

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DISPONÍVEL DE  
BIOMASSA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

por

**João Vitor Do Erre de Jesus Abreu**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, julho de 2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE ENERGIA

METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DISPONÍVEL DE  
BIOMASSA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

por

João Vitor Do Erre de Jesus Abreu

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Profa. Letícia Jenicsh Rodrigues  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Paulo Smith Schneider, Pós-dr.

Banca examinadora:

Prof. Cirilo Seppi Bresolin, Dr. – DEMEC/ UFRGS

Eng. Mário Saffer, Dr.– ENGEBIO

Prof. Flávio Antônio Becon Lemos, Dr.– PPGEE / UFRGS

Porto Alegre, julho de 2019.

Do Erre de Jesus Abreu, E. J. A. **Metodologia de quantificação do potencial disponível de biomassa no Estado do Rio Grande do Sul**. 2019. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## **RESUMO**

A crescente demanda por alimento, água e energia gera a necessidade da gestão de resíduos provenientes das atividades agroindustriais visando à redução do seu impacto ambiental. Dentre as alternativas de destino de resíduos agroindustriais está a sua utilização como combustível para produção de biogás. Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo ordenar uma metodologia de quantificação do potencial disponível de biomassa no Rio Grande do Sul. A quantificação da produção estadual dos resíduos foi feita com as séries históricas da base de dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) a partir de duas fontes: uma da fração de área colhida e outra da fração de área perdida. Sobre premissas agronômicas e informações de produção estadual de cada cultura foi avaliada a possível distorção nas estimativas de produção de resíduos em virtude da desconsideração da parcela de área perdida, a qual depende de intempéries ocorridas. Isso tem impacto na gestão de risco de contratos de compra e venda de biomassa entre produtores de biogás e produtores agrícolas. A partir do ordenamento pela metodologia proposta, considerando a possibilidade de valor do material da fração de área perdida, estimou-se a possibilidade de produção de resíduos agrícolas superior a 20% para quando tal fração de área não é descartada. Tal possibilidade de desvio do valor de produção de resíduos agrícolas estimados a partir da metodologia permite agregar conhecimento à gestão de risco de contratos de compra e venda de biomassa para unidades de produção de biogás.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia Renovável. Agricultura. Gestão de risco. Biomassa.

Do Erre de Jesus Abreu, E. J. A. **Quantification methodology of available biomassa potential in Rio Grande do Sul**. 2019. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

#### **ABSTRACT**

The growing demand for food, water and energy generates the need for agroindustrial activities to reduce environmental impact. Among the alternatives of destination of agroindustrial residues is its use as fuel for the production of biogas. The objective of this work is to quantify the biomass potential for energy valorization of agricultural waste in Rio Grande do Sul. The quantification of the state production of the residues was done from the historical series of the agricultural production of the region (PAM) from two sources: one from the fraction of area harvested and another from the fraction of lost area. On the agronomic assumptions and state's production information of each crop was evaluated distortion in the parts of waste production due to the lack of consideration of the plot of lost areas, wich dependents the occurrences. This has a impact it power purchase agreement from biogas energy sources between biogas producers and agricultural producers. Based on proposed methodology, considering the possibility of producing material of fraction higher than 20%, it can be considered as a possibility of production of agricultural waste of more than 20% for the fraction of waste discarded. Such a chance of deviation of the value of production of agricultural residues estimated from the methodology allows to aggregate knowledge about power purchase agreement from biogas energy sources between the parts

**KEYWORDS:** Renewable energies. Power purchase agreement sources. Biomass

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$f_c$	Fração de área colhida	-
$IC$	Índice de colheita	ton grão/ton vegetal
$IC_c$	Índice de colheita do cultivar	ton grão/ton vegetal
$IC_g$	Índice de colheita genético	ton grão/ton vegetal
$k$	Efetividade do cultivar na produção de grãos	-
$Produção_{grãos}$	Produção anual de grãos	ton grão/ano
$Produção_{resíduos\ safra}$	Produção anual de resíduos do cultivo dos grãos da safra	ton resíduo/ano
$Produção_{resíduos\ área\ perdida}$	Produção anual de vegetal descartado na fração de área perdida	ton resíduo/ano
$Produção_{vegetal}$	Produção anual de matéria vegetal	ton vegetal/ano
$Q_p$	Quantidade material da fração de área perdida	-

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta.....	4
Figura 4.2 – Fluxograma de determinação da produção de resíduos por safra. ....	5
Figura 4.3 – Diferença entre os resultados de Silva Moura et al. (2017) e os da metodologia proposta, com $ICg$ de 0,6, em função de $Q_p$ e $k$ .....	9
Figura 4.4 – Diferença entre os resultados de Silva Moura et al. (2017) e os da metodologia proposta para o trigo em grão em 2015, para $f_c$ de 0,9907 e $Q_p$ de 0,3.....	10
Figura 5.1 – Produção anual de grãos [mil toneladas/ano].....	11
Figura 5.2 – Produção de resíduos para $Q_p$ nulo [mil toneladas/ano] .....	12
Figura 5.3 – Fração histórica de área colhida dos cultivares.....	13
Figura 5.4 – Diferença percentual na produção histórica de resíduos quando $Q_p$ igual a 0,3 e igual a 0. ....	13
Figura 5.5 – Razão resíduos-produtos em função de $Q_p$ e $k$ para $ICg$ de 0,6 e $f_c$ de 0,9.....	14

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E MODELAGEM</b> .....	<b>4</b>
<b>4.1</b>	<b>Aplicação e funcionalidade</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CENÁRIO E DISCUSSÕES</b> .....	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>15</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>16</b>
	<b>APÊNDICE A – EQUAÇÕES UTILIZADAS NA MODELAGEM</b> .....	<b>17</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de conclusão de curso propõe uma metodologia de quantificação do potencial de biomassa disponível a partir de resíduos agroindustriais de culturas produzidas no Rio Grande do Sul, como arroz, milho, soja e trigo. Essa quantificação é necessária para a produção de energia como forma alternativa de destinação dos resíduos produzidos por tais culturas no Estado e respaldado nas diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Por meio do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, são estabelecidas as condições de caracterização e orientações para descarte de resíduos sólidos urbanos (RSU) (SAFFER et al., 2013). Em paralelo, a legislação impõe restrição e responsabilização pelo descarte de RSU, para mitigar seus impactos na sociedade civil, no meio ambiente e no próprio setor agroindustrial (BRASIL, 1998).

Como forma de destino de RSU de origem agrícola, se destacam o uso na alimentação animal ou como adubo; contudo, pelo volume gerado, o uso como combustível se torna uma alternativa, auxiliando na redução do impacto ambiental do setor e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, por meio da diversificação da matriz energética nacional (SILVA MOURA; DALPONT; MICHELS, 2017). Nesse sentido, o governo federal tem por objetivo aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica, privilegiando empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição, através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) (BRASIL, 2002).

Concomitantemente, o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos (BRASIL, 2003) se destina a “propiciar o atendimento em energia elétrica à parcela da população do meio rural brasileiro que ainda não possui acesso a esse serviço público” (ANEEL, 2019). Portanto, há estímulo governamental para expansão do atendimento em energia elétrica pela produção de energia a partir da biomassa disponível no meio rural.

Para quantificação do potencial de biomassa disponível foram adotadas premissas relacionadas ao contexto agrônomo, uma vez que a produção de grãos de cada cultura depende do genótipo plantado, de fatores ambientais e da disponibilidade hídrica na safra. A inclusão de tais variáveis na quantificação da biomassa disponível auxilia na tomada de decisões para o planejamento agrícola e para a política energética, pois reduz o risco associado à comercialização da biomassa, uma vez que o material vegetal disponível pode ser negociado entre o produtor rural e a instalação de produção de biogás.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Referente à estimativa do potencial de biomassa para aproveitamento energético, a precisão das metodologias presentes na literatura estão relacionadas às condições de contorno assumidas. São necessários na definição da metodologia para caracterização do RSU itens como: área de estudo; período; número de amostras; procedimentos de amostragem e determinações; cálculos para a definição da caracterização média de RSU amostrados, da caracterização média de cada Estado e de cada região, sendo que a quantidade e frequência de amostras está relacionada à área escolhida a ser amostrada, dependendo do tamanho, do tipo de coleta e presença de sazonalidade (SAFFER et al., 2013). Da caracterização, a avaliação do potencial disponível faz-se com três elementos-chave: o tipo de potencial avaliado, o tipo de abordagem utilizada no problema e a metodologia de abordagem empregada.

Quanto ao tipo de potencial avaliado, há quatro tipos existentes: o potencial teórico, o potencial técnico, o potencial ecologicamente sustentável e, por fim, o potencial de mercado. O primeiro trata da quantidade máxima de biomassa disponível, desconsiderando limitações de disponibilidade espacial e restrições ambientais quanto ao uso. O segundo é referente à fração do potencial teórico considerando as condições e restrições da disponibilidade da biomassa. O terceiro é referente à parcela do potencial técnico sob condições de restrição relacionadas à preservação do meio ambiente, para preservação da qualidade do solo, da água e da biodiversidade. O quarto potencial é referente à fração do potencial técnico sob critérios econômicos. De modo análogo, a abordagem do problema da quantificação da biomassa é feita sob três óticas: a primeira quanto aos recursos disponíveis, a segunda orientada pela demanda e a terceira pela integração das duas anteriores. A abordagem sob a ótica dos recursos disponíveis não foca o tipo de biomassa nem a sua utilização, sendo estimada a biomassa total, independentemente da utilização (produção de biogás, produção de energia elétrica, alimentação animal, recomposição da qualidade do solo, etc.). A abordagem orientada pela demanda analisa o potencial de biomassa disponível considerando os diferentes sistemas de utilização e os variados fins dados à biomassa, assim como a forma da energia produzida a partir dela. A forma integrada de abordagem do problema da quantificação combina as duas formas supracitadas, possibilitando a avaliação sob aspectos variados quanto à sustentabilidade do uso da biomassa para produção de energia (GONZALEZ-SALAZAR et al., 2014).

Por fim, há diversas metodologias de abordagem empregadas no problema da quantificação, as quais dependem do tipo de abordagem utilizada no problema. Referente à ótica dos recursos disponíveis, as duas aproximações principais são pela análise estatística, sem especificação espacial, ou pela análise espacial explícita. O aspecto espacial dos recursos disponíveis implica a primeira ter como vantagem a simplicidade, a transparência e a reprodutibilidade do método, contudo apresenta limitações referentes aos aspectos macroeconômicos e socioambientais. Em contrapartida, a análise espacial explícita combina informações sobre a disposição espacial da biomassa e seu acesso e, deste modo, tem como vantagem a avaliação da distribuição da biomassa e seu impacto em nível local e regional. Quanto à ótica de abordagem pela demanda, as principais aproximações são pela análise do custo de suprimento e pela modelagem de sistemas de energia. A análise do custo de suprimento utiliza informação sobre a disponibilidade técnica da biomassa e o custo vinculado a ela na cadeia de produção, enquanto a análise pela modelagem de sistemas de energia simula o impacto do mercado de energia e a competitividade dos sistemas de energia que usam a biomassa. Por ser baseada em análise de mercado e análise de risco, as decisões e condições admitidas nestas metodologias de abordagem são empíricas, tendo como benefício a análise financeira dos diferentes sistemas que utilizam biomassa para produção de energia e a efetividade de políticas públicas (GONZALEZ-SALAZAR et al., 2016)

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Biomassa é uma fonte de energia que pode ser definida como toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, sendo a última formada pelo processo de fotossíntese que ocorre na presença de luz solar. Isto é, na biomassa vegetal é armazenada uma fração da energia solar incidente na superfície da Terra, na forma de ligações moleculares orgânicas, que pode ser convertida por processos biológicos ou termoquímicos, dentre as diferentes possibilidades de conversão (SOUZA et al., 2002).

A biomassa deriva do processo de fotossíntese e por isso é considerada uma fonte de energia renovável que não contribui para o acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre, já que na sua conversão energética os gases liberados podem ser utilizados no ciclo de crescimento do vegetal. Um exemplo é a produção de biogás na digestão controlada da biomassa, o qual é convertido em gás carbônico (CO<sub>2</sub>) durante a combustão e absorvido na fotossíntese para formação do vegetal. Por isso, o resíduo de biomassa da atividade agroindustrial pode ser aproveitado como combustível renovável para conversão energética (SOUZA et al., 2002).

Na cultura do milho, se estima que são geradas entre 2,2 e 2,7 toneladas de talos e folhas, bem como 0,3 a 0,9 tonelada de sabugos, para cada tonelada de grãos colhida. Considerando a influência do cultivar utilizado e das condições de manejo, há registros de produção de até 6 toneladas de resíduos por tonelada de grãos de milho (CABRAL et al., 2012). No cultivo da soja se estima gerar 1,4 tonelada de palha no campo para cada tonelada de grãos colhida, enquanto que no cultivo de arroz os resíduos gerados são as hastes e folhas da planta na colheita e as cascas dos grãos na indústria (SILVA MOURA; DALPONT; MICHELS, 2017). Segundo CABRAL et al. (2012, p. 34), “as hastes e folhas são deixadas no campo após a colheita servindo para manutenção do solo”, e “estima-se que, de toda a casca produzida ao longo de um ano, apenas 50% podem ser utilizados na produção de eletricidade, pois 15% são destinados à secagem e cerca de 35% estão disponíveis em pequenas indústrias, especialmente dispersas”. Na cultura do trigo, o principal resíduo gerado é a palhada na colheita dos grãos. Dependendo do cultivar utilizado, do manejo da lavoura, dentre outros fatores, se obtém de 1,1 a 1,5 tonelada de palhada por tonelada de grãos colhida (CABRAL et al., 2012).

No contexto agrônomo, a razão entre a massa de grãos e a massa total do vegetal é denominada Índice de Colheita (*IC*). Segundo Durães Machado, Magalhães e De Oliveira (2002, p. 34):

Adversidades ambientais geralmente redundam em menor *IC*. Estudos têm mostrado que o *IC* de uma cultura é marcadamente influenciado pela densidade de plantio, disponibilidade de água e nutrientes e temperatura na estação de crescimento, o que torna inadequadas as comparações entre cultivares, com base nesse índice. Por esse fato, comparações entre cultivares (e entre espécies) podem ser baseadas no índice de colheita genético *ICG*, ou seja, a expressão máxima da capacidade genética do material em resultar partição útil para o órgão econômico de interesse. Segundo Prihar & Stewart (1990)<sup>1</sup> a hipótese básica para estimar o *ICG* de um cultivar é que *IC* esteja diretamente relacionado com a partição de foto assimilados para o rendimento econômico, e seja um parâmetro relacionado à espécie. Assim, comparações entre cultivares poderiam ser baseadas nos *IC* que se aproximam do *ICG* sob determinadas condições ambientais. Dependendo da natureza e da extensão da condição ambiental, o *IC* observado de uma cultura desvia em maior ou menor intensidade do *ICG*.

Dessa forma, em razão da grande variação das condições climáticas do Estado do Rio Grande do Sul durante o calendário agrícola, adotou-se como premissas que o dado de produção de grãos disponibilizado na base de dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) está com a unidade comercial e que o *IC* de cada cultura tem um desvio em relação ao *IC<sub>g</sub>* devido às intempéries nos diferentes estágios do desenvolvimento do vegetal.

---

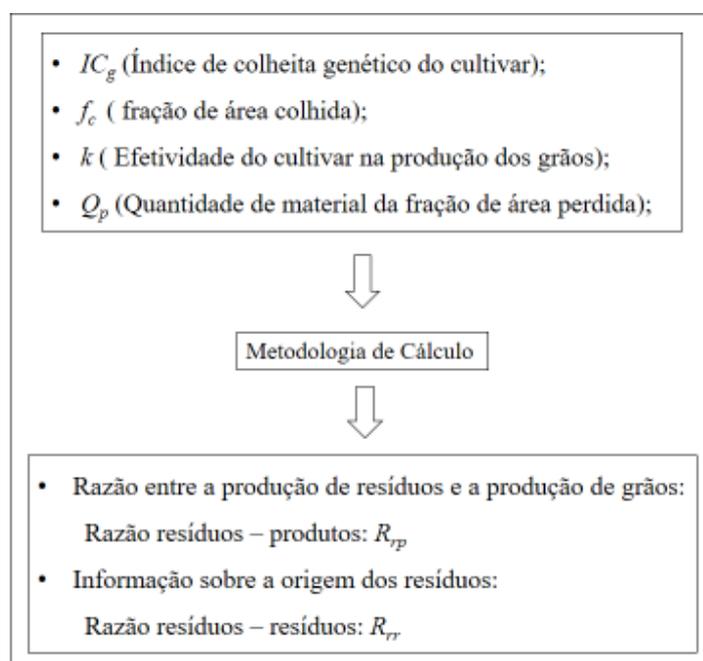
<sup>1</sup> PRIHAR, S.S.; STEWART, B.A. Using upper-bound slope through origin to estimate genetic harvest index. *Agronomy Journal*, Madison, v.82, p.1160- 1165, 1990.

## 4 METODOLOGIA E MODELAGEM

O levantamento das culturas de arroz, milho, soja e trigo é apresentado com base no Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul, divulgado pela Secretaria Estadual de Planejamento, Orçamento e Gestão. A quantificação da produção estadual dos resíduos foi feita com as séries históricas da base de dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), a partir de duas fontes: uma da fração de área colhida e outra da fração de área perdida.

O objetivo da metodologia é possibilitar a estimativa da quantidade disponível de biomassa residual por safra. O procedimento baseia-se na informação da qualidade do grãos utilizado pelo agricultor, por meio do  $IC_g$ , e de informações pós-colheita, acerca da fração de área colhida  $f_c$ , da efetividade do cultivar utilizado na produção de grão  $k$  e da quantidade de material vegetal na fração de área perdida  $Q_p$ , conforme fluxograma da Figura 4.1.

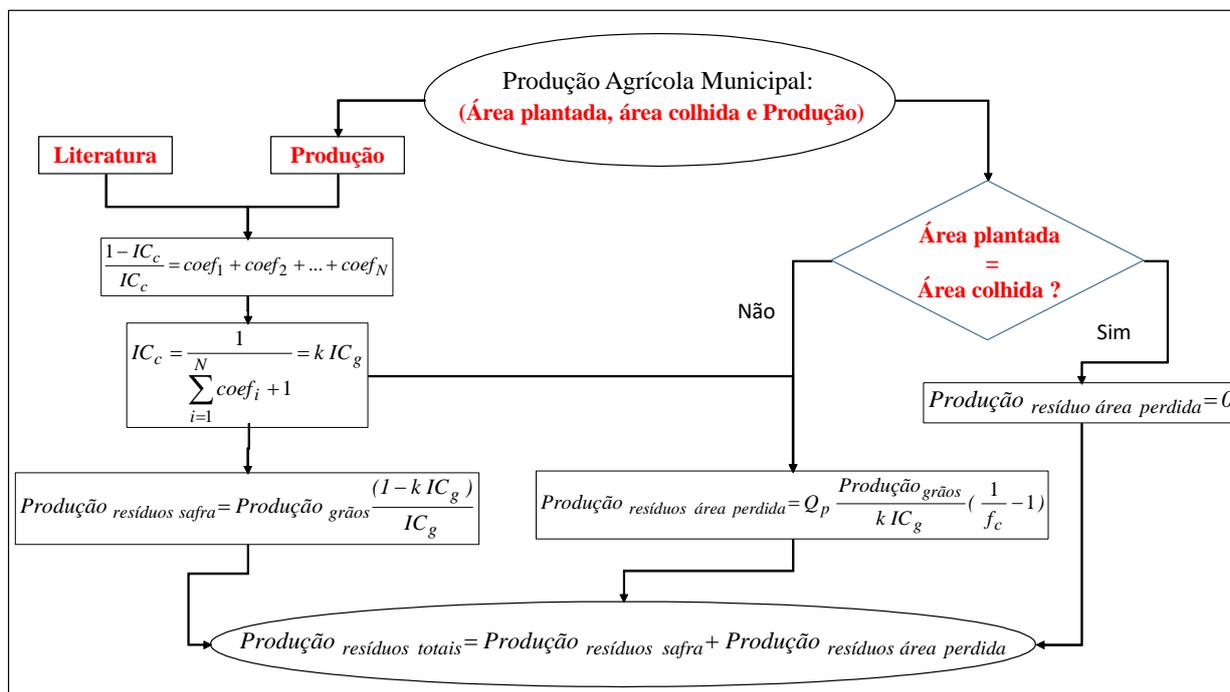
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: Autor.

A partir da análise dos dados disponibilizados na base de dados da PAM sobre a área plantada, a área colhida e a produção de grãos das culturas, foram estabelecidas as relações que utilizam as quatro informações citadas no primeiro bloco para determinação da produção total de resíduos com a produção de grãos da safra, como também a distinção da origem destes resíduos que podem vir da fração de área colhida ou da fração de área perdida. Utilizando informações do primeiro bloco da Figura 4.1, segue no fluxograma da Figura 4.2 o procedimento da metodologia para quantificação das duas parcelas fontes de resíduos.

Figura 4.2 – Fluxograma de determinação da produção de resíduos por safra.



Fonte: Autor.

O índice de colheita do cultivar  $IC_c$  foi determinado a partir da relação com os coeficientes técnicos, dados em tonelada de resíduo por tonelada de grão, com base nas informações de Cabral et al. (2012) e Silva Moura, Dalpont e Michels (2017) sobre as quantidades e os diferentes resíduos gerados na produção de cada grão. Uma vez que a parcela complementar à produção de grãos é o total produzido de resíduos, no lado esquerdo do fluxograma (Figura 4.2) se encontra a igualdade entre o total produzido com base no  $IC_c$  e os coeficientes técnicos dos resíduos. Entretanto, durante o processo de desenvolvimento do cultivar plantado, podem ocorrer variações climáticas que provocam desvios entre o  $IC_c$  e o índice de colheita genético do cultivar  $IC_g$ . Segundo Durães Machado, Magalhães e De Oliveira (2002, p.34), “[...] adversidades ambientais geralmente redundam em menor  $IC$ . Plantas bem adaptadas poderiam produzir próximo de seu  $ICG$ ”. Sendo o  $IC_c$  uma fração do  $IC_g$ , que foi admitido constante e igual para os cultivares, através do coeficiente  $k$  foi estabelecida a relação entre a produção esperada de grãos com a produção verificada de grãos, para o referencial genético de produção de grãos correspondente ao  $IC_g$ .

Entretanto, na base de dados disponibilizados pela PAM, há por vezes diferença entre a área plantada e a área colhida, não sendo informada a origem da diferença. No lado direito do fluxograma da Figura 4.2, é feita a comparação entre as áreas plantada e colhida. Caso não sejam iguais, e utilizando a informação sobre o  $IC_c$ , foi estabelecido que na fração de área perdida a quantidade de material vegetal é reduzida ao fator  $Q_p$ . Por ter sido dada como área perdida, todo o material vegetal está disponível para produção de biogás. Somando as produções de resíduos das duas fontes se tem a produção de resíduos totais da safra.

A Equação (4.1) descreve a relação entre a produção de grãos, o  $IC$  e a produção de massa vegetal, que é composta pelas massas de grãos e de resíduos da safra, como segue:

$$\text{Produção}_{\text{grãos}} = IC \text{Produção}_{\text{vegetal}} = IC (\text{Produção}_{\text{grãos}} + \text{Produção}_{\text{resíduos safra}}) \quad (4.1)$$

onde  $\text{Produção}_{\text{grãos}}$  é a produção de grãos na safra, em toneladas por ano;  $IC$  é o índice de colheita do cultivar, em tonelada de grãos por tonelada de vegetal;  $\text{Produção}_{\text{vegetal}}$  é a produção de massa vegetal na

safra, em toneladas por ano; e  $Produção_{resíduos\ safra}$  é a produção de resíduos em razão do cultivo dos grãos da safra, em toneladas por ano.

A Equação (4.2) descreve a igualdade entre o complementar à produção de grãos e os diferentes coeficientes técnicos. Após manipulação, a relação entre o  $IC_c$  e os diferentes coeficientes técnicos é dada pela Equação (4.3):

$$\frac{1 - IC_c}{IC_c} = coef_1 + coef_2 + \dots + coef_N \quad (4.2)$$

$$IC_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^N coef_i + 1} \quad (4.3)$$

onde  $coef_1$  a  $coef_N$  são os coeficientes técnicos dos diferentes resíduos gerados de cada cultivar, em tonelada de resíduo por tonelada de grão produzido, e  $IC_c$  é o índice de colheita verificado na safra, em tonelada de grão por tonelada de massa de vegetal.

A Equação (4.4) descreve a relação entre o  $k$ ,  $IC_c$  e  $IC_g$ , dado que a  $IC_c$  é determinado na Equação (4.3) e  $IC_g$  é uma informação de entrada da metodologia:

$$k = \frac{IC_c}{IC_g} \quad (4.4)$$

onde  $k$  é a efetividade do cultivar para produção de grãos, adimensional, e  $IC_g$  é o índice de colheita genético do grão, em tonelada de grão por tonelada de massa de vegetal.

A relação entre a  $Produção_{resíduos\ safra}$  e a  $Produção_{grãos}$  advém do  $IC_c$  e segue na Equação (4.5), cujo desenvolvimento encontra-se no Apêndice A, a qual é também mencionada como “complementariedade da safra” por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017):

$$Produção_{resíduo\ safra} = Produção_{grãos} \frac{1 - k IC_g}{IC_g} \quad (4.5)$$

A Equação (4.6) determina a  $Q_p$  como a razão entre a produção de vegetal na fração de área perdida e na fração de área colhida. A  $Q_p$  é um valor experimental relacionado ao vegetal na fração de área perdida, que na metodologia é um dado de entrada. A Equação (4.7) determina a  $Produção_{resíduos\ área\ perdida}$  utilizando as informações de  $f_c$ ,  $k$ ,  $Produção_{grãos}$  e  $Q_p$ , calculadas anteriormente:

$$Q_p = \frac{\frac{Produção_{resíduo\ área\ perdida}}{A_{perdida}}}{\frac{Produção_{vegetal}}{A_c}} \quad (4.6)$$

$$Produção_{resíduo\ área\ perdida} = Q_p \frac{Produção_{grãos}}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (4.7)$$

onde  $Produção_{resíduo\ área\ perdida}$  é a produção de matéria que é descartada na área perdida, em tonelada de vegetal por ano e  $f_c$  a fração de área colhida.

Com base nas premissas agronômicas adotadas e nos dados disponibilizados na base de dados da PAM, a quantidade total de resíduos gerados nas safras é então dada por duas componentes, uma referente à produção de grãos na fração de área colhida, Equação (4.5), e a outra referente à massa de vegetal disponível na fração de área perdida da lavoura, Equação (4.7). Para cada cultivar a produção de resíduos que estão disponíveis em função de  $f_c$ ,  $IC_g$ ,  $k$ ,  $Q_p$  e  $Produção_{grãos}$  é dada pela Equação (4.8):

$$Produção_{total\ resíduo} = Produção_{grãos} \frac{1 - k IC_g}{IC_g} + Q_p \frac{Produção_{grãos}}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (4.8)$$

de cujo equacionamento segue a razão entre a produção total de resíduos e a produção de grãos na Equação (4.9), e a razão entre a produção de resíduos da fração de área perdida e da fração de área colhida na Equação (4.10).

$$R_{r-p} = \frac{1 - k IC_g}{IC_g} + \frac{Q_p}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (4.9)$$

$$R_{r-r} = \frac{Q_p}{k} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \left( \frac{1}{1 - k IC_g} \right) \quad (4.10)$$

#### 4.1 Aplicação e funcionalidade

Visando a analisar a funcionalidade da metodologia, a quantidade de resíduos para o ano de 2015 foi estimada na Tabela 4.1, considerando  $IC_c$  de Cabral et al. (2012)  $IC_g$  de 0,6 e  $Q_p$  nulo, e feita a comparação com os valores obtidos por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017).

Tabela 4.1 – Produções estimadas de resíduos no RS em 2015 ( $Q_p$  nulo)

	Arroz (em casca) [mil toneladas]	Milho (em grão) [mil toneladas]	Soja (em grão) [mil toneladas]	Trigo (em grão) [mil toneladas]
Silva Moura et al. (2017)	13.467	17.319	22.484	2.041
Metodologia proposta	8.759	7.011	15.264	1.353
Diferença [mil toneladas]	4.671	10.308	7.217	679
Diferença [%]	34,69%	59,52%	32,10%	33,24%

Fonte: autoria própria com dados de Silva Moura, Dalpont, Michels (2017) e metodologia proposta para  $IC_c$  de Cabral et al. (2012).  $IC_g$  de 0,6 e  $Q_p$  nulo.

No milho em grão foi encontrada a maior divergência: o valor obtido pela metodologia está 59,52% menor do que o valor encontrado na literatura. O valor mais próximo encontrado é para a soja em grão, cujo valor obtido pela metodologia é 32,10% menor.

Aumentando a  $Q_p$  da fração de área perdida para seu valor máximo, 1,0, a Tabela 4.2 apresenta as diferenças entre as quantidades estimadas por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017) para o ano de 2015 no Estado do Rio Grande do Sul e pela metodologia para  $IC_c$  de Cabral et al. (2012) e  $IC_g$  de 0,6.

Tabela 4.2 – Produções estimadas de resíduos no RS em 2015 ( $Q_p$  de 1)

	Arroz (em casca) [mil toneladas]	Milho (em grão) [mil toneladas]	Soja (em grão) [mil toneladas]	Trigo (em grão) [mil toneladas]
Silva Moura et al. (2017)	13.467	17.319	22.484	2.041
Metodologia proposta	8.881	7.013	15.274	1.384
Diferença [mil toneladas]	4.586	10.306	7.210	657
Diferença [%]	34,05%	59,51%	32,07%	32,18%
Varição em relação à $Q_p=0$ [mil toneladas]	122	2	10	31

Fonte: autoria própria com dados de Silva Moura, Dalpont, Michels (2017) e metodologia proposta para  $IC_c$  de Cabral et al. (2012).  $IC_g$  de 0,6 e  $Q_p$  de 1.

Da última linha da tabela tem-se que a variação entre as quantidades estimadas pela metodologia não sofrem grandes alterações, havendo redução mínima de 2 mil toneladas, para o milho em grãos, e máxima de 122 mil toneladas, para o arroz em casca. A baixa contribuição com aumento da  $Q_p$  ocorre, fundamentalmente, pela alta  $f_c$ , visto que para todos os cultivares esta é acima de 0,99, conforme apresenta a Tabela 4.3, assim como a razão resíduos produtos  $R_{r-p}$ , razão resíduos  $R_{r-r}$  e  $f_c$  para o ano de 2015 para as quatro culturas considerando  $IC_c$  de Cabral et al. (2012),  $IC_g$  de 0,6 e  $Q_p$  de 0,3.

Tabela 4.3 – Razões  $R_{r-p}$  e  $R_{r-r}$  para 2015

	$R_{r-p}$ [ton/ton]	$R_{r-r}$ [ton/ton]	$f_c$ [-]
Arroz	1,01	0,00419	0,994467
Milho (1ª Safra)	1,26	0,00007	0,999932
Soja	0,97	0,00019	0,999738
Trigo	1,18	0,00804	0,990704

Fonte: autoria própria com metodologia proposta para  $IC_c$  de Cabral et al. (2012).  $IC_g$  de 0,6 e  $Q_p$  de 0,3.

Nela se verifica que o cultivar que apresenta a maior produção de resíduos por produção de grãos é o milho, com 1,26 tonelada produzida por tonelada de grãos colhida; em contrapartida, a soja é o cultivar que, nesta situação, apresenta a menor produção de resíduos por produção de grãos, com 0,97 tonelada de resíduos gerados por tonelada de grãos colhida. Também da Tabela 4.3 é possível observar que a menor contribuição dos resíduos da fração de área perdida é para o milho, para o qual é gerado 0,07 quilograma de resíduo da fração de área perdida por tonelada de resíduo vindo da fração de área colhida; e a maior relação é para o caso do trigo, em que são gerados 8,04 quilogramas de resíduo da fração de área perdida por tonelada de resíduo vindo da fração de área colhida. Os dados da Tabela 4.4 se relacionam através dos fatores  $IC_g$ ,  $k$  e  $IC$  aos da Tabela 4.3 quando  $Q_p$  0,3 e  $f_c$  a de 2015.

Tabela 4.4 – Informações acerca dos produtos no ano de 2015

	$IC_g$	$k$	$IC_c$
Arroz	0,60	0,66	0,39
Milho (1ª Safra)	0,60	0,41	0,24
Soja	0,60	0,69	0,42
Trigo	0,60	0,69	0,42

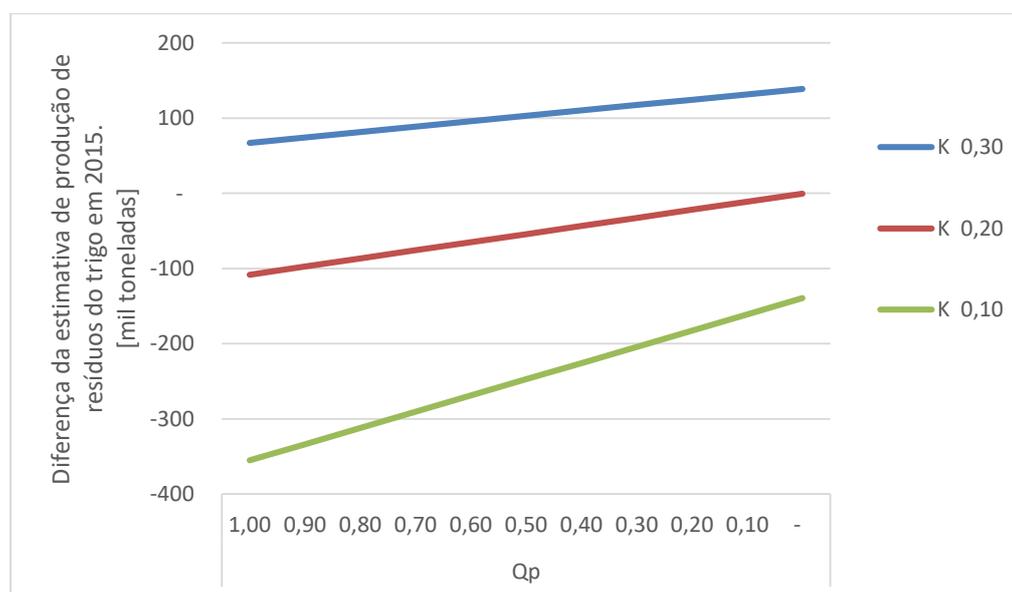
Fonte: Autor.

Pelo baixo  $IC_c$  do milho, a quantidade total de resíduos é superior à produção de grãos, assim como para o arroz, cujo  $IC_c$  abaixo de 0,4 resulta em maior produção de resíduos por produção de grãos. Para o trigo, mesmo que seja alto seu  $IC_c$ , a geração de resíduos a partir dele é elevada pelo fato da fração de área colhida ser a menor dentre os quatro cultivares. Já para a soja, por seu  $IC_c$  e pela fração de área colhida ser elevada, a produção total de resíduos é inferior à produção de grãos. Relacionando a Tabela 4.3 e a Tabela 4.4, é possível perceber que o baixo valor da efetividade  $k$  – menor que 0,7 – aliado à alta  $f_c$  resulta em um baixo valor da  $R_{r-r}$ , o qual foi da ordem de dezena de quilograma de resíduo vindo da fração perdida por tonelada de resíduo vindo da fração de área colhida quando a  $f_c$  é inferior à 0,999. Tal fato é destacável pois justifica o investimento em agricultura de ponta, dado que os parâmetros  $IC_g$  e  $k$  referem-se, respectivamente, aos grãos plantados e colhidos, e a consequente  $f_c$  é resultado de controle e investimento no processo produtivo da safra.

Segundo Silva Moura, Dalpont e Michels (2017), no ano de 2015 foi estimado para o trigo produção de 2.041 mil toneladas de resíduos. Considerando que a metodologia proposta nesse trabalho pode estimar diferentes quantidades de resíduos, compara-se na Figura 4.3 a diferença encontrada entre os resultados de Silva Moura, Dalpont e Michels (2017) e os da metodologia proposta para diferentes valores de  $k$  e  $Q_p$ , sendo a  $f_c$  do ano de 2015 e o  $IC_g$  de 0,6. Na Figura 4.3 e na Figura 4.4, o resultado da Equação (4.11) é representado graficamente.

$$\text{Diferença} = \text{Estimativa}_{\text{SilvaMoura et al.}} - \text{Estimativa}_{\text{Metodologia proposta}} \quad (4.11)$$

Figura 4.3 – Diferença entre os resultados de Silva Moura et al. (2017) e os da metodologia proposta, com  $IC_g$  de 0,6, em função de  $Q_p$  e  $k$

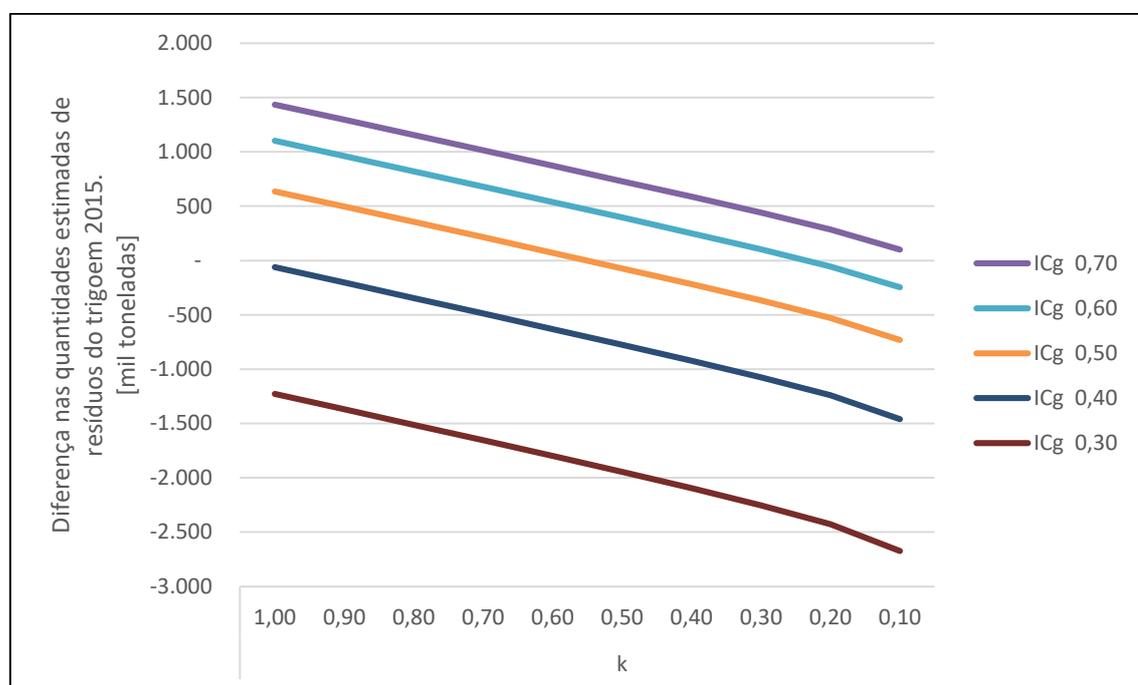


Fonte: autoria própria com dados de Silva Moura, Dalpont, Michels (2017).

Conforme a Equação (4.11), quanto maior o valor da diferença encontrada, menor é a quantidade de resíduos estimada pela metodologia proposta, comparando-se às já estimadas por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017). Entre os três casos, somente para  $k$  igual a 0,2 e  $Q_p$  zero resultou nula a diferença entre as duas estimativas, sendo neste caso as quantidades estimadas iguais. Entretanto, para as demais combinações de  $k$  e  $Q_p$  encontrou-se diferença entre os dados estimados por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017) e os da metodologia proposta, sendo menor a quantidade de resíduos estimada pela metodologia quanto menor  $Q_p$  e maior  $k$ , dado que para  $Q_p$  nulo e  $k$  0,3 a produção estimada pela metodologia é menor em aproximadamente 150 mil toneladas por ano.

A quantidade estimada de resíduos pela metodologia depende do grão plantado e do grão colhido, havendo assim possibilidade de variação na produção de resíduos da safra. Comparando as quantidades estimadas de resíduos do trigo por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017), segue na Figura 4.4 a diferença para as quantidades estimadas pela metodologia proposta quando  $f_c$  0,9907 e  $Q_p$  0,3.

Figura 4.4 – Diferença entre os resultados de Silva Moura et al. (2017) e os da metodologia proposta para o trigo em grão em 2015, para  $f_c$  de 0,9907 e  $Q_p$  de 0,3



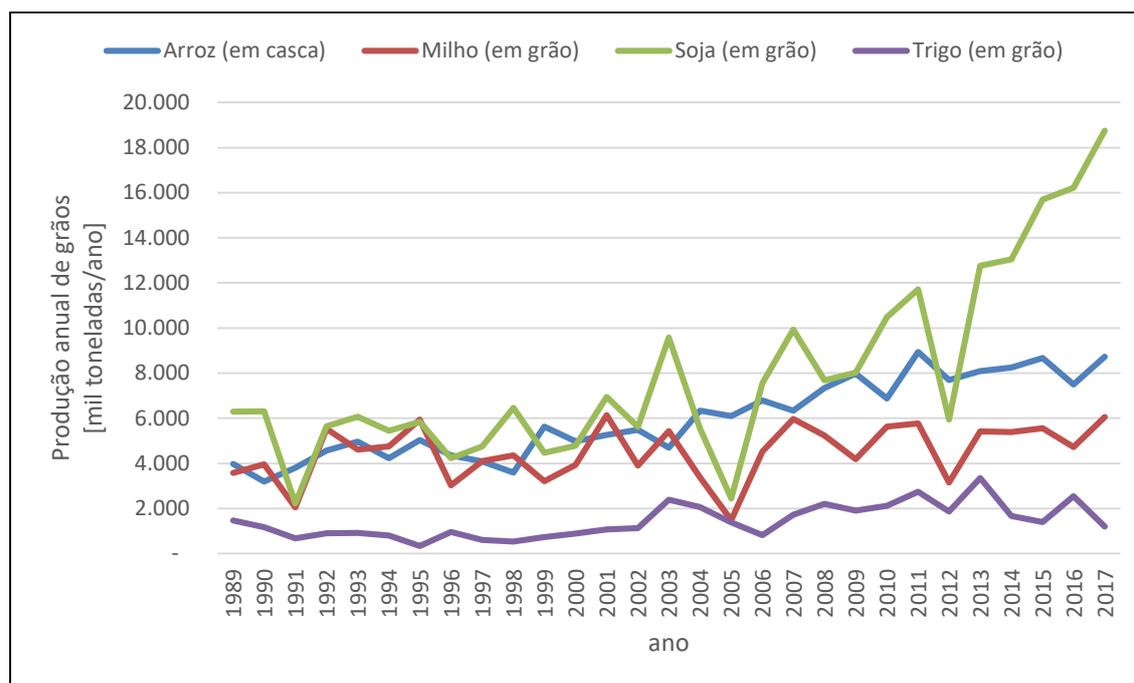
Fonte: autoria própria com dados de Silva Moura, Dalpont, Michels (2017).

Das curvas verifica-se que a diferença entre os dois resultados aumenta à medida que a qualidade do produto plantado e do produto colhido diminuem, pois aumenta a quantidade de resíduos estimada pela metodologia. Para um  $IC_g$  de 0,3 e  $k$  de 0,1 a quantidade estimada pela metodologia ultrapassa em 2.500 mil toneladas por ano a quantidade estimada por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017). Portanto, evidenciou-se uma possível distorção nas quantidades estimadas de resíduos caso a massa do vegetal descartado não seja considerada na quantificação da biomassa total disponível. Na Figura 4.4 verifica-se que as quantidades estimadas pelas duas metodologias são iguais em três situações; quando o par  $(k, IC_g)$  é, aproximadamente, (1,00; 0,4), (0,5; 0,5) ou (0,2; 0,6), corroborando a dependência das quantidades estimadas à quantidade de massa de vegetal vindo da fração de área perdida, como também às qualidades do grão plantado e do grão colhido. Em contrapartida, quanto mais elevado o  $IC_g$  do cultivar utilizado e a efetividade  $k$ , menores são as quantidades de resíduos estimadas pela metodologia proposta, e consequentemente maior a diferença para os montantes estimados por Silva Moura, Dalpont e Michels (2017), a qual passa de 500 mil toneladas quando  $IC_g$  maior que 0,6 e  $k$  maior que 0,6.

## 5 ESTUDO DE CENÁRIO E DISCUSSÕES

A metodologia proposta se constrói considerando duas fontes de resíduos: uma da fração de área colhida; e outra da fração de área perdida. Em decorrência das intempéries que ocorreram durante o crescimento do vegetal, tornam-se altas as variabilidades da efetividade  $k$  e da quantidade  $Q_p$ , as quais dependem do tipo, da intensidade e do momento das intempéries ocorridas. A estimativa da produção histórica de grãos das culturas é apresentada na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Produção anual de grãos [mil toneladas/ano]

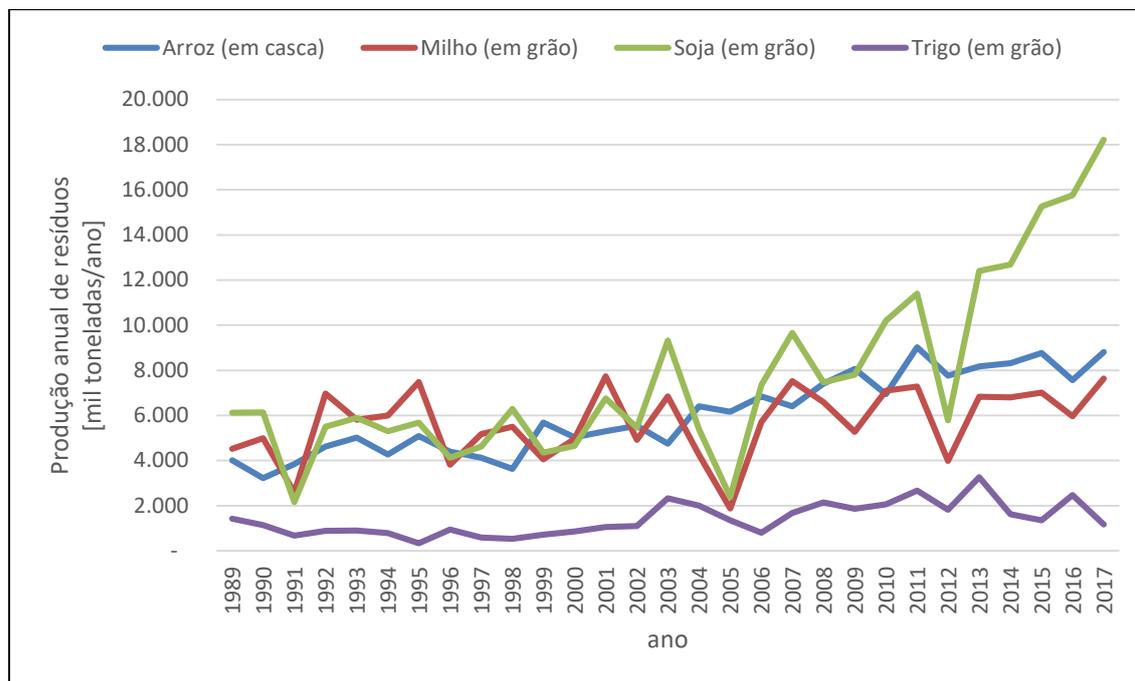


Fonte: PAM (adaptado pelo autor).

A produção dos grãos das safras sofreram significativas variações ao longo do histórico, exceto a do trigo. O investimento no cultivo de milho e soja varia em razão das intempéries e situações de mercado, uma vez que por serem culturas de verão dependem da pluviosidade verificada no ano, assim como do preço das *commodities* no mercado internacional<sup>2</sup>. O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz, contribuindo com mais de 70% da produção nacional, e detém portanto o controle da oferta; por ser cultivado na forma irrigada, o grão não sofre grandes variações por intempéries, e por consequência é crescente o investimento no grão (SILVA MOURA; DALPONT; MICHELS, 2017).

Fruto da produção de grãos nas safras, a produção total de resíduos é apresentada na Figura 5.2.

<sup>2</sup> Ver mais em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/milho/237279-cotacoes-do-milho-registram-maior-patamar-dos-ultimos-5-anos-na-bolsa-de-chicago.html#.XQYb94hKjIU>. Acesso em: 16 maio 2019.

Figura 5.2 – Produção de resíduos para  $Q_p$  nulo [mil toneladas/ano]

Fonte: Autor, com  $IC_c$  de Cabral et al. (2012) e  $f_c$  histórica.  $IC_g$  de 0,6.

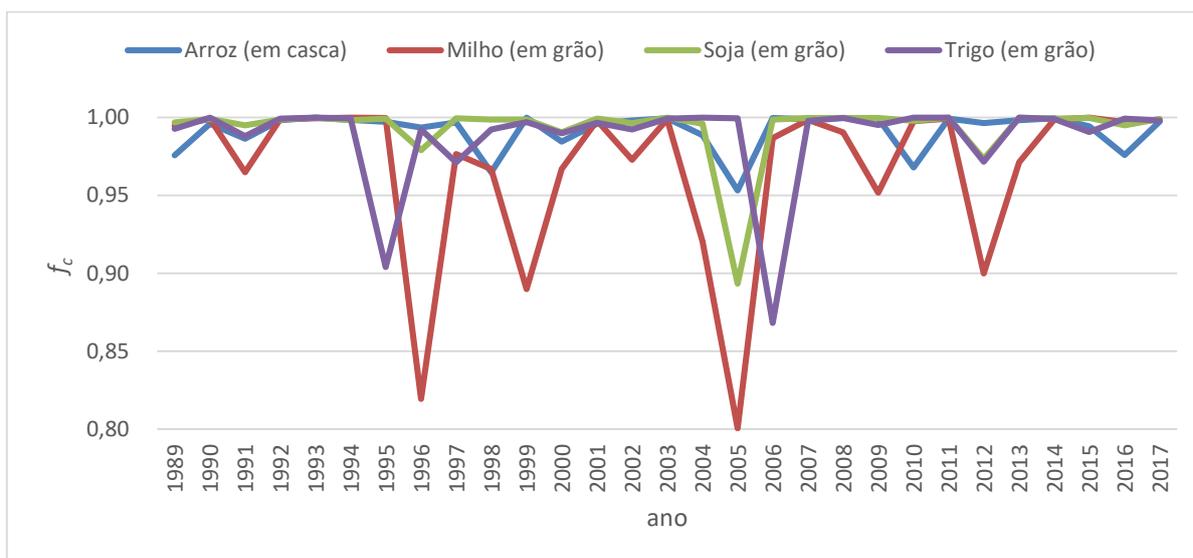
As produções de resíduos do arroz, do milho e da soja são as mais elevadas, havendo entre os anos 1991 a 2002 quantidades totais em torno de 5 milhões de toneladas de resíduos produzidos. No entanto, no ano de 2005 houve uma retração na fração de área colhida do milho e da soja, e por consequência a produção de grãos foi menor, implicando uma queda na produção de resíduos. Nos anos seguintes, a elevação na fração de área colhida resultou no aumento da produção de resíduos; entretanto, em 2012, a elevada fração de área colhida da soja não teve como consequência a manutenção da produção de resíduos, pois a produção anual do grão no Estado foi reduzida quase à metade do ano de 2011, caindo de 11,717 milhões para 5,945 milhões de toneladas do grãos. Contudo, no ano de 2012 a elevação dos preços da *commodity* no mercado internacional resultou na recuperação da produção de grãos, pela elevação da atratividade do investimento, tendo como consequência aumento na produção de resíduos<sup>3</sup>.

A Figura 5.3 mostra a curva histórica de fração de área colhida, em que se destaca que nos anos de 1996, 1999 e 2005 houve as menores frações de área colhida para o milho.

<sup>3</sup> Sobre o preço da soja nos últimos dez anos, vem mais em :

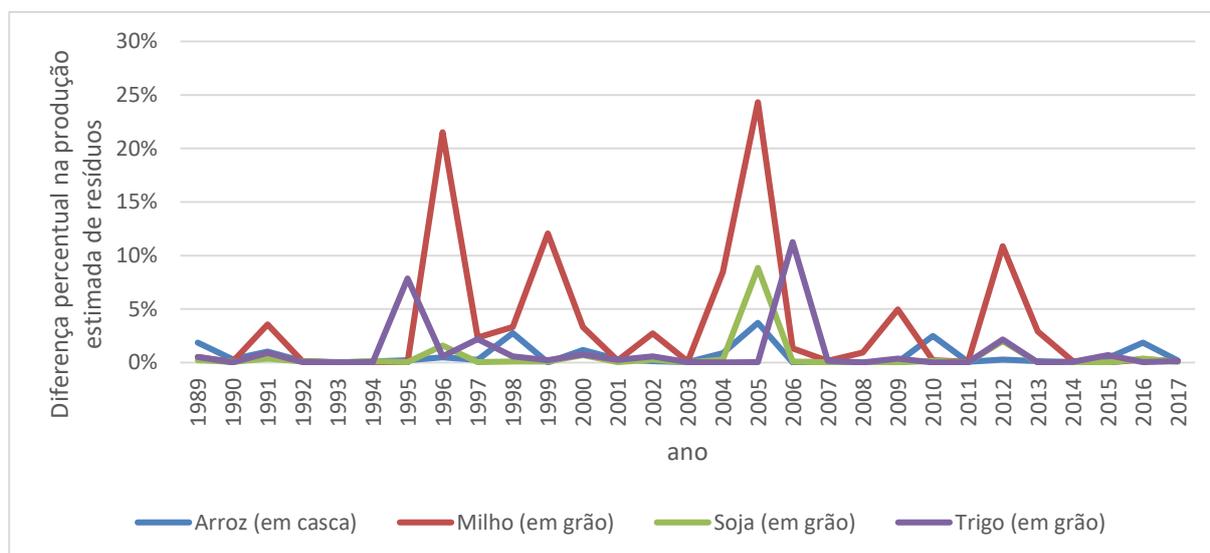
<http://panoramainternacional.fee.tche.br/article/o-preco-da-soja-no-ultimo-decenio/>. Acesso em: 11 jun. 2019.

Figura 5.3 – Fração histórica de área colhida dos cultivares



Fonte: Autor.

As diferenças presentes na Figura 5.4 relacionam a variação histórica de fração colhida às diferenças nas quantidades estimadas quando  $Q_p$  é igual a 0,3 e igual a 0.

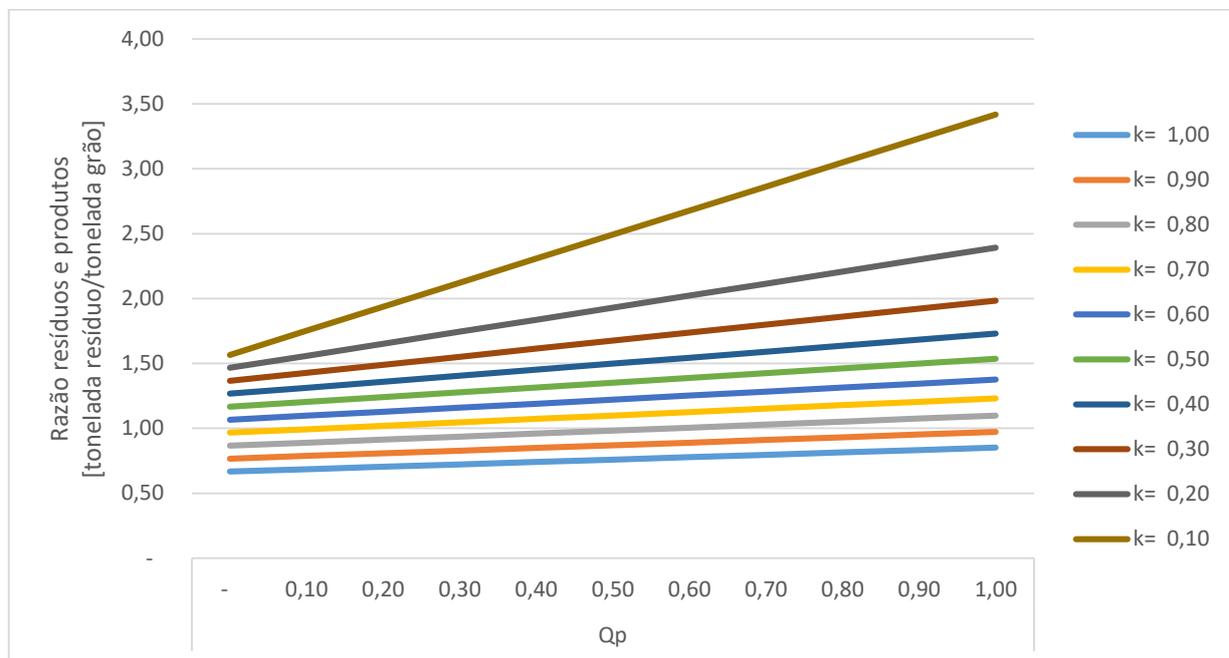
Figura 5.4 – Diferença percentual na produção histórica de resíduos quando  $Q_p$  igual a 0,3 e igual a 0.

Fonte: Autor, com  $IC_c$  de Cabral et al. (2012) e  $f_c$  histórica.  $IC_g$  igual a 0,6.

Na curva de produção histórica dos resíduos para o milho há a maior diferença nos dados estimados, haja vista que este tem a maior variação na  $f_c$  ao longo dos 28 anos, elevando a possível quantidade de resíduos vindos da fração de área perdida. Para o caso do milho, a diferença entre as quantidades estimadas para  $Q_p$  0,3 e 0 pode passar de 20%. Isso evidencia que com agricultura de precisão, cuja fração de área colhida é por consequência elevada, a representatividade dos resíduos da parte perdida da safra é pequena, pois se perde pouco da safra. Também, caso ocorra retração da fração de área colhida na lavoura, a possibilidade de alta produção de resíduos por grãos deve ser considerada pelo agricultor em seu planejamento, uma vez que se não preparado para baixa produção de grãos da lavoura há grandes chances deste não conseguir honrar seus compromissos com credores, porque a produção de grãos foi abaixo do esperado.

Considerando no planejamento agrícola a possibilidade de retração da fração de área colhida, e a possível produção de resíduos decorrente, a  $R_{r-p}$  para  $IC_g$  de 0,6 e  $f_c$  de 0,9 é evidenciada na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Razão resíduos-produtos em função de  $Q_p$  e  $k$  para  $IC_g$  de 0,6 e  $f_c$  de 0,9



Fonte: Autor

Na Figura 5.5 verifica-se a possibilidade de geração de mais de 3 toneladas de resíduos por tonelada de grão, para o caso de  $k$  0,1 e  $Q_p$  1,0. Entretanto, se tal fração de área foi dada como perda não é possível que a densidade de vegetal na fração de área perdida seja igual à densidade de vegetal da fração de área colhida, pois justamente foi descartada. Por isso, considerando um caso de  $Q_p$  de 0,3, a produção de resíduos pode ser de 0,72 até 2,12 toneladas por tonelada de grão, sendo tais estimativas vinculadas ao  $IC_g$  de 0,6 e uma  $f_c$  de 0,9. Caso os dados de colheita de uma safra em análise sejam menos atrativos para o agricultor, ou seja, menores  $f_c$ ,  $k$  e  $IC_g$ , maiores serão as quantidades de resíduos produzidos por grão colhido, como possível também maior representatividade dos resíduos da fração de área perdida.

## 6 CONCLUSÃO

A falta de informações acerca da área perdida da lavoura levanta o questionamento sobre o que houve nesta fração de área que justifique ter sido dada como perdida, podendo ser por intempéries nos diferentes estágios de crescimento do vegetal. Dessa forma, faz-se necessário o conhecimento do evento que diminuiu a fração colhida da safra pelo produtor, pois retraída a fração colhida da lavoura há queda na produção de grãos, o que diminui o lucro da safra, surgindo como consequência a possibilidade de comercialização dos resíduos da safra como forma de mitigar os impactos financeiros.

Para quantificar a biomassa total disponível, a metodologia proposta faz uso de informações dos grãos plantados e de fatores relacionados aos grãos colhidos e à quantidade de material vegetal contido na fração de área perdida, sendo possível estimar as perdas ocorridas e também as perdas que podem ocorrer caso se configurem cenários de baixa produtividade de grãos ou de elevada perda da fração de área colhida. Desse modo, partindo de cinco informações –  $f_c$ ,  $IC_g$ ,  $Q_p$ ,  $k$  e  $Produção_{grãos}$  – é possível de estimar os riscos em contratos de compra e venda de resíduos agroindustriais firmados entre o agricultor e usinas de produção de biogás, uma vez que instalações rurais que praticam agricultura de precisão têm maior controle sobre a produção de grãos, contudo com menor geração de resíduos por grão colhido, mas consequentemente oferecem maior garantia no fornecimento de resíduos produzidos, o que aumenta a segurança nos contratos de fornecimento firmados entre as partes.

Logo, a aplicação da metodologia proposta para estimativa da produção de resíduos agrícolas possibilita agregar mais segurança no planejamento do produtor rural e na gestão dos contratos de fornecimento de matéria-prima para produção de biogás em contratos de longo prazo com agricultores de precisão. Também oferece oportunidades de momento a produtores de biogás quando agricultores tiverem insucesso na safra, que podem se valer da alta oferta de material vegetal e obter melhores preços por tonelada de resíduo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/proinfa>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

BRASIL. Decreto nº 4.873, de 11 de novembro de 2003. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – "LUZ PARA TODOS" e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, DF, 12 nov. 2003.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, DF, 13 fev. 1998.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, DF, 29 abr. 2002.

CABRAL, J. M. et al. **Documentos 13**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agroenergia Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2012.

DURÃES MACHADO, F. O.; MAGALHÃES, P. C.; DE OLIVEIRA, A. C. Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, p. 33-40, 2002.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A. et al. Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. **Applied Energy**, v. 136, p. 781-796, 2014.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A. et al. Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation. **Biomass and Bioenergy**, v. 88, p. 43-58, 2016.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

SAFFER, M.; ALBUQUERQUE, C. M. F.; FARIA, Z. M. F.; MARANHÃO, N. **Análise da metodologia utilizada para a caracterização nacional dos rsu no plano nacional de resíduos sólidos**. melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil, Relatório Parcial nº. 1 – RT 1. Porto Alegre: Ministério do Meio Ambiente, 2013.

SILVA MOURA, P. R.; DALPONT, G.; MICHELS, F. B. Identificação e quantificação do potencial energético dos resíduos agrícolas disponíveis na região sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, 5. Criciúma - SC. **Anais...** 2017.

SOUZA, S. N. M. DE; SORDI, A.; OLIVA, C. A. Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná – 4º Encontro de Energia no Meio Rural. **4º Encontro de Energia no Meio Rural**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2002.

## APÊNDICE A – Equações utilizadas na modelagem

Analisando a produção de vegetal, no fluxo de produção de massa vegetal pode ocorrer variação na produção de grãos da safra tanto em razão da redução da  $f_c$  quanto pelo baixo  $IC_c$  da lavoura, contudo é igual a densidade de produção de vegetal em ambos os casos, como demonstra a Equação (1).

$$\frac{Produção_{verificado}}{A_c IC_c} = \frac{Produção_{esperada}}{A_p IC_g} \quad (1)$$

Sendo a produção de grãos verificada igual à esperada na fração de área colhida, Equação (2) a componente de resíduos complementar à produção de grãos segue na Equação (3), tendo em vista que o  $IC_c$  verificado por estar aquém do  $IC_g$  esperado:

$$Produção_{grãos} = Produção_{verificada} f_c \quad (2)$$

$$Produção_{resíduos safra} = Produção_{grãos} \frac{1 - k IC_g}{IC_g} \quad (3)$$

Considerando a redução da quantidade material da fração de área perdida, a produção de resíduos em tal fração de área segue na Equação 4.

$$Produção_{resíduo área perdida} = Q_p \frac{Produção_{grãos}}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (4)$$

A produção total de resíduos em função de  $f_c$ ,  $IC_g$ ,  $k$ ,  $Q_p$ ,  $Produção_{grãos}$  está na Equação (5), de cujo equacionamento segue a razão entre a produção total de resíduos e a produção de grãos na Equação (6) e a razão entre a produção de resíduos da fração de área perdida e da fração de área colhida na Equação (7).

$$Produção_{resíduo total} = Produção_{grãos} \frac{1 - k IC_g}{IC_g} + Q_p \frac{Produção_{grãos}}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (5)$$

$$R_{r-p} = \frac{1 - k IC_g}{IC_g} + Q_p \frac{1}{k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (6)$$

$$R_{r-r} = \frac{Q_p}{k} \frac{1}{1 - k IC_g} \left( \frac{1}{f_c} - 1 \right) \quad (7)$$