

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**EMPREGO DA PEGADA HÍDRICA E DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA PARA A  
AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DE  
SOJA**

GABRIEL TIMM MÜLLER

Porto Alegre

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**EMPREGO DA PEGADA HÍDRICA E DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA PARA A  
AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL DE  
SOJA**

**GABRIEL TIMM MÜLLER**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador: Prof. Luiz Fernando Cybis**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira

IPH/UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Saldanha Louzada

IPH/UFRGS

Prof. Dr. Miguel Aloysio Sattler

NORIE/UFRGS

Porto Alegre, julho de 2012.

*Aos meus pais, simplesmente por tudo, e à minha namorada, pela inspiração, companhia e incentivo constantes.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço com toda a sinceridade a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a vencer todas as dificuldades e contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial...

Ao professor Luiz Fernando Cybis, pela orientação, confiança, oportunidade, apoio e ensinamentos fundamentais transmitidos.

Ao IPH, pela oportunidade de aperfeiçoamento.

Ao CNPq, por conceder-me bolsa de mestrado.

À FEPAM, pela disponibilização dos processos administrativos para consulta e pela concessão de diversos dados técnicos, e principalmente aos funcionários do Setor de Protocolo e do Serviço da Região do Guaíba, pela grande prestatividade e colaboração.

Aos produtores rurais e aos funcionários do Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Santa Rosa, pela ótima receptividade e boa vontade em conceder-me importantes informações à pesquisa.

Às empresas produtoras de óleo degomado e de biodiesel de soja visitadas e seus funcionários, pelo excelente atendimento e pela cooperação no fornecimento de dados essenciais à execução deste trabalho.

Ao doutorando e colega, Rafael Zortea, pela fundamental participação, contribuição e apoio no desenvolvimento deste trabalho e, igualmente, pela amizade e bons momentos de convívio.

Aos colegas da FMMA de Gravataí, especialmente ao pessoal do setor de Fiscalização, pelo grande apoio e compreensão pelos atrasos e ausências inevitáveis durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, pela amizade sincera e constante, pelo apoio nas horas difíceis e pelos incontáveis bons momentos, com muitos churras, comemorações, viagens, futebol e, principalmente, muitas risadas. Em especial, aos meus amigos de infância que cresceram junto comigo (aprontando nos “prédios”) e até hoje torcem por mim.

À minha namorada, Gabriela, não só por ter sido uma pessoa essencial na realização deste curso, me dando força nos momentos de desânimo, me fazendo companhia nas noites em claro e tornando tudo mais fácil de ser resolvido com seus pensamentos positivos, mas também pelo amor, carinho, amizade e muitos momentos felizes que tem me proporcionado.

Aos meus pais, Ingo e Leni, pelo amor incondicional e por toda a dedicação, confiança, carinho, educação e ensinamentos de vida que me desenvolveram como pessoa e sustentam a minha caminhada em todos os sentidos. Também ao meu irmão, Yuri, pela amizade, apoio e presença permanente.

## RESUMO

A água é um elemento essencial para a manutenção da vida no planeta que, devido a diversos fatores, está sendo cada vez mais consumido em todo o mundo. Até mesmo em países ricos em recursos hídricos, como o Brasil, nota-se que há um crescimento dos problemas relacionados com a escassez. Diante disso, a avaliação do uso da água no ciclo de vida de produtos e serviços torna-se uma ferramenta importante de gestão, principalmente quando relacionada a produtos derivados de cultivos agrícolas, como o biodiesel. No entanto, entre as técnicas existentes que possibilitam realizar este tipo de análise, o uso da água ou é negligenciado por falta de uma estrutura metodológica consistente, como ocorre em estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV), ou ainda não foi abordado de forma ampla no Brasil, como acontece no caso da Pegada Hídrica. Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o uso da água no ciclo de vida do biodiesel de soja produzido no Rio Grande do Sul, através do emprego da Pegada Hídrica e da construção de um inventário específico para os recursos hídricos que possa ser utilizado, posteriormente, em estudos de ACV. Para tanto, foram coletados dados relacionados às características quantitativas e qualitativas dos fluxos de água, que compõem cada etapa da cadeia produtiva estudada, incluindo a simulação do balanço hídrico do solo realizada para o cultivo da soja. A partir destas informações, foi possível identificar, considerando o escopo deste trabalho, que o valor da Pegada Hídrica total da produção de um litro de biodiesel de soja é de 19785,4 litros, sendo composta por 7,8 litros de Água Azul, 8089,6 litros de Água Verde e 11688 litros de Água Cinza. Quanto ao inventário de ACV, os resultados obtidos para a mesma unidade funcional indicaram que, no ciclo de vida estudado, ocorre o uso consuntivo de 7,8 litros de água e o uso degradativo de outros 240 litros, dos quais 94% retornam com qualidade ainda útil para diversos usos, como por exemplo, a irrigação de cultivos não alimentícios. De forma geral, os resultados de ambas as metodologias apontaram que a etapa em que ocorre o uso mais intensivo da água é a fase agrícola e que a principal forma de diminuição da disponibilidade hídrica é através da degradação da qualidade da água. Por fim, também foi identificado que as principais diferenças e limitações das ferramentas empregadas estão relacionadas à contabilização do consumo de água da chuva e à forma de quantificação da poluição hídrica.

## ABSTRACT

Water is an essential element for sustaining life on the planet that, due to several factors, is increasingly being consumed around the world. Even in countries with abundant water resources, such as Brazil, may be noted that there is a growth in problems related to the scarcity. Thus, the assessment of water use in the life cycle of products and services becomes an important management tool, mainly when related to products derived from agricultural crops, such as biodiesel. However, among the existing techniques that allows performing this type of analysis, the water use or is neglected for lack of a consistent methodological framework, as in studies of the Life Cycle Analysis (LCA), or has not been addressed widely in Brazil, as in the case of the Water Footprint. In this context, this study had as main objective evaluate the water use in the life cycle of soybean biodiesel produced in Rio Grande do Sul, through the application of the Water Footprint and the construction of a specific inventory for water resources that can subsequently be used in LCA studies. For this purpose, were collected data related to quantitative and qualitative characteristics of water flows that compose each phase of the supply chain investigated, including the simulation of soil water balance performed for soybean cultivation. Based on this information, could be identified, considering the scope of this work, that the value of total Water Footprint of production one liter of soybean biodiesel was 19785,4 liters, consisting of 7,8 liters of Blue Water, 8089,6 liters of Green Water and 11688 liters of Grey Water. With respect to the inventory of LCA, the results obtained for the same functional unit indicated that in the life cycle studied there is the consumptive use of 7,8 liters and the degradative use of 240 liters, of which 94% return with quality still useful for several uses, such as irrigation of non-food crops. In general, the results of both methods indicated that the stage where occurs the most intensive water use is the agricultural phase and that the main way to decrease the water availability was through the degradation of its quality. Finally, it was also identified that the main differences and limitations of the tools employed in this study are related to accounting the consumption of rainwater and to the form of the water pollution quantification.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	4
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
3.1 <b>ÁGUA</b> .....	5
3.1.1 A Situação dos Recursos Hídricos.....	5
3.1.2 Usos Múltiplos da Água .....	10
3.1.3 Gestão dos Recursos Hídricos .....	15
3.1.4 Ciclo Hidrológico .....	18
3.1.5 Água e a Demanda Energética.....	24
3.2 <b>MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA</b> .....	26
3.2.1 Pegada Hídrica.....	27
3.2.1.1 <i>Características Gerais</i> .....	27
3.2.1.2 <i>Metodologia da Pegada Hídrica</i> .....	31
3.2.1.3 <i>Pegada Hídrica e Bioenergia</i> .....	38
3.2.2 Análise do Ciclo de Vida (ACV) .....	42
3.2.2.1 <i>Características Gerais</i> .....	42
3.2.2.2 <i>Metodologia da ACV</i> .....	44
3.2.2.3 <i>ACV e o Uso da Água</i> .....	48
3.3 <b>BIODIESEL</b> .....	55
3.3.1 Introdução .....	55
3.3.2 A Situação do Biodiesel.....	56
3.3.3 Cadeia Produtiva do Biodiesel.....	58
3.3.4 Matéria-Prima do Biodiesel.....	62
3.3.4.1 <i>Soja</i> .....	64
<b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....	68
4.1 <b>DEFINIÇÕES GERAIS</b> .....	68
4.1.1 Objetivos.....	68
4.1.2 Unidade funcional e fluxo de referência.....	69
4.1.3 Sistema de produto e delimitação das fronteiras .....	69
4.1.3.1 <i>Subsistema da fase agrícola</i> .....	71
4.1.3.2 <i>Subsistema da fase de produção do óleo degomado</i> .....	75
4.1.3.3 <i>Subsistema da fase de fabricação do biodiesel</i> .....	77

4.1.4	Critérios de alocação.....	80
4.1.5	Procedimentos da Pegada Hídrica .....	81
4.1.5.1	<i>Água Verde</i> .....	81
4.1.5.2	<i>Água Azul</i> .....	83
4.1.5.3	<i>Água Cinza</i> .....	85
4.1.6	Procedimentos do ICV do uso da água.....	87
4.1.6.1	<i>Uso consuntivo</i> .....	87
4.1.6.2	<i>Uso degradativo</i> .....	88
4.1.7	Requisitos da coleta de dados .....	88
4.1.8	Suposições e limitações .....	91
4.2	INVENTÁRIO DE MATERIAIS .....	92
4.2.1	Subsistema da fase agrícola.....	92
4.2.2	Subsistema da fase de produção do óleo degomado.....	104
4.2.3	Subsistema da fase de fabricação do biodiesel .....	109
4.2.4	Inventário final de materiais .....	116
4.3	PEGADA HÍDRICA.....	118
4.4	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO USO DA ÁGUA.....	130
4.5	PEGADA HÍDRICA x ICV DO USO DA ÁGUA.....	138
4.5.1	Quantificação da <i>Água Verde</i> .....	138
4.5.2	<i>Água Cinza</i> x <i>Uso Degradativo</i> .....	140
4.5.3	Gestão dos Recursos Hídricos .....	141
4.5.4	Avaliação de Impactos Ambientais .....	143
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	144
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	146
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	147
	<b>APÊNDICES</b> .....	163

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Disponibilidade de recursos hídricos renováveis, por região geográfica .....	8
Tabela 3.2 – Quadro geral da extração de recursos hídricos renováveis no mundo, por região geográfica, com dados de 2000, em unidades de km <sup>3</sup> por ano .....	13
Tabela 3.3 – Características gerais das unidades produtoras de biodiesel localizadas no Rio Grande do Sul .....	61
Tabela 3.4 – Características gerais das principais culturas oleaginosas com potencial de uso na produção de biodiesel dentro do território brasileiro .....	63
Tabela 4.1 – Produtos e substâncias utilizadas na fase de cultivo da soja, por etapa, com indicação da fonte de pesquisa e/ou da justificativa .....	73
Tabela 4.2 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase agrícola .....	74
Tabela 4.3 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase de produção do óleo degomado .....	76
Tabela 4.4 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase de fabricação do biodiesel .....	79
Tabela 4.5 – Definição dos tipos de uso da água considerados no uso degradativo .....	89
Tabela 4.6 – Relação de funcionalidade entre as categorias de classificação e os tipos de uso da água considerados no uso degradativo .....	90
Tabela 4.7 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase agrícola, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados.....	93
Tabela 4.8 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase agrícola, separados pelos principais processos produtivos .....	96
Tabela 4.9 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, na produção dos insumos da cadeia produtiva do calcário dolomítico .....	96
Tabela 4.10 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva da ureia, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	97
Tabela 4.11 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do SSP, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	97

Tabela 4.12 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do KCl, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	97
Tabela 4.13 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do óleo diesel.....	98
Tabela 4.14 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos nas cadeias produtivas dos defensivos agrícolas.....	98
Tabela 4.15 – Valores volumétricos resultantes da simulação do balanço hídrico do solo, para o cultivo de um hectare de soja, em Santa Rosa – RS, no período de 15 de novembro a 25 de março, com dados climáticos de 2000 a 2011.....	100
Tabela 4.16 – Concentração dos parâmetros qualitativos do fluxo de saída de água da etapa de cultivo da soja .....	102
Tabela 4.17 – Consumo de óleo diesel, por operação, no cultivo da soja .....	103
Tabela 4.18 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase agrícola .....	104
Tabela 4.19 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase de produção do óleo degomado, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados .....	105
Tabela 4.20 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase de produção do óleo degomado, separados pelos principais processos produtivos.....	106
Tabela 4.21 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do hexano, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	106
Tabela 4.22 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva da energia elétrica e na produção dos insumos da cadeia produtiva da lenha (biomassa) .....	106
Tabela 4.23 – Valores quantitativos dos fluxos de água, por processo industrial, na etapa de produção do óleo degomado .....	108
Tabela 4.24 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na etapa de produção do óleo degomado.....	109
Tabela 4.25 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase de produção do óleo degomado.....	109
Tabela 4.26 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase de fabricação do biodiesel, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados .....	110

Tabela 4.27 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase de fabricação do biodiesel, separados pelos principais processos produtivos .....	111
Tabela 4.28 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do metanol .....	112
Tabela 4.29 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do metilato de sódio, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	112
Tabela 4.30 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do hidróxido de sódio, com valores específicos para os principais processos produtivos. ....	112
Tabela 4.31 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do ácido clorídrico, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	113
Tabela 4.32 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do ácido fosfórico, com valores específicos para os principais processos produtivos .....	113
Tabela 4.33 – Valores quantitativos dos fluxos de água, por processo industrial, na etapa de fabricação do biodiesel .....	115
Tabela 4.34 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na etapa de fabricação do biodiesel .....	115
Tabela 4.35 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase de fabricação do biodiesel .....	116
Tabela 4.36 – Dados e resultados relacionados aos procedimentos de alocação .....	117
Tabela 4.37 – Inventário final dos fluxos de materiais, para cada subsistema do ciclo de vida do biodiesel de soja, com e sem a aplicação dos fatores de alocação.....	117
Tabela 4.38 – Resultados finais da Pegada Hídrica, para o subsistema da fase agrícola .....	120
Tabela 4.39 – Resultados finais da Pegada Hídrica, para os subsistemas das fases de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel .....	122
Tabela 4.40 – Análise de contribuição das etapas do ciclo de vida do biodiesel de soja, por componente da Pegada Hídrica.....	126
Tabela 4.41 – Análise das regiões com uso mais intensivo da água, envolvidas no ciclo de vida do biodiesel de soja, conforme valor total da Pegada Hídrica e dos componentes Verde, Azul e Cinza.....	127
Tabela 4.42 – Resultados finais do ICV, para o subsistema da fase agrícola.....	132

Tabela 4.43 – Resultados finais do ICV, para os subsistemas das fases de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel .....	133
Tabela 4.44 – Análise de contribuição das etapas do ciclo de vida do biodiesel de soja, de acordo com a forma de uso da água considerada no ICV .....	137
Tabela A.1 – Limites de concentração dos parâmetros de qualidade da água, por tipo de uso da água, incluindo as referências das fontes dos dados .....	163
Tabela A.2 – Limites de concentração dos parâmetros de qualidade da água, por categoria de classificação do uso degradativo.....	165
Tabela B.1 – Valores médios decendiais das variáveis climáticas utilizadas na simulação do balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera, para o cultivo da soja, em Santa Rosa - RS .....	167
Tabela C.1 – Consumo de óleo diesel, nas etapas de transporte dos materiais, considerando o sistema de produto definido para este estudo e a produção de 1 litro de biodiesel de soja.....	168

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Quantidade de água extraída, em percentagem, relacionada com a quantidade de recursos hídricos renováveis disponíveis, por país, com dados de 2001 .....	6
Figura 3.2 – Divisão das regiões hidrográficas do Brasil.....	9
Figura 3.3 – Situação da disponibilidade hídrica das regiões hidrográficas do Brasil, em termos de vazão média anual por habitante .....	9
Figura 3.4 – Situação dos principais rios do Rio Grande do Sul, através da relação entre demanda e disponibilidade de água .....	10
Figura 3.5 – Extração anual de água por habitante, em cada país, com dados de 2000.....	12
Figura 3.6 – Contribuição dos principais setores usuários de água, em percentagem, relativo à extração e ao consumo no Brasil.....	13
Figura 3.7 – Vazão de água extraída para a irrigação, por unidade hidrográfica de área .....	15
Figura 3.8 – Ilustração dos processos hidrológicos que compõem o ciclo da água.....	19
Figura 3.9 – Gráfico ilustrativo do comportamento do valor do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), durante o período de cultivo .....	22
Figura 3.10 – Ilustração dos principais fluxos de entrada e saída de água que compõem o balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera em um cultivo agrícola.....	23
Figura 3.11 – Esquematização dos componentes da Pegada Hídrica (Água Verde, Azul e Cinza), relacionados ao balanço hídrico de uma bacia hidrográfica .....	30
Figura 3.12 – Fases de execução da Pegada Hídrica.....	31
Figura 3.13 – Esquematização geral dos dados necessários ao cálculo da Pegada Hídrica de biocombustíveis .....	40
Figura 3.14 – Exemplificação das fases do ciclo de vida de um determinado produto .....	43
Figura 3.15 – Estrutura das fases de execução da ACV.....	45
Figura 3.16 – Esquema geral da aplicação da ACV para o uso da água .....	50
Figura 3.17 – Evolução anual da capacidade de produção nominal autorizada pela ANP, da demanda obrigatória e da produção total de biodiesel.....	58
Figura 3.18 – Ilustração das principais etapas da cadeia produtiva do biodiesel.....	59
Figura 3.19 – Mapa de distribuição, por estado brasileiro, das principais oleaginosas com potencial de utilização na produção de biodiesel.....	63
Figura 3.20 – Perfil de contribuição das matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil.....	64

Figura 3.21 – Produção de soja no Rio Grande do Sul, por município, na média de 2004 a 2006.....	66
Figura 4.1 – Fluxograma da cadeia produtiva do biodiesel de soja, com indicação da fronteira do sistema de produto considerado no presente estudo .....	70
Figura 4.2 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase agrícola.....	72
Figura 4.3 – Fluxograma do processo industrial de fabricação do óleo degomado .....	76
Figura 4.4 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase de produção do óleo degomado.....	77
Figura 4.5 – Fluxograma do processo industrial de fabricação do biodiesel .....	78
Figura 4.6 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase de fabricação do biodiesel .....	80
Figura 4.7 – Fluxograma simplificado do uso da água, no processo industrial de fabricação do óleo degomado .....	107
Figura 4.8 – Fluxograma simplificado do uso da água, no processo industrial de fabricação do biodiesel .....	114
Figura 4.9 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Verde, Azul e Cinza, do subsistema da fase agrícola.....	121
Figura 4.10 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Azul e Cinza, do subsistema da fase de produção do óleo degomado.....	123
Figura 4.11 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Azul e Cinza, do subsistema da fase de fabricação do biodiesel.....	124
Figura 4.12 – Contribuição da Água Verde, Azul e Cinza, para o valor total da Pegada Hídrica do biodiesel de soja.....	125
Figura 4.13 – Contribuição dos três subsistemas analisados, para os componentes Água Verde, Azul e Cinza, e para o valor total da Pegada Hídrica.....	126
Figura 4.14 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase agrícola .....	132
Figura 4.15 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase de produção do óleo degomado .....	134
Figura 4.16 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase de fabricação do biodiesel .....	135
Figura 4.17 – Contribuição das formas de uso da água do ICV gerado neste estudo, considerando as categorias de classificação do uso degradativo .....	136
Figura 4.18 – Contribuição dos três subsistemas analisados, para o uso consuntivo e degradativo da água .....	136

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional das Águas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAD	Capacidade de Água Disponível
CEE	Comunidade Econômica Europeia
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DALY	Disability Adjusted Life Years
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Rio Grande do Sul)
GEMI	Global Environmental Management Initiative
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
INEA	Instituto Estadual do Ambiente (Rio de Janeiro)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO	International Organization for Standardization
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
ONU	Organização das Nações Unidas
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PNPB	Plano Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
SINDA	Sistema Nacional de Dados Ambientais
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SSP	Fertilizante Superfosfato Simples
UNEP	United Nations Environmental Programme
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WFN	Water Footprint Network
WHO	World Health Organization
WSI	Water Stress Index
WTA	Withdrawal-to-availability

## LISTA DE SÍMBOLOS

$ET_m$	Evapotranspiração potencial ou máxima
$ET_r$	Evapotranspiração real
$ET_0$	Evapotranspiração de referência
$K_c$	Coefficiente de cultura
$\Delta$	Inclinação da curva de pressão de vapor
$R_n$	Radiação líquida na superfície da cultura
$G$	Densidade do fluxo de calor no solo
$\gamma$	Constante psicrométrica
$T$	Temperatura média do ar a 2 metros de altura
$U_2$	Velocidade do vento a 2 metros de altura
$e_s$	Pressão de saturação do vapor
$e_a$	Pressão de vapor
$\theta_i$	Umidade volumétrica do solo, no fim do dia $i$
$\theta_{i-1}$	Umidade volumétrica do solo, no dia anterior ao dia $i$
$P_i$	Precipitação total, no dia $i$
$AC_i$	Volume de água da ascensão capilar, no dia $i$
$I_i$	Volume de água da irrigação que atinge o solo e a cultura, no dia $i$
$ET_{r,i}$	Evapotranspiração real da cultura, ocorrida no dia $i$
$DP_i$	Drenagem profunda, no dia $i$
$ES_i$	Escoamento superficial, ocorrido no dia $i$
$p$	Fração da água existente no solo que pode ser utilizada pela planta, sem haver um gasto energético excessivo
$PH$	Pegada Hídrica Total
$AV_x$	Água Verde ou Pegada Hídrica Verde, do produto/processo/etapa $x$
$AA_x$	Água Azul ou Pegada Hídrica Azul, do produto/processo/etapa $x$
$AC_x$	Água Cinza ou Pegada Hídrica Cinza, do produto/processo/etapa $x$

$ET_{verde}$	Evapotranspiração da Água Verde
$d$	Dia de plantio
$fc$	Fim da colheita
$VI_{verde}$	Volume de Água Verde incorporado no produto
$ET_{azul}$	Evapotranspiração da Água Azul
$VI_{azul}$	Volume de Água Azul incorporado no produto
$NR$	Água Azul que não retorna ao sistema
$ETA_{agric.}$	Evapotranspiração da Água Azul na fase agrícola
$ETA_{ind}$	Evapotranspiração da Água Azul na fase industrial
$ET_{irrig}$	Evapotranspiração da água de irrigação
$E_{arm}$	Evaporação no armazenamento da água de irrigação
$E_{transp}$	Evaporação no transporte da água de irrigação
$E_{aplic}$	Evaporação na aplicação da água de irrigação
$I_{ef}$	Irrigação efetiva aplicada
$I_c$	Volume de irrigação, para um crescimento ótimo do cultivo
$f_{ef}$	Fração do volume total de água extraída para irrigação, que efetivamente atinge o solo
$I_{tot}$	Volume total de água extraída para irrigação
$E_{proc}$	Evaporação da água nos processos industriais
$V_{ent}$	Volume de entrada de água no processo
$V_{sai}$	Volume de saída de água no processo
$AC_{agric.}$	Água Cinza da fase agrícola
$AC_{ind}$	Água Cinza da fase industrial
$V_{efl}$	Volume efluente do processo/etapa
$V_{afl}$	Volume afluyente do processo/etapa
$c_{efl}$	Concentração do poluente no efluente do processo/etapa
$c_{afl}$	Concentração do poluente no afluyente do processo/etapa
$c_{max}$	Concentração máxima permitida para o poluente no corpo hídrico receptor, pelo padrão de qualidade do ambiente aquático existente

$c_{nat}$	Concentração natural do poluente no corpo hídrico receptor
$CP_x$	Carga do poluente $x$ aplicada no processo/etapa
$f_p$	Fração de perda do poluente
$KCl$	Cloreto de potássio
$Prod_x$	Produtividade do processo/produto/etapa $x$
$Q_x$	Quantidade do material $x$ utilizada no ciclo de vida
$UAV_{soja}$	Volume de Água Verde usada por hectare de cultivo da soja
$UAC_{soja}$	Volume de Água Cinza usada por hectare de cultivo da soja
$CR$	Coefficiente de retorno da água extraída

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida e para todas as atividades desenvolvidas pelos seres humanos. Através do ciclo hidrológico, a água circula entre a atmosfera, os continentes e os oceanos, renovando sua disponibilidade e sua capacidade de assimilar a poluição. No entanto, devido a fatores como o acelerado crescimento demográfico, o desenvolvimento econômico não sustentado e o uso ineficiente, os padrões atuais de uso da água se tornaram insustentáveis. Algumas estimativas apontam que de 5 a 25% do consumo de água no mundo excede a capacidade de renovação de seus corpos hídricos (WHO, 2005). Por esse motivo, atualmente existe uma crescente preocupação global com a questão da preservação e utilização racional da água, uma vez que um número cada vez maior de regiões está sentindo os efeitos da escassez. Nota-se, por exemplo, que este tipo de situação já é aguda em muitos locais da África e do Oeste da Ásia e também impõe restrições econômicas mais acentuadas nos países em desenvolvimento, como a China, a Índia e até o Brasil, incluindo algumas localidades do Rio Grande do Sul. Este panorama tem gerado previsões alarmantes, com algumas estimativas indicando que, se a tendência atual de uso da água continuar, em 2025, aproximadamente 1,8 bilhão de pessoas viverão em regiões com escassez de água e dois terços da população mundial estarão sujeitas a estresses de água (MORRISON *et al.*, 2010).

Influenciado pelos mesmos fatores, também ocorre, em paralelo, o crescimento da demanda energética, com um aumento estimado de 55% até 2030 (WWAP, 2009). Essa questão, somada à instabilidade do preço do petróleo e ao seu caráter não renovável, além dos recentes comprometimentos dos países desenvolvidos em reduzir a emissão de gases de efeito estufa, está impulsionando a procura por fontes alternativas de energia, incluindo o biodiesel. Em termos mundiais, esta tendência se reflete nas estatísticas, onde se percebe que a taxa média de crescimento da produção de biodiesel, nos últimos cinco anos, foi em torno de 38% (REN21, 2011). No Brasil, isto tomou forma a partir de 2005, quando foi implementado o Plano Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Este programa atualmente estabelece, através da Resolução n° 06/2009, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que desde 2010 deve ocorrer a mistura obrigatória de 5% de biodiesel no óleo diesel tradicionalmente comercializado, fazendo com que, em 2011, atingisse a produção de 2,7 bilhões de litros e se tornasse o segundo maior produtor mundial deste biocombustível (ANP, 2012b; BRASIL, 2011a).

Os principais problemas ambientais que podem ser gerados por estes cenários de crescimento da demanda por água e energias renováveis são os impactos aos recursos hídricos e os danos decorrentes do esgotamento dos mesmos, causados pelo alto consumo de água que ocorre na produção dos biocombustíveis. No caso do biodiesel, isso ocorre, sobretudo, porque sua principal matéria-prima é o óleo proveniente das culturas oleaginosas, como a soja, as quais, dependendo das condições climáticas locais, da produtividade requerida e do sistema de produção, necessitam de grandes quantidades de água e insumos para se sustentarem. Portanto, isso inclui, muitas vezes, a utilização da irrigação e da aplicação intensiva de fertilizantes para se obter um desenvolvimento satisfatório, o que pode resultar na diminuição da disponibilidade e da qualidade dos recursos hídricos.

Por esse motivo, pela perspectiva da conservação dos recursos hídricos, fica clara a necessidade de se desenvolver e aplicar técnicas de gestão ambiental, que sejam capazes de avaliar a sustentabilidade do biodiesel e da implementação de estratégias e políticas de incentivo à produção do mesmo; ou ainda, que possam ser utilizadas para o fornecimento de informações importantes de suporte a futuras decisões de gestão e que possibilitem aos usuários a obtenção de um melhor entendimento de suas relações com as bacias hidrográficas. Dentro deste contexto, as metodologias da Pegada Hídrica e da Análise do Ciclo de Vida (ACV) podem ser muito úteis tanto para entidades públicas como para empresas particulares e consumidores, uma vez que, de modo geral, possibilitam avaliar e comparar o uso da água durante toda a “vida” de qualquer produto ou serviço, ou seja, desde a obtenção da matéria-prima até sua destinação final.

Com relação à Pegada Hídrica, esta é uma metodologia que foi desenvolvida para ser aplicada especificamente na questão da utilização dos recursos hídricos, a qual fornece um indicador volumétrico do consumo direto e indireto da água de qualquer produto ou grupo de consumidores, produzindo resultados discriminados, conforme a fonte e as condições locais. Entretanto, apesar de ser amplamente aceita e empregada por diversos países e empresas multinacionais, no Brasil o potencial desta técnica ainda é pouco explorado.

No caso da ACV, apesar de ser uma ferramenta de gestão ambiental consolidada e capacitada para avaliar e mensurar os principais aspectos e impactos ambientais de produtos e serviços, tradicionalmente não tem abordado o uso da água e as consequências de seu esgotamento de forma suficientemente detalhada e abrangente. Por esse motivo, atualmente estão sendo realizados diversos estudos específicos desta técnica, focados em desenvolver métodos mais apropriados tanto para a fase de obtenção e organização dos dados como para a de avaliação de impactos ambientais.

A partir destas considerações, o presente trabalho se propõe a empregar, paralelamente, as metodologias da Pegada Hídrica e da ACV, para avaliar o uso da água, ocasionado pelo consumo e pela poluição, que ocorre durante o ciclo de vida do biodiesel de soja, produzido no Rio Grande do Sul. Dessa forma, pretende-se contribuir com o desenvolvimento destas ferramentas de gestão ambiental, analisando e comparando suas aplicabilidades através da perspectiva do uso da água. Além disso, também se almeja fornecer dados mais concretos sobre este ramo da indústria energética, que possam ser úteis no aprimoramento das discussões sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis alternativos.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aplicar as metodologias da Pegada Hídrica e da Análise do Ciclo de Vida (ACV), para avaliar o uso da água que ocorre durante o ciclo de vida do biodiesel produzido a partir da soja no Rio Grande do Sul.

De modo mais específico, este trabalho é delineado pelos seguintes objetivos:

- Calcular a Pegada Hídrica do biodiesel de soja, seguindo as determinações da Water Footprint Network (WFN);
- Gerar um inventário do ciclo de vida (ICV) do biodiesel de soja, específico para o uso da água, seguindo as recomendações recentemente estabelecidas em publicações científicas especializadas;
- Identificar as etapas e os processos da cadeia produtiva do biodiesel em que ocorrem os usos mais intensivos da água e de que forma isso acontece, visando contribuir para a melhoria do conhecimento relacionado à utilização deste recurso;
- Avaliar e comparar a aplicabilidade destas metodologias para a quantificação do uso da água, que ocorre tanto pelo consumo como pela poluição hídrica, levando em consideração o fornecimento de dados para futuros estudos de avaliação de impactos e para a gestão dos recursos hídricos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que haja um correto entendimento do que foi desenvolvido neste trabalho, antes de tudo é necessário esclarecer algumas questões e revisar conceitos importantes, que estão diretamente relacionados com o tema abordado. Dessa forma, o presente capítulo foi organizado de modo a apresentar aspectos relevantes sobre a água, os métodos de avaliação do uso da mesma e o biodiesel.

No primeiro item, foi realizada uma contextualização dos recursos hídricos, abrangendo a situação de disponibilidade, utilização e gestão dos mesmos, além de abordar conceitos e características do ciclo hidrológico. Depois disso, foi feita uma revisão do estado da arte das metodologias de Análise do Ciclo de Vida (ACV) e de Pegada Hídrica, com enfoque na aplicação para a avaliação do uso da água em cadeias produtivas. Por fim, também foram apresentadas informações sobre a produção de biodiesel, incluindo as principais matérias-primas, o processo de fabricação e a situação atual.

#### 3.1 ÁGUA

##### 3.1.1 A Situação dos Recursos Hídricos

A água é um dos recursos mais valiosos do planeta, sendo, de modo geral, um elemento essencial para a manutenção da vida, assim como para todas as atividades desenvolvidas pelos seres humanos. Além de ser indispensável para assegurar a biodiversidade e as funções dos ecossistemas, a água é necessária ao fornecimento de alimentos, à manutenção da higiene e da saúde, à geração de energia elétrica, aos processos industriais, ao transporte de dejetos e resíduos, entre outros (BRANCO *et al.*, 1991).

Apesar do intenso uso, a capacidade de renovação das águas durante o ciclo hidrológico e a propriedade de autodepuração, permite a relativa conservação de sua quantidade e qualidade por um longo período de tempo. No entanto, estas características favoreceram o surgimento da ideia errada de que os recursos hídricos são infinitos no planeta, e isso, somado ao fato de serem considerados como um bem gratuito do meio ambiente, criou condições propícias para o uso irracional dos mesmos (WWAP, 2009).

Atualmente, devido à crescente demanda pela água, existe uma grande preocupação global com as questões ambientais de sua preservação e utilização racional, uma vez que as regiões mais vulneráveis do planeta estão enfrentando situações de escassez cada vez mais

frequentes e com maior gravidade. A partir de algumas estimativas, verifica-se que os padrões atuais de uso dos recursos hídricos se tornaram insustentáveis, pois em torno de 5 a 25% do consumo de água no mundo excede a capacidade de renovação dos corpos hídricos. Em regiões mais específicas, como o Norte da África e o Oriente Médio, mais de um terço de toda a água são utilizadas de forma insustentável (WHO, 2005). O mapa da Figura 3.1 mostra a situação geral dos recursos hídricos renováveis, relacionados com a proporção em que são extraídos para atender à demanda mundial, destacando as regiões mais críticas.

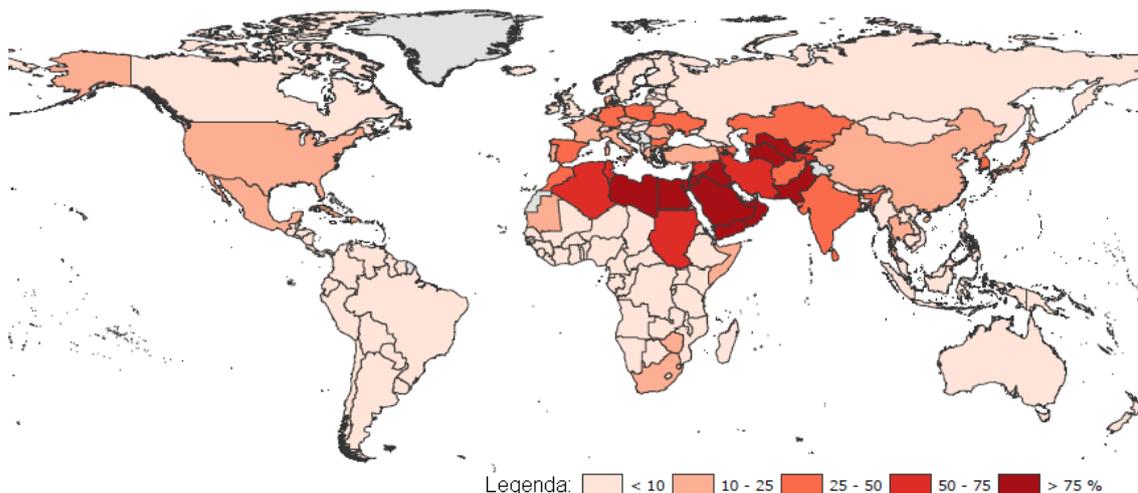


Figura 3.1 – Quantidade de água extraída, em percentagem, relacionada com a quantidade de recursos hídricos renováveis disponíveis, por país, com dados de 2001.

(Fonte: FAO, 2008).

Esse aumento nos padrões de utilização da água é influenciado por diversos fatores, sendo que os principais são: crescimento demográfico; desenvolvimento econômico; mudanças sociais; políticas, leis e sistema financeiro; e mudanças climáticas. Estes, por sua vez, direcionam a demanda hídrica pelos setores usuários, que incluem, entre outros, a agricultura, a energia e a indústria, além da própria necessidade dos ecossistemas (WWAP, 2009).

Assim, pode-se dizer que um dos maiores fatores que contribui para o aumento do consumo de água é o crescimento da população, através da maior demanda por alimentos, energia, bens e serviços industrializados e a competição por terras e recursos naturais. Em paralelo, está o crescimento econômico e o aumento nos padrões de vida da população, principalmente em países em desenvolvimento, uma vez que, com maior rendimento, as pessoas consomem mais e exigem produtos e serviços com maior sofisticação, os quais utilizam mais água no processo de fabricação (GALLOPÍN e RIJSBERMAN, 2000).

Somados a isso, os incentivos políticos e financeiros podem determinar quais cultivos serão utilizados, ou, ainda, qual fonte de energia terá prioridade, afetando indiretamente a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Por fim, as alterações climáticas podem interferir diretamente no ciclo hidrológico, nos padrões de cultivo, nas necessidades de irrigação e evapotranspiração e, com isso, também contribuir com a diminuição da disponibilidade de água (GALLOPÍN e RIJSBERMAN, 2000).

Outro aspecto importante é a distribuição desigual da quantidade total de água disponível para consumo humano ao redor do mundo. De acordo com dados do sistema global de informações AQUASTAT, da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), estima-se que no planeta ocorra uma precipitação de 108.139 km<sup>3</sup> por ano, dos quais a maior parte é perdida devido a fatores climáticos e hidrológicos e não pode ser aproveitada, restando 43.022 km<sup>3</sup> por ano de recursos hídricos renováveis (FAO, 2010). Estes incluem as águas superficiais (rios, lagos, etc.) e as águas subterrâneas recarregáveis, não contabilizando águas dessalinizadas, reutilizadas e águas subterrâneas fósseis (armazenadas entre rochas impermeáveis, onde não ocorre recarga). Diante deste volume total, a disparidade na distribuição da água fica evidente, quando é feita a comparação da disponibilidade existente entre os continentes e algumas regiões específicas, como mostra a Tabela 3.1, mais abaixo.

A partir destas informações, pode-se dizer que o Brasil é um país privilegiado com relação à disponibilidade de recursos hídricos, possuindo uma vazão média anual dos rios de, aproximadamente, 180.000 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a mais de 12% da disponibilidade mundial de água doce. Em termos de vazão média por habitante, também possui alto valor, com quase 30 mil m<sup>3</sup>/hab./ano. Esta quantidade é mais que 17 vezes superior ao piso de 1.700 m<sup>3</sup>/hab./ano, estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), abaixo do qual um país é considerado em situação de estresse hídrico (ANA, 2011).

Entretanto, da mesma maneira que no resto do mundo, a distribuição da água no Brasil também é desigual, apresentando grande variação temporal e espacial. Esta diferença faz com que existam regiões com problemas de escassez hídrica bastante acentuadas, seja devido às condições climáticas desfavoráveis, seja pela excessiva demanda em centros urbanos com grande concentração populacional ou em regiões agrícolas com uso intensivo de irrigação. Segundo dados disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2011), entre as regiões hidrográficas definidas pela Resolução n.º 32/2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (Figura 3.2), a região Amazônica é a que concentra a maior parte dos recursos hídricos superficiais, abrangendo 73,6% da vazão média total do país. Este volume abastece um número de habitantes que representa apenas 4,5% da população

brasileira, o que resulta numa média de 533.096 m<sup>3</sup>/ano/hab. Enquanto isso, a região hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental possui média inferior a 1.200 m<sup>3</sup>/ano/hab., sendo que, em algumas unidades hidrográficas, são registrados valores menores que 500 m<sup>3</sup>/ano/hab. Outro cenário crítico também é observado na bacia do Alto Tietê (região hidrográfica Paraná) e nos rios que deságuam na Baía de Guanabara (região Atlântico Sudeste) onde, devido à densidade populacional, a média chega a valores menores que 500 m<sup>3</sup>/hab./ano. A Figura 3.3 mostra a situação destas regiões hidrográficas, em termos de vazão média anual por habitante.

Tabela 3.1 – Disponibilidade de recursos hídricos renováveis, por região geográfica.

Continente		Recursos Hídricos Renováveis		
Região	Sub-região	Volume por ano (km <sup>3</sup> )	Volume relativo (%)	Volume per capita em 2008 (m <sup>3</sup> )
	<b>África.....</b>	<b>3.931</b>	<b>9,1</b>	<b>4.007</b>
	Norte da África.....	47	0,1	286
	África Subsaariana.....	3.884	9,0	4.753
	<b>Américas.....</b>	<b>19.238</b>	<b>44,7</b>	<b>20.927</b>
	América do Norte.....	6.077	14,1	13.401
	América Central e Caribe.....	781	1,8	9.654
	América do Sul.....	12.380	28,8	32.165
	<i>Brasil.....</i>	<i>5.418</i>	<i>12,6</i>	<i>28.223</i>
	<b>Ásia.....</b>	<b>12.413</b>	<b>28,9</b>	<b>3.041</b>
	Oriente Médio.....	484	1,1	1.632
	Ásia Central.....	263	0,6	3.020
	Ásia Oriental e Meridional.....	11.666	27,1	3.155
	<b>Europa.....</b>	<b>6.548</b>	<b>15,2</b>	<b>8.941</b>
	Europa Ocidental e Central.....	2.098	4,9	3.999
	Europa Oriental.....	4.449	10,3	21.430
	<b>Oceania.....</b>	<b>892</b>	<b>2,1</b>	<b>33.469</b>
	<b>Mundo.....</b>	<b>43.022</b>	<b>100,0</b>	<b>6.383</b>

Fonte: FAO, 2010.

No Rio Grande do Sul, as contribuições das regiões hidrográficas Atlântico Sul e Uruguai chegam a cerca de 5.900 m<sup>3</sup>/s, resultando em uma média de aproximadamente 17.300 m<sup>3</sup>/hab./ano, que é uma quantidade confortável, segundo classificação mostrada na Figura 3.3 (RIO GRANDE DO SUL, 2008a). No entanto, apesar da grande disponibilidade de água, a intensa demanda em certas regiões torna a situação preocupante ou crítica, exigindo investimentos e atividades de gerenciamento. A Figura 3.4, mais abaixo, ilustra a situação dos principais corpos hídricos do Rio Grande do Sul, mostrando a relação entre demanda e disponibilidade de água e a respectiva classificação. Nesta avaliação, nota-se que as bacias

com situação mais crítica estão localizadas próximas da Região Metropolitana de Porto Alegre, onde ocorrem grande consumo e degradação da qualidade pelo abastecimento urbano e industrial, e na Região Sudoeste do Estado, devido, principalmente, à irrigação (ANA, 2007).



Figura 3.2 – Divisão das regiões hidrográficas do Brasil.  
(Fonte: ANA, 2007)

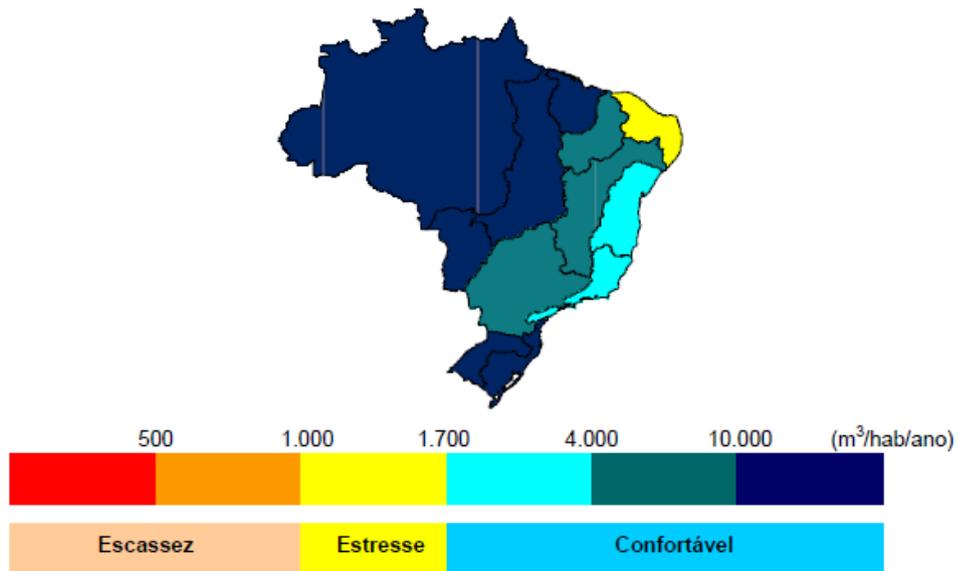


Figura 3.3 – Situação da disponibilidade hídrica das regiões hidrográficas do Brasil, em termos de vazão média anual por habitante.  
(Fonte: ANA, 2007).

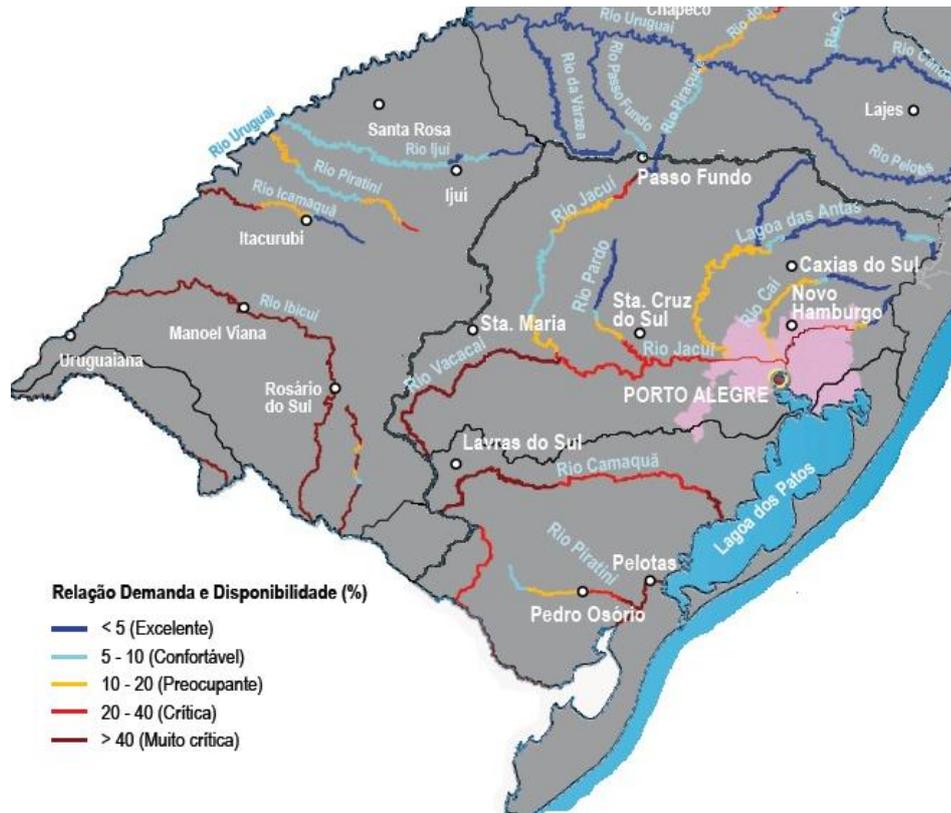


Figura 3.4 – Situação dos principais rios do Rio Grande do Sul, através da relação entre demanda e disponibilidade de água.

(Fonte: adaptado de ANA, 2007).

Diante deste quadro geral, percebe-se claramente que a situação dos recursos hídricos é delicada e até preocupante em quase todas as regiões do mundo, principalmente se considerarmos as necessidades futuras. O último relatório da ONU indica que, atualmente, o gerenciamento da água ao redor do mundo é inadequado, assim como a eficiência no uso da água e a implementação de medidas ambientais de redução da poluição são insuficientes. Com isso, é previsto que, em 2030, 47% da população mundial viverá em áreas com alto estresse hídrico e mais de 67% (5 bilhões de pessoas) ainda podem estar sem saneamento adequado (WWAP, 2009).

### 3.1.2 Usos Múltiplos da Água

O “uso da água” é um termo geral que descreve qualquer ação através da qual a água proporciona um serviço ou exerce uma função. Existem diferentes tipos de uso, os quais são classificados, na maioria dos estudos, nas seguintes categorias: uso direto no curso d’água ou fora do curso d’água; uso consuntivo ou não consuntivo; e uso degradativo (KOHLI *et al.*, 2010).

O uso direto no curso d'água (“*in-stream*”) refere-se ao uso *in situ* da água, o qual, geralmente, é realizado diretamente sobre os recursos hídricos superficiais. Portanto, nesse tipo de uso não há extração da água, como, por exemplo, a navegação, a geração de energia hidrelétrica, a diluição de efluentes, a manutenção de ecossistemas, entre outros. Já o uso fora do curso d'água (“*off-stream*”), ocorre quando a água é removida de sua fonte para um uso específico, podendo ser proveniente de águas superficiais (ex.: rios, lagos, etc.), águas subterrâneas renováveis (ex.: aquífero) e não renováveis (ex.: reservas fósseis), além de águas reutilizadas (ex.: efluentes tratados e água de drenagem agrícola) e outras fontes não convencionais, como a água dessalinizada (WOMACH, 2005).

Os usos não consuntivos são aqueles que não implicam no consumo da água, ou seja, depois de usada, a água retorna totalmente ao sistema e fica disponível para outros usos. Entre os diversos usos não consuntivos podemos citar, como exemplo, a navegação, a recreação e lazer, a aquicultura e, em alguns casos, a produção de energia hidrelétrica. Os usos consuntivos, por sua vez, resultam em uma redução substancial (consumo) na quantidade de água que retorna ao sistema após a extração, sendo que os principais exemplos deste tipo de uso são o abastecimento público e doméstico, os usos industriais, a irrigação e as atividades rurais (dessedentação de animais). Por fim, o uso degradativo da água representa a poluição hídrica, que envolve a alteração da qualidade natural dos corpos hídricos, ocasionado pelo descarte excessivo de substâncias, como por exemplo, o lançamento de efluentes de uma indústria ou a lixiviação de um aterro sanitário (BERGER e FINKBEINER, 2010; KOHLI *et al.*, 2010).

Entre estes diferentes tipos de uso da água, os usos consuntivos e degradativos, nos setores agrícola, industrial e doméstico (urbano), são os que exercem maior pressão sobre os sistemas naturais. Por esse motivo, a maioria dos estudos realizam estimativas e avaliações do uso da água considerando apenas os dados dos usos classificados nestas categorias (BERGER e FINKBEINER, 2010).

De modo geral, um parâmetro utilizado tradicionalmente como indicador dos impactos do uso da água pela população é a quantidade total de água extraída, por pessoa, em um país. Estes valores podem variar de 20 m<sup>3</sup>/ano em Uganda, a mais de 5.000 m<sup>3</sup>/ano no Turcomenistão, sendo que a média mundial é de 600 m<sup>3</sup>/ano. O mapa da Figura 3.5 mostra a situação mundial da extração anual de água, por pessoa, em cada país. A partir dessa ilustração, nota-se claramente que o volume extraído nas regiões áridas e semiáridas são maiores que nas regiões tropicais. Além disso, também se pode perceber que os países desenvolvidos utilizam muito mais água que os países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. A justificativa para essa diferença está na grande necessidade de irrigação

para a produção agrícola nas localidades com clima seco e na maior demanda de água necessária para a fabricação de produtos mais sofisticados (WWAP, 2009).

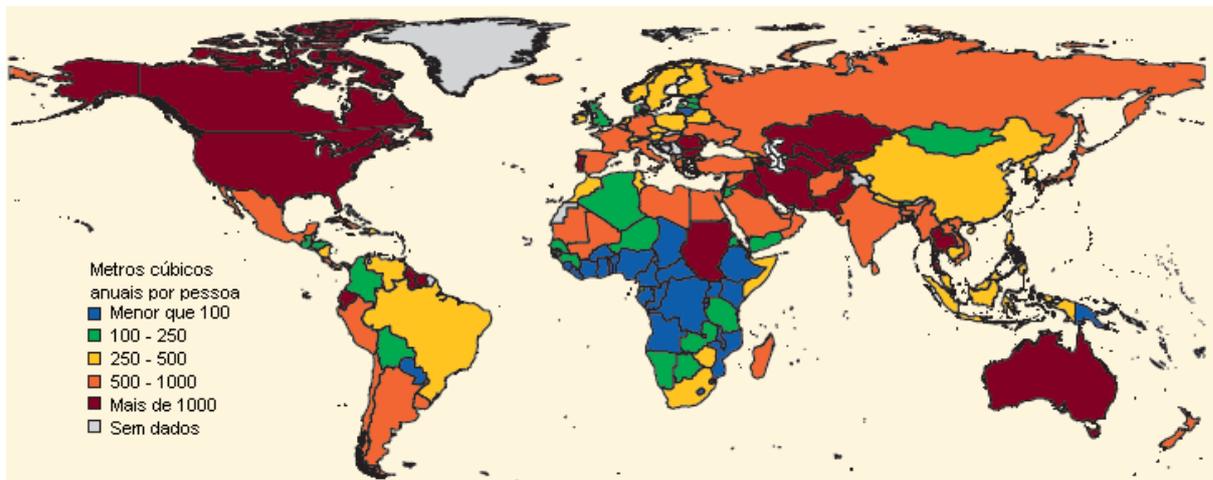


Figura 3.5 – Extração anual de água por habitante, em cada país, com dados de 2000.  
(Fonte: WWAP, 2009).

Com relação ao uso da água pelas diferentes atividades, o setor da agricultura é, de longe, o mais importante, uma vez que representa cerca de 70% do total de água extraída no mundo. Apesar do crescimento das economias urbanizadas, o setor da indústria (incluindo a energia) utiliza somente 20% e o uso doméstico fica em torno de 10%. Ainda analisando por esta perspectiva, pode-se dizer que o mundo fica dividido em dois grupos: um formado pelos países onde o uso agrícola predomina, como na África, maior parte da Ásia, Oceania, América Latina e Caribe; e outro pelos países em que a utilização na indústria e energia representa a maior parte da extração de água (ex.: América do Norte e Europa), como pode ser visto na Tabela 3.2, mais abaixo (MOLDEN, 2007).

Segundo a ANA (2011), o Brasil registra retiradas totais de 58,1 km<sup>3</sup>/ano de água, sendo que, deste total, cerca de 31,1 km<sup>3</sup>/ano (53,5%) são efetivamente consumidos, ou seja, não ficam disponíveis para outros usos nas mesmas bacias hidrográficas devido, principalmente, à evapotranspiração na agricultura. Em termos de consumo de água relacionado à população, a média nacional fica em torno de 291 m<sup>3</sup>/hab./ano, com destaque à região hidrográfica do Uruguai, que possui o maior valor, chegando a 1.223 m<sup>3</sup>/hab./ano. Os gráficos da Figura 3.6 apresentam o perfil da demanda de água pelos setores usuários, diferenciando entre a quantidade extraída e a consumida.

Nesta contabilização, o uso doméstico considera toda a água que é proveniente da rede pública de abastecimento e de outros métodos de extração em zona urbana, que são utilizados para consumo humano, paisagístico e outros usos mistos. No Brasil, o alto valor apresentado

para este uso está relacionado, principalmente, à alta taxa de urbanização e ao percentual de cobertura do abastecimento, que atinge 94,7%. Dessa forma, o uso urbano está associado a problemas de excessiva demanda em regiões metropolitanas, como a do rio Tietê, em São Paulo, e a do lago Guaíba, em Porto Alegre, bem como à alta degradação da qualidade dos cursos d'água, ocasionada pela grande quantidade de carga orgânica lançada nos mesmos (ANA, 2011; LANNA, 1997a).

Tabela 3.2 – Quadro geral da extração de recursos hídricos renováveis no mundo, por região geográfica, com dados de 2000, em unidades de km<sup>3</sup> por ano.

Região	Setores Usuários					
	Agricultura		Indústria		Doméstico	
	Volume extraído	%	Volume extraído	%	Volume extraído	%
África	186	86	9	4	22	10
Ásia	1.936	81	270	11	172	7
América Latina	178	71	26	10	47	19
Caribe	9	69	1	8	3	23
América do Norte	203	39	252	48	70	13
Oceania	18	73	3	12	5	19
Europa	132	32	223	53	63	15
<b>Mundo</b>	<b>2.663</b>	<b>70</b>	<b>784</b>	<b>20</b>	<b>382</b>	<b>10</b>

Fonte: adaptado de MOLDEN, 2007.

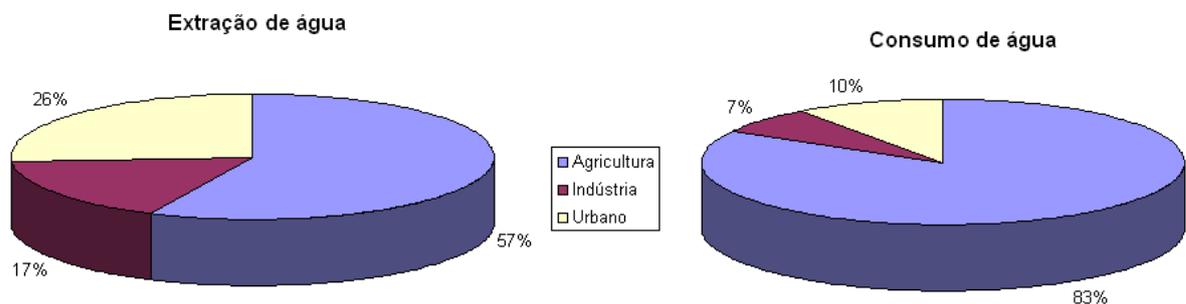


Figura 3.6 – Contribuição dos principais setores usuários de água, em percentagem, relativo à extração e ao consumo no Brasil.

(Fonte: adaptado de ANA, 2011).

O uso da água pela indústria ocorre por diversas maneiras: em procedimentos de limpeza, aquecimento e refrigeração; para a geração de vapor; para o transporte de

substâncias dissolvidas ou particuladas; como matéria-prima; como solvente; e como parte integrante do produto final. Como foi visto anteriormente, o volume de água efetivamente consumido por estas atividades no Brasil é baixo. Por esse motivo, a maior pressão que a indústria pode causar sobre os recursos hídricos é através dos impactos da descarga de efluentes e seu potencial poluidor, influenciando diretamente na qualidade dos mananciais, principalmente de regiões próximas a grandes centros urbanos (ANA, 2011; LANNA, 1997a).

Com relação ao setor da agricultura, este, geralmente, contabiliza a dessedentação de animais, o abastecimento da população rural e a irrigação de cultivos. Dentre estas atividades, a irrigação é a principal responsável pela grande demanda deste setor, sobretudo em países com grande parte da economia voltada ao agronegócio, como o Brasil, onde se torna cada vez mais necessária para aumentar a produtividade agrícola, com o objetivo de suprir as necessidades da população e do crescente mercado mundial (OLIVEIRA e COELHO, 2004; WWAP, 2009).

Na agricultura irrigada, ao contrário do cultivo em regime de sequeiro, que utiliza apenas a água da chuva, a fonte de água são os rios, lagos e aquíferos, de onde a mesma é extraída e aplicada sobre a terra, permitindo que o cultivo cresça em ambientes com recursos hídricos escassos. Como grande parte da água extraída acaba sendo consumida pelo cultivo ou pela evaporação no sistema de irrigação, esse tipo de uso possui a desvantagem de competir com outros setores usuários e com as necessidades dos ecossistemas (OLIVEIRA e COELHO, 2004). Atualmente, apenas 20% das terras cultivadas no mundo são irrigadas, as quais são responsáveis por 40% da produção global de comida. Entretanto, já existem regiões, como o Oriente Médio, onde a irrigação está saturada e sendo realizada de forma insustentável (WWAP, 2009).

No Brasil, devido ao clima favorável, apenas 8,3% da área de lavoura é irrigada, o que equivale a 4,5 milhões de hectares. Mesmo assim, essa quantidade é suficiente para fazer da irrigação a atividade com uso mais intensivo da água, representando 47% da retirada total e 69% do consumo (ANA, 2011). Dessa forma, já é possível identificar algumas regiões que estão em situação crítica de estresse hídrico, necessitando de intensas atividades de gestão, devido a conflitos de uso com a irrigação. Entre estas regiões, destaque pode ser dado aos rios localizados na parte Sul e Oeste do Rio Grande do Sul, pertencentes às regiões hidrográficas Uruguai e Atlântico Sul, onde são retirados os maiores volumes de água para o uso na irrigação, principalmente o cultivo de arroz inundado, como pode ser visto na Figura 3.7 (ANA, 2007).

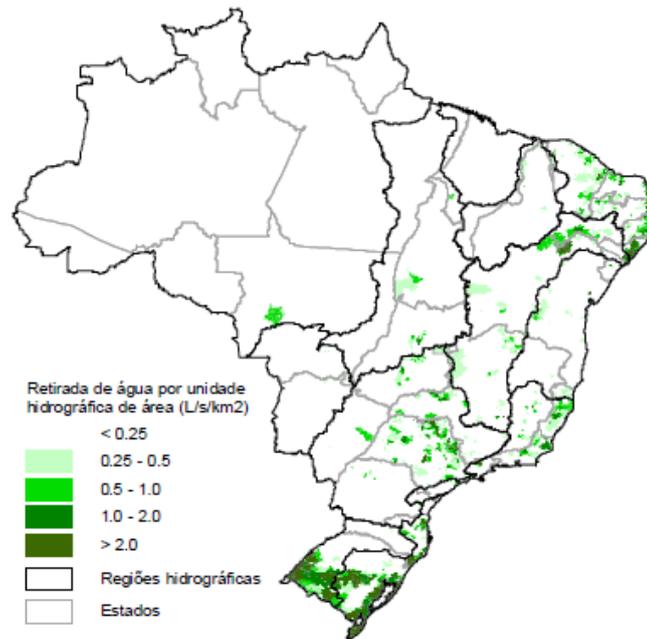


Figura 3.7 – Vazão de água extraída para a irrigação, por unidade hidrográfica de área. (Fonte: ANA, 2007).

### 3.1.3 Gestão dos Recursos Hídricos

Diante da limitação da disponibilidade de água e da alta demanda exigida pelas atividades humanas, torna-se necessário que o poder público exerça o controle sobre o uso da água, de modo que possibilite o atendimento dos usos prioritários, induza à utilização racional e garanta a sustentabilidade dos recursos hídricos. Para atingir estes objetivos, primeiramente é preciso que haja a elaboração de uma política de recursos hídricos, que expresse os princípios doutrinários que conformam as pretensões sociais e governamentais relacionadas à regulamentação do uso, controle e proteção das águas. Depois disso, é necessário que seja implantado um sistema de gestão de recursos hídricos, que defina a estrutura organizacional (conjunto de organismos, agências e instalações públicas e privadas), as ações, as responsabilidades, os procedimentos, os processos e os recursos, que são imprescindíveis para a execução da política de recursos hídricos (LANNA, 1993).

Segundo Campos (2001 *apud* MEZOMO, 2008), a gestão das águas deve ser formada por três funções básicas: (a) o planejamento, constituído pelo conjunto das atividades necessárias à previsão das disponibilidades e das demandas de água, incluindo o inventário dos recursos existentes e estudos de balanço de oferta versus demanda; (b) a administração, que se constitui das ações que dão suporte técnico ao planejamento e aos mecanismos de

avaliação da efetividade alcançada, englobando a coleta de dados e as estatísticas sobre o uso da água; (c) e a regulamentação, que desenvolve o suporte legal da gestão.

No Brasil, o principal mecanismo de gestão dos recursos hídricos foi implementado a partir de 1997, com a promulgação da lei federal n.º 9433, a qual instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Nesta lei, também foram estabelecidos os fundamentos, os objetivos, as diretrizes e os instrumentos, através dos quais a gestão dos recursos hídricos será embasada e executada (BRASIL, 1997).

Em seus fundamentos, a água é reconhecida como bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico. Além disso, determina que a gestão dos recursos hídricos deva proporcionar o uso múltiplo das águas, considerando a bacia hidrográfica como unidade territorial e exercendo administração descentralizada. Como diretrizes gerais de implantação da política nacional, é estabelecido que a gestão dos recursos hídricos deva ser efetuada sem dissociação entre os aspectos de qualidade e quantidade, de forma adequada às diversidades das diversas regiões existentes e articulada com o uso do solo, assim como o planejamento dos recursos hídricos deva ser articulado com os planos dos setores usuários e com os regionais, estaduais e nacional.

Com relação aos instrumentos definidos nesta mesma lei, estes podem ser classificados de acordo com suas funções de planejamento e de gestão. Os instrumentos de planejamento incluem os Planos de Recursos Hídricos (Planos de Bacia, Estadual e Nacional), o enquadramento dos corpos d'água e o Sistema de Informações, os quais têm por objetivo geral organizar e definir a utilização da água, solucionando ou minimizando os conflitos de interesse sobre esse recurso. Quanto aos instrumentos de gestão, estes permitem que os diversos setores usuários disciplinem o uso da água por meio do controle direto sobre os direitos de utilização, como ocorre na outorga, e através de ferramentas econômicas, como a cobrança pelo uso dos recursos hídricos (FERREIRA *et al.*, 2008).

Os Planos de Recursos Hídricos são caracterizados como “*planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional e do Gerenciamento de Recursos Hídricos*”. Estes devem ser elaborados com o seguinte conteúdo mínimo: (a) diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos; (b) análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo; (c) balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais; (d) metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis; (e) medidas, programas e projetos a serem implantados para o atendimento das

metas previstas; (f) prioridades para outorga de direitos de uso; (g) diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; (h) propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso (BRASIL, 1997).

Em nível nacional, o conjunto de diretrizes, metas e programas relacionados à gestão das águas foi determinado no Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), construído em 2006. Este plano envolve um conjunto estratégico de ações e relações interinstitucionais, instrumentos da Política, informações e ferramentas de apoio à decisão, que devem ser implementadas pela União para a gestão dos recursos hídricos do país. Os principais objetivos deste plano são assegurar: (a) a melhoria das disponibilidades hídricas, superficiais e subterrâneas, em qualidade e quantidade; (b) a redução dos conflitos reais e potenciais de uso da água, bem como dos eventos hidrológicos críticos; e (c) a percepção da conservação da água como valor socioambiental relevante (BRASIL, 2006).

Quanto ao enquadramento dos corpos d'água em classes, este é um instrumento que objetiva estabelecer o nível de qualidade a ser alcançado e/ou mantido ao longo do tempo, de maneira adequada para atender as necessidades definidas pela sociedade. Além disso, também pretende diminuir os custos de combate à poluição e assegurar a saúde humana e o equilíbrio ecológico (LEEUWESTEIN e MONTEIRO, 2001). Os padrões de qualidade da água, estabelecidos para as diferentes formas de uso, são determinados pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005).

A cobrança pelo uso da água é baseada no princípio usuário-pagador/poluidor-pagador, com o objetivo de reconhecer o valor econômico dos recursos hídricos e incentivar a racionalização do uso da água, captando, ao mesmo tempo, recursos financeiros para a realização das intervenções necessárias. Dessa forma, qualquer usuário que utilize a água ou prejudique sua qualidade deve pagar pelo uso de um bem que é público ou indenizar a sociedade pela degradação da mesma (FERREIRA *et al.*, 2008).

A outorga dos direitos do uso da água é um instrumento jurídico, pelo qual o Poder Público, titular do domínio sobre os recursos hídricos, atribui ao interessado, por meio de uma autorização administrativa, a possibilidade de usá-los privativamente. Com isso, pretende assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício de acesso à mesma (BRASIL, 1997; LANNA *et al.*, 1997b).

O modelo de gestão dos recursos hídricos implementado no Brasil estipula, como forma de alocação dos direitos de uso da água, a outorga por meio de controle ao usuário (restrições de extração ou lançamento de efluentes) e de controle por objetivos (vazões mínimas residuais e enquadramento dos corpos hídricos). Dessa forma, para cada caso devem ser definidos critérios de outorga, com base na vazão de referência, que deve permanecer no

curso d'água para atender aos requisitos dos ecossistemas, e na priorização de demandas determinadas nos Planos de Recursos Hídricos, os quais devem conter análises de alternativas de crescimento demográfico e de evolução das atividades produtivas da bacia. Estas avaliações de aumento na demanda por água, por sua vez, devem ser realizadas com dados cadastrais de usuários ou, na ausência destes, a partir de censos setoriais, utilizando estimativas de consumos específicos, como por exemplo, por habitante, por unidade de produto fabricado, por hectare irrigado, etc. (LANNA *et al.*, 1997b).

Com relação à outorga qualitativa, ou seja, destinada à diluição de efluentes líquidos, verifica-se, através da Resolução n.º 16/2001, do CNRH, que a abordagem deve ser efetuada com a reserva de uma vazão para a diluição dos poluentes emitidos, de modo que o corpo hídrico mantenha sua qualidade dentro dos limites de concentração da classe em que estiver enquadrado (CNRH, 2001).

#### 3.1.4 Ciclo Hidrológico

A água, através de seu ciclo global, interliga a atmosfera, as massas de terra e os oceanos, circulando através de cada um destes domínios, mudando de fase (sólido, líquido e gasoso), dando suporte à biosfera e aos humanos, desgastando os continentes e nutrindo as zonas costeiras (WWAP, 2009). O ciclo hidrológico terrestre é a base fundamental dos recursos hídricos, sendo definido como o fenômeno de circulação fechada da água, entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado, fundamentalmente, pela energia solar, associada à gravidade e à rotação do planeta. Este intercâmbio pode ocorrer nos dois sentidos: da superfície para a atmosfera, em que a água encontra-se no estado de vapor, devido aos processos de evaporação e transpiração; e no sentido atmosfera-superfície, onde pode ocorrer transferência de água em qualquer estado físico, sendo que as formas mais significativas são as precipitações de chuva e neve (TUCCI, 2004).

O ciclo da água é composto por diversos processos (Figura 3.8), sendo que os principais são: precipitação, infiltração, escoamento superficial, evaporação e transpiração. A seguir, serão descritos os conceitos e aspectos relevantes de cada um destes processos:

##### a) Precipitação:

É a água proveniente do vapor da atmosfera, que é depositada na superfície terrestre sob diferentes formas, como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. É a principal maneira pela qual a água armazenada na atmosfera retorna para a superfície terrestre, sendo responsável pela recarga da água subterrânea e pelo escoamento superficial. Além disso, a

precipitação apresenta grande variabilidade temporal e espacial, influenciando diretamente na grande diferença de disponibilidade hídrica entre certas regiões (TUCCI, 2004).

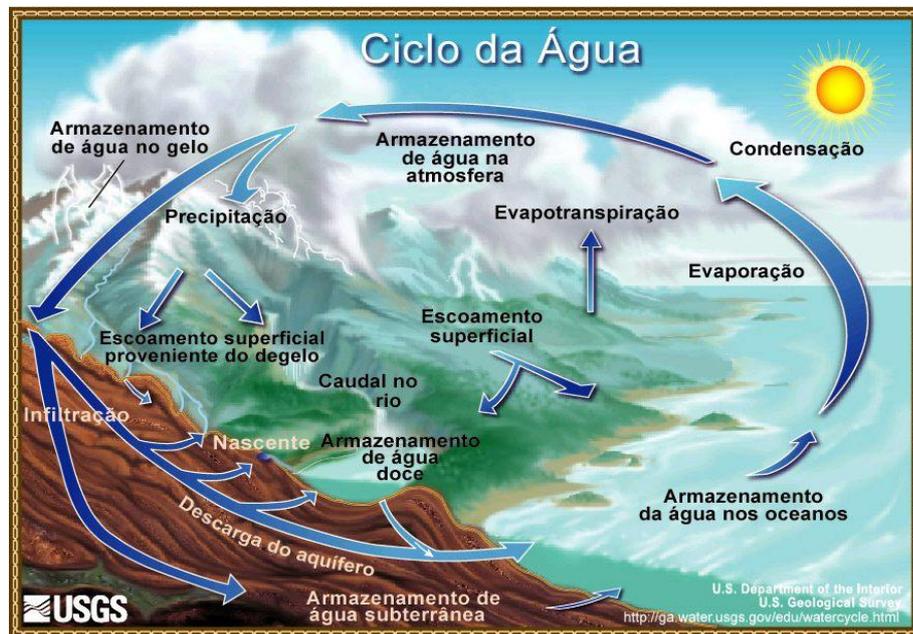


Figura 3.8 – Ilustração dos processos hidrológicos que compõem o ciclo da água.  
(Fonte: USGS, 2011).

Um parâmetro relacionado a este processo, que apresenta grande importância principalmente para a área da agricultura, é a precipitação efetiva, uma vez que esta se refere à fração da precipitação total que realmente fica armazenada no solo, ou seja, não atinge as camadas profundas do solo, não escoam superficialmente e nem é perdida por evaporação, ficando, assim, disponível para os cultivos agrícolas. Por esse motivo, sua estimativa tem diversas utilidades, como por exemplo, na determinação do volume de irrigação suplementar que deve ser aplicado em um certo cultivo ou, ainda, no planejamento da produção agrícola de forma mais eficiente, na seleção de cultivares e de práticas agrônômicas mais adaptadas para uma determinada região (DASTANE, 1974; USDA, 1993).

#### b) Infiltração:

É o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, fazendo com que se mova para baixo, através dos vazios do solo. O desenvolvimento deste processo depende da quantidade de água disponível, das características do solo (densidade, porosidade, estrutura, etc.), do estado da superfície e das quantidades de água e ar já presentes no solo. É possível distinguir duas zonas no processo de infiltração: a zona de aeração, ou não saturada, e a zona saturada. A primeira é a zona mais superficial, em que a

água ainda pode ser evaporada, ser absorvida pelas raízes das plantas, ou se deslocar verticalmente para camadas mais profundas. Quanto à zona saturada, esta é onde ocorre a circulação da água, constituindo o lençol subterrâneo ou formando os aquíferos. Estes corpos hídricos são muito importantes do ponto de vista dos recursos hídricos, uma vez que refletem a produção de água na bacia hidrográfica durante os períodos de seca e formam importantes reservatórios que podem ser bombeados e utilizados, principalmente, em regiões áridas e semiáridas (TUCCI, 2004).

c) Escoamento superficial:

É o fluxo de água, gerado pelo excesso de precipitação, que escoar pela superfície do solo. Este fluxo ocorre quando a capacidade de infiltração do solo é superada tanto pela sua redução gradual como pela elevada intensidade da precipitação.

Assim, os fatores que influenciam neste processo são: características da precipitação, como a intensidade; os atributos do solo, principalmente a permeabilidade; e as formas de manejo do solo. O escoamento superficial é um dos componentes do ciclo hidrológico mais importante para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica, pois constitui a maior fonte de recursos hídricos renováveis na maioria das regiões do planeta. Estima-se que em torno de 75% do uso global da água é derivada do escoamento superficial, sendo que um terço do total disponível encontra-se na América Latina (PRUSKI *et al.*, 2006).

d) Evaporação e Transpiração:

A evaporação é o processo pelo qual a água se transforma do estado líquido para o gasoso, retornando da superfície do solo e dos corpos d'água (oceanos, lagos, rios, etc.) para a atmosfera. A transpiração é o processo de evaporação devido à ação fisiológica dos seres vivos, sobretudo dos vegetais, por meio dos estômatos localizados em suas folhas. A ocorrência destes dois processos simultaneamente é denominada evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998).

A evapotranspiração das plantas é a principal causa do alto consumo de água pela agricultura, podendo variar entre diferentes culturas e condições climáticas, como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, quantidade de luz, entre outros (ALLEN *et al.*, 1998). Por esse motivo, a estimativa de variáveis relacionadas à evapotranspiração dos cultivos agrícolas é de grande importância para avaliar tanto o potencial de adaptação e rendimento da planta às condições ambientais da região de plantio como os impactos aos recursos hídricos, principalmente em regiões com pouca disponibilidade de água. Neste contexto, se destacam a (MATZENAUER *et al.*, 2003):

- Evapotranspiração potencial ou máxima ( $ET_m$ ): que é o volume de evapotranspiração que ocorre em condições ideais de crescimento, ou seja, com boa disponibilidade de água e nutrientes e sem a presença de doenças e pragas;
- Evapotranspiração real ( $ET_r$ ): que expressa o consumo de água ocorrido pela evapotranspiração das plantas em condições de desenvolvimento limitantes.

Para se obter os valores de evapotranspiração, podem ser empregados métodos diretos e indiretos. No entanto, a medição direta, através de equipamentos como o lisímetro, geralmente envolve alto custo e pessoal treinado, fazendo com que este método se torne inapropriado para procedimentos de rotina e para a realização de trabalhos em que o foco principal não seja a estimativa destas variáveis. Por esse motivo, os métodos indiretos, que utilizam fórmulas empíricas, são mais comuns de serem empregados. Uma das metodologias mais conhecidas e aplicadas para estimar a  $ET_m$  ( $mm$ ) é por meio da relação direta entre a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ,  $mm$ ) e o coeficiente de cultura ( $K_c$ , *adimensional*), conforme Equação 3.1 (ALLEN *et al.*, 1998).

$$ET_m = K_c * ET_0 \quad (3.1)$$

Dentro deste contexto, a variável  $ET_0$  se refere à taxa de evaporação proveniente de uma superfície de referência, que por sua vez, é definida como uma cultura hipotética, do tipo gramínea, com características específicas padronizadas, cultivada em uma superfície extensa, totalmente coberta e sem limitação de água. Dessa forma, a introdução deste conceito permite que a demanda evaporativa da atmosfera, em um local e tempo do ano específicos, seja estudada apenas em função de variáveis climáticas, pois é independente do tipo e do desenvolvimento da cultura, das práticas de manejo agrícola e das características do solo (ALLEN *et al.*, 1998).

Entre as diferentes maneiras de determinar a  $ET_0$  ( $mm$ ), o método Penman-Monteith foi adotado como o procedimento padrão da FAO, devido a sua capacidade de estimar, com muito boa aproximação, os valores encontrados em medições diretas. A Equação 3.2 mostra a fórmula empregada, em que  $\Delta$  ( $kPa/^\circ C$ ) é a inclinação da curva de pressão de vapor;  $R_n$  ( $MJ/m^2.dia$ ) é a radiação líquida na superfície da cultura;  $G$  ( $MJ/m^2.dia$ ) é a densidade do fluxo de calor no solo;  $\gamma$  ( $kPa/^\circ C$ ) é a constante psicrométrica;  $T$  ( $^\circ C$ ) é a temperatura média do ar, a 2 metros de altura;  $U_2$  ( $m/s$ ) é a velocidade do vento, a 2 metros de altura;  $e_s$  ( $kPa$ ) é a pressão de saturação do vapor; e  $e_a$  ( $kPa$ ) é a pressão de vapor (ALLEN *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3.2)$$

Com relação ao coeficiente de cultura ( $K_c$ ), este componente é responsável por expressar as características específicas da cultura plantada em uma certa condição, diferenciando sua evapotranspiração máxima em relação à da cultura de referência. Os principais fatores que determinam o  $K_c$  são as características da variedade cultivada, como a altura, as propriedades aerodinâmicas, as propriedades da folha e do estômato e o albedo (medida da refletividade da luz), além das condições climáticas, da capacidade de evaporação do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura. Segundo Allen *et al.* (1998), devido às mudanças no valor do  $K_c$  durante o crescimento da planta, o período total de cultivo pode ser dividido em quatro etapas (Figura 3.9): a inicial (do plantio até 10% de cobertura do solo); a de desenvolvimento (de 10% à total cobertura do solo); a média (até o início da maturidade); e a final (do início da maturidade até o período de colheita).

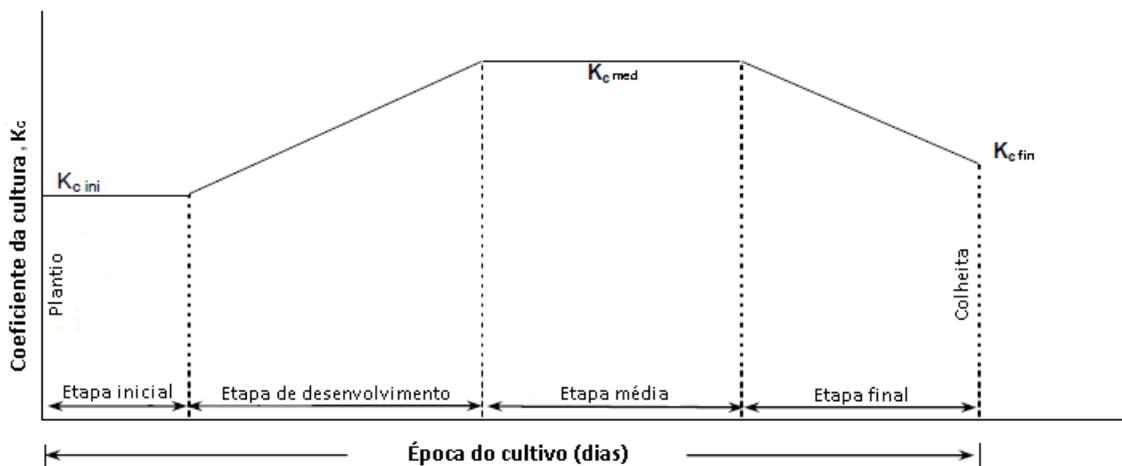


Figura 3.9 – Gráfico ilustrativo do comportamento do valor do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), durante o período de cultivo.

(Fonte: adaptado de CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004)

Com relação à estimativa da evapotranspiração real da cultura ( $ET_r$ ), um dos métodos indiretos mais empregados é a realização do balanço hídrico volumétrico do solo na região de cultivo. Nesta técnica, são contabilizadas todas as entradas e saídas de água do sistema solo-planta-atmosfera. Conforme mostra a Figura 3.10, em um determinado volume de solo e intervalo de tempo (dia, decêndio e mês), as principais formas de contribuição para o aumento da quantidade de água são a precipitação, a ascensão capilar e a irrigação, assim como as

principais saídas de água são a evapotranspiração do cultivo, a drenagem profunda e o escoamento superficial (USDA, 1993).

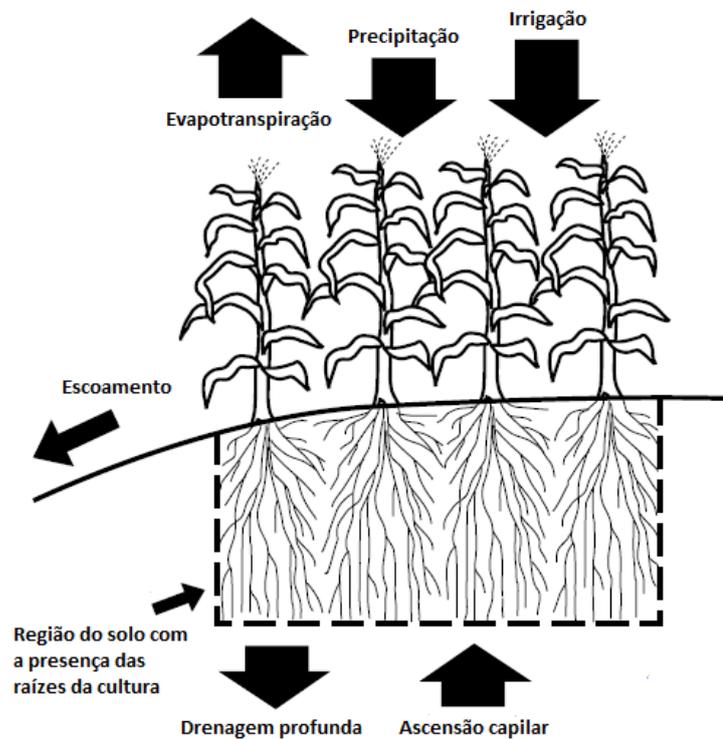


Figura 3.10 – Ilustração dos principais fluxos de entrada e saída de água que compõem o balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera em um cultivo agrícola.

(Fonte: adaptado de USDA, 1993).

Dessa forma, o balanço hídrico diário para a zona radicular da cultura pode ser representado pela Equação 3.3, onde  $\theta_i$  e  $\theta_{i-1}$  é a umidade volumétrica do solo no fim do dia  $i$  e do dia anterior ( $i - 1$ ), em mm;  $P_i$  é a precipitação total no dia  $i$ , em mm;  $AC_i$  é o volume de água da ascensão capilar no dia  $i$ , em mm;  $I_i$  é o volume de água da irrigação, em mm, que efetivamente atinge o solo e a cultura no dia  $i$ , ou seja, descontando as perdas que ocorrem no sistema de irrigação;  $ET_{r,i}$  é a evapotranspiração real da cultura, ocorrida no dia  $i$ , em mm;  $DP_i$  é a drenagem profunda, no dia  $i$ , em mm; e  $ES_i$  é o escoamento superficial, ocorrido no dia  $i$ , em mm (USDA, 1993).

$$\theta_i = \theta_{i-1} + P_i + AC_i + I_i - ET_{r,i} - DP_i - ES_i \quad (3.3)$$

A partir dessa equação, nota-se que, se for possível conhecer o volume de água armazenada no solo e os demais volumes de entrada e saída do sistema, poderá ser encontrado o valor da evapotranspiração real da cultura, o qual, dependendo da disponibilidade de água,

poderá ser menor ou igual à evapotranspiração máxima calculada pela Equação 3.1. Para a estimativa destes parâmetros, existem, atualmente, diversos modelos de simulação do balanço hídrico, incluídos em programas computacionais, que vem apresentando resultados satisfatórios. De forma geral, estes modelos possuem uma interface simples e são facilmente executados, a partir da inserção de dados essenciais relacionados à caracterização hidráulica do solo, da cultura e do clima (JOBIM e LOUZADA, 2009; LOUZADA, 2004; SOUZA e GOMES, 2008).

Um dos programas mais conhecidos e utilizados no mundo é o CROPWAT, o qual é baseado nas diretrizes estabelecidas pela FAO, descritas na publicação de Allen *et al.* (1998). Neste modelo, a equação do balanço hídrico expressa a água disponível em um volume de solo, determinado por uma área horizontal quadrada e pela altura ajustada à profundidade das raízes do cultivo. Além disso, a água disponível para as plantas está relacionada à capacidade de armazenamento do solo (CAD) e à sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. Esta última característica é expressa pela fração “*p*”, de depleção sem estresse, ou seja, é a fração da água existente no solo que pode ser utilizada pela planta, sem haver um gasto energético excessivo.

### 3.1.5 Água e a Demanda Energética

Atualmente, água e energia são recursos que estão fortemente interligados. A água desempenha um importante papel no desenvolvimento e uso dos recursos energéticos, sendo necessária para a extração, refino, processamento, transporte e resfriamento, além de ter uso direto, como no caso das hidrelétricas. Neste mesmo sentido, a energia também é fundamental para o aproveitamento dos recursos hídricos, sendo utilizada no bombeamento, tratamento, transporte e condicionamento final da água (USDE, 2006).

Além disso, a demanda energética e os recursos hídricos são afetados praticamente pelos mesmos motivos: crescimento demográfico e desenvolvimento econômico, social e tecnológico, incluindo as mudanças nos padrões de consumo. Neste contexto, o consumo de energia fóssil também é o principal impulsionador das mudanças climáticas, as quais podem interferir no ciclo hidrológico e ameaçar a sustentabilidade dos recursos hídricos (PATE *et al.*, 2007).

Em todo o mundo, nota-se uma forte tendência na procura por fontes alternativas de energia. Um dos motivos desta mudança é o aumento na demanda global, onde se estima que, se forem mantidas as políticas atuais, haverá um crescimento em torno de 55% até 2030, sendo que os países em desenvolvimento serão responsáveis por 74% deste aumento (WWAP, 2009). Somado a isso, a instabilidade e o aumento no preço da energia,

principalmente derivada do petróleo, faz com que muitos países estimulem a procura por novas fontes, a fim de diminuir a dependência da importação. Outro fator importante, é a implementação de políticas de incentivo à substituição das fontes tradicionais por energias renováveis, devido aos recentes comprometimentos, principalmente dos países desenvolvidos, em reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, que contribuem com as mudanças climáticas (GERBENS-LEENES *et al.*, 2009a).

Esta inovação nos recursos energéticos é composta e dividida na seguinte maneira: tecnologias da primeira geração (energia hidrelétrica e combustão de biomassa); da segunda geração (aquecimento solar e energia eólica); e da terceira geração (energia solar concentrada, energia dos oceanos, sistemas geotérmicos e sistemas integrados de bioenergia). Estima-se que, até 2030, a participação destas novas fontes aumentará em 60% (USDE, 2006).

Dentre estas novas tecnologias, a bioenergia merece maior atenção, quando o assunto é a relação entre recursos hídricos e energéticos. Isso porque esta energia é derivada de matéria-prima biológica, como culturas de grãos, de açucareiras, de oleaginosas, de amido e de celulose (gramíneas e árvores), as quais necessitam de grandes quantidades de água para se desenvolverem. Entre os diferentes tipos de bioenergia, os biocombustíveis líquidos (etanol e biodiesel), embora representem uma pequena porcentagem de todos os produtos bioenergéticos, são de grande importância, devido à capacidade de substituir os combustíveis fósseis (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2008).

Em termos globais, aproximadamente 10% do suprimento total de energia provém da biomassa, porém a maior parte (80%) é fornecida por fontes tradicionais, como madeira, estrume e resíduos de cultivos agrícolas. Da bioenergia “moderna”, dois terços são produzidos a partir de materiais vegetais frescos e resíduos orgânicos, que são utilizados para a produção de eletricidade e calor. Dessa forma, apenas 5% da biomassa destinada à produção de energia é utilizada para produzir biocombustível líquido, os quais representam atualmente menos de 2,7% da matriz energética mundial para transporte (REN21, 2011).

No entanto, nota-se claramente que a produção destes combustíveis está crescendo em ritmo acelerado. A produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar, milho, beterraba sacarina, trigo e sorgo, triplicou entre 2000 e 2009, atingindo 86 bilhões de litros em 2010. O Brasil, usando a cana-de-açúcar (54% do total cultivado), e os Estados Unidos, utilizando na maior parte o milho, são os maiores produtores, representando 88% do suprimento global. Quanto à produção de biodiesel, derivado de gordura animal ou do óleo de culturas como canola, girassol, soja, palma ou pinhão manso, esta chegou a 19 bilhões de litros em 2010, com um crescimento médio de 38%, nos últimos 5 anos. A União Europeia, com 53% do total, é o

centro da produção de biodiesel, destinando em torno de 47% do óleo vegetal produzido para este setor (REN21, 2011).

Este cenário de expansão na produção de biocombustíveis, dependendo das políticas locais e das condições agroclimáticas, pode causar grandes impactos quantitativos e qualitativos sobre os recursos hídricos. Tais impactos seriam provocados, em sua maior parte, pelo aumento na aplicação de fertilizantes e pela retirada excessiva de água destinada à irrigação, os quais são necessários para melhorar a produtividade das culturas que servem de matéria-prima. Dessa forma, essa situação pode resultar no crescimento da eutrofização dos corpos hídricos e da competição com outros usos, além de diversos danos ao meio ambiente e à saúde humana ocasionados pela falta de água. Além disso, a acidificação e a erosão do solo, a perda de biodiversidade pela alteração no uso da terra e a alta toxicidade dos pesticidas também são fatores que podem influenciar na qualidade e disponibilidade hídrica (DOMINGUEZ-FAUS *et al.*, 2009).

Diante deste cenário, em muitos países, como a Índia, China e Estados Unidos, os impactos resultantes podem ser significativos, caso não haja um controle efetivo e não sejam realizadas avaliações criteriosas na implementação de planos e políticas nacionais (FRAITURE *et al.*, 2008). No Brasil, apesar de ser muito pequena a quantidade de água usada na irrigação de culturas para a produção de biocombustíveis, existem algumas localidades, como a região sul do estado do Rio do Grande do Sul, em que a agricultura irrigada já é muito praticada para a produção de comida (ver Figura 3.7), provocando situações preocupantes de disponibilidade de água (ANA, 2011).

### 3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA

Nos últimos anos, diante do crescimento dos desafios relacionados à utilização dos recursos hídricos em nível local, regional e global, há uma necessidade cada vez maior de se avaliar este aspecto, de forma mais consistente, pelas instituições públicas e privadas e também de se conscientizar os próprios consumidores. Por esse motivo, atualmente estão sendo desenvolvidas diversas metodologias e ferramentas que podem ser utilizadas em estudos de avaliação do uso da água, tais como (MORRISON *et al.*, 2010):

- Global Water Tool, da organização World Business Council for Sustainable Development (WBCSD): é uma plataforma online, que faz o cruzamento de informações sobre o uso coletivo da água, a descarga de efluentes e as instalações industriais com dados das bacias hidrográficas e/ou dos países, como meio de auxiliar na avaliação de riscos relacionados ao uso da água.

- Water Sustainability Planner/Tool, da organização Global Environmental Management Initiative (GEMI): são duas ferramentas online, destinadas a auxiliar as empresas a obter um melhor entendimento das necessidades e outras circunstâncias relacionadas à água. A ferramenta “*Tool*” avalia a relação das empresas com a água, identifica riscos associados e descreve as ações, para cada tipo de negócio. A outra parte, chamada de “*Planner*”, ajuda a esclarecer a dependência de água das empresas e a situação da bacia hidrográfica local.
- Pegada Hídrica, da organização Water Footprint Network (WFN): é um método para medir o volume de água usado de forma direta e indireta, por qualquer tipo ou grupo de consumidores.
- Análise do Ciclo de Vida (ACV): é uma ferramenta de análise de sistemas, desenvolvida especificamente para mensurar a sustentabilidade de produtos, através de todos os componentes da cadeia produtiva.

Entre estas diferentes opções, a Pegada Hídrica e a ACV, por permitirem avaliações em toda a cadeia produtiva, são as que têm sido mais mencionadas, debatidas e aplicadas dentro da comunidade científica e por diversos países e empresas de todo o mundo. Por esse motivo, esta seção destina-se a relatar e descrever as principais características destes dois métodos.

### 3.2.1 Pegada Hídrica

#### 3.2.1.1 Características Gerais

O conceito de “Pegada Hídrica”, mundialmente conhecido como “Water Footprint”, foi introduzido e desenvolvido a partir de 2002, por pesquisadores da Universidade de Twente – Holanda (fundadores da organização WFN), com o objetivo de fornecer um indicador de fácil compreensão da apropriação dos recursos hídricos pelo consumo humano, abrangendo os usos diretos e indiretos (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004; HOEKSTRA e HUNG, 2002). Para tanto, estes pesquisadores se basearam no conceito da “água virtual”, o qual foi anteriormente criado por Allan (1993, 1994), em seus estudos sobre a escassez da água no Oriente Médio. Nestes trabalhos, a “água virtual” se refere à quantidade total de água que é requerida para a produção de um certo produto, relacionando este conceito principalmente à quantificação dos fluxos de água que ocorre na exportação/importação de bens e serviços entre países ou regiões. Outro método que serviu de inspiração foi a “Pegada Ecológica”, introduzido na década de 1990, como um indicador também relacionado ao consumo humano

de recursos naturais, entretanto voltado à quantificação do uso de espaço bioprodutivo disponível, expresso em unidades de área (HOEKSTRA, 2009).

A partir disso, a Pegada Hídrica foi definida, de acordo com a organização WFN, como a medida do volume total de água utilizada para produzir bens e serviços, consumidos por qualquer grupo bem definido de consumidores, que pode ser uma pessoa, uma cidade, um estado, um país, e ainda uma empresa ou seus produtos (WFN, 2011). Assim, por exemplo, a Pegada Hídrica de um produto é o volume total de água utilizada em todos os processos envolvidos nas etapas de sua cadeia produtiva; a de uma pessoa, é o volume utilizado para usos diretos (hidratação, higiene, preparação de alimentos, etc.) e para a produção dos produtos consumidos pela mesma; e a de um país, é o somatório do volume utilizado por todos os seus habitantes (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Dessa forma, os resultados podem ser expressos em unidades de volume de água consumida por unidade de produto fabricado (ex.: m<sup>3</sup>/kg), ou por habitante, ou por unidade de tempo, no caso de ter um espaço delimitado (ex.: m<sup>3</sup>/ano no Brasil). Também é importante destacar que a Pegada Hídrica é geograficamente discriminada; ou seja, os resultados mostram a situação específica do local onde ocorre o uso da água e dependem exclusivamente de suas características (GERBENS-LEENES *et al.*, 2008; HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Ainda sobre a definição do conceito da Pegada Hídrica, é importante observar que, atualmente, a utilização deste termo é objeto de debate na comunidade científica. Isso porque, alguns autores de estudos relacionados à metodologia da ACV estão propondo incorporar ao cálculo da Pegada Hídrica fatores de caracterização do estresse hídrico local, transformando esta medida puramente volumétrica em um resultado ponderado por um índice, que reflita as condições locais de escassez da água (PFISTER *et al.*, 2009; RIDOUTT *et al.*, 2009; RIDOUTT e PFISTER, 2010). Segundo estes pesquisadores, esta mudança é justificada, principalmente, pelo fato de que os resultados da Pegada Hídrica original, por não incluírem a relação disponibilidade versus demanda, não expressam de forma clara o significado ou o impacto do valor final encontrado. Desse modo, por exemplo, na comparação de dois resultados diferentes de Pegada Hídrica, o valor menor pode ter maior importância e ser mais impactante do que o outro, se o uso da água ocorrer em uma região com maior escassez. Para ilustrar essa argumentação, é citado o exemplo da Pegada do Carbono, em que todos os resultados descrevem o potencial de aquecimento global na unidade de dióxido de carbono equivalente, permitindo, desse modo, a comparação entre diferentes produtos fabricados em qualquer região do planeta.

Em contrapartida, os integrantes da organização WFN sustentam que as informações fornecidas pela Pegada Hídrica volumétrica são direcionadas, principalmente, ao apoio na

gestão dos recursos hídricos, a qual requer informações explícitas de tempo e espaço, com valores volumétricos reais. Dessa forma, a alteração proposta não seria apropriada por esta perspectiva, pois as informações fornecidas pelos resultados consistentes da Pegada Hídrica original desapareceriam, se transformados em discutíveis índices de impacto agregado, sendo isso apropriado apenas para estudos de ACV. Por fim, estes pesquisadores argumentam que, para evitar confusões de objetivos e significados, deve ser mantido o termo “Pegada Hídrica” somente para os valores volumétricos, que são úteis tanto para a gestão dos recursos hídricos como para a fase de inventário da ACV, e, assim, deixar para nomear os resultados ponderados somente como “índices do uso da água” na ACV (HOEKSTRA *et al.*, 2011). Portanto, ainda cabe salientar que, no decorrer deste trabalho, o termo “Pegada Hídrica” será sempre relacionado à metodologia desenvolvida pela WFN.

Após a definição do conceito, pode-se dizer que a Pegada Hídrica tem por objetivo permitir que os consumidores tenham um melhor entendimento de suas relações com as bacias hidrográficas, prover informações às decisões de gestão e aumentar a conscientização sobre os desafios da água no mundo. Dessa forma, essa metodologia foi desenvolvida como uma ferramenta de contabilidade, que pode permitir a legisladores, planejadores e gestores realizar o mapeamento e a quantificação do uso diversificado da água em um sistema complexo (agrícola, urbano, industrial) e, assim, auxiliar no entendimento da relação do uso da água com a sua disponibilidade e de como a água está sendo alocada entre os usuários, para que suas decisões estejam mais bem fundamentadas. Como ferramenta analítica, a Pegada Hídrica fornece conhecimento para ajudar as pessoas a entender o quê pode ser feito e não para mostrar como fazer (MORRISON *et al.*, 2010).

De forma resumida, a Pegada Hídrica é, então, dividida em três componentes diferentes – Água Azul, Água Verde e Água Cinza – sendo que todos são expressos em unidades volumétricas de água. Conforme Hoekstra *et al.*, (2011), estes são definidos da seguinte maneira:

- **Água Azul:** é o volume de água doce, proveniente dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, que é efetivamente consumido (uso consuntivo), ou seja, não retorna ao sistema e, portanto, fica indisponível para uso na região em que foi extraído. Dessa forma, este componente se refere a qualquer tipo de consumo (ex.: evaporação, incorporação no produto final, etc.) que ocorrer com o uso da água de rios, lagos, aquíferos, entre outros.
- **Água Verde:** é o volume de água consumida proveniente do processo de precipitação (chuva, neve, orvalho, etc.), após esta se infiltrar e ficar armazenada no solo. Portanto, esta se refere basicamente ao consumo pela vegetação, incluindo os

cultivos agrícolas e florestais, uma vez que esta é a única forma de utilização desta fonte de água.

- **Água Cinza:** é um indicador da poluição hídrica, sendo medido pelo volume teórico de água necessária para diluir os poluentes emitidos aos corpos hídricos, de modo que estes permaneçam com um padrão de qualidade (concentração) previamente estabelecido. Dessa forma, este componente é uma maneira de estimar a diminuição da assimilação dos poluentes que um determinado corpo hídrico possui.

Para facilitar o entendimento da diferença entre estes componentes, será descrito, como exemplo, o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, relacionado com a Pegada Hídrica de um produto agrícola (Figura 3.11). De forma geral, após ser precipitada, uma parcela da água que atinge o solo pode se infiltrar ou escoar, para formar os corpos hídricos e outra parte pode ficar armazenada no mesmo. Depois disso, a água que permaneceu no solo pode ser consumida pelo cultivo agrícola (evapotranspiração e incorporação), sendo contabilizada como **Água Verde**, ou ser evapotranspirada pela vegetação nativa. Quanto à outra parte, esta pode ser extraída artificialmente do corpo hídrico para a irrigação ou escoar e evaporar para fora da bacia. Do volume total extraído, uma fração pode retornar, sem ser utilizada pelo cultivo, e outra pode ser consumida de diferentes maneiras (**Água Azul**), incluindo a evaporação nos canais de transporte, no armazenamento e na aplicação da irrigação, e a evapotranspiração e incorporação no próprio cultivo. Além disso, as parcelas que escoam, infiltram e retornam do que foi precipitado e extraído dos corpos hídricos carregam poluentes originados pela aplicação de insumos no cultivo agrícola (fertilizantes, pesticidas, etc.), que degradam a qualidade da água, constituindo a **Água Cinza** (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

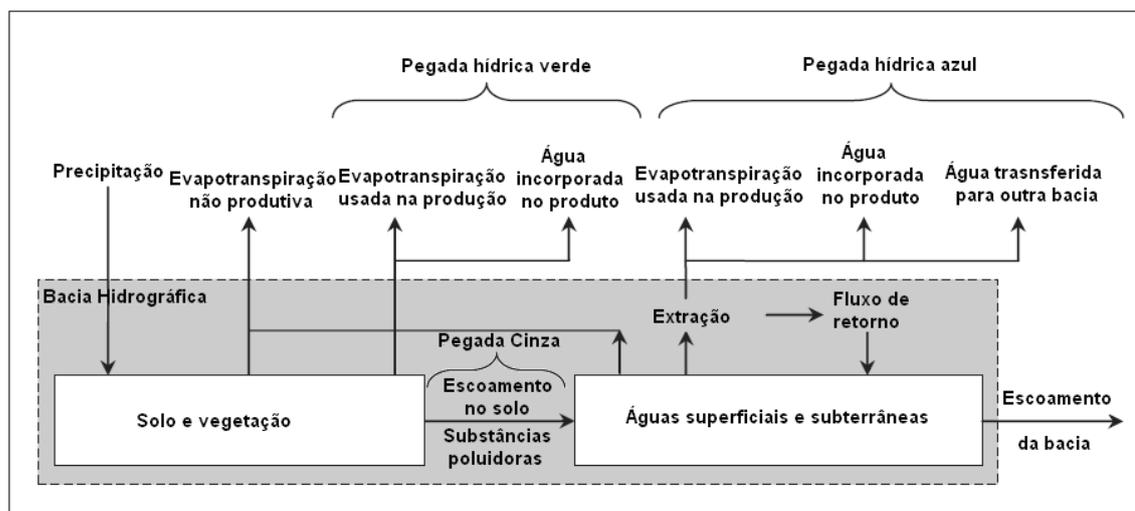


Figura 3.11 – Esquemática dos componentes da Pegada Hídrica (Água Verde, Azul e Cinza), relacionados ao balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

(Fonte: adaptado de HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Diante destas formas de quantificação, a Pegada Hídrica, como um indicador do uso da água, se diferencia da tradicional medição em três aspectos: (i) não considera o uso da água extraída de um corpo hídrico, se esta retorna ao mesmo local, sem alterações significativas de qualidade e quantidade; (ii) não se restringe apenas ao uso da Água Azul, incluindo também a Água Verde e Cinza; e (iii) não se restringe apenas ao uso direto da água, mas também considera o uso indireto (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

### 3.2.1.2 Metodologia da Pegada Hídrica

De acordo com a publicação “*The Water Footprint Assessment Manual*” (HOEKSTRA *et al.*, 2011), que é o guia padrão de aplicação da Pegada Hídrica da WFN, esta metodologia envolve um conjunto de atividades com o objetivo de: (i) quantificar e situar a Pegada Hídrica do objeto em estudo, ou quantificar, no tempo e no espaço, a Pegada Hídrica de uma área geograficamente delimitada; (ii) analisar a sustentabilidade ambiental, social e econômica do valor resultante da Pegada Hídrica; e (iii) formular uma resposta estratégica. Assim, a metodologia da Pegada Hídrica, em sua execução completa, é composta por quatro fases distintas (Figura 3.12):

- a) Definição de objetivos e escopo;
- b) Contabilidade da Pegada Hídrica;
- c) Análise da sustentabilidade da Pegada Hídrica;
- d) Formulação da resposta estratégica.

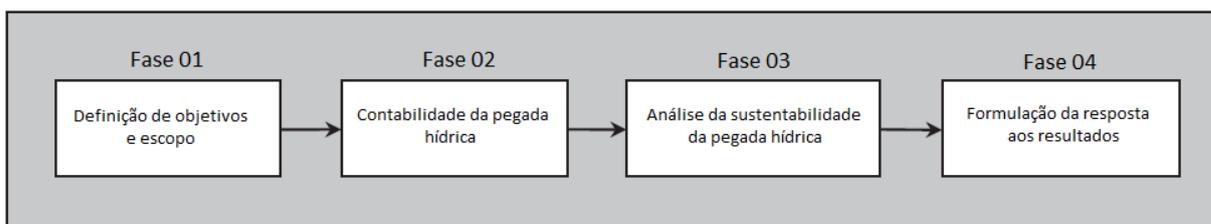


Figura 3.12 – Fases de execução da Pegada Hídrica.

(Fonte: adaptado de HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Para que as escolhas feitas durante o estudo da Pegada Hídrica sejam o mais transparente possível, deve-se começar com uma definição clara dos objetivos e escopo. Isso porque, a Pegada Hídrica pode ser empregada para vários propósitos e em contextos diferentes, como por exemplo, o governo de um país pode estar interessado em conhecer sua dependência de recursos hídricos estrangeiros, ou o órgão gestor de uma região hidrográfica pode estar interessado em saber se a Pegada Hídrica total das atividades humanas, dentro da

área da bacia, está violando as exigências ambientais ou os padrões de qualidade, ou ainda uma empresa pode estar interessada em avaliar sua dependência, dentro da cadeia de suprimentos, de recursos hídricos em áreas com escassez (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Dessa forma, nesta fase de determinação dos objetivos e escopo deve ser especificado, em primeiro lugar, o objeto de interesse do estudo, que pode ser um processo, um produto, um grupo de consumidores, um país ou uma região hidrográfica, um setor de negócios, etc. Depois disso, para que seja conhecido o nível de detalhamento exigido pelo estudo, outras definições devem ser feitas, dentre as quais estão: o objetivo final, que pode ser a sensibilização da população, a identificação de pontos críticos, a formulação de políticas, ou apenas a quantificação do consumo de água; as fases que o estudo irá abordar; os componentes considerados (Água Azul, Verde e Cinza); a escala de tempo e espaço dos dados coletados; e a fronteira dos dados incluídos na quantificação da Pegada Hídrica, ou seja, o que vai ser considerado e o que vai ser excluído do estudo (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

A próxima fase é a de contabilidade da Pegada Hídrica ( $PH$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), onde os dados são coletados e a quantificação do consumo de água é realizada, sendo dividida em Água Verde ( $AV$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), Azul ( $AA$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) e Cinza ( $AC$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) (Equação 3.4). Nesta etapa, a base para o cálculo da Pegada Hídrica de qualquer objeto em estudo, é a Pegada Hídrica de um processo unitário. Desse modo, a Pegada Hídrica de um produto, por exemplo, é a soma dos valores obtidos nos processos unitários envolvidos em sua produção (CHAPAGAIN e ORR, 2008).

$$PH = AV + AA + AC \quad (3.4)$$

A Água Verde, conforme definido anteriormente, acaba sendo relevante apenas para produtos e processos que envolvem alguma atividade agrícola ou florestal. Portanto, o cálculo deste componente é realizado, basicamente, através do somatório do volume de água da precipitação natural, que é evapotranspirada diariamente pela cultura ( $ET_{verde}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), durante todo o período de cultivo (do primeiro dia de plantio,  $d=1$ , ao fim da colheita,  $fc$ ), e o volume que fica incorporada na mesma ( $VI_{verde}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) (Equação 3.5) (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004).

$$AV = \sum_{d=1}^{fc} ET_{verde} + VI_{verde} \quad (3.5)$$

O cálculo do volume de água incorporada na cultura pode ser realizado simplesmente identificando a fração de água que compõe o cultivo após ser colhido. Entretanto, a maioria dos estudos não contabiliza este elemento, por representar um valor muito baixo, na ordem de 0,1 a 1% do total da Pegada Hídrica Verde (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004; GERBENS-LEENES *et al.*, 2008; GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2009; HOEKSTRA *et al.*, 2011). Quanto ao componente  $ET_{verde}$ , conforme mencionado anteriormente no subitem 3.1.4 *Ciclo Hidrológico*, este pode ser medido por meio de diferentes métodos; entretanto, por questões práticas, os estudos de Pegada Hídrica, geralmente, o determinam utilizando programas computacionais, que realizam a simulação do balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera (ERCIN *et al.*, 2012; HESS, 2010; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2010).

Para a quantificação da Água Azul, o consumo efetivo da água extraída de um corpo hídrico é determinado pela soma das três possibilidades em que isso pode ocorrer (Equação 3.6): evapotranspiração ( $ET_{azul}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), incorporação no produto ( $VI_{azul}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) e quando a água não retorna ao sistema ( $NR$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), por ser descartada em outra bacia hidrográfica ou no oceano (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

$$AA = ET_{azul} + VI_{azul} + NR \quad (3.6)$$

Assim como na Água Verde, o consumo de água pela incorporação no produto ( $VI_{azul}$ ), geralmente, representa um valor que não é significativo com relação à Água Azul total, por esse motivo, a maioria dos estudos relacionados à este tema não inclui este elemento (HOEKSTRA *et al.*, 2011). Quanto ao componente  $ET_{azul}$ , este considera o consumo tanto da água de irrigação na agricultura ( $ETA_{agric}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) como da água utilizada em processos industriais ( $ETA_{ind}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) (Equação 3.7). Na fase agrícola, para simplificar a coleta de dados, a maioria dos trabalhos de Pegada Hídrica consideram apenas o consumo diário da água aplicada na irrigação, pela evapotranspiração da cultura ( $ET_{irrig}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), durante todo o período de cultivo (do primeiro dia de plantio,  $d=1$ , ao fim de colheita,  $fc$ ) (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2007; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011; CHAPAGAIN e ORR, 2009; ELENA e ESTHER, 2010; GERBENS-LEENES *et al.*, 2009a, 2009b). Entretanto, nesse cálculo também pode ser contabilizada a evaporação diária, que ocorre no sistema de irrigação, incluindo o armazenamento ( $E_{arm}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), o transporte ( $E_{transp}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) e a aplicação ( $E_{aplic}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) da água (MISHRA e YEH, 2011), conforme Equação 3.8.

$$ET_{azul} = ETA_{agric} + ETA_{ind} \quad (3.7)$$

$$ETA_{agric} = \sum_{d=1}^{fc} (ET_{irrig} + E_{arm} + E_{transp} + E_{aplic}) \quad (3.8)$$

Ainda dentro da Água Azul da fase agrícola, os parâmetros  $E_{arm}$ ,  $E_{transp}$  e  $E_{aplic}$  podem ser estimados com a obtenção da fração de perda destes sistemas, os quais dependem das condições climáticas e da tecnologia empregada (MISHRA e YEH, 2011). Com relação ao  $ET_{irrig}$ , este pode ser determinado, de acordo com a Equação 3.9, pelo menor valor entre a irrigação efetiva aplicada ( $I_{ef}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) e o volume de irrigação exigido pelo cultivo para um crescimento ótimo ( $I_c$ ,  $m^3$  ou  $L$ ). Nesse cálculo, o componente  $I_{ef}$  é definido pela fração ( $f_{ef}$ , *adimensional*) do volume total extraído ( $I_{tot}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) que efetivamente atinge o solo e fica disponível para as plantas (Equação 3.10), enquanto que o  $I_c$  pode ser determinado através da mesma simulação do balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera, mencionado para o cálculo da Água Verde (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

$$ET_{irrig} = \min(I_{ef}, I_c) \quad (3.9)$$

$$I_{ef} = I_{tot} * f_{ef} \quad (3.10)$$

A ferramenta amplamente utilizada em estudos de Pegada Hídrica é o software CROPWAT, desenvolvido pela FAO, uma vez que, através das informações fornecidas pelas simulações executadas neste programa, é possível estimar e diferenciar, de forma simples, o uso da Água Azul e da Água Verde na fase agrícola da cadeia produtiva de qualquer produto. Para tanto, geralmente, assume-se que todo o volume da irrigação efetiva ( $I_{ef}$ ) é consumido pelo cultivo, determinando o valor da Água Azul, e o restante do volume necessário para atingir a exigência da cultura é considerado como o consumo da água da chuva, ou seja, a Água Verde (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2007; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011; CHAPAGAIN e ORR, 2009; ELENA e ESTHER, 2010; GERBENS-LEENES *et al.*, 2009a, 2009b; HOEKSTRA *et al.*, 2011; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2010).

Portanto, o programa CROPWAT possibilita, com base em dados do solo, do clima e da cultura, estimar diversos dados essenciais para os cálculos da Pegada Hídrica, como por exemplo, a quantidade diária de água exigida pela planta em condições ideais ou não de desenvolvimento (evapotranspiração máxima e real), o volume de irrigação necessário, a evapotranspiração de referência, o volume de água perdida do sistema de cultivo, entre outros. Além disso, também possui ligação direta com bancos de dados da FAO, possibilitando, entre

outras vantagens, o acesso rápido às informações climáticas de estações espalhadas por todo o mundo, que podem ser muito úteis, caso não haja informações mais específicas e precisas (FAO, 2011).

Na fase industrial, a evaporação da Água Azul ( $ETA_{ind}$ ) é obtida pelo somatório do consumo de água, que ocorre em todos os processos de fabricação ( $E_{proc}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ), abrangendo, desde a entrada da matéria-prima (*Início*), até a saída do produto final (*Fim*). Este consumo, por sua vez, pode ser calculado pela diferença do volume de água que entra ( $V_{ent}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) e sai ( $V_{sai}$ ,  $m^3$  ou  $L$ ) de cada processo, como mostra a Equação 3.11 (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

$$ETA_{ind} = \sum_{Início}^{Fim} E_{proc} = \sum_{Início}^{Fim} (V_{ent} - V_{sai}) \quad (3.11)$$

Além da quantificação da Água Azul, também podem ser feitas distinções entre as diferentes fontes de água, caso seja relevante para o estudo. Até o momento, a classificação que tem se mostrado com maior utilidade é a divisão entre água superficial, água subterrânea renovável e água subterrânea fóssil (não renovável), as quais podem ser denominadas de Água Azul Claro, Água Azul Escuro e Água Preta. No entanto, devido à falta de disponibilidade de dados, esta classificação quase nunca é feita nos trabalhos de Pegada Hídrica (ALDAYA e HOEKSTRA, 2010; HOEKSTRA *et al.*, 2011; KAMPMAN, 2007).

Com relação à Água Cinza, deve ser observado que, conforme definição apresentada anteriormente, o resultado deste componente tem por objetivo apenas indicar a gravidade da poluição dos corpos hídricos em unidade volumétrica, portanto não mostra o volume real de água poluída. Por esse motivo, quando, por exemplo, o valor da Água Cinza excede a vazão do corpo hídrico existente, isso apenas significa que a poluição está maior que a capacidade de assimilação do mesmo. Por outro lado, se o valor resultante é maior que zero, mas menor que o fluxo de água existente, isso quer dizer que há um consumo da capacidade de assimilação, porém ainda existe água suficiente para diluir a poluição para uma concentração abaixo da que foi previamente estabelecida pela legislação vigente para o corpo hídrico em questão (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Do mesmo modo que a Água Azul, a AC é determinada pelos valores encontrados na fase industrial ( $AC_{ind}$ ) e na fase agrícola ( $AC_{agric}$ ) de uma certa cadeia produtiva (Equação 3.12). Na fase industrial, geralmente a poluição hídrica é caracterizada por ser de fonte pontual, ou seja, ocorre em um local específico onde há o lançamento do efluente. Assim, o

valor da  $AC_{ind}$  pode ser estimado de acordo com a Equação 3.13, onde  $V_{efl}$  ( $m^3$  ou  $L$ ) e  $V_{afl}$  ( $m^3$  ou  $L$ ) são os volumes do efluente produzido e da água extraída (afluente);  $c_{efl}$  ( $g/m^3$  ou  $mg/L$ ) e  $c_{afl}$  ( $g/m^3$  ou  $mg/L$ ) são as concentrações do poluente presente no efluente e no afluente;  $c_{max}$  ( $g/m^3$  ou  $mg/L$ ) é a concentração máxima permitida para o poluente no corpo hídrico receptor pelo padrão de qualidade do ambiente aquático existente; e  $c_{nat}$  ( $g/m^3$  ou  $mg/L$ ) é a concentração natural do poluente no corpo hídrico receptor, ou seja, quando não há interferência antrópica no mesmo (ALDAYA e HOEKSTRA, 2010; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011; GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2009).

$$AC = AC_{ind} + AC_{agric} \quad (3.12)$$

$$AC_{ind} = \frac{V_{efl} * c_{efl} - V_{afl} * c_{afl}}{c_{max} - c_{nat}} \quad (3.13)$$

Devido à característica difusa da poluição agrícola, a estimativa da carga poluidora não é tão simples de ser efetuada como nas fontes pontuais, pois quando a substância química é aplicada no solo, como os fertilizantes e pesticidas, apenas uma fração percola para as águas subterrâneas ou escoar para as águas superficiais. Essa quantidade de poluente não tem como ser diretamente mensurada, pois não há um local e período claramente determinados para realizar a medição. Por esse motivo, a solução encontrada na prática, é estimar a fração das substâncias químicas aplicadas que atinge os corpos hídricos, através de modelos matemáticos ou estudos experimentais (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Existem diversos modelos para o cálculo da poluição difusa, sendo que estes variam, principalmente, em termos de complexidade e exigência de dados. Devido à baixa disponibilidade de informações e por, geralmente, ser suficiente uma estimativa superficial (de acordo com os objetivos e escopo), a maioria dos estudos de Pegada Hídrica utiliza o método mais simples. Nessa estimativa, é assumido, com base em dados da literatura especializada, um valor fixo para a fração das substâncias que efetivamente atinge os corpos hídricos superficiais e subterrâneos (fração de perda) (ALDAYA e HOEKSTRA, 2010; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011; GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2009). A Equação 3.14 mostra a fórmula utilizada, em que  $CP_x$  ( $g$  ou  $mg$ ) é a carga do poluente  $x$  aplicada no processo ou etapa e  $f_p$  (*adimensional*) é a fração de perda do mesmo.

$$AC_{agric} = \frac{f_p * CP_x}{c_{max} - c_{nat}} \quad (3.14)$$

Depois de concluída a etapa de quantificação da Pegada Hídrica, opcionalmente podem ser realizadas as etapas de análise da sustentabilidade dos valores volumétricos resultantes e de formulação de uma resposta estratégica. Para se ter uma ideia do significado ou da gravidade do valor da Pegada Hídrica encontrado na fase de contabilidade, é necessário compará-lo com a disponibilidade dos recursos hídricos locais, ou seja, avaliar a oferta de água na região estudada, levando em conta a demanda já existente para outras atividades humanas e para a manutenção dos ecossistemas. Esse tipo de avaliação é o objetivo básico da fase de análise da sustentabilidade, a qual depende, principalmente, do contexto geográfico em que os vários componentes da Pegada Hídrica estão localizados, ou seja, da disponibilidade hídrica, do nível de competição entre os diferentes usos, do fluxo mínimo necessário para sustentar a fauna e flora da região e da capacidade de assimilação do sistema. Por esse motivo, a sustentabilidade da Pegada Hídrica de um processo, um produto, um consumidor ou uma empresa não pode ser avaliada sem o conhecimento da Pegada Hídrica total da região onde estão localizados. Para tanto, é mais apropriado que se utilize a área da bacia hidrográfica (unidade hidrológica), como escala desta avaliação (CHAPAGAIN e ORR, 2008).

Para a execução desta fase, o primeiro passo é a identificação e a quantificação de um critério de sustentabilidade para cada uma das perspectivas – a ambiental, a social e a econômica. Depois disso, o segundo passo é a identificação dos pontos críticos (“*hot spots*”) específicos de cada local e período de tempo em que a Pegada Hídrica foi reconhecida como insustentável, possivelmente, por estar comprometendo as necessidades ambientais ou os padrões de qualidade ou, ainda, por ser considerada injusta e/ou economicamente ineficiente, resultando em problemas de escassez, poluição e conflitos de uso. Por fim, o último passo é a quantificação dos impactos primários e secundários nos pontos críticos identificados, onde o primeiro se refere às conseqüentes mudanças no fluxo e na qualidade da água e o último descreve os danos resultantes destas alterações, que podem ser medidos através da perda de espécies, redução da biodiversidade, redução da segurança alimentar, efeitos sobre a saúde humana e sobre as atividades econômicas, entre outros (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Para finalizar, uma completa avaliação da Pegada Hídrica termina com a fase de formulação de respostas, estratégias ou políticas que possam apresentar alternativas para a diminuição da Pegada Hídrica e a mitigação de seus impactos. No entanto, nota-se que, até o momento, poucos estudos realizaram as últimas duas etapas opcionais. Nos trabalhos de Chapagain e Orr (2008), Kampman (2007) e Oel *et al.* (2008), os impactos da Pegada Hídrica foram estimados através de mapas da escassez de água, obtidos utilizando indicadores de estresse hídrico, que, por sua vez, foram calculados de diferentes maneiras, como, por

exemplo, dividindo o total da população pelo volume total de escoamento superficial; ou dividindo a taxa de extração de água pelo total disponível; ou ainda pela divisão entre o total de extração de água e a diferença entre o total disponível e o fluxo necessário para a manutenção do ecossistema. Após esta avaliação, estes estudos discutiram e apresentaram opções para solucionar os problemas encontrados.

### 3.2.1.3 *Pegada Hídrica e Bioenergia*

Diante da crescente demanda mundial por recursos hídricos e a consequente diminuição da disponibilidade hídrica, nota-se um significativo aumento na atenção dispensada às questões relacionadas ao uso da água, principalmente por parte da comunidade científica. Esta situação acaba se traduzindo em um aumento da quantidade de trabalhos relacionados a este tema, incluindo, dentro deste contexto, o desenvolvimento de diversos estudos de quantificação e avaliação da Pegada Hídrica de países, produtos e processos (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011).

A Pegada Hídrica mundial e da maioria dos países já foram calculadas por três diferentes estudos (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004; HOEKSTRA e HUNG, 2002; HOEKSTRA e MEKONNEN, 2012). No mais recente destes, Hoekstra e Mekonnen (2012) incluíram a estimativa dos três componentes da Pegada Hídrica (Água Azul, Verde e Cinza) e obtiveram uma média global de 1.385 m<sup>3</sup>/ano por pessoa, com uma variabilidade de 552 a 3.775 m<sup>3</sup>/ano por pessoa. Para o Brasil, a média obtida foi de aproximadamente 2.000 m<sup>3</sup>/ano por pessoa. Também foi possível verificar que a Pegada Hídrica mundial é formada por 74% de Água Verde, 11% de Água Azul e 15% de Água Cinza, com a produção agrícola sendo responsável por 92% do total. Outro aspecto importante observado foi a obtenção de altos valores de Pegada Hídrica tanto para países desenvolvidos como para alguns países em desenvolvimento (ex.: 2.842 m<sup>3</sup>/ano.pessoa para os Estados Unidos e 3.468 m<sup>3</sup>/ano.pessoa para a Bolívia). A justificativa para tal resultado é de que a intensidade do uso da água não é determinada apenas pelo elevado padrão de consumo de produtos que exigem grande demanda de água para serem produzidos, como a carne bovina, mas também pela baixa eficiência de seu uso (menor produtividade por volume utilizado). Na Bolívia, seguindo exemplo anterior, apesar de possuir um consumo de carne apenas 1,3 vezes maior que a média global, contra um padrão de 4,5 vezes maior encontrado nos Estados Unidos, a Pegada Hídrica de sua produção de carne (m<sup>3</sup> por tonelada) é 5 vezes maior que a média global, explicando parcialmente o grande valor da Pegada Hídrica nacional.

Devido à alta representatividade do setor da agricultura na demanda por água, diversos estudos foram e estão sendo conduzidos com o objetivo de quantificar a Pegada Hídrica de uma grande variedade de produtos agrícolas e seus derivados, como trigo, soja, cevada, carne, leite, etc. (CHAPAGAIN, 2006; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2003, 2004; HOEKSTRA e HUNG, 2005; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2010). No entanto, estes estudos se focaram em fornecer apenas uma visão geral da situação global do uso da água, uma vez que realizaram estimativas com dados secundários e sem considerar especificidades locais. Alguns estudos mais detalhados e específicos foram realizados para o algodão (CHAPAGAIN *et al.*, 2006); o chá e o café na Holanda (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2007); o tomate na Espanha (CHAPAGAIN e ORR, 2009); a beterraba, a cana-de-açúcar e o milho (GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2009); e o arroz em 13 países diferentes (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011), nos quais os dados foram coletados em uma escala pequena, propiciando o mapeamento de pontos críticos e a identificação de possíveis impactos e soluções para os mesmos.

De forma mais específica à bioenergia, a metodologia da Pegada Hídrica faz a correlação entre a demanda de energia, a produção de biomassa e a quantidade de água requerida para o crescimento das culturas e para os processos industriais (MEEKEREN, 2008). A Pegada Hídrica dos biocombustíveis, por exemplo, pode ser baseada na quantidade de biocombustível, ou de energia fornecida por este, consumida ou produzida em um determinado tempo (ex.: litros/ano ou GJ/ano) e/ou a quantidade de água usada na produção de uma unidade do biocombustível ou energia (ex.: m<sup>3</sup>/litro ou m<sup>3</sup>/GJ). Este último dado, por sua vez, depende dos seguintes fatores: a água usada no cultivo (m<sup>3</sup>/ha); a produtividade total biológica (toneladas/ha); e a energia contida na biomassa cultivada (GJ/toneladas). Além disso, também deve ser contabilizada a água usada no processo industrial de conversão da biomassa em biocombustível (GERBENS-LEENENS *et al.*, 2009a). A Figura 3.13 esquematiza os principais fatores que devem ser incluídos no cálculo da Pegada Hídrica da produção de bioenergia.

A seguir, serão descritos os elementos que influenciam cada fator e como estes estão relacionados com o valor da Pegada Hídrica:

- Água consumida no cultivo da biomassa (m<sup>3</sup>/ha): depende de diversas características que contribuem para a Água Azul, Verde e Cinza, como por exemplo, tecnologia e manejo da irrigação, características do solo, do clima e da cultura, e quantidade e tempo de aplicação dos fertilizantes e pesticidas (CHAPAGAIN *et al.*, 2006).

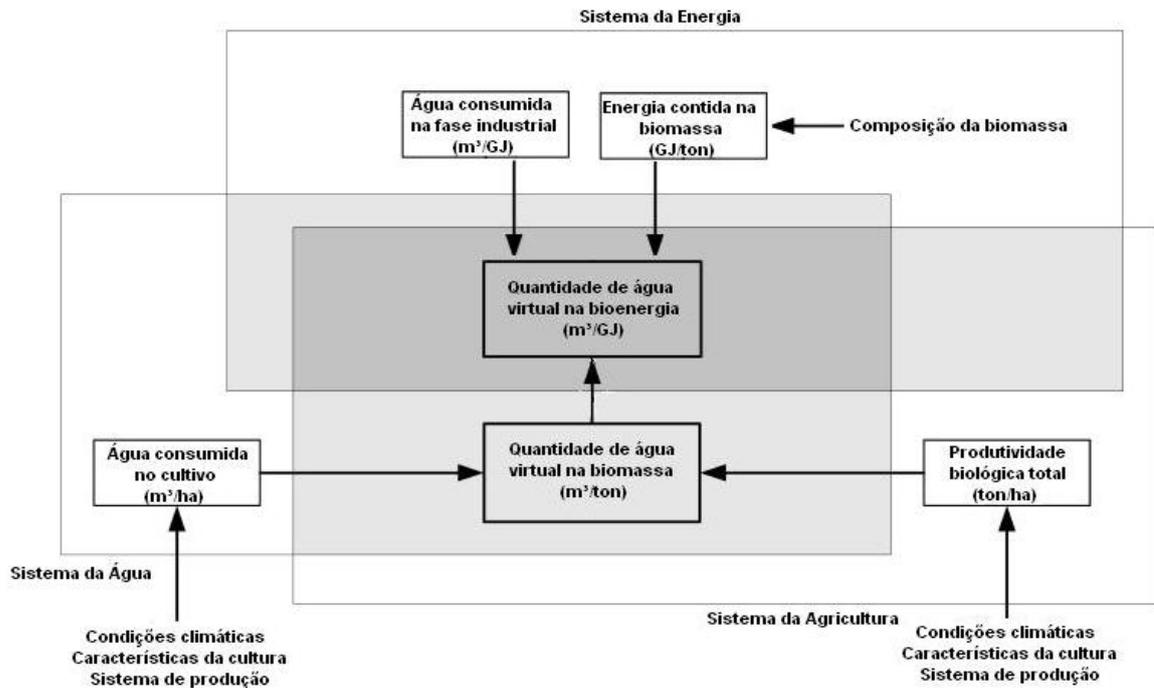


Figura 3.13 – Esquemática geral dos dados necessários ao cálculo da Pegada Hídrica de biocombustíveis.

(Fonte: adaptado de MEEKEREN, 2008).

- Produtividade biológica total (ton./ha): a relação deste fator com o teor de “água virtual” no biocombustível também é complexa, pois a produtividade do cultivo vai depender muito do sistema de produção utilizado pelo agricultor, além das condições climáticas e das características do cultivo. Geralmente, quanto maior for a produtividade da cultura, menor será a Pegada Hídrica do produto final. Na prática, o que ocorre, normalmente, é que para alcançar maiores rendimentos na safra, torna-se necessário suprir o cultivo com mais água, por meio da aplicação ou aumento da irrigação, o que acaba elevando o teor de Água Azul no produto. Entretanto, dependendo do nível de crescimento da produtividade alcançado, o valor da Pegada Hídrica total pode diminuir consideravelmente (LIENDEN, 2009).
- Energia contida na biomassa (GJ/ton.): quanto maior o rendimento energético da biomassa cultivada, menor será a necessidade de produção da cultura e, conseqüentemente, menor é a “água virtual” contida no biocombustível. A quantidade de energia na matéria-prima cultivada depende da composição de seus elementos, como o teor de carboidratos, gorduras, lignina, minerais, ácidos orgânicos e proteínas (MEEKEREN, 2008).
- Água consumida na fase industrial (m³/GJ): os dois elementos que influenciam a Pegada Hídrica desta fase é a Água Azul e a Cinza, os quais dependem do consumo

de água nos processos internos da fábrica de biocombustível, como na refrigeração e a incorporação no produto, e da concentração das substâncias presentes no efluente descartado (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Assim, de forma resumida, a Pegada Hídrica do consumo ou produção de bioenergia depende: do tipo de bioenergia usado (etanol, biodiesel ou bioeletricidade); da matéria-prima (biomassa) usada na produção; do local onde é produzido; e sob quais circunstâncias. Cada país tem suas próprias condições climáticas, sistema hidrológico, tipos de solo e práticas agrícolas, os quais têm um efeito direto sobre o crescimento da vegetação e, portanto, grande influência na escolha da cultura e na forma de uso da água (LIENDEN, 2009).

Nos últimos anos, devido à fácil compreensão dos resultados gerados e à praticidade com que a Pegada Hídrica relaciona o uso da água com o consumo humano, juntamente com a situação de aumento no uso da bioenergia e no número de regiões com estresse hídrico, estão sendo desenvolvidos diversos trabalhos que utilizam a metodologia da Pegada Hídrica para prover dados e estimativas sobre essa situação (GERBENS-LEENES *et al.*, 2009b).

Entre os diferentes assuntos, existem estudos, como o de King e Webber (2008), onde foram feitas comparações da eficiência de uso da água entre a produção dos combustíveis fósseis e dos que são derivados de biomassa (etanol e biodiesel). Neste trabalho, através da estimativa da intensidade do uso da água (Água Azul), em unidades de volume de água por distância percorrida, foi mostrado que os biocombustíveis, de modo geral, podem consumir muito mais água em sua produção. Como por exemplo, um dos resultados encontrados foi o valor de 0,15 gal./milha (0,35 litros/km) para gasolina e diesel e de 25 e 38 gal./milha (59 e 89 litros/km) para o biodiesel de soja e etanol de milho com irrigação. Dessa mesma forma, em outros estudos também foram feitas comparações entre os biocombustíveis e as diferentes fontes de biomassa, onde foram obtidos valores com grandes diferenças, dependendo, principalmente, do tipo de cultivo, do sistema agrícola usado e das condições climáticas (GERBENS-LEENES *et al.*, 2009b; MEEKEREN, 2008).

Também existem estudos que se focaram em avaliar o uso da água na produção dos biocombustíveis e, a partir disso, estimar cenários futuros. Berndes (2002) e Fraiture *et al.* (2008), mostraram que o crescimento acelerado do uso de combustíveis derivados de biomassa, em escala global, acarretará em um aumento substancial no uso da água para a irrigação dos cultivos agrícolas e, conseqüentemente, poderá aumentar a competição por água e terras produtivas e o número de regiões com situações de escassez, sobretudo em países com recursos hídricos limitados. Através de dados específicos para a Espanha, Elena e Esther (2010) estimaram que a Pegada Hídrica (Água Azul e Verde) deste país aumentaria substancialmente - cerca de 49% - se a meta estabelecida para os biocombustíveis (etanol e

biodiesel), de chegar a 5,83% do consumo de gasolina e diesel, for alcançada. Neste mesmo sentido, Dominguez-Faus *et al.* (2009) mostraram o grande consumo de água que deverá ocorrer, para que se possa atingir as metas estabelecidas para 2015 pelas políticas de incentivo ao uso de biocombustíveis nos Estados Unidos e os impactos em alguns aquíferos locais.

Diversos estudos de avaliação do uso da água também foram realizados com o objetivo de fornecer informações úteis de apoio à elaboração de políticas nacionais e regionais. Na publicação de Chiu *et al.* (2009), foi demonstrado que, conforme o local de cultivo do milho, há uma ampla variação na quantidade de água usada para a irrigação voltada à produção de etanol dentro dos EUA. Os resultados obtidos chegaram a uma faixa de variabilidade de 5 a 2138 litros de água usada por litro de etanol produzido, ressaltando a necessidade de se considerar as especificidades regionais tanto em estudos de Pegada Hídrica como no desenvolvimento de planos nacionais de incentivo à produção de biocombustíveis, para que se possa atingir boa eficiência e minimizar os impactos do consumo excessivo.

Além disso, alguns trabalhos também quantificaram a Pegada Hídrica dos diferentes tipos de bioenergia, a partir de uma grande variedade de culturas e com a utilização de dados característicos dos principais países produtores. Entre outros resultados, obteve-se que, no geral, o biodiesel tem a maior Pegada Hídrica, com média global de 394 m<sup>3</sup>/GJ para a soja e de 409 m<sup>3</sup>/GJ para a colza, seguido pelo etanol, que variou de 59 m<sup>3</sup>/GJ para a beterraba a 211 m<sup>3</sup>/GJ para o trigo, e por último a bioeletricidade (queima de cultivos agrícolas), com média de 50 m<sup>3</sup>/GJ (GERBENS-LEENES *et al.*, 2009a). Também foi estimado que, se a utilização dos biocombustíveis atingir 10% do combustível total usado para o transporte, em todo o mundo, o consumo de água pode chegar a 9% do total usado para a produção de alimentos e algodão, aumentando significativamente a competição pelos recursos hídricos (GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2010).

### 3.2.2 Análise do Ciclo de Vida (ACV)

#### 3.2.2.1 Características Gerais

“Ciclo de Vida” é a expressão usada para referir-se a todas as etapas e processos de um sistema de produtos e serviços, englobando toda a cadeia de produção e consumo, onde são consideradas a aquisição de energia, matérias-primas e produtos auxiliares; aspectos dos sistemas de transporte e logística; características da utilização, manuseio, embalagem, marketing e consumo; e emissões, sobras e resíduos, incluindo a reciclagem e destino final (CASAGRANDE e AGUDELO, 2009).

Com isso, a ACV é uma ferramenta de análise de sistemas, que foi projetada especificamente para avaliar a sustentabilidade ambiental de produtos, processos e atividades. Dessa forma, permite aferir todos os elementos que podem interagir com o meio ambiente (aspectos ambientais) e as modificações que ocorrem como consequência destes (impactos ambientais), através da identificação, quantificação e avaliação dos fluxos relacionados aos recursos consumidos em todas as fases do ciclo de vida do objeto em estudo, assim como todas as emissões e resíduos liberados no meio ambiente (BRENTROP *et al.*, 2001).

Em outras palavras, a ACV consiste basicamente em uma técnica que, através da quantificação das entradas e saídas de um sistema associado a um produto ou serviço particular, realiza a avaliação dos impactos ambientais relacionados a estas entradas e saídas, fazendo a interpretação dos resultados alcançados, de acordo com os objetivos estipulados para o estudo (ABNT, 2009a). A Figura 3.14 apresenta, de forma simplificada, as fases integrantes do ciclo de vida de um determinado produto.

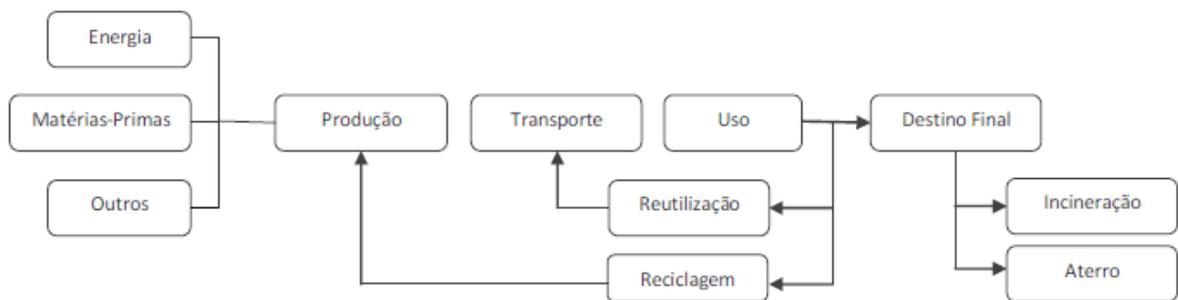


Figura 3.14 – Exemplificação das fases do ciclo de vida de um determinado produto.

(Fonte: FERRÃO, 2009).

Se realizada de forma apropriada, a aplicação da ACV pode possibilitar que companhias e outras partes interessadas (incluindo os consumidores) possam tanto fazer comparações entre diferentes produtos e serviços como também avaliar e otimizar a performance ambiental dos mesmos. Além do uso pelo setor privado, a ACV também pode ser muito útil como ferramenta de apoio às políticas nacionais e internacionais, sendo, atualmente, incorporada em muitas leis da União Europeia, Japão, Austrália, entre outros países. Também deve ser observado que a ACV foi desenvolvida para analisar impactos ambientais em diferentes escalas, como por exemplo, países, municípios, bacias hidrográficas, etc. (MORRISON *et al.*, 2010).

Diante destas características, pode-se dizer que a ACV também se apresenta como um bom instrumento de suporte à tomada de decisões tanto na indústria como em órgãos governamentais e não governamentais. As principais aplicações que podem ser identificadas

para a ACV são: identificação de oportunidades (pontos críticos) para melhorar os aspectos ambientais de produtos e processos em vários pontos de seu ciclo de vida, também conhecida como produção eco-eficiente; tomada de decisões políticas, permitindo o desenvolvimento de uma visão mais racional e holística acerca dos impactos ambientais das atividades realizadas; e decisões de compra e venda baseadas em questões ambientais, fornecendo indicadores pertinentes de desempenho ambiental e informações essenciais para programas de rotulagem ecológica, seleção de fornecedores, marketing de produtos, entre outros (ABNT, 2009a; MORRISON *et al.*, 2010; RIBEIRO, 2003).

Apesar de sua grande aplicabilidade, a ACV é uma ferramenta que apresenta diversas limitações em sua metodologia. Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), as principais limitações são: as escolhas e suposições feitas na ACV podem ser subjetivas; os modelos utilizados na análise de inventário ou para avaliação de impactos são limitados pelas suas suposições; a exatidão da ACV pode ser limitada, em razão da qualidade e abrangência dos dados e a disponibilidade dos mesmos; e a falta de dimensões temporais e espaciais dos dados do ICV introduz incertezas nos resultados da análise.

### 3.2.2.2 Metodologia da ACV

Diferentemente da Pegada Hídrica, que se concentra em um único recurso ambiental (ou seja, a água), a ACV foi desenvolvida como uma metodologia que possibilita realizar avaliações em diversos meios e fazer comparações entre diferentes tipos de recursos ambientais, emissões e seus impactos. De fato, a habilidade de avaliar impactos através de uma série de categorias ambientais é a principal função e valor da ACV. Dessa forma, esta análise necessita de um processo muito mais abrangente do que as medições estritamente relacionadas à água que ocorrem na Pegada Hídrica (KOEHLER, 2008).

A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) sugere uma estrutura metodológica para a execução da ACV. Segundo a mesma, a análise pode ser dividida em quatro fases distintas: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. A relação entre estas fases está ilustrada na Figura 3.15 e, a seguir, é feita uma descrição sucinta de cada uma destas etapas.

#### a) Definição de Objetivos e Escopo:

Nesta fase, são estabelecidas as premissas iniciais, que irão determinar o subsequente plano de trabalho do estudo, definindo-se, de forma clara, o objetivo e o escopo. O objetivo é formulado de maneira que defina a aplicação pretendida, as razões para o desenvolvimento do

estudo e o público-alvo, enquanto que o escopo deve identificar e definir o objeto de análise, e limitá-lo para a inclusão dos pontos mais importantes e significativos (FERRÃO, 2009).

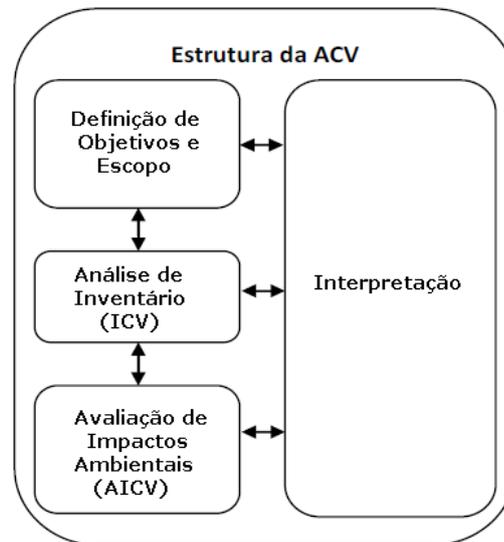


Figura 3.15 – Estrutura das fases de execução da ACV.

(Fonte: ABNT, 2009a).

Quanto ao escopo, de acordo com Chehebe (1997), este restringe a ACV em três dimensões: extensão, largura e profundidade. A extensão determina o tamanho do estudo (início e fim), a largura determina o número de subsistemas que devem ser incluídos no mesmo e a profundidade representa o nível de detalhamento.

A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) estabelece que, na definição do escopo, devam ser considerados e claramente descritos os seguintes itens:

- O sistema de produto e sua função, onde são determinados os processos unitários que devem ser incluídos na análise e para qual propósito servirá.
- A unidade funcional, que é a unidade de medida da função realizada pelo sistema, a qual fornece uma referência, por onde todas as entradas e saídas estejam relacionadas, de modo que se possa garantir a comparabilidade dos resultados.
- Os procedimentos de alocação, que podem ser aplicados quando ocorre, em uma unidade de processo, a geração de um ou mais subprodutos, ou existe reciclagem, ou reuso de um certo material, com o objetivo de distribuir os aspectos ambientais de forma proporcional a cada um destes produtos gerados. Os métodos mais empregados se baseiam na massa ou no valor econômico.
- Tipo de impacto e metodologia de avaliação, onde são definidas as categorias de impactos consideradas e de que modo serão avaliadas.

- Requisitos dos dados, onde é especificada a precisão requerida dos dados e a descrição dos métodos de obtenção e integração dos mesmos.
- Tipo de análise crítica e formato do relatório final.

b) Análise de Inventário:

A fase do ICV é a etapa que envolve, basicamente, a coleta de dados e os procedimentos de cálculo, que devem ser executados para quantificar as entradas e saídas (matéria, energia, resíduos, etc.) relevantes do sistema de produto, provendo uma perspectiva ampla e sistemática do ambiente e dos recursos envolvidos (ABNT, 2009b). Cabe, ainda, destacar que esta fase é altamente dependente das fronteiras do sistema e das unidades funcionais definidas na etapa anterior. Além disso, esse processo é iterativo com outras fases da ACV, ou seja, conforme os dados vão sendo coletados, mais conhecimento sobre o sistema é adquirido e, assim, pode ser necessário haver adaptações em outras etapas.

De acordo com a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), o ICV deve incluir os seguintes procedimentos:

- Preparação para coleta de dados, que inclui a construção de fluxogramas e a descrição dos processos unitários; a listagem das categorias de dados associadas; a determinação das unidades de medida, dos métodos de coleta e dos cálculos utilizados, entre outros.
- Coleta de dados, que é a parte onde são obtidos os valores das entradas e saídas consideradas, sendo que estes dados podem ser coletados de diversas maneiras, como, por exemplo, através de revisão bibliográfica, da aplicação de questionários, do uso de modelos matemáticos ou de medições em campo.
- Procedimentos de cálculo, onde são feitos cálculos para adequar os dados brutos coletados aos processos unitários e à unidade funcional, além de verificar sua validade, através de balanços de massa e energia, e análise comparativa.
- Refinamento das fronteiras do sistema, onde são feitas análises de sensibilidade, para incluir apenas os aspectos mais significativos.

c) Avaliação de Impactos Ambientais (AICV):

Nesta fase, objetiva-se analisar os resultados do ICV e relacioná-los ao seu potencial de impactar o meio ambiente. Para isso, os dados do inventário devem ser associados aos indicadores e categorias de impacto (ABNT, 2009a).

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) estabelece que esta etapa deve compreender os seguintes elementos obrigatórios: seleção das categorias de impactos, classificação e

caracterização dos dados. Depois disso, opcionalmente, podem ainda serem consideradas a normalização, o agrupamento e a ponderação dos resultados. Estes elementos são brevemente descritos abaixo:

- Seleção das categorias de impactos: é o primeiro passo da avaliação de impactos, pois estas categorias são responsáveis pela ligação entre os impactos potenciais de cada fluxo e os efeitos destes nas áreas relevantes. As categorias que têm sido mais utilizadas são: potencial de depleção dos recursos abióticos, potencial de aquecimento global, potencial de depleção do ozônio estratosférico, eutrofização, ecotoxicidade, potencial de formação de oxidantes fotoquímicos, potencial de acidificação, toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante e uso do solo (CHEHEBE, 1997; ISO, 2003).
- Classificação: procedimento que classifica e agrupa os dados obtidos no ICV, nas categorias de impactos selecionadas e identificadas.
- Caracterização: esta etapa consiste na quantificação da classificação; ou seja, se determina, numericamente, qual é a contribuição das entradas e saídas de cada categoria para um determinado impacto potencial. Para isso, os resultados do ICV são convertidos em unidades comuns, através de fatores de equivalência, e posteriormente agregados em cada categoria de impacto.
- Normalização: tem por objetivo prover uma melhor avaliação da magnitude dos resultados da caracterização, calculando a representatividade dos valores encontrados em relação a um valor de referência, como a carga total de um país, padrões legais de emissão, etc.
- Agrupamento: é a reordenação da apresentação das categorias de impacto, de acordo com as características do estudo.
- Ponderação: nesta etapa os indicadores de cada categoria de impacto são multiplicados por fatores e agregados para formar um escore final, sendo que isto é feito de forma subjetiva.

#### d) Interpretação dos Resultados:

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), esta etapa tem como objetivos analisar os resultados, alcançar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações, com base nos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos. Existem três elementos básicos que devem ser abordados, que são: a identificação dos pontos mais significativos do estudo; a avaliação da confiabilidade dos resultados, com análises de abrangência (verifica se as informações são suficientes), de sensibilidade (determina a

influência das incertezas) e de consistência (verifica a coerência dos métodos, dados, suposições, etc.); e a realização de conclusões e recomendações.

### 3.2.2.3 ACV e o Uso da Água

Como foi exposto anteriormente, a ACV é uma metodologia de gestão ambiental consolidada e amplamente aplicada para avaliar as diversas intervenções ambientais causadas por produtos e serviços durante seu ciclo de vida, sendo cada vez mais utilizada por gestores como ferramenta de suporte à tomada de decisão, determinando suas escolhas por produtos e tecnologias sustentáveis. Nos últimos 40 anos, uma quantidade enorme de estudos de ACV foram publicados, dentre os quais a maior parte abordou, em seu desenvolvimento, o setor da agricultura e a produção de alimentos (BAYART *et al.*, 2010; MORRISON *et al.*, 2010).

Devido à grande aplicabilidade e à importância da ACV e de acordo com as recomendações e princípios da norma ISO 14040, é essencial que os estudos que utilizam esta ferramenta de avaliação sejam capazes de abordar todas as principais questões ambientais. Isso significa incluir, entre outros aspectos, as consequências do uso da água, principalmente quando se trata de produtos agrícolas e seus derivados, como os biocombustíveis, onde o consumo de água pode ser significativo. Além disso, considerando a importância da água à saúde humana e à qualidade dos ecossistemas, juntamente com o aumento do número de regiões que enfrentam situações de estresse hídrico em todo o mundo, fica evidente a necessidade de se considerar este aspecto dentro de estudos de avaliação de impactos ambientais. Caso contrário, em um futuro não muito distante, poderá ocorrer o deslocamento dos problemas ambientais críticos atuais (ex.: aquecimento global) para o novo problema da escassez de água, fazendo com que haja a necessidade de um redirecionamento dos esforços mundiais (BAYART *et al.*, 2010; BERGER e FINKBEINER, 2010; KOEHLER, 2008).

No entanto, tradicionalmente, o uso da água não tem sido considerado, de forma suficientemente detalhada e abrangente, no âmbito de aplicação da ferramenta ACV. Até o momento, quando o desempenho ambiental de um produto ou serviço é avaliado através desta metodologia, o foco do estudo geralmente é voltado apenas ao consumo de energia ou sobre as emissões de gases de efeito estufa e/ou substâncias tóxicas (BERGER e FINKBEINER, 2010). Nos casos em que é mensurado, o uso da água é, normalmente, representado apenas na fase ICV e, mesmo assim, na maioria das vezes, somente é contabilizado o total de água retirada do corpo hídrico, sem especificar o quanto é realmente consumido. Além disso, apresentam informações limitadas sobre sua origem (tipo de recurso hídrico) e sem nenhuma

diferenciação quanto ao destino (volume, qualidade, local, etc.), desconsiderando especificidades locais e a poluição hídrica (BAYART *et al.*, 2010; PFISTER *et al.*, 2009).

Na fase AICV, ainda menos atenção é dada ao uso da água, uma vez que, por falta de estrutura metodológica, os estudos de ACV não vêm incluindo a avaliação das significativas consequências da diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos, pelo consumo ou degradação da qualidade. Ainda cabe ser observado que os impactos aos recursos hídricos, comumente considerados até o momento, são apenas de ordem qualitativa, como por exemplo, a acidificação, eutrofização, toxicidade, entre outros (BAYART *et al.*, 2010; PFISTER *et al.*, 2009).

De acordo com algumas publicações, esta limitação da ACV é provavelmente causada por ser uma técnica que, historicamente, foi construída por métodos desenvolvidos em países industrializados, que não sofrem com os efeitos da escassez de água. Além disso, também existem dificuldades metodológicas específicas, como o fato de que a ACV produz resultados independentes de tempo e local, enquanto que os impactos e aspectos relacionados ao uso da água são sazonais e muito particulares da região em que ocorrem. Isso porque, em cada bacia hidrográfica ou área de drenagem de rios, os cursos d'água podem realizar funções ecológicas distintas e as exigências qualitativas, para as diversas formas de uso da água, também podem ser diferentes (BERGER e FINKBEINER, 2010; JESWANI e AZAPAGIC, 2011; KOEHLER, 2008).

Dessa forma, nos últimos anos, cientistas e profissionais dessa área passaram a considerar como uma das prioridades o desenvolvimento de melhores maneiras de avaliar o uso da água dentro da ACV, fazendo com que obtivessem consideráveis progressos. Impulsionadas por iniciativas, como a United Nations Environment Programme (UNEP)/Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) Life Cycle Initiative, diversas publicações científicas já foram feitas com o objetivo de colaborar com o desenvolvimento de métodos mais consistentes. O enfoque principal destes estudos é considerar o uso da água tanto em nível de inventário, incluindo dados com uma diferenciação e um detalhamento adequados, como em nível de avaliação de impactos, abordando de forma consistente os efeitos e danos à saúde humana, à qualidade dos ecossistemas, entre outros. Além disso, recentemente, a ISO formou um grupo de trabalho que pretende estabelecer um padrão internacional, para avaliar o uso da água no ciclo de vida de produtos e serviços, através da criação da norma ISO 14.046 (BERGER e FINKBEINER, 2010; MORRISON *et al.*, 2010).

Através destes estudos, já foi possível definir uma estrutura básica de trabalho, que possibilita avaliar os impactos potenciais associados ao uso da água utilizando a ACV, como

mostra a Figura 3.16. Este esquema geral, em cadeia de causa e efeito, é resultado de uma extensiva análise, realizada pela UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, dos métodos já desenvolvidos para a avaliação das principais questões relacionadas ao uso da água (QUANTIS, 2010). A seguir será realizada uma breve descrição do que já foi feito, até o momento, com relação às etapas de ICV e AICV.

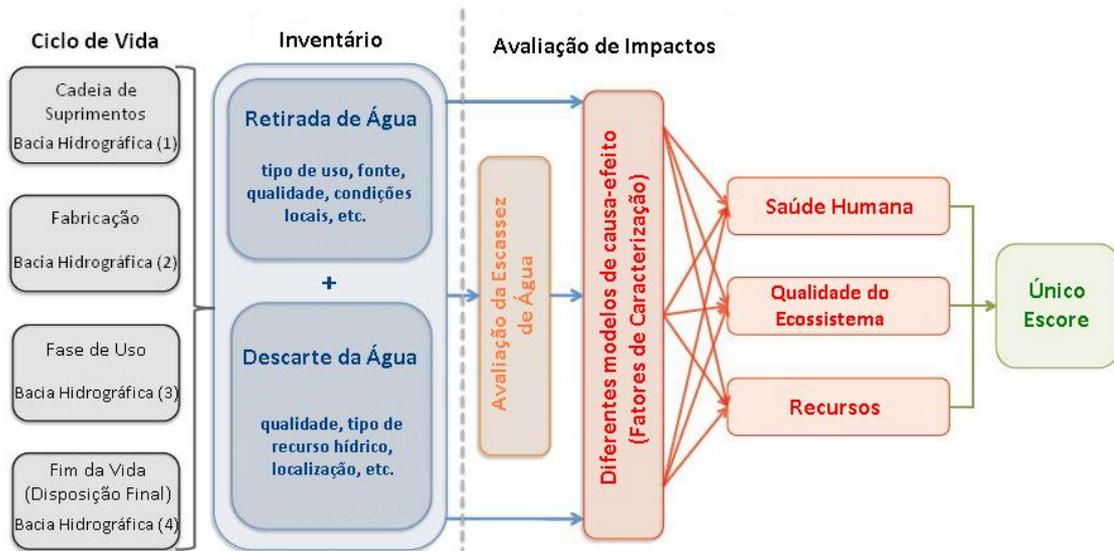


Figura 3.16 – Esquema geral da aplicação da ACV para o uso da água.

(Fonte: adaptado de QUANTIS, 2010).

A análise de inventário envolve a coleta de dados de entrada e saída, para todos os processos unitários incluídos no escopo da avaliação, de maneira que forneça todas as informações necessárias para uma adequada análise dos impactos ambientais. Da perspectiva dos recursos hídricos, isto se traduz em mensurar todas as formas de uso da água, que de alguma maneira alteram a disponibilidade hídrica e limitam a utilização do recurso para outros usuários, o que inclui o consumo e a poluição da água, levando em consideração as condições específicas do local de retirada e descarte (BOULAY *et al.*, 2011a).

No entanto, os inventários atualmente utilizados em estudos de ACV são muito simplificados com relação ao uso da água e, na maioria das vezes, negligenciam as distinções necessárias. Além disso, dependendo do banco de dados, da ferramenta ou da plataforma de trabalho, a informação contida pode ser consideravelmente diferente. Essas questões foram mostradas no levantamento realizado por Jeswani e Azapagic (2011), onde foram comparados os fluxos existentes nos três principais bancos de dados de ACV utilizados no mundo. Segundo este estudo, no banco de dados do software GaBi, da empresa PE International, os fluxos de entrada de água são somente diferenciados com relação à fonte básica do recurso hídrico (ex.: superficial, subterrâneo, de lago, do oceano, etc.). Enquanto isso, o banco de

dados Ecoinvent, da empresa Swiss Centre for Life Cycle Inventories, e o software SimaPro, da empresa PRé Consultants, também incluem alguns fluxos adicionais, baseados na finalidade do uso, da seguinte forma: uso em turbinas para geração de energia elétrica (Ecoinvent) e para refrigeração, processos industriais, dessedentação e uso em turbinas (SimaPro). Com relação aos fluxos de saída, também nota-se que não há padronização, pois no SimaPro existe apenas um fluxo para o descarte de efluentes; no GaBi há um para efluentes e outro para o descarte de água do rio; e no Ecoinvent não existe referência à saída de água. Dessa forma, fica evidente que, não somente a terminologia e a categorização nos bancos de dados são inconsistentes, mas também faltam diversos parâmetros importantes para avaliar os impactos do uso da água, como a localização geográfica e a disponibilidade hídrica do local, tipos de uso, fluxos de saída adequados, parâmetros de qualidade, entre outros (BERGER e FINKBEINER, 2010).

Com o intuito de resolver esta questão, alguns estudos recentes propuseram diferentes abordagens na tentativa de modelar o ICV para o uso da água. No trabalho de Milà i Canals *et al.* (2009), foi proposto um método de avaliação dos impactos do uso da água através da ACV, que, na fase de inventário, considera tanto a fonte de água como o tipo de uso, utilizando como escala a área de uma bacia hidrográfica. Assim, primeiro é feita uma classificação da água por sua fonte, em quatro tipos: umidade do solo originada pela água da chuva (“água verde”), fluxo superficial (lago/rio), água subterrânea de aquífero (renovável) e água subterrânea fóssil. Depois disso, a água proveniente destas fontes é diferenciada em uso evaporativo (água que fica indisponível para outros usos na área estudada) e não evaporativo (água que retorna e fica disponível). Além disso, também propõe considerar dados sobre a mudança no uso do solo, para possibilitar a posterior avaliação dos efeitos desta alteração na disponibilidade hídrica.

Alguns autores (HOEKSTRA *et al.*, 2009; JESWANI e AZAPAGIC, 2011; RIDOUTT e PFISTER, 2010) relatam que o método da Pegada Hídrica, desenvolvido e utilizado pela WFN, também possui potencial para ser adaptado e usado como modelo de inventário da ACV para o uso da água. Isso porque, segundo os mesmos, este método considera todas as informações relevantes relacionadas ao uso dos recursos hídricos pelo objeto em estudo e faz uma adequada classificação das mesmas, além de fornecer dados explicitados, temporal e espacialmente. Como relatado anteriormente, a Pegada Hídrica diferencia o uso da água em três tipos: Água Azul, que é o consumo (uso consuntivo) da água proveniente dos recursos hídricos superficiais (lago/rio) e subterrâneos (aquífero/reserva fóssil); Água Verde, que é o consumo da umidade do solo originada pela precipitação; e Água Cinza, que é um indicador da perda de água ocasionada pela degradação de sua qualidade

(poluição), calculado através da abordagem conhecida como “distância do objetivo” baseada na diluição, a qual quantifica o volume de água necessário para diluir os contaminantes, até atingir padrões de qualidade pré-estabelecidos.

Outra proposta de inventário que merece destaque é a desenvolvida por Boulay *et al.* (2011a), onde foi estabelecida uma estrutura de classificação da água que inclui características qualitativas, junto com diferentes tipos de fontes e finalidades de uso. O objetivo do estudo é possibilitar a realização de uma subsequente avaliação de impactos na ACV, através da abordagem baseada na funcionalidade, ou seja, na perda de função que a água exerce para alguns determinados usuários, que necessitam da mesma em uma certa qualidade mínima. Dessa forma, com base em 136 parâmetros de qualidade, foram determinados 11 diferentes usos humanos e considerados 3 tipos de fontes de água (superficial, subterrânea e água da chuva), que resultaram na criação de 17 categorias de classificação da água na fase ICV, os quais são úteis para avaliar as consequências do uso degradativo dos recursos hídricos.

Fundamentado na análise de publicações anteriores, um grupo de trabalho da UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, formado por especialistas acadêmicos e da indústria, estabeleceu orientações e recomendações para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos de avaliação do uso da água dentro da ACV. Com relação à fase de ICV, os resultados deste grupo de trabalho foram divulgados através do artigo de Bayart *et al.* (2010), onde o esquema de inventário proposto recomenda que se deva considerar apenas o uso degradativo (poluição) e o uso consuntivo da água extraída do corpo hídrico (também conhecida como Água Azul), pois, segundo os mesmos, são as únicas formas de uso que alteram a disponibilidade hídrica. A partir disso, o trabalho determina que esta fase deva fornecer informações específicas sobre a fonte da água retirada, o local em que foi descartada, a qualidade com que entra e sai do sistema, e as condições específicas de disponibilidade hídrica do local (regionalização).

Após a fase de ICV, conforme foi mostrado na Figura 3.16, deve ser realizada a etapa de avaliação de impactos (AICV), para a qual também já foram desenvolvidos diversos métodos, que consideraram tanto a obtenção de fatores de caracterização como o cálculo de impactos primários (“*midpoint level*”) e secundários (também conhecidos como danos finais ou “*endpoint level*”). No entanto, deve ser observado que a maioria destes métodos foram recentemente criados e publicados, ou seja, são relativamente novos e, dessa forma, dificilmente são encontradas experiências de aplicação em estudos de caso, ficando estes limitados a discussões e comparações teóricas (BERGER e FINKBEINER, 2010).

Para a avaliação de impactos, pode-se dizer que existem três áreas ou aspectos ambientais, que estão relacionados com o uso da água: (i) a quantidade suficiente de recursos

hídricos para os atuais usos humanos; (ii) a quantidade suficiente de recursos hídricos para a manutenção dos ecossistemas existentes; e (iii) a sustentabilidade dos recursos hídricos para as futuras gerações e para os futuros usos das gerações atuais. Com relação aos impactos de nível intermediário (“*midpoint level*”), responsáveis pela ligação entre os impactos diretos do uso da água e os consequentes danos finais, os métodos desenvolvidos, até o momento, fornecem fatores de caracterização para as três áreas, com base, principalmente, nas condições locais de disponibilidade hídrica (BAYART *et al.*, 2010; BERGER e FINKBEINER, 2010).

Dentro deste contexto, podemos mencionar novamente o trabalho de Milà i Canals *et al.* (2009), o qual fornece duas categorias de impactos intermediários: (i) impactos no ecossistema aquático, que utiliza um indicador da escassez de água, definido como a razão entre a taxa de extração de água da bacia hidrográfica e a quantidade de água disponível para uso humano na mesma região, considerando neste cálculo a quantia estimada necessária para a manutenção do ecossistema; e (ii) depleção dos recursos hídricos, onde são consideradas as taxas de extração e regeneração do recurso e sua reserva atual para as águas subterrâneas (aquífero e fóssil).

Outro importante fator de caracterização desenvolvido foi o de Pfister *et al.* (2009), denominado Índice de Estresse Hídrico (“*Water Stress Index*” – WSI). Neste método, foi feita uma expansão da razão entre o volume de água retirada e o disponível no local (conhecida como “*withdrawal-to-availability*” – WTA), para que seja possível incluir os efeitos da variabilidade sazonal. Dessa forma, a aplicação deste índice aos dados volumétricos coletados resulta em um inventário ponderado do uso da água, expresso em m<sup>3</sup> equivalentes, o qual pode ser mapeado em qualquer escala e, assim, fornecer um meio simples e consistente de avaliar os impactos potenciais do uso da água. A partir destas considerações, este estudo fornece índices diferenciados por países, como, por exemplo, 0,0659 m<sup>3</sup> equivalentes por m<sup>3</sup> consumido no Brasil, 0,499 para os Estados Unidos, 1,0 para o Kuwait, e assim por diante.

Para o cálculo dos impactos no nível de dano final ou “*endpoint level*”, já existem diversos trabalhos, que desenvolveram diferentes métodos e abordagens, com o objetivo de avaliar os efeitos da falta de água sobre a saúde e bem-estar humano e sobre os ecossistemas e recursos hídricos. Neste contexto, existem metodologias que abordam as três categorias de forma mais geral, como a de Pfister *et al.* (2009), e outras que são mais específicas para uma região particular ou para um determinado tipo de água ou dano, como, por exemplo, os métodos de Motoshita *et al.* (2008, 2011), que avaliam os danos à saúde humana provocados pela desnutrição, relacionada à escassez de água na agricultura, e pelas infecções e doenças, relativas à escassez de água doméstica; ou ainda, o de Zelm *et al.* (2011), que avalia o

desaparecimento de espécies de plantas, por causa da extração de água subterrânea nos Países Baixos.

Um dos estudos que apresentou uma estrutura diferenciada de avaliação de impactos à saúde humana, ocasionados pela diminuição da disponibilidade de água, foi o de Boulay *et al.* (2011b). No método elaborado neste estudo, são contabilizados, além da água consumida, o volume de água degradada, que perde sua funcionalidade para o uso doméstico, o cultivo agrícola e a pesca. Além disso, também considera, com base no produto interno bruto dos países, a capacidade de adaptação dos mesmos em compensar a poluição hídrica, através do tratamento da água ou da importação de alimentos. Dessa forma, depois de quantificar, na fase de inventário, o volume de água perdida para cada tipo de uso, é verificado se há possibilidade de compensação ou não. Em caso negativo, são avaliados os efeitos sobre a saúde humana, na unidade de dias de vida perdidos (“*disability-adjusted life years*” – DALY), ocasionados por doenças, geradas pelo uso doméstico de água imprópria para consumo, e por má nutrição, gerada pela diminuição da produção de alimentos (cultivos agrícolas e pesca), resultante da menor disponibilidade de água própria para estes usos. Na situação contrária, estas consequências diretas são evitadas, porém o sistema deve ser expandido, para que sejam incluídos os impactos gerados em decorrência da adaptação necessária, como, por exemplo, a produção e o emprego dos produtos para tratamento da água.

No entanto, mesmo com os recentes avanços promovidos pelos diversos estudos publicados, ainda existem alguns aspectos que estão em discussão, ou que são deficientes, e que precisam ser resolvidos em futuras pesquisas. Nota-se, por exemplo, que a maioria dos trabalhos tem seu foco voltado somente ao uso consuntivo da “Água Azul”, enquanto que o uso direto no curso d’água (“*in-stream*”) e o uso degradativo (“Água Cinza”) são pouco representados no desenvolvimento metodológico. Além disso, a inclusão da “Água Verde”, que é especialmente importante quando se envolve o cultivo agrícola, ainda é objeto de discordância na comunidade científica. Neste debate, os pesquisadores que são contra a inclusão deste tipo de fonte de água argumentam que esta só é aproveitada pelas plantas e, por esse motivo, o seu consumo não contribui para a escassez hídrica. Já o grupo que é favorável, sustenta que a água da chuva deve ser considerada, pois contribui para a manutenção de ecossistemas e para a renovação das águas superficiais e subterrâneas, além de que sua estimativa é importante para a compreensão geral dos impactos do uso da água e para permitir a comparação entre diferentes produtos. Entretanto, nenhum dos estudos que inclui o uso da “Água Verde” fornece um modelo de caracterização para avaliar os efeitos negativos de seu consumo (BERGER e FINKBEINER, 2010; MILÀ I CANALS *et al.*, 2009; MISHRA e YEH, 2011; PFISTER e HELLWEG, 2009; RIDOUTT e PFISTER, 2010).

De forma geral, também existe a necessidade de haver uma melhor definição e padronização dos tipos de dados que devem ser contabilizados no ICV, incluindo as fontes de água, os diferentes usos da água, a escala, os parâmetros de qualidade e as condições de disponibilidade hídrica, considerando as diferenças entre o local de extração e o de descarte. Para a fase AICV, é preciso, ainda, desenvolver indicadores e métodos mais compreensivos, aplicáveis e cientificamente consistentes, que estejam relacionados de modo adequado com os dados fornecidos pelo inventário. No entanto, deve ser observado que o aumento da sofisticação e do detalhamento dos métodos de inventário e de avaliação de impactos resulta em um crescimento substancial da exigência de dados, principalmente quando são considerados os processos de segundo plano, como a extração de matéria-prima, geração de energia elétrica e a fabricação de produtos semiacabados, o que pode gerar problemas de aplicabilidade, devido à falta de informações ou ao alto custo em obtê-las (BERGER e FINKBEINER, 2010; JESWANI e AZAPAGIC, 2011).

### 3.3 BIODIESEL

#### 3.3.1 Introdução

O biodiesel é definido, segundo a Lei n.º 11.097, de 13 de setembro de 2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira, como:

“Biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.” (BRASIL, 2005)

De modo geral, o biodiesel é considerado um combustível natural biodegradável, usado em motores ciclo-diesel, composto por ésteres alquílicos (metílicos ou etílicos) de ácidos graxos de cadeia longa, produzido através de fontes renováveis e de forma que atenda às especificações da ANP. É, geralmente, obtido através do processo de transesterificação, com a utilização de uma ampla variedade de matérias-primas, que inclui gorduras animais, óleos residuais e vegetais, como a mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso, soja, entre outras (BRASIL, 2011a).

Este biocombustível pode ser utilizado puro ou misturado em uma determinada concentração com o óleo diesel. Desse modo, definiu-se como BX a nomenclatura adotada mundialmente para identificar a concentração do biodiesel, onde o “X” é a percentagem em

volume de biodiesel na mistura, como por exemplo, o B2, B5, B20 e B100, que possuem uma concentração de 2, 5, 20 e 100%, respectivamente (KNOTHE *et al.*, 2005).

A utilização do biodiesel como combustível apresenta algumas características que representam vantagens sobre os combustíveis derivados do petróleo, principalmente relacionadas ao meio ambiente, tais como: é virtualmente livre de enxofre e de compostos aromáticos; possui alto número de cetano; alto teor médio de oxigênio; maior ponto de fulgor, o qual aumenta a segurança no armazenamento e transporte; menor emissão de partículas, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (cerca de 78% menor); caráter não tóxico e biodegradável, além de ser proveniente de fontes renováveis e amplamente diversificadas (FERRARI *et al.*, 2005; GERPEN, 2005).

### 3.3.2 A Situação do Biodiesel

Nos últimos anos, nota-se que há uma significativa expansão da utilização de energias renováveis em todo o mundo, incluindo o crescimento da indústria do biodiesel. Esta tendência está sendo provocada por diversos fatores econômicos e ambientais. Entre os motivos econômicos, está a tentativa de diminuição, principalmente por parte dos países em desenvolvimento, da grande dependência externa do petróleo, além da instabilidade do seu preço e do alerta provocado pelas estimativas de esgotamento das reservas fósseis. Quanto aos fatores ambientais, estes estão relacionados, principalmente, ao aquecimento global e à subsequente assinatura do Protocolo de Quioto, onde a maioria dos países desenvolvidos se comprometeram a diminuir consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa (SCHUCHARDT *et al.*, 2001).

A taxa média de crescimento da produção global de biodiesel, nos últimos 5 anos (2005 a 2010), foi de 38%, chegando a aproximadamente 19 bilhões de litros em 2010. Até o momento, a maior parte da produção e do consumo está concentrada na União Europeia, com destaque para a Alemanha, que é o país que lidera o ranking mundial de produção (REN21, 2011). Segundo o Conselho Europeu de Biodiesel (EBB, 2011), este biocombustível começou a ser produzido em escala industrial em 1992 e, atualmente, são fabricadas em torno de 9 bilhões de litros por ano na Europa.

Com relação ao Brasil, a implantação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) foi regulamentada após a aprovação da Lei Federal 11.097, de 2005. Este programa surgiu com o objetivo principal de implementar, de forma sustentável tanto técnica como economicamente, a produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, através da geração de emprego e renda (BRASIL, 2011a).

Além disso, também estabeleceu, inicialmente, percentuais mínimos de mistura do biodiesel ao diesel fóssil, começando com a adição facultativa de 2% (B2), em 2005, e depois, de forma obrigatória, a partir de 2008 até 2013, quando a quantidade aumentaria para 5% (B5). No entanto, devido ao sucesso do programa, através de resoluções do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), a adição de biodiesel já foi autorizada para 3% em 2008, 4% em 2009, até chegar aos 5% em 2010 (GOES *et al.*, 2010).

Dentre as formas de incentivo à produção de biodiesel, está a desoneração de tributos, as melhores condições de financiamento junto ao Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) e o direito de concorrência nos leilões de compra de biodiesel. Estas vantagens podem ser adquiridas com a obtenção do Selo Combustível Social, que é concedido às agroindústrias que comprovem a aquisição de uma porcentagem mínima de matéria-prima proveniente da agricultura familiar, como forma de estimular o desenvolvimento social (BRASIL, 2011a).

Os leilões de biodiesel foram criados para impulsionar o recente mercado e são realizados pela ANP, a qual administra a compra e venda do biodiesel dos produtores para as refinarias e distribuidoras, que, por sua vez, realizam a mistura ao diesel do petróleo. Desse modo, estimula-se a produção de biodiesel em quantidade suficiente para que refinarias e distribuidoras possam compor a mistura (BX) determinada por lei (GOES *et al.*, 2010). Desde 2005, já foram realizados 25 leilões no total (ANP, 2012a).

Com relação aos dados estatísticos de produção, distribuição e comercialização do biodiesel nacional, segundo a ANP (2012b), que é o órgão responsável pela regulação e fiscalização destas atividades, atualmente existem 64 plantas produtoras de biodiesel autorizadas para operação, o que corresponde a uma capacidade total autorizada de, aproximadamente, 7 bilhões de litros por ano.

Com a entrada do B5, a produção de biodiesel cresceu 46% em 2010 e atingiu o volume anual de quase 2,7 bilhões de litros em 2011, o que faz do Brasil o segundo maior produtor do mundo. O gráfico da Figura 3.17 mostra a evolução anual da produção, da demanda obrigatória e da capacidade nominal autorizada pela ANP. Nota-se, ainda, que a capacidade nominal é duas vezes maior que a quantidade produzida, o que significa que o potencial de crescimento é grande e o consumo pode ser ainda mais estimulado (ANP, 2012b; REN21, 2011).

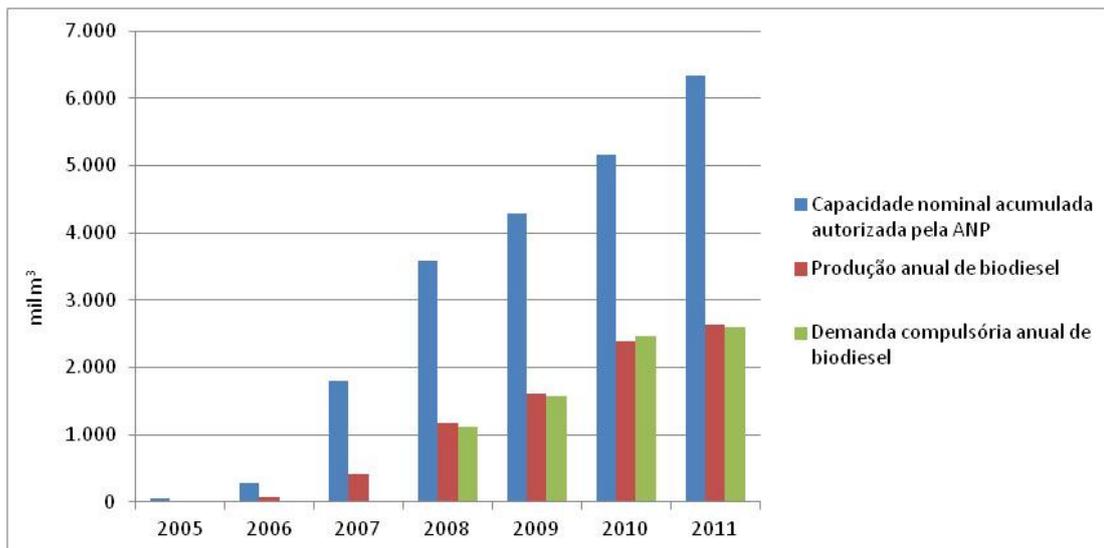


Figura 3.17 – Evolução anual da capacidade de produção nominal autorizada pela ANP, da demanda obrigatória e da produção total de biodiesel.

(Fonte: ANP, 2012b).

### 3.3.3 Cadeia Produtiva do Biodiesel

As duas principais formas de matéria-prima, através da qual o biodiesel pode ser produzido atualmente, é a gordura animal e o óleo vegetal. No entanto, como o tema deste trabalho engloba apenas o biodiesel obtido a partir do óleo de soja, o enfoque desta seção será sobre a cadeia produtiva que utiliza as oleaginosas. Com isso, pode-se dizer que as principais etapas do processo de produção do biodiesel são: a plantação dos cultivos agrícolas, a extração do óleo dos grãos, a produção do biodiesel, a distribuição e a revenda aos consumidores (PARENTE, 2003). A Figura 3.18, mais abaixo, ilustra as principais etapas desta cadeia produtiva.

Dessa forma, pode-se dizer que a cadeia produtiva do biodiesel inicia dependendo de outra cadeia produtiva complexa, que é a da produção agrícola de oleaginosas. Isso significa que um aumento na oferta de biodiesel só é possível se houver disponibilidade e/ou potencialidade de incremento na produção destas culturas. No Rio Grande do Sul, a produção de biodiesel está diretamente ligada à cadeia produtiva da soja, tendo em vista que esta é a principal oleaginosa produzida no estado e que já é utilizada em grande escala (GOLLO *et al.*, 2010).

A cadeia agrícola, mais especificamente da soja, começa com a produção de sementes, revenda de máquinas, equipamentos, fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas, combustíveis e qualquer outro insumo que seja necessário ao preparo do solo, à semeadura e ao trato da cultura. Após o período de colheita, os grãos são, então, armazenados e

comercializados por intermédio de contratos com cooperativas de produtores rurais da região (RATHMANN *et al.*, 2008).

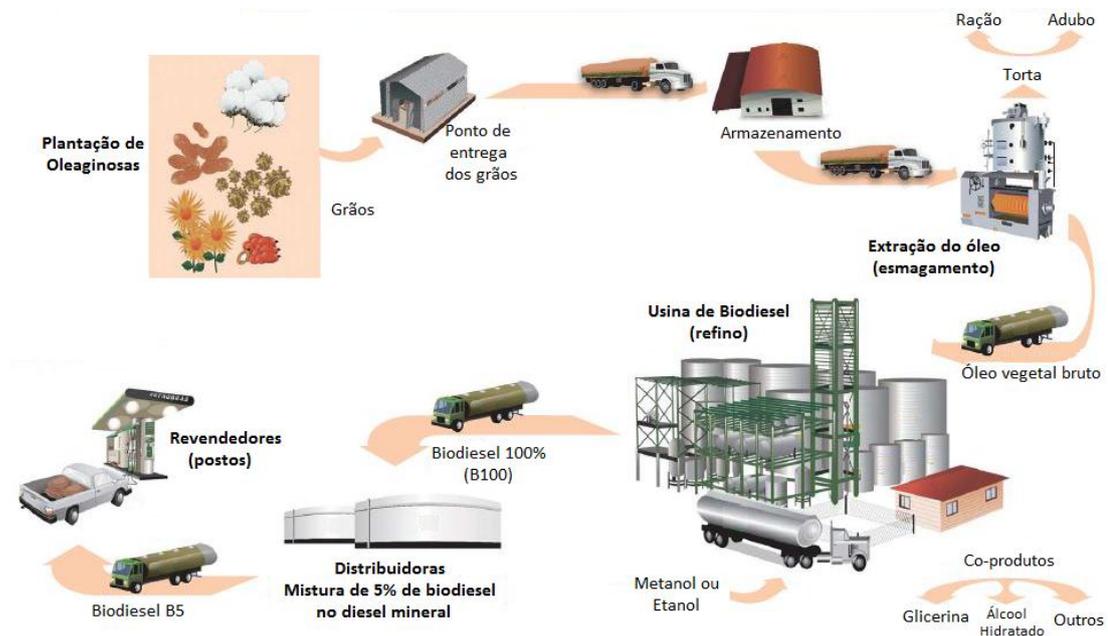


Figura 3.18 – Ilustração das principais etapas da cadeia produtiva do biodiesel.

(Fonte: adaptado de PETROBRAS, 2009).

Depois da fase agrícola, o processo de industrialização das oleaginosas inicia com o esmagamento e a extração do óleo vegetal. Nesta etapa, os grãos, primeiramente, são submetidos aos processos de secagem, limpeza, moagem, laminação e cozimento, com o intuito de realizar a preparação da matéria-prima. Depois disso, é realizado o procedimento de extração do óleo, o qual, dependendo principalmente do teor de óleo da matéria-prima, pode ser realizado de duas formas diferentes: a extração mecânica, que utiliza o processo de prensagem e é realizada para as oleaginosas com altos teores de óleo (mais de 30%), e a extração química, que utiliza um solvente, geralmente o hexano, e é aplicada em oleaginosas com baixo teor de óleo, como a soja (PAULA e FAVARET FILHO, 1998).

Posteriormente à etapa de extração, o óleo é submetido aos processos de degomagem e neutralização, como forma de eliminar substâncias indesejáveis, que diminuem a eficiência da produção de biodiesel. A etapa de degomagem consiste, basicamente, na adição de água ao óleo bruto aquecido, sob agitação constante, para que sejam removidos os fosfatídeos, as proteínas e as substâncias coloidais. Depois disso, a neutralização ocorre com a adição de solução aquosa de álcalis, como o hidróxido de sódio, para que sejam eliminados os ácidos graxos livres e outras impurezas restantes (MANDARINO e ROESSING, 2001). Após a realização destes procedimentos, os subprodutos formados, no caso da soja, são a goma, que pode ser utilizada para a produção de lecitina de soja, e o farelo, direcionado à alimentação

animal (produção de ração) ou à alimentação humana, por meio da retirada da proteína de soja (PAULA e FAVARET FILHO, 1998).

O setor das indústrias de processamento de grãos possui uma importante representatividade na cadeia produtiva do biodiesel, através da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE). Segundo dados desta associação (ABIOVE, 2011), o Rio Grande do Sul está em terceiro lugar no ranking brasileiro da capacidade de processamento de óleos vegetais, representando 17,2% do total. As principais empresas de processamento de óleo de soja, situadas neste Estado, são as estrangeiras Bunge, em Passo Fundo e Marau; Archer Daniels Midland Company, em Três Passos; Louis Dreyfus, em Cruz Alta; e as nacionais Granol, em Cachoeira do Sul; Camera, em Santa Rosa; Oleoplan, em Veranópolis; e Olfar, em Erechim.

A próxima etapa, depois da obtenção do óleo vegetal, é a própria produção industrial do biodiesel nas usinas. Nesta fase, o principal processo envolvido é a transesterificação, onde é, basicamente, realizada a reação do óleo vegetal com álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador, formando uma fase pesada, constituída por glicerina bruta, excesso de álcool, água e impurezas; e uma fase leve, formada por uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos, água e impurezas. Após separação destas fases, a parte pesada é submetida ao processo de evaporação para a recuperação do álcool, restando a glicerina bruta como subproduto, a qual ainda pode ser purificada através da destilação a vácuo, para posterior comercialização. Quanto à fase leve, os ésteres são lavados, centrifugados e desumidificados para retirar as impurezas, resultando no biodiesel purificado (KNOTHE *et al.*, 2005; PARENTE, 2003).

Com relação à matéria-prima para este processo, o álcool possui grande importância, uma vez que constitui de 10 a 20%, em massa, do material que participa da reação. Portanto, as cadeias produtivas do metanol, de origem petroquímica, ou do etanol, proveniente do cultivo de cana-de-açúcar, também devem ser consideradas dentro da cadeia produtiva do biodiesel (KNOTHE *et al.*, 2005; MEDRANO, 2007).

A escolha da rota tecnológica, entre a etílica e a metílica, definirá fortemente alguns aspectos do processo de produção industrial, pois o consumo de álcool, as condições de reação e de separação final serão diferentes, em função das propriedades e características de cada álcool. Na maioria dos países, incluindo o Brasil, a rota que está sendo amplamente utilizada é a metílica (ANP, 2012a). Entre as vantagens do emprego do metanol, está o menor consumo de álcool (45%), tempo de reação e complexidade da reação, resultando em custos mais baixos de operação (PARENTE, 2003). Entretanto, o etanol também possui algumas vantagens, principalmente do ponto de vista ambiental, pois é obtido de fonte renovável e é

muito menos tóxico. Além disso, especialmente no Brasil, pode ser mais viável economicamente, uma vez que é produzido em larga escala, com a tecnologia necessária já desenvolvida e um mercado consolidado (KHALIL, 2006).

Em 2011, do volume total de biodiesel produzido no Brasil, o Rio Grande do Sul foi o estado que mais produziu, com cerca de 862 milhões de litros (32%), seguido por Goiás e Mato Grosso, com 19 e 18%, respectivamente. Até o momento, como mostra a Tabela 3.3, existem sete usinas autorizadas pela ANP, em operação, que compõem a produção de biodiesel no Rio Grande do Sul (ANP, 2012a,b).

Tabela 3.3 – Características gerais das unidades produtoras de biodiesel localizadas no Rio Grande do Sul.

<b>Empresa</b>	<b>Localidade</b>	<b>Capacidade Autorizada pela ANP (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Produção Total em 2011 (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Matéria-Prima</b>	<b>Rota Tecnológica</b>
<b>Brasil Ecodiesel</b>	Rosário do Sul	131.400	67.606	Óleo de soja	Metflica ou Etflica
<b>BSBIOS</b>	Passo Fundo	162.060	125.118	Óleo de soja e de canola	Metflica
<b>Camera</b>	Ijuí	237.250	106.867	Óleo de soja	Metflica
<b>Granol</b>	Cachoeira do Sul	340.665	205.509	Óleo de soja	Metflica
<b>Oleoplan</b>	Veranópolis	383.250	237.756	Óleo de soja e gordura animal	Metflica
<b>Olfar</b>	Erechim	219.000	119.254	Óleo de soja	Metflica
<b>Bianchini</b>	Canoas	328.500	-	Óleo de soja	Metflica

Fonte: dados de ANP, 2012a,b.

Finalmente, depois de produzido, o biodiesel puro (B100) é adquirido pelas distribuidoras que, por sua vez, efetuam a mistura com o diesel, de acordo com a regulamentação vigente (atualmente deve ser de 5% de biodiesel). Dessa forma, este setor da cadeia produtiva é responsável pela aquisição, armazenamento, transporte, controle e distribuição do biodiesel até os postos revendedores (postos de combustíveis), que, posteriormente, o comercializam com o consumidor final (DAL ZOT, 2006).

No Rio Grande do Sul, a distribuição é realizada pela PETROBRAS, que transporta o B100 diretamente das usinas para a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), localizada em

Canoas – RS, a qual possui exclusividade para realizar a mistura do biodiesel com o diesel. Até o momento, a PETROBRAS tem adquirido a maior parte do biodiesel produzido no Rio Grande do Sul, através dos leilões realizados pela ANP (GOLLO *et al.*, 2010).

Com relação aos consumidores finais, estes são representados, principalmente, por transportadoras rodoviárias, que usam ônibus e caminhões e por proprietários particulares de veículos utilitários a diesel, como caminhonetes e vans. Ainda cabe destacar que as principais indústrias de caminhões e ônibus estabelecidas no país estão em pleno desenvolvimento de seus motores para adaptá-los ao biodiesel, estando em estágio avançado para o uso do B20. Inclusive já existem testes, até para o B100, como no caso da Mercedes Bens e da Scania (GOLLO *et al.*, 2010).

### 3.3.4 Matéria-Prima do Biodiesel

Atualmente, o biodiesel pode ser produzido a partir de uma grande variedade de matérias-primas, as quais devem ser compostas, na maior parte de sua estrutura química, por triglicerídeos de ácidos graxos. Estas substâncias são os constituintes principais dos óleos vegetais, gorduras animais e residuais (KNOTHE *et al.*, 2005).

As fontes de óleos vegetais são diversas, pois variam conforme as espécies das plantas oleaginosas cultivadas. Entre estas, as mais conhecidas são: a soja, a mamona, o algodão, o girassol, o dendê, a canola, o amendoim e o pinhão-manso. Outras oleaginosas que possuem bom potencial de rendimento são o babaçu, a macaúba e o abacate, porém ainda não há domínio tecnológico para aproveitá-las (GOES *et al.*, 2010).

O Brasil, com mais de 90 milhões de hectares de terras próprias para a expansão do cultivo de oleaginosas de maneira sustentável, desponta como o país com maior potencial para liderar a produção mundial de biodiesel. Além disso, por possuir um território que abrange variados meios climáticos e tipos de solos, diversas variedades de oleaginosas podem ser cultivadas no país (PERES e BELTRÃO, 2006). No entanto, deve ser observado que cada espécie, dependendo da região em que é cultivada, apresenta grande variação na produtividade e na fração de óleo da amêndoa ou grão, como mostra a Tabela 3.4.

Por esse motivo, o governo brasileiro, através de estudos coordenados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), está concentrando esforços para ajustar a produção de biodiesel no país, com a utilização das oleaginosas mais adaptadas a cada região, objetivando, desse modo, promover o desenvolvimento socioeconômico e garantir, com máxima eficiência, a oferta de matéria-prima (NAE, 2004; PERES e BELTRÃO, 2006). A

Figura 3.19 mostra as principais oleaginosas consideradas, até o momento, com potencial de produção mais promissor nas diferentes regiões brasileiras.

Tabela 3.4 – Características gerais das principais culturas oleaginosas com potencial de uso na produção de biodiesel dentro do território brasileiro.

Espécie	Produtividade (ton./ha)	Conteúdo de Óleo (%)	Meses de Colheita	Regiões Produtoras	Rendimento de Óleo (ton./ha)
Dendê (Palma)	15 - 25	26	12	BA, PA	3,0 - 6,0
Pinhão Manso	2 - 12	50 - 52	12	Nordeste e MG	1,0 - 6,0
Girassol	1,5 - 2	38 - 58	03	GO, MS, SP, RS, PR	0,5 - 1,5
Mamona	0,5 - 1,5	43 - 45	03	Nordeste	0,5 - 1,0
Canola (Colza)	1 - 2	40 - 48	03	PR, SC, RS	0,5 - 0,9
Soja	2 - 3	18	03	MT, PR, RS, GO, MS, MG, SP	0,2 - 0,6
Algodão	1 - 1,5	15	03	MT, GO, MS, BA, MA	0,1 - 0,2

Fonte: adaptado de NAE, 2004 e SEBRAE, 2007.



Figura 3.19 – Mapa de distribuição, por estado brasileiro, das principais oleaginosas com potencial de utilização na produção de biodiesel.

(Fonte: SEBRAE, 2007).

Apesar da potencialidade das diversas oleaginosas, a soja, que apresenta um dos menores teores e rendimentos de óleo, é, de longe, a matéria-prima mais utilizada para a produção de biodiesel no Brasil. Segundo dados da ANP, atualmente o óleo de soja é responsável por mais de 77% da produção nacional, seguido pela gordura animal (16%) e o óleo de algodão (3,6%), como pode ser visto no gráfico da Figura 3.20 (ANP, 2012b). O motivo para tal disparidade é que, nestes primeiros anos de implementação do PNPB, a única matéria-prima que possui viabilidade para dar suporte à demanda de biodiesel é a soja, pois esta já possui uma cadeia produtiva altamente organizada, com uma estrutura de produção e distribuição consolidada, e uma situação econômica estável (GOLLO *et al.*, 2010).

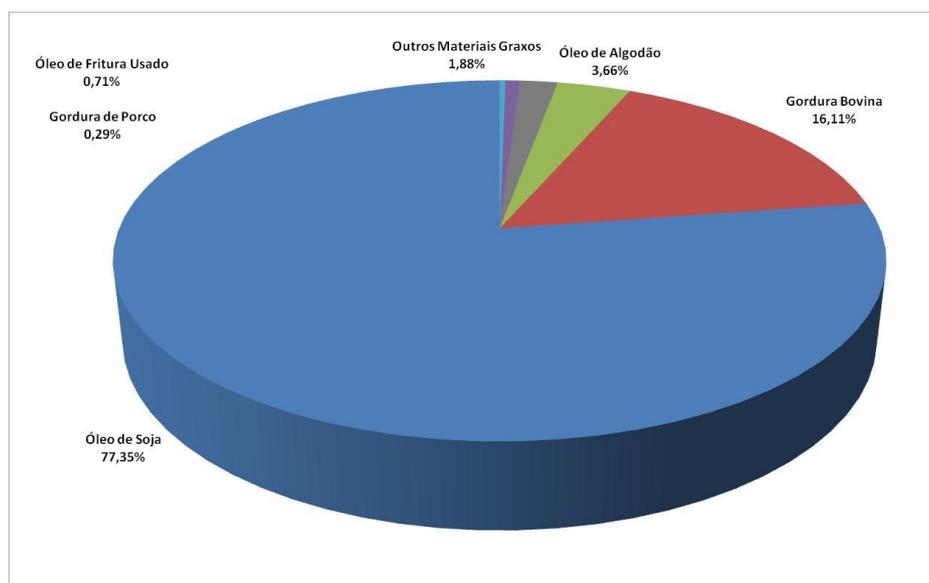


Figura 3.20 – Perfil de contribuição das matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil.

(Fonte: ANP, 2012b).

#### 3.3.4.1 Soja

A soja (*Glycine max*) é uma planta herbácea, pertencente à família das leguminosas, que tem por característica ser muito rica em substâncias proteicas e graxas. O óleo contido na soja, com proporção média de 18%, é rico em ácidos graxos insaturados, contendo em maior proporção o ácido linoleico (MACIEL *et al.*, 2005).

A produção do grão de soja tem diversas finalidades, pois dá origem a produtos e subprodutos muito usados pela agroindústria, indústria química e de alimentos. O farelo (ou a torta), obtido na fase de esmagamento, é o principal produto, sendo muito utilizado na confecção de ração para alimentação animal. Na alimentação humana, a proteína de soja é a base de muitos produtos de padaria, massas, cereais, bebidas, etc., além de ser muito usada na

indústria de nutrientes e adesivos, adubos, fabricação de fibras, entre outros. Os subprodutos do processo é o óleo bruto, de onde são produzidos o óleo refinado, usado em produtos farmacêuticos e medicinais, margarinas, temperos, gordura vegetal e, mais recentemente, na produção de biodiesel, e a lecitina de soja, muito utilizada na fabricação de salsichas, maioneses, achocolatados, etc. (EMBRAPA, 2011).

Devido à sua grande versatilidade, atualmente, a soja é uma das principais commodities do mundo, sendo o quarto grão mais produzido, atrás apenas do milho, do trigo e do arroz, o que a torna a oleaginosa mais cultivada. Quanto aos países produtores, segundo dados da safra de 2010/2011, o EUA está em primeiro lugar, representando 34% (90,6 milhões de toneladas) da produção total, seguido pelo Brasil e Argentina, com 28,5% (75,5 milhões de toneladas) e 18,5% (49 milhões de toneladas), respectivamente. Isso significa que cerca de 81% da produção mundial está concentrada em apenas três países (FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE, 2012).

Com uma área de cultivo de, aproximadamente, 24 milhões de hectares, na safra de 2010/11, a soja é a cultura mais importante do agronegócio brasileiro e também a que possuiu maior crescimento de produção nas últimas três décadas. Além disso, com um aumento médio anual na ordem de 3% de área plantada, como ocorreu entre as safras de 2010/11 e 2011/12, a soja apresenta crescimento estável no cenário agrícola, sustentando previsões positivas de forma segura para os próximos anos (CONAB, 2012).

Desse modo, essa situação também acaba se refletindo na participação da soja no setor agroindustrial, onde, por exemplo, é responsável por 73% da disponibilidade de óleo vegetal (ABIOVE, 2011). Por esse motivo, mesmo que boa parte dos grãos produzidos seja destinada à exportação e que a finalidade principal dos cultivares plantados, atualmente, seja a obtenção de proteína para a indústria alimentícia, a soja será, por muito tempo, a base da produção brasileira de biodiesel (NAE, 2005; PERES e BELTRÃO, 2006).

Especificamente no Rio Grande do Sul, a soja também é a cultura que detém a maior área de plantio, com cerca de 4 milhões de hectares na safra de 2010/2011, o que representa, entre os estados, a terceira maior área empregada para essa cultura no Brasil, com 17% do total. Quanto à produção do grão, também ocupa a terceira posição, com mais de 11 milhões de toneladas e 15,5% do total produzido no país, ficando atrás apenas do Mato Grosso e Paraná (CONAB, 2012). Entre as regiões produtoras do Rio Grande do Sul, merecem destaque os municípios de Tupanciretã, Cruz Alta, Palmeira das Missões, Santa Bárbara do Sul e Júlio de Castilhos, os quais produziram mais de 100.000 toneladas cada um, no período de 2004 a 2006, e juntos representam 14% da produção estadual (IBGE, 2009; 2011). O mapa da Figura 3.21 destaca as regiões com maior produção.

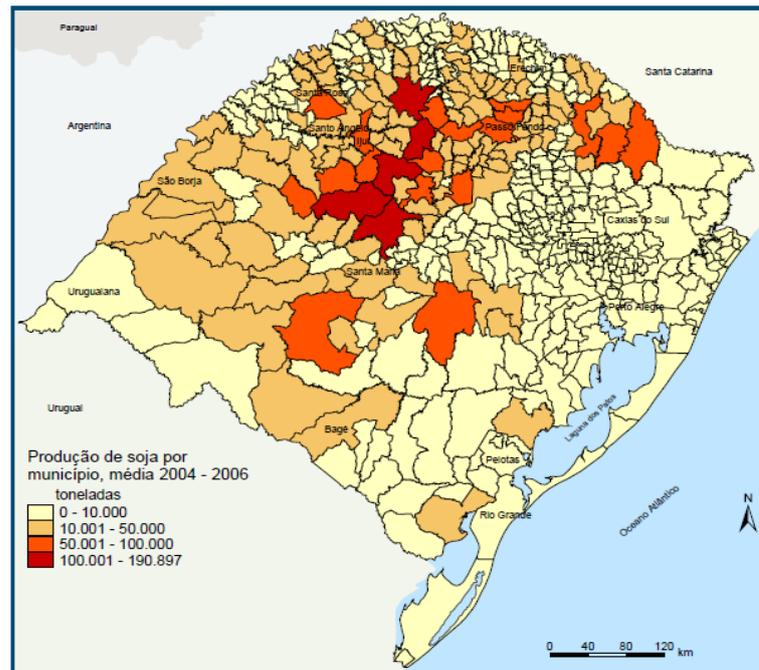


Figura 3.21 – Produção de soja no Rio Grande do Sul, por município, na média de 2004 a 2006.

(Fonte: RIO GRANDE DO SUL, 2008b).

No entanto, apesar destes valores expressivos, no quesito produtividade, o Rio Grande do Sul apresenta uma das piores médias do país, com rendimento de 1.794 kg/ha, no período entre 1990 e 2009, representando um valor bem menor que a média nacional, de 2.337 kg/ha (IBGE, 2009). Segundo informações da Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul (2006), esta baixa produtividade da soja no Rio Grande do Sul é devido, principalmente, à frequência e à intensidade das chuvas que, no período de desenvolvimento da cultura (outubro a março), muitas vezes não são suficientes para que as plantas da soja manifestem todo seu potencial produtivo. Isso também explica a variabilidade na produtividade das safras, as quais são significativamente maiores nos anos em que ocorrem precipitações abundantes, causadas pelo fenômeno climático denominado “El Niño”, e, por outro lado, são menores nos períodos do fenômeno “La Niña”, que possui efeito contrário ao primeiro.

A principal causa disso é que a água, constituindo 90% do peso da planta, é essencial ao desenvolvimento da planta, onde atua em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos, desempenhando a função de solvente para o transporte de gases e minerais nas células e na manutenção e distribuição do calor. Dessa forma, a necessidade de água é crescente durante o desenvolvimento da soja, começando na fase de germinação-emergência e atingindo o pico na fase de floração-enchimento de grãos (de 7 a 8 mm/dia). Nesta fase, a ocorrência de déficits hídricos expressivos pode provocar alterações fisiológicas na planta, como o fechamento dos estômatos e o enrolamento das folhas, o que causa a queda prematura

das mesmas e o abortamento das vagens, resultando, por fim, na redução do rendimento dos grãos. Estima-se que, para uma produtividade considerável, a necessidade total de água para a cultura da soja varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (EMBRAPA, 2008).

Diversos estudos já determinaram que a deficiência hídrica, dentre os componentes limitantes ao desenvolvimento das culturas de soja no Rio Grande do Sul, é o principal fator responsável pela diminuição da produtividade (CUNHA *et al.*, 2001; CUNHA e BERGAMASCHI, 1992; MATZENAUER *et al.*, 2002). Estima-se que 93% das perdas nas safras de soja ocorram em razão das estiagens (BERLATO e FONTANA, 2003). Também foi constatado que a probabilidade da precipitação pluvial alcançar as necessidades hídricas ótimas da cultura é muito baixa, especialmente nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, inclusive no norte do Estado, onde se concentra a produção de soja (ÁVILA *et al.*, 1996).

## 4 ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso, visando atingir os objetivos inicialmente propostos, foram aplicadas as metodologias da Pegada Hídrica e da ACV, com enfoque apenas no uso da água que ocorre na cadeia produtiva do biodiesel de soja, utilizando-se, como modelo, uma empresa com unidades industriais situadas no Rio Grande do Sul. Para tanto, a Pegada Hídrica foi desenvolvida seguindo a estrutura recomendada pela organização Water Footprint Network (WFN), descrita na publicação *The Water Footprint Assessment Manual* (HOEKSTRA *et al.*, 2011). Com relação à ACV, esta foi conduzida até a fase inventário, conforme a estrutura e as determinações das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). A partir disso, o presente capítulo apresenta as informações deste estudo na seguinte ordem: DEFINIÇÕES GERAIS, onde são apresentadas as definições iniciais obrigatórias a ambas metodologias; INVENTÁRIO DE MATERIAIS, no qual será realizada a apresentação de todos os dados brutos que foram coletados para a aplicação das ferramentas; PEGADA HÍDRICA, onde são mostrados e discutidos os resultados da aplicação da Pegada Hídrica; INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO USO DA ÁGUA, no qual são apresentados e discutidos os resultados do inventário produzido; e PEGADA HÍDRICA x ICV DO USO DA ÁGUA, onde é discutida a aplicabilidade, as limitações e as diferenças entre as metodologias empregadas, relacionando com os resultados anteriormente obtidos.

### 4.1 DEFINIÇÕES GERAIS

Neste subcapítulo, serão apresentados, conforme determinam as normas e publicações consultadas, os objetivos da aplicação das metodologias e os diversos itens que integram o escopo do estudo, incluindo a unidade funcional e o fluxo de referência, o sistema de produto e suas fronteiras, os critérios de alocação, as características específicas da aplicação da Pegada Hídrica e da ACV, os requisitos de qualidade dos dados coletados e as suposições realizadas.

#### 4.1.1 Objetivos

As metodologias da Pegada Hídrica e da ACV foram empregadas com o objetivo de quantificar o uso da água no ciclo de vida do biodiesel de soja. Através disso, este estudo pretende fornecer dados que possam contribuir com a avaliação da sustentabilidade do uso deste biocombustível e discutir sobre a aplicabilidade, as diferenças e as limitações destas

técnicas. Além disso, também possui o intuito de fornecer um modelo de inventário do uso da água, considerando que a abordagem deste aspecto, em métodos que avaliam o ciclo de vida de produtos e serviços, é relativamente nova, principalmente no Brasil. Dessa forma, a principal razão para o desenvolvimento deste trabalho é a necessidade, cada vez maior, de se conhecer e incluir de forma consistente a questão do consumo e da poluição hídrica dentro de estudos de avaliação ambiental de produtos e serviços.

#### 4.1.2 Unidade funcional e fluxo de referência

Neste estudo, ao invés de utilizar como unidade funcional a energia fornecida pelo produto, como ocorre na maioria dos trabalhos sobre combustíveis, considerou-se mais prático e representativo adotar a produção de 1 litro de biodiesel de soja, que é equivalente a 0,875 kg, segundo a densidade média estabelecida pela Resolução ANP n.º 14/2012 (ANP, 2012c). Ainda cabe ressaltar que esta escolha foi baseada no fato de que a unidade básica de comercialização do biodiesel, através dos leilões realizados pela ANP, é volumétrica.

#### 4.1.3 Sistema de produto e delimitação das fronteiras

A partir das informações coletadas na revisão bibliográfica, foi possível verificar que o ciclo de vida do biodiesel de soja é composto, basicamente, por cinco etapas principais, que são: o cultivo da soja, a extração e degomagem do óleo, a fabricação do biodiesel, a mistura e distribuição do produto final e a revenda aos consumidores. No entanto, como o foco do estudo é apenas o uso da água, que ocorre através do consumo e da poluição hídrica, foi decidido por aplicar as metodologias mencionadas através de uma abordagem conhecida como “do berço ao portão” (em inglês, “*cradle to gate*”), ou seja, do início da cadeia produtiva até a saída do produto final pelo portão da fábrica. Dessa forma, foram incluídas apenas as etapas do ciclo de vida referentes ao cultivo e produção das matérias-primas e insumos e à fabricação do produto principal, não sendo consideradas as etapas de distribuição e uso final. O fluxograma da Figura 4.1 apresenta a delimitação geral do sistema de produto.

Dentro das condições gerais de execução deste estudo (disponibilidade de tempo, equipamentos, custos, etc.) e com a finalidade de representar, da forma mais próxima possível, a situação real do ciclo de vida do biodiesel de soja, foi adotado como modelo do sistema de produto a cadeia produtiva de uma empresa instalada nos municípios de Santa Rosa e Ijuí – RS, cujo nome não será identificado. Esta empresa, além de estar consolidada há 40 anos no mercado de óleos vegetais refinados, encontra-se em ampla expansão na produção de biodiesel, possuindo, atualmente, uma das maiores usinas do Brasil e, recentemente,

adquirindo a produção de outra grande indústria deste setor, localizada no município de Rosário do Sul - RS.

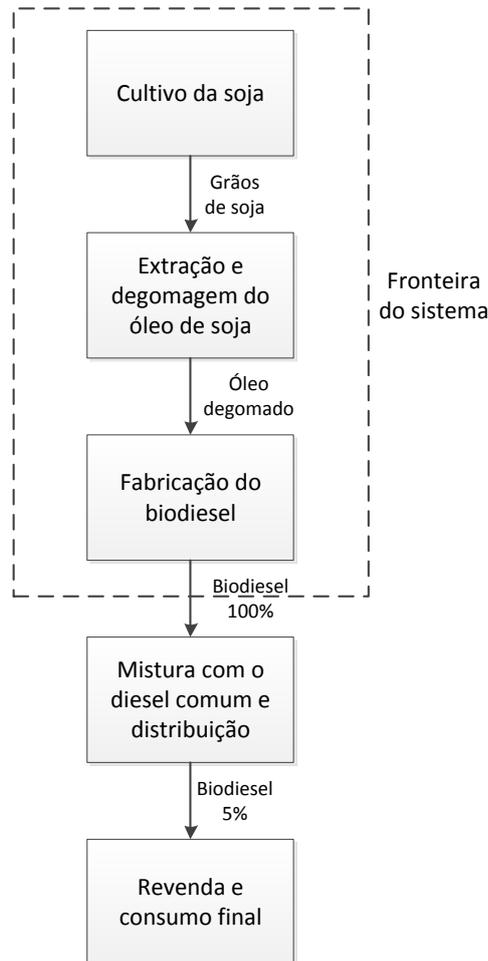


Figura 4.1 – Fluxograma da cadeia produtiva do biodiesel de soja, com indicação da fronteira do sistema de produto considerado no presente estudo.

Dessa forma, a fronteira geográfica deste estudo foi definida conforme a localização da produção dos materiais que participam do ciclo de vida do biodiesel produzido por essa empresa, como será mostrado mais adiante. Com relação à fronteira tecnológica, esta foi delimitada, quando especificado, pelas tecnologias ou sistema produtivo empregado pelos produtores rurais e empresas envolvidas; nos casos contrários, foram consideradas as tecnologias mais difundidas e utilizadas no Brasil ou no mundo. Por fim, com relação à fronteira temporal, apesar de não haver restrição inicial quanto ao período dos dados, procurou-se por informações que representassem a atualidade, da forma mais próxima possível.

Com o intuito de apresentar de forma mais clara as características de cada fase do ciclo de vida em estudo, o sistema de produto foi dividido em três subsistemas: fase agrícola, fase de produção do óleo degomado e fase de fabricação do biodiesel.

#### *4.1.3.1 Subsistema da fase agrícola*

O subsistema da fase agrícola abrange a primeira etapa do ciclo de vida do biodiesel de soja, ou seja, a produção de grãos nas plantações, sendo que grande parte dessa matéria-prima é proveniente da agricultura familiar. Como não há um local bem determinado, adotou-se, como modelo para este estudo, as lavouras dos produtores de soja do município de Santa Rosa – RS, devido à proximidade com relação à planta industrial de extração do óleo (localizada no mesmo município) e por esta região ser uma das maiores produtoras de soja do Rio Grande do Sul (IBGE, 2011).

Nesta fase de cultivo, os procedimentos empregados podem variar consideravelmente, dependendo de diversos fatores, como, por exemplo, as condições climáticas, as tecnologias disponíveis, a presença de praga e doenças na cultura, etc. No entanto, de acordo com informações obtidas através de entrevistas com agricultores locais e com funcionários do Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Santa Rosa, foi possível determinar um procedimento geral, comumente empregado na região, que será utilizado neste estudo.

Dessa forma, o sistema de cultivo da soja considerado foi o plantio direto, sem utilização da irrigação e com aproveitamento dos restos do cultivo anterior como cobertura verde. De modo geral, as atividades agrícolas podem ser divididas, basicamente, em quatro etapas: preparo do solo, plantio das sementes, trato da cultura e colheita dos grãos. Na primeira etapa, o solo é preparado através das operações de calagem, para correção de acidez (procedimento realizado uma vez a cada três anos, em média), e de dessecação (eliminação das ervas daninhas através da aplicação de um herbicida não seletivo), utilizando como equipamento um distribuidor de calcário e um pulverizador, acoplados a um trator. Depois disso, na fase de plantio, as sementes são previamente tratadas com um pesticida e, em seguida, é feita a semeadura da soja, em conjunto com a fertilização, através de máquinas plantadeiras tracionadas por um trator. Ainda nesta etapa, com o uso de pulverizador, também é realizada a aplicação de um herbicida seletivo de pré-emergência. Após a semeadura, o desenvolvimento da soja é acompanhado pela aplicação de defensivos, que variam de acordo com o surgimento de doenças, pragas e ervas daninhas. Nesse caso, foi considerada uma aplicação de fungicida, duas de inseticida e uma de herbicida de pós-emergência. Por fim, na última etapa, utiliza-se uma colheitadeira para efetuar o recolhimento dos grãos, deixando os restos da cultura no próprio solo para o próximo cultivo, conforme determina a prática do plantio direto.

Para determinar quais os produtos e insumos utilizados no cultivo da soja, foi feito um cruzamento das informações coletadas nas entrevistas mencionadas anteriormente, com as

obtidas na literatura especializada, de acordo com a Tabela 4.1, mostrada mais abaixo. Assim, por exemplo, na seleção dos defensivos agrícolas, foram considerados aqueles mais citados pelos produtores rurais, levando em conta o tipo, a função e as recomendações técnicas descritas na publicação *Indicações Técnicas para Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2009/2010* (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2009). Quanto aos fertilizantes, as substâncias foram escolhidas com base na quantidade produzida e no mercado brasileiro. Ainda neste aspecto, deve ser observado que, apesar das indicações técnicas não recomendarem a aplicação do nitrogênio devido à capacidade da soja em fixá-lo naturalmente, este nutriente foi incluído no estudo, pois se considerou que esta prática representa melhor a realidade do local, uma vez que todos os agricultores relataram o uso do fertilizante composto NPK com a presença do nitrogênio, resultando em uma proporção média de 2:20:20.

Ainda dentro do subsistema da fase agrícola, também foram considerados os processos de produção dos insumos envolvidos, incluindo o consumo de combustível no transporte destes até as plantações. No entanto, cabe salientar que não foi contabilizada a produção de bens de capital, como máquinas, equipamentos e infraestrutura, nem o trabalho humano, devido ao elevado grau de incerteza relacionado a esses aspectos. Com isso, os processos envolvidos ficaram delimitados, de acordo com a Tabela 4.2.

Diante destas definições, o subsistema da fase agrícola é apresentado na Figura 4.2.

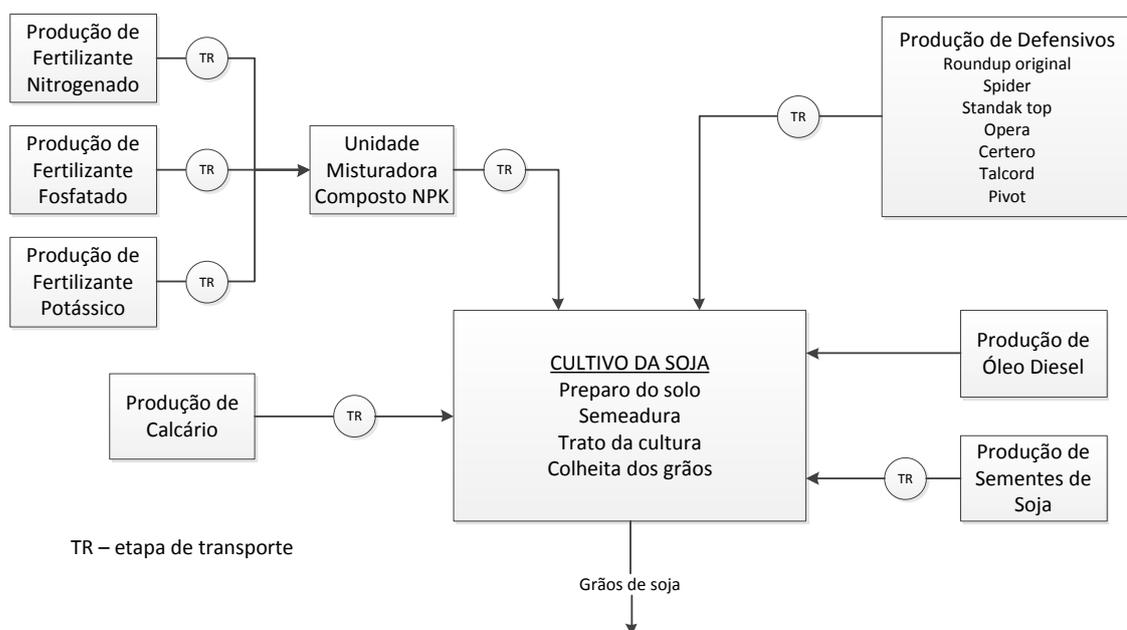


Figura 4.2 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase agrícola.

Tabela 4.1 – Produtos e substâncias utilizadas na fase de cultivo da soja, por etapa, com indicação da fonte de pesquisa e/ou da justificativa.

<b>Etapa</b>	<b>Insumo</b>	<b>Produto</b>	<b>Justificativa/Fonte</b>
Preparo do solo	Corretivo do solo	Calcário dolomítico	Entrevistas + Indicações técnicas*
	Herbicida (dessecação)	Roundup Original (i.a. glifosato)	Entrevistas + Indicações técnicas*
Plantio das sementes	Sementes	Geneticamente modificadas (Roundup Ready)	Entrevistas
	Fertilizante (composto)	NPK 2:20:20	Entrevistas
	Nitrogênio	Ureia	Fert. nitrogenado com maior consumo no Brasil (BRASIL, 2011b)
	Fósforo	Superfosfato simples (SSP)	Fert. fosfatado com maior consumo no Brasil (BRASIL, 2011b)
	Potássio	Cloreto de potássio (KCl)	Fert. potássico com maior consumo no Brasil (BRASIL, 2011b)
	Herbicida (pré-emergência)	Spider 840 WG (i.a. diclosulam)	Entrevistas + Indicações técnicas*
	Fungicida/Inseticida (tratamento de sementes)	Standak Top (i.a. fipronil + piraclostrobina + tiofanato-metílico)	Entrevistas + Indicações técnicas*
Trato do cultivo	Fungicida	Opera (i.a. epoxiconazol + piraclostrobina)	Entrevistas + Indicações técnicas*
	Inseticida	Certero (i.a. triflumurom)	Entrevistas + Indicações técnicas*
	Inseticida	Talcord 250 (i.a. permetrina)	Entrevistas + Indicações técnicas*
	Herbicida	Pivot (i.a. imazetapir)	Entrevistas + Indicações técnicas*
Todas as etapas	Combustível (trator, plantadeira, colheitadeira, etc.)	Óleo diesel	Entrevistas

\*Fonte: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2009.

Tabela 4.2 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase agrícola.

Insumos	Fonte	Tecnologia de produção	Localização	Tipo de transporte
Calcário dolomítico	Diversas	Extração, trituração e peneiramento	Caçapava do Sul – RS <sup>(a)</sup>	Rodoviário
Roundup Original	Monsanto do Brasil	Não disponível	São José dos Campos - SP	Rodoviário
Sementes	Diversas	Cultivo de soja geneticamente modificada	RS	Rodoviário
Fertilizante composto NPK	Diversas	Mistura dos componentes Ureia, SSP e KCl	Rio Grande – RS <sup>(b)</sup>	Rodoviário
Ureia	Diversas	A partir da amônia e do dióxido de carbono	Rússia <sup>(c)</sup>	Marítimo
SSP	Vale Fertilizantes <sup>(d)</sup>	Reação do ácido sulfúrico com a rocha fosfática	Cubatão - SP	Rodoviário
KCl	Diversas	Mineração e beneficiamento da silvinita	Rússia <sup>(e)</sup>	Marítimo
Spider 840 WG	Dow Agrosciences Industrial	Não disponível	Franco da Rocha - SP	Rodoviário
Standak Top, Opera, Talcord 250 e Pivot	Basf	Não disponível	Guaratinguetá - SP	Rodoviário
Certero	Bayer	Não disponível	Belford Roxo - RJ	Rodoviário
Óleo diesel	Petrobrás	Refino do petróleo	Brasil	-

(a) Principal região produtora do Rio Grande do Sul (SINDICALC, 2012).

(b) Região do Rio Grande do Sul que, devido à facilidade de acesso dos materiais pelo porto, concentra o maior número de unidades misturadoras.

(c) De acordo com Brasil (2011b), 73% da ureia consumida no Brasil é importada, sendo a maior parte proveniente da Rússia.

(d) Empresa responsável por 45% do mercado interno de SSP (VALE FERTILIZANTES, 2011).

(e) Conforme Brasil (2011b), 90% do cloreto de potássio consumido no Brasil é importado, sendo que a Rússia é um dos principais exportadores.

#### *4.1.3.2 Subsistema da fase de produção do óleo degomado*

Depois da fase agrícola, os grãos de soja produzidos são transportados por meio rodoviário até a unidade industrial responsável pela extração e degomagem do óleo, que fica localizada no município de Santa Rosa – RS. Nesta fase, segundo informações coletadas em visita à empresa, a transformação dos grãos de soja em óleo degomado é realizada por uma série de processos, como mostra o fluxograma da Figura 4.3, mais abaixo. Os primeiros procedimentos realizados são o recebimento, a pré-limpeza, a secagem e o armazenamento dos grãos de soja. Depois disso, os mesmos passam por um processo de preparação, onde são quebrados, descascados, cozidos, laminados e expandidos (formação de uma massa porosa). Então, na próxima etapa, ocorre o processo de extração, através do uso de um solvente orgânico, resultando na formação do farelo e do óleo, ambos contaminados pelo solvente. A partir da extração, o farelo é encaminhado aos processos de dessolventização (recuperação do solvente) e tostagem, para que possa ser posteriormente armazenado e comercializado. Quanto ao óleo bruto, este é primeiramente submetido ao processo de destilação para a separação do solvente. Logo após, é realizada a degomagem, onde se adiciona água, sob agitação constante, ao óleo previamente aquecido, para que ocorra a remoção de substâncias coloidais, proteínas e fosfatídeos, que formam a chamada “goma”, da qual ainda pode ser obtido o produto comercial conhecido como lecitina de soja.

Além dos processos principais, também foram incluídos os de segundo plano, como a geração de vapor nas caldeiras e o sistema de refrigeração. Outro processo que merece destaque é o de reutilização de efluentes líquidos, chamado de “efluente zero”, o qual consiste basicamente em um sistema evaporador, para onde são encaminhados todos os efluentes gerados, transformando-os em vapor de baixa pressão, que é aproveitado no processo principal.

Diante disso, os principais insumos utilizados neste subsistema são: energia elétrica; biomassa, utilizada como combustível para a geração de vapor nas caldeiras (cascas dos grãos de soja e lenha); água e o hexano, como solvente orgânico. Da mesma forma que no subsistema da fase agrícola, a produção destes insumos e o combustível consumido no transporte também foram considerados, sendo excluídos, apenas, os bens de capital e o trabalho humano. A Tabela 4.3 apresenta as características relacionadas à fonte e o transporte destes materiais, segundo informações repassadas pela empresa considerada neste estudo.

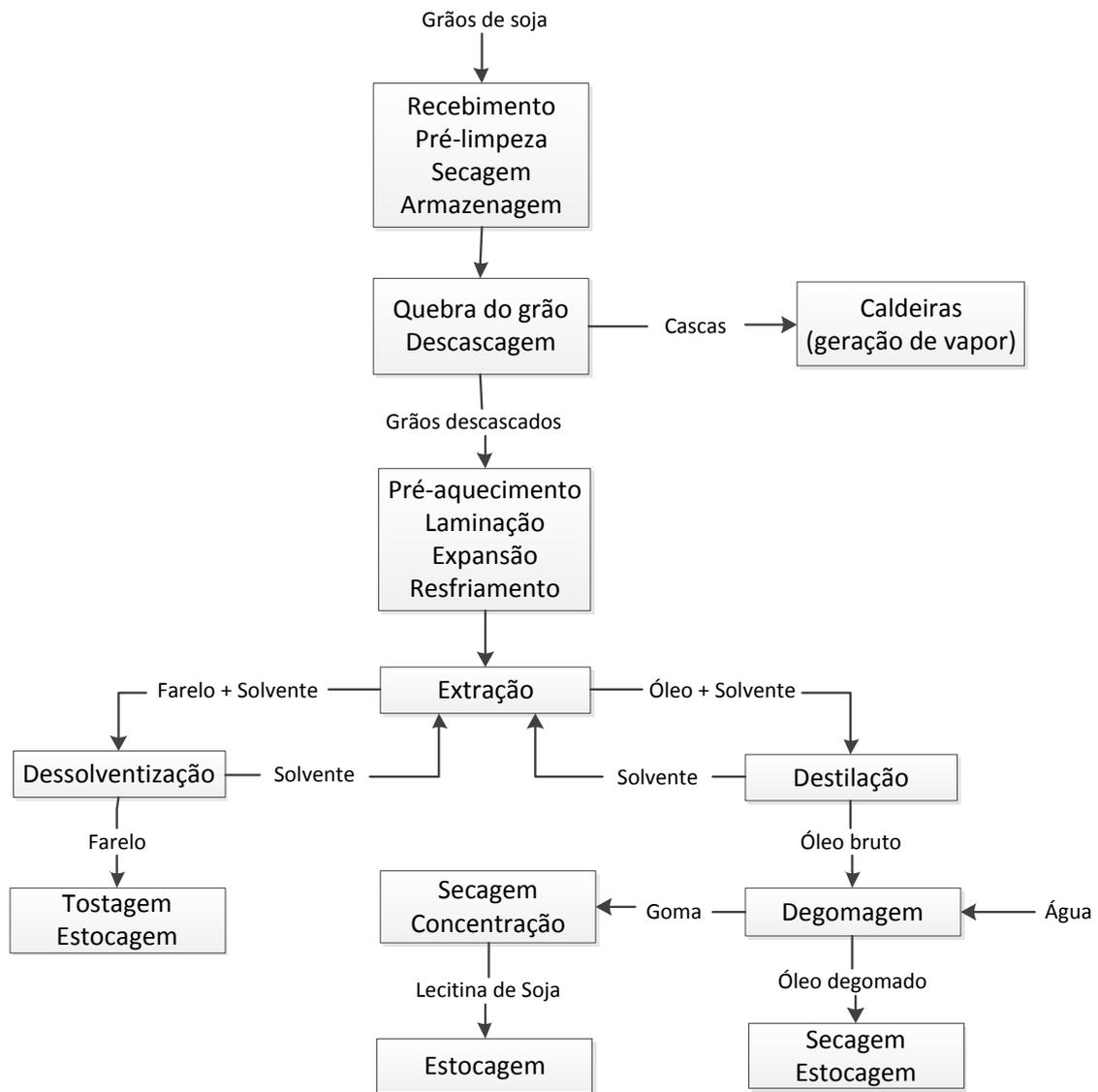


Figura 4.3 – Fluxograma do processo industrial de fabricação do óleo degomado.

Tabela 4.3 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase de produção do óleo degomado.

Insumo	Fonte	Tecnologia de produção	Localização	Tipo de transporte
Energia elétrica	Rede pública	Matriz brasileira	Brasil	-
Biomassa (lenha)	Diversificada	Cultivo de <i>pinus</i> e <i>eucaliptus</i>	RS	Rodoviário
Água	Subterrânea	-	Santa Rosa - RS	-
Hexano	Braskem	Refino do petróleo	Triunfo - RS	Rodoviário
Óleo diesel	Petrobrás	Refino do petróleo	Brasil	n.c.

n.c. - não foi contabilizado neste estudo.

O subsistema resultante da fase de extração do óleo degomado é apresentado na Figura 4.4.

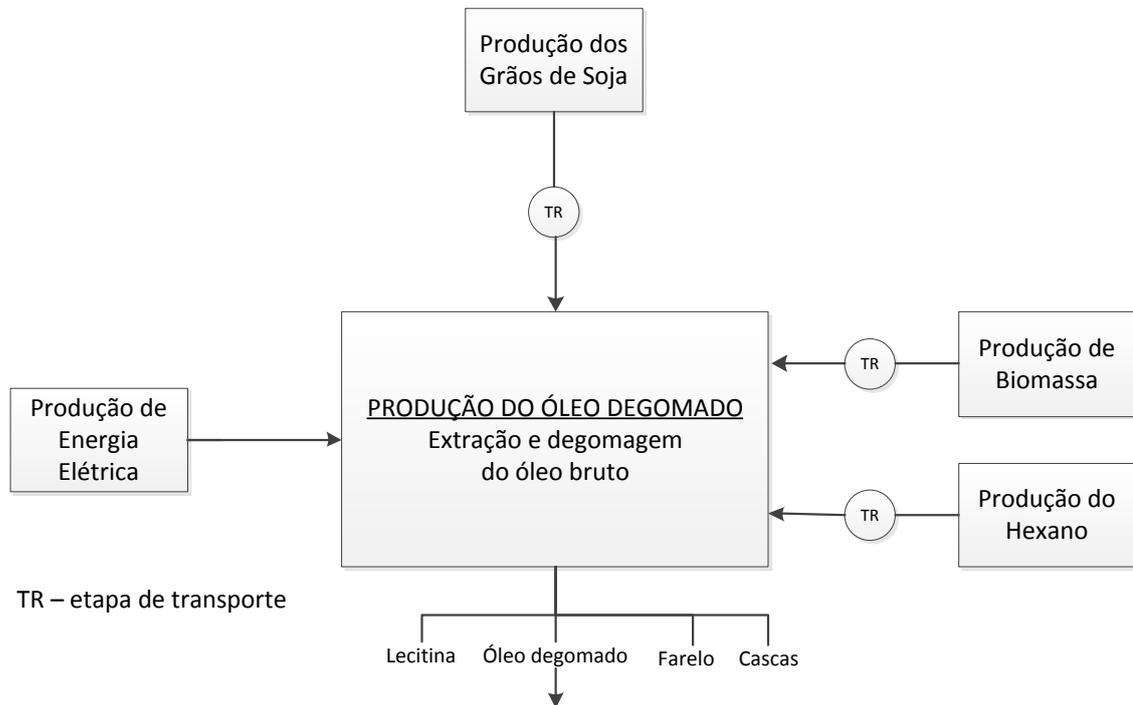


Figura 4.4 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase de produção do óleo degomado.

#### 4.1.3.3 Subsistema da fase de fabricação do biodiesel

Nesta fase do ciclo de vida avaliado, o óleo degomado de soja é encaminhado, através de transporte rodoviário, para outra unidade industrial da mesma empresa, localizada no município de Ijuí – RS, onde é transformado em biodiesel. De acordo com informações coletadas em visita ao local, o processo de fabricação consiste, basicamente, em três etapas principais: o pré-tratamento do óleo degomado, a transesterificação e a purificação do biodiesel e da glicerina.

De acordo com o fluxograma mostrado na Figura 4.5, na etapa inicial de pré-tratamento do óleo degomado, são realizados os processos de neutralização e desacidificação, visando eliminar os ácidos graxos livres e outras impurezas, que diminuem o rendimento da reação de transesterificação. Na neutralização, ocorre a adição de ácido fosfórico e hidróxido de sódio (solução aquosa) ao óleo previamente aquecido, para que ocorra a separação do material conhecido como “borra” (mistura de sabões, ácidos graxos e outras substâncias). Depois disso, na desacidificação, o óleo neutro resultante é submetido ao processo de destilação, com o emprego de vácuo e vapor d’água, para que seja eliminado o restante de

ácidos graxos que ainda permanecem no mesmo. Ainda cabe salientar que os ácidos graxos produzidos nesta etapa também podem ser purificados e posteriormente comercializados.

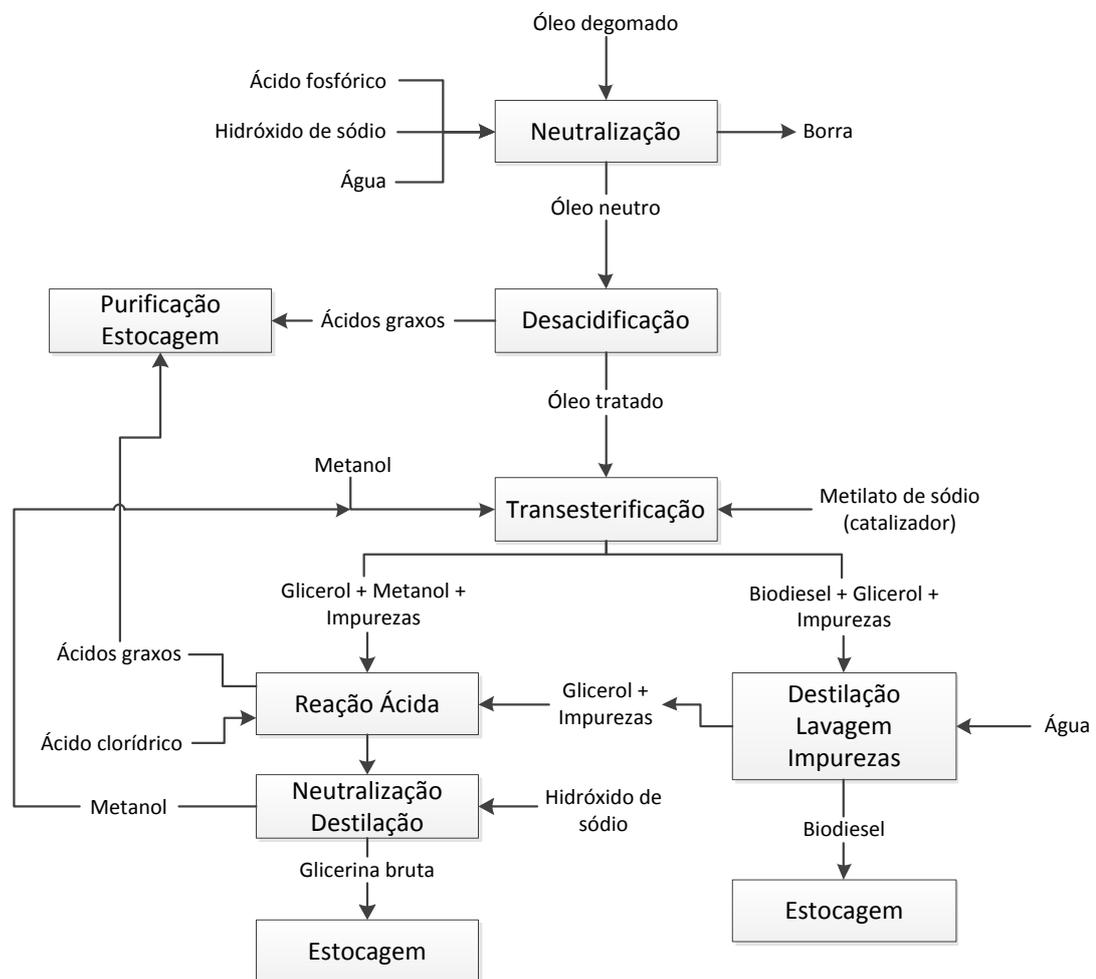


Figura 4.5 – Fluxograma do processo industrial de fabricação do biodiesel.

Após a obtenção do óleo tratado, este é encaminhado ao processo de transesterificação, onde é feita a reação com o metilato de sódio (catalisador) e o metanol, formando o biodiesel e a glicerina. No entanto, para que as características do biodiesel estejam de acordo com a regulamentação da ANP e, desse modo, possa ser estocado para posterior comercialização, ainda é preciso aplicar uma etapa de lavagem e destilação, para a remoção de substâncias indesejáveis, compostas por parte do metanol não reagido, por uma pequena quantidade de glicerina e outras impurezas. Com relação à glicerina formada como subproduto, esta também deve ser tratada, para que possua algum valor comercial. Diante disso, tanto a glicerina produzida no tanque de transesterificação, como a parte recuperada na lavagem do biodiesel, são coletadas e submetidas aos processos de acidificação (aplicação de ácido clorídrico) e destilação, produzindo assim um produto com 80% de concentração de glicerol, conhecido como glicerina bruta ou loira. Nesta etapa de purificação da glicerina,

mais especificamente na destilação, também é feita a recuperação do metanol que não reagiu na reação de transesterificação, objetivando sua reutilização no processo.

Ainda cabe relatar que, assim como na fase de extração do óleo degomado, neste subsistema também foram considerados os processos de segundo plano, como a geração de vapor nas caldeiras e o sistema de refrigeração, além do sistema “efluente zero”, que elimina o lançamento de efluentes líquidos aos corpos hídricos, conforme descrito anteriormente.

Desse modo, foi identificado que os principais insumos envolvidos neste subsistema são: biomassa para as caldeiras (lenha), energia elétrica, metanol, metilato de sódio, hidróxido de sódio, ácido fosfórico, ácido clorídrico e água. A produção destes materiais e o combustível consumido para o transporte até a usina também foram incluídos neste estudo, ficando de fora, apenas, os bens de capital e o trabalho humano. De acordo com informações da mesma empresa, as características da produção dos insumos foram identificadas conforme mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características gerais do ciclo de vida dos insumos envolvidos no subsistema da fase de fabricação do biodiesel.

Insumos	Fonte	Tecnologia de produção	Localização	Tipo de transporte
Energia elétrica	Rede pública	Matriz brasileira	Brasil	-
Biomassa (lenha)	Diversificada	-	RS	Rodoviário
Água	Subterrânea	Poços	Ijuí - RS	-
Metanol	Methanex	Reforma a vapor do gás natural	Punta Arenas - Chile	Marítimo /Rodoviário
Metilato de sódio 30%	DuPont	Reação do sódio metálico com metanol	Pirapozinho - SP	Rodoviário
Hidróxido de sódio 50%	Carbocloro	Eletrólise da salmoura pelo processo diafragma	Cubatão - SP	Rodoviário
Ácido Fosfórico 85%	Fosbrasil	Reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfatada por via úmida	Cajati - SP	Rodoviário
Ácido Clorídrico 32%	Carbocloro	Reação entre cloro e hidrogênio	Cubatão - SP	Rodoviário
Óleo diesel	Petrobrás	Refino do petróleo	Brasil	n.c.

n.c. - não foi contabilizado neste estudo.

A partir destas definições, o subsistema resultante da fase de fabricação do biodiesel é apresentado na Figura 4.6.

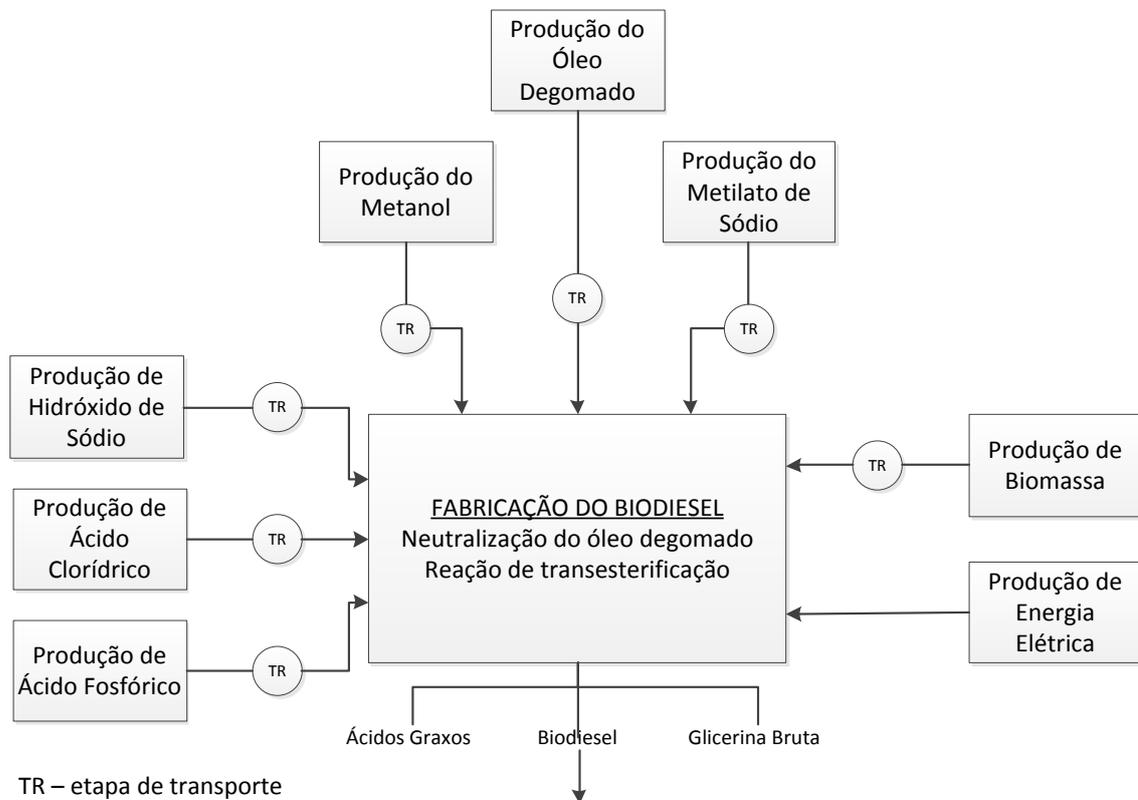


Figura 4.6 – Fluxograma das etapas incluídas no subsistema da fase de fabricação do biodiesel.

#### 4.1.4 Critérios de alocação

De acordo com a descrição da cadeia produtiva do biodiesel, realizada anteriormente, foi possível identificar a produção de outros materiais que são comercializados e que, por esse motivo, também são responsáveis por parte da carga ambiental. Essa distribuição (alocação) deve ser realizada de forma proporcional, conforme algum critério de valorização destes subprodutos. Neste estudo, o critério de alocação empregado foi o de massa em conjunto com o valor de mercado.

Dentre os três subsistemas analisados, apenas a fase agrícola não necessitou de alocação, uma vez que, depois de colhidos os grãos da soja, sobram apenas restos de matéria vegetal, que permanecem no campo como cobertura verde para a próxima cultura, sendo que essa função não apresenta valor comercial mensurável até o momento.

No subsistema da fase de produção do óleo degomado, são produzidas, como subprodutos, as cascas, a lecitina e o farelo de soja. As cascas são reaproveitadas na própria

planta industrial, como combustível para as caldeiras, enquanto que a lecitina e o farelo são comercializados para outros segmentos industriais. Contudo, em uma avaliação preliminar, utilizando os critérios estabelecidos anteriormente, foi verificado que a lecitina e a casca contribuem com menos de 1% para a alocação deste subsistema e, por esse motivo, não foram consideradas neste estudo.

Quanto ao subsistema da fase de fabricação do biodiesel, os subprodutos produzidos são a glicerina bruta (80% de pureza) e o ácido graxo bruto de soja, sendo que ambos são comercializados como matéria-prima para outros setores industriais. No entanto, o ácido graxo não foi contabilizado, pois apresentou contribuição de alocação menor que 1% na avaliação preliminar.

Além disso, ainda cabe observar que, dentro da cadeia produtiva de cada insumo, também foram feitas alocações das cargas ambientais. No entanto, estes procedimentos foram realizados pela própria fonte dos dados.

#### 4.1.5 Procedimentos da Pegada Hídrica

Como mencionado anteriormente, a Pegada Hídrica foi calculada seguindo as determinações da organização WFN, descritas na publicação de Hoekstra *et al.* (2011). Neste contexto, o presente estudo se desenvolveu até a fase de contabilidade, não incluindo as fases de avaliação da sustentabilidade e de formulação de resposta estratégica.

Dentro do escopo estabelecido, a Pegada Hídrica ( $PH_{biodiesel}$  L) foi composta pelos três componentes existentes, ou seja, a Água Verde ( $AV_{biodiesel}$  L), Azul ( $AA_{biodiesel}$  L) e Cinza ( $AC_{biodiesel}$  L), conforme Equação 4.1. A unidade adotada foi de litros de água, levando em conta a unidade funcional previamente definida de 1 litro de biodiesel produzido. Além disso, também foi especificada a origem da água extraída, sendo dividida em água superficial e subterrânea. Diante disso, a seguir serão descritos os procedimentos realizados para a quantificação dos resultados de cada componente.

$$PH_{biodiesel} = AV_{biodiesel} + AA_{biodiesel} + AC_{biodiesel} \quad (4.1)$$

##### 4.1.5.1 Água Verde

A Água Verde (AV), conforme descrito na revisão bibliográfica, refere-se apenas ao consumo de água da chuva armazenada no solo, que pode ocorrer através da evapotranspiração das plantas. Neste estudo, apesar de estar presente em praticamente todos

os processos, devido sobretudo ao uso de biomassa como combustível de caldeiras, este componente foi considerado somente nas etapas em que seu uso ocorre de forma direta, ou seja, no cultivo da soja e na produção de lenha usada na fabricação do óleo degomado e do biodiesel. Isso porque, após realizar uma avaliação preliminar, foi verificado que a contribuição dos valores encontrados para o restante das etapas (considerando o uso de biomassa fornecida pela fonte dos dados) era menor que 0,1% do valor final da  $AV_{biodiesel}$ . Por este mesmo critério, também foi excluído o volume de água que fica incorporado ao produto.

Diante disso, a  $AV_{biodiesel}$  foi determinada pela quantidade total de água da chuva evapotranspirada durante o desenvolvimento das culturas, envolvidas na cadeia produtiva do biodiesel. No entanto, de acordo com a relevância apresentada dentro do ciclo de vida estudado e com a disponibilidade de dados, estes valores foram determinados de diferentes maneiras.

Na produção de lenha, para o cálculo da Água Verde ( $AV_{lenha}$ , L) foram pesquisados na literatura especializada os valores médios anuais, encontrados para o Rio Grande do Sul, do volume de evapotranspiração real ( $ET_r$ , mm/ano) e da produtividade ( $Prod_{lenha}$ ,  $m^3/ha.ano$ ) dos cultivos de *Pinus* e *Eucalyptus*. Depois disso, estes dados foram relacionados com as quantidades de lenha ( $Q_{lenha}$ ,  $m^3$ ) empregadas no ciclo de vida, de acordo com a Equação 4.2 abaixo, onde a multiplicação da evapotranspiração pelo fator 10.000 se faz necessário para converter a unidade volumétrica de milímetros por ano (mm/ano) para litros por hectare por ano (L/ha.ano).

$$AV_{lenha} = \frac{Q_{lenha} \times (10000 \times ET_r)}{Prod_{lenha}} \quad (4.2)$$

Com relação à estimativa da Água Verde no cultivo da soja ( $AV_{soja}$ , L), esta foi realizada através da simulação do consumo de água pela cultura, utilizando o software CROPWAT v.8.0, desenvolvido pela FAO. Empregou-se esta metodologia pois, além de estar amplamente difundida no mundo todo, é a mais empregada em estudos de Pegada Hídrica, como, por exemplo, em Chapagain *et al.* (2006), Chapagain e Orr (2009), Gerbens-Leenes *et al.* (2009a), Gerbens-Leenes e Hoekstra (2009), entre outros.

Entre as opções de simulação “*crop water requirements*” e “*irrigation schedule*”, oferecidas pelo software, selecionou-se a segunda alternativa, uma vez que, conforme Hoekstra *et al.* (2011), além de possibilitar a inclusão de cenários de irrigação, é a mais precisa, pois calcula a  $ET_r$  da cultura, através do balanço hídrico diário do solo para a zona

radicular. Dessa forma, foi necessário inserir os seguintes dados referentes às condições ambientais da região das plantações e às características do cultivo da soja:

- Dados climáticos diários, necessários para a determinação da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) pela fórmula de Penman-Monteith: temperatura média e diurna, umidade relativa do ar, velocidade do vento e duração relativa da radiação solar.
- Precipitação total diária.
- Dados da cultura da soja: data de plantio, coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), duração dos estágios de desenvolvimento, profundidade efetiva das raízes e fração crítica de depleção ( $p$ ).
- Dados do solo: tipo (classificação), capacidade de água disponível (CAD) e taxa de infiltração máxima.

Após executar a simulação, os volumes diários de evapotranspiração real da soja ( $ETr_{soja}$ ,  $mm/dia$ ), fornecidos pelo software, foram somados, abrangendo desde o primeiro dia de plantio ( $d=1$ ) até o último dia da colheita ( $fim$ ), e transformados para a unidade de litros por hectare (multiplicação pelo fator 10000), obtendo-se, assim, o volume de uso da Água Verde por hectare de cultivo da soja ( $UAV_{soja}$ ,  $L/ha$ ) (Equação 4.3). Por fim, a  $AV_{soja}$  foi obtida relacionando o resultado da  $UAV_{soja}$  com a produtividade da região ( $Prod_{soja}$ ,  $kg/ha$ ) e a quantidade necessária de grãos de soja para a fabricação do biodiesel ( $Q_{soja}$ ,  $kg$ ), como mostra a Equação 4.4.

$$UAV_{soja} = 10000 \times \sum_{d=1}^{fim} ETr_{soja} \quad (4.3)$$

$$AV_{soja} = \frac{UAV_{soja}}{Prod_{soja}} \times Q_{soja} \quad (4.4)$$

#### 4.1.5.2 Água Azul

O cálculo da Água Azul do biodiesel ( $AA_{biodiesel}$ ,  $L$ ) foi baseado na diferença entre o volume de água que entra e sai de cada etapa do ciclo de vida, conforme Hoekstra *et al.* (2011). Devido à variação da fonte dos dados, estas informações foram adquiridas de duas diferentes maneiras.

No elo principal da cadeia produtiva, inicialmente foi feito o somatório da diferença entre o volume diário de entrada de água ( $V_{enb}$ ,  $L/dia$ ) e de saída de efluente ( $V_{sai}$ ,  $L/dia$ ) de

cada processo interno da empresa estudada. Depois disso, este valor foi relacionado à produtividade diária da mesma ( $Prod_{emp}$ ,  $kg/dia$ ) e à quantidade do produto utilizada no ciclo de vida estudado ( $Q_{prod}$ ,  $kg$ ), obtendo-se, assim, a Água Azul de cada etapa ( $AA_{etapa}$ ,  $L$ ). A Equação 4.5 resume estas operações.

$$AA_{etapa} = \frac{\sum(V_{ent} - V_{sai})}{Prod_{emp}} \times Q_{prod} \quad (4.5)$$

Nas etapas de produção de insumos, a fonte dos dados coletados forneceu os volumes de entrada de água ( $V_{ent}$ ,  $L/unidade\ do\ produto$ ) e de saída de efluente ( $V_{sai}$ ,  $L/unidade\ do\ produto$ ) por unidade produzida. Dessa forma, conforme Equação 4.6, depois de fazer a subtração dos volumes, foi preciso somente multiplicar pela quantidade do insumo ( $Q_{insumo}$ ,  $unidade\ do\ produto$ ) utilizada no ciclo de vida.

$$AA_{etapa} = (V_{ent} - V_{sai}) \times Q_{insumo} \quad (4.6)$$

Por fim, a  $AA_{biodiesel}$  resultou do somatório dos valores encontrados em todas as  $AA_{etapa}$  envolvidas no ciclo de vida (Equação 4.7).

$$AA_{biodiesel} = \sum AA_{etapa} \quad (4.7)$$

Nota-se, ainda, que, de acordo com o sistema de produto anteriormente definido, a Água Azul da fase agrícola não necessitou de procedimento de cálculo, pois a irrigação não é aplicada ao cultivo da soja e, portanto, não há extração de água dos corpos hídricos. No entanto, como uma contribuição adicional deste estudo, também foi realizada uma estimativa da Pegada Hídrica simulando a aplicação da irrigação.

Neste contexto, para determinar a Água Azul do cultivo da soja ( $AA_{soja}$ ,  $L$ ), foi necessário, primeiramente, calcular o volume total de Água Azul usada por hectare de cultivo ( $UAA_{soja}$ ,  $L/ha$ ), através do somatório do consumo diário, pela cultura, da água que é extraída para a irrigação ( $ET_{irrig}$ ,  $mm/dia$ ) e da evaporação diária que ocorre no sistema de irrigação ( $E_{sist}$ ,  $mm/dia$ ), abrangendo todo o período de cultivo, conforme mostra a Equação 4.8, onde a multiplicação pelo fator 10000 é usada na transformação para a unidade de litros por hectare. Os valores de  $ET_{irrig}$ , por sua vez, foram fornecidos pela simulação executada no software CROPWAT, como foi descrito no item 4.1.5.1 *Água Verde*. Quanto aos valores de  $E_{sist}$ , estes foram obtidos através da relação entre o volume de água perdida no sistema de irrigação ( $V_p$ ,

mm/dia) e a fração deste volume que é efetivamente consumida (evaporada) ( $f_c$ , *adimensional*), de acordo com a Equação 4.9.

$$UAA_{soja} = 10000 \times \sum_{d=1}^{fim} (ET_{irrig} + E_{sist}) \quad (4.8)$$

$$E_{sist} = V_p \times f_c \quad (4.9)$$

Após a realização destes cálculos, o valor da  $AA_{soja}$  foi obtido relacionando o resultado da  $UAA_{soja}$  com a produtividade do cultivo da soja considerada ( $Prod_{soja}$ , kg/ha) e a quantidade de grãos de soja necessários à fabricação do biodiesel ( $Q_{soja}$ , kg), como mostra a Equação 4.10.

$$AA_{soja} = \frac{UAA_{soja}}{Prod_{soja}} \times Q_{soja} \quad (4.10)$$

Dentro dos procedimentos relacionados à simulação do cenário de irrigação, ainda deve ser observado que a diferenciação do uso de Água Azul e de Água Verde foi realizado assumindo, primeiramente, que todo o volume da água de irrigação aplicada de forma efetiva é consumido pela cultura, o que acaba determinando o valor de  $ET_{irrig}$ . A partir disso, foi considerado como consumo de Água Verde (água da chuva) todo o volume que faltou para atingir a necessidade ótima do cultivo.

#### 4.1.5.3 Água Cinza

De acordo com Hoekstra *et al.* (2011), o cálculo da Água Cinza foi realizado através de dois modos diferentes: poluição difusa e poluição pontual. Na poluição difusa, foi contabilizada apenas a etapa de cultivo da soja, uma vez que para o cultivo de biomassa com fins energéticos não foi considerada o uso de fertilizantes e pesticidas.

A fórmula empregada para o cálculo do volume total de Água Cinza usada no cultivo da soja ( $UAC_{soja}$ , L/ha), mostrada na Equação 4.11, é igual a de todas as publicações consultadas que calcularam este componente da Pegada Hídrica, dentre as quais estão a de Chapagain *et al.* (2006), Aldaya e Hoekstra (2010), Gerbens-Leenes e Hoekstra (2012) e Ercin *et al.* (2012), onde:  $CP_x$  (mg/ha) é a carga do poluente  $x$  aplicada no processo ou etapa;  $f_p$  (*adimensional*) é a fração de perda do poluente  $x$ , por lixiviação e/ou escoamento

superficial;  $c_{max}$  (mg/L) é a concentração máxima permitida do poluente  $x$  no corpo hídrico receptor, pela norma ou legislação vigente; e  $c_{nat}$  (mg/L) é a concentração natural do poluente  $x$  no corpo hídrico receptor, ou seja, sem intervenção antrópica.

$$UAC_{soja} = \frac{f_p \times CP_x}{c_{max} - c_{nat}} \quad (4.11)$$

Depois disso, para a obtenção do valor final da Água Cinza do cultivo da soja ( $AC_{soja}$ , L), o resultado de  $UAC_{soja}$  foi relacionado com a produtividade da região ( $Prod_{soja}$ , kg/ha) e a quantidade de soja utilizada no ciclo de vida ( $Q_{soja}$ , kg), conforme Equação 4.12.

$$AC_{soja} = \frac{UAC_{soja}}{Prod_{soja}} \times Q_{soja} \quad (4.12)$$

Com relação à Água Cinza das outras etapas ( $AC_{etapa}$ , L), esta foi calculada pelo método da poluição pontual, conforme Hoekstra *et al.* (2011). A Equação 4.13 mostra a fórmula empregada, já incluindo a relação com a quantidade do produto ou insumo utilizada no ciclo de vida ( $Q_{prod}$ , unidade do produto), onde:  $V_{efl}$  e  $V_{afl}$  (L/unidade do produto) são os volumes de efluente e de afluente (entrada de água) por unidade produzida;  $c_{efl}$  e  $c_{afl}$  (mg/L) são as concentrações da substância no efluente e no afluente;  $c_{max}$  e  $c_{nat}$  (mg/L) possuem a mesma definição descrita anteriormente.

$$AC_{etapa} = \frac{(V_{efl} \times c_{efl}) - (V_{afl} \times c_{afl})}{c_{max} - c_{nat}} \times Q_{prod} \quad (4.13)$$

Ainda cabe salientar que estes procedimentos foram aplicados separadamente a todas as principais substâncias descartadas, em termos de quantidade ou relevância ambiental, nas etapas que compõem o ciclo de vida do biodiesel. No cultivo da soja, por exemplo, foram quantificados os valores da Água Cinza para o nitrogênio, o fósforo e os pesticidas. A partir disso, o resultado final da Água Cinza, de cada etapa, foi definido pela substância que apresentou o maior valor final, partindo do princípio que o volume de água necessária para diluir o poluente crítico também servirá para os outros poluentes, conforme procedimento adotado por Chapagain *et al.* (2006) e Ercin *et al.* (2012).

#### 4.1.6 Procedimentos do ICV do uso da água

De acordo com os objetivos deste estudo, o inventário construído teve como enfoque apenas os fluxos elementares relacionados ao uso da água. No entanto, conforme visto na revisão bibliográfica, até o momento não há nenhum tipo de norma ou padronização que determine, de maneira consistente, as informações sobre o uso da água que devem constar no ICV. Diante disso, utilizou-se, como referência, as recomendações e a estrutura proposta na publicação de Bayart *et al.* (2010) e o modelo desenvolvido no estudo de Boulay *et al.* (2011a). Estas pesquisas expressam resultados recentemente alcançados pelo grupo de trabalho da UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, engajados no projeto intitulado “*Avaliação do uso e da depleção dos recursos hídricos dentro da estrutura de trabalho da ACV*” (tradução livre).

A partir das informações destes estudos, foi determinado que o ICV do biodiesel gerado neste trabalho será dividido em duas formas de uso da água: o uso consuntivo e o uso degradativo. A seguir serão descritos os procedimentos adotados para a quantificação de cada tipo de uso da água.

##### 4.1.6.1 Uso consuntivo

A metodologia adotada para a quantificação do uso consuntivo da água foi igual àquela utilizada para a Água Azul da Pegada Hídrica, ou seja, foi realizado o balanço hídrico de todas as etapas envolvidas no ciclo de vida estudado, contabilizando a diferença entre o volume de água que entra (extração) e sai (efluente) de cada uma. Além disso, também foi especificada a fonte da água extraída, sendo dividida em água superficial e água subterrânea.

Devido à ênfase dada ao elo principal da cadeia produtiva, os resultados alcançados, nas etapas de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel, foram apresentados com maior detalhamento, através da quantificação do consumo de água que ocorre nos principais processos industriais. Na etapa de cultivo da soja, não ocorreu uso consuntivo, pois, conforme visto anteriormente, não há extração de água dos corpos hídricos para irrigação. Quanto à simulação do cenário de irrigação, o uso consuntivo foi determinado pelo mesmo valor encontrado para a Água Azul, conforme procedimentos descritos no item 4.1.5.2 *Água Azul*.

#### 4.1.6.2 Uso degradativo

Para expressar o uso degradativo da água, ou seja, a perda de funcionalidade da mesma devido ao descarte de substâncias por um determinado processo ou atividade, foi necessário classificar a água de entrada e de saída (efluente), de acordo com sua qualidade. Portanto, para cada etapa do ciclo de vida, inicialmente foi preciso obter as características qualitativas dos fluxos de água, por meio da identificação das concentrações das substâncias presentes e de outros parâmetros.

Então, depois de conhecer o volume e a qualidade com que a água entra e sai do processo, esta foi classificada nas categorias de funcionalidade definidas por Boulay *et al.* (2011a). De forma resumida, esta classificação foi feita utilizando dezessete categorias de qualidade da água, sendo: oito para água superficial, oito para água subterrânea e uma para a água da chuva. Estas categorias, por sua vez, foram definidas com base nos requisitos de qualidade da água necessários para o desempenho das funções de onze diferentes tipos de uso. As Tabelas 4.5 e 4.6, mais abaixo, mostram, respectivamente, a descrição dos diferentes tipos de uso da água e a relação resultante de funcionalidade entre as categorias formadas e os tipos de uso da água.

Para caracterizar os requisitos qualitativos da água, os autores deste estudo se basearam em diferentes referências, incluindo padrões da World Health Organization (WHO), da FAO, da Comunidade Econômica Europeia (CEE), entre outros. Dessa forma, foram selecionados 136 parâmetros, que incluem desde os mais comuns, como sólidos suspensos e dissolvidos, dureza, pH, DBO e nitrogênio total, até os mais específicos, como pesticidas, metais pesados e hidrocarbonetos. No entanto, conforme recomendação do mesmo estudo, não foi necessário utilizar todos os parâmetros para classificar os fluxos de água, sendo somente contabilizados os que apresentaram resultados mais críticos e, por esse motivo, determinaram as categorias de classificação. Maiores detalhes sobre as faixas de concentração dos parâmetros, os limites de cada categoria e as respectivas fontes de consulta são mostrados no APÊNDICE A ou podem ser consultados na própria publicação de Boulay *et al.* (2011a).

#### 4.1.7 Requisitos da coleta de dados

Em termos gerais, considerando a complexidade do ciclo de vida do biodiesel de soja e as condições de execução do presente estudo, optou-se por dividir o procedimento de obtenção dos dados em duas formas diferentes: (a) coleta de dados primários específicos para as etapas que constituem o elo principal da cadeia produtiva do biodiesel, que são: o cultivo

da soja, a produção de óleo degomado e a fabricação do biodiesel; e (b) coleta de dados secundários para a produção dos insumos, procurando sempre obter de fontes confiáveis e reconhecidas pela comunidade científica, e também levando em conta as similaridades tecnológicas, temporais e geográficas, da forma mais próxima possível com a realidade do ciclo de vida estudado.

Tabela 4.5 – Definição dos tipos de uso da água considerados no uso degradativo.

<b>Tipos de uso da água</b>	<b>Definição</b>
Doméstico I	Uso doméstico sem necessidade de tratamento prévio ou com apenas uma desinfecção química simples.
Doméstico II	Uso doméstico com necessidade de tratamento físico-químico convencional (coagulação ou precipitação, remoção de sólidos e desinfecção) ou outro tratamento equivalente.
Doméstico III	Uso doméstico com necessidade de tratamento avançado (ex.: tratamento convencional mais um tratamento adicional, como a desinfecção UV, adsorção, etc.) ou um tratamento avançado específico (ex.: osmose reversa, nanofiltração, adsorção, troca iônica, dessalinização, entre outros).
Industrial	Uso por qualquer setor industrial, considerando que este retira a água disponível e faz o tratamento necessário para adaptar ao nível de qualidade requerido.
Refrigeração	Uso exclusivo para o processo de resfriamento da água nas indústrias.
Agricultura I	Atividade agrícola que requer água de boa qualidade para a irrigação (ex.: cultivos que geralmente são consumidos de forma crua).
Agricultura II	Atividade agrícola na qual pode ser utilizada água de baixa qualidade na irrigação (ex.: cultivos que não são consumidos de forma crua ou que não servem como alimento).
Pesca	Atividade de aquicultura e pescaria.
Hidrelétrica	Uso na produção de energia hidrelétrica.
Transporte	Uso para transporte de materiais através de águas interiores (rios, lagos, etc.).
Recreação	Atividades de recreação no geral, como natação e outros esportes aquáticos.

Fonte: adaptado de BOULAY *et al.* (2011a).

Tabela 4.6 – Relação de funcionalidade entre as categorias de classificação e os tipos de uso da água considerados no uso degradativo.

<b>Categoria</b>	<b>1</b>	<b>2a</b>	<b>2b</b>	<b>2c</b>	<b>2d</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>AC</b>
<b>Fonte</b>	S ou G	S ou G	S ou G	S ou G	S ou G	S ou G	S ou G	S ou G	Água da Chuva
<b>Nível da Qualidade</b>	Excelente	Boa	Média	Média toxicidade	Média microbiológica	Baixa	Muito baixa	Não utilizável	-
<b>Doméstico I</b>	√	X	X	X	X	X	X	X	√
<b>Doméstico II</b>	√	√	√	X	X	X	X	X	√
<b>Doméstico III</b>	√	√	√	√	√	√	√	X	√
<b>Agricultura I</b>	√	√	X	√	X	X	X	X	√
<b>Agricultura II</b>	√	√	√	√	√	√	X	X	√
<b>Pesca</b>	√	X	X	X	√	X	X	X	√
<b>Indústria</b>	√	√	√	X	X	X	X	X	√
<b>Refrigeração</b>	√	√	√	√	√	√	√	X	√
<b>Recreação</b>	√	√	X	√	X	X	X	X	√
<b>Transporte</b>	√	√	√	√	√	√	√	√	√
<b>Hidrelétrica</b>	√	√	√	√	√	√	√	√	√

Legenda: √ - funcional, X - não funcional; S – superficial, G - subterrânea.

Fonte: adaptado de BOULAY *et al.* (2011a).

As principais fontes dos dados secundários foram dois bancos de dados de ACV: o software GaBi v.4.4 (PE INTERNATIONAL, 2011) e a base de dados Ecoinvent v.2.2 (ECOINVENT CENTRE, 2010). A partir dos inventários disponibilizados por estes programas, foi possível extrair dados referentes ao volume de entrada de água, separados pela origem (superficial e subterrânea), e a massa de substâncias emitidas aos recursos hídricos.

Quanto ao volume de efluente, esta informação está disponível apenas no software GaBi. Dessa forma, quando os dados foram fornecidos pelo Ecoinvent, o volume de efluente foi determinado multiplicando-se o volume de água extraída por um coeficiente de “retorno” (CR) característico da atividade industrial avaliada, o qual é definido como a fração do volume total de água que não é consumida no processo e acaba sendo descartada como efluente.

A partir disso, a qualidade do efluente foi caracterizada através da divisão entre a massa das substâncias descartadas e o volume de efluente, obtendo-se as concentrações em miligramas por litro. Ainda cabe ressaltar que este procedimento de obtenção dos dados secundários foi baseado nas recomendações de Boulay *et al.* (2011a), que foram descritas para os casos em que há baixa disponibilidade de informações sobre as diferentes formas de uso da água.

#### 4.1.8 Suposições e limitações

As principais suposições e limitações deste estudo estão relacionadas à produção dos insumos, uma vez que se utilizou de dados secundários para a caracterização dos fluxos de água. Uma importante limitação identificada é referente à localização das regiões onde ocorrem os usos da água dentro da cadeia produtiva de cada insumo, pois, devido à grande complexidade de cada ciclo de vida envolvido, foram feitas simplificações, que acabaram concentrando os usos da água em poucos locais ou em regiões maiores que uma bacia hidrográfica. Isso pode ser visto, por exemplo, na produção do herbicida Roundup Original, onde foi considerado que o volume total de água usada em seu ciclo de vida ocorreu somente em São José dos Campos – SP. Outro exemplo claro é a etapa de extração e beneficiamento do cloreto de potássio, onde foi considerada a Rússia como local da atividade, sem haver maior especificação.

Além disso, a característica do efluente lançado na produção de alguns materiais também ficou simplificada, pois a concentração dos poluentes foi determinada de uma só vez, através dos valores totais de volume e de emissão para a água obtidos em todo o ciclo

produtivo, enquanto que, na situação real, cada etapa tem suas características particulares de quantidade e qualidade.

Como o local em que o uso da água ocorre é importante para a questão dos recursos hídricos, procurou-se diminuir estas simplificações, separando e detalhando os inventários consolidados fornecidos pelos bancos de dados, de acordo com os fluxos de materiais existentes. No entanto, devido ao grande número de processos envolvidos, este procedimento foi adotado apenas para os fluxos que representavam mais de 1% da massa total de entrada. Quanto aos demais fluxos, incluindo a produção de energia e o combustível consumido, estes foram agrupados em um único fluxo e local, uma vez que apresentam menor significância com relação ao uso da água e pela produção ocorrer de forma muito distribuída em termos de localização (ex.: energia elétrica).

Estes aspectos, apesar de estarem relacionados apenas aos insumos, devem ser observados, principalmente, se os resultados obtidos com este trabalho forem utilizados posteriormente para estudos de avaliação de impactos ou de sustentabilidade, visto que tendem a concentrar o consumo e a poluição hídrica em um número menor de regiões. Outras limitações e suposições de menor importância serão discriminadas ao longo da apresentação dos resultados finais.

## 4.2 INVENTÁRIO DE MATERIAIS

Neste subitem, serão apresentados e discutidos os resultados relacionados aos fluxos de materiais envolvidos no ciclo de vida do biodiesel de soja. Dessa forma, para cada subsistema, além de descrever o método de obtenção dos dados, serão mostrados os dados brutos referentes aos fluxos de água em cada etapa e as quantidades de insumos e produtos utilizadas para a produção da unidade funcional (1 litro de biodiesel). Portanto, todas as informações apresentadas a seguir foram organizadas de maneira que possam servir de base para a consolidação tanto da Pegada Hídrica como do ICV do uso da água.

### 4.2.1 Subsistema da fase agrícola

O primeiro procedimento adotado foi o de coletar, junto aos bancos de dados de ACV, informações sobre o ciclo de vida dos insumos envolvidos neste subsistema, incluindo o volume de água extraída, o volume de efluente gerado e as emissões de poluentes para a água. Depois disso, a concentração dos poluentes na água extraída foi determinada com dados referentes à qualidade dos corpos hídricos existentes na região de produção de cada material, utilizando as fontes mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase agrícola, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados.

Insumos	Processos internos de produção	Fonte dos fluxos de materiais, volume de água extraída, volume e qualidade do efluente	CR <sup>(a)</sup>	Fonte da qualidade da água extraída / Local de referência
Calcário dolomítico	Insumos	GaBi v.4.4 <sup>(b)</sup>	-	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Ureia	Ureia e amônia	Ecoinvent v.2.2 <sup>(c)</sup>	0,7	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Rússia
	Outros insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Europa
Superfosfato simples (SSP)	SSP e ácido sulfúrico	Ecoinvent v.2.2 <sup>(c)</sup>	0,75	CETESB (2012) / Cubatão - SP
	Extração e beneficiamento de rocha fosfática		0,62	CETESB (2006) / Aquífero São Paulo
	Enxofre		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Europa
	Outros insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Cloreto de potássio (KCl)	Extração e beneficiamento do KCl	Ecoinvent v.2.2 <sup>(c)</sup>	0,62	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Rússia
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Europa
Defensivos agrícolas	Roundup Original <sup>(d)</sup>	Ecoinvent v.2.2 <sup>(c)</sup>	0,7	CETESB (2012) / São José dos Campos - SP e CETESB (2006) / Aquífero Taubaté.
	Certero <sup>(e)</sup>			INEA (2011) / Belford Roxo - RJ
	Spider 840 WG <sup>(f)</sup>			CETESB (2012) / Franco da Rocha – SP e CETESB (2006) / Aquífero São Paulo
	Standak Top <sup>(g)</sup>			CETESB (2012) / Guaratinguetá – SP e CETESB (2006) / Aquífero Taubaté
	Opera <sup>(h)</sup>			
Talcord 250 <sup>(i)</sup>				
Pivot <sup>(j)</sup>				
Óleo diesel	-	GaBi v.4.4 <sup>(b)</sup>	0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Sementes	Cultivo	Resultados da fase agrícola deste estudo	-	-

(a) Fonte: SILVA, 2011; (b) Fonte: PE INTERNATIONAL, 2011; (c) Fonte: ECOINVENT CENTRE, 2010; (d) i.a. glifosato 360 g/kg; (e) i.a. diclosulam 840 g/kg; (f) i.a. fipronil 205 g/kg, piraclostrobina 20,5 g/kg, tiofanato-metílico 184 g/kg; (g) i.a. epoxiconazol 47 g/kg, piraclostrobina 125 g/kg; (h) i.a. permetrina 245 g/kg (i) i.a. imazetapir 96 g/kg; (j) i.a. triflumurom 430 g/kg.

A partir destas informações, a fim de esclarecer a relação entre a origem dos dados e as características da produção destes materiais definidas para o sistema de produto estudado, algumas observações devem ser feitas:

- Calcário dolomítico: não foram encontrados dados referentes à produção brasileira, por esse motivo utilizou-se a base de dados da Europa (“*limestone, flour 2mm, RER*”). No entanto, a sequência do processo produtivo, além de ser simples, é praticamente igual ao empregado no Brasil, ou seja, extração com explosivos, britagem e moagem. Outro aspecto importante, é que não foi encontrado uso da água no processo de produção do calcário; portanto, apenas foram considerados os insumos do ciclo de vida deste produto, que são compostos basicamente por eletricidade e combustível.
- Ureia: conforme identificado anteriormente, grande parte da ureia consumida no Brasil como fertilizante é importada da Rússia. Dessa forma, utilizou-se a base de dados da Europa (“*urea, as N, at regional storehouse, RER*”), que considera os principais processos empregados no mundo, que são a reação entre a amônia e o dióxido de carbono para a produção da ureia e a reforma catalítica do gás natural para a produção da amônia. Os outros insumos são energia elétrica, combustível, níquel e solventes diversificados.
- SSP: na falta de dados consistentes sobre o uso da água na cadeia produtiva brasileira de SSP, empregou-se a base de dados da Europa (“*single superphosphate, as P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, at regional storehouse, RER*”). Neste inventário, são consideradas tecnologias similares às condições brasileiras, onde o SSP é produzido através da acidificação da rocha fosfática. Este último insumo, por sua vez, é extraído e beneficiado através da rota seca. Quanto ao ácido sulfúrico, este é produzido através da oxidação do enxofre proveniente das refinarias de petróleo, que, no caso do Brasil, é importado. De forma geral, os outros insumos dessa cadeia produtiva são eletricidade, combustível, soda cáustica e outras substâncias químicas diversificadas.
- KCl: foi utilizada a base de dados da Europa (“*potassium chloride, as K<sub>2</sub>O, at regional storehouse, RER*”), pois grande parte do KCl consumido no Brasil é importado, principalmente, da Rússia. Neste inventário, são contabilizadas as três técnicas mais utilizadas no mundo para a concentração do sal após a extração, que são a flotação, a separação eletrostática e a solução em água quente. Os insumos empregados nestes processos são energia elétrica, combustível e compostos inorgânicos variados.

- Defensivos: todos os inventários utilizados para estes insumos são baseados em dados europeus. No entanto, acredita-se que, por serem compostos muito específicos, não haja grande variabilidade dos processos de fabricação. Também deve ser observado que, para alguns produtos específicos, foram utilizados inventários genéricos, de acordo com a classe ou o grupo químico do ingrediente ativo (i.a.). Diante disso, a base de dados ficou da seguinte forma: Roundup Original - “*glyphosate, RER*”; Spider 840 WG - “*herbicides, RER*”; Standak Top - “*insecticides, RER*” (i.a. fipronil), “*fungicides, RER*” (i.a. piraclostrobina) e “*urea-compounds, RER*” (i.a. tiofanato metílico); Opera - “*cyclic-N-compounds, RER*” (i.a. epoxiconazol) e “*fungicides, RER*” (i.a. piraclostrobina); Certero - “*urea-compounds, RER*”; Talcord 250 - “*pyretroid-compounds, RER*”; Pivot - “*diazole-compounds, RER*”.
- Óleo diesel: utilizou-se o conjunto de dados baseado na produção brasileira (“*diesel, consumption mix, 500 ppm sulphur, at refinery, BR*”).
- Sementes: foram utilizados os resultados obtidos no cultivo da soja, considerando a área de plantio necessária para a produção da quantidade de sementes requeridas no ciclo de vida estudado. Os fluxos de água da produção dos insumos utilizados nesta etapa não foram incluídos.

A partir da obtenção destes dados, foi possível determinar os valores quantitativos e qualitativos dos fluxos de água envolvidos na produção dos insumos da fase agrícola. A Tabela 4.8 mostra os valores volumétricos de entrada e saída de água de todos os processos, enquanto que da Tabela 4.9 a 4.14 são apresentadas as concentrações das substâncias presentes na água, que determinam a qualidade de cada fluxo. Nota-se que, conforme justificado anteriormente, os dados relacionados aos processos que pertencem ao ciclo de vida de cada insumo foram divididos de acordo com a região em que são produzidos, uma vez que alguns ocorrem de forma muito diversificada e outros são produzidos na mesma planta industrial. Outra observação importante é que, conforme descrito nos procedimentos da Pegada Hídrica e do ICV, não é necessário quantificar a concentração de todas as substâncias emitidas e, portanto, foram mostradas somente as que apresentaram os resultados mais críticos. Além disso, para a água da chuva também não foi preciso incluir seus aspectos qualitativos.

Tabela 4.8 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase agrícola, separados pelos principais processos produtivos.

	<b>Calcário (1 kg)</b>	<b>Ureia (1 kg N)</b>		<b>SSP (1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>			
	Insumos	Ureia e amônia	Outros insumos	SSP e ácido sulfúrico	Rocha fosfática	Enxofre	Outros insumos
<b>Entradas</b>							
Água da chuva (l)							
Água superficial (l)	0,034	1,353	18,7	85,4		1,687	62,22
Água subterrânea (l)	0,012		0,748		3,8		2,37
<b>Saídas</b>							
Efluente (l)	0,036	0,947	15,56	64,05	2,356	1,35	51,67
<b>Defensivos agrícolas (1 kg produto)</b>							
	Roundup Original	Spider 840 WG	Standak Top	Opera	Certero	Talcord 250	Pivot
<b>Entradas</b>							
Água da chuva (l)							
Água superficial (l)	294,79	523,93	351,9	98,6	332,5	170,61	86,5
Água subterrânea (l)	8,07	6,22	6,45	1,39	4,03	2,17	0,96
<b>Saídas</b>							
Efluente (l)	212	371,11	250,84	70	235,57	120,95	61,22
	<b>KCl (1 kg K<sub>2</sub>O)</b>		<b>Sementes (1 kg)</b>		<b>Óleo diesel (1 kg)</b>		
	Extração KCl	Insumos					
<b>Entradas</b>							
Água da chuva (l)					1649		
Água superficial (l)	16,5		6,39				1,22
Água subterrânea (l)			0,18				
<b>Saídas</b>							
Efluente (l)	10,2		5,26		51,4		1,13

Tabela 4.9 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, na produção dos insumos da cadeia produtiva do calcário dolomítico.

<b>Parâmetros (mg/l)</b>	<b>Insumos</b>		
	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
Fósforo	0,05	0,05	0,297
Cloreto	300	125	832,3
Sólidos Suspensos Totais	12,5	-	119
Nitrato	15	15	18,7
Sulfato	250	250	328
Manganês	0,1	0,1	0,121

Tabela 4.10 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva da ureia, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Ureia e amônia		Outros insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
Amônia	0,55	384,4	0,55	0,075	0,112
Fósforo	0,05	-	0,05	0,05	7,6
DBO	2,5	-	2,5	2,5	220,6
Ferro	2,5	-	2,5	2,5	14,03
Cromo	0,025	-	0,075	0,025	0,084
Sulfato	250	-	250	250	267

Tabela 4.11 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do SSP, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	SSP e ácido sulfúrico		Rocha fosfática		Enxofre		Outros insumos		
	AS	Efluente	AG	Efluente	AS	Efluente	AS	AG	Efluente
DBO	7	-	0,56	107	2,5	0,17	2,5	2,5	66,1
Fósforo	0,079	22,5	0,017	14,4	0,05	0,026	0,05	0,05	5,3
Amônia	0,3	-	0,07	-	0,075	0,2075	0,075	0,025	0,3
Cádmio	0,0007	0,068	0,0001	-	0,0165	0,015	0,0165	0	0,001
Chumbo	0,008	0,297	0,0002	-	0,055	0,02	0,055	0	0,011
Sulfato	9,67	10,52	10,9	475,4	250	-	250	250	225,8

Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea.

Tabela 4.12 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do KCl, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Extração do KCl		Insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	2,5	-	2,5	2,5	53,9
Cloreto	125	12316	300	125	12446
Sódio	100	7194	205	100	9510
Enxofre	2,5	12,22	2,5	2,5	-
Sulfato	250	-	250	250	1282
Fósforo	0,05	-	0,05	0,05	0,74

Tabela 4.13 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do óleo diesel.

Parâmetros (mg/l)	Óleo diesel	
	Água Superficial	Efluente
Sólidos Suspensos Totais	12,5	361
Cloreto	300	5472
Benzeno	0,055	0,386
Arsênico	0,055	0,121
Cádmio	0,0165	0,062
HPA*	0,0038	0,017

\* Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

Tabela 4.14 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos nas cadeias produtivas dos defensivos agrícolas.

Parâmetros (mg/l)	Roundup Original			Spider 840 WG			Standak Top			Opera		
	AS	AG	E	AS	AG	E	AS	AG	E	AS	AG	E
Amônia	0,5	0,01	4,96	0,3	0,03	33,4	0,5	0,01	53,6	0,5	0,01	91,3
DBO	3,25	1,74	54,4	4	2,4	104,4	3	1,74	119,2	3	1,74	149
Fluoreto	0,35	0,21	0,22	0,47	0,18	5,74	0,28	0,21	13	0,28	0,21	6,38
Ferro	0,62	0,07	6,04	0,57	1,5	5,52	4,17	0,07	7	4,17	0,07	5,92
Fósforo	0,037	0,02	18,3	0,041	0,018	1,61	0,034	0,02	11,7	0,034	0,02	7,33
Cloreto	3,76	1,2	2270	1,33	1,2	2214	1,27	1,2	1474	1,27	1,2	2024

Parâmetros (mg/l)	Certo			Talcord 250			Pivot		
	AS	AG	E	AS	AG	E	AS	AG	E
Amônia	1,3	0,03	36,7	0,5	0,01	5,55	0,5	0,01	6,03
DBO	7	2,4	157	3	1,74	56,9	3	1,74	44,56
Fluoreto	0,67	0,18	19,7	0,28	0,21	8,11	0,28	0,21	0,18
Ferro	2,3	1,5	5,66	4,17	0,07	5,2	4,17	0,07	5,45
Fósforo	0,73	0,018	1,65	0,034	0,02	1,81	0,034	0,02	1,58
Cloreto	5,89	1,2	2002	1,27	1,2	300	1,27	1,2	2081

Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea; E – efluente.

Depois da produção de insumos, foram obtidos dados relacionados ao uso da água no cultivo da soja, onde não há irrigação e, portanto, a única fonte é a água da chuva. Desse modo, os únicos procedimentos realizados para a estimativa do volume de entrada, de saída e de consumo pela cultura foram aqueles descritos no subitem 4.1.5.1 *Água Verde*.

De forma resumida, para definir as características do cultivo de soja, a ser simulado no software CROPWAT v.8.0, primeiramente foi determinado o período em que ocorre o ciclo produtivo da soja. Esse dado foi obtido através do cruzamento das informações fornecidas pelos produtores rurais (data de plantio e principais cultivares utilizadas) com as indicações

técnicas consultadas (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2009). Com isso, foram estabelecidos os seguintes valores: duração do ciclo da soja de 130 dias (ciclo semiprecoce – médio), iniciando em 15 de novembro (semeadura) e com término em 25 de março (fim da colheita); duração dos estágios de desenvolvimento com 20 dias na fase inicial (plantio até 10% de cobertura do solo), 40 dias na fase de desenvolvimento (de 10% a 100% de cobertura do solo), 40 dias na fase média (da cobertura completa até o início da maturidade) e 30 dias na fase final (início da maturidade até o fim da colheita).

Ainda dentro das características da cultura, os valores dos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para os estágios de desenvolvimento da soja foram obtidos do trabalho de Martorano (2007), uma vez que, neste estudo, os valores de  $K_c$  foram determinados experimentalmente no Rio Grande do Sul, em um padrão de clima (subtropical do tipo Cfa - Köppen) e solo semelhantes aos encontrados em Santa Rosa – RS, e para o mesmo sistema de manejo considerado no ciclo de vida estudado (plantio direto). Dessa forma, foram utilizados os seguintes valores de  $K_c$ : 0,49 (fase inicial), 1,16 (fase média) e 0,69 (fase final). Além disso, os resultados deste mesmo trabalho também foram empregados para a profundidade efetiva das raízes, sendo 0,15 metros no período de emergência e 0,60 metros para o valor máximo. Por fim, o último dado sobre o cultivo da soja inserido no software foi o fator de depleção ( $p$ ), obtido na publicação de Allen *et al.* (1998), onde os valores para as fases inicial, média e final são de 0,5, 0,6 e 0,9, respectivamente.

Com relação aos dados climáticos, que incluem a precipitação, a temperatura máxima e mínima, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a duração relativa da radiação solar, todos foram obtidos junto ao banco de dados do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA), administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estes dados foram coletados diariamente por uma estação agrometeorológica localizada em São Borja – RS, abrangendo o período de cultivo (novembro a março), nos anos de 2000 a 2011 (INPE, 2012). Ainda cabe ser salientado que, dentre as estações e dados disponíveis, selecionou-se esta estação, pois é a que está localizada em uma região com um padrão climático semelhante ao do município de Santa Rosa – RS (EMBRAPA, 2012) e, também, por ser a mais próxima ao mesmo município. Os valores médios destes dados podem ser visualizados no APÊNDICE B.

Para a caracterização do solo, primeiramente, foram coletadas informações sobre o tipo de solo predominante na região de estudo. Com base no levantamento realizado por Engeplus (2011) na região da bacia hidrográfica dos rios Turvo-Santa Rosa-Santo Cristo, foi possível identificar que o solo predominante é classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (Sistema Brasileiro de Classificação de Solos), o qual é caracterizado por

possuir alto teor de argila (acima de 60%). A partir disso, a capacidade de água disponível (CAD) e a taxa de infiltração máxima foram obtidas através de pesquisa na literatura especializada. Para a CAD, foi adotado o valor de 155 mm/m, baseando-se nos trabalhos de Genro Junior *et al.* (2009), Marcolin (2009) e Serafim *et al.* (2008), os quais determinaram experimentalmente este parâmetro, para o mesmo tipo de solo, com cultivos variados em sistema de plantio direto e obtiveram variações de 130 mm/m à 180 mm/m. Quanto à taxa de infiltração máxima, utilizou-se o valor de 84 mm/dia, que é a média da variação apresentada em Gomes (1997) para solos argilosos.

Após a inserção de todos os dados no software CROPWAT v.8.0, foi realizada a simulação do balanço hídrico diário do solo, considerando que o conteúdo de água inicialmente presente no solo é de 50% da CAD, ou seja, 77,5 mm/m. Os resultados finais, produzidos para todo o período de cultivo em um hectare de área, são mostrados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Valores volumétricos resultantes da simulação do balanço hídrico do solo, para o cultivo de um hectare de soja, em Santa Rosa – RS, no período de 15 de novembro a 25 de março, com dados climáticos de 2000 a 2011.

<b>Componente</b>	<b>Valor (mm)</b>
Conteúdo inicial de água no solo	77,5
Precipitação total	522
Entrada total de água	599,5
Evapotranspiração da cultura	535,8
Perdas totais (percolação profunda e escoamento superficial)	16,7
Saída total de água	552,5
Conteúdo final de água no solo	47

A partir destes resultados, foi possível obter os volumes de consumo e de saída de água do processo de cultivo da soja por quilograma de grão produzido. Para tanto, foi considerada a produtividade média de 1707 kg/ha, referente às safras de 2000 a 2011, da região de Santa Rosa – RS (EMATER/RS, 2011). Com isso, foram encontrados os valores de 3139 litros de água consumida e 97,83 litros de água que sai do sistema.

Para estimar as emissões de poluentes aos corpos hídricos, derivados do uso de diferentes insumos agrícolas, foi estabelecida, para cada substância, uma fração de perda por lixiviação e escoamento relacionada à massa total aplicada. O valor destas frações foi determinado com base em revisão bibliográfica, onde foram pesquisados estudos tanto da área

de análise do ciclo de vida como outros específicos para a quantificação da poluição causada pela agricultura.

No caso do nitrogênio, a maior parte dos estudos de ACV tem adotado o valor de 30% de perda deste nutriente na forma de nitrato, como, por exemplo, a base de dados do Ecoinvent (NEMECEK e KÄGI, 2007), Sallaberry (2009), Rocha (2011), Emmenegger *et al.* (2011), entre outros, os quais se basearam, principalmente, nas estimativas do IPCC (1996). Outra grande parcela adota o modelo GREET (WANG, 1999), o qual, através de diversas medidas experimentais, chegou ao valor de 24%. Quanto aos estudos que realizaram medições diretas, foi encontrada uma grande variação de resultados, que vão de 1,5 a 35,9% (FERNANDEZ e LIBARDI, 2009; KLADIVKO *et al.*, 2009; RANDALL e VETSCH, 2005; SANTOS *et al.*, 2009). Estes resultados estão de acordo com o estudo de Powers (2007), o qual analisou dados de duas décadas de perdas de nutrientes na agricultura e comparou com outros trabalhos de campo, encontrando uma variabilidade de 10 a 80% para o nitrogênio, devido, principalmente, à quantidade de precipitação de cada período. No entanto, neste mesmo estudo, a média resultante foi de 31,6% e, por esse motivo, o autor chega à conclusão de que fatores em torno deste valor fornecem ótimas estimativas médias para grandes períodos. Diante disso, neste estudo será adotado o valor de 30% de perdas para o nitrogênio, seguindo a tendência da maior parte dos trabalhos consultados.

Para as perdas de fósforo, muitos estudos de ACV tem adotado o valor de 2,9%, com base nas estimativas de Dalgaard *et al.* (2006). No banco de dados do Ecoinvent, também se chega a um valor próximo de 3%, seguindo um modelo adaptado às condições suíças (NEMECEK e KÄGI, 2007). Quanto aos estudos com medições de campo, de forma geral é encontrada uma variabilidade de 0 a 12%, com média de 3,5%, sendo também muito dependente do volume de precipitação no período avaliado (BASSO, 2003; POWERS, 2007; SELIM *et al.*, 2000; SHARPLEY e HOLVORSON, 1994). Dessa forma, neste estudo foi utilizada a fração de 3,5% de perdas de fósforo, pois é um valor que está próximo dos resultados encontrados pela maioria dos trabalhos analisados e, ao mesmo tempo, não é muito diferente dos valores utilizados pela maioria dos estudos da área de ACV.

Com relação aos defensivos agrícolas, somente foram considerados o glifosato e a permetrina, uma vez que, dos ingredientes ativos incluídos neste estudo, estes são os únicos que possuem limites padronizados de concentração em normas que regram a qualidade da água dos corpos hídricos, como por exemplo, na Resolução CONAMA n.º 357/2005 e na compilação realizada por Boulay *et al.* (2011a). Em pesquisa à literatura, não foram encontradas frações de perda para estas substâncias em estudos da área de ACV, entretanto, em trabalhos mais específicos sobre poluição agrícola, foram encontrados os seguintes valores

que serão utilizados neste estudo: 0,07% para o glifosato (SHIPITALO *et al.*, 2008) e 0,11% para a permetrina (OROS e WERNER, 2005).

Depois de obter estas frações, foi possível calcular a concentração da água que infiltra e escoar da plantação de soja para os corpos hídricos, utilizando o volume de perda (infiltração e escoamento), resultante da simulação previamente descrita. Os resultados são mostrados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Concentração dos parâmetros qualitativos do fluxo de saída de água da etapa de cultivo da soja.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores (mg/l)</b>
Fósforo total	4,12
Nitrato	8,08
Glifosato	0,0035
Permetrina	0,0002

Para propiciar um melhor embasamento sobre estes resultados, os valores das concentrações obtidas para estes poluentes podem ser comparados com os resultados de estudos que foram executados com o objetivo de determinar a perda de substâncias em cultivos agrícolas e que, para tanto, realizaram experimentos com medições diretas. Com relação ao fósforo, Bertol *et al.* (2010) realizaram diversos experimentos práticos em plantações com sistema de plantio direto, em solos do tipo Latossolo Vermelho, e obtiveram valores que variaram entre 2,09 a 5,31 mg/L de fósforo total no escoamento formado pela água da chuva. Para o nitrato, Randall e Vetsch (2005) também realizaram estudos similares com o cultivo de soja e milho, durante 6 anos, e as concentrações médias anuais resultantes variaram de 5 a 16 mg/L. Por fim, Shipitalo *et al.* (2008) pesquisaram a perda do glifosato em plantações de soja resistentes a esta substância, sob plantio direto, e verificaram a variabilidade de 0,00005 a 0,0092 mg/L na água de escoamento. Portanto, a partir destes resultados, nota-se que os valores produzidos na simulação da presente pesquisa (Tabela 4.16) estão dentro da faixa de variação encontrada na literatura especializada.

Ainda nesta etapa do estudo, também foram determinadas as quantidades de insumos e produtos que são necessários para o cultivo da soja. As quantidades aplicadas de calcário, fertilizantes (fósforo e potássio) e defensivos, foram determinadas com base nas doses fornecidas pelas indicações técnicas específicas para o Rio Grande do Sul (REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 2009). Para o caso do calcário, foi considerada a quantidade média de corretivo necessária para elevar o pH do solo em água à 6,0, no sistema

plantio direto, levando em conta o intervalo de três anos para a próxima aplicação e o cultivo de duas culturas por ano. Com relação à aplicação de fósforo e potássio, foi selecionada a quantidade referente a um rendimento de 2.000 kg/ha, para um solo com teor médio destes nutrientes, considerando que uma nova adubação só é necessária depois de dois cultivos. Depois disso, a quantidade de nitrogênio aplicada foi calculada através da proporção do composto NPK (2:20:20), utilizada pelos produtores rurais, os quais também indicaram a quantidade de sementes utilizadas por hectare de plantação. Dessa forma, os valores utilizados por hectare foram: 600 kg de calcário, 4,5 kg de nitrogênio, 45 kg de fósforo e potássio, 50 kg de sementes, 2,33 kg de Roundup Original, 0,036 kg de Spider 840 WG, 0,12 kg de Standak Top, 1,06 kg de Opera, 0,033 kg de Certero, 0,102 kg de Talcord 250 e 1,04 kg de Pivot.

Quanto ao consumo de óleo diesel, foram utilizados os valores encontrados no estudo de Mello *et al.* (2005), onde foi estimado o consumo que ocorre em cada operação de uma plantação de soja. A Tabela 4.17 mostra estas quantidades por etapa de cultivo, com a unidade convertida de litros para quilograma, de acordo com a densidade média de 0,84 kg/l (PETROBRAS, 2011).

Tabela 4.17 – Consumo de óleo diesel, por operação, no cultivo da soja.

<b>Etapa do cultivo</b>	<b>Operação</b>	<b>Óleo diesel (kg/ha)</b>
Preparo do solo	Calagem (distribuição)	0,65
	Dessecação (pulverização)	0,49
Plantio da soja	Semeadura / Fertilização	7,28
	Pulverização herbicida	0,49
Trato da cultura	Pulverização pesticidas (4x)	1,95
Colheita dos grãos	Colheita	24,36

Fonte: adaptado de MELLO *et al.* (2005).

Como a maior parte dos dados são fornecidos por área de cultivo, também foi preciso relacioná-los à quantidade de hectares utilizados para produzir 1 kg de grãos de soja. Isto foi realizado utilizando a produtividade da região, já anteriormente definida como 1707 kg/ha, o que resultou na área de 0,000586 hectares.

Além disso, o consumo de óleo diesel também foi contabilizado nas operações de transporte dos insumos e produtos até a região de cultivo da soja. Para tanto, utilizou-se como padrão de consumo o valor de 0,01024 kg/ton.km para o transporte rodoviário e de 0,0025 kg/ton.km para o transporte marítimo, com base nos dados do Ecoinvent v.2.2 (“*operation, lorry 20-28t, fleet average*” e “*operation, transoceanic freight ship*”), onde é considerado o

consumo médio de um caminhão com capacidade de carga de 20 a 28 toneladas e um navio de carga transoceânico, respectivamente. Quanto à extensão percorrida, foram utilizadas as distâncias médias entre os locais previamente identificados na definição do sistema de produto. Para maiores detalhes, deve ser consultado o APÊNDICE C.

Os resultados dos fluxos de massa para o subsistema da fase agrícola, obtidos a partir destas informações, podem ser vistos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase agrícola.

<b>Materiais</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Entradas		
Calcário dolomítico	kg	3,51E-01
Nitrogênio	kg	2,64E-03
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg	2,64E-02
Potássio (K <sub>2</sub> O)	kg	2,63E-02
Semente	kg	2,93E-02
Óleo diesel	kg	3,56E-02
Roundup original	kg	1,36E-03
Spider 840 WG	kg	2,11E-05
Standak top	kg	7,03E-05
Opera	kg	6,21E-04
Certero	kg	1,93E-05
Talcord 250	kg	5,97E-05
Pivot	kg	6,09E-04
Saídas		
Grãos de soja	kg	1,000E+00

#### 4.2.2 Subsistema da produção do óleo degomado

Neste subsistema, os resultados obtidos serão apresentados com o mesmo padrão da fase agrícola; ou seja, primeiro será mostrado os aspectos relativos aos fluxos de água na produção dos insumos e, depois, na própria fabricação do óleo degomado, finalizando com os fluxos de massa.

De forma geral, os procedimentos de obtenção das características quantitativas e qualitativas dos fluxos de água dos processos de produção dos insumos também foram os mesmos da fase agrícola. Por esse motivo, as informações relacionadas ao óleo diesel, que é um insumo comum a ambos os subsistemas, tem os mesmos valores mencionados

anteriormente e, portanto, não serão mostrados nesta seção. A Tabela 4.19 mostra a fonte dos dados e os coeficientes de retorno utilizados.

Tabela 4.19 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase de produção do óleo degomado, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados.

Insumos	Processos internos de produção	Fonte dos fluxos de materiais, volume de água extraída, volume e qualidade do efluente	CR <sup>(a)</sup>	Fonte da qualidade da água extraída / Local de referência
Hexano	Hexano	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b)</sup>	0,71	FEPAM (2012a) / Rio Caí
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Lenha	-	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b) (c)</sup> e Literatura específica <sup>(d)</sup>	0,8 <sup>(e)</sup>	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Energia Elétrica	-	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b)</sup>	0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil

(a) Fonte: SILVA, 2011; (b) Fonte: ECOINVENT CENTRE (2010); (c) Fonte utilizada para todos os dados, com exceção da água da chuva consumida no cultivo florestal; (d) Fonte: BRACELPA (2009) e RIO GRANDE DO SUL (2010), utilizada para a estimativa do consumo de água da chuva no cultivo florestal; (e) Este coeficiente de retorno não foi utilizado para o fluxo de água da chuva.

Com relação às características das fontes dos dados, algumas observações foram realizadas:

- Hexano: não foram encontrados dados sobre a produção brasileira; por esse motivo, utilizou-se a base de dados da Europa (“*hexane, at plant, RER*”). No entanto, a base do processo produtivo é a mesma, ou seja, processamento da nafta, obtida no refino do petróleo, por separação molecular.
- Lenha: na estimativa do fluxo de água da chuva, utilizou-se dados específicos para as condições do estado do Rio Grande do Sul, que é a região de produção definida neste estudo. Para o restante dos fluxos, foi utilizada uma base de dados genérica da Europa (“*logs, mixed, at forest, RER*”), que considera apenas as atividades básicas realizadas no cultivo florestal, como o corte, a manutenção, entre outros.
- Energia elétrica: os dados fornecidos pela base de dados “*electricity, medium voltage, production BR, at grid*” são específicos para a geração e distribuição de energia nas condições brasileiras.

Diante disso, os resultados relacionados aos volumes de entrada e saída de água da produção de insumos são mostrados na Tabela 4.20 e as concentrações das emissões de

poluentes são mostradas nas Tabelas 4.21 e 4.22. Ainda cabe salientar que a estimativa do consumo de água da chuva na produção de lenha foi realizada conforme descrito na seção “4.1.5.1 Água Verde”, utilizando a produtividade de 35 m<sup>3</sup>/ha.ano (BRACELPA, 2009) e a evapotranspiração de 1125 mm/ano (RIO GRANDE DO SUL, 2010).

Tabela 4.20 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase de produção do óleo degomado, separados pelos principais processos produtivos.

	Hexano (1 kg)		Lenha (1 m <sup>3</sup> )	Energia elétrica (1 kWh)
	Hexano	Insumos		
<b>Entradas</b>				
Água da chuva (l)			321428	
Água superficial (l)	25,9	14,58	19,36	1,14
Água subterrânea (l)		0,35	0,47	
<b>Saídas</b>				
Efluente (l)	20,7	11,95	15,87	0,93

Tabela 4.21 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do hexano, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Hexano		Insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	1,6	941,06	2,5	2,5	1113
Benzeno	0	-	0,05	0	0,27
Fósforo	0,014	-	0,05	0,05	3,33
Bário	-	-	0,35	0,35	1,78
Ferro	0,45	-	2,5	2,5	7,56
Sódio	104	-	205	100	1238

Tabela 4.22 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva da energia elétrica e na produção dos insumos da cadeia produtiva da lenha (biomassa).

Parâmetros (mg/l)	Energia elétrica		Lenha (insumos)		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	2,5	57,33	2,5	2,5	248,3
Fósforo	0,05	9,8	0,05	0,05	2,83
Cloreto	300	360,7	300	125	593

As características dos fluxos de água, relacionados diretamente com o processo de extração e degomagem do óleo de soja, foram determinadas com base em dados declarados pelas próprias empresas, em seus processos administrativos de licenciamento ambiental, que

estão disponíveis para consulta pública na Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS (FEPAM). Nestas pesquisas, realizadas nos meses de janeiro e fevereiro de 2012, além de serem obtidos dados da fábrica localizada em Santa Rosa - RS (empresa definida no sistema de produto) (FEPAM, 2007), também foram coletados dados de outra empresa situada em Cachoeira do Sul – RS (FEPAM, 2011). Este procedimento foi realizado com o objetivo de aumentar a abrangência do estudo e de possibilitar a realização de comparações, uma vez que foi previamente identificado que estas indústrias se diferenciam nos aspectos relacionados aos efluentes, pois, enquanto a última trata e lança seus efluentes no curso d'água, a primeira possui um sistema de recirculação total, onde evapora todo o efluente gerado e reaproveita o vapor no próprio processo industrial. Para facilitar a identificação destas empresas ao longo do trabalho, estas serão denominadas como “Empresa com recirculação” para a de Santa Rosa – RS e “Empresa sem recirculação” para a de Cachoeira do Sul – RS.

A partir das informações coletadas, foi possível identificar que os principais processos em que ocorre uso da água são: produção de vapor nas caldeiras, para posterior utilização no condicionamento dos grãos descascados, no cozimento dos grãos triturados, no processamento do farelo e na recuperação do óleo após extração; processo de degomagem, onde se adiciona água ao óleo bruto para a remoção da “goma”; sistema de resfriamento dos processos; e lavagem de pisos e equipamentos. Além disso, conforme mostra a Figura 4.7, também foi possível produzir um fluxograma simplificado do uso da água na fabricação do óleo degomado, considerando as diferenças nas duas empresas pesquisadas.

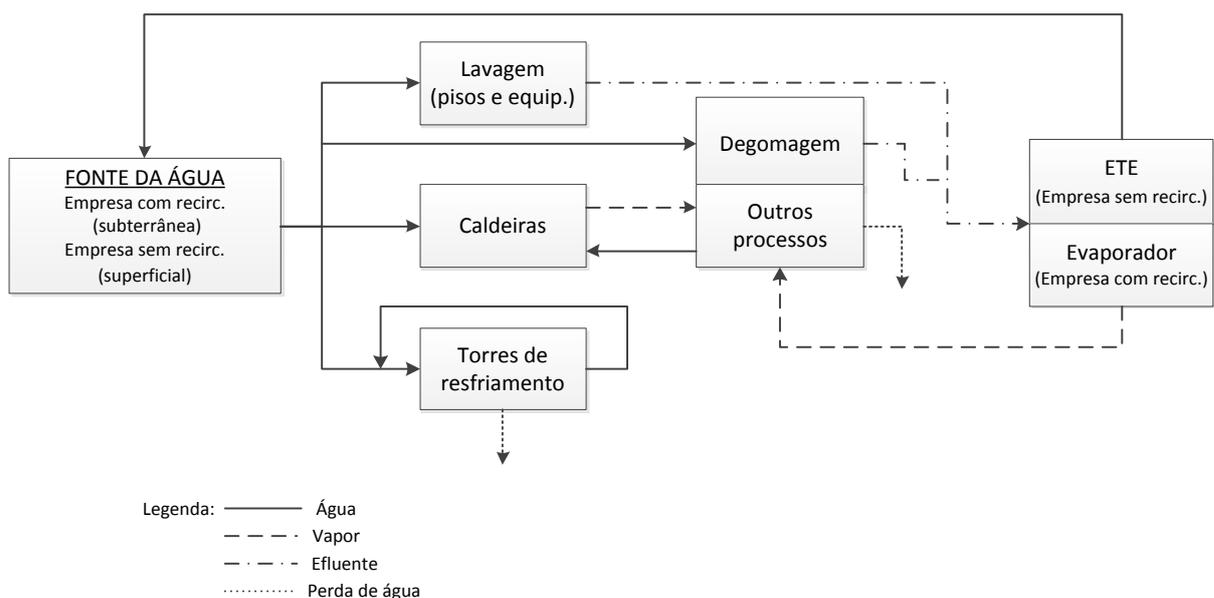


Figura 4.7 – Fluxograma simplificado do uso da água, no processo industrial de fabricação do óleo degomado.

O volume de entrada e saída de água de todo o processo produtivo foi obtido através do somatório dos fluxos dos processos unitários. Estes dados foram fornecidos em vazão diária e, por esse motivo, tiveram que ser relacionados com a produção diária das empresas, como mostra a Tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Valores quantitativos dos fluxos de água, por processo industrial, na etapa de produção do óleo degomado.

	<b>Empresa com recirculação (produtividade 214,67 ton/dia)</b>		<b>Empresa sem recirculação (produtividade 400 ton/dia)</b>	
	Vazão diária (m <sup>3</sup> /dia)	Resultado final (l/kg)	Vazão diária (m <sup>3</sup> /dia)	Resultado final (l/kg)
<b>Entradas</b>				
Caldeiras	192	0,89	624	1,56
Água de processo	45	0,21	264	0,66
Torres de resfriamento	384	1,79	480	1,20
Lavagens	2	0,009	0,6	0,0015
<i>Entrada total</i>	<i>623</i>	<i>2,9</i>	<i>1368,6</i>	<i>3,4</i>
<b>Saídas</b>				
Caldeira	-	-	20	0,05
Água de processo	-	-	50	0,125
Lavagens	-	-	0,6	0,0015
<i>Efluente total</i>	<i>zero</i>	<i>zero</i>	<i>70,6</i>	<i>0,176</i>

Com relação à qualidade dos fluxos de água, estes foram determinados de diferentes maneiras. Para a água utilizada pela Empresa sem recirculação, a qualidade foi obtida com dados do monitoramento, realizado nos últimos cinco anos pela FEPAM (FEPAM, 2012b), do rio Jacuí, que é o corpo hídrico de onde a água é captada. Quanto ao efluente desta mesma empresa, os dados de concentração das substâncias presentes foram obtidos através dos relatórios semestrais, que constavam no mesmo processo de licenciamento consultado (FEPAM, 2011). Para a água extraída pela Empresa com recirculação, foram utilizados os dados apresentados em COAMB (2005). Os resultados finais destas consultas, mostrando os principais parâmetros qualitativos, estão na Tabela 4.24, mais abaixo.

Os fluxos de materiais, envolvidos nesta fase do ciclo de vida, também foram determinados com base na mesma fonte de dados; entretanto, foi considerado apenas um valor para cada fluxo, formado pela média das duas empresas. Entre estes dados, também estão incluídas os valores das quantidades de subprodutos produzidos (cascas, farelo e lecitina de soja), que foram utilizados na estimativa da alocação das cargas ambientais. Quanto ao consumo de diesel para o transporte dos insumos, foram adotadas as mesmas suposições

realizadas na fase agrícola, considerando as distâncias entre os locais de produção dos materiais (maiores detalhes são mostrados no APÊNDICE C). Os valores resultantes para estes fluxos relacionados à produção de 1 kg de óleo degomado podem ser vistos na Tabela 4.25.

Tabela 4.24 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na etapa de produção do óleo degomado.

Parâmetros (mg/l)	Empresa sem recirc.		Empresa com recirc.
	Água Superficial	Efluente	Água Subterrânea
DBO	1,3	58,3	1,05
Óleos e graxas	-	5,5	-
Fósforo	0,23	1,6	0,067
Sólidos Suspensos Totais	88	38,7	11,6
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	-	45	59,6
Nitrogênio total	0,73	7,33	1,15

Tabela 4.25 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase de produção do óleo degomado.

Materiais	Unidade	Quantidade
Entradas		
Grãos de soja	kg	5,00E+00
Energia elétrica	kWh	4,31E-01
Biomassa (lenha)	m <sup>3</sup>	8,60E-04
Hexano	kg	1,44E-02
Óleo diesel	kg	9,68E-03
Saídas		
Óleo degomado	kg	1,00E+00
Farelo	kg	3,87E+00
Cascas	kg	1,10E-01
Lecitina de soja	kg	1,74E-02

#### 4.2.3 Subsistema da fase de fabricação do biodiesel

De forma geral, os procedimentos de caracterização dos fluxos de água deste subsistema seguiram o mesmo padrão de coleta de dados da fase de produção do óleo degomado. Isto significa que as informações utilizadas na produção de insumos comuns a ambos os subsistemas, como o óleo diesel, a lenha e a energia elétrica, são iguais e, portanto, não serão mostradas nesta seção.

A Tabela 4.26 mostra, de forma resumida, a origem dos dados da cadeia produtiva de cada insumo, os coeficientes de retorno utilizados quando a fonte não disponibiliza o volume de efluentes gerados e a fonte utilizada para determinar a qualidade da água extraída.

Tabela 4.26 – Fontes dos dados utilizados no ciclo de vida dos insumos envolvidos na fase de fabricação do biodiesel, relacionados aos fluxos de materiais e de água, com os valores dos coeficientes de retorno (CR) utilizados.

Insumos	Processos internos de produção	Fonte dos fluxos de materiais, volume de água extraída, volume e qualidade do efluente	CR <sup>(a)</sup>	Fonte da qualidade da água extraída / Local de referência
Metanol	-	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b)</sup>	0,71	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Chile
Metilato de sódio	Metilato de sódio	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b)</sup>	0,7	CETESB (2012) / Pirapozinho – SP
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Hidróxido de sódio	Hidróxido de sódio	GaBi Software v.4 <sup>(c)</sup>	0,74	CETESB (2012) / Cubatão – SP
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Ácido clorídrico	Ácido clorídrico	GaBi Software v.4 <sup>(c)</sup>	0,74	CETESB (2012) / Cubatão – SP
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil
Ácido fosfórico	Ácido fosfórico	Ecoinvent v.2.2 <sup>(b)</sup>	0,74	CETESB (2006) / Aquífero São Paulo
	Insumos		0,8	Boulay <i>et al.</i> (2011a) / Brasil

(a) Fonte: SILVA, 2011; (b) Fonte: ECOINVENT CENTRE, 2010; (c) Fonte: PE INTERNATIONAL, 2011.

Após a seleção desta base de dados, alguns aspectos devem ser destacados, de modo a relacionar as características do ciclo de vida estudado com as fontes dos dados:

- Metanol: utilizou-se o inventário com dados globais (“*methanol, at plant, GLO*”), pois foi identificado que este produto é importado do Chile, o qual é um dos maiores produtores mundiais.
- Metilato de sódio: não foram encontradas informações específicas do Brasil e, por esse motivo, foi selecionada a base de dados global (“*sodium methoxide, at plant, GLO*”), que considera o processo mais utilizado no mundo, realizado a partir da reação entre o metanol e o sódio metálico.
- Hidróxido de sódio: na falta de dados específicos do Brasil, utilizou-se a base de dados “*sodium hydroxide, from chlorine-alkali electrolysis, diaphragm,*

100%, DE”, que considera o processo de produção por diafragma, a qual, segundo Fernandes *et al.* (2009), é a tecnologia mais empregada pela indústria de soda-cloro brasileira.

- **Ácido clorídrico:** selecionou-se o inventário que considera o processo produtivo baseado na reação entre o cloro e o hidrogênio (“*hydrochloric acid 32%, reaction of hydrogen with chlorine, DE*”), que é o processo mais utilizado pela indústria brasileira, segundo Fernandes *et al.* (2009).
- **Ácido fosfórico:** na ausência de dados específicos do Brasil, utilizou-se a base de dados da produção de ácido fosfórico, de nível industrial, da Europa (“*phosphoric acid, industrial grade, 85% in H2O, at plant, RER*”), a qual tem como processo produtivo a reação do ácido sulfúrico com a rocha fosfatada, por via úmida, que, por sua vez, é o processo mais empregado na indústria brasileira (SILVA e GIULIETTI, 2010).

A partir das informações fornecidas, foi possível obter os volumes de entrada e saída de água da produção de insumos, conforme Tabela 4.27, e as características qualitativas destes fluxos de água, que podem ser vistas nas Tabelas 4.28 a 4.32.

Tabela 4.27 – Valores quantitativos dos fluxos de água, para a produção unitária dos insumos envolvidos no subsistema da fase de fabricação do biodiesel, separados pelos principais processos produtivos.

	Metanol (1 kg)	Metilato de sódio (1 kg)		Hidróxido de sódio (1 kg)	
		Metilato de sódio	Insumos	Hidróxido de sódio	Insumos
<b>Entradas</b>					
Água da chuva (l)					
Água superficial (l)	11,59	144,8	123,3	135,1	51,6
Água subterrânea (l)	0,5		5,8		1,7
<b>Saídas</b>					
Efluente (l)	8,58	101,4	103,3	100	42,7
		Ácido clorídrico (1 kg)		Ácido fosfórico (1 kg)	
		Ácido clorídrico	Insumos	Ácido fosfórico	Insumos
<b>Entradas</b>					
Água da chuva (l)					
Água superficial (l)	68		52,7		126,5
Água subterrânea (l)			1,8	28,4	7,2
<b>Saídas</b>					
Efluente (l)	50,3		43,8	21	107

Tabela 4.28 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do metanol.

Parâmetros (mg/l)	Metanol		
	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	12,5	2,5	27,4
Ferro	2,5	2,5	4,46
Fósforo	0,05	0,05	1,74
Cromo	0,075	0	0,025
Arsênico	0,055	0,005	0,009
Benzeno	0,055	0	0,004

Tabela 4.29 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do metilato de sódio, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Metilato de sódio		Insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	6	342,6	2,5	2,5	17,9
Boro	0,37	5,4	1,75	0,25	0,16
Bromato	-	1,02	0,055	0,005	-
Fósforo	0,062	-	0,05	0,05	4,42
Ferro	2,84	-	2,5	2,5	20,8
Sódio	3,84	183,4	100	205	30,7

Tabela 4.30 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do hidróxido de sódio, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Hidróxido de sódio		Insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	7	-	2,5	2,5	11,9
Fósforo	0,079	-	0,05	0,05	3,52
Ferro	0,315	-	2,5	2,5	15,7
Bromato	-	1,27	0,055	0,005	-
Cromo	0,001	-	0,05	0	0,02
Cloreto	187,7	69,4	300	125	153

Tabela 4.31 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do ácido clorídrico, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Ácido clorídrico		Insumos		
	Água Superficial	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	7	-	2,5	2,5	10,7
Fósforo	0,079	-	0,05	0,05	2,54
Ferro	0,315	-	2,5	2,5	15,7
Bromato	-	1,27	0,055	0,005	-
Cromo	0,001	-	0,05	0	0,02
Cloreto	187,7	69,4	300	125	152,9

Tabela 4.32 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na cadeia produtiva do ácido fosfórico, com valores específicos para os principais processos produtivos.

Parâmetros (mg/l)	Ácido fosfórico		Insumos		
	Água Subterrânea	Efluente	Água Superficial	Água Subterrânea	Efluente
DBO	-	-	2,5	2,5	24,1
Sulfato	10	6,35	250	250	2794
Fluoreto	0,47	66,5	0,5	0,5	8,97
Cromo	0,002	-	0,055	0	0,317
Arsênico	0,002	-	0,055	0,005	0,177
Fósforo	0,035	0,057	0,05	0,05	0,89

Do mesmo modo como ocorreu no processo de produção do óleo degomado, as características dos fluxos de água, envolvidos diretamente na fabricação do biodiesel, também foram determinadas com dados obtidos em consulta aos processos de licenciamento ambiental das referidas empresas. Os processos consultados, em janeiro e fevereiro de 2012, na FEPAM, foram os que se referem à usina da empresa localizada em Ijuí – RS (FEPAM, 2010) e à mesma planta industrial da empresa localizada em Cachoeira do Sul – RS, porém de forma específica para a atividade de fabricação de biodiesel (FEPAM, 2009). Assim como na fase anterior, a principal diferença relacionada ao uso da água entre estas empresas é o método de tratamento do efluente gerado, uma vez que, na unidade industrial de Ijuí - RS da primeira empresa, também foi implementado o mesmo sistema de reaproveitamento total do efluente na forma de vapor, enquanto que a outra lança seus efluentes no curso d'água depois de realizar o tratamento. Por esse motivo, a identificação destas empresas, para esta fase do ciclo de vida, será realizada da mesma forma que na produção do óleo degomado, ou seja, será

denominado “Empresa com recirculação” para a de Ijuí – RS e “Empresa sem recirculação” para a de Cachoeira do Sul – RS.

De acordo com as informações obtidas, a água é utilizada de diversas formas dentro da usina de biodiesel, sendo que as principais são: resfriamento de equipamentos e processos; geração de vapor nas caldeiras, para uso posterior em procedimentos de secagem e aquecimento em quase todas as etapas; remoção de impurezas do óleo após ser submetido à reação de neutralização; purificação do biodiesel depois da reação de transesterificação; e lavagem de pisos e equipamentos. A Figura 4.8 mostra o fluxograma simplificado do fluxo de água dentro da usina de biodiesel, produzido a partir dos dados coletados.

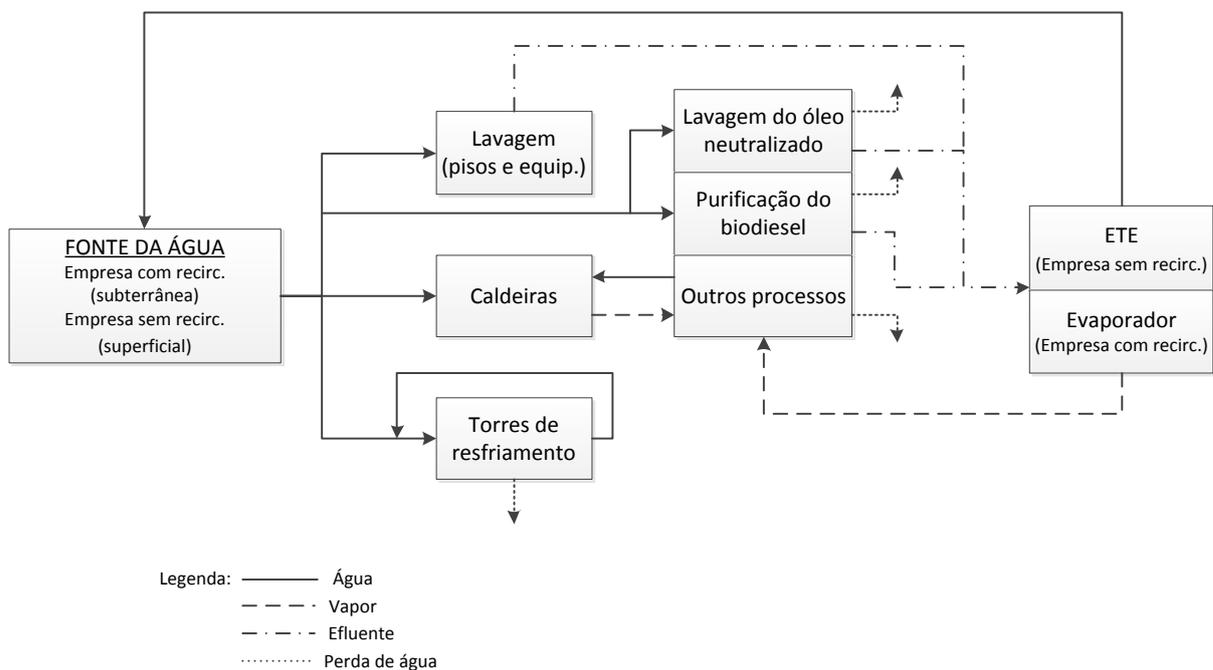


Figura 4.8 – Fluxograma simplificado do uso da água, no processo industrial de fabricação do biodiesel.

Através da obtenção dos volumes de entrada e saída de água de cada fluxo, foi possível determinar o total de água extraída e de efluente gerado no processo produtivo. Estes dados foram fornecidos em vazão diária e, por esse motivo, tiveram que ser relacionados com a quantidade de biodiesel produzido por dia pelas empresas, como mostra a Tabela 4.33, mais abaixo.

As características qualitativas destes fluxos de água foram determinadas com diferentes fontes de dados. Na Empresa sem recirculação, devido ao fato de que as atividades de fabricação do óleo degomado e do biodiesel estão localizadas na mesma planta industrial, o fluxo da água captada e do efluente gerado é o mesmo para ambos os processos e, portanto,

somente há distinção dos dados que se referem aos valores de volume. Dessa forma, a qualidade da água na fabricação do biodiesel foi determinada com os mesmos dados utilizados na fase anterior. Com relação à água utilizada pela Empresa com recirculação, sua qualidade foi obtida com as informações fornecidas pela própria empresa nos processos administrativos consultados (FEPAM, 2010). Os resultados finais dos principais parâmetros qualitativos dos fluxos de água são mostrados na Tabela 4.34.

Tabela 4.33 – Valores quantitativos dos fluxos de água, por processo industrial, na etapa de fabricação do biodiesel.

	Empresa com recirculação (produtividade 650 ton./dia)		Empresa sem recirculação (produtividade 821,3 ton./dia)	
	Vazão diária (m <sup>3</sup> /dia)	Resultado final (l/kg)	Vazão diária (m <sup>3</sup> /dia)	Resultado final (l/kg)
<b>Entradas</b>				
Caldeiras	64,8	0,01	192	0,234
Água de processo	65	0,1	141,57	0,172
Torres de resfriamento	117	0,18	192	0,234
Lavagens	0,48	0,00074	0,6	0,0015
<i>Entrada total</i>	<i>247,28</i>	<i>0,38</i>	<i>526,17</i>	<i>0,64</i>
<b>Saídas</b>				
Caldeira	-	-	20	0,024
Água de processo	-	-	75,83	0,092
Lavagens	-	-	0,6	0,0015
<i>Efluente total</i>	<i>zero</i>	<i>zero</i>	<i>96,43</i>	<i>0,118</i>

Tabela 4.34 – Concentração dos parâmetros qualitativos dos fluxos de água, envolvidos na etapa de fabricação do biodiesel.

Parâmetros (mg/l)	Empresa sem recirc.		Empresa com recirc.
	Água Superficial	Efluente	Água Subterrânea
DBO	1,3	58,3	-
Óleos e graxas	-	5,5	-
Fósforo	0,23	1,6	0,015
Sólidos Suspensos Totais	88	38,7	13,4
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	-	45	38,4
Nitrogênio total	0,73	7,33	1,72

O procedimento adotado para determinar as quantidades de insumos, matérias-primas e subprodutos (glicerina e ácidos graxos), envolvidos no processo produtivo do biodiesel, foi o mesmo da produção de óleo degomado, ou seja, utilizou-se a média das informações coletadas para as duas empresas. Do mesmo modo, também foram adotadas as mesmas

suposições realizadas na fase agrícola para estimar o consumo de óleo diesel nas operações de transporte destes materiais, levando em conta as respectivas distâncias dos locais de produção, como é mostrado em detalhes no APÊNDICE C. Os valores resultantes para estes fluxos, relacionados à produção de 1 litro de biodiesel, são mostrados na Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Resultados dos fluxos de massa do subsistema da fase de fabricação do biodiesel.

<b>Materiais</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Entradas		
Óleo degomado	kg	9,88E-01
Energia elétrica	kWh	4,10E-02
Biomassa (lenha)	m <sup>3</sup>	1,53E-04
Metanol	kg	1,40E-01
Metilato de sódio	kg	3,43E-03
Hidróxido de sódio	kg	2,03E-03
Ácido fosfórico	kg	2,21E-03
Ácido clorídrico	kg	3,06E-03
Óleo diesel	kg	6,76E-03
Saídas		
Biodiesel	L	1,00E+00
Glicerina loira (80%)	kg	1,48E-01
Ácidos graxos	kg	2,86E-02

#### 4.2.4 Inventário final de materiais

Para consolidar o inventário final dos materiais, primeiramente foi necessário relacionar os valores encontrados em cada subsistema com a unidade de referência do ciclo de vida, ou seja, a produção de 1 litro de biodiesel. Isso significa que todos os fluxos da fase agrícola foram transformados para a saída de 4,94 kg de grãos de soja e os da fase de produção do óleo degomado para a saída de 0,988 kg do produto.

Depois disso, também foi preciso alocar os valores encontrados, de acordo com a produção dos subprodutos identificados. Conforme critérios previamente estabelecidos, os fatores de alocação foram definidos considerando a massa produzida e o valor de mercado atual para cada produto. No entanto, devido à baixa representatividade (menos de 1%) dos valores resultantes para a casca, a lecitina de soja e os ácidos graxos, foram incluídos nos resultados finais apenas o farelo, como subproduto do óleo degomado, e a glicerina, como

subproduto do biodiesel. Diante disso, a Tabela 4.36 mostra os dados utilizados, a fonte de obtenção dos mesmos e os valores finais dos fatores de alocação empregados.

Tabela 4.36 – Dados e resultados relacionados aos procedimentos de alocação.

<b>Produto</b>	<b>Produção (kg)<sup>(a)</sup></b>	<b>Valor de mercado (R\$/kg)<sup>(b)</sup></b>	<b>Fator de alocação (%)</b>
<i>Subsistema da fase de produção do óleo degomado</i>			
Óleo degomado	1	2,404 <sup>(c)</sup>	52
Farelo de soja	3,87	0,572 <sup>(c)</sup>	48
<i>Subsistema da fase de fabricação do biodiesel</i>			
Biodiesel	1	2,231 <sup>(d)</sup>	96,7
Glicerina	0,169	0,443 <sup>(e)</sup>	3,3

(a) Fonte: FEPAM (2007, 2009, 2010, 2011); (b) Período jan./2011 a jan./2012; (c) Fonte: ABIOVE (2012); (d) Fonte: ANP (2012d); (e) Fonte: BRASIL (2012).

A partir destes resultados, pode-se concluir que 96,7% dos valores de cada fluxo do ciclo de vida analisado são destinados, exclusivamente, para a produção do biodiesel e, antes disso, 52% dos fluxos dos dois primeiros subsistemas são exclusivos para a fabricação do óleo degomado. Com isso, estas proporções foram aplicadas aos fluxos de cada subsistema, para que seja efetuada a devida alocação.

Após a realização destes procedimentos, foi possível estabelecer o inventário final dos materiais, que será utilizado como referência para a posterior estimativa da Pegada Hídrica e do ICV do uso da água. A Tabela 4.37 mostra os resultados finais, com e sem a aplicação dos fatores de alocação, para cada subsistema.

Tabela 4.37 – Inventário final dos fluxos de materiais, para cada subsistema do ciclo de vida do biodiesel de soja, com e sem a aplicação dos fatores de alocação. (continua)

<b>Materiais</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultados sem alocação</b>	<b>Resultados com alocação</b>
<i>Subsistema da Fase Agrícola</i>			
<i>Entradas</i>			
Calcário Dolomítico	kg	1,73E+00	8,70E-01
Nitrogênio	kg	1,30E-02	6,54E-03
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg	1,30E-01	6,54E-02
Potássio (K <sub>2</sub> O)	kg	1,30E-01	6,54E-02
Semente	kg	1,45E-01	7,29E-02
Óleo Diesel	kg	1,60E-01	8,06E-02
Roundup Original	kg	6,72E-03	3,38E-03
Spider 840 WG	kg	1,04E-04	5,23E-05
Standak Top	kg	3,47E-04	1,74E-04
Opera	kg	3,07E-03	1,54E-03

(continuação)

Certero	kg	9,53E-05	4,79E-05
Talcord 250	kg	2,95E-04	1,48E-04
Pivot	kg	3,01E-03	1,51E-03
<b>Saídas</b>			
Grãos de soja	kg	4,94E+00	2,48E+00
<b>Subsistema da Fase de Produção do Óleo Degomado</b>			
<b>Entradas</b>			
Grãos de soja	kg	4,94E+00	2,48E+00
Energia elétrica	kWh	4,26E-01	2,14E-01
Biomassa (lenha)	m <sup>3</sup>	8,50E-04	4,27E-04
Hexano	kg	1,42E-02	7,14E-03
Óleo diesel	kg	9,56E-03	4,81E-03
<b>Saídas</b>			
Óleo degomado	kg	9,88E-01	9,55E-01
Farelo	kg	3,82E+00	-
Cascas	kg	1,08E-01	-
Lecitina de soja	kg	1,72E-02	-
<b>Subsistema da Fase de Fabricação do Biodiesel</b>			
<b>Entradas</b>			
Óleo degomado	kg	9,88E-01	9,55E-01
Energia elétrica	kWh	4,10E-02	3,96E-02
Biomassa (lenha)	m <sup>3</sup>	1,53E-04	1,48E-04
Metanol	kg	1,40E-01	1,35E-01
Metilato de sódio	kg	3,43E-03	3,32E-03
Hidróxido de sódio	kg	2,03E-03	1,96E-03
Ácido fosfórico	kg	2,21E-03	2,14E-03
Ácido clorídrico	kg	3,06E-03	2,96E-03
Óleo diesel	kg	6,76E-03	6,54E-03
<b>Saídas</b>			
Biodiesel	L	1,00E+00	1,00E+00
Glicerina loira (80%)	kg	1,48E-01	-
Ácidos graxos	kg	2,86E-02	-

#### 4.3 PEGADA HÍDRICA

A Pegada Hídrica do biodiesel de soja foi calculada conforme procedimentos e características previamente estabelecidas nas definições gerais deste estudo. Além disso, praticamente todos os dados necessários para as estimativas dos componentes denominados Água Verde, Água Azul e Água Cinza foram determinados, anteriormente, no inventário de

materiais. Portanto, o presente subcapítulo destina-se somente a apresentar e discutir os resultados encontrados. Ainda cabe salientar que todos os valores resultantes são relacionados às quantidades de materiais utilizadas no ciclo de vida com o fator de alocação, conforme Tabela 4.37.

Na fase agrícola, a estimativa da Água Verde foi realizada para o cultivo da soja e para a produção de sementes, utilizando o volume de evapotranspiração da cultura simulado no software CROPWAT v.8.0. Para a Água Azul, que nesta fase só ocorreu na produção de insumos, foram somados os volumes de entrada de água superficial e subterrânea, e depois subtraídos pelo volume de efluente gerado. Na estimativa deste componente, também foi considerado que o efluente é lançado em corpo hídrico superficial e, portanto, o consumo de água subterrânea acaba sendo total.

Quanto à Água Cinza, os resultados deste componente foram determinados com base nos valores volumétricos de entrada de água e saída de efluente e nas concentrações de cada parâmetro presente nestes fluxos de água, mostrados nas tabelas anteriores. Nestes cálculos, também foram empregados os padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 357/2005, para águas doces de Classe I (CONAMA, 2005), como concentração máxima permitida de cada parâmetro analisado. Além disso, devido à inexistência de dados, foi assumida como zero a concentração natural do corpo hídrico receptor para todas as substâncias. Depois de se obter a Água Cinza de cada parâmetro, foi selecionado aquele que apresentou o maior valor como resultado definitivo de cada etapa. Diante disso, os resultados finais para a Pegada Hídrica da fase agrícola são mostrados na Tabela 4.38.

Através do somatório de cada fluxo, foi possível chegar ao valor de 19404,3 litros para a Pegada Hídrica da fase de cultivo da soja, sendo este total composto por 11496 litros de Água Cinza, 7905 litros de Água Verde e 3,3 litros de Água Azul. Entre as etapas deste subsistema, os valores obtidos para o processo de cultivo da soja foram amplamente maiores do que o restante, representando 91,6% do total, ou ainda, 87% da Água Cinza e 98,5% da Água Verde. Quanto aos insumos, estes contribuíram com 8,4% do total, dentre os quais a produção do fertilizante fosfatado foi a que obteve maior uso da água, com aproximadamente 10% (1140 litros) da Água Cinza e 71% (2,4 litros) da Água Azul. Por outro lado, alguns processos produtivos não apresentaram contribuição igual ou maior que 1% em nenhum componente da Pegada Hídrica desta fase, que são a produção de insumos do calcário, todos os processos do fertilizante nitrogenado, a produção de enxofre para o fertilizante fosfatado e a produção de óleo diesel. Os gráficos da Figura 4.9, mais abaixo, mostram, de forma resumida, a composição da Pegada Hídrica desta fase e de seus componentes.

Tabela 4.38 – Resultados finais da Pegada Hídrica, para o subsistema da fase agrícola.

Material	Processo produtivo	Água Verde (l)	Água Azul		Água Cinza	
			AS (l)	AG (l)	Valor (l)	Parâmetro crítico
Calcário	<i>Insumos</i>	-	zero	9,0E-03	7,2E-02	Fósforo
Fertilizante nitrogenado	<i>Ureia e amônia</i>	-	2,6E-03	-	6,4E-01	Amônia
	<i>Outros insumos</i>	-	2,0E-02	4,9E-03	7,7E+00	Fósforo
Fertilizante fosfatado	<i>SSP e ácido sulfúrico</i>	-	1,4E+00	-	9,4E+02	Fósforo
	<i>Rocha fosfática</i>	-	-	9,4E-02	2,2E+01	Fósforo
	<i>Enxofre</i>	-	2,2E-02	-	3,0E-03	Amônia
	<i>Outros insumos</i>	-	6,9E-01	1,5E-01	1,8E+02	Fósforo
Fertilizante potássico	<i>Cloreto de potássio</i>	-	4,1E-01	-	3,2E+01	Cloreto
	<i>Insumos</i>	-	7,4E-02	1,2E-02	1,7E+01	Cloreto
Pesticidas <sup>(a)</sup>	<i>Roundup</i>	-	2,8E-01	2,7E-02	1,3E+02	Fósforo
	<i>Spider</i>	-	7,6E-03	3,2E-04	6,2E-01	DBO
	<i>Standak Top</i>	-	1,8E-02	1,1E-03	5,1E+00	Fósforo
	<i>Opera</i>	-	4,4E-02	2,1E-03	7,8E+00	Fósforo
	<i>Certero</i>	-	4,6E-03	2,0E-04	1,5E-01	Fluoreto
	<i>Talcord</i>	-	7,3E-03	3,2E-04	3,2E-01	DBO
	<i>Pivot</i>	-	3,8E-02	1,4E-03	1,4E+00	Fósforo
Óleo diesel <sup>(a)</sup>	-	-	8,0E-03	-	6,5E+00	Benzeno
Sementes	<i>Cultivo</i>	1,2E+02	-	-	1,5E+02	Fósforo
Grãos de soja	<i>Cultivo</i>	7,8E+03	-	-	1,0E+04	Fósforo

(a) Para estes materiais, os processos não foram divididos e, portanto, referem-se a todo o ciclo de vida.  
 Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea

Outro resultado significativo, obtido ainda na fase agrícola, foi a participação do fósforo como poluente crítico da Água Cinza, contribuindo com 99,5% do valor total deste componente. Nota-se, ainda, que este grande percentual resultou, principalmente, da poluição difusa, causada pela fração de fósforo perdida no uso do fertilizante fosfatado para o cultivo agrícola.

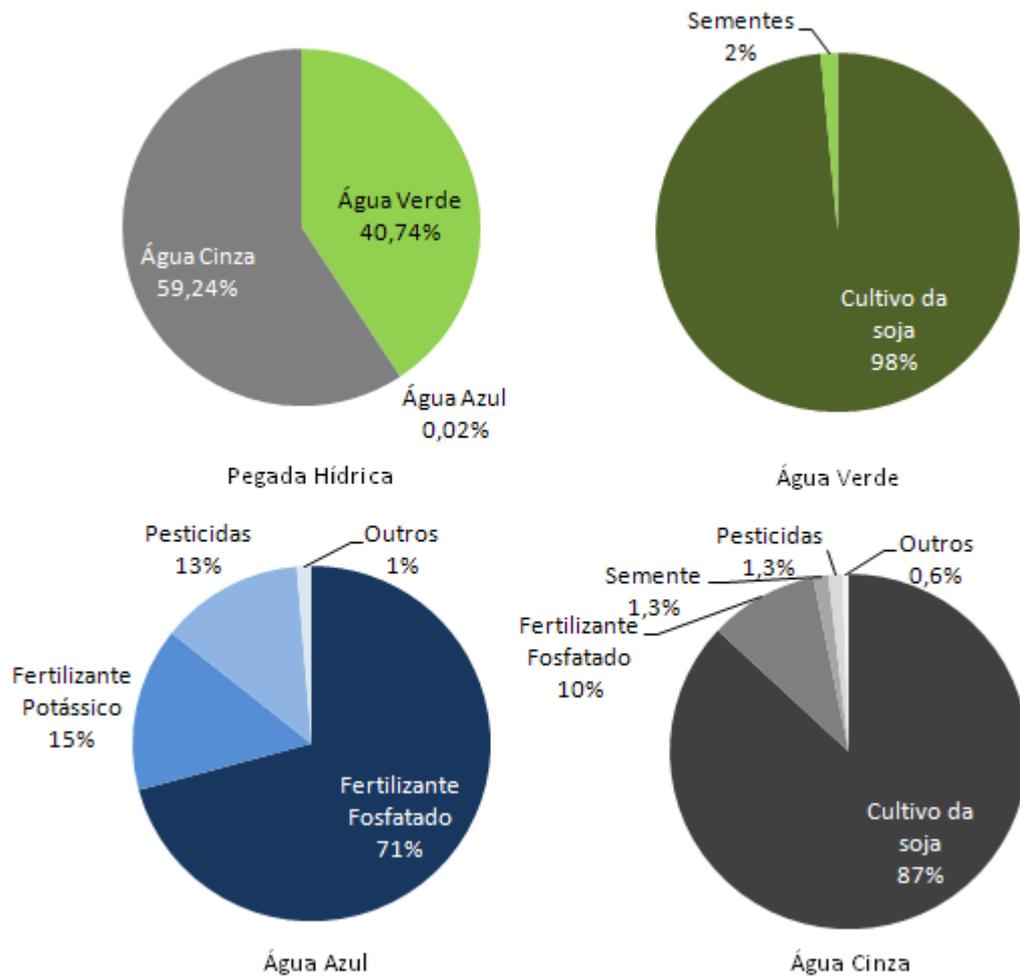


Figura 4.9 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Verde, Azul e Cinza, do subsistema da fase agrícola.

Nas fases de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel, a Água Verde e a Água Azul foram obtidas a partir dos valores volumétricos apresentados anteriormente para cada processo que participa destes subsistemas. No cálculo da Água Cinza, também foram utilizados os mesmos procedimentos, considerações e tipos de dados empregados na fase agrícola, levando em conta os diferentes processos envolvidos. Além disso, os resultados definitivos destes componentes para os processos específicos de produção do óleo degomado e do biodiesel foram obtidos com o uso dos valores médios de consumo de água e geração de efluente entre as duas empresas analisadas. A partir destes procedimentos, obtiveram-se os resultados finais da Pegada Hídrica destes subsistemas, os quais são mostrados em conjunto na Tabela 4.39.

Tabela 4.39 – Resultados finais da Pegada Hídrica, para os subsistemas das fases de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel.

Material	Processo produtivo	Água Verde (l)	Água Azul		Água Cinza	
			AS (l)	AG (l)	Valor (l)	Parâmetro crítico
Biomassa	<i>Cultivo</i>	1,8E+02	-	-	-	-
	<i>Insumos</i>	-	2,0E-03	2,7E-04	7,4E-01	DBO
Energia elétrica <sup>(a)</sup>	-	-	5,3E-02	-	2,3E+01	Fósforo
Óleo diesel <sup>(a)</sup>	-	-	1,0E-03	-	8,3E-01	Benzeno
Hexano	<i>Hexano</i>	-	3,7E-02	-	4,6E+01	DBO
	<i>Insumos</i>	-	1,9E-02	2,5E-03	3,1E+01	DBO
Óleo degomado	<i>Fabricação</i>	-	1,6E+00	1,3E+00	1,9E+00	DBO
Metilato de sódio	<i>Metilato de sódio</i>	-	1,4E-01	-	3,7E+01	DBO
	<i>Insumos</i>	-	7,0E-02	2,0E-02	1,5E+01	Fósforo
Hidróxido de sódio	<i>Hidróxido de sódio</i>	-	6,9E-02	-	zero	-
	<i>Insumos</i>	-	1,8E-02	3,0E-03	3,5E+00	Ferro
Ácido clorídrico	<i>Ácido clorídrico</i>	-	5,3E-02	-	zero	-
	<i>Insumos</i>	-	2,7E-02	5,0E-03	5,4E+00	Ferro
Ácido fosfórico	<i>Ácido fosfórico</i>	-	-	1,6E-02	2,1E+00	Fluoreto
	<i>Insumos</i>	-	4,2E-02	1,5E-02	2,5E+00	Fluoreto
Metanol <sup>(a)</sup>	-	-	4,0E-01	6,7E-02	1,9E+01	Fósforo
Biodiesel	<i>Fabricação</i>	-	2,9E-01	1,7E-01	2,0E+00	DBO

(a) Para estes materiais, os processos não foram divididos e, portanto, referem-se a todo o ciclo de vida.  
Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea.

No subsistema de produção do óleo degomado, o valor da Pegada Hídrica total ficou em torno de 239,1 litros, sendo composta por 137 litros de Água Verde, 3,1 litros de Água Azul e 99 litros de Água Cinza. Ao contrário da fase agrícola, neste subsistema a maior parte do uso da água ocorreu pela produção de insumos, com cerca de 98,4% do valor total. Entre estes materiais, as maiores contribuições ocorreram pelo consumo de água da chuva no cultivo de biomassa (100% da Água Verde) e pela Água Cinza da produção de hexano, como pode ser visto na Figura 4.10. Quanto ao processo produtivo do óleo degomado, este apresentou grande importância apenas na Água Azul, abrangendo 97% do consumo de água.

Por outro lado, a produção de insumos do cultivo de biomassa e a produção de óleo diesel obtiveram representatividade menor que 1% em todos os componentes.

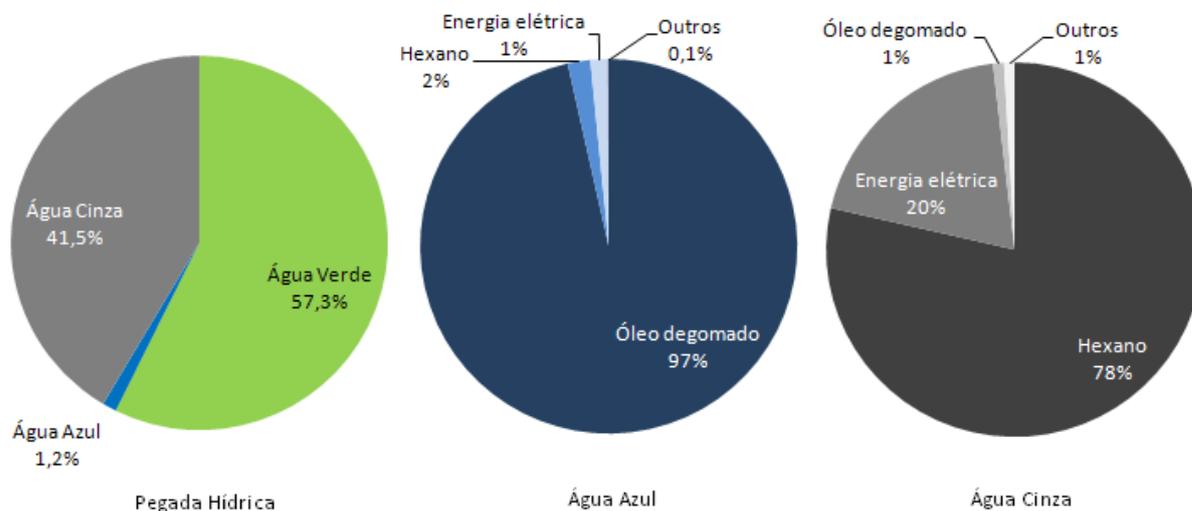


Figura 4.10 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Azul e Cinza, do subsistema da fase de produção do óleo degomado.

De forma específica para a Água Cinza, também nota-se que nesta fase a emissão de matéria orgânica, representada pelo parâmetro da DBO, é o tipo de poluição que mais contribui para o resultado final deste componente (80,3%), incluindo o efluente do processo produtivo do óleo degomado.

Na comparação entre as duas diferentes empresas consideradas, obteve-se o total de 240,2 litros para a Empresa sem recirculação e 238,1 litros para a Empresa com recirculação. Essa pequena diferença de 2,1 litros, menor que 1% do valor total, derivou da diferença de 10% (0,3 litros) na Água Azul e 1,8% (1,8 litros) na Água Cinza. Portanto, em termos de representatividade, pode-se dizer que a recirculação de efluentes resultou em uma diferença pouco significativa, levando em conta todos os processos do subsistema. No entanto, se for considerado apenas o processo de produção do óleo degomado e não forem contabilizadas as diferenças pela eficiência do uso da água (assumindo o consumo médio de 3 litros para as duas empresas), pode-se concluir que o volume de 1,8 litros da Água Cinza representa uma adição de 60% no valor da Pegada Hídrica do processo, mostrando a importância do reaproveitamento do efluente.

Com relação à fase de fabricação do biodiesel, a soma dos valores apresentados na Tabela 4.39 resulta em 47,6 litros de Água Verde, 1,4 litros de Água Azul e 90,3 litros de Água Cinza, totalizando a Pegada Hídrica de 139,3 litros. Assim como na produção do óleo degomado, neste subsistema as etapas de produção dos insumos contribuíram com quase todo o valor da Pegada Hídrica, atingindo um percentual de 98,7%. Conforme mostra os gráficos

da Figura 4.11, entre os diferentes materiais, o uso da água ocorre com maior intensidade na produção do metanol e do metilato de sódio tanto pelo consumo de Água Azul como pela Água Cinza, além da produção de biomassa pelo valor total da Água Verde. Quanto ao processo de fabricação do biodiesel, este somente obteve grande representatividade na Água Azul, abrangendo 32% do volume consumido. Particularmente para o componente Água Cinza, a contribuição para o resultado final ficou dividida entre o parâmetro da DBO (43,4%) e as emissões de fósforo (41,3%).

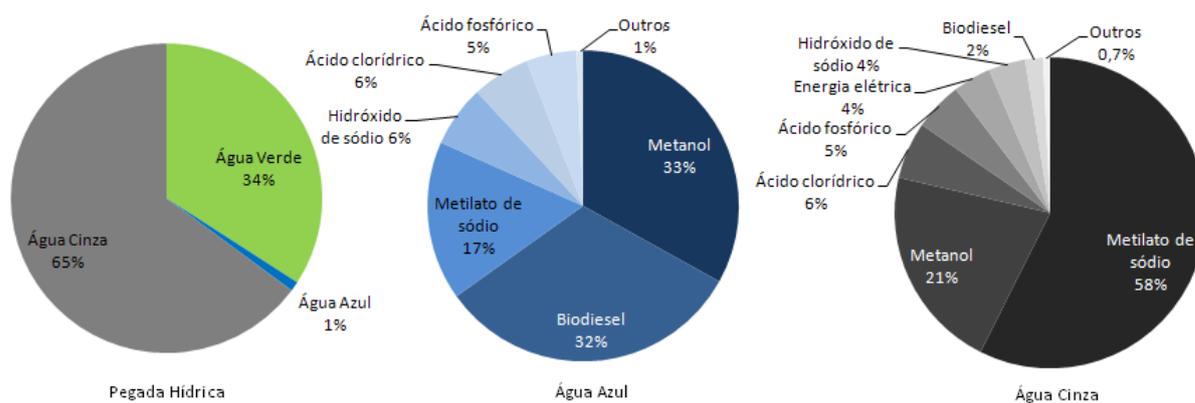


Figura 4.11 – Composição da Pegada Hídrica total e dos componentes Água Azul e Cinza, do subsistema da fase de fabricação do biodiesel.

Quando considerados os resultados separados pelas empresas analisadas, os valores totais resultantes são de 140,5 litros para a Empresa sem recirculação e de 138,3 litros para a Empresa com recirculação. Nota-se que, como o uso da água ocorre majoritariamente na produção dos insumos, a diferença acaba sendo muito pequena, com apenas 2,2 litros ou 1,6% em relação ao valor total. Entretanto, se para este subsistema forem feitas as mesmas considerações realizadas para a fase do óleo degomado, ou seja, contabilizar somente o processo de fabricação do biodiesel e o consumo médio entre as empresas (0,45 litros), a adição do volume de 2 litros da Água Cinza resulta em um aumento de cinco vezes no valor da Pegada Hídrica da Empresa sem recirculação.

A partir da obtenção dos valores totais de cada subsistema, foram encontrados os resultados finais para todo o ciclo de vida do biodiesel de soja, que foram de 8089,6 litros de Água Verde, 7,8 litros de Água Azul e 11688 litros de Água Cinza, totalizando o valor de 19785,4 litros para a Pegada Hídrica. Portanto, em termos de contribuição, nota-se que a Pegada Hídrica resultante é, em sua maior parte, composta pela Água Cinza e depois pela Água Verde, não sendo significativa a fração de Água Azul (0,04%), conforme mostra a Figura 4.12. No entanto, cabe ressaltar que, conforme sugerido em diversos estudos

(CHAPAGAIN *et al.*, 2006; DABROWSKI *et al.*, 2009; FRAITURE *et al.*, 2004; YANG *et al.*, 2006), esta comparação entre os diferentes componentes não é recomendada, uma vez que possuem significados e objetivos diferentes. Por exemplo, enquanto a Água Azul significa o consumo real (físico) de certo volume de água e, portanto, possui consequências diretas sobre a disponibilidade hídrica, a Água Cinza é apenas um indicador da poluição causada, o qual depende da escolha de alguns parâmetros específicos da região em estudo (ex.: concentração máxima permitida).

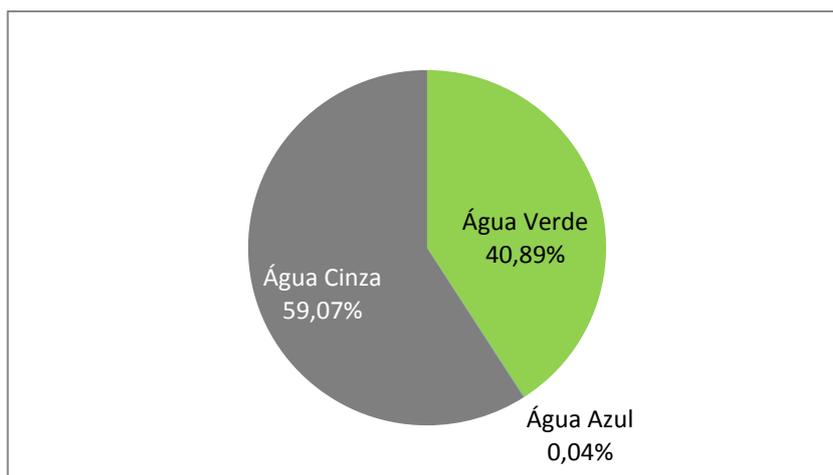


Figura 4.12 – Contribuição da Água Verde, Azul e Cinza, para o valor total da Pegada Hídrica do biodiesel de soja.

Com relação à representatividade de cada fase do ciclo de vida, os valores resultantes são mostrados na Figura 4.13, mais abaixo. Como pode ser visto, a fase agrícola é responsável por quase toda a Pegada Hídrica do biodiesel de soja, uma vez que domina amplamente os resultados da Água Verde e Cinza. Além disso, apesar de não haver extração de água para irrigação, também possui expressiva participação na Água Azul, devido ao consumo na produção dos diversos insumos utilizados.

Entre os resultados totais de cada componente da Pegada Hídrica, somente alguns processos do ciclo de vida obtiveram contribuição maior que 1%. Conforme mostra a Tabela 4.40, o processo de cultivo da soja contribuiu amplamente para os valores da Água Verde e Cinza. Quanto aos outros processos do elo central da cadeia produtiva, apenas o de produção do óleo degomado obteve grande participação no resultado da Água Azul. Por outro lado, a inclusão das etapas de produção dos insumos se mostrou importante, pois obteve significativa participação em todos os componentes da Pegada Hídrica, com 56,6% da Água Azul, 14,4% da Água Cinza e 3,8% da Água Verde. Entre estes materiais, destaque deve ser dado para o

fertilizante fosfatado e para os defensivos agrícolas, que obtiveram resultados significativos em dois componentes.

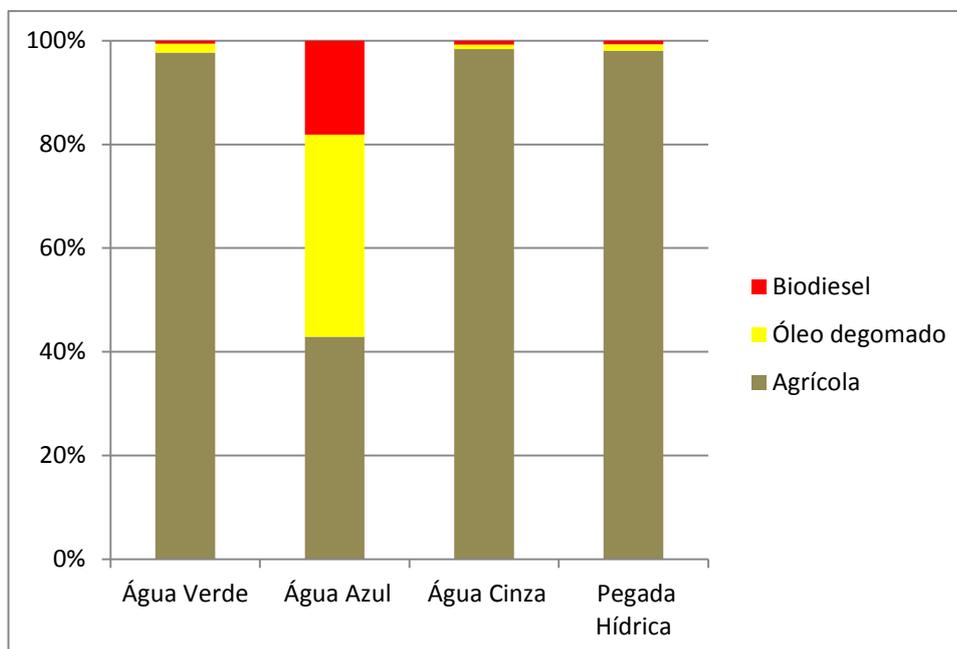


Figura 4.13 – Contribuição dos três subsistemas analisados, para os componentes Água Verde, Azul e Cinza, e para o valor total da Pegada Hídrica.

Tabela 4.40 – Análise de contribuição das etapas do ciclo de vida do biodiesel de soja, por componente da Pegada Hídrica.

Água Verde		Água Azul		Água Cinza	
Etapa	%	Etapa	%	Etapa	%
Cultivo da soja	96,2	Óleo degomado	37,6	Cultivo da soja	85,5
Biomassa	2,3	Fert. fosfatado	30,4	Fert. fosfatado	9,7
Sementes	1,5	Fert. potássico	6,4	Sementes	1,4
		Metanol	6	Pesticidas	1,2
		Biodiesel	5,8	Outros	2,2
		Pesticidas	5,5		
		Metilato de sódio	3		
		Hidróxido de sódio	1,2		
		Ácido clorídrico	1,1		
		Outros	3		

Outra forma importante de se analisar os resultados da Pegada Hídrica é através da relação entre os valores volumétricos encontrados para o uso da água e o local em que ocorrem. Neste estudo, os processos do ciclo de vida do biodiesel de soja que apresentaram os

usos mais intensivos da água foram delimitados de acordo com as regiões em que são realizados, procurando utilizar, como unidade territorial, a bacia hidrográfica, conforme disponibilidade de dados. Dessa forma, os resultados produzidos são mostrados na Tabela 4.41, onde nota-se que grande parte do uso da água fica concentrado na Região Hidrográfica do Uruguai, que é o local no qual são realizados os processos de cultivo da soja e de produção do óleo degomado e do biodiesel. Entretanto, também não pode passar despercebido o volume de consumo e poluição que ocorre nas outras regiões, principalmente na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste.

Tabela 4.41 – Análise das regiões com uso mais intensivo da água, envolvidas no ciclo de vida do biodiesel de soja, conforme valor total da Pegada Hídrica e dos componentes Verde, Azul e Cinza.

Região	Subregião	Água Verde		Água Azul		Água Cinza		Pegada Hídrica	
		Valor (l)	%	Valor (l)	%	Valor (l)	%	Valor (l)	%
R. H. do Uruguai	Bacia dos rios Turvo-Santa Rosa-Santo Cristo	7,78E+03	96	2,90E+00	37	9,99E+03	85	1,78E+04	90
	Bacia do rio Ijuí	-	-	4,60E-01	6	2,00E+00	0	2,46E+00	0
	-	3,05E+02	4	-	-	1,50E+02	2	4,55E+02	2
R. H. Atlântico Sudeste	Bacia Baixada Santista	-	-	1,52E+00	19	9,40E+02	8	9,41E+02	5
	Bacia Paraíba do Sul	-	-	4,19E-01	5	1,44E+02	1	1,45E+02	1
	Bacia Ribeira de Iguape	-	-	1,10E-01	2	2,41E+01	0	2,42E+02	0
	Bacia Baía de Guanabara	-	-	4,80E-03	0	1,50E-01	0	1,55E-01	0
R. H. Atlântico Sul	Bacia do rio Caí	-	-	3,70E-02	0	4,60E+01	0	4,60E+01	0
R. H. do Paraná	Bacia do Alto Tietê	-	-	7,90E-03	0	6,20E-01	0	6,28E-01	0
	Bacia de Paranapanema	-	-	1,40E-01	2	3,70E+01	0	3,71E+01	0
Brasil <sup>(a)</sup>	-	-	-	1,13E+00	15	2,68E+02	2	2,70E+02	1
Rússia <sup>(a)</sup>	-	-	-	4,13E-01	5	3,26E+01	0	3,30E+01	0
Europa <sup>(a)</sup>	-	-	-	1,33E-01	2	2,47E+01	0	2,48E+01	0
Chile <sup>(a)</sup>	-	-	-	4,67E-01	6	1,90E+01	0	1,95E+01	0

(a) Nestes itens, foram consideradas regiões mais abrangentes, pois não foi possível realizar uma maior especificação do local onde o uso da água ocorre.

Depois da apresentação dos resultados, é importante salientar que os valores encontrados neste estudo foram obtidos seguindo a metodologia proposta e com o uso de

diversas estimativas mostradas ao longo do mesmo. Portanto, para o posterior uso destes resultados tais aspectos devem ser considerados.

Entre os diversos estudos de Pegada Hídrica desenvolvidos nos últimos anos, existe uma grande variabilidade nos métodos de coleta de dados e nas diversas suposições que devem ser realizadas para que seja possível executá-los. Por esse motivo, muitas vezes a realização de comparações mais específicas de resultados ficam prejudicadas. Mesmo assim, diante do que foi apresentado, algumas observações importantes ainda podem ser feitas. Nota-se, por exemplo, que a principal diferença deste estudo para a grande maioria dos trabalhos de Pegada Hídrica, que envolvem a quantificação do uso da água no ciclo de vida de produtos, é a inclusão, através de uma abordagem adaptada da metodologia ACV, das etapas de produção dos insumos, os quais geralmente são negligenciados, como por exemplo, em Chapagain *et al.* (2006), Aldaya e Hoekstra (2010), Mekonnen e Hoekstra (2010), Gerbens-Leenes *et al.* (2009a), entre outros. Conforme mostrado anteriormente, o uso da água pela fabricação dos insumos pode contribuir significativamente para o valor final da Pegada Hídrica e, portanto, devem ser contabilizados para que o resultado não seja subestimado.

Outra questão importante é relacionada especificamente à determinação da Água Cinza no cultivo da soja. No presente estudo, este componente foi determinado pela emissão de fósforo, uma vez que este resultou em um valor muito maior (9996 litros) que as outras substâncias (196 litros para o nitrogênio, 13 litros para o glifosato e 2,5 litros para a permetrina). Este resultado acabou fazendo com que a Água Cinza apresentasse uma contribuição maior que os outros dois componentes (Água Verde e Azul), contrariando os resultados encontrados na maioria dos estudos de Pegada Hídrica (ex.: CHAPAGAIN *et al.*, 2006; CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2011; GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2009; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2010). Nestes trabalhos, a estimativa da Água Cinza da fase agrícola foi realizada somente com a emissão de nitrogênio, muitas vezes sem justificar o motivo da escolha, resultando em uma baixa contribuição no valor total da Pegada Hídrica, com cerca de 2 a 12%.

Os poucos estudos que realizaram uma avaliação mais detalhada da Água Cinza apresentaram resultados com um padrão diferente dos demais. No estudo de Ercin *et al.* (2012) foram contabilizadas todas as substâncias emitidas, resultando em uma contribuição mais expressiva da Água Cinza (em torno de 50% da Pegada Hídrica total), porém a emissão de fósforo foi considerada nula, através da justificativa de que há forte adsorção entre este elemento e o solo. Na publicação de Dabrowski *et al.* (2009), com base em frações de perda retiradas da literatura especializada, foram contabilizadas as emissões de fósforo para diferentes cultivos, o que resultou em valores de Água Cinza sempre maiores para este

elemento e também maiores que a Água Verde e Azul, concordando com o que foi obtido no presente trabalho. Dessa forma, os resultados apresentados neste estudo reforçam a ideia de que a contabilização somente do nitrogênio na estimativa da Água Cinza pode acabar subestimando o valor final da Pegada Hídrica.

Devido às frequentes situações de baixa disponibilidade de água da chuva, enfrentadas por diversas regiões produtoras de soja do Rio Grande do Sul, em muitos anos ocorrem diminuições drásticas na produtividade deste cultivo. Por esse motivo, estão sendo incentivados, com cada vez mais força, a implantação de sistemas de irrigação. Diante deste contexto, como um ponto adicional deste estudo, também foi realizada a estimativa da Pegada Hídrica, incluindo a aplicação da irrigação no cultivo da soja. Neste procedimento, além de serem consideradas as mesmas condições e suposições feitas anteriormente, foi assumido que o rendimento potencial da soja, sem sofrer nenhum estresse hídrico, é de 3500 kg/ha, que é o valor aproximado obtido por Martorano (2007). Além disso, foi considerado que a eficiência da água extraída para a irrigação é de 62,2%, conforme dados de Christofidis (1999) para a região sul do Brasil, e que do volume total de água perdida há evaporação (uso consuntivo) de 10%, de acordo com Mishra e Yeh (2011). Por fim, também deve ser observado que não foi considerado o consumo a mais de energia elétrica para o bombeamento da água nem qualquer outro insumo adicional.

A partir destas definições, foi realizada a simulação no software CROPWAT v.8.0, selecionando-se a opção que considera os intervalos de irrigação com eficiência máxima, ou seja, somente é aplicada quando a água disponível no solo chega ao limite de esgotamento para a cultura. Dessa forma, o valor encontrado para o consumo efetivo da água proveniente da irrigação foi de 281,7 mm e para o volume total perdido foi de 172,7 mm, dos quais 17,3 mm são consumidos pela evaporação e o restante retorna aos corpos hídricos. Depois disso, para que se possa obter o resultado da evapotranspiração da água da chuva, o consumo efetivo da irrigação foi subtraído da necessidade total da cultura (704,4 mm), resultando em 422,7 mm. Com estes resultados, mais a produtividade assumida e a quantidade de soja necessária para a produção de 1 litro de biodiesel (2,48 kg), foi possível obter os valores finais de 2126 litros para a Água Azul e de 2995 litros para a Água Verde da fase agrícola. Além disso, com os novos valores de produtividade e, conseqüentemente, de aplicação de fósforo (60 kg/ha, segundo indicações da Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul (2009)), o resultado da Água Cinza também se modifica, diminuindo para 6503 litros e totalizando a Pegada Hídrica de 11616 litros.

Como pode ser notado, a aplicação da irrigação reduziu consideravelmente o valor total da Pegada Hídrica (cerca de 8169 litros), o que concorda com os estudos de Mekonnen e

Hoekstra (2010) e Ercin *et al.* (2012). Essa diminuição do valor pode ser explicada, principalmente, pela maior produtividade alcançada pela soja com o suprimento ótimo de água em seu desenvolvimento. Além disso, a eficiência da água da irrigação, do modo como foi simulado, é maior que a água da chuva, uma vez que somente é aplicada quando a cultura realmente está necessitando de água.

No entanto, também se percebe que ocorre uma mudança significativa na composição da Pegada Hídrica, pois há um grande aumento da participação da Água Azul, ficando em torno de 18% do total, e consequente diminuição da Água Verde e Cinza, com 26% e 56%, respectivamente. Portanto, considerando que a competição pelo uso da Água Azul é maior, este resultado reforça a ideia de que o uso do valor total da Pegada Hídrica não é recomendado, uma vez que, neste caso, fica claro que, apesar da diminuição, o aumento considerável da Água Azul obviamente resultaria em impactos mais significativos aos recursos hídricos.

#### 4.4 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DO USO DA ÁGUA

O ICV voltado ao uso da água, no ciclo de vida do biodiesel de soja, foi produzido seguindo os procedimentos e considerações especificadas e determinadas no subitem relacionado às definições gerais deste estudo. Além disso, do mesmo modo como foram realizados os cálculos da Pegada Hídrica, todos os dados brutos relacionados aos fluxos de materiais e de água necessários para a consolidação deste inventário foram determinados e apresentados no subitem *4.2 Inventário de Materiais*. Portanto, nesta parte do estudo será apenas realizado o tratamento destes dados e a apresentação e discussão dos resultados finais.

De forma geral, para cada processo envolvido nos subsistemas, o uso consuntivo foi determinado pela diferença entre o volume de entrada de água (água superficial e água subterrânea) e o volume de efluente gerado, utilizando os valores anteriormente mostrados em tabelas devidamente identificadas. Entretanto, como foi considerado que todos os efluentes são lançados em corpo hídrico superficial, o volume de água subterrânea extraída sempre foi totalmente consumida, uma vez que este volume não retorna à fonte original. Quanto ao uso degradativo, o valor quantitativo foi determinado pelos volumes de efluente gerado e a classificação da qualidade dos fluxos de água (entrada e saída) foi realizada utilizando os valores de concentração dos parâmetros mostrados anteriormente, em tabelas específicas para cada processo.

Diante destes procedimentos, o inventário produzido para a fase agrícola é mostrado na Tabela 4.42, mais abaixo. Com relação aos resultados relacionados à água da chuva,

ressalta-se que os estudos em que a produção deste inventário se baseia, ou seja, o de Bayart *et al.* (2010) e o de Boulay *et al.* (2011a), recomendam a inclusão da precipitação como fonte de água apenas quando for coletada artificialmente (ex.: cisternas), justificando que esta interceptação é a única forma de diminuir o volume da contribuição natural aos corpos hídricos. Dessa forma, não é contabilizada a evapotranspiração das culturas como uso consuntivo, pois, segundo os mesmos, este consumo aconteceria de qualquer maneira, caso houvesse a presença de vegetação nativa. Entretanto, estes mesmos estudos não deixam claro quanto à contabilização do excesso da água da chuva que escoar ou infiltra para os corpos hídricos com sua qualidade degradada pela solubilização de poluentes derivados dos insumos agrícolas, como os fertilizantes. De acordo com os princípios do uso degradativo, entende-se que este volume poluído deve ser contabilizado, pois esta água atingiria os corpos hídricos com uma qualidade superior e, portanto, com menos restrições de uso, caso houvesse apenas a vegetação nativa. Diante disso, neste estudo foi decidido por quantificar o volume de água da chuva degradada pelo cultivo da soja, se diferenciando do que foi apresentado nos estudos citados anteriormente. Para tanto, utilizou-se, além da carga de poluentes derivados do cultivo, o valor encontrado na estimativa realizada pelo software CROPWAT v.8.0 para o volume de água que fica em excesso no balanço hídrico do solo após se esgotar a capacidade de armazenamento do mesmo, ou seja, a parte que infiltra de forma profunda ou escoar superficialmente.

A partir da soma destes resultados, pode-se chegar aos valores de 3,3 litros de consumo efetivo da água e de 256,4 litros que são degradados. Como pode ser visto nos gráficos da Figura 4.14, o uso consuntivo foi determinado somente pela produção dos insumos, com destaque para o fertilizante fosfatado. Quanto ao uso degradativo, apesar do alto valor apresentado, nota-se que sua maior parte é composta pela água da chuva degradada à categoria S3 (96%), a qual, segundo Tabelas 4.5 e 4.6, ainda pode exercer diversas funções importantes, como o uso doméstico com tratamento avançado, a irrigação de cultivos não consumidos de forma crua ou não comestíveis e o uso em sistemas de refrigeração industrial, fazendo com que o impacto deste resultado seja amenizado, dependendo do tipo de uso da água que se pretende exercer. O restante do volume, cerca de 10 litros, são degradados de forma intensa (categoria S5) e, por esse motivo, perdem totalmente sua funcionalidade, com exceção da navegação e da produção de energia hidrelétrica. Por fim, entre os diferentes processos envolvidos neste subsistema, a produção de insumos do calcário, a do fertilizante nitrogenado e seus insumos, a do enxofre para o fertilizante fosfatado e a do óleo diesel, não apresentaram contribuição maior que 1% em nenhuma das duas formas de uso da água.

Tabela 4.42 – Resultados finais do ICV, para o subsistema da fase agrícola.

Material	Processo produtivo	Uso consuntivo			Uso degradativo	
		AS (l)	AG (l)	Q	E (l)	Q
Calcário	<i>Insumos</i>	zero	9,0E-03	S2c/G1	3,1E-02	S4
Sementes	<i>Cultivo</i>	-	-	R	3,7E+00	S3
Óleo diesel <sup>(a)</sup>	-	8,0E-03	-	S2c	1,0E-01	S5
Fertilizante nitrogenado	<i>Ureia e amônia</i>	2,7E-03	-	S2b	6,2E-03	S5
	<i>Outros insumos</i>	2,0E-02	4,9E-03	S2c/G2b	1,0E-01	S5
Fertilizante fosfatado	<i>SSP e ácido sulfúrico</i>	1,4E+00	-	S3	4,2E+00	S5
	<i>Rocha fosfática</i>	-	9,4E-02	G2a	1,5E-01	S5
	<i>Enxofre</i>	2,2E-02	-	S2c	8,8E-02	S3
	<i>Outros insumos</i>	6,9E-01	1,5E-01	S2c/G1	3,4E+00	S5
Fertilizante Potássico	<i>KCl</i>	4,1E-01	-	S2b	6,7E-01	S5
	<i>Insumos</i>	7,4E-02	1,2E-02	S2c/G2b	3,4E-01	S5
Pesticidas <sup>(a)</sup>	<i>Roundup</i>	2,8E-01	2,7E-02	S2b/G1	7,2E-01	S5
	<i>Spider</i>	7,6E-03	3,2E-04	S2b/G1	1,9E-02	S5
	<i>Standak Top</i>	1,8E-02	1,1E-03	S2b/G1	4,4E-02	S5
	<i>Opera</i>	4,4E-02	2,1E-03	S2b/G1	1,1E-01	S5
	<i>Certero</i>	4,6E-03	2,0E-04	S3/G1	1,1E-02	S5
	<i>Talcord</i>	7,4E-03	3,2E-04	S2b/G1	1,8E-02	S5
	<i>Pivot</i>	3,8E-02	1,4E-03	S2b/G1	9,2E-02	S5
Grãos de soja	<i>Cultivo</i>	-	-	R	2,4E+02	S3

(a) Para estes materiais, os processos não foram divididos e, portanto, referem-se a todo o ciclo de vida.  
 Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea; Q – qualidade (categoria).

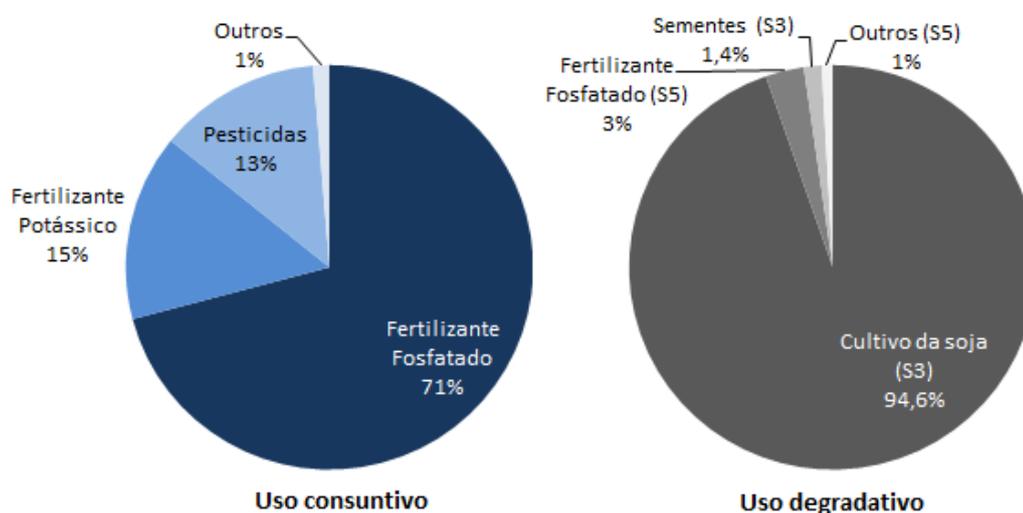


Figura 4.14 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase agrícola.

Com relação aos subsistemas das fases industriais, os inventários finais são mostrados em conjunto na Tabela 4.43. Dentro deste contexto, deve ser observado que, para a obtenção dos resultados finais dos processos de fabricação do óleo degomado e do biodiesel, foram considerados os valores médios de consumo de água e geração de efluente entre as duas empresas analisadas.

Tabela 4.43 – Resultados finais do ICV, para os subsistemas das fases de produção do óleo degomado e de fabricação do biodiesel.

Material	Processo produtivo	Uso consuntivo			Uso degradativo	
		AS (l)	AG (l)	Q	E (l)	Q
Biomassa	<i>Insumos</i>	2,0E-03	2,7E-04	S2c/G1	9,1E-03	S5
Energia elétrica <sup>(a)</sup>	-	5,3E-02	-	S2c	2,3E-01	S5
Óleo diesel <sup>(a)</sup>	-	1,0E-03	-	S2c	1,0E-01	S5
Hexano	<i>Hexano</i>	3,7E-02	-	S1	1,5E-01	S5
	<i>Insumos</i>	1,9E-02	2,5E-03	S2c/G1	8,5E-02	S5
Óleo degomado	<i>Fabricação</i>	1,6E+00	1,3E+00	S3/G1	1,7E-01	S5
Metilato de sódio	<i>Metilato de sódio</i>	1,4E-01	-	S3	3,4E-01	S5
	<i>Insumos</i>	7,0E-02	2,0E-02	S2c/G1	3,4E-01	S5
Hidróxido de sódio	<i>Hidróxido de sódio</i>	6,9E-02	-	S3	2,0E-01	S5
	<i>Insumos</i>	1,8E-02	3,0E-03	S2c/G1	8,3E-02	S5
Ácido clorídrico	<i>Ácido clorídrico</i>	5,3E-02	-	S3	1,5E-01	S5
	<i>Insumos</i>	2,7E-02	5,0E-03	S2c/G1	1,3E-01	S5
Ácido fosfórico	<i>Ácido fosfórico</i>	-	1,6E-02	G2a	4,5E-02	S5
	<i>Insumos</i>	4,2E-02	1,5E-02	S2c/G1	2,3E-01	S5
Metanol <sup>(a)</sup>	-	4,0E-01	6,7E-02	S4/G1	1,2E+00	S5
Biodiesel	<i>Fabricação</i>	2,9E-01	1,7E-01	S3/G1	1,2E-01	S5

(a) Para estes materiais, os processos não foram divididos e, portanto, referem-se a todo o ciclo de vida.  
Legenda: AS – água superficial; AG – água subterrânea; Q – qualidade (categoria).

Para o subsistema de produção do óleo degomado, através da soma dos valores encontrados para cada processo, pode ser observado que há um consumo efetivo de 3,1 litros de água e a degradação total (categoria S5) de outros 0,5 litros. Entre os diferentes processos, a produção de óleo diesel e a dos insumos na produção de biomassa não apresentaram resultados significativos (contribuição maior que 1%) em nenhuma forma de uso da água. De acordo com os gráficos da Figura 4.15, nota-se que a utilização da água na indústria de

extração e degomagem do óleo de soja representa a principal forma de consumo, enquanto que no uso degradativo os insumos predominam com 84% do total.

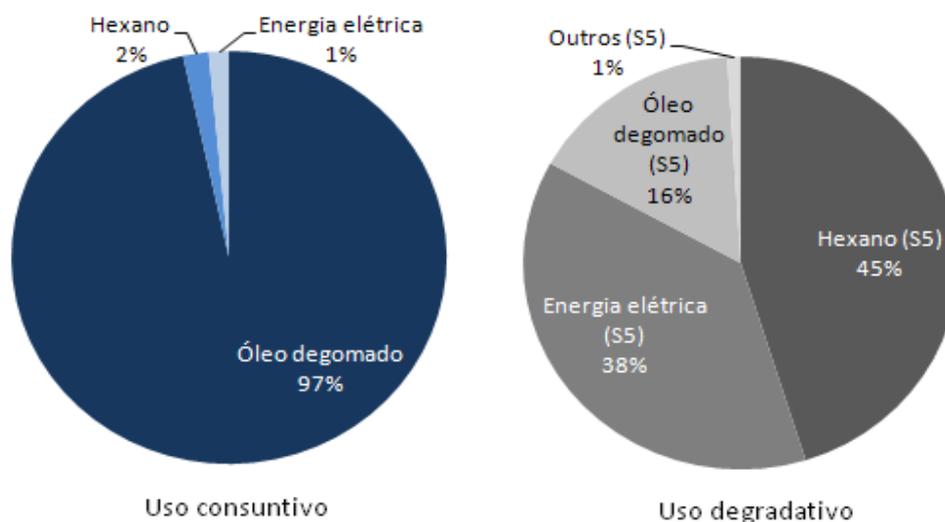


Figura 4.15 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase de produção do óleo degomado.

Na comparação entre as duas empresas analisadas, os resultados obtidos foram de 3,2 e 2,9 litros de uso consuntivo e de 0,6 e 0,4 litros de uso degradativo para a Empresa sem recirculação e a Empresa com recirculação, respectivamente. Apesar de ser pequena a diferença de valores, o uso da água na empresa que não realiza o reaproveitamento de seus efluentes é 30% maior, contabilizando apenas o uso degradativo.

Quanto à fase de fabricação do biodiesel, os valores totais resultantes foram de 1,4 litros de uso consuntivo e 2,8 litros de uso degradativo, com descarte dos efluentes na pior categoria de qualidade possível (S5). Em termos de contribuição, conforme mostra a Figura 4.16, a produção dos insumos representou a maior parte do uso da água, com destaque para o metanol, que teve a maior contribuição nas duas formas consideradas. Por outro lado, os processos envolvidos na produção de biomassa, energia elétrica e óleo diesel não apresentaram contribuição maior que 1% de nenhuma maneira. Quanto ao processo de fabricação do biodiesel, este teve grande representatividade apenas no uso consuntivo.

Os resultados discriminados entre as duas empresas foram de 1,5 e 1,3 litros de consumo de água e de 2,8 e 2,7 litros de uso degradativo para a Empresa sem recirculação e para a Empresa com recirculação, respectivamente. Dessa forma, considerando apenas a questão do descarte de efluentes, nota-se que a diferença foi de apenas 5% entre as empresas, uma vez que o volume de efluente gerado é baixo, se comparado ao volume total de todos os processos envolvidos.

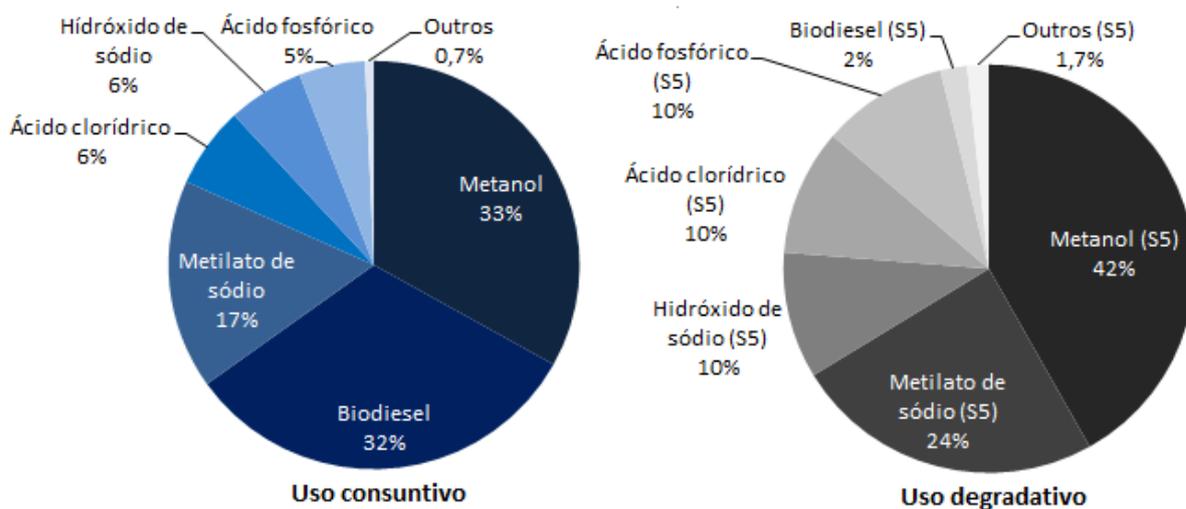


Figura 4.16 – Composição do uso consuntivo e degradativo da água, no ICV do subsistema da fase de fabricação do biodiesel.

Depois de obtidos os resultados de cada subsistema, pode-se dizer que o consumo total de água, que ocorre no ciclo de vida do biodiesel de soja, é de 7,8 litros por litro de combustível produzido. Além disso, também ocorre a degradação da qualidade de outros 260 litros, dos quais 95% (247 litros) ficam com a qualidade S3 e os 5% restantes (13 litros) são devolvidos aos corpos hídricos com a pior qualidade possível (categoria S5). De forma prática, isto significa que, por exemplo, se em um futuro estudo for avaliado o impacto da diminuição de disponibilidade de água causada pela produção de biodiesel para um tipo de uso mais exigente de qualidade, como a irrigação de cultivos que são consumidos de forma crua (ex.: hortaliças), o valor a ser considerado será de 267,8 litros (7,8 de consumo e 260 litros degradados). No entanto, se o objetivo do estudo for avaliar a perda de água para usos menos exigentes, como a irrigação de cultivos não comestíveis (ex.: oleaginosas para biodiesel), o resultado será de apenas 20,8 litros (7,8 litros consumidos e 13 litros degradados). A partir destes resultados, podem ser produzidos dois perfis de perda de água, conforme mostra a Figura 4.17, onde o primeiro gráfico refere-se aos usos que não são satisfeitos com a qualidade da água na categoria S3 (ex.: doméstico I e II, agricultura I, pesca e recreação) e o segundo gráfico são os usos que ainda podem ser exercidos com esta qualidade (ex.: doméstico III, agricultura II e refrigeração).

Estes valores também sugerem que o impacto desta cadeia produtiva na disponibilidade dos recursos hídricos para os principais usos em atividades humanas é maior pela poluição gerada do que pelo consumo efetivo. Dessa forma, os resultados deste estudo reforçam as conclusões de Boulay *et al.* (2011b), que através de um estudo de caso sobre uma indústria de papel, demonstrou a importância de se considerar a perda de funcionalidade da água devido a sua degradação.

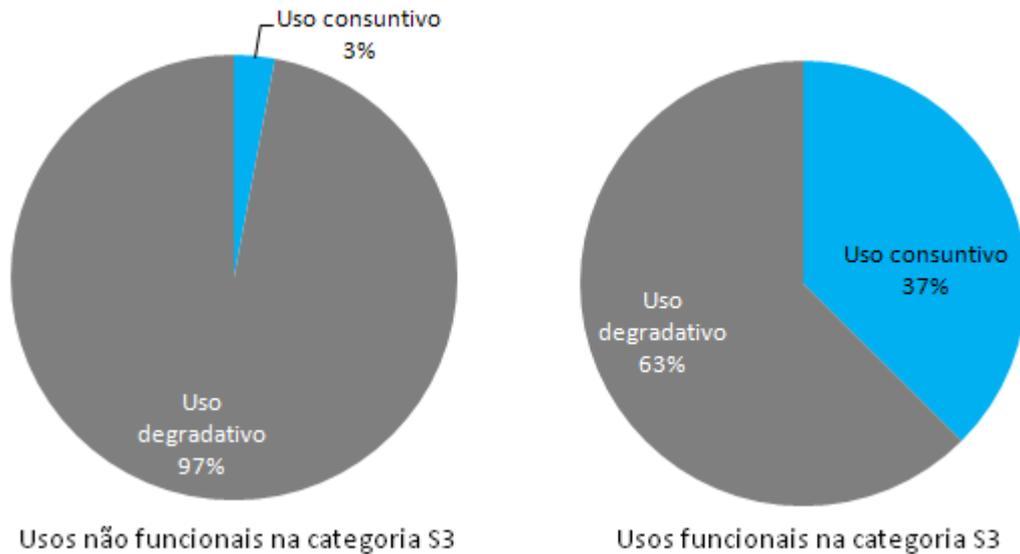


Figura 4.17 – Contribuição das formas de uso da água do ICV gerado neste estudo, considerando as categorias de classificação do uso degradativo.

Em termos de contribuição, entre os três subsistemas definidos para o ciclo de vida do biodiesel de soja, nota-se claramente, conforme Figura 4.18, que a fase agrícola tem maior importância, principalmente no uso degradativo. De acordo com a Tabela 4.44, que mostra a contribuição dos processos aos valores totais de uso da água, esse resultado está relacionado, sobretudo, à poluição difusa, causada no cultivo da soja, devido à lixiviação dos fertilizantes empregados neste processo. Depois disso, também apresentam contribuições importantes ao uso consuntivo os processos de produção do óleo degomado e do fertilizante fosfatado.

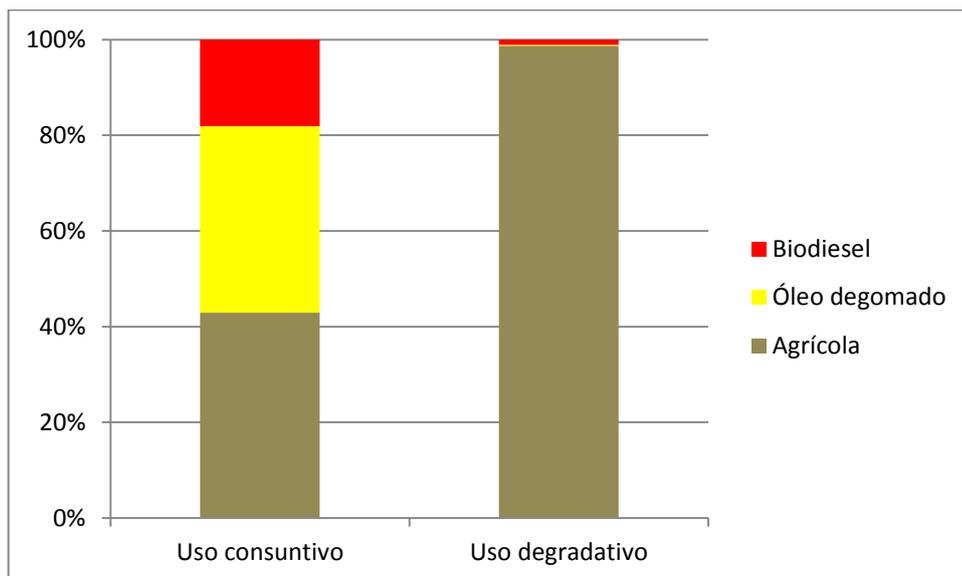


Figura 4.18 – Contribuição dos três subsistemas analisados, para o uso consuntivo e degradativo da água.

Tabela 4.44 – Análise de contribuição das etapas do ciclo de vida do biodiesel de soja, de acordo com a forma de uso da água considerada no ICV.

Uso degradativo		Uso consuntivo	
Etapa	%	Etapa	%
Cultivo da soja	93,4	Óleo degomado	37,6
Fert. fosfatado	3,0	Fert. fosfatado	30,4
Sementes	1,4	Fert. potássico	6,4
Outros	2,2	Metanol	6
		Biodiesel	5,8
		Pesticidas	5,5
		Metilato de sódio	3
		Hidróxido de sódio	1,2
		Ácido clorídrico	1,1
		Outros	3

Devido ao fato de que a utilização da ACV para a avaliação do uso da água é muito recente, existem, até o momento, poucos estudos de caso, ou exemplos de aplicação desta técnica, que realizaram tal análise no ciclo de vida de produtos (BOULAY *et al.*, 2011b; EMMENEGGER *et al.*, 2011; JESWANI e AZAPAGIC, 2011; RIDOUTT *et al.*, 2012; STOESSEL *et al.*, 2012). Por esse motivo, fica difícil de serem realizadas comparações mais específicas de resultados. Dentre os citados, o mais próximo às condições do presente estudo foi o de Emmenegger *et al.* (2011), o qual avaliou o consumo de água no ciclo de vida do biodiesel, produzido a partir da colza cultivada na Argentina, e comparou com dados de outros combustíveis, obtidos de fontes secundárias. Neste trabalho, também foram utilizadas informações fornecidas por bancos de dados, principalmente do Ecoinvent, para a produção dos insumos e, conseqüentemente, o volume consumido de água para estes processos teve que ser estimado com o uso de coeficientes fixos de retorno ou evaporação. Além disso, a determinação da necessidade de irrigação para o cultivo também foi estimado com o uso do software CROPWAT. A partir destes procedimentos, o resultado obtido foi o consumo de 24 litros de água por litro de biodiesel de colza cultivada sem irrigação. Outro valor apontado neste estudo foi o uso consuntivo de 27 litros de água por litro de biodiesel de soja cultivada nos Estados Unidos. Apesar de apresentar valores maiores que o consumo obtido no presente trabalho (7,8 litros), provavelmente causado pelas inúmeras variáveis contidas em um sistema agrícola, o perfil de contribuição dos processos envolvidos foi semelhante, indicando, principalmente, a produção dos fertilizantes como maior consumidor.

Do mesmo modo como foi realizado na Pegada Hídrica, para o ICV do uso da água também foi produzido o cenário de aplicação da irrigação. Dessa forma, utilizando os mesmos dados e suposições, foram obtidos os resultados de 2126 litros para o uso consuntivo e de 1009 litros para o uso degradativo. Esse grande aumento no consumo de água já era previsto, pois, no momento em que se aplica a irrigação, ocorre o consumo da água extraída dos corpos hídricos (uso consuntivo) pela evapotranspiração da cultura e por perdas no sistema. No estudo de Emmenegger *et al.* (2011), descrito anteriormente, o volume de uso consuntivo aumentou para 1480 litros de água por litro de biodiesel quando considerada uma cultura irrigada, atingindo uma proporção semelhante à obtida no presente trabalho. Quanto ao uso degradativo, grande parte deste aumento é proveniente das maiores perdas de água por infiltração ou escoamento, que ocorrem devido à manutenção da umidade do solo em um certo limite desejável. Entretanto, apesar do grande volume, a qualidade com que sai do sistema melhora (S2d), uma vez que, considerando que é assumida uma fração fixa de perdas das substâncias aplicadas no cultivo, os poluentes acabam lixiviando de uma forma mais diluída.

#### 4.5 PEGADA HÍDRICA x ICV DO USO DA ÁGUA

Além da determinação da Pegada Hídrica do biodiesel de soja e a produção de um ICV voltado ao uso da água, a proposta deste estudo também inclui a comparação entre estas duas metodologias. A partir disso, objetiva-se esclarecer alguns aspectos e verificar a aplicabilidade das mesmas, de maneira que se possa contribuir para melhorar o conhecimento e o desenvolvimento dos estudos de avaliação da utilização dos recursos hídricos. Dessa forma, neste subitem serão discutidas algumas características importantes da Pegada Hídrica e do ICV do uso da água, com base nos resultados obtidos anteriormente e em outras publicações pesquisadas.

##### 4.5.1 Quantificação da Água Verde

Uma das principais diferenças entre os resultados encontrados para a Pegada Hídrica e o ICV é referente à inclusão da Água Verde. O ponto central das discussões realizadas pela comunidade científica especializada é focado no significado prático da quantificação deste elemento. Muitos pesquisadores da área de ACV (BAYART *et al.*, 2010; MILÁ I CANALS *et al.*, 2009; PFISTER e HELLWEG, 2009), por estarem preocupados exclusivamente com a avaliação de impactos ambientais, recomendam não contabilizar o consumo de água da chuva

pelo cultivo agrícola, uma vez que, caso não existisse a cultura, este consumo ocorreria de qualquer maneira pela vegetação natural e, portanto, não causa impacto direto sobre a disponibilidade de água útil para outras finalidades.

No entanto, este tipo de abordagem tende a desvalorizar a água da chuva como potencial recurso hídrico em diversos aspectos. Uma das principais questões está relacionada à competição entre diferentes tipos de cultivos e suas finalidades, como a produção de alimentos e de bioenergia. Isso porque, com a crescente demanda por estes recursos, as áreas que possuem grandes potenciais de precipitação e, conseqüentemente, boa produtividade agrícola se tornarão cada vez mais escassas e, dessa forma, a ocupação destas com cultivos energéticos poderá diminuir a disponibilidade de água da chuva para culturas alimentícias (HOEKSTRA *et al.*, 2009). Portanto, dentro do contexto da avaliação de impactos ambientais, este tipo de consumo pode apresentar grande importância, uma vez que se o mesmo ocorrer de forma intensa em uma região ou país com pouco potencial de precipitação e baixo poder econômico de compensação (importação de recursos, desenvolvimento de novas tecnologias, etc.), poderão ser provocados impactos sobre a saúde humana tanto de forma direta, com a diminuição da disponibilidade de alimentos, como de maneira indireta, pela necessidade do emprego da irrigação e a conseqüente diminuição dos recursos hídricos prontamente disponíveis (Água Azul).

Por fora da questão específica de impactos ambientais, também nota-se que apenas com a inclusão da Água Verde é que se pode ter um indicativo consistente da quantidade real de água que é necessária para sustentar uma certa cadeia produtiva. Como um bom exemplo deste aspecto, pode ser mencionado o resultado obtido no ICV gerado no presente estudo, onde apenas os 7,8 litros de uso consuntivo não indicam, de nenhuma forma, que este baixo consumo de água na produção do biodiesel de soja só é possível se houver a ocupação de áreas com bom potencial de precipitação.

Além disso, os resultados da Água Verde também proporcionam a possibilidade de realizar estimativas que relacionam o aumento no consumo de água da chuva, decorrente de cenários de expansão de mercado, e o potencial de uma determinada região em suportar tal crescimento na demanda. Este tipo de avaliação pode ser realizada, por exemplo, para o biodiesel de soja, utilizando o resultado da Água Verde deste estudo para estimar o quanto será consumido a mais de água, se for instituído o aumento para 10% na mistura com o diesel comum e depois comparar com os potenciais de precipitação e produtividade da região estudada e de outras com características semelhantes.

Outra maneira de se utilizar as informações fornecidas pela Água Verde é realizar comparações de eficiência do uso da água entre duas culturas produzidas para uma mesma

finalidade. Assim, em uma determinada região, é possível verificar qual oleaginosa consome menos água na produção de um litro de biodiesel.

Diante destas questões, sugere-se que em inventários de futuros estudos de ACV sejam incluídos dados referentes ao consumo de água da chuva, assim como ocorre em estudos de Pegada Hídrica. Além disso, com o intuito de incluí-los em análises de impactos ambientais, também devem ser realizadas pesquisas que desenvolvam fatores de caracterização diferenciados para este tipo de fluxo.

#### 4.5.2 Água Cinza x Uso Degradativo

Outra grande diferença entre os resultados obtidos para a Pegada Hídrica e o ICV, foram os valores de uso da água pela poluição gerada no ciclo de vida, onde o primeiro, com 11688 litros (Água Cinza), obteve um volume muito superior ao segundo, que atingiu 260 litros (Uso degradativo). Isso ocorreu, obviamente, pela diferença do método de quantificação, pois enquanto o uso degradativo mensura os volumes reais de efluentes lançados em cada etapa, a Água Cinza expressa um indicativo volumétrico da quantidade de água necessária para diluir as emissões de poluentes.

De fato, os dois métodos possuem limitações consideráveis. Na Água Cinza, existe uma grande tendência em superestimar a poluição hídrica, pois não considera o potencial de autodepuração dos corpos hídricos, que ocorre para alguns parâmetros que não são permanentes, como por exemplo, o consumo de oxigênio (DBO) pela degradação da matéria orgânica (BOULAY *et al.*, 2011b). O uso degradativo, por sua vez, tende a subestimar o volume de água poluída, pois considera as concentrações das substâncias presentes no efluente apenas para classificar os fluxos nas categorias de qualidade previamente estabelecidas e, portanto, não contabiliza os valores reais das mesmas, os quais, dependendo do caso, podem fazer com que um volume muito maior de água perca sua funcionalidade no momento em que atingem os corpos hídricos.

A partir destas observações, conclui-se que os dois métodos necessitam de refinamentos para que se tornem mais precisos. Com relação às informações disponibilizadas, a vantagem da Água Cinza é que esta fornece um perfil de quais poluentes são considerados críticos no ciclo de vida estudado, auxiliando no planejamento de quais medidas e ações devem ser adotadas para amenizar os problemas de poluição hídrica. Como exemplo disso, pode ser mencionado o resultado obtido no presente estudo, o qual indicou que o fósforo, derivado principalmente do emprego de fertilizante na fase agrícola, tem grande possibilidade de ser o principal poluente do ciclo de vida do biodiesel de soja. Portanto, na prática, isto

ressalta a importância de se investir na adoção de procedimentos de manejo na agricultura que minimizem a perda das substâncias aplicadas, como por exemplo, evitar o emprego excessivo de fertilizantes e em períodos próximos à ocorrência de precipitação, adotar medidas que diminuam a erosão do solo, entre outros.

Outro aspecto importante é que, conforme visto na revisão bibliográfica, o método da Água Cinza é semelhante à forma de quantificação adotada para a outorga qualitativa (diluição de efluentes), determinada na Resolução n.º 16/2001 do CNRH (CNRH, 2001). Dessa forma, a estimativa deste componente da Pegada Hídrica também pode ser útil para auxiliar na realização de previsões de demanda e na concessão destas autorizações pelos órgãos de gestão e controle dos recursos hídricos.

Além disso, também nota-se que a estrutura de quantificação da Água Cinza é mais flexível e adaptável às condições específicas da região estudada, uma vez que o valor da concentração máxima permitida, em que o cálculo se baseia, pode ser selecionada de acordo com a legislação vigente no local. Ao contrário disso, no uso degradativo os padrões de qualidade da água já estão previamente definidos com base em valores globais, o que muitas vezes não condiz com a situação particular da região estudada; entretanto, favorece uma melhor padronização dos resultados obtidos e, assim, permite a comparação de diferentes estudos.

Por outro lado, também é importante salientar que o método de quantificação adotado para o uso degradativo possui a vantagem de mostrar, com maior detalhamento, os volumes de água perdidos pela poluição hídrica para cada tipo de função exercida pela água. Dessa forma, este método possibilita que sejam realizados estudos específicos para um tipo de uso da água ou generalizados, de forma a se produzir um panorama dos usuários que são mais atingidos pela degradação da qualidade da água gerada em um determinado ciclo de vida.

#### 4.5.3 Gestão de Recursos Hídricos

Com relação à aplicação dos resultados fornecidos pela Pegada Hídrica e pelo ICV para as atividades de gestão dos recursos hídricos, pode-se dizer que, sem contar as diferenças mencionadas anteriormente, ambas as metodologias possuem grande aplicabilidade tanto no setor público como em empresas privadas. Através dos resultados deste estudo, por exemplo, foi possível identificar e mapear as etapas e regiões da cadeia produtiva do biodiesel em que ocorrem os usos mais intensivos da água e de que forma acontecem. A partir disso, as empresas envolvidas podem conhecer melhor a pressão exercida por suas atividades sobre os recursos hídricos e, assim, tomar decisões de gestão e agir de forma mais efetiva, com o

intuito de diminuir ou compensar estas interferências. Na prática, isto pode resultar na melhoria da performance das plantas industriais (ex.: a implantação do sistema de reaproveitamento de efluentes mencionado neste estudo), na aquisição de insumos que utilizam menos água em sua produção, no investimento em projetos de conservação e restauração das bacias hidrográficas que participam do ciclo de vida do produto (ex.: reflorestamento de matas ciliares), na elaboração de projetos de conscientização das partes envolvidas e da população sobre os desafios da água (ex.: incentivos às melhores práticas na agricultura), entre outros.

Especificamente para o poder público, as estimativas sobre o uso da água no ciclo de vida de produtos, como foi realizado no presente estudo, podem contribuir, principalmente, para a questão do planejamento na gestão dos recursos hídricos de uma determinada região. Isso porque, através do cruzamento de dados de uso da água específicos para os setores usuários (ex.: por unidade de produto fabricado) com outros dados de desenvolvimento econômico e político, é possível realizar previsões de crescimento na demanda de água e na poluição hídrica. Além disso, se forem adicionados dados sobre a disponibilidade hídrica da região, também é possível efetuar estudos envolvendo balanços hídricos atuais e futuros com a identificação de conflitos potenciais, que são informações essenciais na elaboração dos planos de recursos hídricos. Estes tipos de avaliações já foram realizadas nos estudos de Elena e Esther (2010), Dominguez-Faus *et al.* (2009) e Lienden (2009), os quais verificaram as futuras consequências da implementação de políticas de incentivos à produção de biocombustíveis em alguns países e no mundo.

Segundo Araújo (2010), os resultados fornecidos pela Pegada Hídrica podem ser úteis, inclusive, para o Plano Nacional de Recursos Hídricos, incluindo análises dos fluxos de água entre as Regiões Hidrográficas, a caracterização das unidades de gerenciamento e a quantificação e avaliação da Pegada Hídrica de alguns setores chave (ex.: setor hidrelétrico, agronegócios, etc.). Neste contexto, nota-se que os resultados do presente estudo podem ser utilizados como uma primeira aproximação da Pegada Hídrica do biodiesel brasileiro, que é um importante ramo do agronegócio, estando, atualmente, em plena expansão. Além disso, também podem contribuir para as análises de exportação e importação de água entre as Regiões Hidrográficas, uma vez que os principais fluxos encontrados foram discriminados conforme as bacias em que ocorrem.

#### 4.5.4 Avaliação de Impactos Ambientais

Além de avaliar o uso da água de forma quantitativa, este trabalho também teve como objetivo fornecer todos os dados necessários para a realização de um futuro estudo de avaliação de impactos ambientais. Com isso, primeiramente foi verificado que a Pegada Hídrica, apesar de ser uma metodologia consolidada, é focada apenas no fornecimento e na análise de dados quantitativos, uma vez que a maioria dos trabalhos que chegam à etapa de avaliação de impactos realizam apenas comparações entre a disponibilidade e a demanda de água (identificação de pontos críticos), sem mensurar os danos finais resultantes dos conflitos de uso da água identificados (CHAPAGAIN e ORR, 2008; KAMPMAN, 2007; OEL *et al.*, 2008).

Com relação à ACV, conforme foi previamente identificado na revisão bibliográfica, apesar do uso da água ter sido recentemente incluído no âmbito desta técnica, já existem diversas propostas de métodos de avaliação dos impactos (AICV) gerados pela diminuição da disponibilidade hídrica (BOULAY *et al.*, 2011b; MILÁ I CANALS *et al.*, 2009; MOTOSHITA *et al.*, 2008, 2011; PFISTER *et al.*, 2009; ZELM *et al.*, 2011). Nestes estudos, foi identificado que, apesar de serem empregadas fórmulas e procedimentos de cálculo diferentes, todos se baseiam nos mesmos tipos de dados, que devem ser coletados na fase de inventário, os quais são: os volumes de água consumida e degradada, a qualidade dos fluxos de entrada e saída da água (concentração dos principais poluentes), a fonte da água (superficial ou subterrânea) e a localização da atividade em que ocorre o uso da água.

A partir dessa avaliação, verificou-se que, apesar de alguns estudos indicarem a possibilidade de utilizar os dados fornecidos pela Pegada Hídrica em posteriores estudos de AICV (JESWANI e AZAPAGIC, 2011; RIDOUTT e PFISTER, 2010), apenas a Água Azul teria utilidade nos métodos desenvolvidos até o momento. Isso porque para a Água Verde e Cinza, ainda não foram criados fatores de caracterização, que permitam a avaliação dos impactos decorrentes destas formas de uso da água. Por outro lado, também foi verificado que o ICV do uso da água gerado no presente estudo fornece todas as informações necessárias para emprego das recentes metodologias de AICV desenvolvidas pela comunidade científica, uma vez que os resultados produzidos descrevem de forma clara a quantidade de água consumida (uso consuntivo) e descartada, descrevendo a qualidade com que a mesma é extraída e depois retorna ao corpo hídrico (uso degradativo) e, também, especificando a localização (bacia hidrográfica) destes fluxos e a fonte dos recursos hídricos.

## 5 CONCLUSÕES

Diante da necessidade cada vez maior de se avaliar de forma consistente o uso da água no ciclo de vida de produtos, o presente estudo concluiu seu objetivo principal de aplicar a Pegada Hídrica e a Análise do Ciclo de Vida para quantificar a apropriação de recursos hídricos na cadeia produtiva do biodiesel de soja. A partir disso, pelo fato de ser um assunto relativamente novo nesta área, principalmente no Brasil, também foi possível apresentar uma estrutura básica de dados a serem coletados para suprir a exigência deste tipo de avaliação, a qual pode servir como modelo para a realização de futuros estudos semelhantes.

Outro diferencial deste trabalho foi a aplicação do procedimento metodológico da Pegada Hídrica, tradicionalmente calculada considerando apenas o elo principal da cadeia produtiva, a todo o ciclo de vida estudado, através da inclusão das etapas de produção dos insumos, com o uso de bancos de dados comumente empregados em estudos de ACV. Por outro lado, também foram utilizados alguns procedimentos comuns de estudos de Pegada Hídrica para gerar o ICV do uso da água, como por exemplo, a simulação do balanço hídrico do solo para estimar o uso degradativo que ocorre no cultivo da soja.

Apesar da baixa disponibilidade de dados relacionados ao uso da água e das diversas suposições realizadas, foi possível obter um grande número de informações de fontes primárias, principalmente para o elo principal da cadeia produtiva analisada, que possibilitaram atingir resultados com certo grau de confiabilidade. Mesmo assim, observa-se que, para a utilização dos valores encontrados, devem ser levadas em conta todas as variáveis discriminadas ao longo do estudo.

Dito isso, alguns aspectos importantes podem ser destacados. Primeiramente, nota-se que, apesar das diferenças entre as duas metodologias, alguns resultados foram semelhantes, como por exemplo, o processo de cultivo agrícola obteve amplo predomínio nos valores encontrados para todo o ciclo de vida tanto pela poluição causada com a lixiviação do fósforo como pelo consumo de água da chuva pela cultura. Dessa forma, isso indica claramente que as ações de gestão e a elaboração de projetos que tenham o objetivo de minimizar a pressão sobre os recursos hídricos causada pela produção do biodiesel de soja poderão ser mais efetivas se forem focadas nesta fase e na bacia hidrográfica onde ocorre.

Outro ponto relevante é que a contabilização do uso da água na produção de insumos também apresentou resultados expressivos, principalmente na produção do fertilizante fosfatado, indicando a necessidade de considerá-los em avaliações do uso da água. Além disso, as duas metodologias apontaram que a principal forma de diminuição da

disponibilidade hídrica provocada pela cadeia produtiva do biodiesel de soja foi a degradação da qualidade da água.

A estimativa de cenários do emprego da irrigação, para evitar a quebra de safra em épocas de seca e elevar a produtividade do cultivo da soja, também apresentou resultados interessantes. O principal ponto a ser destacado é o grande volume de água que deverá ser extraído e consumido dos corpos hídricos para suprir a demanda da irrigação, indicando a necessidade de serem elaborados estudos mais detalhados de avaliação da capacidade da região em suportar este consumo e os seus consequentes impactos, antes de serem implementadas tais medidas.

Por fim, as principais diferenças e limitações das duas ferramentas foram apontadas, indicando a necessidade de se aprimorar a quantificação da poluição hídrica e de se incluir na ACV os aspectos referentes ao consumo de água da chuva pelos cultivos agrícolas. Também foi possível notar que, em termos práticos, a Pegada Hídrica é mais aplicável como um indicador para a gestão de recursos hídricos, apesar de ainda necessitar de alguns refinamentos. Quanto ao ICV produzido neste trabalho, pode-se concluir que este modelo fornece todos os dados necessários para a realização de futuros estudos de avaliação de impactos pelo uso da água, a partir das metodologias desenvolvidas até o momento.

## 6 RECOMENDAÇÕES

A partir das conclusões realizadas anteriormente, é possível apontar algumas recomendações para a realização de futuros estudos na área de avaliação do uso da água no ciclo de vida de produtos:

- Aplicar as metodologias da Pegada Hídrica e do ICV ao biodiesel de soja, aumentando a abrangência da coleta de dados referentes aos principais processos da cadeia produtiva e utilizando dados primários para a produção de insumos;
- Verificar, de forma mais precisa, as perdas de substâncias aplicadas na agricultura (ex.: pesticidas e fertilizantes) e a quantificação dos fluxos de água nesta fase, comparando com as simulações realizadas no presente estudo;
- Estimar a Pegada Hídrica do biodiesel, com a utilização de outras culturas oleaginosas e a substituição do metanol pelo etanol, e comparar com os resultados obtidos neste trabalho, a fim de verificar quais alternativas possuem maior eficiência no uso da água;
- Avaliar as consequências ao uso da água, frente a diferentes cenários de expansão da produção de biodiesel;
- Identificar pontos críticos do ciclo de vida do biodiesel de soja, através da comparação entre a disponibilidade hídrica das regiões envolvidas e o uso da água que ocorre nas mesmas;
- Utilizar os dados fornecidos pelo ICV gerado neste estudo para executar a avaliação dos impactos ambientais provocados pela diminuição da disponibilidade de água e comparar estes resultados com os outros tipos de impactos do ciclo de vida do biodiesel de soja.
- De forma geral, aprimorar as informações sobre o uso da água fornecidas pelos inventários tradicionalmente produzidos, utilizando o modelo empregado neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Capacidade Instalada da Indústria de Óleos Vegetais**. São Paulo: ABIOVE, 2011. Disponível em: [http://www.abiove.com.br/capacidade\\_br.html](http://www.abiove.com.br/capacidade_br.html). Acesso em: 25 de maio de 2011.

ABIOVE. **Complexo Soja – Evolução das Cotações Médias**. São Paulo: ABIOVE, 2012. Disponível em: [http://www.abiove.com.br/cotacoes\\_br.html](http://www.abiove.com.br/cotacoes_br.html). Acesso em: 15 de maio de 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ALDAYA, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. **Agricultural Systems**, vol. 103, p. 351-360, 2010.

ALLAN, J. A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In: **Priorities for water resources allocation and management**. London: ODA, p. 13-26, 1993.

ALLAN, J. A. Overall perspectives on countries and regions. In: ROGERS, P; LYDON, P. **Water in the Arab World**: perspectives and prognoses. Cambridge: Harvard University Press, p. 65-100, 1994.

ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper 56**. Rome: FAO, 1998.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: informe 2011. Brasília: ANA, 2011.

ANA. **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**: cadernos de recursos hídricos 2. Brasília: ANA, 2007.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. Rio de Janeiro, 2012a. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?id=472>. Acesso em: 15 de maio de 2012.

ANP. **Boletim Mensal de Biodiesel**: Maio de 2012. Brasília: ANP/SRP, 2012b.

ANP. **Resolução ANP n° 14, de 11 de maio de 2012**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília: ANP, 2012c.

ANP. **Leilões de Biodiesel**. Resultados de todos os leilões realizados até o 25°. Brasília: ANP, 2012d. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?dw=58013>>. Acesso em: 16 de abril de 2012.

ARAÚJO, A. Pegada Hídrica & Água Virtual: Quantificando a Apropriação dos Recursos Hídricos. In: SEMINÁRIO DIÁLOGO: ÁGUA E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, 2010, João Pessoa. **Documentos**, João Pessoa: SRHU/MMA e IPEA, 2010. Disponível em: <<http://www.cnrh.gov.br/seminario/aguaeconomia/docs.php>>. Acesso em: 05 de maio de 2012.

ÁVILA, A. M. H.; BERLATO, M. A.; SILVA, J. B.; FONTANA, D. C. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, vol. 02, p. 149-154, 1996.

BASSO, C. J. **Perdas de nitrogênio e fósforo com aplicação no solo de dejetos líquidos de suínos**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BAYART, J. B.; BULLE, C.; DESCHÊNES, L.; MARGNI, M.; PFISTER, S.; VINCE, F.; KOEHLER, A. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 15, p. 439-453, 2010.

BERGER, M.; FINKBEINER, M. Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? **Sustainability**, v. 2, p. 919-944, 2010.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña**: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003.

BERNDES, G. Bioenergy and water – the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. **Global Environmental Change**, vol. 12, p. 253-271, 2002.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; FAVARETTO, N.; LANA, M. C. Phosphorus loss by surface runoff in no-till system under mineral and organic fertilization. **Scientia Agricola**, v. 67, n.1, p. 71-77, 2010.

BOULAY, A. M.; BOUCHARD, C.; BULLE, C.; DESCHÊNES, L.; MARGNI, M. Categorizing water for LCA inventory. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 16, 2011a.

BOULAY, A. M.; BULLE, C.; BAYART, J. B.; DESCHÊNES, L.; MARGNI, M. Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. **Environmental Science & Technology**, vol. 45, p. 8948-8957, 2011b.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório Florestal 2009**. São Paulo: BRACELPA, 2009.

BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUCA, S. J.; NOGUEIRA, V. P. Q.; PORTO, M. F. A. **Hidrologia Ambiental**. São Paulo: Ed. da USP, v. 03, 1991.

BRASIL. **Lei n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 1997.

BRASIL. **Lei n.º 11.097, de 13 de janeiro de 2005.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2005. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm)>. Acesso em: 18 de maio de 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil.** Volume 1. Brasília: MMA/SRH, 2006.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Portal do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel.** Brasília: MCTI, 2011a. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 18 de maio de 2011.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Secretaria de Acompanhamento Econômico (SEAE). **Panorama do mercado de fertilizantes:** Maio/2011. Brasília: MF/SEAE, 2011b.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Secretaria de Comércio Exterior (SECEX). **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior via Internet (AliceWeb).** Versão 2. Brasília: MDIC/SECEX, 2012. Disponível em: <<http://aliceweb2.mdic.gov.br/>>. Acesso em: 30 de maio de 2012.

BRENTROP, F.; KÜSTERS, J.; KUHLMANN, H.; LAMMEL, J. Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers. **European Journal of Agronomy**, vol. 14, p. 221-233, 2001.

CAMPOS, N.; STUDART, T. Políticas das águas. In: **Gestão das águas: princípios e práticas.** Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 25-38.

CASAGRANDE, E. F. Jr.; AGUDELO, L. P. P. **Conceito de construção sustentável, ecoprodutos, ecotecnologias e rotulagem ambiental.** Curitiba: II Eco Arq., 2009.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Consulta por Aquíferos Monitorados** São Paulo: CETESB, 2006. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/Qualidade-da-gua-Subterr?nea/9-Consulta-por-Aquifero-Monitorado>>. Acesso em: 20 de abril de 2012.

CETESB. **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2011.** Série Relatórios. São Paulo: CETESB, 2012. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: 25 de abril de 2012.

CHAPAGAIN, A. K. **Globalization of water: opportunities and threats of virtual water trade.** Dissertation (Doctorate). Delft University of Technology and the Academic Board of the UNESCO-IHE, Delft, 2006.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products.** Value of Water Research Report Series No. 13. Delft: UNESCO/IHE, 2003.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Water footprint of nations: main report.** Volume 01. Value of Water Research Report Series No. 16. Delft: UNESCO/IHE, 2004.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. **Ecological Economics**, vol. 64, p. 109-118, 2007.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics**, vol. 70, p. 749-758, 2011.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y.; SAVENIJE, H. H. G.; GAUTAM, R. The water footprint of cotton production: An assessment of the impacts of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. **Ecological Economics**, vol. 60, p. 186-203, 2006.

CHAPAGAIN, A. K.; ORR, S. **UK Water Footprint: the impact of the UK's food and fibre consumption on global water resources**. Volume 01. Godalming: WWF-UK, 2008.

CHAPAGAIN, A. K.; ORR, S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. **Journal of Environmental Management**, vol. 90, p. 1219-1228, 2009.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CHIU, Y.; WALSETH, B.; SUH, S. Water Embodied in Bioethanol in the United States. **Environmental Science & Technology**, vol. 43, no. 8, p. 2688-2692, 2009.

CHRISTOFIDIS, D. **Recursos Hídricos e Irrigação no Brasil**. Brasília: CDS/UnB, 1999.

CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução Nº 16, de 08 de maio de 2001**. Brasília, 2001.

COAMB – COOPERATIVA DE CONSULTORIA E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. **Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais e Subterrâneas: Relatório Final**. Porto Alegre: SEMA/FEPAM/DRH, 2005.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos – Safra 2011/2012**. Nono levantamento – junho de 2012. Brasília: Conab, 2012.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, 2005.

CUNHA, G. R.; BARNI, N. A.; HASS, J. C.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. **Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. 9, n. 03, p. 446-459, Passo Fundo, 2001.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1992. p. 85-97.

DABROWSKI, J. M.; MURRAY, K.; ASHTON, P. J.; LEANER, J. J. Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions. **Ecological Economics**, v. 68, p. 1074-1082, 2009.

DALGAARD, R.; HALBERG, N.; KRISTENSEN, I. S.; LARSEN, I. Modeling representative and coherent Danish farm types based on farm accountancy data for use in environmental assessment. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 117, n. 4, p. 223-237, 2006.

DAL ZOT, F. **Biodiesel no Rio Grande do Sul: um modelo para sua distribuição e localização de usinas**. Dissertação (Mestrado em Administração). Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DASTANE, N. G. Effective rainfall and irrigated water requirements. **Irrigation and Drainage Paper 25**. Rome: FAO, 1974.

DOMINGUEZ-FAUS, R.; POWERS, S. E.; BURKEN, J. G.; ALVAREZ, P. J. The Water Footprint of Biofuels: A Drink or Drive Issue? **Environmental Science & Technology**, vol. 43, n. 9, p. 3005-3010, 2009.

EBB – EUROPEAN BIODIESEL BOARD. **Statistics: The EU biodiesel industry**. Bruxelles: EBB, 2011. Disponível em: <http://www.ebb-eu.org/stats.php>. Acesso em: 21 de maio de 2011.

ECOINVENT CENTRE. **Ecoinvent Database**. Versão 2.2. St. Gallen, Switzerland: Ecoinvent Centre, 2010. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/database/>>. Acesso em: jan. - abr./2012.

EEC – ECONOMIC EUROPEAN COMMUNITY. Council Directive of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States. 75/440/EEC. **Official Journal of the European Communities**, n. 194/26, 1975.

ELENA, G. C.; ESTHER, V. From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain. **Energy Policy**, vol. 38, p. 1345-1352, 2010.

EMATER/RS – EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Série Histórica Soja – Rendimento Médio**. Porto Alegre: EMATER/GPL/NIP, 2011. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/servicos/serie.php#soja>>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2012.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistemas de Produção 13: Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja, 2008.

EMBRAPA. **Soja: Diferentes usos do grão**. Distrito de Warta: Embrapa Soja, 2011. Disponível em: [http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op\\_page=25&cod\\_pai=29](http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=25&cod_pai=29)>. Acesso em: 10 de abril de 2011.

EMBRAPA. **Mapas de Variáveis Climáticas**. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, Laboratório de Agrometeorologia, 2012. Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/>>. Acesso em: 15 de março de 2012.

EMMENEGGER, M. F.; PFISTER, S.; KOEHLER, A.; GIOVANETTI, L. de; ARENA. A. P.; ZAH, R. Taking into account water use impacts in the LCA of biofuels: an Argentinean case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, p. 869-877, 2011.

ENGEPLUS. **Relatório Técnico 3 – Consolidação do Diagnóstico RT3**: Elaboração de serviço de consultoria relativo ao processo de planejamento dos usos da água nas bacias hidrográficas dos rios Turvo-Santa Rosa-Santo Cristo – Enquadramento. Porto Alegre: SEMA/DRH, 2011.

EPRI – ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants**. Palo Alto: EPRI; Sacramento: California Energy Commission, 2003.

ERCIN, A. E.; ALDAYA, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. **Ecological Indicators**, vol. 18, p. 392-402, 2012.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Proportion of renewable water resources withdrawn (MDG water indicator)**. AQUASTAT, 2008. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/globalmaps/02\\_PCT\\_RWR.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/globalmaps/02_PCT_RWR.pdf)>. Acesso em: 26 de março de 2011.

FAO. **Global tables**. AQUASTAT, 2010. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/AquastatWorldDataEng\\_20101129.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/dbase/AquastatWorldDataEng_20101129.pdf)>. Acesso em: 04 de abril de 2011.

FAO. **CROPWAT 8.0**. Water Development and Management Unit/FAO, 2011. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_cropwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html)>. Acesso em: 05 de maio de 2011.

FEPAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIS ROESSLER/RS. **Processo Administrativo nº 1781-0567/07-0**. Porto Alegre: FEPAM, 2007.

FEPAM. **Processo Administrativo nº 7947-0567/08-7**. Porto Alegre: FEPAM, 2009.

FEPAM. **Processo Administrativo nº 6032-0567/10-2**. Porto Alegre: FEPAM, 2010.

FEPAM. **Processo Administrativo nº 2854-0567/11-6**. Porto Alegre: FEPAM, 2011.

FEPAM. **Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Caí – 1992 a 2011**. Porto Alegre: Departamento de Qualidade Ambiental/FEPAM, 2012a. Disponível em: <[http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade\\_cai/cai.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_cai/cai.asp)>. Acesso em: 20 de março de 2012.

FEPAM. **Dados brutos de monitoramento da qualidade da água do rio Jacuí**. Porto Alegre: Departamento de Qualidade Ambiental/FEPAM, 2012b.

FERNANDES, E.; GLÓRIA, A. M. S.; GUIMARÃES, B. A. O Setor de Soda-Cloro no Brasil e no Mundo. **BNDES Setorial**, n. 29, p. 279-320, Rio de Janeiro, 2009.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Drenagem interna e lixiviação de nitrato em um latossolo sob sucessão milho-braquiária-milho, com diferentes doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, p. 1163-1173, 2009.

FERRÃO, P. **Ecologia Industrial: princípios e ferramentas**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2009.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. da S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, vol. 28, n. 01, p. 19-23, 2005.

FERREIRA, M. I. P.; SILVA, J. A. F. da; PINHEIRO, M. R. C. **Políticas Públicas e Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 2, n. 2. Campos dos Goytacazes, RJ, 2008.

FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE. **Production, Supply and Distribution Online**. Washington: United States Department of Agriculture, 2012. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>>. Acesso em: 29 de abril de 2012.

FRAITURE, C. de; CAI, X.; AMARASINGHE, U.; ROSEGRANT, M.; MOLDEN, D. **Does international cereal trade save water? The impact of virtual water trade on global water use**. Comprehensive Assessment Research Report 4. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat, 2004.

FRAITURE de, C.; GIORDANO, M.; LIAO, Y. Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. **Water Policy**, v. 10, supplement 1, p. 67-81, 2008.

GALLOPÍN, G. C.; RIJSBERMAN, F. Three Global Water Scenarios. **International Journal of Water**, vol. 1, 2000.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 65-73, Santa Maria, 2009.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. **The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize**. Value of Water Research Report Series No. 38. Delft: UNESCO/IHE, 2009.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. **Burning water: The water footprint of biofuel-based transport**. Value of Water Research Report Series No. 44. Delft: UNESCO/IHE, 2010.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. **Environment International**, vol. 40, p. 202-211, 2012.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER van der, T. H. The water footprint of bioenergy. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, v. 106, n. 25. 2009a.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER van der, T. H. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, vol. 68, p. 1052-1060, 2009b.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER van der, T. H. **Water footprint of bioenergy and other primary energy carriers**. Value of Water Research Report Series No. 29. Delft: UNESCO/IHE, 2008.

GERPEN van, J. Biodiesel processing and production. **Fuel Processing Technology**, vol. 86, p. 1097-1107, 2005.

GOES, T.; ARAÚJO de, M.; MARRA, R. **Biodiesel e sua Sustentabilidade**. Artigos Técnicos 2010. Brasília: Embrapa, 2010.

GOLLO, S. S.; MEDEIROS, J. F.; CRUZ, C. M. L.; CASTRO de, A. W. V.; PAZZINATO, A. P. Configuração da cadeia produtiva do biodiesel, a partir da matéria-prima soja, no Rio Grande do Sul/Brasil. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 48º, 2010, Campo Grande. **Anais...** Passo Fundo: UPF, 2010.

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação**. 2ª Edição. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997.

HESS, T. Estimating Green Water Footprints in a Temperate Environment. **Water**, vol. 2, p. 351-362, 2010.

HOEKSTRA, A. Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. **Ecological Economics**, vol. 68, p. 1963-1974, 2009.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEM, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard**. London: Earthscan, 2011.

HOEKSTRA, A. Y.; GERBENS-LEENES, P. W.; MEER van der, T. H. Reply to Pfister and Hellweg: Water footprint accounting, impact assessment and life cycle assessment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, vol. 16, n. 40, 2009.

HOEKSTRA, A. Y.; HUNG, P. Q. **Virtual Water Trade: A quantification of virtual water flows between nations in to international crop trade**. Value of Water Research Report Series No. 11. Delft: UNESCO/IHE, 2002.

HOEKSTRA, A. Y.; HUNG, P. Q. Globalization of water resources: international virtual flows in relation to crop trade. **Global Environmental Change**, vol. 15, p. 45-56, 2005.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M. The water footprint of humanity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, vol. 12, n. 9, p. 3232-3237, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2009/default.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2009/default.shtm)>. Acesso em: 18 de junho de 2011.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil – Junho de 2011, vol. 24, n. 06, p. 1-81. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Rio de Janeiro). **Monitoramento da Qualidade da Água**. Rio de Janeiro: INEA, 2011. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/fma/qualidade-agua.asp>>. Acesso em: 14 de abril de 2012.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de dados das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) Agrometeorológicas**. São José dos Campos: SINDA/INPE. Disponível em: <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>. Acesso em: 11 de maio de 2012.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Reference Manual (Volume 3). Paris: IPCC/OECD/IEA, 1996.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO / TR 14047**: Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042. Geneva: ISO, 2003.

JESWANI, H. K.; AZAPAGIC, A. Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. **Journal of Cleaner Production**, p. 1-12, 2011.

JOBIM, C. I.; LOUZADA, J. A. Avaliação de desempenho do modelo ISAREG de simulação de balanço hídrico. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 15, n. 2, p. 85-183, Porto Alegre, 2009.

KAMPMAN, D. A. **The water footprint of India**: A study on water use in relation to the consumption of agricultural goods in the Indian states. Thesis report (Master in Civil Engineering and Management). Department of Water Engineering & Management, University of Twente, Enschede, 2007.

KHALIL, C. N. As tecnologias de produção de biodiesel. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coords.). **O Futuro da Indústria: Biodiesel**. Coletânea de Artigos, Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, n.14. Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006. p. 83-90.

KING, C. W.; WEBBER, M. E. Water Intensity of Transportation. **Environmental Science & Technology**, vol. 42, no. 21, p. 7866-7872, 2008.

KLADIVKO, E. J.; FRANKENBERGER, J. R.; JAYNES, D. B.; MEEK, D. W.; JENKINSON, B. J.; FAUSEY, N. R. Nitrate Leaching to Subsurface Drains as Affected by Drain Spacing and Changes in Crop Production System. **Journal of Environmental Quality**, v. 13, 2004.

KNOTHE, G.; GERPEN van, J.; KRAHL, J. **The Biodiesel Handbook**. Champaign: AOCS Press, 2005.

KOEHLER, A. Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 13, p. 451-455, 2008.

KOHLI, A.; FRENKEN, K.; SPOTTORNO, C. **Disambiguation of Water Use Statistics**. FAO/AQUATAST, 2010.

LANNA, A. E. L. Gestão dos recursos hídricos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 1993. p. 734-743.

LANNA, A. E. L. Introdução. In: PORTO, R. L. (Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento dos recursos hídricos**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1997a. p. 16-20.

LANNA, A. E. L.; PEREIRA, J.; SILVA, L. Análise de critérios de outorga de direitos de uso da água. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 1997, Vitória. **Anais...** Vitória: ABRH, 1997b.

LEEUEWESTEIN, J. M.; MONTEIRO, R. A. **Procedimentos Técnicos para Enquadramento de Corpos de Água**: Documento Orientativo. Brasília: MMA, 2001.

LIENDEN van, A. R. **Energy Scenarios in a Water Perspective**: changes in water footprints related to energy transitions. Thesis report (Master in Civil Engineering and Management). Department Water Engineering & Management, University of Twente, Enschede, 2009.

LOUZADA, J. A. **Simulação da Irrigação por Inundação e da Drenagem nos Solos de Várzea do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2004.

MACIEL, C. D. de G.; POLETINE, J. P.; PEREIRA, J. C.; MONDINI, M. L. Avaliação da Qualidade de Sementes de Soja (*Glycine max* (L.) Merrill) Cultivar IAC-18. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Publicação Científica da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal de Garça, Ano IV, n. 07, Garça, 2005.

MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja**: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. Londrina: EMBRAPA Soja, 2001.

MARCOLIN, C. D. **Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto**. Tese (Doutorado em Agronomia). Passo Fundo: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, 2009.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Porto Alegre: Faculdade de Agronomia, UFRGS, 2007.

MATZENAUER, R.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, 2003.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MALUF, J. R. T.; BARNI, N. A.; BUENO, A. C.; DIDONE, I. A.; ANJOS, C. S.; MACHADO, F. A.; SAMPAIO, M. R. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Boletim Técnico n° 10. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002.

MEDRANO, M. F. **Avaliação da Sustentabilidade do Biodiesel de Soja no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Política e Gestão Ambiental). Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MEEKEREN van, B. T. **The Water Footprint of Bioenergy**. Thesis Report (Doctorate in Civil Engineering & Management). Faculty of Engineering Technology, University of Twente, Enschede, 2008.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **The green, blue and grey water footprint of crops and derived crops products: main report**. Volume 1. Value of Water Research Report Series No. 47. Delft: UNESCO/IHE, 2010.

MELLO, C. A.; MACIEL, A. J. S.; ALBIERO, D.; RIBEIRO, A. I. Estimativa da área necessária na produção da soja objetivando a sustentabilidade energética utilizando o biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 2., 2005, Varginha. **Anais...** Varginha: Universidade Federal de Lavras, 2005.

MEZOMO, A. M. **A Qualidade das Águas como Subsídio para a Gestão Ambiental**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

MILÀ I CANALS, L.; CHENOWETH, J.; CHAPAGAIN, A.; ORR, S.; ANTÓN, A.; CLIFT, R. Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I – inventory modelling and characterization factors for the main impact pathways. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 14, p. 28-42, 2009.

MISHRA, G. S.; YEH, S. Life Cycle Water Consumption and Withdrawal Requirements of Ethanol from Corn Grain and Residues. **Environmental Science & Technology**, vol. 45, n. 10, p. 4563-4569, 2011.

MOLDEN, D. (Coord.). **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. London: Earthscan; Colombo: International Water Management Institute, 2007.

MORRISON, J.; SCHULTE, P.; SCHENCK, R. **Corporate Water Accounting: An Analysis of Methods and Tools for Measuring Water Use and Its Impacts**. Oakland: Pacific Institute; New York: UN Global Compact, 2010.

MOTOSHITA, M.; ITSUBO, N.; INABA, A. Development of impact assessment method on health damages of undernourishment related to agricultural water scarcity. In: International Conference on EcoBalance, 8°, 2008, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 2008.

MOTOSHITA, M.; ITSUBO, N.; INABA, A. Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 16, p. 65-73, 2011.

NAE – NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Biocombustíveis**. Cadernos NAE, Número 02. Brasília: NAE/SECOM, 2004.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Water Implications of Biofuels Production in the United States**. Washington: The National Academy Press, 2008.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. **Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production System**. Final report ecoinvent v2.0 n° 15. Zurich: Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station (ART); Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

OEL van, P. R.; MEKONNEM, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **The external of water footprint of the Netherlands: quantification and impact assessment**. Value of Water Research Report Series No. 33. Delft: UNESCO/IHE, 2008.

OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F. Irrigação e recursos hídricos. **Artigos Técnicos**. EMBRAPA, 2004. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2000>>. Acesso em: 29 de março de 2011.

OROS, D. R.; WERNER, I. **Pyrethroid Insecticides: An Analysis of Use Patterns, Distributions, Potential Toxicity and Fate in the Sacramento-San Joaquin Delta and Central Valley**. White Paper for the Interagency Ecological Program. Oakland: San Francisco Estuary Institute; Davis: University of California, 2005.

PARENTE, E. J. de S. **Biodiesel: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**. Fortaleza, 2003.

PATE, R.; HIGHTOWER, M.; CAMERON, C.; EINFELD, W. **Overview of energy-water interdependencies and the emerging energy demands on water resources**. Albuquerque, Novo México: Sandia National Laboratories, 2007.

PAULA de, S. R.; FAVARET FILHO, P. **Panorama do Complexo Soja**. Rio de Janeiro: BNDES, n. 8, p. 119-152, 1998.

PE INTERNATIONAL. **GaBi Software for Product Sustainability Performance and Databases**. Versão 4.4. Leinfelden-Echterdingen: PE International, 2011.

PERES, J. R. R.; BELTRÃO, N. E. de M. Oleaginosas para biodiesel: situação atual e potencial. In: FERREIRA, J. R.; CRISTO, C. M. P. N. (Coords.). **O Futuro da Indústria: Biodiesel**. Coletânea de Artigos – Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior – 14. Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006. p. 67-82.

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.. **Petrobras e Agricultura Familiar: Plantando sementes e produzindo biodiesel na Bahia**. 2 ed. Salvador: Gerência Executiva de Desenvolvimento Energéticos da Área de Negócios de Gás e Energia, 2009.

PETROBRAS. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ: n° BR0109. Óleo Diesel S500**. Rio de Janeiro: PETROBRAS S.A., 2011.

PFISTER, S.; HELLWEG, S. The water “shoesize” vs. footprint of bioenergy. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, vol. 106, n. 35, p. 93-94, 2009.

PFISTER, S.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. **Environmental Science & Technology**, vol. 43, n. 11, p. 4098-4104, 2009.

POWERS, S. E. Nutrient Loads to Surface Water from Row Crop Production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 6, p. 399-407, 2007.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. dos S.; SILVA, D. D. da. **Escoamento Superficial**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2006.

QUANTIS. **Water footprinting in life cycle assessment**: State of the science and framework to assess impacts of water use in life cycle assessment. Version 1.0. Lausanne: 2010.

RANDALL, G. W.; VETSCH, J. A. Nitrate Losses in Subsurface Drainage from a Corn-Soybean Rotation as Affected by Fall and Spring Application of Nitrogen and Nitrpyrin. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, 2005.

RATHMANN, R.; SILVEIRA da, S. J. C.; SANTOS, O. I. B. Governança e configuração da cadeia produtiva do biodiesel no Rio Grande do Sul. **Revista Extensão Rural**, UFSM, Santa Maria, Ano XV, p. 69-101, 2008.

REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21<sup>ST</sup> CENTURY. **Renewables 2011**: global status report. Paris: REN21 Secretariat, 2011.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 34. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2006/2007**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 37. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2009/2010**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

RIBEIRO, F. de M. **Inventário do ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: primeira aproximação**. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

RIDOUTT, B. G.; EADY, S. J.; SELLAHEWA, J.; SIMONS, L.; BEKTASH, R. Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges. **Journal of Cleaner Production**, vol. 17, p. 1228-1235, 2009.

RIDOUTT, B. G.; PFISTER, S. A. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. **Global Environmental Change**, vol. 20, p. 113-120, 2010.

RIDOUTT, B. G.; SANGUANSRI, P.; FREER, M.; HARPER, G. S. Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 165-175, 2012.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). Departamento de Recursos Hídricos. **Relatório Anual Sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul**. Edição 2007/2008. Porto Alegre: SEMA/DRH, 2008a.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria de Planejamento, Gestão e Participação Cidadã (SEPLAG). Departamento de Planejamento Governamental (DEPLAN). **Mapa da Produção de Soja no RS – 2004 a 2006**. Porto Alegre: SEPLAG/DEPLAN, 2008b.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). **Zoneamento Ambiental da Silvicultura**: estrutura, metodologia e resultados. Porto Alegre: SEMA, 2010.

ROCHA, T. B. **Harmonização de Inventários de Ciclo de Vida de Biocombustíveis do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SALLABERRY, R. R. **Emprego da Avaliação do Ciclo de Vida para Levantamento dos Desempenhos Ambientais do Biodiesel de Girassol e do Óleo Diesel**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, S. C. G.; MENEZES, J. F. S.; BENITTES, V. M. Lixiviação de nitrogênio em um Latossolo Vermelho cultivado com soja após aplicação de dejetos líquidos de suínos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ANIMAIS, 1., 2009, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SIGERA, 2009, p. 338-344.

SCHUCHARDT, U.; RIBEIRO, L. M.; GONÇALVES, A. R. A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria-prima?. **Química Nova**, vol. 24, n. 02, p. 247-251, 2001.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Biodiesel**. Brasília: SEBRAE Agroenergia, 2007.

SELIM, H. M.; BENGTON, R. L.; ZHU, H.; RICAUD, R. **Runoff losses of Atrazine, Metribuzin, and nutrients as affected by management practices for sugarcane**. Bulletin Number 875, Louisiana Agricultural Experiment Station, Louisiana Agricultural Center, Baton Rouge, 2000.

SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; PEIXOTO, P. P. P.; SOUZA, C. M. A.; CARVALHO, D. F. de. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 654-665, Jaboticabal, 2008.

SHARPLEY, A. N.; HALVORSON, A. D. The management of soil phosphorus availability and its transport in agricultural runoff. In: LAL, R.; STEWART, B. A. (edit.) **Soil processes and water quality**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994.

SHIPITALO, M. J.; MALONE, R. W.; OWENS, L. B. Impact of Glyphosate-Tolerant Soybean and Glufosinate-Tolerant Corn Production on Herbicide Losses in Surface Runoff. **Journal of Environmental Quality**, v. 37, 2008.

SILVA, D. D. da (Coord.). **Desenvolvimento de Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil**: relatório final dos coeficientes técnicos de recursos hídricos das atividades industrial e agricultura irrigada. Relatório Técnico 6. Brasília: MMA/FBB/FUNARBE, 2011.

SILVA, R. M.; GIULIETTI, M. Fosfogesso: Geração, Destino e Desafios. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Ed.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 07, p. 125-144.

SINDICALC – SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CALCÁRIO NO RIO GRANDE DO SUL. **Mapa das Jazidas**. Porto Alegre: SINDICALC. Disponível em: <<http://www.calcarior-s.com.br/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2012.

SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

STOESSEL, F.; JURASKE, R.; PFISTER, S.; HELLWEG, S. Life Cycle Inventory and Carbon and Water FoodPrint of Fruits and Vegetables: Application to a Swiss Retailer. **Environmental Science e Technology**, v. 46, p. 3253-3262, 2012.

SVOBODOVA, Z.; LLOYD, R.; MACHOVA, J.; VYKUSOVA, B. **Water Quality and Fish Health**. EIFAC Technical Paper 54. Rome: FAO, 1993.

TAIWAN EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION ADMINISTRATION. **Surface Water Classification and Water Quality Standards**. Taipei: R. O. C. (Taiwan) Environmental Law Library, 1998. Disponível em: <<http://law.epa.gov.tw/en/laws/309417667.html>>.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 2004.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service (SCS). **National Engineering Handbook: Chapter 2 Irrigation Water Requirements**. Washington: USDA/SCS, 1993.

USDE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy Demands on Water Resources: Report to Congress on the Interdependency of Energy and Water**. Washington: USDE, 2006.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Ilustração do Ciclo da Água**. 2011. Traduzido por Maria Helena Alves, Instituto da Água, Portugal. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguesehi.html>>. Acesso em: 26 de março de 2011.

VALE FERTILIZANTES S.A. Fact Sheet. São Paulo: Vale S.A., 2011. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com/relacoes/apresentacoes.asp>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2012.

WANG, M. Q. **REET 1.5 – transportation fuel-cycle model – Vol. 1: methodology, development, use and results**. Argonne: Argonne National Laboratory, 1999.

WFN – WATER FOOTPRINT NETWORK. **Glossary**. Enschede: WFN, University of Twente, 2011. Disponível em: <<http://www.waterfootprint.org/index.php?page=files/Glossary>>. Acesso em: 10 de março de 2011.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ecosystems and human well-being: health synthesis, a report of Millennium Ecosystems Assessment**. Geneva: WHO, 2005.

WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater:** Wastewater use in agriculture. Volume 2. Geneva: WHO Press, 2006.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality:** third edition incorporating the first and second addenda. Volume 1. Geneva: WHO Press, 2008.

WOMACH, J. (Coord.). **Agriculture: A Glossary of Terms, Programs, and Laws:** 2005 Edition. CRS Report for Congress. Washington: Congressional Research Service – The Library of Congress, 2005.

WWAP - WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations World Water Development Report 3:** Water in a Changing World. Paris: UNESCO; London: Earthscan, 2009.

YANG, H.; WANG, L.; ABBASPOUR, K. C.; ZEHNDER, A. J. B. Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, p. 443-454, 2006.

ZELM van, R.; SCHIPPER, A. M.; ROMBOUTS, M.; SNEPVANGERS, J.; HUIJBREGTS, M. A. Implementing groundwater extraction in life cycle impact assessment: characterization factors based on plant species richness for The Netherlands. **Environmental Science & Technology**, vol. 45, n. 2, p. 629-635, 2011.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Dados relacionados à metodologia do uso degradativo no ICV do uso da água.

Tabela A.1 – Limites de concentração dos parâmetros de qualidade da água, por tipo de uso da água, incluindo as referências das fontes dos dados.

(continua)

Parâmetro	Unidade	Agricultura 1	Agricultura 2	Pesca	Doméstico 1	Doméstico 2	Doméstico 3	Recreação	Refrigeração
SST <sup>(a)</sup>	mg/L	100 (WHO06, TAI98)	100 (WHO06, TAI98)	40 (TAI98)	25 (TAI98, EEC75)			25 (TAI98)	300 (EPRI03)
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L			5 (FAO93, TAI98)	5 (EEC75)	5 (EEC75)	20 (EEC75)	5 (EEC75)	
Nitrogênio Total	mg N/L	30 (WHO06)	30 (WHO06)						
Dureza	mg CaCO <sub>3</sub> /L				500 (WHO08)	500 (WHO08)	7000 <sup>(b)</sup>		
Óleo e Graxas	mg/L			1,4 (TAI98)	1,4 (EEC75)	1,4 (EEC75)	1,4 (EEC75)		
Amônia	mg N/L			0,3 (TAI98)	0,05 (EEC75)	1 (EEC75)	2 (EEC75)	0,1 (TAI98)	2 (EPRI03)
Arsênico	mg/L	0,1 (WHO06)	0,1 (WHO06)	3 (FAO93)	0,01 (WHO08)	0,01 (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08, EEC75)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Bário	mg/L				0,7 (WHO08)	0,7 (WHO08)	7 <sup>(c)</sup> (WHO08)	7 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Boro	mg/L	3 (WHO06)	3 (WHO06)		0,5 (WHO08)	0,5 (WHO08)	5 <sup>(c)</sup> (WHO08)	5 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Cádmio	mg/L	0,03 (WHO06)	0,03 (WHO06)	Ausência (FAO93)	0,003 (WHO08)	0,003 (WHO08)	0,03 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,03 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Cloreto	mg/L	350 (WHO06)	350 (WHO06)		250 (WHO08)	250 (WHO08)	25000 <sup>(b)</sup>	25000 <sup>(b)</sup>	
Cromo	mg/L	0,1 (WHO06)	0,1 (WHO06)	Ausência (FAO93)	0,05 (WHO08)	0,05 (WHO08)	0,5 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,5 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Fluoreto	mg/L	1 (WHO06)	1 (WHO06)		1,5 (WHO08)	1,5 (WHO08)	15 <sup>(c)</sup> (WHO08)	15 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
Ferro	mg/L	5 (WHO06)	5 (WHO06)						0,5 (EPRI03)

(continuação)

<b>Chumbo</b>	mg/L	5 (WHO06)	5 (WHO06)	Ausência (FAO93)	0,01 (WHO08)	0,01 (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
<b>Manganês</b>	mg/L	0,2 (WHO06)	0,2 (WHO06)		0,4 (WHO08)				0,5 (EPRI03)
<b>Nitrato</b>	mg N/L				50 (WHO08)	50 (WHO08)			
<b>Fósforo</b>	mg/L				0,1 (TAI98)	0,1 (TAI98)		0,1 (TAI98)	
<b>Enxofre</b>	mg/L								5 (EPRI03)
<b>Sódio</b>	mg/L	210 (WHO06)	210 (WHO06)		200 (WHO08)	200 (WHO08)	15000 <sup>(b)</sup>	15000 <sup>(b)</sup>	
<b>Sulfato</b>	mg/L				500 (WHO08)	500 (WHO08)	3000 <sup>(b)</sup>	3000 <sup>(b)</sup>	
<b>Pesticidas organofosforados<sup>(d)</sup></b>	mg/L			Ausência (FAO93)					
<b>Pesticidas piretróides<sup>(e)</sup></b>	mg/L			Ausência (FAO93)					
<b>Benzeno</b>	mg/L			Ausência (FAO93)	0,01 (WHO08)	0,01 (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
<b>HPA<sup>(f)</sup></b>	mg/L			Ausência (FAO93)	0,0007 (WHO08)	0,0007 (WHO08)	0,007 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,007 <sup>(c)</sup> (WHO08)	
<b>Bromato</b>	mg/L				0,01 (WHO08)	0,01 (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	0,1 <sup>(c)</sup> (WHO08)	

Fonte: adaptado de BOULAY *et al.* (2011a).

(a) Sólidos Suspensos Totais; (b) Nestes casos foi considerado a concentração da água do mar como limite; (c) Nestes casos foi considerado um valor 10 vezes maior que o padrão de WHO08; (d) Inclui o glifosato; (e) Inclui a permetrina; (f) Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos.

Legenda: WHO06 – Fonte: WHO (2006); TAI98 – Fonte: TAIWAN EPA (1998); EEC75 – Fonte: EEC (1975); EPRI03 – Fonte: EPRI (2003); FAO93 – Fonte: SVOBODOVA *et al.* (1993); WHO08 – Fonte: WHO (2008).



(continuação)

<b>Nitrato</b>	mg N/L	50	50	50					
<b>Fósforo</b>	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,1				
<b>Enxofre</b>	mg/L	5	5	5	5	5	5	5	
<b>Sódio</b>	mg/L	200	200	200	210	210	210	15000	
<b>Sulfato</b>	mg/L	500	500	500	3000	3000	3000	3000	
<b>Pesticidas organofosforados<sup>(d)</sup></b>	mg/L	0				0			
<b>Pesticidas piretróides<sup>(e)</sup></b>	mg/L	0				0			
<b>Benzeno</b>	mg/L	0	0,01	0,01	0,1	0	0,1	0,1	
<b>HPA<sup>(f)</sup></b>	mg/L	0	0,0007	0,0007	0,007	0	0,007	0,007	
<b>Bromato</b>	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	

Fonte: adaptado de BOULAY *et al.* (2011a). (a) Sólidos Suspensos Totais; (b) Inclui o glifosato; (c) Inclui a permetrina; (d) Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos.

## APÊNDICE B – Dados climáticos.

Tabela B.1 – Valores médios decendiais das variáveis climáticas utilizadas na simulação do balanço hídrico do sistema solo-planta-atmosfera, para o cultivo da soja, em Santa Rosa - RS.

Mês	Período Decendial	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Umidade Relativa do Ar (%)	Velocidade do Vento (km/dia)	Radiação Solar (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	ET <sub>0</sub> (mm/dia) <sup>(a)</sup>	Precipitação (mm/dia)
Novembro	1°	15,2	28,3	69	454	21,5	5,56	5,54
	2°	16,1	29,5	71	334,7	21,9	5,48	6,14
	3°	15,7	31,2	67	388,5	22,2	6,05	4,70
Dezembro	1°	18	31,1	67	461	23,5	6,50	2,80
	2°	17,7	31	72	477	23,6	6,47	5,29
	3°	17,8	32,2	70	393	23,6	6,37	3,60
Janeiro	1°	19,2	32,7	70	484,5	24	6,70	4,05
	2°	19	32,4	68	428,5	23,7	6,44	4,47
	3°	19,7	32,6	67	412,4	23,6	6,40	2,66
Fevereiro	1°	19,4	31,9	72	447	23	6,12	4,38
	2°	19,5	31	70	459	22,5	5,90	3,15
	3°	19,1	31,5	69	412,5	21,9	5,76	4,25
Março	1°	19,2	31	74	420,8	20	5,26	4,68
	2°	16,7	29,2	71	420,6	19,4	5,52	2,11
	3°	16,8	28,9	73	407,1	18,5	4,66	4,00

Fonte: dados obtidos em INPE (2012).

(a) Este item foi calculado pela fórmula de Penman-Monteith.

## APÊNDICE C – Inventário das etapas de transporte de materiais.

Tabela C.1 – Consumo de óleo diesel, nas etapas de transporte dos materiais, considerando o sistema de produto definido para este estudo e a produção de 1 litro de biodiesel de soja.

(continua)

<b>Etapa Local de Destino</b>	<b>Material</b>	<b>Local de Origem</b>	<b>Distância Média (km)<sup>(a)</sup></b>	<b>Quantidade de Material (kg)</b>	<b>Tipo de Transporte</b>	<b>Consumo de Óleo Diesel (kg)<sup>(b)</sup></b>
Cultivo da Soja Santa Rosa - RS	Sementes de soja	Rio Grande do Sul <sup>(c)</sup>	100	0,1447	Rodoviário	0,0003
	Calcário dolomítico	Caçapava do Sul – RS	370	1,7364	Rodoviário	0,0130
	Fert. Nitrogenado (Uréia)	Rússia	13000 <sup>(d)</sup>	0,0281	Marítimo	0,0018
	Fert. Fosfatado (SSP)	Cubatão – SP	1400 <sup>(d)</sup>	0,6205	Rodoviário	0,0178
	Fert. Potássico (KCl)	Rússia	13000 <sup>(d)</sup>	0,2178	Marítimo	0,0142
	Unidade Misturadora NPK	Rio Grande – RS	616	0,8665	Rodoviário	0,0109
	Roundup Original	São José dos Campos – SP	1300	0,0067	Rodoviário	0,0002
	Spider 840 WG	Franco da Rocha – SP	1220	0,000104	Rodoviário	0,000003
	Standak Top	Guaratinguetá – SP	1390	0,000347	Rodoviário	0,00001
	Opera	Guaratinguetá – SP	1390	0,00307	Rodoviário	0,000087
	Certero	Belford Roxo – RJ	1615	0,000097	Rodoviário	0,000003
	Talcord 250	Guaratinguetá – SP	1390	0,000295	Rodoviário	0,000008
Pivot	Guaratinguetá – SP	1390	0,00301	Rodoviário	0,000086	
Produção do Óleo Degomado Santa Rosa - RS	Grãos de soja	Santa Rosa – RS <sup>(e)</sup>	70	4,94	Rodoviário	0,007
	Biomassa (lenha)	Rio Grande do Sul <sup>(f)</sup>	200	0,484	Rodoviário	0,002
	Hexano (20%)	Triunfo – RS	470	0,0712	Rodoviário	0,00068
Fabricação do Biodiesel Ijuí - RS	Óleo degomado	Santa Rosa – RS	100	0,988	Rodoviário	0,002
	Biomassa (lenha)	Rio Grande do Sul <sup>(f)</sup>	200	0,0874	Rodoviário	0,00036

(continuação)

	Metanol	Punta Arenas – Chile	2800 <sup>(g)</sup>	0,14	Marítimo	0,00196
		Rio Grande – RS	616		Rodoviário	0,00176
	Metilato de sódio (30%)	Pirapozinho – SP	1010	0,0114	Rodoviário	0,00024
	Hidróxido de sódio (50%)	Cubatão – SP	1200	0,0041	Rodoviário	0,00012
	Ácido fosfórico (50%)	Cajati – SP	970	0,0044	Rodoviário	0,00009
	Ácido clorídrico (32%)	Cubatão – SP	1200	0,0096	Rodoviário	0,00023

(a) No cálculo do consumo de óleo diesel, estes valores são multiplicados por dois para considerar as viagens de ida e volta; (b) Para o transporte rodoviário, foi considerado o consumo de 0,01024 kg/ton.km de óleo diesel conforme o processo "*operation, lorry 20-28t, fleet average*" do banco de dados Ecoinvent, o qual considera o consumo médio de um caminhão com capacidade de carga de 20-28 ton. Para o transporte marítimo, foi considerado o consumo de 0,0025 kg/ton.km de óleo diesel, conforme o processo "*operation, transoceanic freight ship*" do banco de dados do Ecoinvent, o qual considera o consumo médio de um navio de carga transoceânico; (c) Para este material foi considerada a produção em diversas localidades próximas à região de cultivo; (d) Esta distância é relacionada ao município de Rio Grande – RS, onde os produtos chegam pelo porto e são encaminhados para as unidades misturadoras do composto NPK localizadas na mesma região; (e) Foi considerado que os grãos de soja utilizados na indústria (localizada no centro do município) são provenientes das regiões agrícolas do entorno do município; (f) Para este material considerou-se que sua obtenção ocorre de diversas localidades do Rio Grande do Sul e, portanto, foi estabelecida uma distância média; (g) Distância até o porto de Rio Grande – RS.