excedente e deficiência hídrica, da reposição e da retirada da água do solo e da quantidade de água armazenada no mesmo (SENTELHAS et al, 1999). Segundo Tubelis e Nascimento (1992 apud SENTELHAS et al, 1999), o balanço hídrico contabiliza a precipitação perante a evapotranspiração potencial, levando em consideração a capacidade de armazenamento de água no solo. Segundo Sentelhas et al (1999), esta é a máxima quantidade de água, utilizável pelas plantas, que pode ser armazenada na zona radicular das mesmas.

Como o balanço hídrico, segundo Thornthwaite & Mather (1955 apud SENTELHAS et al, 1999), é mais utilizado para fins de caracterização da disponibilidade hídrica de uma região em bases climatológicas e comparativas, a seleção da CAD pode ser realizada em função do tipo de cultura ao qual se quer aplicá-lo do que do tipo de solo. Assim, independentemente do tipo de solo, pode-se adotar valores de CAD geralmente observados para a cultura de interesse (PEREIRA et al, 1997 apud SENTELHAS et al, 1999).

A aplicação do método de Sentelhas et al (1999) permite verificar quando a água proveniente da chuva não será suficiente para atender à demanda do vegetal e obter o balanço hídrico climatológico para coberturas vegetais distintas em um mesmo tipo de solo.

¹⁰ Capacidade máxima de perda de água na forma de vapor, em uma dada condição climática, por um meio contínuo de vegetação, que cobre toda a superfície do solo estando este na capacidade de campo ou acima desta. Inclui a evaporação do solo e transpiração de uma vegetação de uma região específica em um dado intervalo de tempo (CIIAGRO, sd)

¹¹ Soma de todas as formas de transferência de água para a atmosfera através da evaporação pela superfície e transpirada pelas plantas nas condições atuais de parâmetros atmosféricos, umidade do solo e condições da cultura.

2.5. Considerações deste capítulo

Tendo visto os métodos de balanço hídrico apresentado, cabe ressaltar que o método empregado neste trabalho será o de Thornthwaite & Mather (1955) a partir da aplicação do “BHnorm” de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999). O método foi selecionado por permitir a determinação do regime hidrológico local sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo, bem como sua ampla aplicação para a determinação das componentes de balanço hídrico, tais como evapotranspiração e excedente hídrico, que terão importância neste estudo.

Alguns dos estudos que serão apresentados na revisão de impactos hídricos da silvicultura e de serviços ecossistêmicos também avaliaram balanços hídricos e uso da água por coberturas vegetais empregando os métodos apresentados neste capítulo. Existe certa variância entre os resultados obtidos a partir da quantificação do balanço por diferentes métodos e por isso, a comparação entre estes resultados deve ser realizada de forma cautelosa.

CAPÍTULO 3 – A SILVICULTURA DE EUCALIPTO E SEUS IMPACTOS HÍDRICOS

Neste capítulo são apresentados os principais acontecimentos históricos que marcaram a evolução da atividade de silvicultura de eucalipto no Brasil e em São Paulo. Em seguida, são apresentadas as principais características da produção de madeira pela silvicultura que podem implicar em impactos de ordem hidrológica. Por fim, apresenta-se uma revisão do que diversos autores têm apontado como impactos sobre os processos hidrológicos nas áreas onde estes são cultivados.

3.1. Histórico da silvicultura de eucalipto no Brasil

Não se sabe ao certo quando ocorreu a introdução do eucalipto no Brasil (VIANA, 2004). O gênero *Eucalyptus*, originário da Austrália, foi inicialmente cultivado em larga escala no Brasil pelo silvicultor brasileiro Edmundo Navarro de Andrade, através da Companhia Paulista de Estradas de Ferro no estado de São Paulo (ABRAF, 2009).

Ferraro (2010) ressalta que a origem da silvicultura moderna não pode ser conferida exclusivamente ao silvicultor e sua experiência com a Companhia Paulista de Estradas de Ferro, pois se tratou, antes de tudo, de uma ação coletiva, até mesmo mundial, no qual a burguesia cafeeira desempenha forte papel no contexto de crise de superprodução de café ao buscar alternativas de sobrevivência. No entanto, o referido autor (op. cit) aponta que Navarro se destaca ao implantar nos Hortos da Companhia Paulista de Estradas de Ferro uma silvicultura imbuída de princípios da agricultura moderna.

As experiências de Navarro de Andrade tiveram início na primeira década do século XX, entre 1904 e 1909, no horto de Jundiaí, nas quais o silvicultor realizou diversas comparações entre espécies nativas, tais como a peroba, jequitibá, cabriúva, e espécies exóticas, dentre as quais se destaca o *Eucalyptus globulus*. Em seus ensaios, a espécie exótica se sobressaiu para a finalidade desejada e Navarro passou a importar sementes de variadas espécies, selecionando áreas de características ecológicas semelhantes às da Austrália, a fim de aprimorar a produção (ABRAF, 2009).

Os plantios em larga escala de eucalipto no Brasil tiveram impulso nas décadas de 1960 e 1970, com o incentivo fiscal propiciado aos plantios florestais associados ao investimento por parte das indústrias de celulose, papel e siderurgia (HILGEMBERG & BACHA, 2000; ABRAF, 2009), como já citado anteriormente.

3.2. Aspectos técnicos da produção da madeira de eucalipto

Para a realização da análise da apropriação de água pela produção do eucalipto, faz-se importante apresentar uma breve revisão quanto ao ciclo da produção da madeira de eucalipto, desde a fase inicial do processo. Esta revisão visa apontar as atividades necessárias para o cultivo das espécies de eucalipto e as características desejadas para o produto final.

A importância desta revisão não é apenas contribuir para a discussão final do trabalho, mas também apresentar e pontuar os processos necessários que podem gerar impactos sobre os recursos hídricos, bem como os processos que definem o perfil produtivo do setor.

3.2.1. Plantio

Para possibilitar a implantação florestal são necessárias operações tais como o preparo do solo, plantio e os tratos culturais, até que a floresta esteja estabelecida. No preparo do solo, as operações gerais podem envolver a construção de estradas e aceiros, o desmatamento prévio da área, combate às formigas, controle de ervas daninhas, revolvimento do solo, entre outras técnicas que se façam necessárias, de acordo com as características da região (COUTO et al, 2002).

O plantio das mudas pode ser caracterizado pela colocação das mudas no campo. Esta ação pode ser realizada por meio mecanizado, manual ou semi mecanizado, de acordo com os recursos financeiros disponíveis, topografia do campo e disponibilidade de equipamentos e mão de obra (SILVA et al, 2003). Ainda segundo estes autores (op. cit), o plantio mecanizado ou semi mecanizado é realizado nos locais, nos quais a topografia plana permite a utilização de tratores para o emprego de plantadoras traquinadas. O sistema semi mecanizado é denominado desta forma por ter as operações de tratos culturais e preparo do solo realizadas

de forma mecanizada, enquanto o plantio é realizado de forma manual. Já o plantio manual é mais utilizado em áreas declivosas ou em situações nas quais o uso de máquinas é inviável.

Para a realização do plantio pode ser realizada uma avaliação nutricional para a determinação de uso de fertilizantes minerais (SILVA & BELLOTE, 2003). Segundo Valeri et al (1985), que realizou uma análise do tratamento de *Eucalyptus grandis* com aplicação de N, K e micronutrientes aponta que a adubação básica mostrou-se essencial para o desenvolvimento desejável das plantas, maior resistência destas à geada e maior crescimento das árvores e maior produção volumétrica de madeira. A aplicação de nutrientes será apresentada a seguir.

3.2.2. Aplicação de nutrientes minerais e outros produtos químicos

Silva & Bellote (2003) apontam que os nutrientes comumente aplicados para adubação em espécies florestais são o N, P, K e em menor frequência o B e o Zn. Já o Ca e Mg são aplicados apenas no momento da calagem, durante a preparação do solo, antes do plantio e na rotação de culturas. Bellote (2003) aponta que pode ocorrer a necessidade de realização de uma adubação de manutenção, em torno de 2,5 e 3 anos de idade, com o objetivo de fornecer K, Ca e Mg para as plantas.

A seguir, no Quadro 3, são apresentadas as recomendações de Gonçalves (2005) sobre quantidade de adubo (N, P e K) que deve ser aplicada como fertilizante de acordo com algumas características do solo.

Adubação Nitrogenada (N)		Adubação Fosfatada (P)		Adubação Potássica (K)	
Característica do solo (matéria orgânica - g/dm ³)	Quantidade aplicada (N - kg/ha)	Característica do solo (teor de argila)	Quantidade aplicada (P ₂ O ₅ - kg/ha)*	Característica do solo (teor de argila)	Quantidade aplicada (K ₂ O - kg/ha)**
0 – 15	60	< 150	40	< 150	30
16 – 40	40	150 – 350	70	150 – 350	40
> 40	30	> 350	100	> 350	60

Quadro 1 – Recomendações de adubação para cultivo de eucalipto (GONÇALVES, 2005)¹².

* Baseado em solo com extração de 3 a 7 ppm de fósforo.

** Baseado em uma concentração de K⁺ trocável de 0,6 a 1,5 mmolc/dm³

¹² Para mais indicações de quantidades a serem aplicadas sob outras condições e características do solo, consultar Gonçalves (2005).

3.2.3. Outras práticas do processo de silvicultura

Outra ação que pode estar associada à fase de plantio seria o sulcateamento ou coveamento, plantio de mudas, irrigação das covas e replantio (COUTO et al, 2002). Em relação à irrigação, Simões (1989) aponta que em plantios fora de época, a irrigação pode ser necessária para aumentar a taxa de sobrevivência das mudas. Essa irrigação é realizada através do auxílio de carreta pipa, que distribui cerca de 1 a 3 litros de água no solo por muda, em uma única aplicação.

O espaçamento entre as mudas, no momento do plantio é outro fator importante para a qualidade e quantidade de madeira produzida. O objetivo do espaçamento é obter a produção máxima possível, com a melhor qualidade e o menor custo econômico (MARTINS, 2008).

Martins (2008) realizou uma análise de desempenho e custo econômicos de diferentes espaçamentos para a colheita em uma fazenda da VCP, localizada na região de Jacareí. A coleta de dados de produtividade foi realizada em condições reais de operação, em dois povoamentos de eucalipto com diferentes espaçamentos, sendo eles: 6; 7,5; 9; 12; e 18 m² por árvore. O autor (op. cit) conclui que maiores espaçamentos estão associados a menores custos de colheita e melhor desempenho da colheita realizada com uso de *Harvester*¹³.

A preocupação com a produtividade de madeira e qualidade, não se dá apenas em decorrência da maior produção de celulose, mas também em função da qualidade do produto final. Para a utilização da madeira de eucalipto na produção celulósica, Silva (2011) aponta que a madeira proveniente de áreas com maior produtividade apresentam maior qualidade e melhor desempenho, influenciando a qualidade do produto final. Esta conclusão é baseada na análise do emprego de madeira de *Eucalyptus grandis* e *urophylla* para a produção de celulose pelo processo kraft.

Nos tratos silviculturais, Couto et al (2002) destacam ainda que podem ser realizadas as práticas de desrama e desbaste. A primeira tem o objetivo de eliminar os nós formados na madeira através da inserção de galhos e ramos. Já a segunda prática visa a redistribuição do potencial de crescimento do povoamento, além de utilizar o material comercializável produzido (SIMÕES, 1989; COUTO et al, 2002).

Outra característica que precisa ser observada para o cultivo do eucalipto é a capacidade de água disponível no solo (CAD). Souza et al (2006) aponta que para espécies

¹³ Método de colheita de eucalipto mecanizado com equipamento que realiza corte e descasco no próprio local de colheita.

florestais a CAD varia de 150 a 300 mm, adotando o valor médio de 200 mm que foi observado para plantios de eucalipto variando de 3 a 8 anos. Almeida & Soares (2003), em seu estudo no Espírito Santo, em uma área que apresenta cobertura vegetal de *Eucalyptus grandis* e Mata Ciliar, encontraram valores de 200 mm para a capacidade máxima de armazenamento de água do solo para os primeiros 2,5 metros de profundidade.

3.3. Silvicultura de eucalipto e seus impactos

Não somente no Brasil, mas em todo o mundo, as plantações de eucalipto levantam uma ampla e controversa discussão acerca de seus impactos sobre o ambiente. Neste trabalho são abordados apenas os aspectos e impactos de natureza hídrica, ou seja, apenas os efeitos das alterações que afetem os processos hidrológicos da bacia hidrográfica.

Posto isto, inicialmente se aponta que as perdas de solo e nutrientes, provocadas pelos processos erosivos, podem levar a degradação da qualidade da água em função da ocorrência de lixiviação de nutrientes e carreamento de sedimentos. É estimado que cerca de 80% da degradação da qualidade da água de uma bacia esteja associada a processos erosivos (ANDERSON et al, 1976).

Lima (1993), Lima et al (1996), Soares e Almeida (2001), Morris et al (2004), Vital (2007), Viana et al (2009) apontam que os casos das monoculturas de eucalipto devem ser analisados com base no histórico local de uso e ocupação do solo e as condições prévias de conservação do solo. Em casos de áreas sem cobertura vegetal ou com cobertura de pastagens ou agricultura, as plantações florestais de eucalipto podem contribuir para a recuperação de algumas características hidrológicas de uma bacia, tais como a redução de processos erosivos e redução de lixiviação de nutrientes.

No entanto, Lima (1993; 2011), aponta para que as plantações florestais contribuam para a recuperação das condições hidrológicas de bacias degradadas, a fim de melhorar a qualidade da água produzida, é necessário que a floresta tenha um determinado tempo de estabelecimento e deve contar com a adoção de controle de processos de escoamento superficial, erosão e ciclagem de nutrientes.

Lima et al (1996) analisaram a qualidade da água do corpo hídrico principal de uma microbacia, localizada no Município de Itatinga (SP), reflorestada com eucalipto desde 1944, e os resultados obtidos indicaram, com base na concentração dos sedimentos em

suspensão, uma perda média anual de solo de $0,28 \text{ ton.ha}^{-1}$ ¹⁴. Os autores (op. cit.) concluem que a bacia com cobertura vegetal de floresta plantada estudada apresentou escoamento superficial conservativo e dentro do intervalo de concentração natural dos componentes analisados na água do córrego principal.

Outro estudo realizado na mesma microbacia, em Itatinga (SP), também investigou as relações entre uma plantação de eucalipto de 50 anos a 16 anos sem intervenção de práticas de silvicultura quanto à qualidade da água produzida. A investigação foi conduzida por 6 anos antes do corte raso e após o corte. Verificou-se que após o corte, os parâmetros de qualidade mais afetados foram o de turbidez, cor e produção de sedimento em suspensão, todos associados aos processos erosivos relacionados à retirada da cobertura do solo, redução do processo de interceptação da água da chuva e aumento do deflúvio (CAMARA & LIMA, 1999).

Alguns trabalhos apontam que a preservação da mata ciliar, o corte gradual com a retirada apenas do lenho e sem uso intenso de máquinas, a manutenção da serapilheira e a consideração das características hidrológicas locais para o manejo, podem contribuir para a redução dos impactos sobre os processos erosivos e lixiviação de nutrientes do solo, que acabam por impactar a qualidade dos recursos hídricos (LIMA et al, 1996; CAMARA & LIMA, 1999; RANZINI & LIMA, 2002).

Lima (1993) ressalta que a prática de plantações florestais de rápido crescimento, em regimes de rotação intensiva para abastecimento industrial de madeira, ao contrário das florestas de eucalipto de maior idade, conduziria à degradação da qualidade da água. Isto, em função da adoção de práticas de silvicultura, tais como preparo de solo, regime de corte raso, fertilização mineral, entre outras práticas de manejo que propiciam a exposição e degradação do solo, permitindo a lixiviação de nutrientes e contaminação dos corpos hídricos.

A concorrência entre o uso da água pelas espécies de eucalipto e outras espécies seria outro impacto a ser levantado. Este fator estaria relacionado, dentre outras formas que serão abordadas mais a frente, ao consumo de água no solo, de maneira a tornar indisponível o recurso para o consumo das demais espécies da mesma região. Este assunto é discutido por uma série de autores, no entanto, suas conclusões variam de acordo com os estudos realizados (LIMA, 1993; MORRIS et al, 2004; VITAL, 2007).

¹⁴ Estudos revisados no tópico de Valoração Econômica dos SES e SAs indicam uma alta variação desta taxa pois foram encontrados valores de perda de solo que variaram de $0,135 \text{ t/ha/ano}$, para monoculturas de eucalipto com cerca de 9 anos, no Estado do Rio Grande do Sul (OLIVEIRA, 2011), até cerca de 200 t/ha/ano , para o caso de silvicultura em ciclo de produção industrial, no Estado do Espírito Santo (VENTURIN, 2011).

Em relação ao regime hídrico, o eucalipto poderia acarretar no ressecamento do solo em locais, nos quais a faixa de precipitação anual seja inferior a 400 mm.ano^{-1} (VITAL, 2007). Neste caso, a plantação pode utilizar as reservas de água contidas no solo, podendo ainda prejudicar o crescimento de outras espécies. Diversos autores (LIMA, 1993; SOARES & ALMEIDA, 2001; ALMEIDA & SOARES, 2003; VITAL, 2007; VIANA et al, 2009), no entanto, alegam que em locais nos quais ocorra maior precipitação pluviométrica, de forma a atender a demanda hídrica da plantação florestal, a silvicultura receberia mais água do que o necessário para seu consumo, e não provocaria o ressecamento do solo.

A partir desta argumentação, Vital (2007) aponta que os impactos sobre a água subterrânea e cursos d'água dependerão da região na qual a plantação estiver inserida, bem como da distância entre as plantações e do nível do lençol freático. Percebe-se, entretanto, que o autor deixa de considerar outros usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na bacia hidrográfica, uma vez que não será o único usuário do recurso.

Desta forma, não estão sendo consideradas as demandas pelos outros usuários da bacia (antrópicos e não antrópicos) que, junto a alteração da capacidade de infiltração e percolação de água que afetarão a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, determinando, por exemplo, a disponibilidade de água para o consumo pela atividade agrícola. Contudo, é possível destacar que, com base nas informações levantadas neste trabalho (VITAL, 2007), a concorrência entre o uso da água por espécies nativas e exóticas dependerá fortemente das características pluviométricas da região na qual estiverem inseridas.

Soares & Almeida (2001) e Almeida & Soares (2003) indicam que em condições de baixa disponibilidade de água no solo, as árvores de eucalipto apresentam um eficiente controle estomático, bem como elevada perda de folhas a fim de evitar a transpiração. Neste estudo, tanto a floresta plantada, como a floresta nativa apresentam comportamento semelhante, inclusive consumindo água do solo nos períodos de menor precipitação. Cabe ressaltar, que este estudo foi realizado na região de Aracruz no Estado do Espírito Santo, região que apresenta precipitação pluviométrica de aproximadamente $1.350 \text{ mm.ano}^{-1}$ (SOARES & ALMEIDA, 2001), considerada alta se comparada à média de precipitação anual de outras regiões do país.

Neste caso, o consumo de água do eucalipto é semelhante ao da floresta nativa do Estado do Espírito Santo, segundo as conclusões apresentadas pelos autores (SOARES & ALMEIDA, 2001; ALMEIDA & SOARES, 2003), portanto as características locais

(características climáticas, pedológicas, condições edáficas, hidrológicas e fitogeográficas¹⁵) propiciam um ambiente de menor vulnerabilidade a impactos em relação à disponibilidade quantitativa da água para a implantação desta cultura vegetal. Obviamente que esta observação não está considerando outras dimensões de impactos ambientais, como aqueles associados aos usos sociais da água na bacia hidrográfica (comunidades locais, população, demais atividades econômicas, entre outros) e àqueles relacionados à qualidade da água produzida pela bacia.

Isto parece fazer sentido ao observar os impactos analisados em regiões que apresentem outras características, como por exemplo, o caso da Península Leizhou, na China (MORRIS et al, 2004) e áreas de cerrado, no Estado de Minas Gerais (LIMA, 1993; OLIVEIRA et al, 2002).

Visando entender este impacto, Morris et al (2004) conduziu um estudo na Península Leizhou, na China, em uma região na qual a precipitação anual varia entre 1300 mm e 1800 mm e o solo é arenoso e com baixa capacidade de armazenamento de água ¹⁶. Neste caso, o estudo indica a possibilidade das plantações de eucalipto afetar excessivamente os recursos subterrâneos quando as plantações, tanto de eucalipto como das outras atividades agrícolas, esgotam a água armazenada no solo na zona radicular durante a estação seca e extraem parte da água da chuva que infiltraria no solo durante a estação chuvosa.

No Brasil, Lima et al (1990) apresenta uma comparação entre o balanço hídrico de vegetação natural de cerrado, no Vale do Jequitinhonha, no Estado de Minas Gerais, com plantações de Eucalipto e Pinus, ambas com cinco anos de idade. No esquema elaborado pelo autor pode ser observado, na Figura 4, que ocorre maior precipitação efetiva (parcela da precipitação que infiltra no solo) no caso da vegetação nativa, porém é observado maior volume de drenagem em função da maior ascensão capilar das silviculturas. Ainda neste trabalho, são apontadas que as perdas de água do perfil do solo são maiores no caso das silviculturas.

A partir destes resultados, Lima (1993) discute a eficiência do uso da água pela floresta de eucalipto para produção de madeira. A produção de madeira da vegetação nativa de cerrado é expressivamente mais baixa que a produção de madeira das silviculturas. No

¹⁵ Características que permitem o estabelecimento dos domínios morfoclimáticos de Ab'Saber (1977; 2003).

¹⁶ A definição de “baixa capacidade de armazenamento de água no solo” foi apontada pelos próprios autores do artigo Morris et al (2004).

entanto, citando Adlard (1987 apud LIMA, 1993), ele ressalva que este não deve ser o argumento para justificar o maior consumo de água pelas silviculturas de eucalipto.

Figura 4 – Representação esquemática do balanço hídrico do solo comparativo entre vegetação nativa de cerrado, de Minas Gerais, e plantações de Pinus e Eucalipto, ambas com 5 anos (LIMA et al, 1990)

Em outra região do Vale do Jequitinhonha (MG), que tem seu clima caracterizado como semiárido, apresentando precipitação anual de 800 mm, e em uma área de solos álicos, ácidos e de baixa fertilidade natural, foi realizado um estudo sobre os impactos das plantações de eucalipto sobre a recarga subterrânea. Neste local, ocorreu a substituição direta da vegetação nativa de cerrado por plantações de eucalipto. Esta alteração na cobertura vegetal ocasionou um aumento da evapotranspiração, e consequentemente, na redução de cerca de 164 mm.ano^{-1} da recarga da água subterrânea. Esta redução, por sua vez, acarretou em redução do fluxo dos rios temporários da região, impactando a população local que utiliza esta água superficial (OLIVEIRA et al, 2002).

Este estudo (OLIVEIRA et al, 2002) compara seus resultados com aqueles obtidos por Lima et al (1990), apontados anteriormente, e destaca a diferença no índice de precipitação média anual das duas regiões estudadas. O primeiro estudo (LIMA et al, 1990), realizado na região de Grão Mogol, apresenta precipitação anual média de 1.121mm, enquanto a região estudada por Oliveira et al (2002) apresenta média de 800 mm. A Figura 5 apresenta a representação esquemática elaborada por Lima et al (1990), com os resultados obtidos no estudo de Oliveira et al (2002).

Figura 5 – Representação esquemática do balanço hídrico do solo comparativo entre vegetação nativa de cerrado, de Minas Gerais, e plantação de Eucalipto (adaptado de OLIVEIRA et al, 2002)

Com base nos dados apresentados por Oliveira et al (2002), a perda de água de recarga representa, quando considerada a área de plantações de eucalipto da região, a diminuição de cerca de $46.550 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, em uma área que apresenta escassez hídrica. O autor (op. cit) extrapola esta análise para outra região do Vale do Jequitinhonha que apresenta maior área de reflorestamento com eucalipto e conclui que a perda de recarga seria da ordem de $9,78.10^8 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$.

A evapotranspiração é outro fator do balanço hídrico bastante estudado quando se pretende avaliar o consumo de água de uma cobertura vegetal. Muitos autores (SOARES & ALMEIDA, 2001; ZHANG et al, 2001; ALMEIDA & SOARES, 2003; LIMA, 2011) apontam que as florestas plantadas de eucalipto apresentam taxa de evapotranspiração semelhantes às de outras florestas nativas.

Neste sentido, Soares & Almeida (2001) e Almeida & Soares (2003), já citados anteriormente, no estudo realizado em área de floresta atlântica, no Estado do Espírito Santo, realizam medições de balanço hídrico nas florestas plantadas e nativas da região e afirmam que as taxas de evapotranspiração obtidas para a plantação do eucalipto são muito próximas daquela obtida para a floresta nativa. O consumo de água na fase inicial de crescimento da floresta plantada pode ser inferior ao da floresta nativa e a razão entre as taxas de

evapotranspiração e precipitação mostraram que existe certo equilíbrio entre a perda de água (evapotranspiração) e a sua entrada (precipitação).

Estes autores (op. cit) realizaram as análises apontadas também no estudo de Vital (2007), que ressaltou que a avaliação do uso da água por uma floresta estaria associada à relação existente entre as taxas de precipitação e evapotranspiração. Os resultados obtidos por Almeida e Soares (2003), após a avaliação da perda de água do sistema por ambas as coberturas florestais, apontam, mesmo que próximos, maiores valores para o caso do eucalipto.

Lima (2011) aponta um estudo realizado por Zhang et al (2001), que analisam dados de cerca de 250 estudos experimentais em bacias hidrográficas e indica que não existem diferenças significativas entre o comportamento da evapotranspiração de bacias com diferentes coberturas vegetais, ou seja, desde a cobertura de pasto até a cobertura florestal apresentam comportamentos semelhantes.

Neste sentido, o autor (op. cit.) afirma que o balanço hídrico é governado mais fortemente por condições climáticas do que pela cobertura vegetal¹⁷. Na Figura 6, é possível observar a relação entre a evapotranspiração anual e a precipitação anual obtidos em um estudo experimental em uma bacia do PROAMB, programa de monitoramento ambiental, do Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, comparados à curva do comportamento entre estas variáveis propostas pelo estudo de Zhang et al (2001).

Figura 6 – Relação entre a evapotranspiração anual de diversas coberturas vegetais e a precipitação anual, com curva da relação proposta por Zhang et al (2001).

¹⁷ Existem estudos, como o de Almeida et al (2009), citado neste trabalho, que apontam que o uso e ocupação do solo, bem como os tipos de coberturas vegetais de uma bacia podem influenciar significativamente o balanço hídrico, ao indicar alterações das RH em função da proporção de florestas nativas e outras coberturas vegetais na bacia.

Em relação aos aspectos hidrológicos das silviculturas, Lima et al (2011) ressaltam que o problema de consumo de água é apenas uma parte de um problema maior, que deve ser analisada não apenas em quanto à quantidade de consumo *per si*, mas também quanto ao nível de consumo, considerando a disponibilidade natural da água na região. Neste contexto, cabe adicionar que não somente a disponibilidade quantitativa de água da região deve ser considerada, como também as demais demandas da bacia, bem como a disponibilidade qualitativa para atender a estas.

Outra questão a ser levantada refere-se à diferença entre os resultados obtidos de acordo com o método aplicado para a estimativa deste fator do balanço hídrico. No trabalho realizado em Itatinga, no Estado de São Paulo (SP), Lima et al (1996) realizaram um estudo experimental com duração de três anos em uma microbacia “reflorestada” com eucalipto (de cerca de 50 anos) e indicaram que a precipitação média anual (P) foi de 1.635 mm, o escoamento superficial média anual (Q) foi de 551 e a evapotranspiração média anual (P – Q) foi de 1.084 mm.

Com base em dados históricos, sabe-se que a normal climatológica (1991 – 2003) para a evapotranspiração potencial¹⁸, nesta região é de 920 mm.ano⁻¹, obtidos a partir do método de Thornthwaite (LIMA et al, 2008). Ainda em Lima et al (2008), são apontadas diferenças semelhantes a esta entre os valores estimados para a evapotranspiração obtida a partir dos dois métodos, o de balanço hídrico do solo (P – Q) e Thornthwaite, para outros locais monitorados. Com isso, pode-se observar que diferenças nos valores de evapotranspiração podem ser referentes ao método empregado para sua estimativa.

Assim como já pontuado anteriormente em relação ao aspecto de armazenamento de água no solo, a evapotranspiração também é indicada como um fator que varia de acordo com a região na qual a plantação de eucalipto estiver inserida, e, portanto se distinguirá da vegetação nativa de áreas que apresentem médias menores de precipitação anual, bem como outras condições edáficas, características pedológicas, entre outras (NOSETTO et al, 2005; TATSCH, 2006, CAVALCANTE, 2011).

Em áreas de campo limpo ou pastagens, por exemplo, bem como qualquer outro tipo de vegetação aberta, o florestamento pode ocasionar uma redução de aproximadamente 20%, da produção de água de uma bacia hidrográfica em termos gerais, enquanto as perdas evaporativas podem dobrar, devido à interceptação maior da água da chuva pelas copas das árvores (CALDER, 1986; LIMA, 1993).

¹⁸ A evapotranspiração potencial seria a máxima perda de água para a atmosfera, em forma de vapor, que ocorre com uma vegetação em crescimento, sem restrição de água no solo (AGRITEMPO, sd).

Nosetto et al (2005) realiza a comparação entre a forma de uso da água pela vegetação natural dos Pampas da área central da Argentina, em áreas de transição de solos argilosos para arenosos, e com plantações de eucalipto. Seus resultados apontam que as plantações de eucalipto, em média, perdem cerca de 80% de água a mais por processos evaporativos. A evapotranspiração anual observada para as duas coberturas foi de aproximadamente 630 mm.ano^{-1} para a vegetação nativa de Pampa e $1.150 \text{ mm.ano}^{-1}$ para o eucalipto. O autor (op. cit.) aponta que a substituição direta dos pastos naturais pelo eucalipto provoca alterações no ciclo hidrológico da região e, considerando a tendência de constante substituição de pastos naturais por silvicultura, são necessários estudos quanto a modificações nos processos hidrológicos e climáticos regionais, em função da maior perda de água pela vegetação.

Tatsch (2006) realiza um estudo comparativo entre as plantações de eucalipto, cana de açúcar e áreas de cerrado, visando identificar a influência dos padrões de mudança de uso do solo sobre mudanças climáticas locais. Os resultados apontam que existe uma grande oscilação nos valores obtidos para a evapotranspiração do eucalipto e que este se destaca em relação às demais coberturas vegetais analisadas (cana de açúcar e cerrado), sendo esta mais pronunciada no período úmido.

Outro estudo, realizado por Mendes (2011), em Eldorado (RS), na sub bacia de Arroio dos Ratos, compara o balanço hídrico de dois manejos de plantios de eucalipto, empregando espaçamentos entre indivíduos de $1.666 \text{ árvores.ha}^{-1}$ e $1.111 \text{ árvores.ha}^{-1}$, em substituição a áreas de pastos e conclui que ocorre maior perda de água, via evapotranspiração, após a substituição. Esta perda por evapotranspiração é mais intensa no caso do cultivo de $1.666 \text{ árvores.ha}^{-1}$. Esta maior perda de água, via evapotranspiração, apresenta impactos sobre a produção de vazão anual (produção de água de uma bacia).

Outro fator do balanço hídrico analisado por diversos autores seria o escoamento superficial. Tucci & Clarke (1997) analisam a literatura focada na relação entre as silviculturas de eucalipto e a água. Inicialmente um estudo realizado em 1967, por Hibbert, que estudou 39 bacias experimentais no mundo, com diferentes coberturas vegetais, buscou estabelecer as relações existentes analisando as taxas de desmatamento e retirada da cobertura vegetal com o aumento do escoamento rápido e vazões de corpos hídricos (BOSCH & HEWLETT, 1982).

Dentre os principais apontamentos, o estudo indica que a redução da cobertura florestal está associada ao aumento da vazão média dos rios, bem como o estabelecimento de

cobertura florestal (ou de espécies arbóreas) em áreas de vegetação esparsa, acabam por diminuir a vazão média (BOSCH & HEWLETT, 1982).

O estudo de Bosch e Hewlett (1982) ampliou a análise de Hibbert, para 94 bacias hidrográficas, ao adicionar mais 55 bacias experimentais. Este estudo confirmou as afirmações de Hibbert, quanto à relação da cobertura florestal e as vazões médias, indicando que esta avaliação não é possível quando o desmatamento for inferior a 20% por não apresentar efeitos quantificáveis. Os referidos autores fizeram outras importantes contribuições ao apontarem que a retirada de cada 10% de uma cobertura vegetal de coníferas ou eucaliptos¹⁹ ocasiona um aumento de aproximadamente 40 mm na vazão anual. Da mesma forma, a retirada de cada 10% de floresta decidual e vegetação arbustiva provoca um aumento de 10 a 25 mm na vazão anual.

Sato et al (2007) e Sato (2008) realizam estudos para determinar as respostas geo hidrológicas da substituição das áreas de pastagens, utilizada pela pecuária, por plantações de eucalipto. Este estudo é realizado no médio Vale do Paraíba do Sul e aponta que apesar da maior produção de serapilheira, com retenção de água semelhante à produzida por florestas ombrófilas densas da região, o comportamento entre a infiltração e escoamento, tanto do pasto, como da silvicultura, foram semelhantes. As taxas de escoamento superficial e relação entre escoamento e precipitação da silvicultura foram semelhantes àsquelas observadas áreas de pastos (SATO et al, 2007; SATO, 2008).

O trabalho de Cavalcante (2011), realizado em Eldorado (RS), que compara manejo de plantio de eucalipto e pastos não naturais indica que ocorre diminuição do escoamento superficial após a substituição de pastos por plantações de eucalipto. Seus resultados apontam também que as menores taxas de escoamento são observadas quando o eucalipto está na faixa etária entre 3 e 4 anos e que o maior espaçamento entre os indivíduos, contribui para maiores taxas de escoamento.

Da mesma forma, o Trabalho de Baumhardt (2010), que compara o comportamento hidrológico de coberturas de pastagens naturais de Pampa com plantações de eucalipto, na região de Campanha (RS) em campos naturais de Pampa utilizados para pecuária, mostram que em média ocorre menor escoamento superficial nas áreas plantadas com eucalipto. Os autores (op. cit) indicam que este fator pode, também, estar associado à maior interceptação por parte da silvicultura e pela menor capacidade de infiltração das áreas de campos naturais, utilizadas para pastagem pela atividade pecuária.

¹⁹ Os autores não apontam se as coberturas de eucalipto e coníferas são naturais ou plantada, porém grande parte das bacias estão localizadas em zonas temperadas.

Estudos conduzidos no Chile, em bacias semelhantes localizadas na região das florestas tropicais de Valdivia, mostram resultados distintos destes obtidos por Sato et al (2007) e Sato (2008). Lara et al (2009) e Lara et al (2011), por sua vez realizaram uma análise histórica da evolução das taxas de florestas nativas²⁰ e silviculturas com espécies exóticas, dentre elas o eucalipto, em 6 bacias hidrográficas do Chile. O estudo mostrou uma forte correlação positiva entre a razão entre o escoamento superficial (“quickflow”²¹), precipitação (Q/P) e a porcentagem de cobertura florestal nativa, enquanto que para a cobertura vegetal de espécies plantadas esta correlação foi negativa. As relações obtidas no estudo podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre o escoamento superficial e a precipitação observada em 6 bacias hidrográficas do Chile e a porcentagem de cobertura vegetal por tipo (LARA et al, 2009; LARA et al, 2011)

Outro resultado observado pelo estudo foi que áreas com florestas nativas apresentam maior vazão observada nos rios na estação seca (verão). Para isso se observou a relação vazão/precipitação, observando o efeito da sazonalidade. Sendo assim, a análise realizada neste estudo aponta que a substituição das florestas naturais por silviculturas (eucalipto e pinus) afeta a produção quantitativa de água desta bacia, ou em outras palavras, impactam o serviço ecossistêmico de provisão de água ao longo do tempo (LARA et al, 2011).

Os dados acima levantados apontam que a presença ou ausência de cobertura florestal apresenta influência no escoamento superficial de bacias hidrográficas, podendo impactar a produção de água destas, como pode ser observado nos estudos conduzidos por Bosch e Hewlett (1982). Os estudos de Sato et al (2007) e Sato (2008) mostram que existe semelhança

²⁰ As florestas nativas deste estudo referem-se a uma variação de espécies que seguem o gradiente bioclimático da região. Existem domínios de áreas com formações vegetais abertas do tipo esclerófila, florestas caducifólias do gênero *Nothofagus* e florestas latifoliadas perenifólias, que formam as “florestas sempre verdes” (valdivianas) (LARA et al, 2012). O clima da região norte é considerado temperado com influência mediterrânea, caracterizado por verões secos, com precipitação entre 1700 a 4500 mm/ano (LARA et al, 2009).

²¹ Escoamento total com a subtração do escoamento base.

entre as taxas de escoamento e relação entre escoamento e precipitação ao comparar plantações de eucalipto e pastos na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Já estudos realizados em outros locais, como no caso daqueles conduzidos no Estado do Rio Grande do Sul (BAUMHARDT, 2010; CAVALCANTE, 2011) mostram comportamentos distintos entre as coberturas vegetais naturais, pastos e eucalipto. O mesmo ocorre no estudo conduzido no Chile (LARA et al, 2009; LARA et al, 2011), pois os autores concluem que ao longo do tempo ocorre perda de produção de água pelas bacias

Os estudos de Lara et al (2009; 2011) mostram que a vegetação nativa desta região apresenta maior produção rápida de água (maior escoamento superficial), bem como maior produção de água em períodos secos, associados ao escoamento lento (sub superficial). Segundo a revisão teórica de comportamento hidrológico (apresentadas anteriormente) e estudos realizados em outros locais, florestas são responsáveis por menor escoamento superficial, associado ao consumo de água que aumenta a capacidade do solo de infiltração. Estes estudos conduzidos no Chile, no entanto, apontam que a plantação de eucalipto e pinus provocam uma redução da produção de água ao observar redução do escoamento superficial e da vazão dos rios nos períodos secos. Estes resultados, que indicam maior consumo de água pelas monoculturas das espécies exóticas, conduzem ao questionamento do comportamento vegetal associado às profundidade de raízes e sua relação com a percolação e recarga de aquíferos, bem como fluxo de escoamento sub superficial.

Balbinot et al (2008), após revisar diversos trabalhos, aponta que as coníferas podem interceptar maior volume de água precipitado que as florestas folhosas, bem como a interceptação tende a aumentar com a idade do povoamento florestal. Rogerson (1968 apud BALBINOT et al, 2008) aponta que uma redução de $4,5 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ da área basal do povoamento florestal, pode aumentar cerca de 2% da precipitação interna (água proveniente da precipitação que atinge o solo).

Bruijnzeel (1990), ao analisar os impactos da retirada de coberturas florestais ou arbóreas sobre o regime de chuvas, ressalta que a modificação da cobertura florestal de uma região, afeta a evapotranspiração. Neste sentido, Morris et al (2004) aponta que a cobertura de silvicultura de eucalipto poderia estar contribuindo para um aumento da umidade atmosférica local, da Península Leizhou, na China, no qual o estudo foi realizado.

Esta relação entre os níveis de precipitação e alteração de cobertura vegetal provoca uma grande divergência entre os diversos autores que tratam do assunto. No entanto, de acordo com as premissas teóricas de formação de precipitação pluviométrica (KOBİYAMA et

al, 2006) é esperado que quanto maior a alteração da cobertura vegetal (em tipo e escala) em áreas de formação de chuvas convectivas, maior será o impacto sobre o regime de formação de chuvas.

Cabe ressaltar que os impactos mencionados neste tópico, assim como a proposta de análise desta pesquisa, estão focados na questão hídrica. Desta forma, muitos outros impactos ambientais, sociais e econômicos deixam de ser citados aqui. Isto não quer dizer que estes foram ignorados, no entanto, em função da necessidade de delimitação de um escopo não foram considerados neste momento. Porém, tendo em vista que a questão hídrica, ambiental, social e econômica são indissociáveis, será brevemente apresentados outros impactos, visando levantar questões para pesquisas futuras.

3.3.1. Outros impactos das monoculturas de eucalipto

Apenas a fim de citação, cabe apontar que existem outros impactos e conflitos envolvendo as monoculturas de eucalipto e a questão hídrica. Martinez-Alier (2007) cita alguns relacionados às práticas de silvicultura, justificadas pela argumentação da redução da pressão sobre as florestas naturais. Neste caso, o autor destaca o processo de conversão de florestas naturais em plantações de eucalipto na Tailândia promovidos pelo Departamento Estatal de Florestas na Tailândia, para produção de papel pelas indústrias japonesas instaladas no território. Neste caso, a alteração teve impactos ambientais e sociais sobre comunidades camponesas da região.

Outro exemplo de conflitos socioambientais, que provocam as situações de injustiças, seria o caso das monoculturas de Eucalipto no Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais, que ocorrem nas terras de chapadas. Estas terras são concedidas pelo Estado à exploração privada, no entanto, eram originalmente ocupadas por comunidades locais e tradicionais destinados à criação extensiva de gado e atividades extrativistas (ZHOURI & ZUCARELLI, 2008).

Dentre diversos conflitos socioambientais estabelecidos neste contexto, os autores (op. cit) apontam que os moradores da região enfrentam situações de escassez hídrica, provocada após a instalação das monoculturas de eucalipto na região, além da degradação da qualidade da água, devido às diversas consequências associadas às práticas agrícolas que provocam processos erosivos, lixiviação de nutrientes e agroquímicos, etc.

Ainda segundo Zhouri & Zucarelli (2008), os moradores da região interviram no desmatamento de vegetação nativa de Mata Atlântica da região, realizado para a instalação das monoculturas de eucalipto, e exigiram que fosse realizada uma avaliação da capacidade de recarga hídrica da chapada, bem como dos impactos sobre as nascentes de corpos hídricos no caso da continuidade dos desmatamentos.

Outro caso de conflito socioambiental, também envolvendo monoculturas de eucalipto e a região estudada (trecho paulista do Vale do Paraíba do Sul), seria o caso da contaminação de solo e recursos hídricos por uso de agroquímicos para manejo da silvicultura. Segundo resultados do estudo (FIOCRUZ & FASE, sd), esta extensa monocultura é responsável por impactos sobre a qualidade ambiental, bem como pelo êxodo rural, provocado pela desocupação de agricultores familiares e trabalhadores rurais empregados na atividade leiteira.

Estes e outros impactos não serão explorados neste trabalho, pois o recorte de análise focará apenas nos impactos de ordem hídrica, no entanto, cabe destacar que não se faz uma ordem de valores de impactos.

3.4. Considerações do capítulo

Se buscou apresentar os padrões de produção adotados para a análise, bem como evidenciar os possíveis impactos destas práticas que serão analisados a seguir com o emprego dos métodos de contabilização do uso da água e avaliação de serviços ecossistêmicos.

Dentre as principais práticas, pode-se destacar o processo de preparação do solo para plantio de mudas, bem como a aplicação de nutrientes inorgânicos. Em relação as quantidades necessárias de nutrientes, neste trabalho foram adotadas apenas a referência de Gonçalves (2005) para nitrogênio.

Tendo em vista a quantidade de água utilizada para a irrigação, por vezes não sendo necessária, não serão considerados estes volumes na contabilização do uso da água. Em relação ao uso da água armazenada no solo pelas silviculturas, optou-se por utilizar um valor médio, também empregado por outros autores consultados (ALMEIDA & SOARES, 2003; SOUZA et al, 2006). Já em relação às especificidades apresentadas em relação à qualidade e características desejadas da madeira para produção de celulose, serão definidos posteriormente, no tópico de materiais e métodos, os valores adotados.

Com base na discussão sobre os impactos de ordem hidrológica, o que se pretende apontar é que no caso das plantações de eucalipto, estes variam de intensidade de acordo com a região no qual as plantações estão inseridas. Neste sentido, percebe-se que quanto mais distante do comportamento hídrico da floresta nativa local, maior parece ser o impacto das monoculturas de eucalipto sobre o ciclo hidrológico da bacia. Mas estas observações ainda carecem de uma análise mais detalhada quanto a medições locais de balanços hídricos e padrões hidrológicos, o que não foi foco desta pesquisa.

No caso de plantações de eucalipto para produção industrial de celulose, com práticas que conduzam a compactação e redução da capacidade de infiltração, implicarão em alterações de características do solo que podem afetar qualidade e quantidade de água da bacia. Outra questão que deve ser ressaltada, pois foi retomada por diversos autores, é que mesmo nos casos, nos quais a plantação de eucalipto apresente comportamento hidrológico semelhante ao da vegetação nativa local, são necessárias adoções de práticas de manejo que visem à mitigação dos impactos causados.

Dentre estas medidas, os diversos autores ressaltam o maior espaçamento entre indivíduos, como forma de redução do consumo de água e perdas por evapotranspiração; a formação de serapilheira após o corte, como medida de redução dos processos erosivos do solo; a realização do corte rotativo, ao invés do corte raso, de forma a reduzir a lixiviação e erosão; redução do uso de maquinários, como forma de redução dos processos erosivos.

CAPÍTULO 4 - A PEGADA HÍDRICA

Neste capítulo são apresentados o conceito de Pegada Hídrica (PH) e suas aplicações no setor de produção de celulose. Com isso pretende-se evidenciar como este método vem sendo utilizado e os tipos de estudos que se realizaram para este setor econômico. As limitações do método de análise do uso da água também são apresentadas, bem como algumas formas de contornar os principais problemas ou alertar para a cautela da análise de resultados. Por fim, são apresentadas as experiências de ampliação do método, de forma a considerar mais fatores de análise e superar algumas das limitações citadas anteriormente.

O conceito da Pegada Hídrica (PH), introduzido por Hoekstra e Hung (2002) e desenvolvido posteriormente por Hoekstra e Chapagain (2007), permite uma análise da apropriação da água para consumo humano por meio de diversos usos (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2010a; 2010b). Cabe, no entanto, pontuar que inicialmente a proposta de criação do método de PH, utilizando dados médios globais, visava sensibilizar os consumidores para redução do consumo através da informação aproximada dos volumes de água associados na produção de diversos tipos de produtos (CHAPAGAIN & TICKNER, 2012). Posteriormente, o método passou por diversos ajustes, sendo atualmente proposto para ser usado como um indicador de uso direto e indireto da água (HOEKSTRA, 2003).

A PH de um produto pode ser definida como o total de água alocada em sua produção, mensurado no local onde o produto é atualmente produzido (HOEKSTRA & CHAPAGAIN, 2007). Ela pode ser calculada para qualquer tipo de uso da água, tais como a utilização por grupos de consumidores (indivíduos, famílias, bairros, cidades, estados, nações) ou para produtores (organizações públicas, indústrias, setores econômicos) (ALDAYA & HOEKSTRA, 2010). Para sua mensuração, é realizada uma divisão da água utilizada em três categorias: água azul, água verde e água cinza.

Segundo Hoekstra et al (2011), a água azul pode ser definida como um indicador do volume de água superficial ou subterrânea alocada para a produção de um bem ou serviço. Para sua contabilização, de uma forma geral, é levado em conta o volume de água captado de algum corpo hídrico (rios, lagos e aquíferos) para utilização no processo produtivo e que pode ser perdido por evaporação, somado ao volume que não retorna ao corpo hídrico de origem (emissários submarinos, etc) e, ainda ao volume de água que não retorna ao corpo hídrico de

origem no mesmo período do qual foi captado (represas, cisternas, outras formas de armazenamento de água, etc).

A água verde seria o indicador da água de chuva envolvida na fase de produção vegetal de uma cadeia produtiva, como exemplo pode-se citar o processo agrícola ou de silvicultura. Refere-se ao volume de água precipitado que é estocado no solo em função da cultura vegetal cultivada (armazenamento de água no solo), à água contida no próprio vegetal (água incorporada) e à água transferida para a atmosfera através a evapotranspiração (água perdida por vapor), ou seja, toda a água que é utilizada pelo vegetal e que não percola para o solo e recarrega corpos hídricos (HOEKSTRA et al, 2011).

Por fim, a água cinza refere-se ao indicador do volume de água requerido para que a poluição de um processo possa ser assimilada. Ela é definida como o volume de água utilizado para a diluição dos poluentes, baseando-se no limite máximo estabelecido por legislação (ou qualquer outro critério para limite adotado) e da qualidade natural do corpo hídrico em questão (HOEKSTRA et al, 2009). Com a definição dos padrões máximos permitidos para o determinado poluente, bem como sua ocorrência natural no ambiente aquático, pode-se determinar o volume de água necessário para a diluição do efluente líquido lançado no corpo hídrico para que a concentração máxima permitida seja respeitada.

De modo geral, por considerar a quantidade de água utilizada para a diluição de um efluente, visando sua neutralização, o conceito de PH Cinza insere uma análise do uso de água indireto, que dependendo do padrão de qualidade de água adotado (standard) pode permitir a adoção de práticas de gestão que possibilitem a redução da poluição de recursos hídricos.

4.1. Aplicações do método de análise de Pegada Hídrica

De uma forma geral, os estudos realizados em todo o mundo que utilizam o método de Pegada Hídrica têm se focado principalmente na análise do setor agrícola (HOEKSTRA & HUNG, 2005; CHAPAGAIN et al, 2006a; CHAPAGAIN et al, 2006b; HOEKSTRA & CHAPAGAIN, 2007; MEKONNEN & HOEKSTRA, 2010a; ALDAYA et al, 2010; BULSINK et al, 2010; MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011). Muitos destes trabalhos, além

de quantificar as águas verde, azul e cinza dos principais produtos agrícolas no local onde são cultivados, focam a atenção para a análise da água virtual²².

Sobre o setor industrial também são encontrados trabalhos que tratam do tema, dentre os quais se podem destacar: Gerbens- Leenes e Hoekstra (2009); Ercin et al (2009); Van Oel e Hoekstra (2010); IFC, LimnoTech, Jain Irrigation Systems and TNC (2010); TCCC and TNC (2010) e Chapagain e Orr (2010) e Ercin et al (2011a; 2011b).

Cabe ressaltar que poucos trabalhos que contabilizam a PH da produção de silvicultura, papel e celulose foram realizados no mundo. Dentre os trabalhos publicados pela Water Footprint Network²³, serão apontados a seguir os trabalhos de Van Oel e Hoekstra (2010), UPM-kymmene (2011) e Van Oel & Hoekstra (2012).

4.1.1. Pegada Hídrica do setor de papel e celulose

Van Oel & Hoekstra (2010) e Van Oel & Hoekstra (2012) apresentam um estudo sobre a análise da PH do papel e produtos de papel produzidos nos países que apresentam maior produção de celulose no mundo. A análise realizada neste estudo contempla a fase de silvicultura e industrial do processo produtivo e seu escopo considera apenas o uso consuntivo de água verde e água azul. Não é contabilizada, nem considerada a água cinza envolvida em qualquer fase do processo produtivo.

As informações utilizadas nessa análise partiram de bases de dados globais, que apresentam médias para cada país considerado, disponibilizados pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO). Desta forma, cabe ressaltar que não foram consideradas características locais ou regionais, que podem se diferenciar da média do país.

No caso do Brasil, o estudo utilizou dados de evapotranspiração para eucalipto em áreas tropicais e subtropicais, sendo a média de 1.048 e 965 mm.ano⁻¹, respectivamente FAO (2001; 2009 apud HOEKSTRA et al, 2010). A produtividade de madeira de eucalipto por área considerada foi de 45 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (FAO, 2006 apud HOEKSTRA et al, 2010). A fração de

²² “Água virtual” ou “Virtual water” (do inglês, mais amplamente citado) é um termo cunhado em 1993, durante um seminário realizado na SOAS (School of Oriental and African Studies) da Universidade de Londres para referir-se ao volume de água contido nos produtos. Este termo chegou a ser substituído por “embedded water”, porém este último não obteve o mesmo impacto que o primeiro (ALLAN, 2003). O termo água virtual refere-se à água necessária à produção de commodities.

²³ Site da rede da WFN - <http://www.waterfootprint.org/>

água (ou umidade) da madeira foi de 0,4 metros cúbicos de água para cada metro cúbico de madeira ($0,4 \text{ m}^3 \text{ água.m}^{-3} \text{ madeira}$) (GONZALEZ-GARCIA et al, 2009 apud HOEKSTRA et al, 2010; NCASI, 2009 apud HOEKSTRA et al, 2010).

Dentre os principais resultados, o estudo apontou que a PH da madeira produzida no Brasil, a partir de eucalipto em zonas tropicais e subtropicais foi de 233 e $214 \text{ m}^3 \text{ água.m}^{-3} \text{ madeira}$, respectivamente. A PH do papel para impressão, tamanho A4, está estimada entre $300 \text{ a } 2.600 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ para os diversos países analisados (VAN OEL & HOEKSTRA, 2010).

Os autores (op. cit.) concluem que o maior consumo de água está relacionado à fase de silvicultura, necessária para a obtenção da madeira da qual se extrai a celulose. Este estudo (op. cit.) aponta ainda que, a PH global de papel pode ser reduzida se forem selecionados os locais de maior eficiência de produção de madeira em termos de água. Com isso, os países apontados como “mais eficientes” na produção de papel seriam a Espanha, França e Brasil.

Outra discussão levantada neste artigo é a relação entre a Holanda e os países produtores de papel e celulose em relação ao fluxo de água virtual. Na Figura 8 estas relações são apresentadas em um esquema mapeado.

Figura 8 – Água virtual importada pela Holanda (adaptado de VAN OEL & HOEKSTRA, 2010; VAN OEL & HOEKSTRA, 2012)

Neste mapeamento, percebe-se que a relação entre os países produtores do setor na América do Sul considerados no escopo do estudo é fundamentalmente de exportação de matéria prima (celulose).

O estudo realizado por UPM-kymmene (2011) utiliza a mesma metodologia proposta em Van Oel & Hoekstra (2010). O escopo de sua análise contempla a PH da fase de silvicultura e industrial (cadeia de suprimentos e operação direta da UPM na Alemanha na atividade de produção do papel e derivados). A cadeia produtiva considerada contempla as unidades de *UPM Kaukas* (Finlândia), *UPM Pietarsaari* (Finlândia) e *UPM Fray Bentos* (Uruguai) que são as três maiores fornecedoras de celulose para a *UPM Nordland Papier* (Alemanha). Diferencialmente da análise da PH do setor produtivo realizada por Van Oel & Hoekstra (2010), o estudo da UPM-kymmene (2011), além de considerar a água cinza consumida no processo, apresenta um esforço na análise adicional, proposta por Hoekstra et al (2011), denominada como “Sustentabilidade da Pegada Hídrica”.

Esta análise propõe considerar os demais usos do mesmo tipo de água na região (bacia hidrográfica, município, ou qualquer outra delimitação geográfica) que estiver sendo analisado e inferir qual o impacto da utilização deste tipo de água pela atividade sobre a disponibilidade da mesma (Hoekstra et al, 2011).

A análise da água verde utilizada pela silvicultura é aplicada para analisar o eucalipto cultivado nas unidades do Uruguai e florestas boreais “semi naturais”²⁴ da Finlândia. Os resultados indicam que a evapotranspiração obtida para as florestas boreais da Finlândia foi de $3.600 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (equivalente a $360 \text{ mm}.\text{ano}^{-1}$), enquanto que no caso das silviculturas em regiões subtropicais no Uruguai foi de $9.300 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (equivalente a $930 \text{ mm}.\text{ano}^{-1}$). A maior produtividade de madeira, no entanto, foi observada no caso das silviculturas de eucalipto no Uruguai. Com isso, os resultados indicam que comparativamente com as florestas boreais da Finlândia, a PH verde do eucalipto produzido no Uruguai é menor.

Foram realizadas análises do uso da água azul e cinza nas outras fases da cadeia produtiva utilizando o método proposto por Hoekstra et al (2011). Com isso, os resultados indicam que 99% da PH total do processo está associada a cadeia de suprimentos, enquanto que 1% seria referente a fase das operações diretas industriais da *UPM Nordland Papier mill*. A PH cinza da fase industrial direta representa cerca de 80% da PH total da fase industrial, composta pela soma da PH azul e PH cinza. O componente considerado para a análise da água cinza e contabilização desta Pegada Hídrica foi o AOX (Compostos Orgânicos Halogenados Adsorvíveis ou, em inglês, Adsorbable Organic Halogen).

Os resultados quantitativos obtidos pela empresa, segundo o relatório de UPM-kymmene (2011), não informam muito sobre os reais impactos da produção de papel sobre os

²⁴ Florestas mistas de espécies nativas e exóticas (UPM-KYMMENE, 2011).

recursos hídricos locais. Como forma de suprir esta deficiência, realizam a aplicação da avaliação de “Sustentabilidade da Pegada Hídrica”, método determinado por Hoekstra et al (2011). Como análise de sustentabilidade, um estudo complementar apontou que devido a certificação florestal (FSC e PEFC²⁵) utilizada, as práticas da silvicultura são sustentáveis²⁶. Em relação aos impactos de ordem hídrica da silvicultura no Uruguai, o relatório aponta que a precipitação local do país (cerca de 1.200 mm.ano⁻¹) suporta a demanda por água das espécies cultivadas, utilizando estudo de Lima (1997), sobre os impactos potenciais do eucalipto e suas implicações sobre os recursos hídricos, para embasar sua discussão.

Em relação à água azul, UPM-kymmene (2011) aponta que no caso da *UPM Nordland* o “nível de escassez” hídrica avaliado foi de 42%, da *UPM Pietarsaari* foi de 23%, da *UPM Kaukas* e *Fray Bentos* foram menores que 0,005%. Cabe ressaltar que o “nível de escassez” hídrica azul acima de 100% indica situação de insustentabilidade da Pegada Hídrica azul, como definido por Hoekstra et al (2011), o que, por sua vez indica insustentabilidade do uso deste tipo de água.

Já no caso da água cinza, a análise de sustentabilidade apontou que a *UPM Nordland* e *UPM Kaukas* atingiram um “nível de poluição da água” de aproximadamente 10%, a *UPM Pietarsaari* não possui PH cinza por lançar seus efluentes em águas marinhas (emissários submarinos²⁷) e a *UPM Fray Bentos* apresentou um nível de 0,5%. Assim como a análise de sustentabilidade da água azul, níveis acima de 100% indicam insustentabilidade do uso da água cinza.

Baseados nesta análise o relatório (UPM-KYMMENE, 2011) aponta que as atividades analisadas, desde a fase florestal ou silvícola até o processamento final dos produtos de papel, podem ser consideradas sustentáveis.

4.2. Experiências de inserção da variável econômica no indicador de Pegada Hídrica

A contabilização da Pegada Hídrica tem sido amplamente empregada para a quantificação do uso da água para a produção de distintos produtos e bens econômicos em

²⁵ FSC – (Forest Stewardship Council)

PEFC – (Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes)

²⁶ Cabe ressaltar que este estudo não levou em consideração qualquer outra dimensão de análise de impacto ambiental ou socioambiental. Tampouco considerou, comparativamente, que a produção finlandesa, realizada em sistema agroflorestal (misto com espécies nativas e exóticas) poderia implicar em menor impacto do que a produção realizada no Uruguai que apresenta maior eficiência de uso da água, ainda que a utilize em maiores volumes totais.

²⁷ Emissários submarinos são considerados na contabilização de PH azul e ignorados para a contabilização de PH cinza pelo método estabelecido por Hoekstra et al (2011).

todo o mundo. Na Espanha, a PH tem sido explorada para a quantificação da água utilizada em escala de bacias hidrográficas e províncias, de todo o país. Cabe ressaltar, que a PH está inserida como um instrumento oficial de planejamento do uso da água na política pública hídrica espanhola (LLAMAS et al, 2009; MAPFRE, 2010; ORDEN ARM/2656/2008; DE STEFANO & LLAMAS, 2013).

A inserção da PH na gestão pública da água na Espanha ocorre em um contexto de busca por indicadores e índices de sustentabilidade, para possibilitar uma análise integrada das questões hídricas nacionais. Na Espanha, o Ministério de Meio Ambiente e Meio Rural e Marinho (MMA e MRM) incentivou os estudos de determinação da PH das atividades econômicas do país, de suas Comunidades Autônomas (CC.AA) e de suas Demarcações Hidrográficas, de forma a introduzir um indicador integrado sobre o consumo e uso dos recursos hídricos desde a perspectiva de sustentabilidade e com objetivo de contribuir para a gestão do meio físico hídrico (MMA y MRM, 2011).

Com base na análise inicial da quantificação da água realizada para as diversas bacias (MMA Y MRM, 2011), Garrido et al (2010) apresentam a proposta de ampliação do método da Pegada Hídrica, considerando também aspectos econômicos relacionados aos recursos hídricos. Este método foi aplicado para algumas análises do uso dos recursos hídricos na Espanha, das quais se pode citar o trabalho de Salmoral et al (2011) que realiza uma análise da PH estendida da Bacia Hidrográfica de Guadalquivir, o trabalho de Aldaya & Llamas (2008) sobre a análise da PH da bacia do Guadiana e o trabalho de Dumont et al (2011) que apresenta a aplicação do método de análise de PH estendida para o caso das águas subterrâneas em Campo de Dalías.

Os aspectos econômicos considerados no método estendido referem-se ao valor da água utilizada (água azul superficial e subterrânea) que possibilitam a criação de um novo indicador, denominado por Garrido et al (2010) como análise de “Pegada Hídrica Estendida”. É considerada também a rentabilidade econômica dos produtos produzidos por cada unidade de volume de água utilizada. Esta análise denominada “produtividade aparente da água” é dada em unidades monetárias por volume de água ($\$.Volume^{-1}$). No caso dos estudos citados (ALDAYA & LLAMAS, 2008; SALMORAL et al, 2011; DUMONT et al; 201) a unidade utilizada é de $\text{€}.\text{m}^3$.

Com as experiências de aplicação do método estendido (GARRIDO et al, 2010) são possíveis análises ampliadas em relação àquelas que poderia se realizar com a aplicação somente do método tradicional. No estudo de Aldaya & Llamas (2008) os autores apontam

que a observação da produtividade aparente da água acabam evidenciando diferenças entre as práticas voltadas a eficiência entre o uso da água azul superficial e subterrânea. Este resultado leva à discussão das práticas de eficiência do uso da água que são utilizados no caso de exploração dos recursos subterrâneos em função de seu maior custo para uso que poderiam também ser aplicadas para o caso do uso de águas superficiais.

Já, no estudo de Salmoral et al (2011), além das conclusões acerca do uso mais eficiente da água subterrânea em comparação ao uso da água superficial, na bacia do Guadalquivir, é apontado que a agricultura é o maior consumidor de água verde e azul da bacia. Este setor econômico, junto à pecuária e pesca, representam 7% do PIB da bacia e 12% dos empregos. Com base nestes resultados, os autores apontam que o maior uso da água verde e azul está relacionado a atividades de baixa rentabilidade econômica, quando comparadas a outros setores como o de turismo e industrial.

Os autores (op. cit.) elaboram um esquema ilustrativo do balanço hídrico da bacia hidrográfica do Guadalquivir que pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Balanço Hídrico baseado na análise de PH e PH estendida realizada na Bacia do rio Guadalquivir (SALMORAL et al, 2011)

Contudo, o estudo discute que apesar da análise de PH e PH estendida apresentarem resultados que indicariam a conveniência de exploração de atividades economicamente mais rentáveis, ressalta-se também a necessidade de consideração dos aspectos ambientais e sociais relacionados ao contexto analisado (SALMORAL et al, 2011).

Esta experiência de ampliação do método, que acaba por levantar dados e informações adicionais para embasamento das análises de uso da água, confirma a necessidade de melhorias e ampliações do método de PH para que sejam contemplados aspectos sociais, econômicos e ambientais.

4.3. Limitações do Método de Pegada Hídrica

A metodologia da PH, segundo Hoekstra et al (2011), pode ser aplicada com a finalidade de identificação do período ou local nos quais a captação e consumo de água se torna insustentável, por ser considerada abusiva ou economicamente ineficiente. Neste sentido, seria possível ainda apontar ou prever a ocorrência de conflitos pelo uso da água, subsidiando assim a tomada de decisão para a gestão da água.

Esta observação citada acima faz sentido quando considerada a análise da disponibilidade hídrica quali e quantitativa do contexto no qual a atividade estudada estiver inserida. A análise de PH, desconectada de um contexto, implica somente na contabilização de um número que não pode indicar nem auxiliar na gestão de uma bacia hidrográfica. Poderia servir para uma avaliação parcial dos diferentes usos para o processo produtivo. Outra questão que poderia ser levantada seria em relação ao tipo de sustentabilidade²⁸ mencionada, uma vez que nem toda a dimensão ambiental é considerada, tampouco aspectos sociais ou econômicos.

O método possui ainda uma série de limitações. Para exemplificar algumas destas limitações, Mekonnen & Hoekstra (2011) levantam alguns pontos sobre as incertezas relacionadas às estimativas dos diferentes tipos de água considerada pelo método da PH, em seu estudo, e alertam para uma interpretação cuidadosa quando a metodologia for aplicada para as várias escalas. De modo geral, os autores apontam para a necessidade de generalização de dados e, muitas vezes pela falta dos mesmos, faz-se necessária uma série de suposições e simplificações, o que diminui o nível de confiabilidade do resultado.

A problemática apontada por Mekonnen & Hoekstra (2011) acerca da generalização, suposição e simplificação referem-se ao quanto o resultado final refletirá o quadro real analisado. Por vezes, algumas generalizações, como a utilização de médias globais, por exemplo, acabam gerando dados, descontextualizados que não permitem maiores análises e não fornecem muitas informações úteis a gestão do uso da água.

Os trabalhos que aplicaram o método para analisar a apropriação da água pelo setor industrial, de uma forma geral, buscaram apontar a PH de produtos variados (industriais e

²⁸ O termo sustentabilidade isento de definição pode referir-se às mais diversas dimensões de análise. Neste sentido, independente do conceito que se utilize faz-se necessária a definição do que está sendo considerado no escopo de análise.

agrícolas, quando relacionados à produção industrial) em diversos países, no entanto utilizaram variações metodológicas que acabam por torná-los incomparáveis entre si.

Desta forma, ressalta-se que a comparação entre os resultados podem conduzir a uma análise limitada e com possíveis disparidades entre os resultados obtidos e a realidade, pois se sabe que os resultados se referem a determinado método produtivo e calculados com métodos diversos, por autores diferentes. No entanto, é possível observar a quantidade de água alocada para suas produções e desta forma permitir medidas que visem maior eficiência no uso da água em cada fase do processo.

Aldaya et al (2010) apontam que mesmo que a análise de PH forneça um quadro transparente para a identificação de alternativas e potenciais usos mais adequados do recurso hídrico, de forma a obter uma alocação mais eficiente da água e dos recursos econômicos da região, esta oferece uma visão parcial do problema. Desta forma, faz-se necessária a inclusão de ferramentas complementares para ampliar o escopo de análise de forma a permitir a consideração de fatores ambientais²⁹, com ênfase nos aspectos ecológicos, sociais e econômicos.

Mesmo sem ser parte do objetivo deste trabalho, pareceu relevante analisar uma discussão levantada em diversos trabalhos que abordam fluxos de água virtual, importação e exportação de PH, por evidenciar o posicionamento adotado que, mesmo que indiretamente, permeia esta pesquisa. A consideração da disponibilidade hídrica, com base em conceitos de água verde e azul, de algumas áreas, para incentivar a produção e importação de produtos produzidos em locais de maior disponibilidade hídrica não deve ser entendida com a solução ao problema e suas consequências. Com base nas críticas ao conceito de Pegada Hídrica realizadas por Merret (2003), não parece adequada sua utilização sem as devidas considerações do contexto local, como fatores ambientais, ecológicos, sociais, políticos e econômicos.

A simples importação de produtos de locais com maior disponibilidade hídrica, como pontua Merret (2003), não resolveria o problema de escassez de água nos diversos locais, como por exemplo, na África e Oriente Médio, uma vez que a distribuição dos produtos não ocorre de forma equitativa e a adoção desta prática, como solução ao problema, acaba por

²⁹ Sanchez (2008) define o termo “ambiente” como amplo, multifacetado e maleável. Amplo por considerar tanto aspectos naturais (físicos e ecológicos) como sociais (econômicos, culturais, etc), multifacetado por poder ser apreendido por diversas perspectivas e maleável por sua capacidade de ampliação e redução de acordo com a necessidade de análise.

tirar o foco da preocupação com a gestão hídrica destes locais, sem, contudo resolver os conflitos gerados pela escassez.

Neste sentido, é importante pontuar que tanto os conceitos de água virtual como o de Pegada Hídrica estão inseridos dentro de um raciocínio econômico de eficiência de alocação de recurso, sem a devida contextualização ambiental e social. Neste sentido, segundo Empinotti & Warner (2012), a água é vista como uma vantagem econômica, capaz de influenciar estratégias políticas e práticas do comércio internacional³⁰.

Boelens & Vos (2012) também chamam a atenção para os riscos de naturalização dos conceitos de “eficiência” e “produtividade” pelos gestores, formuladores de políticas e especialistas em gestão da água. Como impactos da adoção destas premissas, sem contextualização social, poderia conduzir a um quadro de privação de pequenos produtores rurais de direitos de uso da água, impactos sobre manejos de uso da água local com impactos sobre produção (através de imposição normatizada de práticas “mais sustentáveis” de uso da água) e, por fim, o estabelecimento de padrões e normas podem favorecer um ciclo definido como “poder-saber” dominantes. Neste sentido os autores (op. cit) discutem as relações políticas e econômicas associadas à formulação de saberes, que embasam normas que favorecem a seus formuladores.

Outro ponto a ser considerado seria o da não internalização dos impactos socioambientais gerados nos locais de maior disponibilidade hídrica. Como já apresentado, a proposta sugerida por Tony Allan (ALLAN, 2003) e discutida por diversos outros estudos, seria que a solução de escassez hídrica local poderia ser amenizada através da não produção local, uma vez que o recurso é escasso, mas sim da importação de outros locais que apresentem maior disponibilidade.

Quanto a isso, faz-se necessário algumas observações. A solução apresentada acima pode implicar no direcionamento de produtos com alta demanda hídrica para exportação, em detrimento do consumo local por parte da população e destinação do uso da água para manutenção do fluxo de serviços ecossistêmicos. O método de análise não contempla e nem apresenta mecanismos de evitar que ocorram injustiças ambientais³¹.

³⁰ Empinotti & Warner (2012) também discutem limitações da adoção do conceito de água virtual para resolução de problemas associados à escassez hídrica, tais como a indução de produção agrícola impulsionada em países de maior disponibilidade hídrica, gerando impactos sobre os estilos de vida camponeses e de pequenos agricultores.

³¹ Por injustiças ambientais, compreendem-se as vítimas que não só são excluídas do chamado desenvolvimento, mas assumem todo o ônus dele resultante (ZHOURI, 2008). Acserald et al (2009) adicionam ainda que injustiças ambientais seriam o mecanismo pelo qual sociedades desiguais destinam maior carga de danos ambientais sobre populações de baixa renda, grupos étnicos discriminados, povos tradicionais, bairro de

Acreditar que apenas ações focadas na redução da poluição e do consumo de água é embrenhar-se em uma das correntes do ecologismo denominada, por Martinez-Alier (2007), como “credo da ecoeficiência³²” ou “evangelho da ecoeficiência”. Em outras palavras, chama-se a atenção para não se acreditar que somente a aplicação da avaliação da PH e sua utilização para a promoção de práticas que promovam uma melhor eficiência (quali e quantitativa) no uso da água, em locais de maior disponibilidade, isoladamente de uma análise e consideração adequada do contexto, sejam suficientes para garantir que não sejam gerados impactos ambientais e sociais, bem como injustiças ambientais.

Vários exemplos de injustiças ambientais são citados por Martinez-Alier (2007), nos quais grupos sociais são afetados pelos impactos ambientais negativos gerados por atividades de empresas ou por projetos promovidos pelo Estado. Dentre os exemplos, Martinez-Alier (2007) cita alguns relacionados às práticas de silvicultura, justificadas pela argumentação da redução da pressão sobre as florestas naturais. Como já citado anteriormente, o método de Pegada Hídrica não contempla os desdobramentos socioambientais dos impactos sobre o uso dos recursos hídricos, porém esta limitação não será explorada neste trabalho, devido à necessidade de definição do escopo de análise focado apenas nos impactos de ordem hídrica, que serão explorados mais a frente.

4.4. Considerações do capítulo

Neste tópico, inicialmente foram apresentados os conceitos e aplicações do método de PH. Como se pôde perceber, este método apresenta um diferencial em relação aos demais

operários, bem como sobre populações marginalizadas e vulneráveis. Já por Justiça Ambiental, designa-se a garantia de que: (i) nenhum grupo social (racial, étnico ou de classe) seja submetido à parcela desproporcional de consequências ambientais negativas de atividades econômicas, decisões e programas políticos, assim como a ausência de políticas; (ii) acesso justo e equitativo, direto e indireto a recursos ambientais do país; (iii) amplo acesso à informações relevantes sobre uso de recursos naturais, sobre destinação de rejeitos, sobre a localização de fontes de riscos ambientais, bem como processos participativos e democráticos de definição de Políticas, Planos e Programas; (iv) favorecer a constituição de movimentos sociais, sujeitos coletivos de direitos e organizações populares para a construção de modelos alternativos de desenvolvimento, de forma a assegurar a democratização do acesso aos recursos naturais e sua sustentabilidade (ACSERLALD et al, 2009).

³² Corrente do movimento ecologista com viés economicista, embasado no discurso de “desenvolvimento sustentável”, “modernização ecológica” e “boa utilização” dos recursos visando crescimento econômico. Preocupa-se com o manejo sustentável dos recursos naturais e com a minimização dos impactos da produção de bens. Dentro desta corrente, por exemplo, é possível destacar a parceria entre Shell e WWF para o plantio de eucalipto em diversos locais do mundo, sob a argumentação de que desta forma se reduziriam as pressões sobre os bosques naturais (MARTINEZ-ALLIER, 2007).

métodos de quantificação e análise de uso da água por sua classificação em função de sua fonte (água verde, azul e cinza).

Sua aplicação como método de análise neste trabalho é importante especificamente por este diferencial, uma vez que permite a separação do uso da água da chuva dos demais tipos de água da bacia hidrográfica. Esta separação por tipos de água, por sua vez, auxilia na compreensão do comportamento hídrico da bacia de acordo com o uso e ocupação do solo.

Tendo em vista os estudos realizados no setor de produção de papel e celulose, pode-se constatar que as análises não chegam a considerar o impacto sobre a disponibilidade da água na bacia, ou as modificações do comportamento hidrológico natural da bacia. No caso do estudo realizado pela indústria finlandesa, que aponta que a madeira produzida a partir de eucalipto cultivado no Uruguai possui menor PH, quando comparada à madeira de suas florestas boreais, e alega que a PH verde está dentro do intervalo de precipitação anual da região deixa de considerar a sazonalidade e distribuição da água ao longo desta área, bem como a demanda hídrica pelos demais usuários da bacia (população, comunidades, ecossistemas e demais setores econômicos).

Quanto a este aspecto, cabe mencionar que estes trabalhos revisados não apresentam como a atividade de silvicultura praticada para a produção de madeira para celulose pode impactar a disponibilidade de água da bacia, bem como os demais usuários dos recursos hídricos (antrópicos e naturais).

Dentre as limitações do método de PH apontadas, pôde-se verificar que as generalizações de dados, como no caso de adoções de médias, tornam-se delicadas e, por vezes, impossibilitam a comparação dos resultados que empregam escalas ou métodos distintos. Ainda que se empreguem métodos compatíveis, a comparação de valores de PH não é desejável, pois os valores de PH por si só não explicitam os impactos associados ao uso da água em uma determinada região ou bacia hidrográfica.

Em função desta observação, destaca-se que os resultados obtidos ao final deste estudo e dos estudos revisados anteriormente (VAN OEL & HOEKSTRA, 2010; UPM-KYMMENE, 2011; VAN OEL & HOEKSTRA, 2012) não são passíveis de comparação, pois foram utilizadas fontes, escalas e generalizações distintas.

Outro fator relevante que se mostra como uma limitação do método de análise, apontado por diversos autores, seria a não consideração de aspectos importantes para a tomada de decisão para a gestão da água, principalmente em escala de bacia. Este trabalho, não visa contemplar todas essas demandas de melhorias do método, uma vez que não

considera a dimensão social, cultural, econômica e tampouco todas as dimensões físicas e ecológicas do impacto da silvicultura, no entanto, busca ampliar a forma de análise e alertar para a necessidade de consideração de aspectos associados à perda de qualidade dos serviços ecossistêmicos hidrológicos da bacia.

O método de PH estendida proposto por Garrido et al (2010), apresenta uma interessante análise que poderia ser aplicada de forma a verificar potenciais locais de produção econômica. Ainda que se torne importante ressaltar que outras dimensões não foram consideradas, o que acaba por implicar também em limitações nas análises para embasar decisões políticas de gestão que podem gerar impactos e conflitos socioambientais, como já discutido anteriormente.

O trabalho de Salmoral et al (2011) apresentou uma interessante análise de balanço hídrico a partir do método de PH que será adotada semelhantemente neste trabalho, tendo em vista o objetivo de análise aqui proposto. Desta forma, será possível a visualização esquemática do uso da água pelas diferentes coberturas vegetais da bacia.

Para concluir esta discussão levantada, e lembrando que não se trata do foco da análise proposta por este trabalho, é importante que sejam consideradas a inclusão de outros aspectos que possam gerar impactos sobre outras dimensões ambientais³³ à análise de PH.

Cabe apontar que pouco foi trabalhado neste sentido até o momento, pelo que se pode levantar da bibliografia publicada sobre as diversas formas de utilização da PH. Com isso, levanta-se a demanda de trabalhos que visem discutir, questionar, ampliar e complementar a análise de PH de forma a transpor as medidas de melhoria da eficiência do uso da água, para fins de gestão dos recursos hídricos, para, com isso, a não gerar ou intensificar impactos socioambientais³⁴ e ou socioculturais.

³³ Aqui compreendidas a partir da definição de Sanchez (2008), no qual o ambiente pode ser entendido em suas dimensões físicas (hidrológicas, climáticas, etc), ecológicas e sociais (econômicas, políticas, culturais, etc).

³⁴ Em Boellens & Vos (2012), podem ser observados aspectos relacionados à utilização de indicadores de medição de eficiência de uso da água e possíveis consequências da internalização destes conceitos em Políticas Públicas e Gestão Pública da Água. A gestão da água, bem como de uso e ocupação do solo, determinadas a partir da definição de práticas e modelos de produção “sustentáveis” foram analisadas sob o conceito de Justiça Hídrica e alertam para os riscos associados à imposição de modelos produtivos e econômicos sobre práticas tradicionais, de subsistência e de abastecimento alimentar interno das Nações.

CAPÍTULO 5 - FUNÇÕES E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

São apresentados neste capítulo os conceitos de funções ecossistêmicas (FE) e serviços ecossistêmicos (SE), seguido pela apresentação das relações existentes entre a cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica e seus processos hidrológicos. Em seguida, são pontuados os SE's provisionados pelo tipo de cobertura vegetal nativa da região estudada e a atual discussão acerca das áreas mínimas necessárias para que estes sejam preservados. Por fim, são abordados métodos de Valoração Ambiental, como uma forma de avaliação dos serviços fornecidos pelas vegetações.

De forma geral, há diversas interpretações ao se empregar os termos Serviços Ecossistêmicos e Funções Ecossistêmicas (DE GROOT et al, 2002). Neste trabalho, parte-se da premissa que é necessário o emprego correto das terminologias, pois estas implicam em conceitos distintos. Sobretudo, a diferenciação se mostrará essencial para a compreensão das estruturas ecossistêmicas, associadas às coberturas vegetais, com o fornecimento dos SEs.

5.1. Conceitos e definições

A compreensão dos conceitos associados aos serviços ecossistêmicos fornecidos pelas coberturas vegetais é de extrema relevância para este trabalho, uma vez que implicará na compreensão dos componentes e dos processos ecológicos responsáveis por seus fluxos. Para iniciar a conceituação, cabe ressaltar que existe diferenciação entre os conceitos de funções ecossistêmicas e serviços ecossistêmicos (DE GROOT et al, 2002; DALY & FARLEY, 2004). Sua diferenciação é fundamental para a compreensão de como são formados os serviços ecossistêmicos utilizados pelo homem.

Dentro dos sistemas ecológicos ocorre uma estreita relação entre processos e estruturas ecossistêmicas (componentes do ecossistema), que interagem entre si e se traduzem em Funções Ecossistêmicas (FE). Daly & Farley (2004) definem estrutura ecossistêmica como sendo todos os indivíduos e comunidades (animais e vegetais) que compõem o ecossistema, junto aos recursos abióticos (combustíveis, minerais, etc). Eles destacam ainda que diversos ecossistemas possuem milhares de estruturas ecossistêmicas ou elementos estruturais, cada um deles possuindo seu grau de complexidade, que atuam e interagem de

forma a produzir o todo (ecossistema), que seria mais do que a somatória de todas as partes individuais.

Esta interação resulta no surgimento do fenômeno emergente, inerente a associação de agentes em um sistema complexo. Para estes autores, este fenômeno emergente dos ecossistemas poderia ser compreendido como sendo as FE, que incluem transferências de energia, ciclagem de nutrientes, regulação climática, regulação de gases e o ciclo da água (DALY & FARLEY, 2004). As FE, por conseguinte, geram os Bens e Serviços Ecossistêmicos (SE) (DE GROOT et al, 2002).

De Groot et al (2002), diferencia as FE de bens e SE e separa as funções em quatro categorias como se observa no Quadro 2.

1. <i>Função de regulação</i> : capacidade de ecossistemas naturais e seminaturais regularem processos ecológicos essenciais e sistemas de suporte à vida através de ciclos biogeoquímicos e outros sistemas biosféricos.
2. <i>Função de Habitat</i> : ecossistemas naturais fornecem refúgio e habitat para reprodução de plantas e animais selvagens, contribuindo para a diversidade genética, conservação biológica e processos evolutivos.
3. <i>Função de produção</i> : fotossíntese e absorção de nutrientes pelos autótrofos convertem energia, dióxido de carbono, água e nutrientes numa variedade de estruturas de carboidratos, que por sua vez são usados por produtores secundários para produzir uma ampla variedade de biomassa (viva). Esta ampla variedade de estruturas de carboidratos fornece muitos bens ecossistêmicos para o consumo humano, desde alimentos, material para combustíveis até recursos genéticos.
4. <i>Função de informação</i> : provém a oportunidade de reflexão, enriquecimento espiritual, desenvolvimento cognitivo, o que permite a manutenção da saúde humana e do meio natural, uma vez que atualmente o homem possui consciência do contexto no qual está inserido, direcionando suas ações de maneira a conservar o meio natural.

Quadro 2 - Classificação das funções ecossistêmicas de de Groot et al (2002).

Esta hierarquização possui uma lógica subjacente, pois as duas primeiras são essenciais para a manutenção dos processos naturais e seus componentes, e sendo assim, são imprescindíveis para a viabilidade dos outros dois grupos de funções. As funções ecossistêmicas, assim conceituadas, fornecem uma base empírica para a classificação dos aspectos dos ecossistemas naturais (potencialmente) passíveis de serem usados por humanos (DE GROOT et al, 2002). A seguir, na Figura 10, são apresentadas alguns dos serviços que podem ser providos pelas categorias de funções apontadas por De Groot et al (2002):

FUNÇÕES	SERVIÇOS
REGULAÇÃO Regulação de gás, regulação climática, regulação de distúrbios, etc	Proteção UVb, devido ao O ₃ Manutenção da qualidade do ar Proteção contra tempestades Prevenção de enchentes
HABITAT Berçário e Refúgio de espécies	Manutenção da diversidade biológica e genética Manutenção de espécies comercializáveis
PRODUÇÃO Alimentos, recursos ornamentais, recursos genéticos	Fornecimento de caça, pesca, etc Fornecimento de combustíveis e energia Fornecimento de medicamentos
INFORMAÇÃO Informação estética, recreação, informação histórica, etc	Aproveitamento estético Utilização para propósitos religiosos ou culturais Ecoturismo

Figura 10 – Classificação de Funções Ecosistêmicas. (SOSA & TADEU, 2010).

Assim como para De Groot et al (2002), o relatório da Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005) define que os serviços ecosistêmicos seriam os benefícios humanos provindos dos ecossistemas. Sua avaliação, no entanto, busca analisar o impacto das alterações dos ecossistemas sobre o bem estar humano, ressaltando que os ecossistemas vêm sendo modificados não apenas em sua estrutura e sistemas (tais como habitats), mas também as funções e processos. Distintamente de De Groot et al (2002), a classificação refere-se aos serviços ecosistêmicos e é subdivida em categorias que são apresentadas no Quadro 3.

<i>Serviços de provisão:</i> estes serviços seriam os produtos obtidos diretamente dos ecossistemas para a utilização humana. Como exemplo deste serviço tem-se a obtenção de alimentos, madeira, etc.
<i>Serviços de regulação:</i> seriam os benefícios humanos obtidos pelos processos de regulação dos processos ecosistêmicos, como por exemplo a regulação da qualidade do ar.
<i>Serviços culturais:</i> seriam os benefícios não materiais obtidos dos ecossistemas que proporcionam um enriquecimento espiritual, desenvolvimento cognitivo, reflexão, recreação e experiências estéticas.
<i>Serviços de suporte:</i> esta categoria engloba todos os serviços necessários para a produção de todos os outros serviços ecosistêmicos.

Quadro 3 - Classificação de serviços ecosistêmicos estabelecidos pelo relatório de Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005).

Esta classificação pode ser observada também de forma esquematizada na Figura 11.

Figura 11 – Classificação de Serviços Ecossistêmicos (SOSA & TADEU, 2010).

Neste trabalho, para fins de compreensão dos componentes e processos que produzem os serviços ecossistêmicos abordados, será empregada a definição de De Groot et al (2002), que define que as estruturas e componentes ecossistêmicos (bióticos e abióticos) interagem entre si, gerando as FEs, que por sua vez originam os benefícios humanos diretos e indiretos, denominados SEs.

Não obstante, alguns autores trabalham a definição e diferenciação dos conceitos de “serviços ecossistêmicos” e “serviços ambientais”³⁵ (WUNDER et al, 2008; AMAZONAS, 2009; TADEU et al, 2011). Neste trabalho, esta diferenciação não será explorada, no entanto será adotada aquela proposta em Tadeu et al (2011), na qual, “serviço ecossistêmico” refere-se aos benefícios humanos provenientes dos ecossistemas naturais e “serviços ambientais” aos benefícios provindo das ações humanas de recuperação ou manutenção de propriedades ecossistêmicas que geram os benefícios humanos.

Com isso, a seguir serão apresentados alguns processos que propiciam a geração de serviços ecossistêmicos proporcionados pela cobertura florestal natural e, posteriormente, as relações entre as estruturas ecossistêmicas relacionadas à função do ciclo hidrológico, especificamente no tocante às interações entre a cobertura vegetal e os processos hidrológicos.

³⁵ Para verificar a diferença entre os termos Serviço Ecossistêmico e Serviço ambiental consulte os trabalhos desenvolvidos por Wunder et al (2008), Amazonas (2009) e Tadeu et al (2011).

5.2. Relação entre cobertura florestal e processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica

As interrelações entre uma bacia hidrográfica e a sua cobertura vegetal são de difícil caracterização e variam de acordo com formações geográficas, clima e de manejo (REIS, 2004). A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema físico, no qual ocorre a entrada de água (através da precipitação) e saída (através do escoamento superficial por seu exutório). Neste sistema, a evapotranspiração e infiltração seriam perdas intermediárias (TUCCI, 2002). Os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de seu fluxo, sendo estes o fluxo vertical e o fluxo longitudinal (TUCCI & CLARKE, 1997). O fluxo vertical, segundo estes autores, seria representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração, enquanto que o fluxo longitudinal seria representado pelo escoamento superficial, rios e escoamento subterrâneo.

As modificações na cobertura vegetal das bacias hidrográficas, sejam elas por razões naturais ou antrópicas, influenciam o seu comportamento hidrológico, produzindo os mais diversos impactos sobre o ambiente e a disponibilidade da água (TUCCI & CLARKE, 1997; NEARY et al, 2009). Tucci & Clarke (1997) apontam que a vegetação possui papel fundamental no balanço de água e energia de uma bacia. Parte inicial da precipitação é retida pela superfície da folhagem da vegetação e evapora. Quanto maior a superfície de folhagem, maior a retenção de água precipitada.

Após a evaporação da água interceptada sobre a superfície das folhas, a vegetação passa a perder umidade através da transpiração da água retirada do solo, por suas raízes, permitindo maior infiltração da precipitação que atravessa o dossel. A precipitação que atravessa a superfície de folhagem atinge o solo de duas formas: 1) atravessando a vegetação (cerca de 85% da precipitação incidente); ou 2) escoamento através dos troncos (cerca de 1 a 2% da precipitação incidente) (TUCCI & CLARKE, 1997).

Parte da água que atinge o solo a partir da precipitação pode escoar superficialmente ou infiltrar-se no solo, de acordo com a capacidade de infiltração deste no determinado momento. Após a infiltração, a água pode percolar e recargar o aquífero ou gerar um escoamento subsuperficial ao longo de canais internos do solo até atingir um curso de água superficial (CALDER, 1992; ZILBERMAN, 1997; TUCCI, 2002; TUNDISI, 2003; VON SPERLING, 2005; HELLER & PÁDUA, 2006; LIMA, 2008; NEARY et al, 2009). Se a água

chegar ao aquífero, esta será armazenada. No subsolo, esta é transportada até os rios, criando condições de perenidade nos períodos de longa estiagem. No caso de baixa capacidade de armazenamento e transporte de água subterrânea, com grandes afloramentos rochosos e alta evaporação, não é mantida a perenidade dos rios, como no caso da região de cristalino no Nordeste brasileiro³⁶ (TUCCI, 2002).

A água no solo, de forma geral, apresenta-se ao longo de seu perfil. Para entender isso, classifica-se o perfil em zona aerada e zona freática (ou zona saturada). A zona aerada, por sua vez, pode ser subdividida em zona das raízes, zona intermediária e franja capilar. A água existente na zona saturada pode ser referida como *água subterrânea*. Nesta zona, os poros do solo se apresentam quase que totalmente preenchidos por água (LIMA, 2008). Esta classificação pode ser observada de forma esquematizada na Figura 12.

Figura 12 – Perfil de distribuição da água no solo (adaptado de LIMA, 2008)

Na zona de aeração ocorre predomínio de forças capilares e a pressão é menor que a pressão atmosférica. A água contida nesta zona é denominada *água do solo* e é caracterizada

³⁶ Em geral, no território brasileiro, predomina a perenidade dos rios à exceção da Região Nordeste (ANA, 2007).

por apresentar presença de ar e água entre seus interstícios. Esta zona apresenta espessura variada de acordo com o local, podendo estar ausente (ex: áreas alagadiças) ou apresentar centenas de metros (ex: montanhas). De uma forma geral, esta zona apresenta em média 30 metros de profundidade (LIMA, 2008).

Ainda segundo Lima (2008), a franja capilar é formada pela ascensão capilar da água subterrânea, constituindo a umidade capilar do solo. Esta zona é mais pronunciada em solos de textura mais fina e nos locais onde a franja capilar encontra-se em áreas menos profundas, o sistema radicular da cobertura vegetal podem alcançá-la, propiciando o movimento ascendente contínuo da água subterrânea. A água pode apresentar também movimentação devido às forças gravitacionais, definindo o processo de percolação. À quantidade máxima de água capilar que é retida no solo se dá o nome de *capacidade de campo*, que, por sua vez, representa a capacidade máxima de armazenamento de água no solo e dependerá fundamentalmente de sua textura e estrutura.

A infiltração³⁷ de água no solo varia de acordo com o tipo, bem como com o uso e ocupação do solo. Segundo Pritchett (1979) e Neary et al (2009), geralmente solos com cobertura florestal, de forma geral, apresentam maior capacidade de infiltração e menor escoamento superficial, enquanto solos com superfície desprotegida podem sofrer compactação, diminuindo sua capacidade de infiltração e aumentando o escoamento superficial. Calder (1992) indica que o processo de intensificação do uso agrícola afeta o escoamento total, devido a alteração do processo de evapotranspiração (que retira água do solo, permitindo maior infiltração) levando a uma alteração da velocidade do escoamento em decorrência do aumento do escoamento superficial.

As bacias com cobertura vegetal florestal nativa geralmente produzem água de melhor qualidade (REIS, 2004; NEARY et al, 2009), reduzindo os custos envolvidos nos processos de purificação para consumo (REIS, 2004). Segundo o relatório a respeito da importância das florestas para o abastecimento de água para consumo elaborado pelo Banco Mundial e pela Organização Não Governamental (ONG) World Wild Fund for Nature (WWF), grande parte da água destinada ao consumo humano provém de áreas com cobertura vegetal natural.

³⁷ Este processo define a entrada de água no solo, trata-se, portanto de um processo de superfície, ao contrário da percolação que trata da movimentação de água dentro do perfil, sendo assim, caracterizada como um processo interno. A “capacidade de infiltração” seria a taxa máxima de absorção de água do solo sob determinadas condições (LIMA, 2008).

O relatório aponta que existe uma forte conexão entre a qualidade da água das bacias hidrográficas e a cobertura vegetal natural (florestas naturais), pois geralmente as bacias hidrográficas florestadas naturalmente produzem água de melhor qualidade do que aquelas ocupadas por atividades industriais, agricultura, ocupação urbana, que tendem a aumentar os níveis de poluição dos corpos hídricos (WORLD BANK & WWF, 2003).

O relatório apresentado pelo Banco Mundial e pela ONG WWF (WORLD BANK & WWF, 2003), ressalta que explicitar a conexão entre cobertura vegetal e qualidade da água produzida por uma bacia não é uma tarefa fácil. Existem inúmeras, e até mesmo desconhecidas ou pouco estudadas, interações e fenômenos associados a este tema. Este é um debate que permanece entre ecologistas, economistas dos recursos naturais e hidrólogos.

Entretanto, cabe ressaltar que diversos autores concordam que as florestas, de maneira geral, tendem a contribuir com a regulação da erosão do solo e redução da carga de sedimentos para os rios, via escoamento superficial, quando comparadas a solos sem coberturas vegetais (LIMA, 1993; 2008; 2011; REIS, 2004; ZOLIN et al, 2005; THOMAZ, 2007; MINGOTI, 2009; NEARY et al, 2009).

A erosão é apontada como um sério problema por ocasionar a perda de nutrientes do solo, tanto em decorrência da perda de capacidade de retenção de água, quanto por sua degradação estrutural, além das perdas diretas de nutrientes por lixiviação e carreamento de partículas.

Segundo Lima (2008) e Neary et al (2009), a vegetação florestal poderia atuar como “filtro” para proteção do solo contra escoamento superficial e erosão. Este termo refere-se às características já apontadas anteriormente pela cobertura vegetal de reduzir o impacto da precipitação sobre o solo, bem como influenciar a capacidade de infiltração e percolação de água neste, fatores que contribuiriam para um menor escoamento superficial, carreamento de partículas e lixiviação de nutrientes.

Mingoti (2009) analisa a produção de sedimentos em microbacias, com diferentes relevos, cultivos (pastos, cana, fruticultura, eucalipto), tamanhos e localização de cobertura florestal nativa (vegetação atlântica e de cerrado), na bacia hidrográfica do rio Corumbataí (SP). Sua análise é feita com base no cumprimento do antigo código florestal³⁸ (instituído

³⁸ Revogada pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, modificada pela Lei 12.727, de 17 de outubro de 2012 e regulamentada pelo Decreto 7.830, de 17 de outubro de 2012. Com base na análise comparativa de Juras & Ganem (2012), a nova lei flexibiliza e reduz as áreas preservadas ao determinar, por exemplo, a adoção das faixas de APP a partir do leito regular (ao contrário do nível mais alto, determinado pela lei de 1965), redução da faixa de APP para reservatórios artificiais, isenção de necessidade de RL para propriedades com até 4 módulos

pela Lei 4.771 de 15 de Setembro de 1965), até então em vigor no período de realização de sua pesquisa. Seu estudo aponta que o efeito da cobertura florestal na redução da erosão anual varia de acordo com a declividade média da microbacia. As reduções significativas da taxa de erosão são observadas apenas em casos, nos quais, a largura da Área de Preservação Permanente (APP³⁹) é duas vezes maior do que aquela prevista pela legislação. O tamanho da Reserva Legal (RL⁴⁰) influencia diretamente a taxa de redução erosão, desta forma, quanto maior a RL, menor a erosão observada. O estudo aponta ainda que a largura de APP deveria ser determinada com base na consideração da declividade da microbacia, enquanto a RL deveria estar localizada ao longo da APP, pois desta forma seria potencializado o efeito de redução da erosão.

Uma pesquisa realizada em área naturalmente coberta por vegetação de Mata Atlântica, no Parque Estadual dos Três Picos na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, visando estabelecer critérios de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) sob o princípio do Protetor Recebedor, define relações entre a cobertura vegetal e a produção de água das bacias da região (STROBEL et al, 2006). Neste sentido, os autores apontam que a Unidade de Conservação (UC) contribui, em alguns casos, com 70% a 100% da “produção” de água disponibilizada para a bacia.

Para estabelecer esta relação, os autores estimaram contribuições médias, através da taxa de escoamento superficial de água para corpos hídricos superficiais e taxa de infiltração para corpos hídricos subterrâneos. O objetivo da pesquisa foi estabelecer critérios e valores a serem cobrados pelos agentes econômicos usuários do recurso à UC por seu papel como produtor do serviço ecossistêmico de provisão de água (STROBEL et al, 2006).

Existem ainda outros estudos que abordam as interações entre as coberturas vegetais, solo e a quantidade de água produzida que serão apresentados no tópico referente aos impactos das silviculturas de eucalipto. De antemão, pode-se destacar os trabalhos de Lara et al (2009; 2011) que apontam a relação entre a produção de água nas bacias com cobertura florestal nativa do Chile, comparadas com a produção de água das bacias com maior proporção de silviculturas. Outros trabalhos como os de Baumhardt (2010) e Cavalcante

fiscais, permissão de cômputo de APP no cálculo percentual de RL (além do que já era permitido pela lei revogada), entre outras medidas.

³⁹ Definida, na lei revogada, como área necessária a proteção dos recursos hídricos, à margem de corpos hídricos, topos de morros, encostas, áreas de restingas, bordas de tabuleiros ou chapadas e em altitudes superiores a 1.800 metros (Lei Federal no 4.771, de 15 de setembro de 1965, alterada pela Lei no 7.803, de 1993).

⁴⁰ Definida, na lei revogada, como 80% da área da propriedade localizada na Amazônia Legal, 35% da propriedade localizada em Cerrado na Amazônia Legal e 20% da propriedade em qualquer outra região do país (incluído pela Medida Provisória nº 2.166, de 24 de agosto de 2001).

(2011), por sua vez, apontam os efeitos da produção de água pela substituição de áreas de pastos e campos naturais (Pampa) por silviculturas.

Estes últimos trabalhos citados (BAUMHARDT, 2010; CAVALCANTE, 2011) dialogam com Lima (2008), que aponta que uma cobertura florestal tende a reduzir o nível de água do solo mais do que quando comparada a outras coberturas vegetais esparsas. Sob a cobertura florestal, a depleção de água armazenada no solo é maior, no entanto, durante as estações chuvosas, a recarga do solo também pode ser mais elevada no caso das florestas em função do aumento da capacidade de infiltração do solo.

Outro trabalho que busca explorar esta relação foi realizado por Almeida et al (2009) que realizaram um estudo de caso no córrego do Galo, em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 970 km², com cobertura vegetal de floresta de Mata Atlântica, onde predominam a cobertura de Floresta Ombrófila Densa e Aberta. Para a análise da resposta hidrológica anual (RH⁴¹) da bacia, os autores calcularam a razão entre a vazão média anual (m³.s⁻¹) e o total anual precipitado (mm).

Por fim, Almeida et al (2009) apontaram como resultado uma alta correlação positiva entre os diferentes níveis de cobertura vegetal de remanescentes de floresta natural e a RH da bacia. Os autores apontam que foi possível observar alterações da RH em função do tipo de cobertura florestal ao longo do tempo, em função da introdução de silviculturas na região. Isto indica que a vazão média anual do referido corpo hídrico sofre forte influência quantitativa em função da cobertura florestal. O estudo mostrou que nesta bacia, as maiores áreas de remanescentes florestais atlânticos estão relacionados a maior RH.

Linhares (2006) também realiza um estudo para detectar influências de resposta hidrológica entre o desmatamento de Floresta Amazônica, na bacia do Rio Ji-Paraná, em Rondônia, comparado à Bacia do Rio Sucunduri, no Amazonas, que apresenta melhor estado de conservação de sua vegetação. Os resultados deste estudo indicaram ausência de tendência temporal entre desmatamento e RH para a floresta amazônica. No entanto, uma análise anual evidenciou a que tanto a RH como taxas de incremento de deflúvio estão associadas à dinâmica das taxas de desflorestamento na Bacia do Rio Ji-Paraná. A retirada da floresta provocou uma rápida resposta nos valores de escoamento superficial, possivelmente devido à diminuição dos processos de interceptação e infiltração de água no solo (LINHARES, 2006).

⁴¹ Resposta Hidrológica (RH) seria a razão entre a vazão de um determinado período de tempo de um corpo hídrico e a precipitação deste mesmo período a fim de eliminar as variações da vazão em decorrência da variação da precipitação (ALMEIDA et al, 2009). Desta forma, as variações de vazões observadas serão referentes a outros fatores, como o uso e ocupação do solo, por exemplo.

Carriello (2005), por sua vez, apresenta uma análise ampliada acerca da resposta hídrica de todo o território brasileiro. Seus resultados indicam que, tanto o clima, quanto a vegetação são importantes fatores na produção da RH. As diferenças observadas entre as distintas coberturas vegetais ocorrem devido às suas diversas características físicas e fisiológicas que interferem em fatores como a interceptação, evaporação da água da chuva e até mesmo a retirada de água do solo (como no caso das grandes formações vegetais do país).

Dentre seus resultados, pode-se destacar que as maiores correlações entre índice de vegetação e RH foram obtidas para as áreas de clima semiárido e semiúmido, que caracterizam as regiões do Nordeste, Centro Oeste e parte da região Sudeste do Brasil. Na região Centro Oeste, e parte da região amazônica, a correlação obtida foi negativa, possivelmente em função da alta evapotranspiração da floresta que reduz o volume de escoamento.

Os resultados referentes à Resposta Hídrica Observada (RHO)⁴², que implicam em observações a longo prazo, indicaram que as regiões de clima semiárido, que possuem vegetação mais resistentes a restrições hídricas, apresentaram menores respostas. Já regiões nas quais predominam vegetação de Floresta Ombrófila (Floresta Amazônica e Atlântica) a resposta é alta (CARRIELLO, 2005).

A mudança no regime de chuvas é outro tema que vem sendo debatido ao longo da história por diversos autores, sem, contudo se chegar a um consenso. Bruijnzeel (1990) aponta, de forma cautelosa, a redução da taxa de precipitação de acordo com o desmatamento de florestas tropicais, tais como a amazônica. No entanto, aponta que esta é uma relação que pode ser alterada após o desmatamento ou modificação da cobertura florestal.

Almeida et al (2009), na mesma linha, destacam a diminuição das taxas fotossintéticas e de evapotranspiração no caso de modificações do uso do solo (caracterizado pela retirada da cobertura florestal nativa), esta última, podendo provocar modificações das taxas de precipitação se ocorridas em larga escala. Os autores apontam que caso ocorram mudanças do regime de chuvas seria possível ocorrer alterações do regime de vazões e desta forma alterar a resposta hidrológica (RH) de uma bacia hidrográfica.

Conceitualmente sabe-se que existem três processos básicos de formação de precipitação pluviométrica, sendo: (1) precipitação convectiva – seria a precipitação provocada por processos comuns no verão por estar associadas ao movimento vertical de massa de ar quente e úmida, que se resfria, condensa e precipita; (2) precipitação orográfica –

⁴² Que utiliza dados de vazão de um período histórico de 1970 – 2000 e de precipitação de 1900 – 2000.

ocorre a elevação de massa de ar úmida, provocando queda de temperatura, condensação e precipitação; (3) precipitação frontal (ou por frentes) - quando ocorre ação frontal (fria ou quente). Uma frente fria provoca o soerguimento da massa mais aquecida e úmida provocando chuvas de maior intensidade, já frentes quentes provocam chuvas de menor intensidade (KOBAYAMA et al, 2006).

Tendo em vista essa breve revisão dos processos de formação de chuvas, pode-se inferir que a alteração de cobertura vegetal poderá alterar o regime de chuvas especialmente em regiões onde governam os processos de precipitação convectiva.

5.3. Serviços Ecossistêmicos relacionados aos recursos hídricos fornecidos pela cobertura vegetal natural do solo

A cobertura florestal natural oferece uma ampla variedade de serviços ecossistêmicos. Diversos são os autores que visam estudar os serviços oferecidos pela cobertura vegetal do complexo de biomas que formam o que se chama de forma generalista por “Mata Atlântica”.

A seguir, na Tabela 3.3.1, serão organizados alguns dos autores que apontaram ou identificaram alguns dos serviços ecossistêmicos fornecidos pela cobertura vegetal natural da Mata Atlântica relacionados aos recursos hídricos, de forma direta ou indireta.

Tabela 2.3.1 – Serviços ecossistêmicos oferecidos pela Mata Atlântica

Funções ecossistêmicas e Serviços ecossistêmicos	Referência
Manutenção da qualidade da água	Arcova & Cicco (1999); World Bank & WWF (2003); Forti (2003); Reis (2004); Bacellar (2005); Cicco et al (2007); Balbinot et al (2008); Ditt et al (2010)
Retenção de sedimentos e nutrientes	Arcova & Cicco (1999); World Bank & WWF (2003); Forti (2003); Reis (2004); Bacellar (2005); Camphora & May (2006); Ditt et al (2010)
Provisão e suprimento de água	World Bank & WWF (2003); Reis (2004); Bacellar (2005); Silvano et al (2005); Camphora & May (2006); Cicco et al (2007); Almeida et al (2009)
Manutenção do regime de chuvas	Cabral et al (1999 apud LINO & DIAS, 2003)
Filtro e tratamento de poluição (autodepuração)	World Bank & WWF (2003); Reis (2004); Lima (2008); Camphora & May (2006)
Sequestro de carbono	Bacellar (2005); Britez et al (2007); Ditt et al (2010)
Regulação atmosférica e climática	Silvano et al (2005); Camphora & May (2006); Balbinot et al (2008)
Regulação de nutrientes	Domingos et al (1997); Forti (2003); Gama-Rodrigues et al (2008); Sheer (2009)
Controle biológico e Manutenção da biodiversidade	Camphora & May (2006)
Retenção de solo e controle de erosão	Arcova & Cicco (1999); Bacellar (2005); Silva et al (2005); Ditt et al (2010)
Manutenção da qualidade dos solos	Forti (2003); Camphora & May (2006); Balbinot et al (2008); Gama-Rodrigues et al (2008)

De uma forma geral, a síntese acima buscou mostrar uma série de estudos que levantam e indicam serviços ecossistêmicos providos pela floresta relacionados de forma direta ou indiretamente aos recursos hídricos. A seguir, serão brevemente detalhados alguns dos serviços ecossistêmicos que vêm sendo estudados em relação às áreas mínimas necessárias, relacionados aos recursos hídricos.

5.4. Áreas de floresta nativa necessárias à manutenção de alguns Serviços Ecossistêmicos relacionados direta ou indiretamente aos recursos hídricos

Como já visto, a vegetação possui papel fundamental no balanço de água e energia de uma bacia. Reis (2004) realizou uma análise da relação entre a porcentagem de cobertura florestal de uma bacia hidrográfica e dos custos associados ao tratamento de água por Estações de Tratamento de Água (ETA) da rede de saneamento. A autora (op. cit.) encontrou fortes relações entre a cobertura vegetal sobre mananciais de captação de águas para abastecimento doméstico e os custos de tratamento da água, bem como a qualidade desta.

Dentre os mananciais estudados, aqueles com cobertura vegetal inferior a 15% da área da bacia apresentaram maiores variações na turbidez média entre o período seco e o chuvoso. Tal fato traz implicações em relação ao custo do tratamento da água dos mananciais estudados em uma relação de causalidade (REIS, 2004). Esta pesquisa (op. cit.) mostra claramente o serviço ecossistêmico da cobertura vegetal natural na manutenção da qualidade da água sendo afetado pela redução da cobertura vegetal natural.

Cabe ressaltar, que existem outros trabalhos citados ao longo deste que explicitam a relação entre floresta e qualidade da água que também explicitam como a floresta presta este serviço ecossistêmico. No entanto, como o foco deste tópico seria a revisão das áreas mínimas para garantir o fornecimento destes serviços, apenas o trabalho de Reis (2004) conseguiu estabelecer uma proporção mínima de floresta preservada em uma bacia associada a este serviço ecossistêmico nas condições específicas de sua área de estudo.

Lara et al (2009) e Lara et al (2011), realizam uma semelhante análise, em um período prolongado, considerando a evolução das taxas de florestas nativas e reflorestamento com espécies exóticas, dentre elas o eucalipto, em 6 bacias hidrográficas na região de Valdivia, no Chile. O estudo mostrou uma forte correlação positiva entre a razão da vazão dos rios, precipitação (Q/P) e a porcentagem de cobertura florestal nativa. A cada 10% de floresta nativa, observou-se um incremento de 5,8% no serviço de provisão de água nos rios da região das florestas tropicais temperadas do Chile (LARA et al, 2009).

Outro serviço, indiretamente associado aos recursos hídricos, seria o de manutenção da biodiversidade. Muitos são os estudos para a determinação de uma fração mínima a ser preservada para garantir que este serviço não seja perdido de forma irreversível. A Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB, 2002) determinou metas para o ano de 2010, que apontavam a necessidade de preservação de pelo menos 10% da área de cada uma das regiões ecológicas do mundo e de 50% das áreas de maior importância ecológica do mundo, visando à proteção da biodiversidade vegetal (apenas). Cabe ressaltar, no entanto, que os vegetais possuem alta importância biológica, pois são recursos fundamentais para a estabilidade climática e balanço de gases. Milhares de espécies selvagens possuem significativa importância econômica e cultural, provêm alimentos, medicamentos, combustíveis, vestimentas, entre outros. Além destes usos diretos, os vegetais possuem uma variedade de benefícios indiretos, tais como a provisão de habitats para animais de todo o mundo, dentre muitas outras funções (CDB, 2002).

A determinação da porcentagem ou área do território que necessita ser preservada para a garantia da manutenção da biodiversidade é muito variável, pois cada espécie possui uma área mínima requerida para sua manutenção e preservação. Estudos apontam uma ampla faixa que varia de 10 a 75% da área do território que necessitariam ser preservados para este fim (WECD, 1987; NOSS & COOPERRIDER, 1994; CDB, 2002; SVANCARA et al, 2005).

Hoekstra et al (2011) aponta que a preservação de 10 a 15 % do total de um território não seria suficiente para garantir a proteção da biodiversidade. Para estes autores (op.cit.), ao se determinar um valor que poderia ser utilizado amplamente, no caso de não existirem dados mais adequados a especificidade local, este ficaria na ordem de 25 a 50% do território, variando de acordo com as necessidades de cada ecossistema.

Metzger (2010) analisa as proporções estabelecidas para RL e APP pelo antigo Código Florestal Brasileiro (instituído pela Lei 4.771 de 15 de Setembro de 1965) e aponta que estas proporções indicadas (20% como Reserva Legal em área de Mata Atlântica) apresentam embasamento e fundamentação científicos, porém em alguns casos ainda existiria a necessidade de superação das áreas mínimas definidas para as APPs. As conclusões do trabalho de Mingoti (2009) vão ao encontro das conclusões apontadas por Metzger (2010), apontando a necessidade de superação das áreas mínimas estabelecidas para as APPs a fim de se garantir o fluxo de fornecimento de dois distintos serviços ecossistêmicos⁴³. Não obstante, Metzger (2010) ressalta ainda o risco de graves prejuízos ao patrimônio biológico e genético decorrentes da adoção de proporções que não sejam suficientes para a preservação destes serviços ecossistêmicos.

Estudo conduzido por Vanzela et al (2010), na Sub Bacia Hidrográfica do córrego Três Barras, no Município de Marinópolis (SP), apresenta como resultados que áreas ocupadas por floresta nativa favorecem o aumento da vazão dos rios em função da maior cobertura do solo, proporcionando estabilidade e proteção contra a desagregação de suas partículas, bem como favorecendo a infiltração de água no solo que reduz o escoamento superficial, contribuindo também para a qualidade da água. Áreas com manejo agrícola que provocam compactação ou alteração das características do solo, proporcionam aumento de escoamento superficial, menor infiltração e, portanto contribuem para redução da vazão dos

⁴³ Enquanto o trabalho de Metzger (2010) foca o impacto das APPs e RLs sobre o serviço de manutenção da biodiversidade, o trabalho de Mingoti (2009) foca o impacto destas para a garantia de provisão do serviço ecossistêmico de retenção de solo ou controle dos processos erosivos, associados diretamente à qualidade da água produzida na bacia hidrográfica.

corpos hídricos. Este trabalho não contabilizou a área de vegetação nativa necessária, apenas frisa a importância de sua existência.

Tendo em vista a revisão acima apresentada, foi possível observar a incerteza associada à determinação das áreas naturais mínimas necessárias para a manutenção do fluxo de fornecimento de três serviços ecossistêmicos – provisão de água, manutenção da qualidade da água e da biodiversidade. Também como foi possível observar, a localização da área de cobertura vegetal natural também atuará de diferentes maneiras, pois até mesmo em relação aos serviços hidrológicos, ou seja, sem considerar o serviço de manutenção da biodiversidade que apresenta extrema complexidade e variabilidade, as áreas vegetais possuem funções distintas dependendo da área da bacia no qual estiver inserida.

Serviços como o de provisão de água na bacia necessitam de maiores áreas permeáveis e com alta capacidade de infiltração. Desta forma, tanto a percolação até recarga do aquífero, como o escoamento sub superficial serão favorecidos. Por essa razão, não se trata somente de preservação da área de APP como também de áreas altas da bacia e locais onde pode ocorrer maior disponibilidade hídrica verde.

As áreas de APP por sua vez, atuam da mesma maneira que as florestas de outros locais, mas ao permitir a infiltração de maior volume de água e proteção contra a desagregação de partículas de solo, reduzem o escoamento superficial e desta forma evitam que maiores volume de água, carreando sedimentos e lixiviados, atinjam os corpos hídricos superficiais.

É válido lembrar que muitos outros serviços são fornecidos pelo ecossistema em análise, vide Tabela 3.3.1. Em função disso, optou-se por não adotar, em nenhuma fase da análise, uma área mínima a ser conservada para que não exista o risco de interrupção no fluxo de SE diversos.

5.5. Valoração Econômica dos Serviços Ecossistêmicos e Ambientais

Como já definido anteriormente, os serviços ecossistêmicos são os benefícios providos pelos ecossistemas que podem ser utilizados, direta ou indiretamente, pelo homem sendo passíveis de valoração (DE GROOT et al, 2002; MEA, 2005). Também foi citada a diferenciação entre os conceitos “serviço ecossistêmico” e “serviço ambiental” a ser adotada nesta pesquisa a fins de diferenciação dos tipos de serviços analisados, em função de sua fonte

de provisão. Enquanto o termo SE se refere aos benefícios humanos provenientes dos ecossistemas naturais, o termo SA, se refere aos benefícios provindos das ações humanas de recuperação ou manutenção de propriedades ecossistêmicas que geram aos benefícios humanos.

A valoração, sendo ela econômica ou não econômica⁴⁴, dos serviços ecossistêmicos ou ambientais compõe o conjunto de instrumentos das duas principais correntes da Economia do Meio Ambiente, sendo elas a Economia Ambiental e a Economia Ecológica (ROMEIRO, 2003).

A Economia Ambiental toma como base os princípios da Economia Neoclássica e está baseada nas premissas da sustentabilidade fraca⁴⁵ (SINISGALLI, 2005). Embasada pelos pressupostos de que as limitações ecossistêmicas, ou capacidade de suporte do planeta, podem ser superadas pelo progresso tecnológico, esta corrente se fundamenta essencialmente na premissa de que os mecanismos de mercado são suficientes para garantir o crescimento econômico indefinidamente, com a incorporação dos aspectos ambientais através da internalização das externalidades.

Dentro desta corrente, as externalidades ambientais negativas⁴⁶ podem ser internalizadas sob o emprego de taxações ou subsídios, de privatização dos recursos naturais ou de cotas de emissão/uso. De forma sucinta, para se atingir um nível social ótimo de degradação poderiam ser empregados subsídios ou taxações sobre a externalidade representada pela poluição. Esta abordagem é contemplada pela Economia da Poluição (SINISGALLI, 2005) e estes mecanismos são aplicados de forma a fazer com que os custos das externalidades negativas sejam internalizados pelos agentes econômicos que a geram (AMAZONAS, 1994).

Uma outra abordagem refere-se às questões relacionadas à exaustão de recursos naturais, contemplada pela Economia dos Recursos Naturais, que define conceitos de custos de oportunidade intertemporais e taxas de desconto visando atingir o “ótimo de extração” (AMAZONAS, 1994). Nesta abordagem, caso um recurso seja demasiadamente explorado, alcançando o risco de escassez, a elevação de seu preço provoca a indução de busca por novas

⁴⁴ Existem ainda valorações sociais, ambientais, etc.

⁴⁵ A *sustentabilidade fraca* indica a possibilidade de substitutabilidade entre o capital natural e capital produzido, ou seja, entre bens e serviços ecossistêmicos por bens e serviços econômicos. Ao passo que ocorre a redução do capital natural, esta perda poderia ser compensada pelo aumento da produção do capital produzido. Desta forma, este conceito de sustentabilidade defende que os limites impostos pela capacidade de suporte ecossistêmica podem ser superados pelo progresso técnico (ROMEIRO, 2003; ROMEIRO, 2004; DALY, 2005; SINISGALLI, 2005).

⁴⁶ Impacto negativo de uma atividade de um agente sobre o bem-estar de outro ou outros (MANKIW, 2001).

tecnologias que permitam a economia de exploração do recurso e ou sua substituição por outro recurso ainda abundante (ROMEIRO, 2004).

A Economia Ecológica, por sua vez, é uma corrente teórica que surge na arena do debate acadêmico e está embasada pelo conceito por ela denominado sustentabilidade forte⁴⁷ (ROMEIRO, 2003). A principal diferença entre a Economia Ecológica e a Economia Ambiental está no fato da primeira compreender a economia como um subsistema de um todo maior – o ambiente – (ROMEIRO, 2004), enquanto a segunda compreende a economia como sistema paralelo ao sistema ambiental. A partir disso, diferem suas concepções de compreender o ambiente. Para a Economia Ecológica o ambiente é um fator limitante ao crescimento econômico indeterminado, enquanto que para a Economia Ambiental o ambiente é considerado apenas como mais uma variável da função de produção (MARTINEZ-ALIER, 2007).

A valoração econômica é considerada por Seroa da Motta (2006) parte do arcabouço teórico da microeconomia de bem estar. Sua função seria a de determinar o quanto melhor ou pior estará o bem estar dos indivíduos em decorrência das mudanças na oferta de bens e serviços ecossistêmicos ou ambientais. Para Ortiz (2003), a valoração é fundamental para análises de custo benefício envolvendo recursos ambientais.

Na vertente da Economia Ambiental, a valoração assume um caráter utilitarista e antropocêntrico, tendo como princípio norteador o bem estar humano. Para a Economia Ecológica a valoração tem como objetivo o reconhecimento da importância dos bens e serviços ecossistêmicos para o bem estar humano e a sua valoração permite a sua incorporação na contabilidade econômica, atentando para a impossibilidade de substitutabilidade completa de capital natural, ao considerar os limites biofísicos além do bem estar humano (ROMEIRO, 2004).

Dentro da vertente da Economia Ambiental, Pearce & Moran (1994) classificam os métodos de valoração econômica ambiental em diretos⁴⁸ e indiretos⁴⁹. Dentre os métodos diretos, pode se destacar o método de valoração contingente, no qual o valor do bem ou serviço ecossistêmico ou ambiental avaliado é obtido através de entrevistas a indivíduos que revelam o quanto estão dispostos a pagar (DAP) para sua preservação ou aceitar como

⁴⁷ A *sustentabilidade forte* baseia-se na premissa de complementaridade entre capital natural (bens e serviços ecossistêmicos) e capital produzido (bens e serviços econômicos). Este conceito de sustentabilidade defende a necessidade da manutenção de um estoque constante de capital natural, pois a sua substituição completa pelo capital produzido poderia incorrer em risco de perdas irreversíveis de capital natural, em níveis catastróficos (ROMEIRO, 2003; ROMEIRO, 2004; DALY, 2005; SINISGALLI, 2005).

⁴⁸ Obtidos a partir da consulta direta sobre a preferência dos indivíduos

⁴⁹ Obtidos a partir de análises que considerem indiretamente a opção dos indivíduos.

compensação para a perda do bem ou serviço. Entre os métodos indiretos podem-se destacar os métodos de análise da variação marginal, preços hedônicos, custo de viagem, função dose resposta e custos de reposição (PEARCE & MORAN, 1994).

Na análise de variação marginal, observa-se a variação no provimento de bens ou serviços ambientais ou ecossistêmicos, em forma de insumos necessários à produção de um bem ou serviço econômico. Desta forma, o valor é atribuído a partir da variação observada (“preço sombra”), equivalente à parcela do produto para o qual contribui (SEROA DA MOTTA, 1997).

O método de preços hedônicos baseia-se na hipótese de complementaridade. Neste método é realizada a valoração de um bem ou serviço ecossistêmico ou ambiental a partir da observação dos mercados reais nos quais esses bens ou serviços são efetivamente considerados (PEARCE & MORAN, 1994). Como exemplo deste tipo de valoração, temos frequentemente a consideração da valorização ou desvalorização de imóveis em função de uma boa ou má qualidade ambiental.

O método de custo de viagem pode ser obtido através da avaliação da variação do excedente do consumidor medida através da função de demanda estimada para este recurso. Pode ser determinado o valor pelo qual os indivíduos estão dispostos a pagar para visitar determinado local com determinadas características ambientais a serem avaliadas (SEROA DA MOTTA, 1997). Este valor está associado aos custos incorridos aos indivíduos para a visitação (transporte, estadia, entre outros custos).

A função dose resposta visa estabelecer uma relação entre a degradação do bem ou serviço ecossistêmico ou ambiental, tais como a poluição, contaminação, etc, e a alteração sobre algum bem ou serviço econômico com valor de mercado. Desta forma, o estado de degradação ambiental (dose) é avaliado através da observação das mudanças e alterações nos níveis de produção de um determinado bem ou serviço de mercado provocado pelo dano (resposta) (PEARCE & MORAN, 1994; SEROA DA MOTTA, 1997). Como exemplo deste tipo de valoração, é possível citar trabalhos que valoram os danos provocados pela poluição atmosférica através dos custos associados a incidência de problemas respiratório.

Os custos de reposição, por sua vez, podem ser estimados a partir da consideração dos custos envolvidos na restauração de um bem ou serviço ambiental ou ecossistêmico degradado (ex: solo) até que este recupere suas características iniciais. Este método é utilizado quando ocorre a necessidade de gastos pelos usuários do recurso ou serviço natural para

garantir os níveis desejados do serviço (PEARCE & MORAN, 1994; SEROA DA MOTTA, 1997).

Seroa da Motta (1997) aponta ainda o método de gastos defensivos ou custos evitados. Esta forma de valoração mensura os gastos que seriam despendidos pelos usuários em bens substitutos para não alterar o produto ou a qualidade deste. Como exemplo é possível citar os gastos com tratamento de água ou compra de água tratada, necessários em caso de poluição de mananciais; gastos com medicamentos para problemas de saúde provocados pela poluição, entre outros.

Na Figura 13 pode-se observar a classificação proposta por Seroa da Motta (1997) para os métodos acima abordados. Sua classificação divide os métodos em “Função da Produção” ou “Função da Demanda”.

Figura 13 – Classificação dos métodos de Valoração Econômica Ambiental
(Fonte: SEROA DA MOTTA, 1997).

5.5.1. Valores Econômicos de SE e SA fornecidos pelas coberturas vegetais de florestas de mata atlântica, silvicultura de eucalipto e pastagem

A seguir será organizada a revisão de valores encontrados para alguns dos serviços ecossistêmicos e ambientais fornecidos pelas diversas coberturas vegetais. Primeiramente serão apresentados os valores encontrados para a o serviço de provisão de água, a seguir são apresentados os valores para o serviço de retenção de nutrientes no solo e controle de processos erosivos, por fim, são organizados alguns dos dados encontrados acerca dos valores econômicos do serviço de manutenção do fluxo hidrológico. Não foram encontrados valores econômicos para todos os serviços considerados neste levantamento para as coberturas de pastagem e eucalipto analisadas, o que pode indicar uma carência de estudos que realizem a

avaliação econômica dos serviços prestados por estas coberturas. Os valores levantados podem ser verificados nas Tabelas 5.5.1.1, 5.5.1.2, 5.5.1.3 e 5.5.1.4.

Tabela 5.5.1.1 – Valores levantados para o serviço de provisão de água

Fonte	Método / base para cálculo	Valor	Unidade	Vegetação
Andrade (2010)	Estimado*	0,08 ¹	R\$/m³	Pastagem
Andrade (2010)	Transferência de valores de florestas tropicais de Costanza et al (1997)	8	US\$/ha/ano	Mata Atlântica (ombrófila densa, estacional, transição para cerrado)
Andrade (2010)	Estimado*	0,0333 ¹	R\$/m³	Floresta secundária – Mata Atlântica

* Estimado a partir dos dados de escoamento superficial e valor da água disponíveis no trabalho

¹ Considerou o escoamento superficial

Tendo em vista os valores apresentados na Tabela 5.5.1.1, cabe ressaltar que neste trabalho, após a revisão de comportamento hidrológico, entende-se como serviço de provisão de água o escoamento sub superficial (de menor velocidade) e não apenas o escoamento superficial (rápido).

Tabela 5.5.1.2 – Valores levantados para o serviço de retenção da lixiviação de nutrientes no solo.

Fonte	Método / base para cálculo	Valor	Unidade	Vegetação
Andrade (2010)	Transferência de valores de florestas tropicais de Costanza et al (1997)	922*	US\$/ha/ano	Mata Atlântica
Andrade (2010)	Custo de reposição	5,03	R\$/ha/ano	Vegetação secundária – Mata Atlântica
Andrade (2010)	Custo de reposição	0,54	R\$/ha/ano	Vegetação Riparia – Mata Atlântica
Santos et al (2001)	Custo evitado	13,65	US\$/ha/ano	Mata Atlântica
Medeiros (1995)	Custo de reposição aplicado ao caso de utilização da madeira nativa para produção de carvão	4,45	US\$/ha/ano	Florestas nativas (diversas tipologias de cerrados, matas ciliares, Mata Atlântica)
Sarcinelli, (2008); Sarcinelli et al (2009)	Custo de reposição	34	R\$/ha/ano	Pastagem
Andrade (2010)	Custo de reposição	8,97	R\$/ha/ano	Pastagem
Sarcinelli, (2008); Sarcinelli et al (2009)	Custo de reposição	55,52	R\$/ha/ano	Silvicultura de Eucalipto
Medeiros (1995)	Custo de reposição	134,41	US\$/ha/ano	Eucalipto

*Foi necessário desagregar resultados do autor

Tabela 5.5.1.3 – Valores levantados para o serviço de controle de erosão.

Fonte	Método / base para cálculo	Valor em US\$/ha/ano	Vegetação
Andrade (2010)	Transferência de valores de florestas tropicais de Costanza et al (1997)	245*	Mata Atlântica
Costanza et al (1997)	Revisão de estudos (vários métodos)	29	Pastagem
Santos et al (2001)	Custo evitado da erosão	83,23	Mata Atlântica

*Foi necessário desagregar resultados do autor

Tabela 5.5.1.4 – Valoração do serviço de manutenção do fluxo hidrológico.

Fonte	Método / base para cálculo	Valor em US\$/ha/ano	Vegetação
Tolmasquim (2000)	Valoração econômica VPL (5% 20 anos)	1.76*	Florestas Tropicais
Santos et al (1997)	Custo evitado de inundações	621,70*	Mata Atlântica
Sinisgalli (2005)	Transferência de valor relativo à floresta amazônica – produtividade marginal	28,20	Mata Atlântica

*Valores disponíveis na literatura (apud SINISGALLI, 2005)

O levantamento de valores econômicos dos SE e SA servirá como base para a comparação proposta neste trabalho. No caso da valoração do serviço de retenção de nutrientes no solo, estes dados levantados serão utilizados para a estimativa e transferência de valores. Tendo em vista a variação entre os valores obtidos a partir do emprego de métodos diversos, optou-se por considerar apenas os valores obtidos pelos mesmos métodos de valoração, uma vez que o objetivo deste trabalho não é definir o valor econômico preciso dos serviços fornecidos, mas sim realizar a comparação destes valores a fim de determinar a qualidade dos serviços providos pelas três coberturas vegetais consideradas.

5.6. Considerações do capítulo

Com foi visto, serão adotados os termos SE e SA com significados distintos neste trabalho para diferenciar os benefícios provindos dos ecossistemas naturais e das silviculturas, bem como qualquer outra ação antrópica que visa restaurar ou recuperar um serviço antes provido pela vegetação natural.

Posto isto, cabe ainda concluir que se compreende que os SE são providos pelas FE, através das diversas interações entre as estruturas ecológicas, que por sua vez, geram os processos ecológicos. Desta forma, alterações nas estruturas, podem modificar os processos e

as alterações em cadeia podem afetar o provimento dos SEs. As estruturas e processos ecológicos foram apresentados ao abordar as relações entre cobertura vegetal e comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Desta forma, qualquer alteração nesta dinâmica de interações podem provocar impactos sobre o provimento de serviços ecossistêmicos.

Isto por que, como já apresentado anteriormente, coberturas florestais utilizam água do solo, ao mesmo tempo que propiciam maior infiltração de água. A maior infiltração favorece os processos mais lentos de movimentação de água no solo, permitindo a perenidade de rios. Já solos com maior compactação ou menor capacidade de infiltração favorecem os processos de escoamento superficial, movimentação de água mais rápida, que também é responsável pela lixiviação superficial e carreamento de sedimentos aos corpos hídricos.

Quanto à avaliação dos serviços, primeiro apresentaram-se alguns estudos que buscaram determinar uma área mínima a ser preservada de forma a não alterar a qualidade do serviço ecossistêmico provido. Neste sentido, o que se pode concluir é que frente às incertezas, deve-se sempre que possível buscar superar estas áreas determinadas, pois elas podem não garantir a preservação de todos os serviços providos pela floresta em questão.

Outra questão abordada foi o método de valoração econômica ambiental, que pode ser utilizado para avaliar a qualidade ou alteração da qualidade dos serviços prestados pela vegetação nativa ou serviços ambientais prestados pelas coberturas vegetais antrópicas.

Desta forma, pode-se concluir que para uma avaliação do uso da água e impactos de ordem hidrológica deste uso sobre a bacia, estas avaliações serão integradas de forma a permitir a visualização, não somente da água utilizada, bem como seus impactos sobre a disponibilidade hídrica da bacia e as alterações sobre os serviços ecossistêmicos e ambientais hidrológicos.

CAPÍTULO 6 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a caracterização do trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHPS), área de estudo deste trabalho, que permitirá compreender as especificidades que tornam interessante e relevante a avaliação do uso da água pelas diversas coberturas vegetais da bacia para a avaliação da disponibilidade qualitativa e quantitativa para os diversos usos.

Em seguida, apresenta-se os métodos empregados para a verificação das hipóteses desta pesquisa, bem como atender aos objetivos definidos. Inicialmente será apresentado o método de Balanço Hídrico Climatológico. Posteriormente, é apresentado o método de Pegada Hídrica, método de interesse do setor de produção de celulose que foi utilizado na quantificação de uso da água. A seguir, descreve-se o método e adaptações necessárias para realizar um balanço hídrico da bacia a partir da classificação por tipos de água da Pegada Hídrica. Por fim, apresenta-se o método de valoração de SEs e SAs empregados para avaliar as alterações sobre o provimento de SEs.

6.1. Caracterização da área de estudo

A análise proposta neste trabalho será realizada no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. A escolha foi realizada com base no levantamento das áreas de maior produção de celulose no país. O Brasil, atualmente ocupa a 4ª posição no ranking mundial dos países produtores de celulose (BRACELPA, 2011). Dentro do país, a produção total de pastas de celulose (incluindo pastas de fibra curta, longa e de alto rendimento) do Estado de São Paulo no ano de 2009 foi de mais de 3 milhões de toneladas, representando 27,7% da produção nacional (BRACELPA, 2010). Dentro do país, o Estado de São Paulo é o estado que apresenta maior produção total de pasta de celulose de todos os tipos. No trecho paulista da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul estão localizadas três indústrias, e sua produção em 2009, segundo relatório estatístico do setor (BRACELPA, 2010), foi de cerca de 1.540 mil toneladas de celulose de todos os tipos, representando 43,8% da produção estadual.

A bacia do rio Paraíba do Sul, em sua totalidade, possui uma área de drenagem de 55.300 km². Desta área total, 20.900 km² situam-se em território fluminense, 20.700 km² em território mineiro e 13.900 km² em território paulista (COPPETEC, 2006). O principal rio da bacia, o Paraíba do Sul, é formado pela confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga no Estado de São Paulo (FCR, 2009). O rio possui um percurso de mais 1.000 km, antes de desembocar no Oceano Atlântico, no Estado do Rio de Janeiro (CEIVAP, 2011). O rio Paraíba do Sul, em

seu trecho paulista, constitui o dreno natural da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 02 – UGRHI 02 (FCR, 2009). Sua distribuição ao longo do território sudeste brasileiro pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – Localização e limite da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Fonte: ANA, sd

A pedologia desta região é variada, sendo composta por Latossolos Vermelho Amarelo, Cambissolo álico, Podzólico Vermelho Amarelo, etc (COPPETEC, 2002). Esta bacia está situada em uma região na qual o clima predominante é subtropical quente, com temperatura média anual entre 18°C e 24°C (MARENGO & ALVES, 2005). Os maiores índices de precipitação pluviométrica ocorrem no trecho paulista da Serra do Mar, onde a precipitação anual chega a ultrapassar 2.000 mm. O regime de chuvas é caracterizado por um período seco, entre junho e setembro, e um período chuvoso, entre novembro a janeiro (COPPETEC, 2006). É uma área originalmente coberta por vegetação de Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual) (COPPETEC, 2002), como pode também ser visualizado na Figura 15.

A agricultura é praticada no trecho paulista em menor escala e com pouca expressão em termos comerciais. Após o declínio da produção de café em meados do século XX, o governo chegou a incentivar a agricultura irrigada de arroz. No entanto, não se atingiram as metas de produção, não chegando a produzir nem metade do total esperado. Com o tempo, estas estruturas foram se esvaziando, e os investimentos para a conclusão dos projetos minguaram (CEIVAP, 2006).

Atualmente, o plantio de eucalipto tem se intensificado devido à instalação de fábricas de celulose na região (FREITAS JUNIOR & MARSON, 2009; DIAS et al, 2011). Como se pode observar nos dados apresentados na Tabela 6.1, no trecho paulista restam apenas cerca de 15,6% da cobertura vegetal original da bacia, apresentando maior relevância a cobertura por campo e pastagens com cerca de 57,6%. Segundo Arguello et al (2010), o eucalipto apresenta uma proporção de uso de 7,1% da área. Cabe ressaltar que apenas estes três tipos de uso do solo são responsáveis por cerca de 80,3% do uso e ocupação da área da bacia em seu trecho paulista.

Tabela 6.1.1 – Proporção do uso e ocupação do solo por algumas coberturas da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Ocupação e Uso do Solo				
Cobertura Vegetal e Uso do Solo	Minas Gerais (%)	Rio de Janeiro (%)	São Paulo (%)	Bacia total (%)
Floresta Ombrófila	0,3	8,9	15,3	7,3
Floresta Estacional	4,9	4,3	0,3	3,5
Vegetação Secundária	9,2	17,8	12,3	13,2
Campo/Pastagem	80,2	61,2	57,6	67,4
Área Agrícola	2	2,4	4,5	2,8
Área Urbana	0,4	1,1	2,6	1,2

Fonte: COPPETEC, 2006.

As alterações no uso e ocupação do solo, decorrente da substituição da cobertura natural, além da influência na paisagem, acarretam também modificações no comportamento hidrológico da bacia. Inicialmente predominavam os processos de infiltração e estocagem (COELHO NETTO, 1985 apud FREITAS JUNIOR & MARSON, 2009), passando posteriormente para predomínio de escoamento superficial, conduzindo a um quadro de altas taxas de erosão (DANTAS & COELHO NETTO, 1996) e, conseqüentemente, assoreamento nos canais coletores principais (VIANNA et al, 2009).

Com a substituição da agricultura por pastagens extensivas, ocorreu o enraizamento raso de gramíneas e escavação de formigas saúva, do gênero *Atta*, que implicou em significativas descontinuidades hidrológicas nas encostas (SATO et al, 2009). A ação biogênica, associada à cobertura de gramíneas, favorece a infiltração da água no solo através da formação de “rotas preferenciais” de escoamento nas camadas superficiais do solo (DEUS, 1991).

Em relação à qualidade dos recursos hídricos da bacia, o relatório da CEIVAP (2011) aponta que o trecho do rio Paraíba do Sul entre São José dos Campos e Jacareí perdeu sua capacidade de auto depuração. Atividades realizadas sem critério técnico de uso do solo são observadas ao longo de toda a bacia. Dentre as principais práticas, destacam-se o pastejo de gado bovino sem a aplicação de práticas conservacionistas, ausência de critérios técnicos na abertura e conservação de acessos rurais e estradas, ocupação de encostas e áreas de acentuado declive, bem como a ausência de cobertura florestal que implicam em maior escoamento superficial, com consequente aumento de transporte de material particulado e assoreamento de reservatórios e talvegues (CEIVAP, 2011).

Não obstante a retirada da cobertura vegetal natural, são contabilizados ainda 155 pontos de lançamentos de efluentes, destes, 63 estão localizados em trechos com a qualidade da água comprometida acima do permitido (CEIVAP, 2011). O relatório (CEIVAP, 2011) aponta ainda que a disponibilidade hídrica está diminuindo em função do aumento da demanda entre as distintas atividades, bem como em função de seu uso irracional. Dentre os principais usos da bacia, recebem destaque os usos para abastecimento, diluição de efluentes, irrigação e geração de energia hidrelétrica. Em menor escala, ocorrem ainda atividades como pesca, aquicultura, recreação, navegação, entre outras.

Os aspectos relacionados a impactos negativos sobre a disponibilidade quali e quantitativa dos recursos hídricos acima apontados são relevantes para evidenciar a situação atual dos corpos hídricos da bacia. Frente a isso, cabe entender como a atividade de silvicultura pode potencializar estes impactos.

6.2. Características das coberturas vegetais de floresta nativa e pastagem no trecho paulista da BHPS

A seguir serão apresentadas algumas das características das coberturas vegetais de eucalipto, floresta nativa e pastagem, relevantes para a análise e contabilização do uso da água pela aplicação dos métodos de balanço hídrico e pegada hídrica.

6.2.1. Características da madeira de eucalipto para a produção de celulose produzidas na região

A seguir, serão apresentadas as características da madeira produzida para a finalidade de produção de celulose. Sempre que possível, foram selecionadas as revisões que melhor refletem a característica da madeira produzida na região estudada.

Segundo Neto (2002), a qualidade da celulose e operações posteriores ao cozimento é afetada pela densidade básica da madeira. O autor aponta que os limites ideais para a densidade básica da madeira de eucalipto para celulose seria entre 0,450 e 0,650 g.cm⁻³, pois madeiras muito leves levam a redução do rendimento volumétrico em celulose, enquanto madeiras muito pesadas apresentam dificuldades de picagem e impregnação dos cavacos, consomem altas quantidades de reagentes e levam a baixos rendimentos gravimétricos e elevados teores de rejeitos. Da mesma forma, Queiroz & Barichello (2008) destacam que para que a madeira de eucalipto seja utilizada para a produção de celulose, esta deve apresentar densidade igual ou superior a 500 kg.m⁻³.

Bassa et al (2007), apontam que atualmente são obtidas madeiras de eucalipto de boa qualidade e com altos rendimentos em polpa celulósica com uma densidade básica em torno de 0,5 a 0,52 g.cm⁻³. Sturion et al (1987) realizam um estudo comparativo das densidades básicas da madeira obtidas a partir de diversas espécies de eucalipto e aponta que esta varia de 0,525 a 0,715 g.cm⁻³, sendo que as espécies mais exploradas no Brasil, segundo ABRAF (2009), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* apresentaram densidades básicas de 0,525 e 0,581 g.cm⁻³, respectivamente. Guedes (2010) realiza um estudo comparativo entre a qualidade das madeiras obtidas a partir do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e obtém resultados de densidade básica entre 0,3497 e 0,5317 g/cm³.

Foelkel (2005) aponta três classes de curva volumétrica. A primeira ele denomina como “crescimento pobre”, nesta classe ele aponta um incremento médio anual de madeira de $20 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Já para a classe de “crescimento médio”, o autor aponta um incremento médio de $35 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Por fim, na categoria de “crescimento excelente” o autor aponta um incremento médio anual de $50 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. O autor ressalta que é comum observar ligeira queda da densidade básica para povoamentos que cresçam mais e tenham maior produtividade volumétrica, porém esta característica não pode ser generalizada, uma vez que se busca, através do desenvolvimento de clones, maior produtividade, com densidade básica mais elevada.

Devido aos avanços tecnológicos nas práticas de silvicultura, atualmente se obtém uma alta produção de madeira por hectare anualmente (curva volumétrica) em torno de 40 a $50 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (BASSA et al, 2007). O relatório florestal elaborado pela BRACELPA (2011b), referente ao balanço do ano de 2010 e 2011, aponta que a produtividade média de madeira observada para o Estado de São Paulo é de $46 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

O indicador de consumo específico refere-se ao volume de madeira necessário para a produção de uma tonelada de celulose. Queiroz & Barrichelo (2008) apontam que na década de 1970 o consumo específico era de $4,46 \text{ m}^3.\text{tsa}^{-1}$.

Em decorrência de melhoramentos implementados, os autores (op. cit.) afirmam que, ao utilizar uma madeira com densidade básica maior que 500 kg.m^{-3} , como no caso da região estudada, e incremento médio anual em torno de $50 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, o consumo específico de madeira para a produção de uma tonelada de celulose é de 3,35 metros cúbicos por tonelada seca ao ar ($\text{m}^3.\text{tsa}^{-1}$).

A umidade da madeira na região próxima à medula pode variar de 80% a 160%, e entre 40 a 60% nas partes periféricas de um mesmo tronco (FAGUNDES, 2003). Haseleic et al (2004) analisou o *Eucalyptus grandis* e obteve uma umidade média (total) de 99,51%.

6.2.2. Características da floresta nativa de Mata Atlântica

Primeiramente cabe pontuar que, diferentemente do caso da silvicultura, que será apresentado posteriormente, não se pode indicar o valor de CAD indicado para esta vegetação, mas sim, realizar um levantamento dos CADs encontrados sob esta cobertura

vegetal. Isto, porque a floresta nativa possui ampla variedade de espécies com necessidades hídricas diversas, diferentemente de uma plantação homogênea de eucalipto.

De forma geral, os valores encontrados para a região estudada (trecho paulista da BHPS) variam entre 125 mm e 180 mm. Fujieda et al (1997) realiza seu estudo na bacia experimental em Cunha, Estado de São Paulo, na Serra do Mar, em uma área com cobertura vegetal natural de Mata Atlântica e aponta que a média da capacidade de armazenamento de água do solo nesta região é de 180 mm para os primeiros 1,5 metros de profundidade. Kurtz & Araujo (2000), que estudaram a região de Mata Atlântica do Rio de Janeiro, aplicou o método de balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955), considerou uma capacidade de armazenamento de água no solo de 125 mm.

Os valores referentes às características específicas da madeira precisaram ser extrapolados para um valor médio, estimado a partir de diversas espécies de árvores da floresta atlântica. Sabe-se que estes valores médios podem variar de região para região, mas para que a contabilização da Pegada Hídrica seja realizada serão necessárias as estimativas médias destes valores que nem sempre poderão representar os valores reais específicos de cada região.

Werneck et al (2001) quantificou a produção de madeira produzida em uma Floresta Semidecidual do Estado de Minas Gerais em trechos florestados com diferentes graus de perturbação. Neste estudo, a maior produção de madeira foi observada no trecho de menor grau de perturbação, no qual não se registrou retirada de madeira nos últimos 30 anos. Neste trecho o volume de madeira foi de 11,5 m³, associado a maior densidade de indivíduos arbóreos.

Outro estudo desenvolvido em Minas Gerais, em regiões de fragmentos florestais conservados de vegetação primária. Neste trecho, a autora encontrou uma floresta com área basal de aproximadamente 33,4 m².ha⁻¹ e volume de fuste de cerca de 236 m³.ha⁻¹ (RIBEIRO, 2007).

Ribeiro et al (2009) visaram quantificar a biomassa de fuste sem casca de uma floresta nativa madura, com histórico de pelo menos 100 anos sem perturbação, no Município de Viçosa, MG. Neste estudo, assim como Ribeiro (2007), encontrou-se um valor médio de volume de fuste de 236 m³.ha⁻¹, com valor mínimo de 153 m³/ha e máximo de 480 m³.ha⁻¹. A área basal média encontrada foi de 33 m².ha⁻¹, com mínima de 23 e máxima de 40 m².ha⁻¹.

Schettino (1999) analisou os efeitos do corte de cipós sobre a dinâmica de sucessão, crescimento e produção de uma Floresta Ombrófila Densa secundária, no Estado do Espírito

Santo (ES), visando identificar uma forma de obter um rápido retorno da floresta às suas condições primárias ou, no mínimo, diminuir o intervalo de tempo entre dois ciclos de corte sucessivos. Os valores que o autor obteve em um monitoramento iniciado em 1989 até 1997, indicou um aumento volumétrico ao longo do tempo, no início do monitoramento foi encontrado um total de $195 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e de 216 ao final.

Alves et al (2005) realizou um estudo sobre sucessão florestal em uma região de Ombrófila Densa Submontana da Mata Atlântica, no Município de Angra dos Reis, litoral sul do Rio de Janeiro. O autor indicou períodos de recuperação natural da floresta, após perturbação provocada por práticas de cultivos rotativos de subsistência em comunidades caiçaras. Este estudo apontou que nos primeiros 5 anos de início da recuperação natural da floresta, ocorre predominância de espécies pioneiras e poucas espécies secundárias iniciais. Ao atingir a faixa de 25 anos, ocorre predominância de espécies secundárias tardias e o aparecimento das primeiras espécies climáticas. Com 50 anos, a floresta modifica sua estrutura, apresentando predominância de secundárias iniciais e aumento da proporção de espécies climáticas.

May & Trovatto (2008) apontam que a Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006), determina um tempo de descanso de até 10 anos para práticas de pousio como suficiente para recuperação da floresta, destinado a comunidades tradicionais e pequenos produtores agrícolas.

Ribeiro (2007) realizou um levantamento em um trecho não perturbado de floresta nativa e identificou uma densidade básica ponderada de $0,7 \text{ t.m}^{-3}$ e massa total do fuste sem casca de 167 t.ha^{-1} , ao excluir a espécie de menor densidade ($0,17 \text{ t.ha}^{-1}$). Ribeiro et al (2009) apontam os mesmos valores.

Ferrez (2010) visando determinar o sequestro de carbono em sistemas de recuperação florestal de Mata Atlântica indicou a densidade média da madeira de 590 kg/m^3 para 67 espécies. Optou-se por utilizar a densidade básica ponderada de $0,7 \text{ t.ha}^{-1}$ por se tratar de um trecho florestal com menor perturbação.

Não foram encontrados até o momento de realização desta pesquisa, relatos de estudos de teor de umidade média da madeira de florestas naturais (incluindo a diversidade de espécies), por essa razão optou-se por utilizar o valor referenciado por Brito & Barrichelo (1979). Os autores apontam que, em geral, a madeira recém cortada apresenta umidade média de 45 a 50%.

6.2.3. Características da pastagem na região

A cobertura de pastagem utilizada na atividade de pecuária extensiva cobre cerca de 57,6% da área da bacia (COPPETEC, 2006). De acordo com Delgado-Rojas et al (2004), que considerou uma profundidade radicular de aproximadamente 38 cm para a espécie de capim Tanzânia o valor de capacidade de água disponível é de 60 mm.

Outro estudo, realizado por Andrade (2003) aponta uma CAD de 50 mm para o capim Marandu, uma das espécies de *Brachiaria* sp⁵⁰. Scopel et al (2009) aponta que na área central do país, predomina os tipos de solos arenosos, onde a CAD observada é de aproximadamente 68mm, a uma profundidade de 2 m para gramíneas e pastagens em geral.

Santos et al (2010) analisa o plantio de pasto do capim Marandu no estado de São Paulo e aponta que em solos classificados como Latossolos vermelhos e vermelhos-amarelos, com teores de argila entre 15 a 35%, a capacidade de armazenamento do solo é de 40 mm. Já em solos podzólicos vermelho amarelos e vermelho escuros, cambissolos roxos e latossolos roxos e vermelho escuros com mais de 35% de argila, o armazenamento de água é de 60 mm. Cabe lembrar que a região estudada apresenta uma mescla de alguns destes tipos de solos, tais como Latossolos Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo (COPPETEC, 2002).

Não foi realizado o levantamento de dados acerca da produtividade de pasto para a atividade pecuária da bacia, pois o objetivo deste trabalho se restringe apenas à comparação do consumo de água verde (água da chuva) por área ocupada pelas coberturas.

6.3. Métodos de quantificação do uso de água e impactos hidrológicos

Para atender ao objetivo proposto nesta pesquisa, foram aplicados métodos de avaliação do uso da água utilizados pelo setor econômico de papel e celulose, complementados pelos métodos de balanço hídrico geral (a partir da classificação de água pela Pegada Hídrica) e pela abordagem de serviços ecossistêmicos.

⁵⁰ Andrade (2003) faz uma revisão bibliográfica e aponta que o gênero *Brachiaria* compõe a maior proporção de pastagens cultivadas no Brasil.

Para compreender os impactos da alteração de cobertura vegetal decorrente da expansão da silvicultura de eucalipto no trecho paulista da BHPS, foram avaliados os usos da água pelas coberturas vegetais predominantes da bacia. Isto porque, as coberturas arbóreas (silvicultura de eucalipto e floresta nativa) representam apenas 22,7% da cobertura total do trecho paulista da bacia (COPPETEC, 2006; ARGUELLO et al, 2010), sendo predominante a cobertura de pastagens, que representa sozinha 57,6% do total do trecho analisado (COPPETEC, 2006).

A avaliação da PH da madeira produzida foi aplicada para as coberturas arbóreas (silvicultura e floresta nativa). Já, os métodos de balanço hídrico climatológico, balanço hídrico da bacia hidrográfica - utilizando os conceitos de classificação de água da PH - e valoração econômica do serviço hidrológico de retenção da lixiviação de nutrientes do solo consideraram as coberturas vegetais predominantes da bacia hidrográfica (pastagens, floresta nativa e eucalipto).

6.3.1. Método aplicado para balanço hídrico

Foi realizado um levantamento de estudos de balanço hídrico de diversas coberturas vegetais realizados na BHPS que foi apresentado no Capítulo 3 desta pesquisa. Este levantamento integrará a análise dos resultados obtidos, uma vez que neste estudo aplicou-se apenas o método de Balanço Hídrico Climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) para as principais coberturas vegetais da bacia.

Para avaliação do Balanço Hídrico Climatológico foi aplicado a partir da utilização de planilhas elaboradas por Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999), ou programa "BHnorm". O balanço hídrico climatológico determina o regime hidrológico local sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Pode ser considerado como uma das maneiras de monitoramento da variação de armazenamento de água no solo (CAMARGO, 1971 apud SENTELHAS et al, 1999; SENTELHAS et al, 1999). Este método foi selecionado também por sua ampla aplicação para avaliação por diversos estudos realizados pelo setor estudado.

Segundo Sentelhas et al (1999), trata-se de uma das ferramentas mais utilizadas para a estimativa da do excedente e deficiência hídrica, da reposição e da retirada da água do solo e da quantidade de água armazenada no mesmo. Seu emprego implica na utilização de dados climatológicos de uma série histórica de um intervalo de 30 anos (normais climatológicas) e

adaptação dos dados de capacidade de água armazenada no solo (CAD), adequada à cobertura vegetal em análise. Com a utilização da média histórica de dados climatológicos espera-se evitar a escolha de dados atípicos do comportamento climático da região.

Foram utilizados dados das normais climatológicas referentes à temperatura média mensal do ar (TMED) e chuva total média mensal (P) pertencentes às redes do INMET, IAC, IAPAR, DAEE/SP e ESALQ/USP para o período de 1961-1990, que já estavam contidas no modelo de Sentelhas et al (1999), para todos os municípios que compõe a Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul pertencentes ao Estado de São Paulo que possuem cobertura por silviculturas de eucalipto, segundo Arguello (2010). Uma média de todos os municípios que possuem silvicultura de eucalipto foi utilizada para obter um dado geral da região.

O dado de CAD utilizado para a cobertura de eucalipto se baseou em valores observados em plantios da espécie *Eucalyptus grandis* entre 3 a 8 anos (ALMEIRA & SOARES, 2003; SOUZA et al, 2006). Para a floresta nativa, optou-se por utilizar valores encontrados para florestas de Mata Atlântica, considerando a diversidade de fitofisionomias segundo estudos de Fujieda et al (1997), que estuda a bacia experimental de Cunha, na Serra do Mar no Estado de São Paulo, e Kurtz & Araujo (2000), que estuda uma bacia localizada no Estado do Rio de Janeiro.

6.3.2. Pegada Hídrica da madeira de eucalipto e celulose

Para a contabilização da Pegada Hídrica total (PH_{total}) da silvicultura para a produção da madeira e extração da celulose foi calculada a Pegada Hídrica Cinza (PH_{cinza}) e a Pegada Hídrica Verde (PH_{verde}). O esquema ilustrativo do escopo de análise pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Esquema ilustrativo do escopo da contabilização da pegada hídrica deste trabalho (baseado em Hoekstra et al, 2011).

Foi necessário estabelecer um padrão de uma fábrica hipotética de celulose, localizada no Estado de São Paulo, na bacia do rio Paraíba do Sul, que produz o total de celulose do trecho paulista da bacia a partir do eucalipto cultivado na região⁵¹. A lixiviação dos fertilizantes aplicados no manejo agrícola, por sua vez é lixiviado para os corpos hídricos da região, que desaguam no principal rio da bacia, o Paraíba do Sul⁵².

Para a quantificação da produção anual de celulose da bacia, foram identificadas as indústrias associadas à BRACELPA, localizadas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul em seu trecho paulista, e agregadas suas produções anuais com base no Relatório Estatístico do setor de 2009 (BRACELPA, 2010). Com base nestes dados, estabeleceu-se uma produção desta fábrica hipotética⁵³ de 1.600 mil toneladas de celulose por ano.

A celulose é um produto obtido a partir da matéria prima fornecida pela atividade da silvicultura, que após tratamento é transformada por processos industriais. A Pegada Hídrica total contabilizada neste trabalho não contemplará as fases de produção industrial, comércio, consumidor e insumos produtivos, uma vez que o objetivo desta pesquisa não foi avaliar a PH do setor de produção de celulose e papel. O objetivo deste trabalho visa focar apenas a fase produtiva diretamente envolvida no processo produtivo silvícola da celulose e sua relação com o consumo de água em concorrência com a floresta nativa da bacia, bem como determinar o impacto hidrológico desta atividade na região.

⁵¹ A determinação de uma fábrica de celulose hipotética se faz necessária para utilização de dados de produção de celulose e dados locais para cálculo das PHs verde e cinza.

⁵² A definição do corpo hídrico para onde escoar a lixiviação de nutrientes é requisito para o modelo da contabilização da Pegada Hídrica cinza da fase de silvicultura segundo Hoekstra et al (2011).

⁵³ Dados de produção anual de celulose são necessários ao cálculo de PH_{cinza} em volume de água por tonelada produzida.

Tendo em vista o exposto acima, a contabilização da PH_{total} , com base em Hoekstra et al (2011), será obtida a partir da equação:

$$PH_{total} = (PH_{silvicultura, verde} + PH_{silvicultura, cinza}) \quad (25)$$

A Pegada Hídrica verde da Silvicultura poderá ser obtida a partir do método apresentado por Van Oel e Hoekstra (2010), que calcularam a pegada hídrica do papel, como já apresentado anteriormente. A equação para a obtenção da PH_{verde} da silvicultura pode ser observada a seguir:

$$PH_{silvicultura, verde} = \left(\frac{ET + (Y_{madeira} \times f_{água})}{Y_{madeira}} \right) \times f_{celulose} \times f_{utilização} \quad (26)$$

Sendo,

ET = Evapotranspiração ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

$Y_{madeira}$ = Volume de madeira produzido anualmente em uma área ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$)

$f_{água}$ = Fração volumétrica de água incorporada na madeira ($m^{-3} \cdot m^{-3}$)

$f_{celulose}$ = Volume necessário de madeira para a produção de celulose ($m^3 \cdot t^{-1}$)

$f_{utilização}$ = Fator de conversão da madeira em celulose (varia de 0 a 1)

Assumindo que o dado de produção de madeira utilizado no modelo para contabilização da PH_{verde} é destinado somente à produção de celulose, o “ $f_{utilização}$ ” adotado foi igual a “1”, indicando que 100% da madeira é utilizada na produção de celulose. Não se considerou que fração da madeira de eucalipto produzido no trecho da bacia estudado é destinado para outras finalidades.

O valor de ET foi obtido a partir da aplicação das planilhas elaboradas por Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) que empregam o método de balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955). As planilhas de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) utilizam dados das normais climatológicas (série de dados de aproximadamente 30 anos) de temperatura média mensal do ar (T) e precipitação total média mensal (P) pertencentes às redes do INMET, IAC, IAPAR, DAEE/SP e ESALQ/USP para o período de 1961-1990.

Foram considerados todos os municípios paulistas inseridos na delimitação da bacia que possuem plantações de eucalipto segundo estudos de Viana et al (2009) e Arguello et al (2010). Todos os municípios foram considerados pelo fato da PH estimar apenas um valor médio resultante. Para obter o balanço hídrico da cobertura vegetal de silvicultura de eucalipto, adotou-se a CAD de 200 mm (ALMEIRA & SOARES, 2003; SOUZA et al, 2006).

A seguir, os dados de temperatura média (T) e precipitação total anual média (P) empregados para a alimentação das planilhas de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) podem ser observados na Tabela 7.3.1.

Tabela 6.3.2.1 – Dados climáticos (Temperatura e Precipitação total) – normais climatológicas (1961-1990)

Meses	T (°C)	P (mm)
Jan	23,9	239,8
Fev	24,0	220,9
Mar	23,4	181,4
Abr	21,1	75,7
Mai	18,8	50,1
Jun	17,4	41,7
Jul	17,2	30,5
Ago	18,8	40,3
Set	20,3	61,8
Out	21,5	133,8
Nov	22,3	147,2
Dez	23,1	210,2

Fonte: Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999).

Dados específicos da madeira produzida a partir da silvicultura de eucalipto foram obtidos através de levantamento bibliográfico de estudos realizados por diversos autores, tais como Sturion et al (1987), Neto (2002), Fagundes (2003), Haseleic et al (2004), Foelkel (2005), Bassa et al (2007), Queiroz & Barichello (2008), ABRAF (2009), Viana et al (2009), ABRAF (2010), Guedes (2010), BRACELPA (2011b).

Com base nas referencias citadas, foi possível estimar que o “ $f_{\text{água}}$ ” (fração volumétrica de água incorporada na madeira), para a contabilização da Pegada Hídrica verde, será de $0,995 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Já a pegada hídrica cinza da silvicultura de eucalipto foi ser obtida a partir do método definido em Hoekstra et al (2011). Desta forma, a PH cinza da Silvicultura será obtida a partir da aplicação da seguinte equação:

$$PH_{\text{silvicultura, cinza}} = \frac{\left(\frac{AR \times \alpha}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \right)}{Y} \quad (27)$$

Sendo,

AR = quantidade do componente químico aplicado no solo (kg.ha^{-1})

α = percentagem de lixiviação do componente químico aplicado

C_{max} = concentração máxima do poluente permitida no corpo hídrico receptor (kg.m^{-3})

C_{nat} = concentração natural do poluente no corpo hídrico receptor sem interferência humana (kg.m^{-3})

Y = produção (t.ha^{-1})

Para a contabilização da PH_{cinza} foi considerada apenas a aplicação de fertilizantes nitrogenados para silvicultura de eucalipto, segundo indicação de Gonçalves (2005) de 40 kg.ha^{-1} , de acordo com o teor de matéria orgânica mediano do solo da região (APTA, 2012), e a porcentagem de lixiviação de 10% da quantidade aplicada, como indicado por Chapagain et al (2006a).

Foram adotados os parâmetros referentes à poluição da calha do rio Paraíba do Sul. O dado de “concentração natural” empregado refere ao ponto localizado imediatamente a jusante do reservatório de Santa Branca. Adotou-se o ponto “PARB 02050” da rede de monitoramento da qualidade da água superficial da CETESB.

Foram agregadas as concentrações obtidas para os poluentes nitrogenados (nitrato, nitrito e N-amoniaco) de forma a estimar a concentração natural do nitrogênio do corpo hídrico do ano de 2009 (CETESB, 2010). O mesmo processo de agregação foi feito para os limites estabelecidos pela Resolução Conama 357 de 2005 (BRASIL, 2005), que determina os limites máximos dos poluentes nos corpos hídricos, adotando-se a Classe II para águas doces como referência.

6.3.3. “Pegada Hídrica” da madeira de florestas nativas

O mesmo método de contabilização da Pegada Hídrica verde foi aplicado para analisar o uso da água na produção de madeira na floresta nativa. Neste sentido, apesar de não ser realizada uma contabilização de PH, com a aplicação do conceito original⁵⁴, foi realizada a contabilização do uso da água através da aplicação da equação para o cálculo da pegada hídrica verde apresentada por Van Oel e Hoekstra (2010).

Foi necessária a adaptação da fórmula para o caso de florestas naturais. Tendo em vista que a madeira nativa não é utilizada para a produção de celulose (ou qualquer outro uso direto), foi desconsiderado o fator de quantidade de madeira necessária para a produção de celulose (f_{celulose}), bem como o fator de conversão ($f_{\text{utilização}}$).

Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos a partir da aplicação do método para as duas coberturas florestais foi necessária a consideração da densidade média da madeira da floresta nativa, para realizar uma correção da unidade do resultado ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$). Neste caso, a equação aplicada foi:

$$PH_{\text{floresta nativa, verde}} = \frac{\left(\frac{ET + (Y_{\text{madeira}} \times f_{\text{água}})}{Y_{\text{madeira}}} \right)}{D_{\text{madeira}}} \quad (28)$$

Sendo,

ET = Evapotranspiração ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)

Y_{madeira} = Volume de madeira ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)

$f_{\text{água}}$ = Porcentagem de água contida na madeira

D_{madeira} = Densidade da madeira ($\text{ton} \cdot \text{m}^{-3}$)

Cabe ressaltar, que o resultado obtido com a aplicação da Equação 28, se considerada a produção de madeira, estará apontando a quantidade de água envolvida no processo natural da floresta, porém apenas volume de água acumulada na madeira estará sendo contabilizada. Neste caso, a quantificação do volume de água anual necessário apontará um resultado

⁵⁴ Tendo em vista que o conceito foi criado para contabilização do volume de água requerido direta e indiretamente para a produção de bens e serviços econômicos (HOEKSTRA & CHAPPAGAIN, 2007).

subestimado, tendo em vista que também ocorre acúmulo de água em outras partes do vegetal (em menores proporções).

O valor de ET utilizado foi obtido a partir da aplicação do mesmo método empregado para o caso da silvicultura de eucalipto, através do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955), com o uso das planilhas elaboradas por Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999), bem como a mesma base de dados de temperatura média mensal do ar (T) e precipitação total média mensal (P) pertencentes às redes do INMET, IAC, IAPAR, DAEE/SP e ESALQ/USP para o período de 1961-1990.

Os dados relativos às características específicas da floresta para alimentar a equação foram obtidas a partir da revisão da literatura (BRITO & BARRICHELO, 1979; FUJIEDA ET AL, 1997; SCHETTINO, 1999; KURTZ & ARAUJO, 2000; WERNECK ET AL, 2001; ALVES ET AL, 2005; RIBEIRO, 2007; MAY & TROVATTO, 2008; RIBEIRO ET AL, 2009; FERREZ, 2010).

A seguir foi realizada a comparação dos resultados obtidos em relação ao balanço hídrico climatológico (ROLIM et al, 1998; SENTELHAS et al , 1999), ao consumo de água por cada unidade de massa ou volume de madeira produzido por cada cobertura vegetal (PH) e em relação aos consumos de água em volume por área ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

6.3.4. Balanço Hídrico geral – Disponibilidade e demandas de água verde e azul da bacia

A partir de dados empregados para a avaliação do balanço hídrico climatológico das coberturas vegetais do trecho estudado da bacia hidrográfica e da classificação por tipos de água da PH, foi estimado o balanço hídrico geral da bacia. Para isso foi realizada a avaliação da água verde demandada por estas coberturas, bem como a disponibilidade deste tipo de água na região.

Adicionalmente à avaliação da disponibilidade da água verde na bacia hidrográfica, foi avaliada também a relação entre a água verde e água azul⁵⁵, uma vez que a água verde não consumida escoa sub e superficialmente (TUCCI & CLARKE, 1997; TUCCI, 2002), tornando-se azul. Desta forma, foi possível avaliar se existe impacto na disponibilidade hídrica para outros usuários do recurso.

⁵⁵ De acordo com a classificação de tipos de água sugeridas por Hoekstra et al (2011) em azul, verde e cinza.

Segundo Hoekstra et al (2011), o volume de água proveniente da chuva utilizado pela vegetação pode ser indicado através da aplicação do método de contabilização da Evapotranspiração do ambiente (ET_{amb}). Este método, segundo Hoekstra et al (2011) foi desenvolvido para determinar o volume de água verde requerido pelas áreas naturais que necessitam ser preservadas dentro de uma bacia hidrográfica.

No caso desta pesquisa, tendo em vista a incerteza das áreas mínimas a serem preservadas de forma a garantir o fluxo de serviços ecossistêmicos, sem risco de perdas irreversíveis, optou-se por aplicar este método para analisar somente a demanda de água verde por parte das coberturas vegetais (floresta nativa, pastagens e silvicultura de eucalipto) atualmente existentes na bacia e, a partir desta análise, identificar se os usos estão sendo atendidos pela disponibilidade.

Desta forma, o método apresentado por Hoekstra et al (2011) será adaptado para a determinação dos usos de água verde, não apenas da cobertura natural, como também das coberturas plantadas. Para sua aplicação é necessário determinar a taxa de evapotranspiração da cobertura vegetal a ser analisada, considerando sua proporção de área em relação ao restante da bacia, como pode ser observado na Equação 29. O resultado aponta o volume ou vazão de água que está associado à cobertura da área em análise, enquanto a soma destes resultados (obtido para cada cobertura analisada) indica o consumo “total”⁵⁶ das coberturas vegetais da bacia hidrográfica.

$$ET_{amb} = (P \cdot A_{total} \cdot ET) \cdot 1000 \quad (29)$$

Sendo,

P – Proporção da área de vegetação em relação à área total

A_{total} – Área total da bacia ou limite geográfico da análise (km^2)

ET – Evapotranspiração da vegetação da área de estudo ($mm \cdot ano^{-1}$)

Para esta análise, serão utilizados os valores estimados de ET a partir do emprego das planilhas de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) e de dados oficiais de porcentagens das coberturas vegetais (COPPETEC, 2006; ARGUELLO et al, 2010).

Com a aplicação do método apresentado, foram obtidos volumes de água requeridos por ambas as coberturas vegetais em $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$. Estes resultados possibilitaram a análise da utilização da água verde pelas coberturas de silvicultura de eucalipto, cobertura vegetal

⁵⁶ Considerando apenas as coberturas delimitadas pelo escopo desta pesquisa.

natural e pastagens. Para isso, foi necessária ainda a contabilização da disponibilidade hídrica verde total, obtida a partir da multiplicação da precipitação média mensal e anual (de uma série de aproximadamente 30 anos ou normal climatológica) pela área total da bacia.

A demanda de água azul, por sua vez, foi determinada a partir do levantamento bibliográfico acerca dos principais usuários da bacia e da estimativa de consumo destes para o ano de 2010, relativo apenas ao trecho paulista da bacia (VALLENGE, 2011). É importante ressaltar que foram considerados nesta análise apenas dados oficiais de demanda de água levantados pelas fontes consultadas. Com isso, é esperado que o valor da vazão de água realmente demandada na bacia esteja subestimado, pois deixa de considerar outros usos de menor proporção e usos informais.

Ainda que se desconsidere os usos informais da água na bacia, não se pôde deixar de considerar que ocorram perdas da água azul pelo processo de evaporação. Em relação a este dado, foram levantados trabalhos que realizam a quantificação da evaporação que ocorre na bacia (THOMAS & GOMES, 2005; REIS et al, 2006; AGEVAP, 2011). Para a estimativa da evaporação total do trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, optou-se por empregar o mesmo método utilizado em Diniz et al (2010) que utiliza o dado de evaporação total em mm e extrapola para a superfície de água que se deseja considerar. Desta forma, optou-se por utilizar os dados de Evaporação Total, estimado a partir do método de Piché, disponibilizados pelo INMET (sd) e extrapolar para toda a área de água⁵⁷ do trecho analisado determinado pelo Relatório do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul (COPPETEC, 2007).

6.3.5. Valoração econômica dos serviços ecossistêmicos e ambientais prestados pelas coberturas vegetais da bacia

A título de comparação entre os serviços ecossistêmicos e ambientais fornecidos pelas coberturas vegetais da bacia realizou-se um exercício de valoração econômica. O serviço avaliado nesta análise econômica foi o de retenção de lixiviação de nutrientes no solo. Foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de se levantar os valores já produzidos para os

⁵⁷ A determinação da área de água da bacia pela COPPETEC (2007) considera todos os corpos d'água registrados nas bases cartográficas ou detectáveis nas imagens de satélite, inclusive lagos naturais ou artificiais e planícies de inundação natural do leito dos rios.

serviços gerados pelas três coberturas vegetais analisadas (floresta nativa de Mata Atlântica, silvicultura de eucalipto e pastagem).

Para a valoração do serviço ecossistêmico e ambiental de retenção de lixiviação de nutrientes do solo foram utilizados dados gerados em outras pesquisas que empregaram o método do custo de reposição através da aplicação do método de transferência⁵⁸ (DESVOUSGES et al, 1998; NAVRUD & BERGLAND, 2001). Este método considerou os custos incorridos na recuperação da qualidade do solo em função da perda de nutrientes provocados pelos processos erosivos calculados pelos estudos levantados. Através do método de transferência simples de unidade de valor, determinaram-se os valores para os custos associados aos processos erosivos e perda de nutrientes das coberturas vegetais deste estudo.

6.3.6. Integração dos métodos

Na discussão dos resultados, buscou-se realizar uma integração dos resultados obtidos por cada método apresentado a fim de proporcionar melhor compreensão do impacto da silvicultura de eucalipto sobre a ordem hidrológica na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

Na Figura 17 a organização para a integração dos resultados obtidos pode ser observada. Na discussão dos resultados, buscou-se, a partir da visão ecossistêmica integrar os resultados obtidos, analisando também algumas limitações de cada método.

Figura 17 – Integração dos resultados obtidos pelos diferentes métodos

⁵⁸ O método empregado atende as necessidades deste trabalho tendo em vista o objetivo comparativo entre os benefícios econômicos relacionados às coberturas vegetais consideradas na análise. Sabe-se que as taxas de solo e nutrientes perdidos pelos processos erosivos podem ser alteradas em função de características específicas locais, no entanto, esta comparação não exige acurácia do valor econômico adotado.

CAPÍTULO 7 – INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA POR COBERTURAS VEGETAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos anteriormente. Primeiramente são abordados os resultados obtidos para balanço hídrico e pegada hídrica da silvicultura de eucalipto, seguidos pelos resultados da floresta nativa. A seguir são apresentados os resultados referentes ao balanço hídrico da pastagem, para permitir a comparação do uso de água verde pelas três coberturas vegetais e a disponibilidade de água azul para os demais usuários da bacia. São ainda apresentadas e discutidas algumas limitações do método identificadas nesta pesquisa. Posteriormente são abordados os SEs fornecidos pela cobertura natural, bem como os possíveis impactos da atividade de silvicultura sobre a qualidade dos SEs. Por fim, a título de comparação são apresentados os resultados obtidos a partir da valoração econômica ambiental dos SEs e SAs fornecidos pelas coberturas vegetais analisadas do trecho paulista da BHPS. Esta valoração foi realizada para finalizar a análise e avaliação dos impactos das coberturas vegetais sobre a disponibilidade quali e quantitativa da bacia hidrográfica.

7.1. Silvicultura de Eucalipto na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o caso do eucalipto cultivado na BHPS. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos para o balanço hídrico climatológico, seguido pelos resultados obtidos pela aplicação do método de PH. Como apresentado anteriormente, para permitir a quantificação da PH das monoculturas de eucalipto para a produção de celulose da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul foi necessária a contabilização de suas componentes verde e cinza.

7.1.1. Balanço Hídrico da silvicultura de eucalipto no trecho paulista da BHPS

Como pode ser visto na tabela a seguir (Tabela 7.1.1.1), foram estimados os componentes de evapotranspiração potencial (ETP), armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF) e Excedente Hídrico (EXC).

Tabela 7.1.1.1 – Balanço Hídrico da Bacia do rio Paraíba do Sul, com cobertura de monocultura de eucalipto – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC).

Meses	ETP (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	118,86	200,00	0,00	118,9	0,0	120,9
Fev	109,85	200,00	0,00	109,9	0,0	111,1
Mar	109,65	200,00	0,00	109,7	0,0	71,7
Abr	79,02	196,70	-3,30	79,0	0,0	0,0
Mai	58,43	188,66	-8,04	58,1	0,3	0,0
Jun	45,38	185,21	-3,45	45,1	0,2	0,0
Jul	45,39	171,89	-13,32	43,8	1,6	0,0
Ago	57,81	157,46	-14,43	54,7	3,1	0,0
Set	70,33	150,86	-6,60	68,4	2,0	0,0
Out	87,99	196,71	45,85	88,0	0,0	0,0
Nov	98,13	200,00	3,29	98,1	0,0	45,7
Dez	112,97	200,00	0,00	113,0	0,0	97,3
Total	993,82	2247	0,00	986,6	7,3	446,7
Média	82,82	187,3		82,2	0,6	37,2

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do modelo Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) referentes ao período de 1961 – 1990.

Nos resultados apresentados na Tabela 7.1.1.1 e Gráficos 1 e 2 é possível verificar que a precipitação total anual média (P) foi de 1.433,3 mm, a evapotranspiração potencial (ETP) obtida para a região foi de 993,8 mm.ano⁻¹, o excedente hídrico (EXC) produzido por esta cobertura foi de 446,7 mm.ano⁻¹, o déficit hídrico (DEF) foi de 7,3 mm.ano⁻¹ e a evapotranspiração real (ETR) foi de 986,6 mm.ano⁻¹. Nos gráficos a seguir, Gráfico 1 e 2, é possível observar o período de menor disponibilidade hídrica.

Gráfico 1: Balanço Hídrico da cobertura de eucalipto

Gráfico 2: Balanço Hídrico da cobertura de eucalipto por componente (Déficit Hídrico, Excedente Hídrico, Retirada de Água do Solo e Reposição de Água no Solo)

Pode-se notar ainda que ocorre retirada da água do solo pelo eucalipto entre os meses de abril, julho e agosto. Em agosto ocorre de forma mais acentuada o déficit hídrico. Entre os meses de novembro e março, ocorre a reposição da água do solo, pois a precipitação supera o consumo de água das árvores, permitindo que a água seja armazenada.

7.1.2. Contabilização da Pegada Hídrica da madeira de eucalipto no trecho paulista da BHPS

Para a contabilização da PH da silvicultura de eucalipto, como apresentado no Capítulo 7, que aborda os métodos de quantificação do uso da água, foi aplicada a adaptação do método de van Oel & Hoekstra (2010) e para a PH_{cinza} a adaptação do método indicado por Hoekstra et al (2011). Para o emprego dos métodos citados, foi necessária a adoção de dados médios locais referentes às características da produção de madeira, indicadas no Capítulo 6, que tratou da caracterização da área de estudo.

Com base nos dados de densidade da madeira de eucalipto apontados por diversos estudos (considerando as principais espécies cultivadas na região), optou-se por utilizar um valor intermediário de $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ (NETO, 2002), entre o menor e maior valor, daqueles citados pelos autores (STURION et al, 1987; NETO, 2002; BASSA et al, 2007; QUEIROZ &

BARICHELO, 2008; GUEDES, 2010). Este dado é requerido para a conversão da unidade do valor de PH_{verde} da madeira para volume de água por massa de madeira ($m^3.t^{-1}$).

A variável “ET”, referente à evapotranspiração real da cobertura vegetal, foi de $986,6 mm.ano^{-1}$, obtida a partir da estimativa do balanço hídrico climatológico (ROLIM et al, 1998; SENTELHAS et al, 1999) apresentado anteriormente. Para sua inserção na equação foi necessária a sua multiplicação por um fator de conversão (10), para que o valor adotado seja $9.866 m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$.

Em relação à produtividade da madeira (ou curva volumétrica), sendo a variável denominada “ $Y_{madeira}$ ” na equação, foi adotado o valor de $46 m^3.ha^{-1}.ano^{-1}$, referente aos anos de 2010 e 2011, no Estado de São Paulo (BRACELPA, 2011b).

Dadas as características específicas da madeira produzida na região, o “ $f_{celulose}$ ”, para a contabilização da Pegada Hídrica verde, ou seja, o consumo específico de madeira é de $3,35 m^3.tsa^{-1}$ (QUEIROZ & BARICHELO, 2008).

Já a umidade da madeira, referente à variável “ $f_{água}$ ”, considerada foi de 99,51% (HASELEIC et al, 2004), por se tratar de um valor médio de uma árvore de eucalipto da espécie *Eucalyptus grandis*⁵⁹.

A umidade de 99,51% pode ser convertida para $0,995 m^3$ de água para cada m^3 de madeira. Como já citado anteriormente, assume-se que toda a madeira considerada nesta análise destina-se à produção de celulose da região. Desta forma, o valor adotado para a variável “ $f_{utilização}$ ” será igual a “1”, indicando que 100% de utilização da para a produção de celulose.

A produção de celulose considerada para este cálculo refere-se à produção agregada das indústrias localizadas na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul referente ao ano de 2009⁶⁰ (BRACELPA, 2010). Desta forma, a produção de celulose considerada foi de $1.600 t.ano^{-1}$ de celulose.

A partir destas definições, os resultados obtidos para a PH_{verde} da silvicultura de eucalipto da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul podem ser observados nas Tabelas 7.1.2.1 e 7.1.2.2.

⁵⁹ *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* são as espécies mais exploradas no Brasil (ABRAF, 2009).

⁶⁰ A produção de 2009 foi adotada em função de se tratar do dado mais atual desagregado por indústria, permitindo a seleção apenas da produção do trecho paulista da bacia, divulgado em fontes oficiais do setor produtivo.

Tabela 7.1.2.1 – Contabilização da PH_{verde} da silvicultura de eucalipto da BHPS em relação à produtividade de celulose.

ETR (m ³ /ha/ano)	Produção de madeira (m ³ /ha/ano)	$f_{água}$ (m ³ /m ³)	$f_{celulose}$ (m ³ /tsa)	f_{valor}	PH_{verde} (m ³ /tsa)
9.866	46	0,995	3,35	1	722

Com base nos resultados indicados acima, os resultados com a aplicação do modelo de contabilização da pegada hídrica verde da silvicultura para produção de celulose foi de 722 metros cúbicos de água para cada tonelada de celulose produzida.

A seguir foi contabilizada também a PH_{verde} da madeira de eucalipto produzida para atender a esta produção de celulose adotada para a região. Na Tabela 7.1.2.2, é possível observar que para cada metro cúbico de madeira de eucalipto produzida, são alocados 215 m³ de água verde. Como já citado, este volume de água é perdido para a atmosfera através do processo de evapotranspiração vegetal e acumulado na madeira (“água contida”). Desta forma, a água deixa de se tornar água azul e não se torna disponível para usos diversos na bacia hidrográfica.

Tabela 7.1.2.2 – Contabilização da PH_{verde} da silvicultura de eucalipto da BHPS em relação à produtividade da madeira.

$PH_{verde, silvicultura}$ (m ³ /m ³)	$PH_{verde, silvicultura}$ (m ³ /t/ano)	Água Verde por área (m ³ /hectare/ano)
215	392	9.912

A contabilização da Pegada Hídrica cinza da silvicultura de eucalipto foi baseado no método apresentado em Hoekstra et al (2011), que utiliza dados de aplicação de fertilizantes nitrogenados minerais e considera a porcentagem de lixiviação (10%), como definido em Chapagain et al (2006a). Seus valores podem ser conferidos na Tabela 7.1.2.3.

De acordo com Gonçalves (2005) e com as características da região, que possui um teor mediano de matéria orgânica no solo (APTA, 2012), a quantidade de fertilizante nitrogenado mineral indicada à aplicação é de 40 kg.ha⁻¹.

Tabela 7.1.2.3– Contabilização da PH_{cinza} da produção de madeira produzida pela silvicultura de eucalipto da BHPS.

$PH_{cinza, silvicultura}$ (m ³ /m ³)	$PH_{cinza, silvicultura}$ (m ³ /t/ano)	$PH_{cinza, celulose}$ (m ³ /tsa)	Água Cinza por área (m ³ /hectare/ano)
6	11	20	275,6

Com base nos resultados obtidos para cada um dos componentes da PH total, o valor final obtido foi de 742 metros cúbicos de água para cada tonelada de celulose produzida, 221

metros cúbicos de água a cada metro cúbico de madeira produzido. Somente o volume de água cinza por hectare, por ano, alocado para a produção da madeira foi de 275,6 m³. Anualmente, entre água perdida por evapotranspiração, acumulada na madeira e água necessária a diluição de poluentes de N que chegam aos corpos hídricos, aloca-se direta e indiretamente aproximadamente 10 mil metros cúbicos de água a cada hectare de eucalipto cultivado, como pode ser observado na Tabela 7.1.2.4.

Tabela 7.1.2.4 – Contabilização da PH_{total} da silvicultura de eucalipto da BHPS.

PH _{total} , silvicultura (m ³ /m ³)	PH _{total} , silvicultura (m ³ /ton/ano)	PH _{total} , celulose (m ³ /t _{sa})	Total de água por área (m ³ /hectare/ano)
221	402	742	10.188

Estes valores, isolados de uma análise contextualizada não parecem fornecer maiores informações acerca do impacto da atividade de silvicultura. Por essa razão, a seguir será apresentada a contabilização da PH da floresta nativa da região, balanço hídrico da atividade de pastagem e, por fim, a análise contextualizada da disponibilidade hídrica da região e das demandas por alguns usuários do recurso na bacia. A título de comparação da qualidade dos serviços ecossistêmicos e ambientais prestados pela cobertura, será ainda apresentado o resultado obtido do exercício de valoração realizado para a qualificação do serviço hidrológico de retenção de lixiviação de nutrientes provido.

Cabe, no entanto alguns apontamentos quanto à possibilidade de melhorias e redução no uso da água. Com base nos trabalhos revisados (ALDAYA & LLAMAS, 2008; ALDAYA et al, 2010; HOEKSTRA et al, 2011), o uso da água cinza pode implicar em maior impacto sobre o recurso hídrico. Isto ocorre uma vez que o uso (indireto) deste tipo de água afeta qualitativamente a disponibilidade hídrica da bacia. Neste sentido, o uso da água verde pode ser reduzido porém este é um aspecto bastante relacionado com o clima regional, no entanto o foco de ação deve ser a redução da poluição gerada pela atividade econômica em análise.

Cabem apontar também que o tipo de cobertura do solo exerce uma influência na alteração do uso da água verde, que deve ser similar ao da cobertura vegetal nativa, para evitar que ocorra uma alteração do ciclo hidrológico da bacia, através da redução da evapotranspiração, implicando em impactos nos volumes de água escoados por deflúvio.

O valor obtido para a evapotranspiração de eucalipto em biomas subtropicais por van Oel & Hoekstra (2010; 2012) no Brasil foi de 965 mm.ano⁻¹ e em relação ao volume de água e volume de madeira foi encontrada uma alocação de 214 m³.m⁻³, na mesma faixa que os valores encontrados para a PH_{verde} deste estudo. Cabe ressaltar, no entanto, que os estudos

(op. cit.) não realizam a avaliação da PH cinza⁶¹ e por razões já apresentadas não se realizou a comparação dos valores obtidos.

7.2. Floresta nativa (Mata Atlântica) da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul

Para permitir a análise integrada do uso da água pelas coberturas vegetais do trecho paulista da BHPS proposta por este trabalho, será apresentada a contabilização da PH verde das florestas naturais da região, bem como do balanço hídrico obtido a partir da aplicação do método de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999).

7.2.1. Balanço Hídrico da floresta nativa no trecho paulista da BHPS

Assim como realizado para a análise do balanço hídrico da silvicultura, os valores de normais climatológicas para temperatura média e precipitação total (ROLIM et al, 1998; SENTELHAS et al, 1999) foram utilizados para alimentar as planilhas do “BHnorm” e calcular o balanço hídrico climatológico das florestas naturais. Com isso, tornou-se possível a comparação do uso da água por ambas as coberturas e a avaliação do impacto da primeira.

A adaptação do método de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999), realizada para a área de remanescentes de vegetação nativa de Ombrófila Densa, deu-se a partir do emprego de um valor médio de 150 mm de CAD, levantado a partir de outros estudos (FUJIEDA et al, 1997; KURTZ & ARAUJO, 2000). Os resultados obtidos para o balanço hídrico climatológico da floresta nativa podem ser observados na Tabela 7.2.1.1.

⁶¹ A comparação de processos produtivos e locais distintos, entretanto, não seria adequada. Por essa razão optou-se pela comparação apenas dos estudos de van Oel & Hoekstra (2010; 2012) que consideram a região de clima subtropical brasileira. Os valores obtidos refletem tanto as tecnológicas empregadas como características locais das bacias nas quais estão inseridas.

Tabela 7.2.1.1 – Balanço Hídrico da Bacia do rio Paraíba do Sul, com cobertura de florestas nativas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC).

Meses	ETP (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	118,86	150,00	0,00	118,9	0,0	120,9
Fev	109,85	150,00	0,00	109,9	0,0	111,1
Mar	109,65	150,00	0,00	109,7	0,0	71,7
Abr	79,02	146,71	-3,29	79,0	0,0	0,0
Mai	58,43	138,77	-7,95	58,0	0,4	0,0
Jun	45,38	135,40	-3,37	45,1	0,3	0,0
Jul	45,39	122,57	-12,83	43,3	2,1	0,0
Ago	57,81	109,04	-13,53	53,8	4,0	0,0
Set	70,33	102,99	-6,05	67,8	2,5	0,0
Out	87,99	148,85	45,85	88,0	0,0	0,0
Nov	98,13	150,00	1,15	98,1	0,0	47,9
Dez	112,97	150,00	0,00	113,0	0,0	97,3
Total	993,82	1654	0,00	984,4	9,4	448,9
Média	82,82	137,9		82,0	0,8	37,4

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do modelo Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) referentes ao período de 1961 – 1990.

Tanto na Tabela 7.2.1.1 como nos Gráficos 3 e 4, pode-se verificar que ocorre retirada da água do solo de forma mais intensa, caracterizando o déficit hídrico (DEF), nos meses de julho e agosto. A partir de outubro, ocorre a reposição da água retirada do solo, pois a precipitação supera o consumo de água das árvores, permitindo que a água seja armazenada no solo, como se observou também para o caso da silvicultura.

Gráfico 3: Balanço Hídrico da cobertura florestal natural da bacia

Gráfico 4: Balanço Hídrico da cobertura florestal nativa da bacia por componente (Déficit Hídrico, Excedente Hídrico, Retirada de Água do Solo e Reposição de Água no Solo)

Pode-se perceber, no entanto, que houve um pequeno diferencial observado na Evapotranspiração total anual entre as duas coberturas. Enquanto a floresta nativa apresentou uma ETR de $984,4 \text{ mm.ano}^{-1}$, a monocultura de eucalipto apresentou um valor de $986,6 \text{ mm.ano}^{-1}$. O excedente hídrico (EXC) produzido pela cobertura de silvicultura foi de $446,7 \text{ mm.ano}^{-1}$, enquanto o da cobertura nativa foi de $448,9 \text{ mm.ano}^{-1}$. Esta diferença aponta que pode existir maior aporte de água pela cobertura vegetal nativa, ainda que o modelo não permita a diferenciação entre escoamento superficial e subsuperficial.

Já o déficit hídrico (DEF) do eucalipto de $7,3 \text{ mm.ano}^{-1}$, contra $9,4$ da vegetação nativa, indica que pode ocorrer maior demanda de água pela segunda nos meses entre julho e setembro.

7.2.2. Contabilização da “Pegada Hídrica” da madeira de floresta nativa no trecho paulista da BHPS

Antes de iniciar a apresentação dos resultados obtidos e análises, é relevante destacar que o termo “Pegada Hídrica” utilizado neste trabalho para se referir à produção de madeira da floresta nativa, em hipótese alguma deve ser interpretado com o mesmo significado conceitual que o termo apresentado por Hoekstra & Chapagain (2007), apesar de aplicar o

mesmo método de quantificação. Isto por que, neste caso, o objeto de análise não se refere a um produto ou serviço que será apropriado para uso humano diretamente.

Em outras palavras, a PH foi um conceito cunhado especificamente para se referir à apropriação de água para a produção de bens e serviços econômicos. Neste trabalho, no que tange à produção de madeira pela floresta nativa, é referida sempre como “*Pegada Hídrica*”, pois apenas emprega o método de quantificação do uso direto e indireto da água, mas trata-se apenas de uma avaliação do uso natural do recurso por parte da vegetação nativa, sem contar necessariamente com a possibilidade de corte e uso desta madeira.

Com base nos dados secundários levantados na literatura, aplicou-se o modelo de contabilização da Pegada Hídrica verde, proposto por van Oel & Hoekstra (2010) e adaptado para a produção de madeira da floresta nativa⁶². O valor de “ET” (evapotranspiração) empregado foi o valor obtido a partir do emprego do “BHnorm” (ROLIM et al, 1998; SENTELHAS et al, 1999).

Em seguida, foi necessária a adoção de um valor de produtividade de madeira média para a floresta. Neste sentido, optou-se por utilizar a produção de $236 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ (RIBEIRO, 2007; RIBEIRO et al, 2009), por se tratar de um valor médio de produtividade de floresta Ombrófila Densa. Para a estimativa da produtividade, foi necessário adotar também um tempo de crescimento da árvore, equivalente ao ciclo de produção do eucalipto até a idade de corte. Neste sentido, adotou-se o tempo mínimo estabelecido pela Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006) que determina um período de até 10 anos para possibilitar a recuperação da floresta nativa durante as práticas de pousio (MAY & TROVATTO, 2008). Com isso, a produtividade de madeira, semelhantemente à curva volumétrica utilizada para o caso do eucalipto, foi de $24 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

A densidade básica ponderada (por espécies) encontrada para a floresta nativa foi de $0,7 \text{ t.m}^{-3}$ (RIBEIRO, 2007). Este dado, assim como para o caso do eucalipto, permitiu a conversão das unidades finais da PH_{verde} da madeira em $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ (volume de água por volume de madeira) para $\text{m}^3.\text{t}^{-1}$ (volume de água por massa de madeira).

A última variável necessária para a estimativa da PH_{verde} da madeira da floresta nativa foi sua umidade. Quanto a este parâmetro, cabe destacar que não foram encontrados dados médios ponderados por espécies. Em função da ausência deste dado, optou-se por utilizar o valor referenciado por Brito & Barrichelo (1979) de 50% de umidade média em espécies

⁶² Adaptação do método está apresentada no tópico de Materiais e Métodos deste trabalho.

florestais. Desta forma, o dado empregado na equação foi de $0,5 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, referente à água contida na madeira no “momento do corte”⁶³.

Os dados empregados para a determinação da PH_{verde} da floresta nativa de Mata Atlântica da Bacia do Rio Paraíba do Sul podem ser conferidos na Tabela 7.2.2.1.

Tabela 7.2.2.1 – Dados para a contabilização da PH_{verde} da madeira de floresta nativa da BHPS.

ETR ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$)	Produção de madeira ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$)	$f_{\text{água}}$ (m^3/m^3)
9.844	24	0,5

Com base nas determinações, adoções de dados e limitações apresentadas, a Tabela 7.2.2.2 apresenta a PH verde referente à produtividade média da madeira obtida para o conjunto de fitofisionomias de Ombrófila Densa Atlântica.

Tabela 7.2.2.2 – Contabilização da PH da madeira de floresta nativa da BHPS.

“ $\text{PH}_{\text{verde, floresta nativa}}$ ” (m^3/m^3)	“ $\text{PH}_{\text{verde, floresta nativa}}$ ” ($\text{m}^3/\text{t}/\text{ano}$)	“ $\text{PH}_{\text{verde, floresta nativa}}$ ” ($\text{m}^3/\text{hectare}/\text{ano}$)
418	597	9.856

Os resultados obtidos em relação à PH_{verde} , somente para o caso da floresta nativa, podem ser considerados o valor de PH_{total} . Isto, porque não se realiza a aplicação de fertilizantes minerais e, portanto, não é considerada pelo método de análise de PH apresentado em Hoekstra et al (2011).

Em relação aos resultados obtidos para a contabilização da PH_{verde} do eucalipto, como apresentado, pode-se observar que para cada tonelada de celulose produzida, são necessários mais de 700 m^3 de água. A relação entre volume de água e volume de madeira produzido mostrou que são alocados 215 m^3 de água a cada metro cúbico de madeira produzido, ou $392 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$.

A PH_{total} da celulose, considerado a soma da PH_{verde} e PH_{cinza} , foi de $742 \text{ m}^3.\text{tsa}^{-1}$. Considerando apenas a madeira de eucalipto produzida, foi estimado que são necessários aproximadamente 400 metros cúbicos de água para cada tonelada produzida, ou ainda, 221 metros cúbicos de água para cada metro cúbico de madeira produzida.

Já os valores para a “ PH_{total} ” da hipotética de produção de madeira a partir da floresta de Mata Atlântica foi de $418 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ou $597 \text{ m}^3.\text{t}^{-1}$. Como já explicitado anteriormente, não se pode estimar a produção de celulose a partir deste tipo de madeira.

⁶³ Ressaltando que se trata apenas de uma situação hipotética na qual foi necessário estimar a umidade no momento do corte. Isto não significa necessariamente que esta madeira será destinada a corte.

Ao comparar os valores do consumo de água de um hectare por ano ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$), ou seja, desconsiderando a produtividade de madeira anual⁶⁴, pode-se observar que a Mata Atlântica apresentou uma alocação de 9.856 m^3 de água para cada hectare/ano, enquanto que a produção de eucalipto apresentou uma alocação de 9.912 m^3 de água verde e 10.188 m^3 de água total (verde e cinza) para a mesma área e período de tempo analisados. Neste sentido, pode-se apontar que os valores obtidos pelo método de contabilização de PH são sensíveis à produtividade anual do bem ou serviço avaliado.

É evidente que os avanços tecnológicos contribuíram para o maior incremento anual de madeira observado para as silviculturas de eucalipto. Isto faz com que a eficiência de uso da água para sua produção seja maior (menor consumo de água por unidade produzida), no entanto, observa-se que ocorre a alocação de um maior volume total de água pela monocultura de eucalipto ao comparar os volumes de água associados às florestas nativas. Neste sentido, ao observar somente os valores obtidos com base no volume de água utilizado para cada volume ou massa de produto produzido, deixa-se de considerar o impacto total deste consumo, que pode ser maior até mesmo em casos de PH mais baixa.

7.3. Balanço hídrico da pastagem no trecho paulista da BHPS

Para possibilitar a análise da demanda por uso de água na bacia foi considerado o uso da água verde pelas principais coberturas vegetais e a demanda por água azul divulgada nos relatórios de situação da bacia hidrográfica. Para que esta análise se tornasse possível, foi necessário ainda a contabilização da evapotranspiração e do consumo de água verde da pastagem da bacia, utilizada na atividade de pecuária extensiva que cobre cerca de 57,6% da área da bacia (COPPETEC, 2006).

Como já citado anteriormente, não foram levantados os dados necessários para a quantificação da PH desta cobertura por não integrar o escopo de análise aqui proposto. Desta forma, serão considerados somente os dados necessários a estimativa do balanço hídrico através do emprego do “BHnorm” (ROLIM et al, 1998; SENTELHAS et al, 1999).

Adotou-se um valor intermediário de 50 mm para CAD de pastos em geral na região da bacia. Os resultados obtidos pela aplicação do modelo de Rolim et al (1998) e Sentelhas

⁶⁴ Que é significativamente mais elevada para espécies de crescimento rápido.

et al (1999), utilizando os mesmos dados climatológicos aplicado aos demais casos. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 7.3.1.

Tabela 7.3.1 – Balanço Hídrico da cobertura de pastagem na Bacia do rio Paraíba do Sul – Evapotranspiração potencial (ETP), Armazenamento de água no solo (ARM), Alterações positivas e negativas no estoque de água do solo (ALT), Evapotranspiração Real (ETR), Déficit Hídrico (DEF), Excedente Hídrico (EXC).

Meses	ETP Thorntwaite 1948	P - ETP	P-ETP mm	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	118,86	120,9	120,9	50,00	0,00	118,9	0,0	120,9
Fev	109,85	111,1	111,1	50,00	0,00	109,9	0,0	111,1
Mar	109,65	71,7	71,7	50,00	0,00	109,7	0,0	71,7
Abr	79,02	-3,3	-3,3	46,78	-3,22	78,9	0,1	0,0
Mai	58,43	-8,4	-8,4	39,59	-7,20	57,3	1,2	0,0
Jun	45,38	-3,7	-3,7	36,77	-2,82	44,5	0,9	0,0
Jul	45,39	-14,9	-14,9	27,28	-9,49	40,0	5,4	0,0
Ago	57,81	-17,5	-17,5	19,21	-8,07	48,3	9,5	0,0
Set	70,33	-8,6	-8,6	16,19	-3,02	64,8	5,5	0,0
Out	87,99	45,9	45,9	50,00	33,81	88,0	0,0	12,0
Nov	98,13	49,0	49,0	50,00	0,00	98,1	0,0	49,0
Dez	112,97	97,3	97,3	50,00	0,00	113,0	0,0	97,3
Total	993,82	439,5	439,5	486	0,00	971,2	22,6	462,1
Média	82,82		36,6	40,5		80,9	1,9	38,5

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do modelo Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) referentes ao período de 1961 – 1990.

A evapotranspiração estimada desta cobertura (ETR) foi de $971,2 \text{ mm.ano}^{-1}$, o déficit hídrico (DEF) de $22,6 \text{ mm.ano}^{-1}$, o excedente hídrico (EXC) foi estimado em $462,1 \text{ mm.ano}^{-1}$. O extrato do balanço hídrico pode ser observado em gráficos a seguir (Gráfico 5 e Gráfico 6).

Gráfico 5: Balanço Hídrico da cobertura de pastagem da bacia

Gráfico 6: Balanço Hídrico da cobertura vegetal de pastagem da bacia por componente (Déficit Hídrico, Excedente Hídrico, Retirada de Água do Solo e Reposição de Água no Solo)

Como também citado por autores que realizaram análises comparativas de escoamentos em solos com coberturas de pastagem, florestas e silviculturas (LIMA, 1990; BAUMHARDT, 2010; CAVALCANTE, 2011), utilizando diversos métodos, dentre os quais o método de balanço de massa que implica em medições locais de precipitação e deflúvio, os resultados obtidos apontam maior EXC (ou escoamento sub e superficial) por esta cobertura vegetal.

7.4. Análise comparativa das coberturas vegetais de monoculturas de eucalipto, floresta nativa e pastagem

Tendo em vista os resultados apresentados anteriormente, discute-se neste tópico, à luz de outros estudos já realizados na região, alterações, semelhanças e diferenças entre os usos de água pelas diferentes coberturas vegetais.

Sato et al (2007) e Sato (2008) apontam que na região do médio Vale do Paraíba do Sul, as taxas de escoamento entre as três coberturas vegetais analisadas (eucalipto, pastagem e floresta nativa) foram semelhantes. Resultados parecidos foram obtidos neste trabalho, com a estimativa a partir do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite & Mather (1955), ao observar a diferença entre os valores obtidos sendo de 446,7 mm.ano⁻¹ de EXC produzido pela cobertura de silvicultura, 448,9 mm.ano⁻¹ para floresta nativa e 462,1 mm.ano⁻¹ para a

pastagem. Cabe ressaltar, mais uma vez, que o método de balanço hídrico climatológico não detalha o excedente hídrico em proporção de escoamento superficial e sub superficial.

A evapotranspiração é outro parâmetro que apresentou pequena diferença entre as coberturas analisadas. No caso da silvicultura de eucalipto, o valor estimado foi de 986,6 mm.ano⁻¹, para a floresta nativa o valor foi de 984,4 mm.ano⁻¹ e para a pastagem de 971,2 mm.ano⁻¹.

Zhang et al (2001) e Lima (2011) apontam que o comportamento de diferentes coberturas vegetais em relação a evapotranspiração é semelhante. Neste sentido, os autores defendem que o balanço hídrico é governado mais fortemente por condições climáticas do que pela cobertura vegetal. Entretanto, há controvérsias quanto a esta abordagem, uma vez que trabalhos como o de Nasetto et al (2005), Tatsch (2006) e Cavalcante (2011) apontam que em áreas de vegetação de pampa ou cerrado, por exemplo, a plantação de eucalipto altera a taxa de evapotranspiração da microbacia. A partir destes trabalhos, percebe-se que não somente o porte das espécies vegetais, mas também o espaçamento influencia este parâmetro.

Trabalhos realizados por Soares & Almeida (2001) e Almeida & Soares (2003) em áreas tropicais de florestas nativas de Mata Atlântica no Espírito Santo apresentaram resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa.

Cabe apontar que os dados apresentados acima possibilitaram a quantificação da água verde utilizada pelas principais coberturas vegetais da área da bacia que cobrem 80,3% do total da área da bacia (COPPETEC, 2007). A seguir, estes dados são apresentados, de acordo com a classificação de tipos de água definida pelo método de PH.

7.5. Comparação dos usos e requerimentos hídricos das coberturas vegetais

Com a aplicação do balanço hídrico climatológico de Thornthwaite & Mather (1955), os resultados obtidos indicam que a evapotranspiração das coberturas de floresta nativa e eucalipto apresentam semelhanças. Os valores obtidos neste trabalho para a evapotranspiração do eucalipto (986,6 mm.ano⁻¹) encontram-se dentro da faixa de valores entre 569 e 1.952 mm.ano⁻¹ encontrados na literatura (LIMA et al, 1990; CÂMARA, 1999; SOARES & ALMEIDA, 2001; RANZINI & LIMA, 2002; BARRETO, 2006; CARDOSO et al, 2006; TATSCH, 2006; ALMEIDA & SOARES, 2007; STAPE et al, 2010).

A floresta nativa de Mata Atlântica, por sua vez, apresentou uma evapotranspiração média anual de 984,4 mm, sendo o intervalo encontrado em outros trabalhos entre 553 e 1.350 (ARCOVA; 1996; FUJIEDA et al, 1997; KURTZ & ARAUJO, 2000; ANIDO et al, 2002; ALMEIDA & SOARES, 2003; CICCIO, 2004; CICCIO et al, 2007; DONATO et al, 2008).

Os menores valores observados para evapotranspiração foram obtidos a partir do método de balanço hídrico por balanço de massa no qual são realizadas medições locais de precipitação e escoamento (deflúvio). A disparidade entre os valores encontrados neste trabalho, bem como em relação àqueles observados na literatura que utilizam o método de balanço de massa, mostram que o balanço hídrico florestal apresenta grande incerteza. Pois, dependendo do método empregado, os valores obtidos podem ser muito diversos. Porém, destaca-se que não foi foco deste trabalho determinar o melhor método de avaliação do balanço hídrico florestal, no entanto serão levantadas ao final da discussão os limites do método empregado.

Em relação aos resultados obtidos para a contabilização da PH da celulose, esta apresentou que para cada tonelada produzida, são necessários mais de 740 m³ de água (verde e cinza). Já a relação entre volume de água e volume de madeira produzido mostrou que são consumidos 221 m³ de água a cada metro cúbico de madeira produzido, sendo 215 m³ referentes à água verde e 6 m³ à água cinza. Já o valor para a “PH” hipotética de produção de madeira a partir da floresta de Mata Atlântica foi de 418 m³.m⁻³ (metro cúbico de madeira produzida).

Ao comparar os valores da “PH” para apenas um hectare por ano, ou seja, desconsiderando a produtividade de madeira anual (m³.ha⁻¹.ano⁻¹), pode-se observar que a Mata Atlântica apresentou uma alocação de 9.856 m³ de água para cada hectare/ano, enquanto que a produção de eucalipto apresentou uma alocação de 9.912 m³ de água verde e 10.188 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, considerando todos os tipos de água utilizados, para a mesma área e período de tempo. Os valores obtidos a partir da quantificação da PH total e alocação de água por hectare por ano para as duas coberturas arbóreas (eucalipto e nativas) são mostradas na Tabela 7.5.1.

Tabela 7.5.1 – Comparação entre os valores de PH da produção de madeira obtidos para as coberturas vegetais de floresta nativa e silvicultura de eucalipto.

Cobertura	PH _{total, madeira} (m ³ /m ³)	PH _{total, madeira} (m ³ /t/ano)	Alocação de água verde (m ³ /hectare/ano)	Alocação total de água(m ³ /hectare/ano)
Mata Atlântica	418	597	9.856	9.856
Eucalipto	221	402	9.912	10.188
Diferença	197	195	-56	-332

Pode-se apontar que os valores obtidos pelo método de contabilização de PH são sensíveis à variação da produtividade anual do bem ou serviço avaliado. Cabe ressaltar que avanços tecnológicos contribuíram para o maior incremento anual de madeira observado para as monoculturas de eucalipto, o que não ocorre com a floresta nativa, logo seu incremento é consideravelmente menor. Observa-se, contudo, que no caso do eucalipto ocorre alocação de um maior volume de água ao comparar os volumes de água, por área, por ano ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$), utilizados pelas duas coberturas vegetais arbóreas (floresta nativa e silvicultura).

Em relação à variável “produtividade de madeira”, cabe lembrar o estudo realizado por Cavalcante (2011) evidenciando a maior perda de água em espaçamentos menores entre os indivíduos da silvicultura. O menor espaçamento entre indivíduos de eucaliptos cultivados poderia implicar em maior produtividade de madeira, tendo em vista a maior quantidade de árvores em uma área, no entanto, seria perdido do sistema maior volume de água, principalmente, via evapotranspiração.

7.6. Uso da água verde e disponibilidade de água azul no trecho paulista da BHPS

A partir das estimativas dos balanços hídricos das três coberturas vegetais, que juntas representam 80,3% do uso do solo do trecho paulista da bacia, foi possível estabelecer a comparação e análise entre as demandas e disponibilidade de água verde e azul. A seguir, na Tabela 7.6.1, são apresentados os usos da água verde pelas principais coberturas vegetais da bacia hidrográfica. Estes usos representam a demanda por água verde que é disponibilizada naturalmente na bacia hidrográfica através do regime de chuvas. Cabe destacar que nesta contabilização, são quantificadas apenas as perdas de água do sistema através do processo de evapotranspiração, o que diferencia estes resultados daqueles obtidos pelo método utilizado para o cálculo da PH_{verde} , que considera também a água verde contida na madeira no momento do corte.

Tabela 7.6.1 – Demanda de água verde por diferentes coberturas vegetais na Bacia do rio Paraíba do Sul

Objeto de análise	ETR ^a (mm/ano)	Porcentagem de cobertura	Água verde requerida pela cobertura total (m ³ /ano)	Água Verde anual requerida* (m ³ /ha/ano)
Mata Atlântica	984	0,156 ^b	2.134.572.960	9.844
Silvicultura de Eucalipto	987	0,071 ^c	973.675.540	9.866
Pastagem ^c	971	0,576 ^b	7.775.815.680	9.712

* Este valor se difere daquele calculado para a PH_{verde}, pois não considera a água verde contida na madeira, e sim apenas a água verde da evapotranspiração vegetal.

Fonte: ^a Todos os valores de ETR foram obtidos a partir da aplicação do “BHnorm” (Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999) com adaptação de CAD que emprega o Método de Thornthwaite & Mather (1955); ^b COPPETEC (2006); ^c ARGUELLO et al (2010)

Apresentada a demanda por água verde agregada para valores anuais, cabe analisar também a disponibilidade hídrica verde da bacia. Como é possível observar na tabela 7.6.2, com base nos dados de precipitação média anual de uma série de normais climatológicas utilizado pelo modelo de estimativa do balanço hídrico climatológico de Rolim et al (1998) e Sentelhas et al (1999), pôde-se estimar a disponibilidade da água verde total anual (m³.ano⁻¹) e por área (m³.ha⁻¹.ano⁻¹).

Tabela 7.6.2 – Disponibilidade de água verde na Bacia do rio Paraíba do Sul

Disponibilidade de água verde da bacia			
Precipitação total (mm/ano)	Área da Bacia (km ²)	Água verde total disponível (milhões m ³ /ano)	Água Verde disponível (m ³ /ha/ano)
1.433	13.900	19.922	14.333

Fonte: COPPETEC (2006); DAEE; INMET

Com base nos conceitos apresentados por Tucci e Clarke (1997) e Tucci (2002), revisados anteriormente neste trabalho, podem-se apontar as relações entre a água verde e água azul, com base nos processos de fluxo vertical (precipitação e evapotranspiração da água verde) e dos fluxos longitudinais (escoamento superficial e subterrâneo da água azul), cabe apontar ainda, a quantificação da demanda por uso da água azul da bacia.

Na Tabela 7.6.3 é apresentada a demanda por água azul na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, apenas em seu trecho paulista, pelas atividades industriais, uso doméstico e agropecuário (VALLENGE, 2011).

Tabela 7.6.3 – Demanda de água azul por diferentes atividades antrópicas na Bacia do rio Paraíba do Sul em seu trecho paulista

Estimativa das Demandas da Bacia do Rio Paraíba do Sul para o ano de 2010 – Apenas trecho Paulista		
Usos	Demanda estimada da Bacia do Rio Paraíba do Sul (m³/s)	Demanda estimada da Bacia do Rio Paraíba do Sul (m³/ano)
Uso doméstico	7,1 ¹	223.905.600
Uso Agropecuário	8,2 ¹	259.225.920
Uso Industrial	0,68 ¹	21.444.480
Total (usos)	16	504.576.000
Evaporação	-	218.732.400 ²
Total (usos e perdas)	-	723.308.400

Fonte: ¹ Vallenge (2011); ² Evaporação média total (INMET, sd) extrapolada para todo o trecho paulista da bacia com base no método utilizado por Diniz et al (2011)

Com base na análise dos dados anuais, para o período considerado, foi possível observar que na área de estudo, a disponibilidade de água verde total da bacia atende às demandas relativas das principais coberturas vegetais da bacia (floresta nativa, monocultura de eucalipto e pastagem), com base nas áreas de cobertura vegetal publicados em COPPETEC (2006).

Ao analisar a relação entre água verde e água azul, os dados indicam que a atividade de silvicultura aparentemente não impacta diretamente a disponibilidade da água azul para os demais tipos de uso da água na bacia, pois existe maior produção de água azul do que é consumido, como pode ser observado na Tabela 7.6.4.

Tabela 7.6.4 – Disponibilidade de água verde e água azul na bacia e as demandas para cada tipo de água

Parâmetro analisado	milhões m³/ano
Disponibilidade de água verde total na bacia	19.922
Água verde total requerida – cobertura florestal nativa, silvicultura e pastagem	10.904
Disponibilidade de água azul no trecho paulista (superficial e subterrânea)	9.018
Demanda de água azul no trecho paulista*	723

* Considera demanda por água pelos setores industrial, agropecuário, consumo doméstico e perdas por evaporação no trecho paulista da bacia

Ainda que a análise dos dados agregados anualmente não evidenciem possíveis impactos do consumo de água realizado pela atividade de silvicultura de eucalipto na bacia sobre os serviços ecossistêmicos e os demais usos dos recursos hídricos em relação à água verde e azul, não se pode deixar de considerar a existência da geração da pegada hídrica cinza da atividade desta produção.

Quanto a este aspecto, pode-se destacar o uso indireto de 6 m³ de água para cada m³ de madeira produzido, ou ainda, 11 m³ de água para cada tonelada de madeira produzida. Considerando a produção anual de celulose da bacia, o uso anual deste tipo de água é de aproximadamente 32 milhões m³.ano⁻¹, o que representa um volume considerável, tendo em vista a disponibilidade hídrica apresentada na Tabela 7.6.4.

Com base no esquema ilustrativo do balanço hídrico desenvolvido por Salmoral et al (2011), elaborou-se a Figura 16, que esquematiza o balanço hídrico do trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

Figura 18 – Usos proporcionais da água verde e azul no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (Baseado em Salmoral et al, 2011) – AV (Água Verde); AA (Água Azul).

No esquema acima a proporcionalidade apresentada para os usos da água verde está diretamente relacionada com a proporção da área do trecho estudado da bacia. Sendo assim, observa-se o maior consumo de água verde pela cobertura de pastagem, seguida pela cobertura de floresta nativa e por último a silvicultura de eucalipto.

O total de água azul consumido representa 4% de toda a água precipitada na bacia. Do total de água verde disponibilizada, cerca de 55% é consumido pela cobertura vegetal, 3% é consumido para atendimento dos diversos usos (doméstico, industrial e agropecuário), 1% é perdido para a atmosfera devido ao processo de evaporação da água de superfície e 42% é o restante que mantém o corpo hídrico e segue para os demais estados abrangidos pela bacia. Em relação ao total da disponibilidade de água azul, cerca de 6% é utilizada pelos demais usuários do recurso na bacia e 2% é evaporada.

Para uma análise mais detalhada em relação ao uso da água ao longo do ano, optou-se também por realizar o mesmo processo para dados agregados mensalmente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.6.5.

Tabela 7.6.5 – Disponibilidade e demanda mensais de água verde da bacia

Meses	Disponibilidade hídrica verde (m³/ha)	Demandas de água verde na bacia		
		Eucalipto (m³/ha)	Mata Atlântica (m³/ha)	Pastagem (m³/ha)
Jan	2.398,1	1.188,6	1.188,6	1.188,6
Fev	2.209,2	1.098,5	1.098,5	1.098,5
Mar	1.813,8	1.096,5	1.096,5	1.096,5
Abr	756,9	789,9	789,8	789,1
Mai	500,8	581,2	580,2	572,7
Jun	416,9	451,4	450,6	445,1
Jul	304,6	437,8	432,9	399,5
Ago	402,7	547,0	537,9	483,4
Set	617,7	683,7	678,2	647,9
Out	1.338,5	879,9	879,9	879,9
Nov	1.471,5	981,3	981,3	981,3
Dez	2.102,3	1.129,7	1.129,7	1.129,7
Total Anual	14.333,1	9.865,6	9.844,3	9.712,4
Média mensal	1.194,4	822,1	820,4	809,4

Na Tabela 7.6.6, na qual a disponibilidade hídrica verde foi subtraída da demanda por água verde pelas coberturas vegetais analisadas, pode se notar que os dados mensais apresentam situações em que a disponibilidade de água da chuva não atende completamente as demandas pelas coberturas vegetais.

Tabela 7.6.6 – Disponibilidades de água verde e azul da bacia e água azul restante após usos por outros usuários.

Meses	Disponibilidade hídrica verde total da bacia	Disponibilidade hídrica azul total da bacia	Disponibilidade descontada dos usos e perdas* da bacia
	milhões de m³/ano	milhões m³/ano	milhões m³/ano
Jan	3.333	2.006	1.946
Fev	3.070	1.844	1.784
Mar	2.521	1.297	1.237
Abr	1.052	171	110
Mai	696	54	- 5
Jun	579	80	20
Jul	423	-33	- 93
Ago	559	2	- 58
Set	858	125	65
Out	1.860	878	818
Nov	2.045	950	889
Dez	2.922	1.661	1.601
Total Anual	19.922	9.038	8.315
Média mensal	1.660	753	692

* Considerou-se a evaporação média da região (INMET, sd) extrapolada para toda superfície de água da bacia (COPPETEC, 2007).

O que se nota ao observar os dados agregados por mês é que as disponibilidades hídricas, que parecem altas e suficientes para atender a todas as demandas quando se considera somente o volume de água anual, apresentam situações críticas em meses menos chuvosos do ano. Após considerar o consumo oficial da bacia (VALLENGE, 2011) e das perdas por evaporação da água superficial (lagos, rios, etc), os meses de maio, julho e agosto apresentam uma situação de criticidade quantitativa da disponibilidade hídrica nesta região. Consequentemente, a criticidade da disponibilidade hídrica neste trecho acaba por afetar as demais regiões que a bacia contempla. No Gráfico 7 podem ser observadas a disponibilidade hídrica verde total, demanda hídrica verde das coberturas vegetais e disponibilidade após os usos (vegetação e usuários da bacia).

Gráfico 7 – Balanço Hídrico Geral mensal por tipos de água

No gráfico 7 é possível observar que nos meses de menor disponibilidade hídrica a cobertura vegetal demanda volume de água próximo ao disponível. Este quadro de criticidade, como já comentado, é agravado se considerados os volumes demandados pelos demais usuários da bacia. Esta criticidade quantitativa também pode agravar a qualidade da água da bacia.

Cabe destacar que apesar de existirem dados quanto às outorgas de captação de água e emissão de efluente, que são necessários para a quantificação da disponibilidade de água cinza deste trecho da bacia e do impacto do consumo deste tipo de água pela atividade de silvicultura, estes não foram utilizados por não apresentarem o mesmo nível de detalhamento que permitisse uma análise consistente de PH_{cinza} e “sustentabilidade” do uso deste tipo de água considerando o contexto local.

A avaliação da água cinza seria importante para evidenciar também o impacto da poluição gerada pela atividade aqui analisada, a silvicultura de eucalipto, sobre a disponibilidade de água para a diluição dos poluentes. Tendo em vista que o relatório de Conjuntura Nacional dos recursos hídricos (ANA, 2012) aponta trechos de criticidade quali e quantitativa na região onde o trecho paulista da Bacia do rio Paraíba do Sul está inserido, torna-se relevante que a água cinza seja um indicador avaliado e para isso é necessário controle, coleta e transparência de dados quanto às outorgas de uso e emissão de efluentes.

Não obstante, o impacto sobre o consumo de água cinza quando comparado à floresta nativa (que não possui PH cinza) indica que existe a demanda deste tipo de água e, portanto, o impacto sobre a qualidade da água produzida na bacia, enquanto a floresta nativa produziria o serviço ecossistêmico de manutenção da qualidade da água, como já discutido anteriormente.

7.7. Limitações dos métodos empregados e da análise

De acordo com a revisão apresentada neste trabalho acerca dos estudos que tentaram estabelecer áreas mínimas para a garantia do fornecimento de alguns SEs, pode-se perceber um alto teor de incerteza. Muitos trabalhos definem porcentagens distintas para garantir um mesmo serviço, tomando como base biomas diversos e empregando métodos de análise diferentes. Com isso, cabe ressaltar que este trabalho não focou em apontar uma área mínima a ser preservada em uma bacia hidrográfica por considerar o risco que uma indicação desta poderia ter em determinados biomas cujas proporções indicadas, se adotadas com rigor, podem vir a implicar na perda irreversível de diversos SEs.

Neste mesmo sentido, retomando a investigação realizada por Mingoti (2009), que analisa áreas de cerrado e mata atlântica, com coberturas vegetais de pasto, agricultura e eucalipto e apontam, segundo o antigo Código Florestal (Lei Federal nº 4.771, de 15 de setembro de 1965) em vigor no período de realização da pesquisa, que as determinações para APP e RL não eram suficientes para garantir o serviço ecossistêmico de retenção de sedimentos, associado aos processos erosivos. Este estudo indica ainda que o tamanho das APPs, em grande parte das microbacias estudadas, deveria ser duas vezes maior e associados às RLs para garantir a manutenção deste único serviço.

Este trabalho foi citado novamente para evidenciar o risco da limitação associado à definição de áreas mínimas a serem preservadas. Neste sentido, o que se propõe neste trabalho é a consideração da superação das porcentagens determinadas legalmente (de acordo com o

antigo e atual Código Florestal, alterado em 2012), uma vez que muitos SEs deixariam de ser perdidos de forma irreversível.

Quanto ao método de balanço hídrico climatológico empregado, cabe destacar que sua aplicação baseou-se apenas em dados climatológicos (temperatura e precipitação) e da alteração da variável “capacidade de água disponível no solo” (CAD), de acordo com as diferentes coberturas vegetais que se deseja analisar. Desta forma, a aplicação deste modelo de balanço hídrico estima as condições locais do solo, a partir os dados de entrada que foram adaptados à cobertura vegetal analisada. Modelos que realizam medições locais podem refletir as condições mais precisas de comportamento da cobertura vegetal na região estudada.

Outra limitação da aplicação do Balanço Hídrico Climatológico está relacionada à definição de excedente hídrico, podendo este ser referente a escoamento superficial e subterrâneo, bem como percolação até recarga de aquífero, sem distinção. Se medidos localmente os volumes de escoamento superficial e subterrâneo associados às coberturas vegetais analisadas, seria possível realizar também a valoração do serviço de provisão de água. Para esta valoração, poderiam ser adotados os volumes de escoamento subsuperficial, responsáveis pela manutenção do corpo hídrico inclusive nos períodos secos, e os valores de consumo da água definidos para cobrança pelo uso da água na bacia (CEIVAP, 2006).

Quanto ao método de PH empregado, assim como apontado por Mekonnen & Hoekstra (2011), ocorreu a necessidade de generalizações e simplificações de dados para a região estudada. Estas generalizações e simplificações acabam por homogeneizar o resultado que pode apresentar diferenças se forem estudados mais especificamente. Como exemplo, temos alguns municípios dentro desta região que apresentam maior precipitação que os demais, como o município de Monteiro Lobato.

Para este caso específico, o modelo de balanço hídrico aplicado indicou menor valor de evapotranspiração, maior escoamento superficial e ausência de período de déficit hídrico. No entanto, a média da região considerou os municípios que possuem também menores precipitações médias anuais e os resultados obtidos foram aqueles apresentados e discutidos anteriormente.

Outra questão relevante, trazida a partir da aplicação e comparação do método de PH a outras análises, foi a forte relação entre a variável de produtividade a menores valores de PH. Esta relação volta a ser destacada para trazer à discussão a necessidade de considerar a escala de produção do objeto de análise. Neste sentido, a PH de produtos não deve ser utilizada somente para a definição de volumes de água por unidade ou massa de produto, mas sim

considerando o consumo total de água levando em conta o total produzido. Com isso, pode-se evitar o equívoco de considerar que a redução de um valor de PH implica em menor consumo de água, dentro de um processo em constante crescimento de produção.

Foram necessárias diversas generalizações também em relação às características das coberturas vegetais arbóreas e para a madeira produzida por ambas. No caso da Mata Atlântica, por se tratar de um tipo de vegetação com maior biodiversidade vegetal, quando comparado ao cultivo de eucaliptos (ainda que considerando a possível existência de sub bosques), o impacto da generalização deste tipo de dado é ainda maior.

A PH foi criada para contemplar aspectos relacionados à geração de impactos socioambientais. Não se trata, portanto, de utilizá-la de forma descuidada com o objetivo de avaliar melhores locais, com maior disponibilidade hídrica, semelhanças com características da vegetação nativa e condições climáticas, pedológicas, etc, favoráveis. Deve-se também considerar de forma complementar as questões relacionadas às demais dimensões ambientais para reduzir e evitar a geração de injustiças ambientais⁶⁵.

Assim, ressalta-se a importância da consideração de outros aspectos que possam gerar impactos ambientais (sociais, físicos e biológicos) à análise de PH. Cabe apontar que pouco foi trabalhado neste sentido até o momento pelo que se pode levantar da bibliografia publicada sobre as diversas formas de utilização da PH. Como sugestão de futuros trabalhos destaca-se, portanto, a necessidade de pesquisas que visem ampliar a análise de PH de forma a transpor as medidas de melhoria da eficiência do uso da água, para fins de gestão dos recursos hídricos de forma a não gerar ou intensificar impactos socioambientais.

7.7.1. Serviços Ecosistêmicos impactados pelas coberturas vegetais não naturais relacionados aos recursos hídricos

A água da bacia, apesar de aparentemente abundante, apresenta momentos de escassez quali e quantitativa, devido aos diversos usos. As coberturas vegetais, neste trabalho, são consideradas “usuários” do recurso hídrico da bacia e com os resultados até então apresentados, o que se pode argumentar é que a preservação de áreas de vegetação natural, apesar de consumir a água de forma semelhante, produz os serviços ecossistêmicos que garantirão a melhor qualidade da água produzida pela bacia (REIS, 2004; MINGOTI, 2009).

⁶⁵ Martinez-Alier (2007)

A organização dos serviços ecossistêmicos impactados pela atividade de silvicultura (ou pastagem) relacionados aos recursos hídricos da bacia se deu a partir dos dados secundários levantados nos estudos realizados na região e dos resultados produzidos a partir da análise deste trabalho. A proposta foi organizar as alterações provocadas na qualidade dos SEs prestados pela floresta nativa pela sua ausência ou substituição por outras coberturas.

Posto isto, inicialmente se aponta que as perdas de solo e nutrientes podem ocasionar a degradação da qualidade da água em função da ocorrência de lixiviação e carreamento de sedimentos, bem como pelos processos erosivos como visto em diversos estudos revisados por este trabalho (LIMA, 1993; LIMA et al, 1996; SOARES & ALMEIDA, 2001; MORRIS et al, 2004; VITAL, 2007; VIANA et al, 2009).

Estes autores ressaltam que a consideração dos impactos relacionados aos processos erosivos e de lixiviação devem ser analisados com base no histórico local de uso e ocupação do solo e as condições prévias de conservação do solo. No caso da Bacia do rio Paraíba do Sul, onde o avanço da monocultura eucalipto, em grande parte, ocorre em substituição de áreas pastagens, a silvicultura pode recuperar algumas características hidrológicas de uma bacia, tais como a redução de processos erosivos e redução de lixiviação de nutrientes (LIMA, 1993; LIMA et al, 1996). Contudo, isto ocorreria no caso da implantação de uma plantação de eucalipto sem a finalidade de exploração industrial, que possui alta rotatividade e curtos intervalos de corte.

Lima (1993), como apontado anteriormente, destaca que o papel das silviculturas para a função de “proteção” do solo contra processos erosivos e de lixiviação, visando à redução da poluição dos corpos hídricos, ocorre em silviculturas de eucalipto com maior tempo de permanência e não em ciclos de rápido crescimento e corte, como ocorre, por exemplo, para a produção industrial da celulose. Ainda assim, alguns estudos como aquele realizado por Reis (2004), ressaltam que a cobertura vegetal nativa geralmente produz água de melhor qualidade. Isto por que a água escoada sub e superficialmente carrega menor quantidade de sedimentos e nutrientes.

O estudo realizado por Mingoti (2009) ressaltou a importância das APPs e RLs na redução dos processos erosivos do solo e da qualidade da água produzida em microbacias que apresentavam culturas diversas, dentre as quais também se considerou silviculturas de eucalipto.

Neste sentido, ao organizar a literatura citada anteriormente, verifica-se que existe um importante papel da floresta nativa no fornecimento de serviços ecossistêmicos associados à

conservação de propriedades do solo, de forma a evitar e reduzir os processos erosivos e de lixiviação de nutrientes e a consequente poluição dos corpos hídricos.

Porém a cobertura de silvicultura, quando comparadas às áreas desmatadas, descampadas ou com cobertura de pastagem, podem fornecer serviços ambientais de manutenção das características do solo e redução dos impactos sobre os recursos hídricos relacionados à lixiviação e carreamento de sedimentos⁶⁶.

Quanto ao serviço ecossistêmico associado à produção de água da bacia, diversos autores (LIMA, 1993; SOARES & ALMEIDA, 2001; ALMEIDA & SOARES, 2003; VITAL, 2007; VIANA et al, 2009) apontaram que em locais nos quais ocorra maior precipitação pluviométrica e atendem à demanda hídrica da plantação arbórea não ocorre o consumo da água do solo e parte desta é escoada sub e superficialmente. Sato et al (2007) e Sato (2008) ressaltam ainda que na região da Bacia do rio Paraíba do Sul as taxas de escoamento e relação entre escoamento e precipitação de diferentes coberturas vegetais (eucalipto, floresta nativa e pastagem) são semelhantes entre si.

Neste sentido, estudos conduzidos em áreas de alta precipitação pluviométrica, como o de Soares & Almeida (2001) e Almeida & Soares (2003), apontaram que tanto a silvicultura, como a floresta nativa apresentaram comportamento semelhante em relação ao consumo de água, inclusive consumindo água do solo nos períodos de menor precipitação. No entanto, outros estudos conduzidos em locais de menor precipitação pluviométricas, como no sul do país ou regiões de clima árido ou semiárido apontam que pode ocorrer a redução da produção de água de uma bacia hidrográfica em função, principalmente, das alterações dos processos de escoamento superficial, armazenamento de água no solo e evapotranspiração (CALDER, 1986; MORRIS et al, 2004; LIMA, 1993; OLIVEIRA et al, 2002; NOSETTO et al, 2005; TATSCH, 2006; BAUMHARDT, 2010; CAVALCANTE, 2011).

Cabe destacar também que as características naturais locais (climáticas, pedológicas, edáficas, hidrológicas e fitogeográficas⁶⁷) nas quais a plantação de eucalipto estiver inserida influenciam na vulnerabilidade aos impactos em relação à disponibilidade quantitativa da água, como demonstrado ao longo da discussão acerca dos impactos da monocultura de eucalipto.

Contudo, ainda que exista compatibilidade entre disponibilidade hídrica verde e demanda de água pela cobertura vegetal estabelecida, é necessário também considerar

⁶⁶ Este serviço ocorre quando as plantações possuem idade mais elevada (acima de 7 anos), sendo menor quando ocorre práticas de ciclos rápidos de corte para fins industriais, como apontadas por Lima (1993).

⁶⁷ Características que permitem o estabelecimento dos domínios morfoclimáticos de Ab'Saber (1977; 2003).

impactos sobre outros processos hidrológicos, tais como as propriedades do solo de infiltração e percolação (que podem ser influenciados por compactação superficial ou profunda), além do consumo de água no solo. Isto por que, teoricamente, maior consumo de água do solo em períodos de maior disponibilidade hídrica, junto a uma propriedade do solo não compactada, proporcionam condições de maior infiltração, com isso aumenta o escoamento sub superficial, recarga de aquíferos e redução do escoamento superficial (responsável por processos erosivos e de lixiviação).

Tendo visto como a plantação de eucalipto afeta as funções ecossistêmicas, por alterarem as estruturas ecossistêmicas e os processos e, conseqüentemente, gerar impactos sobre o fornecimento de serviços ecossistêmicos, nas Tabelas 7.7.1.1 e 7.7.1.2 estão apresentados os serviços ecossistêmicos citados na literatura revisada e organizados de acordo com a classificação proposta por De Groot et al (2002). Para permitir melhor entendimento do processo, também se realizou uma organização quanto aos serviços e funções associados a cada tipo de água envolvida no processo da fase de silvicultura da produção de celulose.

Tabela 7.7.1.1 – Serviços ecossistêmicos associados à alteração do balanço hídrico devido à mudança da cobertura vegetal provocada pelo cultivo do eucalipto (água verde) para a produção de celulose.

Processos e estruturas ecológicas	Tipo de Função	Funções Ecossistêmicas	Serviços e Bens Ecossistêmicos
Disponibilidade de água, ciclo hidrológico	Regulação	Suprimento de água	Provisão de água para ecossistema e consumo humano / Manutenção do fluxo hidrológico

Tabela 7.7.1.2 – Serviços ecossistêmicos associados à poluição gerada (água cinza) na fase de silvicultura, devido aplicação de nutrientes minerais e pesticidas e decorrente lixiviação.

Processos e estruturas ecológicas	Tipo de Função	Funções Ecossistêmicas	Serviços e Bens Ecossistêmicos
Ciclo hidrológico	Regulação	Suprimento de água	Integridade dos corpos d'água / água para biota e populações/
Ciclos biogeoquímicos		Regulação de Nutrientes	Manutenção da qualidade da água para a biota, pesca, etc
Estabilização do solo através da fixação pela vegetação		Retenção de solo	Retenção de sedimentos e nutrientes / Manutenção da qualidade da água / Estabilização de solos / Proteção contra assoreamento de corpos hídricos / Prevenção contra processos erosivos

7.7.2. Valoração do Serviço Ecológico e Ambiental de retenção de lixiviação de nutrientes do solo no trecho paulista da BHPS

Dos serviços listados acima, foi realizada uma avaliação econômica, apenas a título de comparação, entre os ganhos e custos envolvidos no uso do serviço ecológico de retenção de lixiviação de nutrientes do solo. A estimativa do valor deste serviço foi realizada a partir de outros estudos que empregaram o método de custo de reposição através do emprego do método de transferência simples de unidade de valor, apresentados anteriormente. A seguir, na Tabela 7.7.2.1, são apresentados os valores econômicos deste serviço fornecido pelas coberturas vegetais levantados da literatura e que são adotados neste trabalho.

Tabela 7.7.2.1 – Valoração econômica do serviço ecológico e ambiental de retenção de nutrientes do solo associado às coberturas vegetais da bacia

Valoração do serviço de disponibilidade de nutrientes do solo			
Cobertura vegetal	Valor (R\$/ha)	Método / base para cálculo	Fonte e referências
Eucalipto	55,52	Custo de reposição	Sarcinelli, (2008); Sarcinelli et al (2009)
Mata Atlântica	5,03	Custo de reposição	Vegetação secundária – Mata Atlântica (Andrade, 2010)
Pastagem	21,49	Média dos valores de custos de reposição	(Sarcinelli, 2008; Sarcinelli et al 2009; Andrade, 2010)

Os estudos acima selecionados empregam o mesmo método de valoração econômica por custo de reposição dos nutrientes perdidos por processos erosivos hídricos (erosão provocada pelo escoamento superficial). Ambos foram realizados no Estado de São Paulo em áreas naturalmente cobertas por vegetação de Mata Atlântica.

Importante ressaltar que este método empregado para a valoração estima somente uma fração do valor total de um único serviço (retenção de nutrientes do solo) e utiliza método que também subestima o valor real associado à qualidade da água afetada.

Com base nos valores econômicos por hectare apresentados na Tabela 8.7.2.1, o custo total associado à cobertura de floresta nativa foi de R\$ 1.090.705,20, já para a cobertura de eucalipto foi de R\$ 5.479.268,80. Tendo em vista a extensa ocupação pela cobertura de pastagens, esta implicou em um custo de R\$ 17.201.750,40, contudo, caso a cobertura de eucalipto hipoteticamente venha a substituir completamente a cobertura de pastagem, este custo seria de R\$ 49.930.801,60.

Os valores obtidos indicam maior custo por hectare incorrido em solos com cobertura de silvicultura. Estudos realizados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Espírito

Santo, empregando métodos de quantificação da erosão de solo, indicam maiores perdas de solo e nutrientes por processos erosivos em solos cobertos por eucalipto em ciclos de produção industrial (SARCINELLI, 2008; SARCINELLI et al, 2009; ANDRADE, 2010; VENTURIN, 2011; OLIVEIRA, 2011).

A partir destes dados foi possível observar que os maiores custos de reposição estão associados às práticas de silvicultura, enquanto a cobertura florestal nativa apresenta menores perdas por processos de lixiviação, e assim, consequentemente, menor custo hipotético de reposição destes.

Estes dados reforçam o que foi indicado por Lima (1993) que a prática de plantações arbóreas de rápido crescimento, em regimes de rotação para abastecimento industrial, ao contrário das silviculturas de eucalipto de maior idade, pode conduzir à degradação da qualidade da água. Isto ocorre em função das práticas silvícolas que propiciam a exposição e degradação do solo (devido ao corte, uso de maquinários, etc), a lixiviação de nutrientes e agroquímicos e contaminação dos corpos hídricos.

Pode-se perceber que, apesar do comportamento das monoculturas de eucalipto se assemelharem em alguns aspectos ao da vegetação natural, vide valores de evapotranspiração, excedente hídrico, etc, o valor econômico associado à qualidade do serviço fornecido pelas coberturas vegetais aponta que a floresta nativa apresenta maiores benefícios. Não obstante, estudos locais acerca das taxas de escoamento superficial, lixiviação de nutrientes (e outros produtos inorgânicos utilizados) e perdas de solo são indicadas para maior precisão e acurácia desta análise. No entanto, a partir dos dados secundários utilizados pode-se indicar a necessidade de consideração destes aspectos além do simples consumo de água.

CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo teve como objetivo verificar os impactos de ordem hidrológica da implantação da atividade de silvicultura de eucalipto para produção de celulose no trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Os resultados obtidos a partir das análises realizadas indicam que as principais coberturas vegetais da bacia (eucalipto, floresta nativa e pastagem) concorrem pelo uso da água verde em meses de menor precipitação, diminuindo o serviço de provisão de água para a bacia.

Tendo em vista o histórico de uso e ocupação do solo, não se pode afirmar que o impacto pela concorrência por uso da água deve-se exclusivamente à existência da atividade de silvicultura, pois esta vêm substituindo áreas de pastagens. No entanto, observou-se que maiores valores de evapotranspiração e menores valores de excedente hídrico foram obtidos para a cobertura de eucalipto em comparação com as demais coberturas vegetais (nativa e pastagem).

Não obstante a concorrência existente entre o consumo de água verde pelas coberturas vegetais da bacia, observou-se concorrência também em relação aos demais usuários da bacia. Isto ocorre por que se observou que nos meses mais secos do ano ocorre baixa ou nula produção de água em função direta da precipitação no trecho analisado da bacia hidrográfica, ou seja, nos períodos de menor precipitação ocorre quadro de criticidade quantitativa.

No período de menor precipitação predominam outros processos hidrológicos, no qual os corpos hídricos superficiais são mantidos pelo fluxo de água subterrânea, associada à capacidade de infiltração de água no solo da bacia, bem como a gestão dos reservatórios existentes na região.

Este comportamento está associado à serviço de provisão de água. Quanto a análise deste serviço, pode-se verificar que, apesar de sua semelhança à vegetação nativa em relação ao uso da água (evapotranspiração), são necessários estudos mais aprofundados e específicos para verificar localmente o impacto sobre o escoamento subsuperficial, superficial e recarga de aquíferos proporcionado. Isto por que os dados analisados e resultados obtidos neste estudo não permitiram compreender claramente quais as alterações provocadas pela silvicultura de eucalipto sobre a disponibilidade quantitativa de água, associada aos escoamentos e recarga de água subterrânea, comparadas à pastagem e floresta nativa.

Em relação à qualidade da água, a revisão e análise dos diversos trabalhos consultados indicou que o serviço ecossistêmico relacionado à redução de processos erosivos e de lixiviação de nutrientes do solo fornecido pela floresta nativa é mais eficiente na diminuição da quantidade de nutrientes e sedimentos que chegam aos corpos hídricos quando comparados ao cultivo de eucalipto, principalmente em ciclos rápidos de corte para produção industrial (em torno de 7 anos).

Sendo assim, é possível inferir que a silvicultura não produz serviço ambiental (SA) - substituto ao serviço ecossistêmico fornecido pela cobertura nativa - com mesma qualidade. Ao não produzir o SA com mesma qualidade, pode-se indicar que ocorre o impacto negativo da atividade sobre a qualidade da água da bacia.

Outra questão que não se pode deixar de considerar em relação à qualidade da água seria a pegada hídrica cinza da silvicultura, cujo o uso indireto de água foi de $275,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, ou se considerada a produção anual de celulose, o valor passa para 32 milhões de m^3 por ano, que representa um volume considerável, tendo em vista a disponibilidade hídrica da região.

Não obstante, é importante pontuar a partir destes resultados, que o emprego do método de quantificação da PH sem a consideração de análises adicionais que embasem e ampliem a discussão de seus resultados pode incorrer em um reducionismo, quando realizada uma análise comparativa do consumo de água por parte de coberturas vegetais antropizadas e naturais.

Como visto, somente a análise de PH indicaria que o consumo de água por parte da atividade de silvicultura é menor que o da floresta nativa. No entanto, há necessidade de uma análise que integre o consumo de água verde pelas coberturas e os serviços ecossistêmicos e ambientais para embasamento de tomada de decisão.

Tanto a PH como o método de balanço hídrico climatológico apresentaram necessidade de complementação e integração a outras análises. A limitação destes métodos exige que suas análises sejam feitas de maneira cuidadosa, com embasamento e integração a análises adicionais que complementem seus resultados de forma a considerar mais amplamente os impactos do consumo da água, inseridos dentro de um contexto de compreensão do comportamento hidrológico da bacia.

Como pesquisas futuras, identificou-se a necessidade de investigação para a determinação da real concentração dos nutrientes carreados via escoamento para os corpos hídricos, a fim de determinar quantitativamente o impacto da atividade de silvicultura de

eucalipto sobre a qualidade da água da bacia no qual está inserida. Ainda relacionado à qualidade da água, aponta-se a importância da verificação contextualizada do comprometimento da água cinza na bacia.

Também se verificou a necessidade de medição *in situ* da produção de escoamento superficial e sub superficial pelas distintas coberturas vegetais. Desta forma seria possível determinar com maior precisão o impacto sobre o serviço de provisão de água, bem como sobre a disponibilidade de água cinza (volume de água necessária para diluição de poluentes para atender o padrão de qualidade exigido) associada à qualidade da água da bacia.

Por fim, não se pode deixar de citar e destacar a fundamental importância da consideração dos aspectos socioambientais relacionados à atividade de silvicultura em estudos posteriores a este. Isto se faz importante, uma vez que nesta pesquisa foram considerados somente impactos de ordem hidrológica e alguns aspectos de serviços ecossistêmicos e não se ignora o fato da possibilidade de conflitos desta atividade econômica com comunidades que são afetadas direta ou indiretamente por suas atividades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF. Anuário estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas de 2010 ano base 2009/ ABRAF. – Brasília, 2010.
- AB’SABER, A. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- AB’SABER, A. Os domínios morfo-climáticos na América do Sul: primeira aproximação Geomorfológica. São Paulo: IG/USP, 1977.
- AGRITEMPO. Evapotranspiração potencial (ETP). Disponível em:
<http://www.agritempo.gov.br/modules.php?name=Encyclopedia&op=content&tid=9>.
 Acessado em: 14/01/2013.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. Rev. Árvore. 2003, vol.27, n.2, pp. 159-170.
- ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; SOUZA, C. A. M. Relação entre cobertura florestal e resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 2507-2513.
- ALLAN, J.A (2003) Virtual water - the water, food and trade nexus: useful concept or misleading metaphor? Water International, 28, 4-11.
- ALDAYA, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. (2010) The water needed for Italians to eat pasta and pizza, Agricultural Systems, 103: 351-360.
- ALDAYA, M.M.; LLAMAS, M.R. (2008) 'Water footprint analysis for the Guadiana river basin', Value of Water Research Report Series No.35, UNESCO-IHE.
- ALDAYA, M.M.; MARTINEZ-SANTOS, P.; LLAMAS, M.R. (2010) Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain, Water Resources Management 24(5): 941-958.

- ALVES, L. S.; ZAU, A. S.; OLIVEIRA, R. R.; LIMA, D. F.; MOURA, C. J. R. SUCESSÃO FLORESTAL E GRUPOS ECOLÓGICOS EM FLORESTA ATLÂNTICA DE ENCOSTA, ILHA GRANDE, ANGRA DOS REIS / RJ. Rev. Univ. Rural, Sér. Ci. Vida. Seropédica, RJ, EDUR, v. 25, n. 1, Jan.-Jun., p.26-32, 2005.
- AMARAL, K. J. USO DE ÁGUA EM INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE SOB A ÓTICA DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2008. Dissertação (Mestrado). PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- AMAZONAS, M. C. Economia do Meio Ambiente: uma análise da abordagem Neoclássica a partir de marcos Evolucionistas e Institucionalistas. Campinas: UNICAMP, 1994. Dissertação (Mestrado), Instituto de Economia da Unicamp, Campinas, 1994.
- AMAZONAS, M. C. Pagamentos por Serviços Ambientais: Alguns Pontos Críticos. VIII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, Cuiabá, 04 de agosto de 2009.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Bacia do rio Paraíba do Sul. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/Bacia%20Para%C3%ADba%20do%20Sul.pdf>. Acessado em: 16/03/2012.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Região Hidrográfica Atlântico Sudeste - Região enfrenta sérios problemas por causa da escassez de água. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/AtlanticoSudeste.aspx>. Acessado em: 17/01/2014.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). GEO Brasil Série Temática : GEO Brasil Recursos Hídricos. Brasília: ANA, MMA, 2007.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Informe 2012. Brasília: ANA, 2012
- ANDRADE, D. C. MODELAGEM E VALORAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS: UMA CONTRIBUIÇÃO DA ECONOMIA ECOLÓGICA. Tese (Doutorado). Progra de Pós Graduação do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas: UNICAMP, 2010.

- ANDRADE, D. C. & ROMEIRO A. R. Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem estar humano. Texto p/ Discussão 155. IE/UNICAMP, 2009a.
- ANDRADE, D. C. & ROMEIRO A. R. Capital natural, serviços ecossistêmicos e sistema econômico: rumo a uma “Economia dos Ecossistemas” Texto p/ Discussão 159. IE/UNICAMP, 2009b.
- ANDRADE, F. M. B. Produção de forragem e valor alimentício do capim-Marandu submetido a regimes de lotação contínua por bovinos de corte. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciência animal e Pastagens da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. São Paulo: ESALQ, 2003.
- ANIDO, N. M. R. Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental. 2002. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2002.
- APTA. Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios. PLANTIO DIRETO DE MANDIOCA NO VALE DO PARAÍBA-SP. Relatório apresentado a Fundação Agrisus. Pindamonhangaba, 2012.
- ARCOVA, F. S. C. Balanço Hídrico, características do deflúvio e calibragem de duas microbacias hidrográficas na serra do mar, SP. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba: 1996, 130 p.
- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. Water quality in small watersheds with different land uses in Cunha region, State of São Paulo. SCIENTIA FORESTALIS, n. 56, p. 125-134, dez. 1999.
- ARGUELLO, F. V. Expansão do eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica Paraíba do Sul. Dissertação (Mestrado). Curso de Ciências Ambientais do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. Taubaté, 2010.
- ARGUELLO, F. V.; BATISTA, G. T.; PONZONI, F. J.; DIAS, N. W. Distribuição espacial de plantios de eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica Rio Paraíba do Sul, Brasil. Ambi-Agua, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 133-146, 2010.

- BACELLAR, L. A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 39 p. Disponível em: <http://www.degeo.ufop.br/geobr>. Acessado em: 28/02/2012.
- BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. The forest role in the hydrological cycle at hydrological basins. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 4 n. 1, p. 131 – 149, 2008.
- BARRETO, C. E. A. G. Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Saneamento e Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos (USP). São Carlos, 2006.
- BASSA, A. G. M. C.; SILVA JUNIOR, F. G.; SACON, V. M. Mixtures of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* and *Pinus taeda* wood chips for kraft pulp production by Lo-Solids® process. *Sci. For.*, Piracicaba, n. 75, p. 19-29, set. 2007.
- BAUMHARDT, E. BALANÇO HÍDRICO DE MICROBACIA COM EUCALIPTO E PASTAGEM NATIVA NA REGIÃO DA CAMPANHA DO RS. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Santa Maria: UFSM, 2010.
- BELLOTE, A. F. J. Cultivo do Eucalipto – Nutrição, dubação e Calagem – Recomendação de calagem. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 4. Versão Eletrônica, Ago., 2003. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/05_05_recomendacao_de_calagem.htm. Acessado em: 05/09/2012.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Cultivo de Eucalipto – Nutrição adubação e Calagem. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 4 1678-8281, Versão Eletrônica, Ago./2003. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/05_01_importancia_da_nutricao_mineral.htm. Acessado em: 06/09/2012.
- BOELEN, R.; VOS, J. The danger of naturalizing water policy concepts: Water productivity and efficiency discourses from field irrigation to virtual water trade. *Agricultural Water Management* 108 (2012) 16– 26.
- BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Relatório Estatístico Anual – 2010/2011, 2012a. Disponível em:

<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2010.pdf>. Acessado em: 13/03/2012.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Dados do setor – Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>. Acessado em: 28/09/2012.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Dados do Setor – Março de 2011, 2011a. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/booklet/booklet.pdf>. Acessado em: 13/01/2012.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Dados do Setor – Dezembro de 2013. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf>. Acessado em: 18/01/2014.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. Relatório Florestal 2010 - 2011, 2011b. Disponível em: http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/public/RA02-RelatorioFlorestal_2010.pdf. Acessado em: 08/02/2012.

BRACELPA. História. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/170>. Acessado em: 07/01/2012.

BRASIL. CDI - Conselho de Desenvolvimento Industria. Resolução numero 11 de 16 de março de 1972. Seção 1 - Diário Oficial da União de 16/03/1972.

BRASIL. Lei Nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm. Acessado em: 17/03/2012.

BRASIL. DECRETO Nº 6.591, DE 1º DE OUTUBRO DE 2008. Altera a denominação do Comitê instituído pelo Decreto no 1.842, de 22 de março de 1996, e acresce parágrafo único ao seu art. 1o. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6591.htm. Acessado em: 27/02/2012.

- BRITEZ, R. M.; BORGO, M.; TIEPOLO, G.; FERRETI, A.; CALMON, M.; HIGA, R. Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do sul do Brasil. Colombo: Embrapa, 2006.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. IPEF: Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras, Circular Técnica nº 52, 1979.
- BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; GREGERSEN, H. M.; DEBANO, L. F. Hydrology and the management of watersheds. Blackwell Publishing, Iowa, 3^o edition, 2003.
- BRUIJNZEEL, L.A., 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. IHP. IAHS. UNESCO.224p.
- BULSINK, F., HOEKSTRA, A.Y. AND BOOIJ, M.J. (2010) The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products, Hydrology and Earth System Sciences, 14(1): 119–128. DALY, H.; FARLEY, J. Economia Ecológica: princípios e aplicações. Lisboa: Instituto Piaget, 2004.
- BURGER, D.M. ; DELITTI, W.B.C. Allometric models for estimating the phytomass of a secondary Atlantic Forest area of southeastern Brazil. Biota Neotrop, 8(4): 131-136. 2008.
- CALDER, I.R. THE INFLUENCE OF LAND USE ON WATER YIELD IN UPLAND AREAS OF THE U.K. Journal of Hydrology, 88, 201-211, 1986.
- CALDER, I. R. Hydrologic effects of land use change. In: Handbook of hidrology. Cap.13. 1992.
- CAMPHORA, A. L.; MAY, P. H. A valoração ambiental como ferramenta de gestão em unidades de conservação: há convergência de valores para o bioma Mata Atlântica?. MEGADIVERSIDADE, V 2, N. 1-2, 2006.
- CAMPOS, M. C. O papel do Estado brasileiro na expansão do complexo da soja. In: XII Coloquio Internacional de Geocritica. 2012. Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/coloquio2012/actas/14-M-Campos.pdf>
- CANO, W. Desequilíbrios regionais e concentração industrial no Brasil (1930 – 1970). 3^a ed. São Paulo: Editora Unesp, 2007.

- CANOVA, N. A cultura do eucalipto e o consumo de água. BRACELPA, 2013. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/?q=node/567>. Acessado em: 15/06/2013.
- CARRIELLO, F.; VICENS, R. S. Silvicultura de eucalipto no vale do Paraíba do Sul/SP no período entre 1986 e 2010. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, 2011.
- CAVALCANTE, R. B. L. Planejamento de povoamento de eucalipto com condicionantes hidrológicos: um estudo de caso em Eldorado do Sul (RS). Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- CBD. Convention on Biological Diversity. Global strategy for plant conservation. CBD: Montreal, Canada, 2002. Disponível em: www.cbd.int. Acessado em: 09/04/2012.
- CDB. Convention on Biological Diversity. The Convention on Biological Diversity Plant Conservation Report: A Review of Progress in Implementing the Global Strategy of Plant Conservation (GSPC). CBD: Montreal, Canada, 2002. Disponível em: www.cbd.int. Acessado em: 09/04/2012.
- CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: CEIVAP, sd - <http://ceivap.org.br>. Acessado em: 27/02/2012.
- CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Deliberação CEIVAP n.º 65/2006 de 28 de setembro de 2006 - Estabelece mecanismos e propõe valores para a cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a partir de 2007. Disponível em: <http://ceivap.org.br/downloads/Deliberacao%20CEIVAP%2065%20-%202006%20Cobranca%20-%20aprovada%20Plenaria%20CEIVAP%20Resende%20-%2028-09-06.pdf>. Acessado em: 05/02/2013.
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Qualidade das águas superficiais do Estado de São Paulo de 2007 – Série Relatórios. São Paulo: CETESB, 2008.
- CHAPAGAIN, A.K.; HOEKSTRA, A.Y.; SAVENIJE, H.H.G.; GAUTAM, R. (2006a). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*, 60 (1). pp. 186-203.

- CHAPAGAIN, A.K.; HOEKSTRA, A.Y.; SAVENIJE, H.H.G. (2006b) Water saving through international trade of agricultural products, *Hydrology and Earth System Sciences* 10(3): 455-468.
- CHAPAGAIN, A.K.; ORR, S. (2010) Water Footprint of Nestlé's 'Bitesize Shredded Wheat'. A pilot study to account and analyse the water footprints of Bitesize Shredded Wheat in the context of water availability along its supply chain, WWF (WFN).
- CHAPAGAIN, A.; TICKNER, D. Pegada Hídrica: Evolução do conceito e sua utilidade na prática. In: EMPINOTTI, V.; JACOBI, P. R. Pegada Hídrica – Inovação, corresponsabilização e os desafios de sua aplicação. São Paulo: Anablume, Procam, IEE; Brasília: CNPq, 2012.
- CICCO, V. Determinação da evapotranspiração pelo métodos dos balanços hídricos e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Geografia Física da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humana da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- CICCO, V.; ARCOVA, F. C. S.; RANZINI, M.; SANTOS, J. B. A.; FORTI, M. C. Recursos hídricos na Mata Atlântica: estudo de caso do Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, Cunha – SP. Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro 2007, p. 25-33.
- CIIAGRO. Centro Integrado de Informações Meteorológicas. Balanço Hídrico. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/Definicoes/BalancoH%C3%ADrico.htm>. Acessado em: 17/03/2012.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo hidrologia. Rio Grande do Sul: IPH UFRGS, 2008. Disponível em: http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html. Acessado em: 06/09/2012.
- COPPETEC. Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente. Plano de Recursos Hídricos para a Fase Inicial da Cobrança na Bacia do Rio Paraíba do Sul - Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos - PGRH-RE-010-R0 - Volume 1. Agencia Nacional de agua, COPPETEC, 2002.

- COPPETEC. Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Plano de Recursos Hídricos Consolidado - Resumo. Relatório contratual R-10 para Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP. Resende: AGEVAP, 2007.
- COPPETEC. Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente. Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo: Diagnóstico dos Recursos Hídricos - Relatório Final. Relatório contratual para Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP Resende: AGEVAP, 2006.
- COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; TSUKAMOTO FILHO, A. A. Florestas plantadas para energia: aspectos técnicos, sócio-econômicos e ambientais. In: CONFERÊNCIA - SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA NO BRASIL: OS PRÓXIMOS VINTE ANOS, 2002. Campinas: UNICAMP, 2002 .
- DANTAS, M. E.; COELHO NETO, A. L. Resultantes geo-hidroecológicas do ciclo cafeeiro (1780-1880) no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul: uma análise quali-quantitativa. Anuário do Instituto de Geociências, v. 19, 1996.
- DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R.M. J. A typology for the classification, description, and valuation of ecosystem function, goods, and services. Ecological Economics, v. 41, p. 393–408, 2002.
- DE STEFANO, L.; LLAMAS, M. R. Water, Agriculture and the Environment in Spain: can we square the circle?. Londres: CRC Press/Balkema, 2013.
- DELGADO-ROJAS, Juan S.; NOVAES, Marcelo; LOURENCO, Leandro F. and COELHO, Rubens D.. Evapotranspiração máxima do capim "Tanzânia" (*Panicum maximum* J.) em pastejo rotacionado, baseada na evaporação do tanque "Classe A " e no índice de área foliar. Eng. Agríc., vol.24, n.1, pp. 226-234. 2004.
- DESVOUSGES, W.; JOHNSON, F. R.; BANZHAF, H. S Environmental Policy Analysis with Limited Information: Principles and Applications of the Transfer Method. Aldershot and Lyme, NH: Edward Elgar, 1998.
- DEUS, E. O papel da escavação das formigas do gênero *Atta* na hidrologia de encostas em áreas de pastagem – Bananal (SP). Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 1991.

- DIAS, N. W.; BATISTA, G. T.; CATELANI, C. S. Preferências topográficas das áreas cultivadas com eucalipto no Vale do Paraíba Paulista. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, 2011.
- DINIZ, H. N.; GALINA, M. H.; TEIXEIRA BATISTA, G.; SANTOS TARGA, M. Hidrogeologia da Várzea do Rio Paraíba do Sul: estudo de caso de uma área de mineração no município de Tremembé, SP, Brasil. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 5, núm. 3, 2010, pp. 76-107
- DITT, E. H; MOURATO, S.; GHAZOUL, J.; KNIGHT, J. Forest conversion and provision of ecosystem services in the Brazilian Atlantic Forest. *Land Degrad. Develop.* 21: 591–603, 2001.
- DOMINGOS, M; MORAES, R. M.; VUONO, Y. S.; ANSELMO, C. E.. Produção de serapilheira e retorno de nutrientes em um trecho de Mata Atlântica secundária, na Reserva Biológica de Paranapiacaba, SP. *Rev. bras. Bot.*, vol.20, n.1, pp. 91-96, 1997.
- DONATO, C. F.; RANZINI, M.; CICCIO, V.; ARCOVA, F.C S.; SOUZA, L.F. S. Balanço de massa em microbacia experimental com Mata Atlântica, na Serra Do Mar, Cunha, SP. *Rev. Inst. Flor.*, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 1-11, jun. 2008.
- DUMONT, A.; LOPEZ-GUNN, E.; LLAMAS, R. La huella hídrica extendida de las aguas subterráneas en el Campo de Dalías (Almería, España). *Congreso Ibérico sobre las Aguas Subterráneas*, Zaragoza, 14-17 septiembre, 2011.
- EMPINOTTI, V.L.; WARNER, J. Água Virtual e Pegada Hídrica: as contribuições e desafios que estes conceitos trouxeram à maneira como discutimos os recursos hídricos. São Paulo: Annablume, 2012.
- ERCIN, A.E., ALDAYA, M.M. AND HOEKSTRA, A.Y. (2009) A pilot in corporate water footprint accounting and impact assessment: The water footprint of a sugar-containing carbonated beverage, *Value of Water Research Report Series No.39*, UNESCO-IHE.
- ERCIN, A.E.; ALDAYA, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. (2011a) Corporate water footprint accounting and impact assessment: The case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage, *Water Resources Management*, 25(2): 721-741.
- ERCIN, A.E.; ALDAYA, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. (2011b) The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products, *Value of Water Research Report Series No.49*, UNESCO-IHE.

- FAGUNDES, H. A. V. Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande Do Sul. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- FAO. Food and Agriculture Organization. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> >. Acessado em: 06/09/2012.
- FCR. Fundação Christiano Rosa. Plano de Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul – UGRHI 02 – 2009 – 2012. Piquete, SP: CBH-PS/FEHIDRO, 325 p., 2009
- FERRARI, M. P. Cultivo de Eucalipto – Produção de mudas. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 4. Versão Eletrônica, Ago., 2003. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/index.htm>. Acessado em: 05/09/2012.
- FERRARO, M. R. A modernização da agricultura e da silvicultura paulista – início do século XX. Anápolis: Universidade Federal de Goiás, 2010.
- FEREZ, A. P. C. Efeitos das praticas silviculturais sobre as taxas iniciais de sequestro de carbono em plantios de restauração de Mata Atlântica. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais da da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.
- FIBRIA. Institucional – Compromissos. 2013. Disponível em: <http://www.fibria.com.br/web/pt/institucional/compromissos.htm>. Acessado em: 05/08/2013.
- FIBRIA. Relatório de Sustentabilidade 2011. Fibria Celulose S.A., 2012. Disponível em: http://www.fibria.com.br/rs2011/Fibria_Relatorio_de_Sustentabilidade_2011.pdf. Acessado em: 03/05/2013.
- FIOCRUZ – Fundação Oswaldo Cruz; FASE – Federação de Orgãos para Assistência Social e Educacional. Mapa de conflitos envolvendo injustiça ambiental e Saúde no Brasil . Disponível em: <http://www.conflitoambiental.iciet.fiocruz.br/>. Acessado em: 10/12/2013.

- FOELKEL, C. “Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores”. Eucalyptus Newsletter, n. 2, out. 2005.
- FORTI, M. C. Ciclos biogeoquímicos e transferências de espécies químicas nas interfaces de ecossistemas terrestres de Mata Atlântica: Estudo de duas áreas contrastantes. São José dos Campos: INPE, 2003. <http://mtc-m05.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.04.10.14/doc/forti9547PRP.pdf>. Acessado em: 23/02/2012.
- FREITAS JUNIOR, G.; MARSON, A. A. Biogeografia aplicada ao diagnóstico ambiental em áreas rurais degradadas no Vale do Paraíba paulista. Anais II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade, Taubaté, Brasil, 09-11 dezembro, 2009.
- FUIJIEDA, M.; KUDOH, T.; CICCIO, V.; CALVARCHO, J. L. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology* 196, 26–46, 1997.
- FUNDACION MAPFRE. Rodríguez, F. C. (Org.). La Huella Hídrica Española en el contexto del cambio ambiental. Madrid: Lufercomp, Fundación Mapfre, 2010.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; PIO VIANA, A.; SANTOS, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da Região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, núm. 4, agosto, pp. 1489-1499, 2008.
- GARRIDO, A.; LLAMAS, R.; VARELA-ORTEGA, C.; NOVO, P.; ALDAYA, M. M. Water Footprint And Virtual Water Trade In Spain. Londres: Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010.
- GERBENS-LEENES, P.W.; HOEKSTRA, A.Y.; VAN DER MEER. Th. (2009) The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply, *Ecological Economics*, 68(4): 1052-1060.
- GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de Adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Nativas. Documentos Florestais, Piracicaba – IPEF, 2005. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/adubacao.asp>. Acessado em: 15/01/2012.

- GUEDES, F. T. P. Qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* e genotipagem a partir de marcadores moleculares TRAP e microssatélites para estudos de associação. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.
- HASELEIN, C. R.; LOPES, M. C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DA MADEIRA DE ÁRVORES MATRIZES DE *Eucalyptus grandis*. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 145-155, 2004.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.
- HILGEMBERG, E. M.; BACHA, C. J. C. A evolução da indústria brasileira de celulose e sua atuação no mercado mundial. Análise Econômica, ano 18, nº 33, Porto Alegre, 2000.
- HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. Energia e meio ambiente. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- HOEKSTRA, A.Y. (2003). ‘Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade’ ,Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE.
- HOEKSTRA, A.Y., CHAPAGAIN, A.K., ALDAYA, M.M. and MEKONNEN, M.M. (2009) Water footprint manual: State of the art 2009, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands.
- HOEKSTRA, A.Y., CHAPAGAIN, A.K. (2007). The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities, Ecological Economics 64(1): 143-151.
- HOEKSTRA, A.Y., HUNG, P.Q. (2005). Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade, Global Environmental Change,15(1): 45-56.
- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard, Earthscan, London, UK.

- HOEKSTRA, A.Y. AND HUNG, P.Q. (2002). 'Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade'. Value of Water Research Report Series, No.11, UNESCO-IHE.
- HOWELL, T.A.; EVETT, S.R. The Penman-Monteith method. In: Evapotranspiration: Determination of Consumptive Use in Water Rights Proceedings. Section 3, Continuing Legal Education in Colorado, Inc. Denver, CO, 2004.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010: população do Brasil é de 190.732.694 pessoas. Comunicação Pessoal: 2010. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1766. Acessado em: 13/03/2012.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Primeiros dados do Censo 2010 – Censo Demográfico 2000 – 2010. Disponível em: http://www.censo2010.ibge.gov.br/primeiros_dados_divulgados/index.php. Acessado em: 13/03/2012.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da extração vegetal e da silvicultura. Ministério do Planejamento. Rio de Janeiro, Orçamento e Gestão, v. 26, 55 p., 2011.
- IFC, LimnoTech, Jain Irrigation Systems and TNC (2010) Water footprint assessments – Dehydrated onion products, Micro-irrigation systems – Jain Irrigation Systems Ltd. , International Finance Corporation, Washington, D.C., USA.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DO BRASIL 1961-1990. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/>. Acessado em: 05/02/2013.
- JORGE, M. M. O. Emergência e consolidação do "padrão eucalipto" na indústria brasileira de celulose de mercado. Campinas, Dissertação (M.estrado). Programa de Pós Graduação do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. O setor de celulose e papel. Rio de Janeiro: BNDES, 2001.

KC-BRASIL. Kimberly Clark Brasil. Case Global. 2012. Disponível em: <http://www.kcessencial.com.br/PaginaInterna.aspx?id=160&t=n>. Acessado em: 05/08/2013.

KIMBERLY-CLARK. Neve completa seu ciclo sustentável com embalagens verdes. Press Release, São Paulo, 2012. Disponível em: http://www.kimberly-clark.com.br/data/files/pressrelease/doc/20130521172038_neve---sustentabilidade-em-produto-vf.pdf. Acessado em: 08/05/2013.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.; MARCELINO, I.; MARCELINO, E.; GONÇALVES, E.; BRAZETTI, L.; GOERL, R.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006. 124p. Disponível em: [http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20\(Prevencao%20de%20Desastres%20Naturais\).pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20(Prevencao%20de%20Desastres%20Naturais).pdf).

KURTZ, B. C.; ARAÚJO, D. S. D. Composição florística e estrutura do componente arbóreo de um trecho de Mata Atlântica na Estação Ecológica Estadual do Paraíso, Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro, Brasil. Rodriguésia n. 51, 78/115, p. 69-112, 2000.

LARA, A.; LITTLE, C. URRUTIA, R.; McPHEE, J. ÁLVARES-GARRETÓN, C. Water provision as an ecosystem service of native forests compared to exotic forest plantations in Southern Chile. XIV World Water Congress, 25 a 29 de SETERMBRO, Porto de Galinhas, Recife, PE, Brasil, 2011.

LARA, A.; LITTLE, C. URRUTIA, R.; McPHEE, J. ÁLVARES-GARRETÓN, C.; OYARZÚN, C.; SOTO, D.; DONOSO, P.; NAHUELHUAL, L.; PINO, M.; ARISMENDI, I. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management* 258, 415–424, 2009.

LARA, A.; SOLARI, M. E.; PRIETO, M. R.; PENA, M. P. Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° - 43° 30' S). *Bosque (Valdivia)* [online]. 2012, vol.33, n.1, pp. 13-23. ISSN 0717-9200.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; STAPE J. L.; MENDONÇA, E. S.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; PAUL, K.; SCHULTHAIS, F.; POLGLASE, P.; RAISON, J.; SOARES, E. M. B. Modeling changes in organic carbon stocks for distinct soils in southeastern Brazil after four eucalyptus rotations using the century model. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:833-847, 2011.

- LIMA, J. E.F.W.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. *Rev. bras. eng. agríc. Ambiente*, vol.5, n.1, pp. 33-41, 2001.
- LIMA, W. P. *Impacto Ambiental do Eucalipto*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993.
- LIMA, W. P. *Plantation Forestry and Water Science, Dogmas, Challenges. Writings of The Dialogue – Volume 01*. Rio de Janeiro: Instituto de Botânica, 2011.
- LIMA, W. P. *Hidrologia Florestal aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas*. Piracicaba: Esalq, 2008. Disponível em: <http://www.ipef.br/hidrologia/hidrologia.pdf>. Acessado em: 09/02/2012.
- LIMA, W. P.; FONTANA, C. R.; CAMARA, C. D.; VOIGTLAENDER, M.; FREITAS, M. A. L. *Promab: Histórico, Fundamentos e Conquistas. Documentos Técnicos IPEF*, v.1, n.1, 2008.
- LIMA, W. P. MOREIRA, R. M.; SCÁRDUA, F. P.; MASETTO, A. V. The hydrology of a small catchment covered with 50-year old Eucalyptus plantation in the Itatinga forest experimental station, State of São Paulo. *Scientia Florestalis*, n. 50, p. 11 – 19, dez, 1996.
- LIMA, W. P; ZAKIA, M. J. B.; LIBARDI, P. L.; SOUZA FILHO, A. P. Comparative evapotranspiration of eucalyptus, pine and natural “cerrado” vegetation measure by the soil water balance method. *IPEF International* (1), Piracicaba: p.5-11, 1990.
- LINO, C. F.; DIAS, H. *Águas e Florestas da Mata Atlântica: Por uma Gestão Integrada*. São Paulo : CNRBMA/SOS 2003.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências Hidrológicas Da Bacia Do Rio Paraíba Do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, 215-226, 2005.
- MARM (2008). Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. *BOE*, n. 299, p. 38472 a 38582, 2008.
- MARTINEZ-ALIER, J. *O ecologismo dos pobres: conflitos ambientais e linguagens de Valoração*. São Paulo: Contexto, 2007.

- MAY, P.H.; TROVATTO, C.M.M (Coord.). Manual Agroflorestal para a Mata Atlântica. Ministério do Desenvolvimento Agrário, Brasília, 2008. 196 p.
- MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT: Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC; 2005.
- MEDEIROS, J. X. Aspectos econômico-ecológicos da produção e utilização do carvão vegetal na Siderurgia brasileira. In: MAY, P. H. Economia Ecológica. Rio de Janeiro, Campus, 1995. p. 83-114.
- MEKONNEN, M.M. and HOEKSTRA, A.Y. (2010a) The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, Value of Water Research Report Series No.48, UNESCO-IHE.
- MEKONNEN, M.M. and HOEKSTRA, A.Y. (2010b) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No.47, UNESCO-IHE.
- MEKONNEN, M.M. and HOEKSTRA, A.Y. (2011) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Hydrology and Earth System Sciences, 15(5): 1577-1600.
- METZGER, J. P. O Código Florestal tem Base Científica?. *Natureza & Conservação*, v. 8, nº 1, p. 92-99, 2010.
- MINGOTI, R. Produção de sedimentos em microbacias hidrográficas em função do relevo e da cobertura florestal. (Tese de Mestrado). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2009. 101p.
- MMA y MRM – Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Sostenibilidad y Territorio: Huella Hídrica de España. Madrid: Publicaciones oficiales, 2011.
- MORRIS, J; NINGNAN, Z; ZENGJIANG, Y.; COLLOPY, J.; DAPING, X. Water use by fast-growing *Eucalyptus urophylla* plantations in southern China. *Tree Physiology* 24, 1035–1044, 2004.
- MORRISON, J. AND SCHULTE, P. Corporate water accounting: An analysis of methods and tools for measuring water use and its impacts. UNEP, The Global Compact CEO Water Mandate. Oakland: Pacific Institute, 2010. Disponível em:

http://www.pacinst.org/reports/corporate_water_accounting_analysis/corporate_water_accounting_analysis.pdf. Acessado em: 27/02/2012.

NAVRUD , S.; BERGLAND, O. Value Transfer and Environmental Policy. Cambridge Research for the Environment, 2001

NEARY, D. G.; ICE, G. G.; JACKSON, C. R. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*, 13 p., 2009.

NOSETTO, M. D.; JOBBÁGY, E. G.; PARUELO, J. M. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, Volume 11, Issue 7, 1101–1117, 2005.

NOSS, R. F. AND COOPERRIDER, A. Y. Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity, Island Press, Washington, 1994.

OLIVEIRA, P. A. Estratégias de internalização da gestão ambiental: o caso da gestão hídrica na etapa industrial da produção na Companhia Suzano de Papel e Celulose. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental PROCAM/USP. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, R. A. J.; ANGELIS, C. F. Características e tendências da precipitação estimada por satélite sobre uma região de intenso desmatamento na Amazônia Legal: Uma comparação entre áreas de Floresta e Desmatadas. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011.

OLIVEIRA, R. F.; MENEGASSE, L. N.; DUARTE, U. Impacto ambiental do eucalipto na recarga de água subterrânea em área de Cerrado, no Médio Vale Do Jequitinhonha, Minas Gerais. In: *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 2002. Anais.

OLIVETTI NETO, A. Qualidade de Cavacos de Eucalipto para Obtenção de Celulose Kraft. *Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel 2002*, 2002, Campinas - SP. *Anais do Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel 2002*. São Paulo - SP : IPT/USP, 2002.

ORTIZ, R. A. Valoração Econômica ambiental. In: MAY, P. et all *Economia do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.

- PAIVA, E. M. C. D. REGIME DE PRECIPITAÇÃO NA AMAZÔNIA E SUA RELAÇÃO COM O DESMATAMENTO E TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DOMAR. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.
- PEARCE, D. & MORAN, D. O Valor econômico da Biodiversidade. Lisboa: Instituto Piaget, 1994.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAM, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997.
- PRITCHETT, W.L. Properties and Management of Forest Soils. New York: Wiley, John & Sons, Incorporated, 1979.
- QUEIROZ, L. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. A celulose de eucalipto: uma oportunidade brasileira. Vinhedo: Avisbrasilis, 2008.
- RANZINI, M.; LIMA, W. P. Hydrological behaviour, nutrient budget and soil losses in two small catchments planted with Eucalyptus in the Paraíba River Valley, SP. Scientia Forestalis, n. 61, p. 144-159, jun. 2002
- REBOUÇAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas Doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. 3 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006, p. 1-35.
- REIS, L. V. S. COBERTURA FLORESTAL E CUSTO DO TRATAMENTO DE ÁGUAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO: CASO DO MANANCIAL DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Recursos Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2004.
- RIBEIRO, S. C. Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando a geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciencia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.; SOUZA, A. L.; NARDELLI, A. M. B. QUANTIFICAÇÃO DE BIOMASSA E ESTIMATIVA DE

ESTOQUE DE CARBONO EM UMA FLORESTA MADURA NO MUNICÍPIO DE VIÇOSA, MINAS GERAIS. R. Árvore, Viçosa-MG, v.33, n.5, p.917-926, 2009.

RIBEIRO, W. C. Geografia política da água. São Paulo: Annablume, 2008.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

ROMEIRO, A. R. Economia ou Economia Política da Sustentabilidade? In: May, P. et all. Economia do Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.

ROMEIRO, A. R. Avaliação e contabilização de impactos ambientais. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2004.

SALATI, E.; LEMOS, H. M.; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas Doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. 3 ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006, p. 37-62.

SALMORAL, G., DUMONT, A., ALDAYA M.M., RODRÍGUEZ-CASADO R., GARRIDO A. AND LLAMAS M.R. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Papeles de Seguridad Hídrica y Alimentaria y Cuidado de la Naturaleza, No. 1, Fundación Botín, Observatorio Del Agua, Santander, 2011.

SANTOS, J. E.; NOGUEIRA, F.; PIRES, J. S. R.; OBARA, A. T.; PIRES, A. M. Z. C. R. The value of the Ecological Station of Jataí's ecosystem services and natural capital. Rev. Bras. Biol. [online]. 2001, vol.61, n.2, pp. 171-190.

SANTOS, J.E.; NOGUEIRA, F. Funções Ambientais e Valores dos Ecossistemas Naturais – Estudo de Caso: Estação Ecológica de Jataí. In II Congresso Nacional de Unidades de Conservação, Curitiba. IAP: UNILIVRE: Rede Nacional de Pro Unidades de Conservação. 465-477, 1997.

SARCINELLI, O. Análise Econômica da adição de medidas mitigadoras de impactos agro-ambientais: Estudo de caso na microbacia hidrográfica do córrego Oriçanguinha. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação do Instituto de Economia da UNICAMP. Campinas: UNICAMP, 2008.

- SARCINELLI, O.; MARQUES, J. F.; ROMEIRO, A. R. Custos e benefícios da adoção de práticas e medidas para conservação do solo agrícola: um estudo de caso na microbacia hidrográfica do córrego Oriçanguinha. *Informações Econômicas*, SP, v.39, n.4, abr. 2009.
- SATO, A. M. RESPOSTAS GEO-HIDROECOLÓGICAS À SUBSTITUIÇÃO DE PASTAGENS POR PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL: a interface biota-solo-água. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.
- SATO, A. M.; AVELAR, A. S. COELHO NETO, A. L. Hidrologia de encosta numa cabeceira de drenagem com cobertura de eucalipto na bacia do rio Sesmarias: médio vale do rio Paraíba do Sul. *Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico*, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro 2007, p. 147-154.
- SCHETTINO, S. Efeito do Corte de Cipós sobre a Dinâmica de Sucessão, Crescimento e Produção de Uma Floresta Ombrófila Densa Secundária, na Reserva Florestal de Linhares - ES.. 1999. 0 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- SCOPEL, I.; SOUZA M. ; PEIXINHO D.; MARIANO, Z. F.; MENEZES, B. B. Novas Fronteiras Agrícolas: Solos Arenosos e Tecnologias Atuais. In: 12 do Encuentro de Geógrafos de América Latina, 2009, Montevideo. 12 do Encuentro de Geógrafos de América Latina, 2009.
- SETTI, A. A., WERNECK LIMA, J. E. F., CHAVES, A. G. M., PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas. 328 p, 2001.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. BHBRASIL - balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999.
- SEROA DA MOTTA, R. Manual para valoração econômica de recursos ambientais. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente, 1997.
- SEROA DA MOTTA, R. Economia Ambiental. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006

- SHEER, M. B. Fluxo de nutrientes pela precipitação pluviométrica em dois trechos de Floresta Ombrófila Densa em Guaraqueçaba, Paraná. *FLORESTA*, Curitiba, PR, v. 39, n. 1, p. 117-130, 2009.
- SICILIANO, R. O desenvolvimento da Indústria de Papel e Celulose no Brasil (1960-2000) – Champion International Paper: um estudo de caso. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação do Departamento de História da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.
- SILVA, A. M.; RANZINI, M.; GUANDIQUE, M. E. G.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no Município De Cunha – SP. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 24, n. 1, p. 43-53, 2005
- SILVA, C. L. ; SILVA, H. P. E. . Fatores históricos da klabin, papel e celulose, determinantes para o desenvolvimento sócioeconômico do município de Telêmaco Borba-pr. In: SLADE, 2005, Santa Cruz de la Sierra Bolívi. SLADE, 2005. p. 1-16.
- SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A. Cultivo do Eucalipto – Sistemas de plantio. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 4. Versão Eletrônica, Ago., 2003. Disponível em:
http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/04_consideracoes_gerais_sobre_o_plantio.htm. Acessado em: 05/09/2012.
- SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J. Cultivo do Eucalipto – Nutrição, adubação e Calagem. Embrapa Florestas, Sistemas de Produção, 4. Versão Eletrônica, Ago., 2003. Disponível em:
http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/05_01_importancia_da_nutricao_mineral.htm. Acessado em: 05/09/2012.
- SILVA, T. B.; SANTOS, R. M.; AHNERT, F.; MACHADO JR., J. A. Projeto produtores de água: uma nova estratégia de gestão dos recursos hídricos através do mecanismo de pagamento por serviços ambientais. *Rio Claro, Ciência & Tecnologia*, ano VIII, v. 8, nº 3, 2008.
- SILVANO, R. A. M.; UDVARDY, S.; CERONI, M.; FARLEY, J. An ecological integrity assessment of a Brazilian Atlantic Forest watershed based on surveys of stream health and local farmers' perceptions: implications for management. *Ecological Economics* 53, 369– 385, 2005.
- SIMÕES, J.W. Reflorestamento e Manejo de Florestas Implantadas. *Documentos Florestais*, Piracicaba, 1989, 4: 1-29.

- SINISGALLI, P. A. A. Valoração dos danos ambientais de hidrelétricas: estudos de caso. 2005. Campinas: UNICAMP, 2005, 226p. Tese (Doutorado). Instituto de Economia da UNICAMP, Campinas, 2005.
- SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes on a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, 253, pp. 130 – 147, 2001.
- SOSA, P. R. B.; TADEU, N. D. Valoração econômico-ecológica dos impactos decorrentes da existência do Valo Grande sobre o Complexo Estuarino Lagunar Cananéia-Iguape-Paranaguá (CEL-CIP), Litoral Sul de São Paulo/Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Gestão Ambiental) - Universidade de São Paulo, 2010.
- SOTO, F. A. Da indústria de papel ao complexo florestal no Brasil: o caminho do corporativismo tradicional ao neocorporativismo. Tese (Doutorado). Programa de Pós Graduação do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. *Revista Árvore*, v. 30, n. 3, Sociedade de Investigações Florestais, Viosa, Brasil, p. 399 – 410, 2006.
- STROBEL, J. S.; SOUSA JR., W. C.; SEROA DA MOTTA, R.; AMEND, M. R.; GONÇALVES, D. A. Critérios econômicos para a aplicação do princípio do protetor-recebedor: estudo de caso do Parque Estadual dos Três Picos. *Megadiversidade*, v. 2, Nº 1-2, 2006.
- STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; ALBINO, J. C.; MORITA, M. VARIAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE DOZE ESPÉCIES DE Eucalyptus PLANTADAS EM UBERABA, MG. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 14, p.28-38, jun. 1987.
- SVANCARA, L. K.; BRANNON, R.; SCOTT, M. J.; GROVES, G. R.; NOSS, R. F.; PRESSEY, R. L. Policy-driven versus Evidence- based Conservation: A Review of Political Targets and Biological Needs. *BioScience*, 2005 vol. 55 (11) pp. 989-995, 2005.
- TADEU, N. D. ; SINISGALLI, P. A. A. ; SOSA, P. R. B. Funções e Serviços Ecossistêmicos e Serviços Ambientais: Conceitos e Abordagens. In: III Encontro Internacional de Governança da Água, 2011, Sao Paulo. Água e Pagamento por Serviços Ecossistêmicos, 2011.

- TATSCH, J. D. Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre Cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. São Paulo: USP, 2006. TCCC and TNC (2010) Product water footprint assessments: Practical application in corporate water stewardship, The Coca-Cola Company, Atlanta, USA / The Nature Conservancy, Arlington, USA.
- THOMAS, P. T.; GOMES, P. M. Mecanismos de cobrança pelo uso de Recursos Hídricos para o setor de extração de areia da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., 2005, João Pessoa. Anais: ABRH.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.
- TNC. The Nature Conservancy. Cada gota conta. 2012. Disponível em: <http://portugues.tnc.org/comunicacao-midia/destaques/parcerias-corporativas-pela-agua.xml>. Acessado em: 05/08/2013.
- TUCCI, C. E. M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Estudo preparado como contribuição da ANA – Agência Nacional de Águas para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/relclima.PDF>. Acessado em: 14/03/2012.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. IMPACTO DAS MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL NO ESCOAMENTO: REVISÃO. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 2 n.1 Jan/Jun 1997, 135-152.
- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. Cienc. Cult. [online]. 2003, vol.55, n.4, pp. 31-33.
- VALLENGE. Vallenge Consultoria, Projetos e Obras Ltda. RELATÓRIO TÉCNICO - BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL – SUBSÍDIOS ÀS AÇÕES DE MELHORIA DA GESTÃO 2011. Relatório contratual para Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP Resende: AGEVAP, 2011.

- VALERI, S.V.; CORRADINI, L.; AGUIAR, I B.; SOUZA, E.C.A.; BANZATTO, D.A. Efeitos do fósforo e calcário dolomítico no desenvolvimento inicial de *Eucalyptus grandis* plantado em um regossolo. Revista IPEF, Piracicaba, n.29, p.55-60, abr. 1985.
- VAN OEL, P.R. AND HOEKSTRA, A.Y. (2010) The green and blue water footprint of paper products: methodological considerations and quantification, Value of Water Research Report Series No.46, UNESCO-IHE.
- VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. Rev. bras. eng. agríc. ambient. [online]. 2010, vol.14, n.1, pp. 55-64.
- VENTURIN, G. H. Diagnóstico físico conservacionista da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jerusalém, Alegre, ES. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro: UFES, 2011.
- VIANA, M. B. O EUCALIPTO E OS EFEITOS AMBIENTAIS DO SEU PLANTIO EM ESCALA. Biblioteca Digital da Camara dos Deputados – Centro de Documentação e Informação, 2004. Disponível em: http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1162/eucalipto_efeitos_boratto.pdf. Acessado em: 05/03/2012.
- VIANNA, L. G. R.; SATO, A. M.; COELHO NETO, A. L. EXPANSÃO DO EUCALIPTO NO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL: SUBSÍDIOS AOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS DE BACIAS. In: XIII SBGFA - Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa - MG. Anais do XIII SBGFA - Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Viçosa, 2009. p. 01-13.
- VIEIRA, E. L.; SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R.; SANTOS SILVA, J. Manual de Fisiologia Vegetal. São Luis: EDUFMA, 2010.
- VITAL, M. H. F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, V. 14, N. 28, P. 235-276, dez. 2007.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- WCED. World Commission on Environment and Development. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press, 1987.

- WERNECK, M. S.; PEDRALLI, G.; GIESEKE, L. F. Produção de serapilheira em três trechos de uma floresta semidecídua com diferentes graus de perturbação na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto, MG. *Revta brasil. Bot.*, São Paulo, V.24, n.2, p.195-198, jun. 2001.
- WILKINS, A.P. AND HORNE, R.. Wood-density variation of young plantation-grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. *For. Ecol. Manage.*, 40: 39-50, 1991.
- WILLAARTS, B. A.; VOLK, M.; AGUILERA, P. A. Assessing the ecosystem services supplied by freshwater flows in Mediterranean agroecosystems. *Agricultural Water Management* 105, 21– 31, 2012.
- WORLD BANK; WWF. Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use. Running Pure: The importance of forest protected areas to drinking water: A research report for the World Bank / WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use. 2003. Disponível em: http://wwf.panda.org/what_we_do/how_we_work/conservation/forests/publications/?uNewsID=8443. Acessado em: 13/03/2012.
- WUNDER, S. (Coord.) et. al. Pagamentos por Serviços Ambientais Perspectivas para a Amazônia Legal. Ministério do Meio Ambiente. Série Estudos 10. Brasília, 2008.
- ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37: 701-708, 2001.
- ZHOURI, A. Justiça ambiental, diversidade cultural e accountability: desafios para a governança ambiental. *Rev. bras. Ci. Soc.* [online]. 2008, vol.23, n.68, pp. 97-107.
- ZHOURI, A.; ZUCARELLI, M. C. Vozes da Resistência: Mapeando os conflitos ambientais no estado de Minas Gerais. In: 32º Encontro Anual da ANPOCS, Caxambu, 2008.
- ZILBERMAN, I. Introdução à engenharia ambiental. Canoas: Editora ULBRA, 1997.