

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Roberta Lago Giovelli

**LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A  
DECOMPOSIÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB  
DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA PALHA**

Santa Maria, RS  
2022

Roberta Lago Giovelli

**LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO DE  
PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA  
PALHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Sandro José Giacomini

Santa Maria, RS  
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Gioielli, Roberta Lago  
LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO  
DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE  
REMOÇÃO DA PALHA / Roberta Lago Gioielli.- 2022.  
56 p.; 30 cm

Orientador: Sandro José Giacomini  
Coorientadora: Raquel Schmatz  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2022

1. Cana-de-açúcar 2. Liberação de fósforo e potássio da  
palha 3. Quantidade de palha 4. Condições edafoclimáticas  
I. Giacomini, Sandro José II. Schmatz, Raquel III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ROBERTA LAGO GIOVELLI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Roberta Lago Giovelli**

**LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO DE  
PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA  
PALHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Aprovado em 24 de fevereiro de 2022:**

---

**Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Douglas Adams Weiler, Dr. (UFSC)**

---

**Paulo Ademar Avelar Ferreira, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre junto a mim guardando, guiando e iluminando meus passos.

Aos meus pais, Paulo e Nedi, meus maiores exemplos de vida, agradeço por todo o amor, carinho, paciência, confiança, incentivo e apoio durante minha trajetória acadêmica.

Ao meu irmão, Ricardo, pela amizade, compreensão e apoio de sempre.

À minha avó Helena e demais familiares, pelo apoio e incentivo durante minha caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Sandro José Giacomini, agradeço pela oportunidade, ensinamentos, paciência e pela confiança em mim depositada durante esses anos.

À minha coorientadora, Raquel Schmatz, por todo o auxílio, ensinamentos e disponibilidade apesar da distância.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de um estudo de qualidade e de crescimento pessoal e profissional.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado, que possibilitou a realização deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Solos, pelo aprendizado.

Ao Guilherme Dietrich, por disponibilizar parte de seus estudos para o desenvolvimento e execução deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação do LABCEN, Adriane, Bruno, Caren, Getúlio, Heitor, José Flávio, Pâmela e Stefen, pela convivência e amizade neste período.

Aos bolsista e ex-bolsistas de iniciação científica, Bruna, Fernanda, Gabriele, Guilherme, Menikey, Milena, Mônica, Natália, Rafael e demais bolsistas do LABCEN, pela amizade e auxílio na realização deste trabalho.

Ao laboratório de Fertilidade do Solo, pelo auxílio nas análises que fazem parte deste trabalho.

A banca examinadora, pela disponibilidade, contribuição e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos meus amigos, Adriane, Bruno, Douglas, Heitor, Luize, Nariane, Pâmela, Raquel e Vanessa, pela amizade e conselhos, pelos momentos de descontração deixando este período mais leve, sempre me motivando a seguir em frente e não desistir dos meus objetivos.

E, por fim, a todos que de alguma forma auxiliaram neste trabalho e me incentivaram a nunca desistir, minha gratidão!

## RESUMO

### LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA PALHA

AUTORA: Roberta Lago Giovelli

ORIENTADOR: Dr. Sandro José Giacomini

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) resulta em grandes quantidades de palha depositada na superfície do solo, despertando o interesse das indústrias no uso desta para a produção de bioetanol e geração de eletricidade. Entretanto, a manutenção da palha na superfície do solo apresenta inúmeros benefícios, sejam eles físicos, químicos ou biológicos. Desse modo, a remoção parcial da palha surge como alternativa. Contudo, ao remover parcialmente a palha, *mulches* de diferentes quantidades são formados, podendo alterar as taxas de decomposição e de liberação de fósforo (P) e potássio (K) da palha que permanece na superfície do solo. Assim, o presente estudo teve como objetivo testar se a quantidade de palha de cana-de-açúcar mantida na superfície do solo em diferentes condições edafoclimáticas afeta a decomposição e a liberação de P e K, e como a posição da camada de palha no interior do *mulch* afeta a dinâmica de liberação P e K. Para atingir esse objetivo foram utilizadas palhas de cana-de-açúcar provenientes de dois experimentos de campo. O Experimento I foi conduzido em 2015/16, em cinco locais do Rio Grande do Sul durante 330 dias e o Experimento II foi conduzido em 2017/18, no Departamento de Solos da UFSM durante 360 dias. Em ambos os experimentos, os tratamentos consistiram em 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha, em um delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. No Experimento II, os tratamentos com 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha foram divididos em duas (superior e inferior) e três (superior, central e inferior) camadas, respectivamente, com 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha cada camada. No Experimento I foram realizadas sete coletas e no Experimento II seis coletas de palha onde foram avaliadas a matéria seca remanescente (MSR) e os teores de P e K remanescentes. A quantidade de palha não apresentou efeito na decomposição, com 36,7 % de MSR para as três quantidades aos 330 dias ( $P > 0,05$ ), e teve efeito transitório na liberação de P e K nos primeiros 150 dias de avaliação. Aos 330 dias, a quantidade de P e K liberada foi de 3,75 e 0,27 kg ha<sup>-1</sup> de K e P, respectivamente, para cada tonelada de palha mantida na superfície do solo. Por outro lado, o local afetou a decomposição e liberação de P e K da palha durante todo o período avaliado, com maior decomposição e liberação desses nutrientes em locais de maior precipitação e temperatura média do ar. A ausência de efeito da quantidade de palha sobre a liberação do P e K pode ser atribuído a formação de um gradiente vertical de liberação no interior do *mulch*, que pode ser observado através dos resultados obtidos no Experimento II, onde camadas do *mulch* em contato com o solo apresentam maior liberação de P, enquanto camadas expostas a atmosfera tendem a liberar K mais rapidamente. Os resultados deste estudo indicam que independentemente do local, a remoção parcial da palha não afeta a decomposição e a liberação de P e K da palha. No entanto, a remoção parcial reduz a quantidade de P e K reciclada no solo, condição que requer atenção quanto ao balanço de nutrientes nos cultivos com cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** *Mulch*. Fósforo. Potássio. Palha de cana-de-açúcar. Quantidade de palha.

## ABSTRACT

### PHOSPHORUS AND POTASSIUM RELEASE DURING THE DECOMPOSITION OF SUGARCANE STRAW UNDER DIFFERENT STRAW REMOVAL RATES

AUTHOR: Roberta Lago Giovelli  
ODVISOR: Dr. Sandro José Giacomini

The mechanized harvesting of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) results in large amounts of straw deposited on the soil surface, arousing the interest of industries in its use for the production of bioethanol and electricity generation. However, the maintenance of straw on the soil surface has numerous benefits, whether physical, chemical, or biological. Thus, the partial removal of straw appears as an alternative. However, when partially removing a straw from the soil surface, mulches of different amounts are formed which can change the rates of decomposition and release of phosphorus (P) and potassium (K) from the straw that remains on the soil surface. Thus, the present study aimed to test whether the amount of sugarcane straw kept on the soil surface under different soil and climatic conditions affects the decomposition and release of P and K, and how the position of the straw layer inside the mulch affects the P and K release dynamics. To achieve this objective, sugarcane straw from two field experiments was used. Experiment I was conducted on 2015/16, at five locations in the Rio Grande do Sul for 330 days and experiment II was conducted on 2017/18, at the UFSM Soil Department for 360 days. In both experiments, treatments consisted of 4, 8, and 12 Mg ha<sup>-1</sup> of straw, in a randomized complete block design with four replications. In experiment II, treatments with 8 and 12 Mg ha<sup>-1</sup> straw were divided into two (upper and lower) and three (upper, central, and lower) layers, respectively, with 4 Mg ha<sup>-1</sup> straw in each layer. In experiment I, seven collections were carried out and in experiment II, six straw collections were carried out, where the remaining dry matter (DM), P, and K were evaluated. The amount of straw did not affect decomposition, with 36.7 % of DM for the three amounts at 330 days ( $P > 0.05$ ), and had a transient effect on the release of P and K in the first 150 days of evaluation. At 330 days, the amount of P and K released was 3.75 and 0.27 kg ha<sup>-1</sup> of K and P, respectively, for each ton of straw kept on the soil surface. However, the location affected the decomposition and release of P and K from the straw throughout the evaluated period, with the greater release of these nutrients in places with greater precipitation and average air temperature. The lack of effect of the amount of straw on the release of P and K can be attributed to the formation of a vertical gradient of nutrient release within the mulch, which can be observed through the results obtained in Experiment II, where mulch layers in contact with the soil present greater release of P, while layers exposed to the atmosphere tend to release K more quickly. The results of this study indicate that, regardless of location, partial straw removal does not affect straw decomposition and P and K release. However, partial removal reduces the amount of P and K recycled in the soil, a condition that requires attention to the balance of nutrients in sugarcane crops.

**Keywords:** Mulch. Phosphorus. Potassium. Straw sugarcane. Straw quantity.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização geográfica dos locais de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.  
.....45
- Figura 2** - Precipitação acumulada (a) e temperatura média (b) durante o período do Experimento I. ....46
- Figura 3** - Precipitação acumulada (a) e temperatura média (b) durante o período do Experimento II. ....47
- Figura 4** - MS (a, b), P total (c, d) e K total (e, f) remanescentes nas três quantidades de palha (a, c, e) e nos cinco locais de estudo (b, d, f). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). ....48
- Figura 5** - Quantidades cumulativas de P (a, b) e K (c, d) liberadas nas três quantidades de palha (a, c) e nos cinco locais de estudo (b, d). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). ....49
- Figura 6** - Evolução das relações C: P (a, b) e N: P (c, d) na palha remanescente das três quantidades de palha (a, c) e nos cinco locais de estudo (b, d). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). ....50
- Figura 7** - MS (a, b), P total (c, d) e K total (e, f) remanescentes nas três quantidades de palha (a, c, e) e posições da palha no interior do mulch (b, d, f). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). ....51

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Localização e breve descrição do solo (camada 0-10 cm) e clima de cada local do Experimento I. .... 41
- Tabela 2** - Resultados da análise da variância (ANOVA) mostrando o efeito da quantidade de palha (Q), do local (L) e suas interações nas variáveis avaliadas no Experimento I. .... 42
- Tabela 3** - Resultados da análise da variância (ANOVA) mostrando o efeito da quantidade de palha (Q) e da posição da palha no interior do mulch (C) nas variáveis avaliadas no Experimento II. .... 43
- Tabela 4** - Parâmetros de decomposição, P e K remanescentes da palha de cana-de-açúcar para as três diferentes quantidades (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>) e os cinco locais (SM: Santa Maria, PEL: Pelotas; SJ: Salto do Jacuí; PX: Porto Xavier e SLG: São Luiz Gonzaga)... 44

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	10
1.1	HIPÓTESES .....	13
1.2	OBJETIVO GERAL .....	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2</b>	<b>LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA PALHA</b> .....	15
2.1	ABSTRACT .....	15
2.2	INTRODUÇÃO .....	16
2.3	MATERIAL E MÉTODOS .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Experimento I</b> .....	18
2.3.1.1	<i>Área do experimento</i> .....	18
2.3.1.2	<i>Resíduos culturais, delineamento experimental e tratamentos</i> .....	19
<b>2.3.2</b>	<b>Experimento II</b> .....	20
2.3.2.1	<i>Área do experimento</i> .....	20
2.3.2.2	<i>Resíduos culturais, delineamento experimental e tratamentos</i> .....	20
<b>2.3.3</b>	<b>Avaliações</b> .....	21
<b>2.3.4</b>	<b>Cálculos e análise estatística</b> .....	22
2.4	RESULTADOS .....	23
<b>2.4.1</b>	<b>Efeito da quantidade de palha na decomposição e liberação de P e K da palha</b> ..	23
<b>2.4.2</b>	<b>Efeito do local na decomposição e liberação de P e K da palha</b> .....	24
<b>2.4.3</b>	<b>Relações C: P e N: P ao longo do tempo em função da quantidade de palha e do ambiente</b> .....	25
<b>2.4.4</b>	<b>MS, P e K remanescentes em função da posição da palha no interior do <i>mulch</i></b> ..	26
2.5	DISCUSSÃO .....	28
<b>2.5.1</b>	<b>Efeito da quantidade de palha e do local de estudo na decomposição e liberação de P e K da palha</b> .....	28
<b>2.5.2</b>	<b>Efeito da posição da palha no interior do <i>mulch</i> na decomposição e na liberação de P e K da palha</b> .....	31
2.6	CONCLUSÃO .....	33
2.7	REFERÊNCIAS .....	34
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	52

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Originária da Ásia, a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tem sua produção difundida em todo mundo (FAO, 2021), concentrando-se em países de clima tropical e subtropical. O Brasil ocupa lugar de destaque, sendo o maior produtor mundial (USDA, 2021), com uma área cultivada de aproximadamente 8,3 milhões de hectares na safra 2021/22 (CONAB, 2021). O setor sucroalcooleiro brasileiro é impulsionado pela alta demanda de matéria-prima para a produção de etanol para atender o mercado interno e pelas elevadas exportações de açúcar e etanol. Visando a redução na emissão dos gases de efeito estufa (GEE) a legislação nacional e, em alguns casos, estadual, prevê o gradual fim das queimadas que antecedem a colheita. Atualmente, em mais de 90 % da área cultivada com cana-de-açúcar a colheita é mecanizada, sem o uso da queima prévia da palha (CONAB, 2021), tornando a produção mais sustentável.

Com a adoção da colheita mecanizada restam aproximadamente 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha (ponteiras, folhas e fragmentos de colmos) na superfície do solo para cada 100 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos produzidos, podendo formar um *mulch* de 10 a 12 cm de espessura (CAMPOS, 2003; ROBERTSON e THORBURN, 2007). Devido à crescente demanda por etanol e eletricidade, a grande quantidade de palha deixada na superfície do solo tem despertado o interesse das grandes indústrias, onde essa palha passa a ser considerada matéria-prima promissora como fonte geradora de eletricidade e para a produção de etanol de segunda geração, também conhecido como etanol celulósico ou bioetanol (SANTOS et al., 2012; LEAL et al., 2013; NUNES et al., 2013). Contudo, ao remover completamente a palha da superfície do solo para fins industriais, a exportação de nutrientes do solo aumenta, reduzindo a ciclagem de nutrientes. Como consequência, a fertilidade do solo reduz, podendo aumentar significativamente o consumo de fertilizantes à base de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) pela cultura, ao longo prazo (CHERUBIN et al., 2019), elevando os custos de produção da cultura e gerando um maior impacto ambiental. Dessa forma, buscando minimizar os impactos negativos no solo ocasionados pelo recolhimento total da palha e visando incrementar a produção de etanol e geração de energia, a retirada parcial surge como uma alternativa promissora.

Durante o processo de decomposição, os nutrientes presentes nos resíduos culturais são transformados e podem ser liberados ao solo (NOACK et al., 2012; VARELA et al., 2017). A liberação desses nutrientes depende de inúmeros fatores e suas inter-relações, como: localização e forma do nutriente no tecido vegetal (GIACOMINI et al., 2003); fatores

climáticos, principalmente, temperatura e precipitação (SANTOS et al., 2014); características bioquímicas dos resíduos culturais (também conhecida como qualidade do resíduo), quantidade de resíduo cultural, tamanho das partículas dos resíduos e da sua localização no solo (contato solo-resíduo) (OLIVEIRA et al., 2002; MOREIRA e SIQUEIRA, 2006; BOER et al., 2007; COTRUFO et al., 2013). Com a remoção parcial da palha o principal fator afetado é a quantidade de palha mantida na superfície do solo, influenciando diretamente no contato solo-resíduo, sendo que quanto maior a quantidade de palha, menor será a proporção de palha do *mulch* em contato direto com o solo. Aliado a redução da quantidade de palha também ocorre modificação no teor de umidade do solo, com maior perda de água do solo por evaporação em condições com menor quantidade de palha na superfície do solo.

Resíduos culturais que estão em menor contato com o solo apresentam menores taxa de decomposição quando comparados a resíduos que permanecem em contato direto com o solo (STEINER et al., 1999; ABEVIN e RECOUS, 2007; GIACOMINI et al., 2008). Desta forma, pode inferir-se que o aumento da quantidade de resíduos culturais na superfície do solo e formação de um *mulch* mais espesso a taxa de decomposição diminui devido a menor proporção de palha em contato direto com o solo (STOTT et al., 1990). Entretanto, estudos mais recentes demonstram que a taxa de decomposição é proporcional a quantidade de resíduo depositada na superfície do solo (HALDE e ENTZ, 2016; WILLIANS et al., 2018, SCHMATZ, 2019). De acordo com Dietrich et al. (2019), ao aumentarmos a quantidade de resíduo na superfície do solo, as camadas mais próximas ao solo são expostas a um microclima mais favorável a decomposição, permanecendo mais úmidas e com uma menor variação de temperatura, ocorrendo um efeito compensatório na decomposição. No entanto, ainda são escassos os resultados sobre o efeito de diferentes quantidades de palha na dinâmica de liberação de nutrientes da palha, condição que pode se tornar comum em um cenário de remoção parcial da palha para fins de produção de bioetanol e geração de energia.

Embora a palha da cana-de-açúcar apresente elevada relação C: N (geralmente 100: 1), cerca de 60 % da quantidade inicial da palha mantida na superfície do solo é decomposta em um ano na região centro-sul do Brasil (VARANDA et al. 2018). A ocorrência do processo de decomposição juntamente com a concentração e espécie do nutriente no tecido vegetal governam o processo de liberação de nutrientes da palha (NOACK et al., 2012; VARELA et al., 2017). No caso do P, é aceito que a fração inorgânica é liberada mais rapidamente, ainda nos estágios iniciais da decomposição, e que a fração orgânica depende da ocorrência de processos bioquímicos para se tornar disponível para as plantas (VARELA et al., 2017). Conforme Varela et al. (2017) a magnitude da liberação de P é afetada pela quantidade e

qualidade do resíduo cultural e pelas condições ambientais do período de decomposição. Além disso, as concentrações de P orgânico e de P inorgânico variam de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura (NOACK et al. 2012). Geralmente, resíduos culturais maduros (fase de colheita) apresentam baixos teores de P (NOACK et al., 2012; CHERUBIN et al. 2019), porém cerca de 40 a 60 % do teor total do P desses resíduos é a fração de P solúvel em água (DAMON et al., 2014), tendo potencial de ser lixiviado para a solução do solo após a primeira chuva significativa no campo (NOACK et al., 2012). Na liberação de P de resíduos culturais, também deve-se considerar que pode ocorrer uma imobilização líquida de P quando a relação C: P do resíduo for superior a 300 (RECOUS et al., 2018). Esse fator tem sido atribuído por diversos autores para a ausência de liberação ou liberação pouco significativa de P ao longo de um ano de decomposição da palha de cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al., 1999; CONDE et al., 2005; FORTES et al., 2012; BENEDETTI, 2014).

O K é necessário em grandes concentrações para a síntese proteica e o segundo nutriente necessário, em quantidade, para o crescimento e desenvolvimento das plantas (HAWKESFORD et al., 2012), formando apenas complexos fracos no tecido vegetal e, por não ser metabolizado, é rapidamente lixiviado dos resíduos culturais para o solo após o manejo das plantas, com baixa dependência dos processos microbianos (GIACOMINI et al., 2003; HAWKESFORD et al., 2012). Com isso, a ação da água das chuvas pode constituir um fator importante para a lixiviação do K dos resíduos culturais para o solo, atingindo uma liberação considerável mesmo na ausência de decomposição (CALONEGO et al., 2012). Por estar presente em grandes concentrações na palha de cana-de-açúcar e pela sua elevada taxa de liberação para o solo durante o processo de decomposição da palha, a manutenção dos resíduos de colheita sobre a superfície do solo, torna-se importante para o equilíbrio de K, pois permite uma grande ciclagem desse nutriente, contribuindo com a nutrição das soqueiras subsequentes (POPIN et al., 2017; CHERUBIN et al., 2019).

Devido a dependência do Rio Grande do Sul pelo etanol produzido nos outros estados, a produção de cana-de-açúcar e os avanços nos sistemas de produção de bioetanol a partir da biomassa vegetal vem sendo incentivados. Ao remover a palha do campo, *mulches* com diferentes quantidades de palha são formados e permanecem na superfície do solo. Com isso, o efeito da quantidade de palha que permanece na superfície do solo sobre a dinâmica de decomposição e de liberação de nutriente da palha vem recebendo atenção (RAMOS et al., 2016; WILLIAMS et al., 2018; DIETRICH et al., 2019). Outro ponto importante a ser destacado, é que os países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, pouco exploram a ciclagem de nutrientes de resíduos culturais, sendo que na faixa tropical a contribuição

nutricional através da decomposição dos resíduos seria mais acelerada e esses nutrientes potencialmente disponíveis (LIU et al., 2010).

Dentro deste contexto, para a realização deste estudo foi utilizada a palha de cana-de-açúcar proveniente de dois experimentos conduzidos por Dietrich et al. (2017 e 2019), com quantidades de 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha na superfície do solo. O objetivo da realização deste estudo foi testar se a quantidade inicial de palha de cana-de-açúcar mantida na superfície do solo e as diferentes condições edafoclimáticas afetam a decomposição e liberação P e K da palha e, se a posição da palha no interior do *mulch* afeta a dinâmica de liberação de P e K da palha.

### 1.1 HIPÓTESES

- 1) A liberação de P e K será proporcional a quantidade de palha que permanece na superfície do solo.
- 2) A decomposição e a liberação de P e K será maior em locais com maior temperatura média do ar e precipitação, independentemente da quantidade de palha na superfície do solo.
- 3) As camadas do *mulch* em contato com a superfície do solo apresentarão uma liberação mais rápida de P, enquanto que a liberação de K será mais rápida nas camadas de palha expostas à atmosfera.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Testar se a quantidade de palha de cana-de-açúcar mantida na superfície do solo em diferentes condições edafoclimáticas afeta a decomposição e a liberação de P e K e, como a posição da palha no interior do *mulch* afeta a dinâmica de liberação de P e K do *mulch*.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Compreender como a quantidade de palha de cana-de-açúcar mantida na superfície do solo interfere na liberação de P e K.
- 2) Compreender quais fatores interferem na decomposição e na liberação de P e K da palha.

- 3) Compreender a importância do contato da palha com o solo na liberação de P e K da palha.

## 2 LIBERAÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO DURANTE A DECOMPOSIÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TAXAS DE REMOÇÃO DA PALHA<sup>1</sup>

### 2.1 ABSTRACT

The partial removal of sugarcane straw (*Saccharum officinarum* L.) from the soil surface, after mechanized harvesting, causes changes in the thickness of the mulch, which can modify the dynamics of decomposition and nutrient release. This study aimed to understand: i) how the quantities of sugarcane straw kept on the soil surface affect decomposition and the release of phosphorus (P) and potassium (K); ii) the factors that interfere in the decomposition and the release of P and K in the mulch; and, iii) the importance of soil-straw contact in the release of P and K. For this, sugarcane straw from two field experiments were used. Experiment I was carried out for 330 days at five sites in the Rio Grande do Sul, Brazil, and Experiment II was carried out for 360 days in a Typic Paludalf, at the University Federal of Santa Maria, the Rio Grande do Sul, Brazil. The treatments were composed of 4, 8, and 12 Mg ha<sup>-1</sup> of sugarcane dry matter (DM). In both studies, to evaluate the decomposition and release of P and K, the straw was allocated in a litter box of 0.16 m<sup>2</sup>. In addition, in Experiment II, the mulch for 8 and 12 Mg ha<sup>-1</sup> treatments was separated, into two and three layers of 4 Mg ha<sup>-1</sup> of DM, respectively. The amount of DM, P, and K remaining in the mulch were evaluated for each sampling in the two experiments. The interaction between quantity and study site had a transient effect, not being observed at the end of the study. The amount of straw had no significant effect on remaining DM and had a transient effect on P and K release. The study site was significant for the remaining DM, P, and K, with the highest straw decomposition and nutrient release occurring with the increase in precipitation and average air temperature and soils with higher clay, carbon (C), and nitrogen (N) contents. Straw position in the mulch has a significant but transitory effect on remaining DM, P and K. Thus, the site is the main factor that affects the decomposition and release of P and K. In addition, a vertical gradient of P and K release occurs in the mulch.

**Keywords:** Mulch. Straw sugarcane. Phosphorus. Potassium. Straw quantity. Sites.

---

<sup>1</sup> Artigo elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira em Ciência do Solo

## 2.2 INTRODUÇÃO

A produção da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é difundida em todo o mundo (FAO, 2021), concentrando-se em países de clima tropical e subtropical, dentre os quais o Brasil ocupa lugar de destaque como o maior produtor mundial (USDA, 2021). Atualmente, a colheita da cana-de-açúcar tem migrado para o sistema mecanizado, devido as legislações que preveem o gradual fim das queimadas que antecediam a colheita, visando a redução das taxas de emissão de gases para a atmosfera e os impactos da agricultura no efeito estufa (Chagas et al., 2007). Com a colheita mecânica, restam cerca de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha na superfície do solo para cada 100 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos produzidos, podendo formar um *mulch* de 10 a 12 cm de espessura sobre a superfície do solo (Campos, 2003; Robertson e Thorburn, 2007).

Devido as crescentes demandas nacionais e internacionais por etanol, a palha remanescente da colheita mecanizada passou a ser considerada matéria-prima promissora para a produção do etanol de segunda geração (Cherubin et al., 2019). Contudo, ao remover completamente a palha da superfície do solo para fins industriais, aumenta a exportação de nutrientes do solo, reduzindo assim a ciclagem de nutrientes. Conseqüentemente, a fertilidade do solo reduz, podendo aumentar significativamente o consumo de fertilizantes à base de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) pela cultura, ao longo prazo (Cherubin et al., 2019), elevando os custos de produção da cultura e gerando um maior impacto ambiental.

Ademais, manter uma camada de palha na superfície do solo oferece inúmeros benefícios ao solo, sejam eles físicos, químicos ou biológicos (Cantarella, 2010), dentre os quais podemos destacar: (i) aumento dos estoques de carbono (C) e N do solo (Panosso et al., 2009), (ii) fonte de nutrientes para a cultura subsequente (Floss, 2002), (iii) manutenção da umidade do solo, e (iv) formação de uma barreira protetora contra processos erosivos do solo. No entanto, alguns estudos apontam que a espessa camada de palha deixada na superfície do solo pela colheita mecanizada pode prejudicar o rebrote da cana soca (Carvalho et al., 2017) e favorecer as perdas de N por volatilização de amônia (Pinheiro et al., 2018). Portanto, a remoção parcial da palha surge como uma estratégia sustentável, visando uma redução no impacto do uso de fertilizantes pela remoção total da palha e pelos benefícios apresentados quando uma camada de palha é mantida na superfície do solo.

Quando a remoção parcial da palha é realizada, diferentes quantidades permanecem na superfície do solo, influenciando diretamente no fator contato solo-resíduo. Quanto maior a quantidade de palha mantida, menor será a proporção de palha do *mulch* que estará em contato

com o solo. Resíduos culturais com menor contato com o solo apresentam menor taxa de decomposição comparado a resíduos em contato direto com o solo (Steiner et al., 1999; Abevin e Recous, 2007; Giacomini et al., 2008). Desta forma, pode inferir-se que o aumento da quantidade de resíduos culturais na superfície do solo (*mulches* mais espessos) reduz a taxa de decomposição devido a menor proporção de palha em contato direto com o solo (Stott et al., 1990). Aliado à redução da quantidade de palha, ocorrem modificações no teor de umidade do solo, com maior perda de água do solo por evaporação em condições de menor quantidade de palha na superfície do solo, podendo interferir diretamente no processo de decomposição. Entretanto, estudos mais recentes demonstram que a taxa de decomposição é proporcional a quantidade de resíduo depositada na superfície do solo (Halde e Entz, 2016; Ramos et al., 2016; Willians et al., 2018; Pimentel et al., 2019). Porém ainda são escassas as informações sobre a dinâmica de liberação do P e K sob diferentes quantidades de palha mantidas na superfície do solo, uma vez que a liberação de nutrientes da palha não ocorre necessariamente nas mesmas proporções que a decomposição (Carvalho et al., 2017).

Durante o processo de decomposição, os nutrientes presentes nos resíduos culturais são transformados e podem ser liberados para o solo, dependendo das características químicas desses resíduos (Noack et al., 2012; Varela et al., 2017). A forma e a localização do nutriente no tecido vegetal determinam a velocidade com que a sua liberação ocorre durante a decomposição (Giacomini et al., 2003). O P por estar presente na palha associado a componentes orgânicos, formando macromoléculas (Hawkesford et al., 2012), tem sua liberação intimamente ligada aos processos microbianos que ocorrem durante a decomposição (Giacomini et al., 2003). Já o K, presente na forma iônica no vacúolo celular das plantas e na forma de complexos fracos, é facilmente trocável (Hawkesford et al., 2012), apresentando baixa dependência dos processos microbianos para sua liberação (Giacomini et al., 2003). A qualidades dos resíduos culturais (fração solúvel, relação C: N, teor de nutrientes, entre outros) e as condições edafoclimáticas (Paul e Clark, 1996; Giacomini et al., 2003) interferem na decomposição e liberação de nutrientes. Dentre as condições edafoclimáticas podemos destacar a temperatura e precipitação, por apresentarem correlação positiva com as taxas de decomposição (Robertson e Thorburn, 2007; Zhang et al., 2008), sendo a temperatura um fator chave nesse processo (Grzyb et al., 2020).

Portanto, a remoção parcial da palha surge como estratégia para a redução do impacto no mercado de fertilizantes e pelos inúmeros benefícios apresentados ao solo pela sua manutenção. Dessa forma, no contexto da retirada parcial da palha de cana-de açúcar, oriunda do processo de colheita mecanizada para fins industriais, os objetivos deste estudo foram: i)

compreender como a quantidade de palha de cana-de-açúcar mantida na superfície do solo interfere na liberação de P e K, ii) compreender quais fatores interferem na decomposição e na liberação de P e K da palha e iii) compreender a importância do contato da solo-palha na liberação de P e K da palha. As hipóteses são: i) a liberação de P e K será proporcional a quantidade de palha que permanece na superfície do solo, ii) a decomposição e a liberação de P e K será maior em locais de maior temperatura e precipitação, independentemente da quantidade de palha na superfície do solo, e iii) as camadas do *mulch* em contato com a superfície do solo apresentarão uma liberação mais rápida de P, enquanto que a liberação de K será mais rápida nas camadas de palha expostas à atmosfera.

## 2.3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado a partir da palha remanescente de cana-de-açúcar obtida em dois experimentos conduzidos por Dietrich et al. (2017 e 2019). Uma breve descrição dos experimentos é apresentada nos itens 2.3.1 e 2.3.2

### 2.3.1 Experimento I

#### 2.3.1.1 Área do experimento

O estudo foi realizado em condições de campo no período de setembro de 2012 a agosto de 2013, totalizando 330 dias, em cinco locais do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1): (1) Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria (SM), (2) Área experimental da EMBRAPA Clima Temperado, Pelotas (PEL), (3) Empresa Grandespe, Salto do Jacuí (SJ), (4) Cooperativa Coopercana, Porto Xavier (PX), e (5) Propriedade rural em São Luiz Gonzaga (SLG). A escolha desses locais teve por objetivo abranger diferentes regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado e com diferentes condições de solo e clima. A localização, condições climáticas e o tipo de solo de cada local de estudo são apresentados na Tabela 1. Os dados meteorológicos (temperatura média do ar e precipitação) foram obtidos nos registros oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em estações meteorológicas localizadas próximas aos locais dos experimentos (Figura 2).

### 2.3.1.2 Resíduos culturais, delineamento experimental e tratamentos

A palha utilizada no experimento de Dietrich et al. (2017) foi coletada quando a cana-de-açúcar estava no estágio de maturação. A palha utilizada para a realização do experimento foi composta por 76 % de folhas envoltas no colmo (palha lateral) e de 24 % de folhas acima do último internódio da planta (palha de ponteiro). Após a coleta, a palha foi seca ao ar e posteriormente triturada em uma trilhadora de grãos de culturas comerciais com a finalidade de uniformizar o tamanho da palha e obter uma granulometria similar a encontrada após a colheita mecanizada (cerca de 10 cm de comprimento). Após este processo, a palha permaneceu secando ao ar até peso constante. A mesma palha foi utilizada nos cinco locais a fim de evitar que diferenças na qualidade da palha pudessem dificultar a interpretação dos efeitos da quantidade de palha e das condições edafoclimáticas. A composição química da palha de cana-de-açúcar utilizada neste estudo incluiu  $435 \pm 7$  g C  $\text{kg}^{-1}$  MS,  $4,5 \pm 0,2$  g N  $\text{kg}^{-1}$  MS,  $0,49 \pm 0,02$  g P  $\text{kg}^{-1}$  MS,  $4,0 \pm 0,24$  g K  $\text{kg}^{-1}$  MS, relação C: N de  $97 \pm 7$  e uma relação C: P de  $896 \pm 30,4$ . A palha era inicialmente composta de  $100 \pm 7$  g  $\text{kg}^{-1}$  MS de fração solúvel (SOL),  $422 \pm 5$  g  $\text{kg}^{-1}$  MS de celulose (CEL),  $390 \pm 3$  g  $\text{kg}^{-1}$  MS de hemicelulose (HEM) e  $89 \pm 2$  g  $\text{kg}^{-1}$  MS de lignina (LIG).

Considerando que  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  de MS é a quantidade média produzida de palha em diferentes variedades (Franco et al., 2013), e que esta permanece na superfície do solo após a colheita mecanizada, os tratamentos foram definidos com o objetivo de simular diferentes taxas de remoção de palha: (i)  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  de MS (remoção de 67 % da palha deixada na superfície do solo), (ii)  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  de MS (remoção de 33 % da palha deixada na superfície do solo) e (iii)  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  de MS (sem remoção de palha). A quantidade de P e K adicionada ao solo através dos tratamentos foi de 2, 4 e 6 kg de P  $\text{ha}^{-1}$  e 16, 32 e 48 kg de K  $\text{ha}^{-1}$  para 4, 8 e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  de MS, respectivamente. O delineamento experimental utilizado em cada local foi o de blocos ao acaso com três repetições, sendo composto por um fatorial  $3 \times 5$ , sendo o primeiro fator quantidades (4, 8 e 12 com  $\text{Mg ha}^{-1}$  de MS) e o segundo fator o local (SM, PEL, SJ, PX, SLG).

A palha correspondente a cada tratamento foi alocada dentro de quadros de decomposição de madeira de  $0,16 \text{ m}^2$  (40 cm de largura x 40 cm de comprimento x 8 cm de altura). Os quadros foram fechados na parte inferior com uma tela de nylon de malha 2 mm, com o objetivo de evitar a perda da palha sem prejudicar o contato solo-palha e, na parte superior com uma tela plástica de malha de 10 mm a fim de não limitar o acesso da macrofauna do solo, bem como de minimizar as perdas de palha e entrada de materiais indesejados pela ação do vento. Dietrich et al. (2017) descreveu detalhadamente essa metodologia. Os quadros

de decomposição foram distribuídos entre as linhas de cana-de-açúcar, no primeiro ciclo da cana soca, no início da brotação da cultura, sendo acomodados em relevo plano, buscando maximizar o contato da palha com o solo. Durante o período de condução do experimento, nenhum tipo de fertilizante foi aplicado sobre a palha presente nos quadros de decomposição.

## 2.3.2 Experimento II

### 2.3.2.1 Área do experimento

O estudo foi realizado em condições de campo no período de novembro de 2015 a novembro de 2016, totalizando 360 dias. O experimento foi conduzido no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (29° 42' S, 53° 42' W, altitude de 90 m). O clima do local é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de aproximadamente 1796 mm e temperatura média anual de 19,3 °C, sem estação seca. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (Santos et al., 2018), com 110, 260, 630 g kg<sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente, mensurados através do método do densímetro. As características químicas do solo, na camada de 0-10 cm, no início do experimento, foram: pH<sub>H2O</sub> = 5,6, 7,54 g kg<sup>-1</sup> de C total e 0,38 g kg<sup>-1</sup> de N total. Os dados meteorológicos (temperatura média do ar e precipitação) foram obtidos nos registros oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em estação meteorológica localizada próxima ao local de estudo (Figura 3).

### 2.3.2.2 Resíduos culturais, delineamento experimental e tratamentos

A palha utilizada no experimento de Dietrich et al. (2019) foi coletada em cana-de-açúcar de primeiro corte (cana planta), após colheita mecanizada, na empresa Grandespe em Salto do Jacuí, Rio Grande do Sul, Brasil (28° 59' S, 53° 14' W, altitude de 345 m). Após a coleta, a palha permaneceu secando ao ar até peso constante. A composição química da palha de cana-de-açúcar utilizada neste estudo incluiu 425 ± 2,7 g C kg<sup>-1</sup> MS, 8 ± 0,2 g N kg<sup>-1</sup> MS, 0,50 ± 0,02 g P kg<sup>-1</sup> MS, 4,58 ± 0,2 g K kg<sup>-1</sup> MS, relação C: N de 53 ± 1,4 e uma relação C: P de 854 ± 26,6. A palha era inicialmente composta de 288 ± 7,5 g SOL kg<sup>-1</sup> MS, 372 ± 2,7 g CEL kg<sup>-1</sup> MS, 335 ± 5,2 g HEM kg<sup>-1</sup> MS e 65 ± 1,6 g LIG kg<sup>-1</sup> MS. O experimento foi conduzido na primeira soqueira da cana-de-açúcar, sendo iniciado logo após a colheita. A

colheita da área experimental foi realizada manualmente e todos os resíduos vegetais foram removidos da superfície do solo, deixando o solo descoberto.

O experimento foi composto pelos tratamentos de 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de MS. A quantidade de P e K adicionada ao solo através dos tratamentos foi de 2,3, 4,6, 6,9 kg de P ha<sup>-1</sup> e 18,5, 37 e 55,5 kg de K ha<sup>-1</sup> para 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de MS, respectivamente. A palha seca ao ar foi adicionada em caixas de decomposição de 0,16 m<sup>2</sup> (40 cm de largura x 40 cm de comprimento x 8 cm de altura) conforme descrito no Experimento I (item 2.3.1.2). Além disso, os tratamentos de 8 e 12 ha<sup>-1</sup> de MS foram divididos em duas e três camadas de 4 Mg ha<sup>-1</sup> de MS, respectivamente. As camadas foram separadas por uma malha sintética maleável de 10 mm para permitir a amostragem de cada camada separadamente, sem dificultar o acesso da macrofauna do solo no *mulch*. Portanto, o tratamento 4 Mg ha<sup>-1</sup> de MS foi constituído por uma camada única, que está simultaneamente em contato com o solo e com a atmosfera, o tratamento de 8 Mg ha<sup>-1</sup> de MS foi constituído por uma camada inferior (8 INF), em contato com o solo, e uma camada superior (8 SUP), em contato com a atmosfera, e o tratamento de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de MS foi composto por uma camada inferior (12 INF), uma camada central (12 CEN) e uma camada superior (12 SUP).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com 4 repetições. As parcelas foram constituídas por 4 linhas da cultura, com espaçamento entre linhas de 1,4 m e 4 m de comprimento, totalizando uma área de 22,4 m<sup>2</sup>. Durante o período de condução do experimento nenhum tipo de fertilizante foi aplicado sobre a palha presente nos quadros de decomposição.

### 2.3.3 Avaliações

A caracterização inicial da palha utilizada no Experimento I e no Experimento II foi realizada a partir de uma subamostra da palha inicial, que foi seca a 45 °C e posteriormente finamente moída, em moinho do tipo *Willey* (1 mm), para a análise da fração solúvel, celulose, hemicelulose e frações de lignina pelo método de Van Soest (1963), conforme descrito por Redin et al. (2014). Outra subamostra foi seca a 65 °C e moída em moinho do tipo *Willey* (1 mm) para a análise dos teores iniciais de carbono (C) e N total. Os teores de C e N totais foram determinados por combustão seca em analisador elementar (FlashEA 1112; Thermo Finnigan, Milan, Italy).

As coletas dos quadros de decomposição com a palha no experimento I foram realizadas aos 30, 60, 90, 150, 210, 270 e 330 dias e no experimento II aos 36, 72, 103, 168, 238 e 360

dias após sua distribuição na superfície do solo. A palha remanescente dos quadros de decomposição foi armazenada em sacos de papel e secos em estufa a 65 °C. Posteriormente, foi separado o solo aderido a palha através de limpeza a seco, pesada e determinado a MS remanescente. Após, a palha remanescente foi moída em moinho do tipo *Willey* (1 mm) e armazenada em potes plásticos. A quantificação do conteúdo de cinzas nas amostras, foi obtido através da incineração de 1 g de palha em mufla a 550 °C por 3 h (Tedesco et al., 1995) para a obtenção MS remanescente livre de cinzas, por diferença.

A extração de P e K da palha inicial e da palha remanescente foi realizada através da digestão de 250 mg de palha (finamente moída e seca a 65 °C) em solução nitro-perclórica (2:1) conforme a metodologia descrita por Carmo et al. (2000). A concentração de P foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Murphy e Riley (1962), através de colorimetria em espectrofotômetro (SF325NM, Bel Engineering, Italy), e a concentração de K foi determinada pela metodologia descrita por Tedesco et al. (1995) em fotômetro de chama (DM62, Digimed, Brasil).

#### 2.3.4 Cálculos e análise estatística

A MS remanescente, expressa em função da quantidade inicial adicionada, foi calculada dividindo-se a massa coletada de cada quadro de decomposição em cada data de avaliação pela massa inicial de palha adicionada em cada quadro após dedução de cinzas de cada amostra. No Experimento I a taxa de decomposição para as diferentes quantidades de palha e locais foi calculada utilizando um modelo de decaimento exponencial simples (Plantae e Parton, 2007), de acordo com a equação:

$$MS_r = MS_0 e^{-kt}$$

onde,  $MS_r$  são os valores de MS remanescente (% da quantidade inicial) no tempo  $t$ ;  $MS_0$  é a quantidade de MS no tempo 0 (% da quantidade inicial);  $k$  é a taxa constante de decomposição da MS.

Os teores de P e K remanescentes da palha em cada data de amostragem foram calculados com a MS remanescente de cada tratamento multiplicada pelas suas concentrações de P e K (descontado do teor de cinzas). No experimento II, os teores de P e K remanescentes do *mulch* total foram obtidos a partir da soma dos teores de nutrientes de cada camada de palha que compõem o *mulch*.

Os valores obtidos das quantidades de P e K em cada coleta para o Experimento I foram ajustados para o modelo assintótico (Wieder e Lang, 1982), definido pela equação:

$$Pr e Kr = Ae^{-kt} + (100 - A)$$

onde, Pr e Kr são os valores de P e K remanescentes (% da quantidade inicial) no tempo t; A é a quantidade de P ou K (% da quantidade inicial) contida no compartimento lábil (mais facilmente mineralizável); (100 – A) é a quantidade de P ou K (% da quantidade inicial) contido no compartimento recalcitrante (mais difícil mineralização); k é a taxa constante de liberação de P e K do compartimento A.

A partir dos valores da constante de decomposição da MS e da constante de liberação de P e K do compartimento A, calculou-se o tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ), que é o tempo necessário para degradar metade da quantidade inicial de palha adicionada ou para que 50 % do P e K presentes naquele compartimento sejam liberados. O  $t_{1/2}$  foi calculado conforme Plantae e Parton (2007):

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

Todos os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). No Experimento I, o efeito das diferentes quantidades de palha, dos locais de estudo e sua interação foram testados para todos os parâmetros avaliados em cada data (Tabela 2). Quando a ANOVA indicou diferenças significativas ( $P < 0,05$ ), os tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Os resultados referentes às variáveis dos modelos ajustados (MS0, compartimento A, taxa de decomposição da MS, taxas de liberação de P e de K e  $t_{1/2}$ ) foram submetidos à ANOVA (Tabela 4). Quando a ANOVA indicou diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). No Experimento II, o efeito das diferentes quantidades de palha e da posição da palha no interior do *mulch* foram testados para todos os parâmetros avaliados em cada data (Tabela 3). Quando a ANOVA indicou diferenças significativas ( $P < 0,05$ ), os tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Todos os dados foram analisados com o software estatístico SISVAR® (versão 5.6) (Ferreira, 2011).

## 2.4 RESULTADOS

### 2.4.1 Efeito da quantidade de palha na decomposição e liberação de P e K da palha

Após 330 dias de decomposição, os tratamentos de 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> apresentavam 36,1, 38 e 36 de MSR, respectivamente, (Figura 4a) sem diferenças significativas entre os tratamentos ( $P > 0,05$ ). As diferenças observadas na MSR entre as três quantidades não foram superiores a

2 % durante todo o período avaliado. Em paralelo, para a cinética de decomposição descrita utilizando um modelo de um compartimento, as três quantidades de palha apresentavam  $k$  e  $t_{1/2}$  médios de  $0,0032 \text{ dias}^{-1}$  e 219,8 dias, respectivamente, não apresentando diferenças significativas entre as quantidades de palha para nenhum dos parâmetros ( $P > 0,05$ , Tabela 4). A liberação mais intensa de P (Figura 4c) e K (Figura 4e) ocorreu nos primeiros 30 dias de avaliação, com diferenças significativas entre os tratamentos de 4, 8 e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ , que se mantém até os 60 dias ( $P < 0,05$ ). Nos primeiros 30 dias, os tratamentos de 4 e  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  apresentaram comportamento semelhante e menores teores médios de P remanescente (média de 64,8 %) e K remanescente (média de 11,3 %) do que  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  (71,7 e 13,9 % de P e K remanescente, respectivamente). Aos 330 dias, o cumulativo liberado de P (Figura 5a) e K (Figura 5c) foi proporcional a quantidade de palha ( $4 < 8 < 12 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), com a liberação de  $3,75 \text{ kg K ha}^{-1}$  e  $0,27 \text{ kg P ha}^{-1}$  por tonelada de palha mantida na superfície do solo, com diferença significativa entre as quantidades de palha durante todo o período de avaliação ( $P < 0,05$ ).

Para descrever a cinética de liberação de P e K foi utilizado o modelo assintótico. O efeito da quantidade de palha na liberação de P foi observado apenas para o  $k$  (Tabela 4), que foi significativamente maior para o tratamento de  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  comparado com o tratamento de  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Na média das três quantidades o  $t_{1/2}$  para a liberação de P foi de 219,76 dias. Para a liberação de K o efeito da quantidade foi observado para  $k$  e  $t_{1/2}$  (Tabela 4). O  $k$  foi significativamente superior para o tratamento de  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $0,1128 \text{ dias}^{-1}$ ) comparado com o tratamento de  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  ( $0,0893 \text{ dias}^{-1}$ ), resultando em um  $t_{1/2}$  em  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  25,8 % superior ao observado em  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  (7,8 vs 6,2 dias, respectivamente).

#### **2.4.2 Efeito do local na decomposição e liberação de P e K da palha**

Comparamos os tratamentos de quantidade de palha nos cinco locais (SM, PX, SLG, SJ e PEL), uma vez que os efeitos de interação entre a quantidade inicial de palha e os locais não apresentaram uma tendência definida e não foram observados ao final do estudo (Tabela 2). Houve um efeito significativo do local na MSR durante todo o período de avaliação, exceto aos 150 dias (Figura 4b). Um comportamento semelhante na redução de MS foi observado entre os diferentes locais. Após 330 dias, a decomposição foi menor em SJ e PEL do que nos outros locais (média de 40,4 % de MSR). A maior decomposição da MS foi observada em SLG (31,6 % de MSR) e a decomposição de MS intermediária ocorreu em SM e PX (média de 35,5 % de MSR). No modelo que descreve a cinética de decomposição, o efeito do local foi observado

para  $k$  e  $t_{1/2}$  (Tabela 4), sendo  $k$  significativamente maior para SM e SLG quando comparado a SJ (0,0033 vs 0,0028 dias<sup>-1</sup>). Em PEL e PX o  $k$  foi intermediário (0,0031 dias<sup>-1</sup>). O maior  $t_{1/2}$  foi observado em SJ (247,7 dias) sendo 1,2 vezes superior ao observado em SLG e SM (média de 205,6 dias).

Os maiores teores de P e K remanescente foram observados em PEL, sendo o efeito do local significativo durante todo o período de avaliação ( $P < 0,05$ , Figuras 4d, f). Nos primeiros 30 dias ocorreu a maior liberação de P (Figura 4d) e K (Figura 4f) nos cinco locais avaliados, onde a maior liberação foi observada em PX (55,3 e 8,1 % de P e K remanescente, respectivamente). Após 330 dias, o menor conteúdo de P remanescente foi observado em SLG e PX (média de 35,6 %) sendo 47,7 % superior à liberação ocorrida em SM e PEL (média de 56,4 %), totalizando uma liberação cumulativa média de 1,7 kg P ha<sup>-1</sup> em SM e PEL e de 2,5 kg P ha<sup>-1</sup> em SLG e PX (Figura 5b). O remanescente de P intermediário ocorreu em SJ (43,2 %), resultando em uma liberação cumulativa de 2,3 kg P ha<sup>-1</sup>. No modelo que descreve a cinética de liberação de P da palha, o efeito do local foi observado para o compartimento lábil,  $k$  e  $t_{1/2}$  (Tabela 4). O compartimento lábil foi significativamente maior para PX e SLG (média de 55,8 %) comparado a SJ (46,1 %) e SM (39,29 %). O  $k$  observado em PX foi 61 % superior ao encontrado em PEL e SLG (0,0509 vs 0,0195 dias<sup>-1</sup>, respectivamente), que resultou em um  $t_{1/2}$  significativamente maior para PEL (44,1 dias) do que SJ e PX (média de 16,3 dias).

Para o K remanescente, aos 330 dias, a menor liberação foi observada em PEL (9,8 % remanescente) comparada com SM, PX e SLG que liberaram a maior parte do K presente na palha (média de 4,6 % de K remanescente), resultando em uma liberação cumulativa de 28,8 kg K ha<sup>-1</sup> para PEL e média de 30,4 kg K ha<sup>-1</sup> para SM, PX e SLG (Figura 5d). O remanescente de K intermediário ocorreu em SJ (7,8 %), resultando em uma liberação cumulativa de 29,5 kg K ha<sup>-1</sup>. No modelo que descreve a cinética de liberação de K da palha, o efeito do local foi observado para todos os parâmetros (Tabela 4). O maior compartimento lábil foi observado em PX (95,4 %) enquanto o menor ocorreu em PEL (89,5 %). Já a taxa de liberação de K em SJ e PX foi 1,3 vezes superior à de PEL (0,1053 vs 0,0807 dias<sup>-1</sup>), resultando em um  $t_{1/2}$  maior em PEL (8,6 dias) do que SJ e PX (6,6 dias).

#### **2.4.3 Relações C: P e N: P ao longo do tempo em função da quantidade de palha e do ambiente**

Após 330 dias de decomposição, os tratamentos de 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> apresentavam uma relação C: P de 153,1, 802,2 e 795,1, respectivamente, (Figura 6a) e uma relação N: P de 16,6,

18,4 e 19,2, respectivamente, (Figura 6a) sem diferenças significativas entre os tratamentos ( $P > 0,05$ ). O efeito da quantidade de palha na relação C: P e na relação N: P foi observado, principalmente, na metade inicial do processo de decomposição (Tabela 2). Por outro lado, o local de estudo apresentou efeito significativo para a relação C: P em todas as datas avaliadas (Figura 6b), enquanto que para a relação N: P o efeito ocorreu durante todo o período de avaliação, exceto aos 270 dias (Figura 6d).

A relação C: P da palha remanescente aumentou até os 60 dias (Figura 6a, b), após esse período observou-se uma tendência de queda que se manteve até o final do experimento. Para as três quantidades avaliadas, a maior relação C: P foi observada para a quantidade de 8 Mg ha<sup>-1</sup> (1338), aos 60 dias, que diferiu da C: P média de 1154 observadas nas quantidades de 4 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>. Nas diferentes quantidades de palha a menor relação C: P foi de 767, aos 270 dias, na média das quantidades. O maior aumento na relação C: P ocorreu em PX, onde a relação C: P inicial da palha de 891 aumentou para 1489 aos 60 dias, enquanto PEL registrou o menor aumento, com uma relação de 1026 aos 60 dias. No mesmo período, a palha remanescente em SM, SJ e SLG apresentou relação C: P intermediária com valor médio de 1187. Aos 330 dias, SM e PEL apresentaram a menor relação C: P (média de 620) em comparação a SJ, PX e SLG (média de 892).

A relação N: P da palha remanescente aumentou nos primeiros 30 dias e se manteve relativamente constante até o final do experimento, tanto para as três quantidades (Figura 6c) como para os cinco locais (Figura 6d). Nos primeiros 30 dias observou-se o maior aumento da relação para 8 Mg ha<sup>-1</sup> quando passou de 8,9 na palha inicial para 18,5, enquanto 12 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou a menor elevação (13,9). Aos 330 dias, a palha remanescente, apresentava uma relação N: P de 18,1, na média das três quantidades de palha. Para SLG e PX observou-se a maior relação N: P (média de 20), aos 30 dias, já SM e PEL apresentaram a menor relação (média de 12,8). Em SJ a relação foi intermediária (15,6) não se diferenciando dos demais. Ao final do estudo, a menor relação N: P da palha remanescente foi observada em PEL (14,9) enquanto em SLG observou-se a maior relação N: P (20,5).

#### **2.4.4 MS, P e K remanescentes em função da posição da palha no interior do *mulch***

No geral, a cinética de decomposição (Figura 7a, b) e liberação de P (Figura 7c, d) e K (Figura 7e, f) foi semelhante entre as três quantidades (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>) e posição da palha no *mulch*, com uma fase mais rápida nos primeiros 30 dias seguida de outra mais lenta até o final do experimento. Assim como observado no experimento I, a decomposição não foi influenciada

pela quantidade de palha na superfície do solo ( $P > 0,05$ , Tabela 3), sendo proporcional a quantidade de palha na superfície do solo ( $12 > 8 > 4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). A maior decomposição ocorreu nos primeiros 36 dias com 66,5 % de MSR na média das três quantidades.

A liberação mais intensa de P (Figura 7c) e K (Figura 7e) ocorreu nos primeiros 36 dias de avaliação, com diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) entre os tratamentos de 4, 8 e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ , para o P aos 103 dias e para o K aos 36 e 103 dias. Para o conteúdo de P remanescente, aos 103 dias, foi possível observar que o menor teor de P ocorreu no tratamento de  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$  (51,4 %) enquanto que  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  apresentava o maior teor de P remanescente (62,9 %) para o mesmo período. Para a quantidade de K remanescente observa-se, aos 36 dias, as quantidades 4 e  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$  não diferem entre si, com um remanescente de 8,4 % do K inicial adicionado, enquanto que  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$  teve uma menor liberação (13,1 % de K remanescente). Após os 72 dias, a quantidade de K remanescente nas diferentes quantidades permaneceu estável, com uma variação inferior a 3 % até o final do período de avaliação.

Durante todo período de avaliação, a dinâmica de decomposição da MS em relação a posição da camada de palha no *mulch* (Figura 7b) seguiu uma dinâmica similar entre as camadas superiores (8 SUP = 12 SUP) e  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , da mesma forma, as camadas inferiores tiveram um comportamento semelhante a camada central (12 CEN = 8 INF = 12 INF). Por exemplo, aos 103 dias observa-se uma quantidade MSR de 62,9 % para  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , 8 SUP e 12 SUP e de 55,5 % para 12 CEN, 8 INF e 12 INF.

Nas camadas do *mulch* de  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ , a dinâmica foi caracterizada pela maior decomposição (Figura 7b) e liberação de P (Figura 7d) para a camada 12 INF em comparação à camada 12 SUP durante o período avaliação. Após 330 dias de decomposição a camada 12 SUP a maior quantidade de MSR (38,5 %) e a menor liberação de P (65,3 % de P remanescente), enquanto que a camada 12 INF apresentava 48 % de P remanescente e 23,2 % de MSR. Para o K remanescente (Figura 7f) a dinâmica aos 36 dias foi de uma perda mais rápida para a camada 12 SUP, sendo 41,1 % superior a liberação que ocorreu na camada 12 INF (10,7 % vs 15,1 % de K remanescente). Nas camadas do *mulch*  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , aos 72 dias, a camada 8 INF apresentava 60,2 % de MSR e 56,3 % de P remanescente, enquanto que na camada 8 SUP havia ainda 67,2 % de MSR e 61,1 % de P remanescente. O conteúdo de K remanescente na palha (Figura 7f), aos 36 dias, foi 41,2 % inferior na camada 8 SUP em relação ao observado para a camada 8 INF (6,8 vs 9,6 %, respectivamente). Após os 72 dias, o conteúdo de K remanescente presente na palha permaneceu estável nas diferentes camadas, com variações inferiores a 5 % nas diferentes camadas dos *mulches* de 4, 8 e  $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

## 2.5 DISCUSSÃO

### 2.5.1 Efeito da quantidade de palha e do local de estudo na decomposição e liberação de P e K da palha

A manutenção da palha sobre a superfície do solo traz inúmeros benefícios ao sistema produtivo da cana-de-açúcar, dentre os quais podemos destacar: (i) ciclagem de nutrientes, como o P e K, para a soca da cultura; (ii) aumento dos estoques de C do solo no longo prazo; e (iii) proteção do solo contra processos erosivos. Portanto, o estudo de diferentes taxas de remoção da palha e os seus impactos ao solo e ao meio ambiente merecem atenção. Um dos resultados obtidos neste estudo é que decomposição da MS foi proporcional a quantidade de palha mantida na superfície do solo (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>), em todos os locais de avaliação. Resultados como estes já foram obtidos por Acosta et al. (2014) com resíduos de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca (de 3 a 9 Mg ha<sup>-1</sup>), Ramos et al. (2016) com resíduos de cana-de-açúcar (de 2.8 a 11.3 Mg ha<sup>-1</sup>) e Williams et al. (2018) com resíduos de centeio (de 5 a 15 Mg ha<sup>-1</sup>). Tal resultado pode ser explicado pelo fato de quantidades maiores de palha na superfície do solo, formam *mulches* mais espesso e, com isso, as camadas de palha mais próximas da superfície do solo apresentam melhores condições de umidade para o crescimento da biomassa microbiana, resultando em uma aceleração na decomposição das camadas inferiores (Dietrich et al., 2019). Desta forma, em *mulches* mais espessos, a decomposição mais acelerada da camada inferior compensa a menor decomposição da camada de palha exposta a atmosfera, anulando o efeito da menor proporção do *mulch* em contato com o solo comparado a *mulches* de menor espessura, em algumas condições ambientais.

Diferenças significativas foram observadas nas taxas de decomposição entre os locais avaliados. Apesar dos cinco locais estarem situados sob a mesma classificação climática, diferenças nas características do solo, precipitação e temperatura do ar podem ser as responsáveis por esse efeito, já que utilizamos a mesma palha em ambos locais. Observamos que a menor decomposição da palha ocorreu em SJ e PEL, podendo estar relacionadas com a temperatura média do ar e a precipitação acumulada, que foram as menores entre os locais no período avaliado (Figura 2). Essas duas variáveis climáticas apresentam uma correlação positiva com a taxa de decomposição (Robertson e Thorburn, 2007; Zhang et al., 2008). Além disso, a temperatura é considerada um fator chave para a decomposição, pois ao se elevar de 8 a 9 °C na temperatura média anual a taxa de decomposição duplica (Grzyb et al., 2020). Portanto, as maiores taxas de decomposição observadas em SLG podem ser atribuídas as

condições climáticas mais favoráveis, como a ocorrência de precipitações bem distribuídas e em elevado volume e temperatura média mais elevada (Figura 2), e ao solo (Tabela 1), com maiores teores de argila, C e N total. Solos com maiores quantidades de argila tendem a favorecer o processo de decomposição, devido à maior retenção de água e nutrientes, que proporcionam maior atividade da biomassa microbiana do solo (Varanda et al., 2018) e chuvas bem distribuídas são importantes e favorecem a decomposição, pois períodos de seca sazonal podem ser limitantes ao processo devido à redução na atividade microbiana (Zhang et al., 2008).

Na liberação de P da palha conseguimos identificar duas fases distintas. Uma fase inicial mais rápida, em que ocorre uma rápida liberação do conteúdo de P (início da decomposição), seguida por uma fase mais lenta que permanece até o final do período de avaliação. Damon et al. (2014) caracteriza a primeira fase como a fase de ocorrência da liberação da fração lábil do P e, a segunda fase com a liberação das formas orgânicas de P mais recalcitrantes. Em nosso estudo podemos observar essa liberação mais significativa do P total nos primeiros 30 dias. Associado a maior liberação de P na fase inicial do processo de decomposição, temos a maior liberação de K. Isso ocorre devido a forma em que esse elemento se encontra no tecido vegetal. Como não é um constituinte dos componentes estruturais da parede celular e nem está associado a compostos orgânicos (Malavolta et al., 1997), é rapidamente lixiviado logo após o manejo da palha, com uma baixa dependência dos processos microbianos, sendo liberado ao solo na forma iônica contribuindo para a nutrição da planta no curto prazo (Giacomini et al., 2003; Carvalho et al., 2017).

Ao considerarmos a elevada relação C: P inicial da palha era esperado que ocorresse uma imobilização de P, principalmente durante o primeiro estágio de decomposição (primeiro mês), uma vez que é aceito que concentrações inferiores a  $2 \text{ g P kg}^{-1} \text{ MS}$  ou uma relação C: P superior a 300 provoque uma imobilização (Kwabiah et al., 2003; Varela et al., 2017). Os resultados de liberação de P da palha no presente estudo são contraditórios aos obtidos por Oliveira et al. (1999), Conde et al. (2005) e Fortes et al. (2012) que não verificaram ou encontraram uma liberação não significativa de P para a palha de cana-de-açúcar durante o período de um ano de avaliação. A ausência de liberação de P foi atribuída as características da palha, por ser pobre em P e rica em C (alta relação C: P) o que impossibilitaria a liberação de P durante um ciclo da cultura. Como no período inicial ocorre, predominantemente, a liberação do P solúvel da palha, a ocorrência de chuvas é a responsável pela lixiviação do P da palha para o solo. Alguns estudos já têm identificado que a lixiviação é o principal processo para a liberação do P inorgânico dos resíduos e que ocorre independentemente da utilização do C dos resíduos pela biomassa microbiana (Damon et al., 2014; Varela et al., 2017). Aliado a isso, a

maior pluviometria fornece condições mais favoráveis a atividade microbiana decompositora que é dependente da disponibilidade de água no solo e no *mulch*.

Associado a essa maior liberação de P na fase inicial do processo de decomposição, temos a maior liberação de K. A drástica redução no conteúdo de K nos primeiros dias também foi observada por Giacomini et al. (2003), Li et al. (2014) e Werner et al. (2020). Isso ocorre devido a forma em que esse elemento se encontra no tecido vegetal, já que este não constitui componentes estruturais da parede celular e nem está associado a compostos orgânicos (Hawkesford et al., 2012). Com isso, o K é rapidamente lixiviado logo após o manejo da palha, com uma baixa dependência dos processos microbianos, sendo liberado ao solo na forma iônica contribuindo para a nutrição da planta no curto prazo (Giacomini et al., 2003; Carvalho et al., 2017).

As diferenças observadas entre as três quantidades ( $12 < 8 = 4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), até os 60 dias, para a liberação de P e K indica que ao mantermos camadas mais espessas de palha sobre o solo, maiores volumes de precipitação são necessários para que ocorra a lixiviação dos nutrientes e de suas formas mais lábeis na fase inicial da decomposição. Esse efeito do volume de chuva é apoiado pelos maiores conteúdos de P e K remanescentes encontrados para PEL, que apresentou o menor acumulado pluviométrico nos primeiros 60 dias de avaliação (Figura 2). Devido os resíduos culturais apresentarem uma quantidade representativa de P na forma solúvel (Noack et al., 2012) e o K na forma iônica (Malavolta et al., 1997) torna a ação da água da chuva importante na dinâmica de liberação desses nutrientes. Varela et al. (2017), ao estudarem diferentes resíduos culturais, observaram maiores taxas de liberação de P inorgânico na estação chuvosa. Portanto, a ocorrência de menores volumes de chuva em PEL (Figura 2), nos primeiros 60 dias, pode ter limitado a atividade microbiana e a ação da água no transporte dos nutrientes para o solo, permanecendo maiores quantidades de P e K na palha remanescente. Após os 60 dias, observamos uma liberação mais lenta de P associada com uma redução da relação C: P (Figuras 6a, b), podendo indicar um enriquecimento de P na palha devido a imobilização desse nutriente da solução do solo pelos microrganismos decompositores. Frey et al. (2000) observaram um enriquecimento de N nos resíduos de trigo durante o processo de decomposição e atribuíram esse resultado a imobilização de N por fungos pela absorção do N mineral do solo pelas hifas de fungo que colonizavam os resíduos. Em resíduos culturais de baixa relação N: P ( $< 5$ ) as bactérias apresentam maior importância relativa na decomposição (Güsewell et al., 2009; Recous et al., 2018). Portanto, pode-se assumir que durante o processo de decomposição da palha desse estudo, os fungos foram o principal grupo de microrganismos responsáveis pela decomposição, uma vez que a nossa relação N: P é alta (Figuras 6c, d). Além

do N e do C, outros nutrientes, como o P, são necessários para o crescimento microbiano. Dessa forma, a presença de fungos sobre a palha pode ser responsável pelo enriquecimento de P que contribuiu para a redução da relação C: P observada após os 60 dias.

### **2.5.2 Efeito da posição da palha no interior do *mulch* na decomposição e na liberação de P e K da palha**

Ao observarmos o *mulch*, de forma integral, não se observa diferenças na decomposição entre as diferentes quantidades de palha. Entretanto, ao se estratificar o *mulch* em camadas, de quantidades iguais, se observa que a decomposição da palha é afetada pela posição da camada de palha no interior do *mulch*. As principais diferenças observadas ocorreram entre as camadas inferiores, que apresentam decomposição mais rápida, quando comparadas com as camadas superiores de *much* mais espessos e a camada única. Dietrich et al. (2019) observaram a formação de um gradiente de umidade no interior do *mulch*, onde as camadas inferiores, que estão em contato com o solo, apresentam maior conteúdo de água em comparação com as demais camadas. A manutenção da umidade nessa camada ocorre devido à proteção exercida pelas camadas superiores que interceptam a radiação solar, resultando na menor umidade das camadas em contato com a atmosfera (Fuchs e Hadas, 2011). Como resultado desse gradiente de umidade no interior do *mulch* temos a decomposição mais acelerada das camadas inferiores em relação as camadas superiores, anulando sobre a decomposição da maior quantidade de palha que apresenta menor proporção de palha em contato com o solo. Isso é apoiado pela estreita relação encontrada por Dietrich et al. (2019), para esta mesma palha, na quantidade de C e N remanescentes e o conteúdo de água das camadas.

A liberação de nutrientes no *mulch* total apresentou poucas diferenças entre as quantidades de 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>. Entretanto, quando dividimos o *mulch* em camadas observou-se um gradiente de liberação, que interferiu significativamente na liberação de P e K. Na liberação de P observou-se que as principais diferenças ocorreram nos tratamentos de 12 Mg ha<sup>-1</sup>, com uma maior liberação na camada INF (12 INF > 12 CEN > 12 SUP). Nos tratamentos de 8 Mg ha<sup>-1</sup> a liberação de P seguiu a mesma dinâmica (8 INF > 8 SUP). Quando comparamos as camadas inferiores (12 INF e 8 INF) com a camada única (4 Mg ha<sup>-1</sup>) temos uma maior liberação de P ocorrendo nas camadas inferiores. Dessa forma, podemos dizer que a liberação de P, no longo prazo, está intimamente ligada ao processo de decomposição, uma vez que as camadas inferiores apresentam uma maior decomposição em relação a camada única e as camadas superiores. Isso ocorre devido ao fato de que importante proporção do P, no tecido

vegetal, está associada a componentes orgânicos e depende da ação dos microrganismos para ser liberada (Giacomini et al., 2003). Dietrich et al. (2019) também observaram, para a palha de cana-de-açúcar, o menor conteúdo de C e N remanescente para as camadas inferiores em relação a camada única e as camadas superiores. Schmatz (2019) observou para diferentes quantidades de resíduos de trigo e ervilhaca, nos primeiros dias, uma liberação de P maior na camada única em relação as camadas inferiores. Tal resultado foi atribuído a ocorrência de um evento pluviométrico de alta intensidade logo após a instalação do experimento, que ao atingir a camada única, lixiviou os nutrientes que se encontravam na forma solúvel para o solo, ocasionando maior liberação em comparação com as inferiores, que podem ter acumulado parte dos nutrientes lixiviados pelas camadas localizadas acima delas. Dessa forma, na fase inicial de decomposição a ocorrência de eventos pluviométricos é um fator que influencia diretamente a liberação de nutrientes, pois nesta fase ocorre, principalmente, a liberação dos nutrientes presentes na fração solúvel que é facilmente removida da palha pela ação da água da chuva. A partir do esgotamento da fração solúvel a ação dos microrganismos durante o processo de decomposição passa a governar a liberação de nutrientes. Além disso, a ocorrência da decomposição da palha degrada as células vegetais facilitando a remoção dos nutrientes da palha pela ação da chuva.

Para a liberação de K observamos que as camadas inferiores apresentam liberação mais lenta em comparação com as camadas superiores (12 SUP > 12 CEN > 12 INF e 8 SUP > 8 INF). Isso ocorre devido a forma que esse nutriente se encontra no tecido vegetal. Como o K não faz parte de nenhum componente estrutural e nem está ligado a composto orgânicos (Malavolta et al., 1997), a ação da chuva é responsável pelo transporte desse nutriente da palha para o solo. Portanto, as camadas superiores, que estão em contato com a atmosfera, são atingidas pela chuva proporcionando a maior liberação desse nutriente nessas camadas. Isso pode ser verificado, pois ao mantermos uma maior quantidade de palha na superfície do solo (12 Mg ha<sup>-1</sup>), a camada de palha que está em contato com o solo apresentou as maiores quantidades de K remanescente, além disso, os nutrientes que foram lixiviados nas camadas mais expostas a atmosfera podem ser acumulados nas camadas inferiores. Benedetti (2014) ao avaliar diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar, observou que a quantidade de resíduos mantida na superfície do solo interfere na liberação de K. Esse autor encontrou uma liberação de K mais rápida na menor quantidade em comparação as maiores quantidades de palha, entretanto o efeito da quantidade é transitório e ao final do estudo não foi mais observado. Isso sugere que em camadas mais espessas de palha maiores volumes de chuva são necessários para que a água atinja o solo. Quando as precipitações são reduzidas e de baixa intensidade a

perda de K das camadas de palha de *mulch* mais espessos que estão mais próximas ao solo são reduzidas.

## 2.6 CONCLUSÃO

Este estudo confirma que as condições edafoclimáticas são fatores importantes e afetam a dinâmica de decomposição e liberação de P e K da palha, que foi maior em locais com precipitação e temperatura média do ar mais elevadas. A decomposição e a quantidade de P e K liberada pela palha ocorre proporcionalmente a quantidade de palha na superfície do solo, sendo que a semelhança na liberação de P e K pelas diferentes quantidades de palha ocorre devido a formação de um gradiente de liberação desses nutrientes no interior do *mulch*, com maior quantidade liberada nas camadas inferiores (em contato com o solo), o que compensa a menor liberação de nutrientes da camada superior do *mulch*, a qual está mais distante do solo devido ao aumento da quantidade de palha na superfície do solo. Os resultados deste estudo indicam que independentemente do local, a remoção parcial da palha não afeta a decomposição e a liberação de P e K da palha. No entanto, a remoção parcial reduz a quantidade de P e K reciclada no solo, condição que requer atenção quanto ao balanço de nutrientes nos cultivos de cana-de-açúcar.

### **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 2.7 REFERÊNCIAS

Abevin S, Recous, S. Mineralisation of crop residues on the soil surface of incorporated in the soil under controlled conditions. *Biol Fert Soils*. 2007; 43:849-852. <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0165-2>

Acosta JAA, Amado TJC, Silva LS, Santi A, Weber MA. Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. *Cienc Rural*. 2014; 44:801-809. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000002>.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z*. 2013; 22:711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Benedetti MM. Palhada de cana-de-açúcar em condição de cerrado: decomposição e disponibilidade de nutrientes [Tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2014.

Cantarella H. Sugarcane production. In: Coser TR; Davis MJ, editor. *BIOFUELS: Reasonable Steps Towards a Renewable Energy Future*. Brasília, DF, Brazil: Full bright Comission Brazil, p. 27-37, 2010.

Campos DC. Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono [Tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo; 2003.

Carmo CAF, de Araújo WS, Bernardi ACC, Saldanha MFC. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2000. (Embrapa Solos – Circular Técnica, n. 6).

Carvalho JLN, Nogueirol RC, Menandro LMS, Bordonal RO, Borges CD, Cantarella H, Franco HCJ. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*. 2017; 9:1181-1195. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.

Chagas E, Araújo AP, Teixeira MG, Guerra, JGM. Decomposição e liberação de nitrogênio, fósforo e potássio de resíduos da cultura do feijoeiro. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007; 31:723-729. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400013>.

Cherubin MR, Lisboa IP, Silva AGB, Varanda LL, Bordonal RO, Carvalho JLN, Otto R, Pavinato PS, Soltangheisi A, Cerri CEP. Sugarcane straw removal: Implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. *Bioenerg Res*. 2019; 12:888-900. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10021-w>.

Conde AJ, Penatti CP, Bellinaso IF. Impacts on soil. In: Hassuani S, Leal MRLV, Macedo IC, editores. *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: PNUD-CTC; 2005. p. 161-166.

Damon PM, Bowden B, Rose T, Rengel Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biol Biochem*. 2014; 74:127-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.003>.

Dietrich G, Sauvadet M, Recous S, Redin M, Pfeife IC, Garlet CM, Bazzo H, Giacomini SJ. Sugarcane mulch C and N dynamics during decomposition under different rates of trash removal. *Agr Ecosyst Environ*. 2017; 243:123-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.013>.

Dietrich G, Recous S, Pinheiro PL, Weiler DA, Schu AL, Rambo MRL, Giacomini SJ. Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses. *Soil Till Res*. 2019; 192:66-75. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.022>.

Ferreira DF. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Cienc Agrotec*. 2011; 35:1039-1042. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

Floss EL. Aveia, um sustentáculo do sistema de semeadura direta. *Revista Plantio Direto*. 2002; 72:14-18.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. OECD-FAO. Agricultural Outlook 2021-2030. Disponível em: <[https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030\\_19428846-en](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en)>.

Fortes C, Trivelin PCO, Vitti AC. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass Bioenerg.* 2012; 42:189-198. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.011>.

Franco HCJ, Pimenta MTB, Carvalho JLN, Magalhães PSG, Rossell CEV, Braunbeck AO, Vitti AC, Kölln OT, Neto JR. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci Agric.* 2013; 70:305-312. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500004>.

Frey SD, Elliott ET, Paustian K, Peterson GA. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem. *Soil Biol Biochem.* 2000; 32:686-698. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00205-9).

Fuchs M, Hadas A. Mulch resistance to water vapor transport. *Agr Water Manage.* 2011; 98:990-998. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.008>.

Giacomini SJ, Aita C, Hübner AP, Lunkes A, Guidini E, Amaral EB. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. *Pesqui Agropecu Bras.* 2003; 38:1097-1104. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000900011>.

Giacomini SJ, Aita C, Miola ECC, Recous S. Carbon mineralization of straw and pig manure with and without incorporation of soil. *Rev Bras Cienc Solo,* 2008; 32:2661-2668. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700008>.

Grzyb A, Wolma-Maruwka A, Niewiadomska A. Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. *Agronomy.* 2020; 10:1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>.

Güsewell S, Gessner MO. N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Funct Ecol.* 2009; 23:211-219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01478.x>.

Halde C, Entz MH. Plant species and mulch application rate affected decomposition of cover crop mulches used in organic rotational no-till systems. *Can J Plant Sci.* 2016; 96:59-71. <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0095>.

Hawkesford M, Horst W, Kichey T, Lambers H, Schjoerrin J, MØller IS, White P. Functions of macronutrients. In: Marschner P, editor. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2012. p. 135-189.

Kwabiah AB, Palm CA, Stoskopf NC, Voroney RP. Response of soil microbial biomass dynamics to quality of plant materials with emphasis on P availability. *Soil Biol Biochem.* 2003; 35:207-216. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00253-5).

Li J, Lu J, Li X, Ren T, Cong R, Shou L. Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue. *PLoS One.* 2014; 9:e90440. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090440>.

Malavolta E.; Vitti GC, Oliveira AS. *Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Potafós; 1997.

Murphy J, Riley JP. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chim Acta.* 1962; 27:31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).

Noack SR, McLaughlin MJ, Smernik RJ, McBeath TM, Armstrong RD. Crop residue phosphorus: speciation and potential bio-availability. *Plant Soil.* 2012; 359:375-385. v. 359, p. 375-385, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1216-5>.

Oliveira MW, Trivelin PCO, Penatti P, Piccolo MC. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. *Pesqui Agropecu Bras.* 1999; 34:2359-2362. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200024>.

Panosso AR, Marques J, Pereira GT, La Scala N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. *Soil Till Res.* 2009; 105:275-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.09.008>.

Paul EA, Clark FE. Dynamics of residue decomposition and soil organic matter turnover. In: Paul EA, Clark FE, editores. *Soil microbiology and biochemistry*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1996. p. 158-179.

Pimentel LG, Cherubin MR, Oliveira DMS, Cerri CEP, Cerri CC. Decomposition of sugarcane straw: basis for management decisions for bioenergy production. *Biomass Bioenerg.* 2019; 122:133-144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.027>.

Pinheiro PL, Recous S, Dietrich G, Weiler DA, Schu AL, Bazzo HLS, Giacomini SJ. N<sub>2</sub>O emission increases with mulch mass in a fertilized sugarcane cropping system. *Biol Fert Soils.* 2019; 55:511-523. <https://doi.org/10.1007/s00374-019-01366-7>.

Plantae AF, Parton WJ. The dynamics of soil organic matter and nutrient cycling. In: Paul EA, editor. *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. Academic Press, Amsterdam, 2007. p. 433-464.

Ramos NP, Yamaguchi CS, Pires AMM, Rossetto R, Possenti RA, Packer AP, Cabral OMR, Amrader CA. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. *Pesqui Agropecu Bras.* 2016; 51:1492-1500. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900048>.

Recous S, Lashermes G, Bertrand I, Duru M, Pellerin S. C-N-P decoupling processes linked to arable cropping management systems in relation with intensification of production. In: Lemaire G, Carvalho PCF, Kronberg S, Recous S, editores. *Agrosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. Academic Press: Elsevier; 2018. p. 35-45.

Redin M, Recous S, Aita C, Dietrich G, Skolaude AC, Ludke WH, Schmatz R, Giacomini SJ. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biol Biochem.* 2014; 78:65-75. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.014>.

Robertson FA, Thorburn PJ. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. *Aust J Soil Res.* 2007; 45:1-11. <http://dx.doi.org/10.1071/SR06079>.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Filho JCA, Oliveira JB, Cunha TJF. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2018.

Schmatz R. Decomposição e emissão de N<sub>2</sub>O em função da qualidade e quantidade de resíduos culturais na superfície do solo [Tese]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2019.

Steiner JL, Schomberg HH, Unger PW, Cresap J. Crop residue decomposition in no-tillage small-grain fields. *Soil Sci Soc Am J.* 1999; 63:1817-1824. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6361817x>.

Stott DE, Stroo HF, Elliott LF, Papendick RI, Unger PW. Wheat residue loss from fields under no till management. *Soil Sci Soc Am J.* 1990; 54:92-98. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400010014x>

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohem H, Volkweiss SJ. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS; 1995.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Sugar Production Up Globally in 2021/22, Stable in the United States and Mexico*. 2021. Disponível em: <<https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/z029p472x?locale=en>>.

Van Soest PJ. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds I: preparation of fiber residues of low nitrogen content. *J Assoc off Agr Chem.* 1963; 46:825-835.

Varanda LL, Cherubin MR, Cerri CEP. Decomposition dynamics altered by straw removal management in the sugarcane-expansion regions in Brazil. *Soil Res.* 2018; 47:41-52. <https://doi.org/10.1071/SR17298>.

Varela MF, Barraco M, Gili A, Taboada MA, Rubio G. Biomass decomposition and phosphorus release from residues of cover crops under no-tillage. *Agron J.* 2017; 109:317-326. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160272>.

Werner F, Ferreira AS, Balbinot Junior AA, Oliveira Junior A, Franchini JC, Debiasi H, Silva MAA. Nitrogen, phosphorus, and potassium released by decomposition of palisade grass to soybean in succession. *Pesqui Agropecu Bras.* 2020; 55:e01853. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01853>.

Wieder RK, Lang GE. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from titter bags. *Ecology.* 1982; 63:1636-1642. <https://doi.org/10.2307/1940104>.

Willians A, Wells MS, Dickey DA, Hu S, Maul J, Raskin DT, Reberg-Horton SC, Mirsky SB. Establishing the relationship of soil nitrogen immobilization to cereal rye residues in a mulched system. *Plant Soil.* 2018; 426:95-107. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3566-0>.

Zhang D, Hui D, Luo Y, Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *J Plant Ecol.* 2008; 1:85-93. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtn002>.

**Tabela 1** - Localização e breve descrição do solo (camada 0-10 cm) e clima de cada local do Experimento I.

<b>Local</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Local 1	Localização	Santa Maria – 29° 43' S, 53° 42' W, altitude de 87 m.
	Solo <sup>(1)</sup>	Argissolo Vermelho (100, 220, 680 g kg <sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente), com pH <sub>H2O</sub> = 6,0, 7,4 g kg <sup>-1</sup> de C total e 0,45 g kg <sup>-1</sup> de N total.
	Clima <sup>(2)</sup>	Cfa: precipitação média anual de aproximadamente 1796 mm, e temperatura média anual de 19,3 °C, sem estação seca.
Local 2	Localização	Pelotas – 31° 41' S, 52° 26' W, altitude de 51 m.
	Solo	Argissolo Vermelho-Amarelo (120, 230, 650 g kg <sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente) , com pH <sub>H2O</sub> = 6,4, 6,8 g kg <sup>-1</sup> de C total e 0,42 g kg <sup>-1</sup> de N total.
	Clima	Cfa: precipitação média anual de aproximadamente 1403 mm, e temperatura média anual de 18 °C, sem estação seca.
Local 3	Localização	Salto do Jacuí – 28° 59' S, 53° 14' W, altitude de 345 m.
	Solo	Latossolo Vermelho (370, 260, 360 g kg <sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente), com pH <sub>H2O</sub> = 6,7, 12,9 g kg <sup>-1</sup> de C total e 0,73 g kg <sup>-1</sup> de N total.
	Clima	Cfa: precipitação média anual de aproximadamente 1780 mm, e temperatura média anual de 18,5 °C, sem estação seca.
Local 4	Localização	Porto Xavier – 27° 56' S, 55° 14' W, altitude de 126 m.
	Solo	Latossolo Vermelho (570, 280, 150 g kg <sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente) , com pH <sub>H2O</sub> = 5,4, 15,4 g kg <sup>-1</sup> de C total e 0,98 g kg <sup>-1</sup> de N total.
	Clima	Cfa: precipitação média anual de aproximadamente 1964 mm, e temperatura média anual de 21,5 °C, sem estação seca.
Local 5	Localização	São Luiz Gonzaga – 28° 30' S, 54° 50' W, altitude de 254 m.
	Solo	Latossolo Vermelho (580, 290, 130 g kg <sup>-1</sup> de argila, silte e areia, respectivamente) , com pH <sub>H2O</sub> = 5,8, 26,2 g kg <sup>-1</sup> de C total e 1,92 g kg <sup>-1</sup> de N total.
	Clima	Cfa: precipitação média anual de aproximadamente 1913 mm, e temperatura média anual de 20,7 °C, sem estação seca.

<sup>(1)</sup> Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). <sup>(2)</sup> Classificação de Köppen (Alvares et al., 2013).

**Tabela 2** - Resultados da análise da variância (ANOVA) mostrando o efeito da quantidade de palha (Q), do local (L) e suas interações nas variáveis avaliadas no Experimento I.

Variáveis		30 dias	60 dias	90 dias	150 dias	210 dias	270 dias	330 dias
Matéria seca remanescente (% do inicial)	Q <sup>(1)</sup>	0,526 <sup>(4)</sup>	0,747	0,444	0,219	0,383	0,365	0,542
	L <sup>(2)</sup>	0,004	<0,001	<0,001	0,392	<0,001	0,007	0,005
	QxL	0,091	0,388	0,689	0,011	0,189	0,401	0,650
	CV (%) <sup>(3)</sup>	2,54	3,13	4,32	5,94	6,93	10,69	14,45
P remanescente (% do inicial)	Q	0,001	<0,001	0,821	<0,001	0,202	0,453	0,643
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	QxL	<0,001	<0,001	0,072	<0,001	<0,001	0,208	0,063
	CV (%)	8,29	6,86	10,77	7,26	7,60	13,28	18,48
K remanescente (% do inicial)	Q	<0,001	0,019	0,847	0,009	0,802	0,301	0,468
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	QxL	<0,001	0,001	0,014	0,050	0,001	0,0161	0,927
	CV (%)	14,93	21,92	19,20	15,65	15,32	19,65	20,40
P cumulativo liberado (kg ha <sup>-1</sup> )	Q	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	QxL	<0,001	<0,001	0,344	<0,001	<0,001	0,002	0,182
	CV (%)	21,83	11,22	16,28	10,96	9,86	12,78	16,71
K cumulativo liberado (kg ha <sup>-1</sup> )	Q	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	QxL	<0,001	<0,001	0,008	<0,001	<0,001	0,001	0,044
	CV (%)	1,81	1,98	1,39	1,45	1,14	1,96	1,54
Relação C: P	Q	0,001	<0,001	0,872	<0,001	0,093	0,894	0,521
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	QxL	<0,001	<0,001	0,036	<0,001	<0,001	0,016	0,052
	CV (%)	8,73	5,38	11,23	7,99	6,47	8,13	16,04
Relação N: P	Q	0,004	<0,001	0,156	0,001	0,107	0,013	0,174
	L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,176	0,014
	QxL	0,011	0,003	0,032	<0,001	<0,001	0,064	0,196
	CV (%)	21,22	9,93	9,95	9,69	8,96	14,43	20,98

<sup>(1)</sup> Quantidades (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>). <sup>(2)</sup> Local (SM, PX, PEL, SJ e SLG). <sup>(3)</sup> Coeficiente de variação (expresso em %). <sup>(4)</sup> Os fatores e as suas interações são consideradas significativas quando os valores de P < 0,05.

**Tabela 3** - Resultados da análise da variância (ANOVA) mostrando o efeito da quantidade de palha (Q) e da posição da palha no interior do mulch (C) nas variáveis avaliadas no Experimento II.

Variáveis		36 dias	72 dias	103 dias	168 dias	238 dias	360 dias
Matéria seca remanescente (% do inicial)	Q <sup>(1)</sup>	0,266 <sup>(5)</sup>	0,080	0,152	0,455	0,989	0,332
	CV (%) <sup>(2)</sup>	5,89	4,74	5,57	7,79	11,58	6,58
	C <sup>(3)</sup>	0,134	0,017	0,006	0,161	0,013	0,001
	CV (%) <sup>(4)</sup>	8,65	6,49	7,81	10,45	12,03	11,95
P remanescente (% do inicial)	Q <sup>(1)</sup>	0,261	0,850	0,017	0,564	0,842	0,226
	CV (%) <sup>(2)</sup>	8,27	8,93	6,80	10,91	16,06	14,18
	C <sup>(3)</sup>	0,050	0,048	0,007	0,425	0,017	0,010
	CV (%) <sup>(4)</sup>	11,09	10,56	11,20	14,30	13,63	21,02
K remanescente (% do inicial)	Q <sup>(1)</sup>	0,002	0,119	0,007	0,971	0,906	0,056
	CV (%) <sup>(2)</sup>	12,23	8,90	9,59	11,16	16,12	9,58
	C <sup>(3)</sup>	<0,001	0,572	<0,001	0,053	0,073	<0,001
	CV (%) <sup>(4)</sup>	13,08	18,35	8,91	14,76	16,06	12,40

<sup>(1)</sup>Quantidades (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>). <sup>(2)</sup> Coeficiente de variação das quantidades (expresso em %). <sup>(3)</sup> Camadas (4, 8 SUP, 8 INF, 12 SUP, 12 CEN e 12 INF). <sup>(4)</sup> Coeficiente de variação das camadas (expresso em %). <sup>(5)</sup> Os fatores e as suas interações são considerados significativas quando os valores de P < 0,05.

**Tabela 4** - Parâmetros de decomposição, P e K remanescentes da palha de cana-de-açúcar para as três diferentes quantidades (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>) e os cinco locais (SM: Santa Maria, PEL: Pelotas; SJ: Salto do Jacuí; PX: Porto Xavier e SLG: São Luiz Gonzaga).

Parâmetros	Quantidade (Mg ha <sup>-1</sup> )			Local				
	4	8	12	SM	PEL	SJ	PX	SLG
MS remanescente								
MS 0 (%) <sup>a</sup>	97,81 <sup>ns</sup>	97,33	98,31	96,63 <sup>ns</sup>	97,95	98,67	97,26	98,68
k (dias <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	0,0032 <sup>ns</sup>	0,0031	0,0032	0,0033a	0,0030ab	0,0028b	0,0032ab	0,0034a
t <sub>1/2</sub> (dias) <sup>c</sup>	218,89 <sup>ns</sup>	223,70	216,70	309,11b	231,00ab	247,71a	214,71ab	202,11b
R <sup>2</sup>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99
P remanescente								
A (%) <sup>d</sup>	48,15 <sup>ns</sup>	47,89	47,58	39,29c	43,61bc	46,12b	56,03a	55,47a
k (dias <sup>-1</sup> )	0,0283ab	0,0461a	0,0223b	0,0423ab	0,0167b	0,0368ab	0,0509a	0,0223b
t <sub>1/2</sub> (dias)	26,53 <sup>ns</sup>	15,22	32,63	22,37ab	44,14a	18,83b	13,71b	27,47ab
100-A (%) <sup>e</sup>	50,35 <sup>ns</sup>	51,92	50,85	60,82 <sup>ns</sup>	54,50	52,77	43,87	41,59
R <sup>2</sup>	0,94	0,96	0,92	0,91	0,87	0,89	0,97	0,92
K remanescente								
A (%)	92,55 <sup>ns</sup>	92,55	92,16	91,86c	89,49d	91,46c	95,42a	93,91b
k (dias <sup>-1</sup> )	0,1128a	0,0997ab	0,0893b	0,0988ab	0,0807b	0,1003a	0,1103a	0,0987ab
t <sub>1/2</sub> (dias)	6,19b	6,96ab	7,79a	7,05ab	8,61a	6,91b	6,31b	7,13ab
100-A (%)	7,44 <sup>ns</sup>	7,45	7,83	8,14b	10,47a	8,54b	4,58d	6,08c
R <sup>2</sup>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Valores seguidos pelas mesmas letras na linha não são significativamente diferentes (Teste de Tukey, P <0,05).

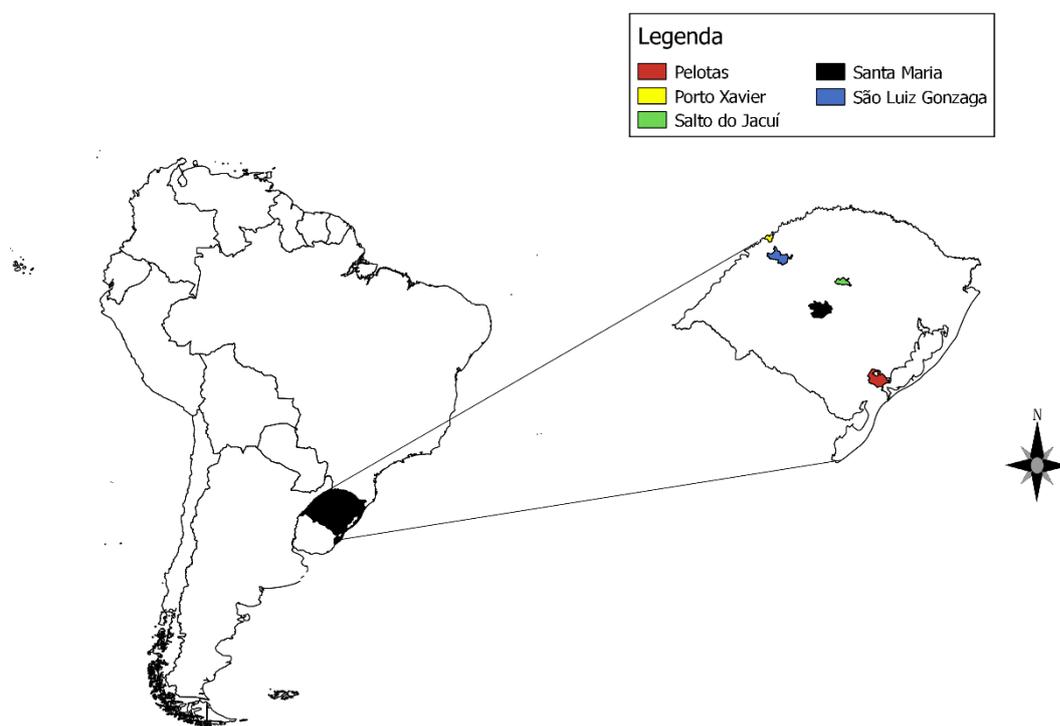
<sup>a</sup> MS 0 é a quantidade de MS no tempo 0 (% da quantidade inicial).

<sup>b</sup> k é a taxa constante de decomposição da MS ou a taxa constante de liberação de P e K do compartimento lábil A.

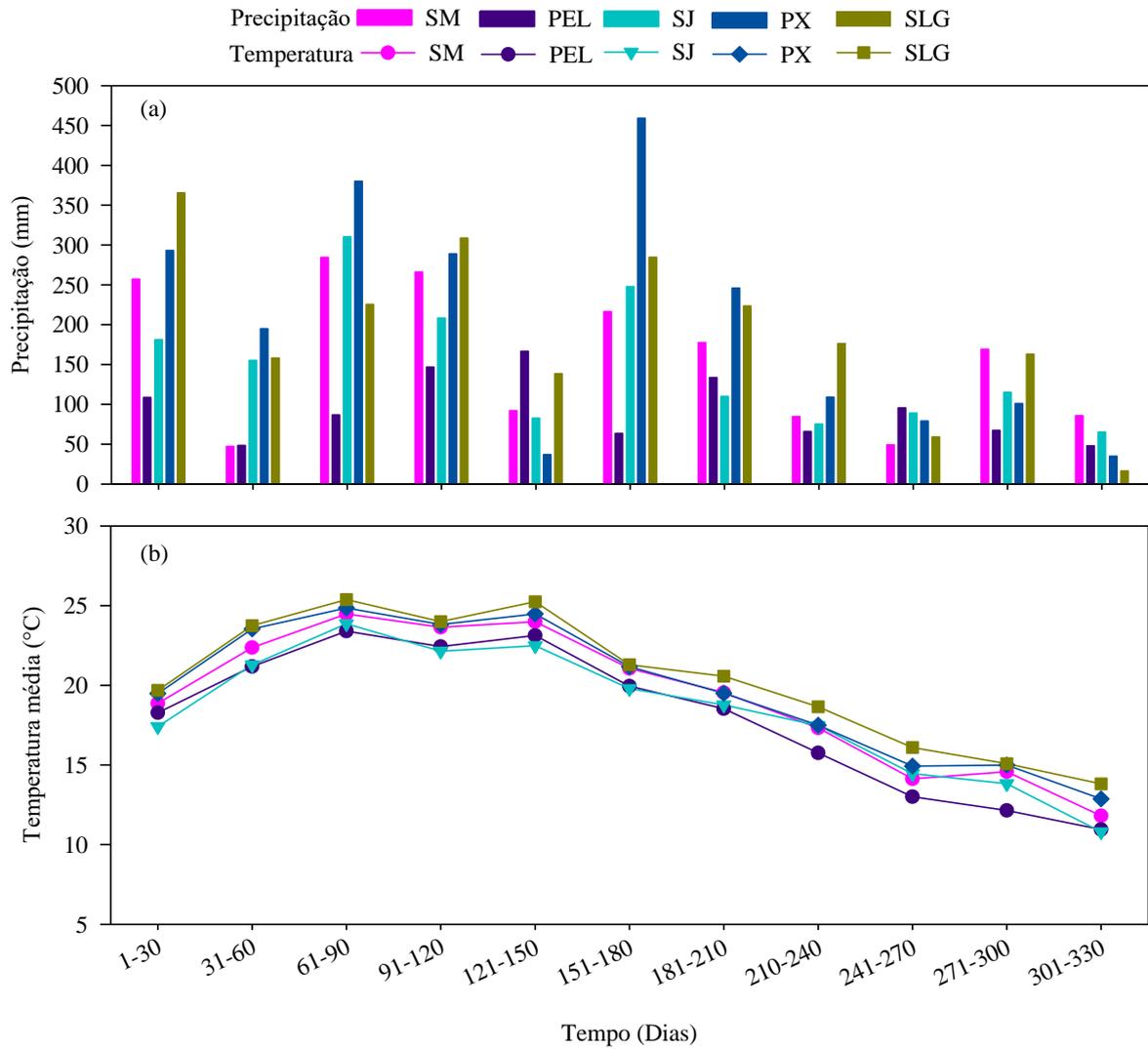
<sup>c</sup> t<sub>1/2</sub> é o tempo necessário para degradar metade da quantidade inicial de palha adicionada ou para que metade do P e K presentes no compartimento A sejam liberados.

<sup>d</sup> A é a quantidade de P ou K (% da quantidade inicial) contida no compartimento lábil.

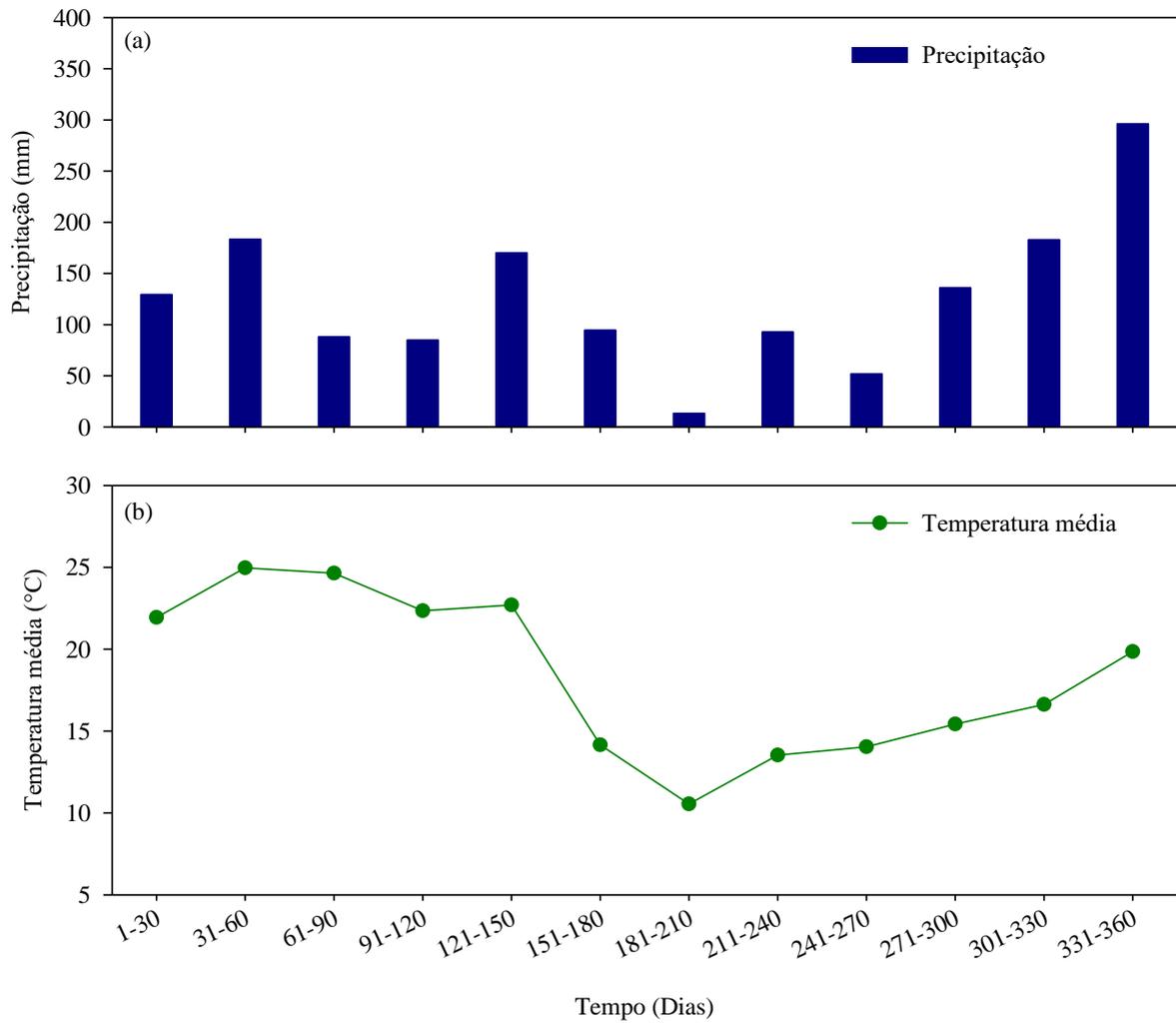
<sup>e</sup> (100 - A) é a quantidade de P ou K (% da quantidade inicial) contido no compartimento recalitrante.



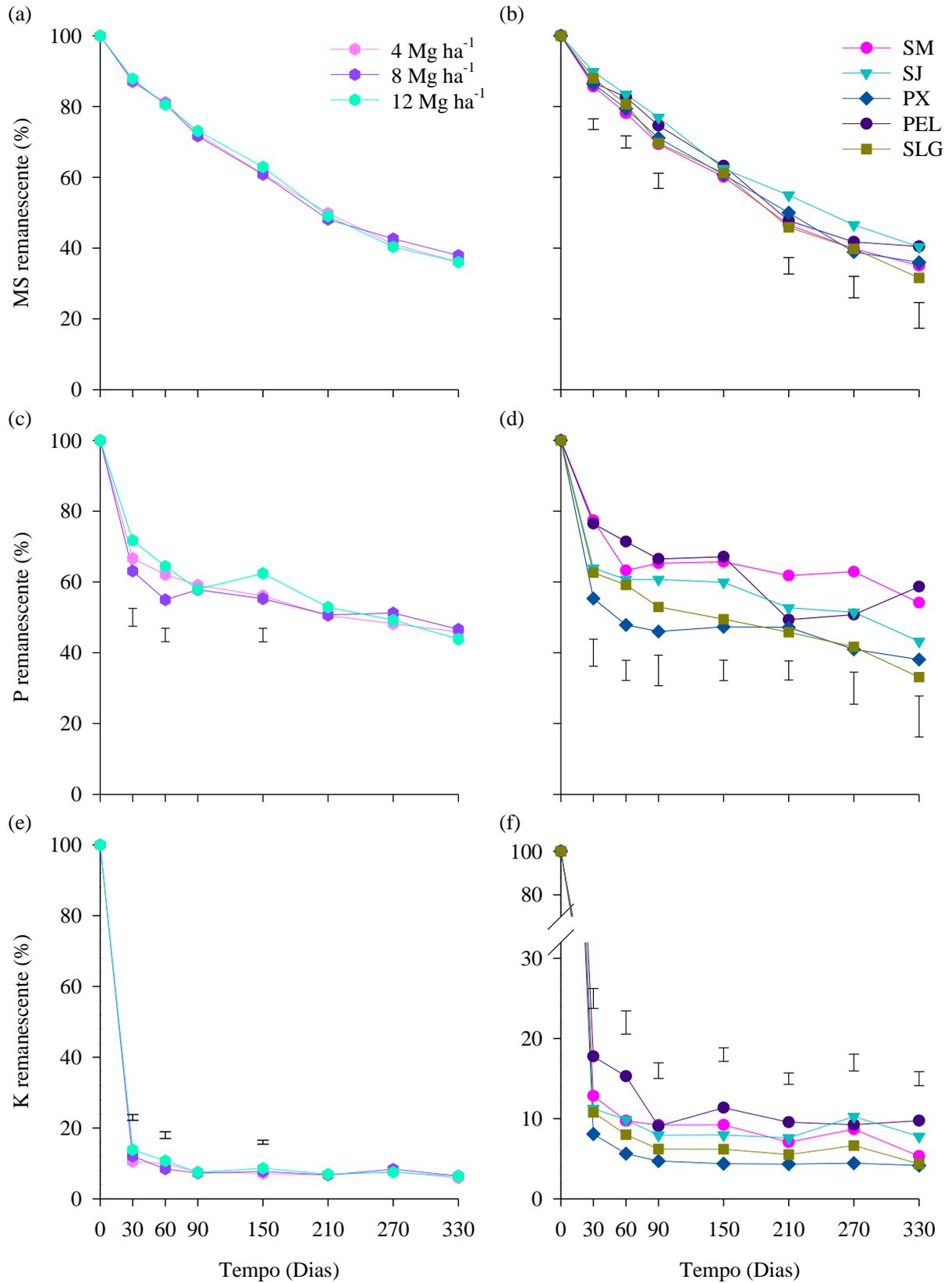
**Figura 1** - Localização geográfica dos locais de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.



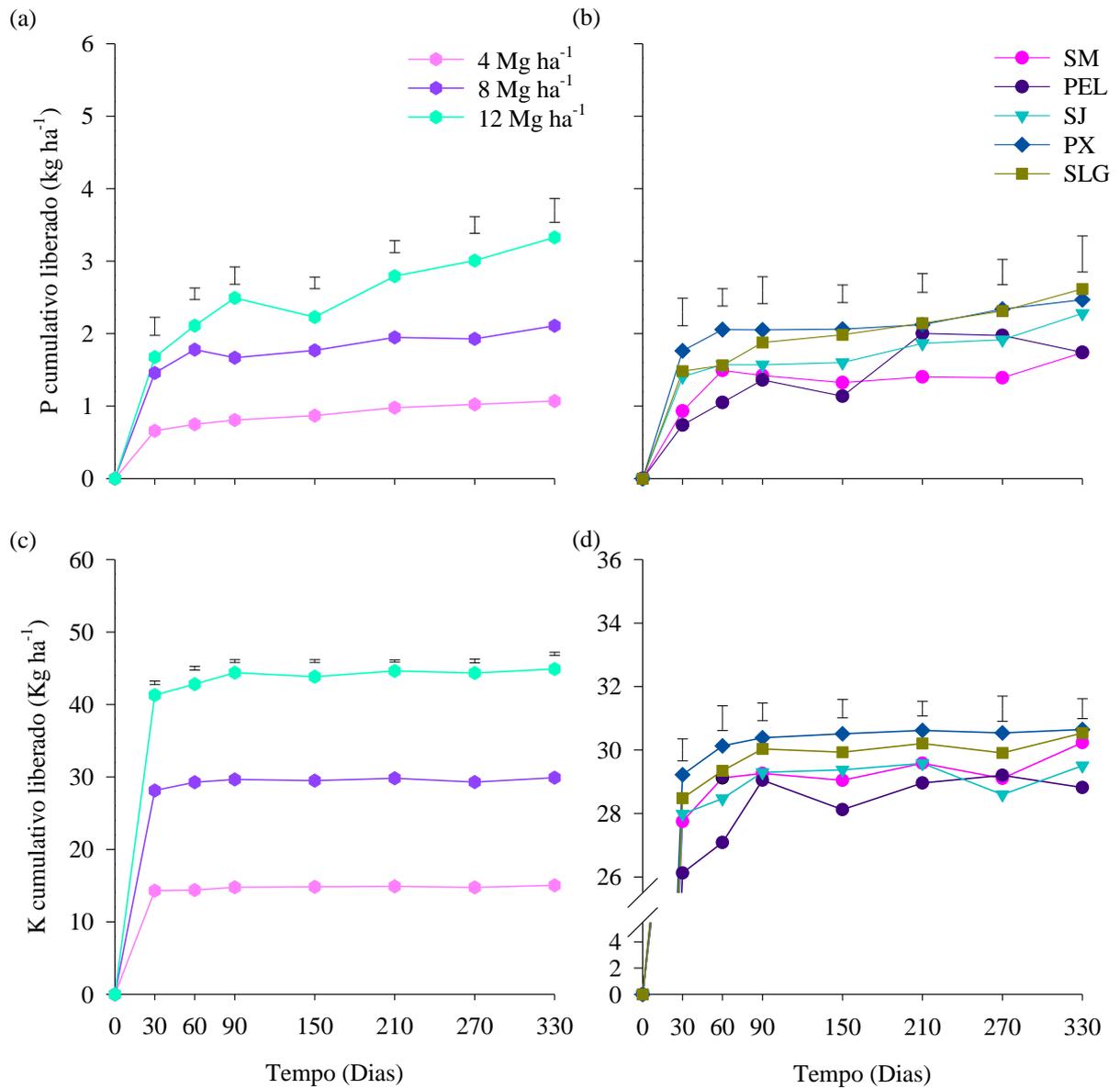
**Figura 2** - Precipitação acumulada (a) e temperatura média (b) durante o período do Experimento I.



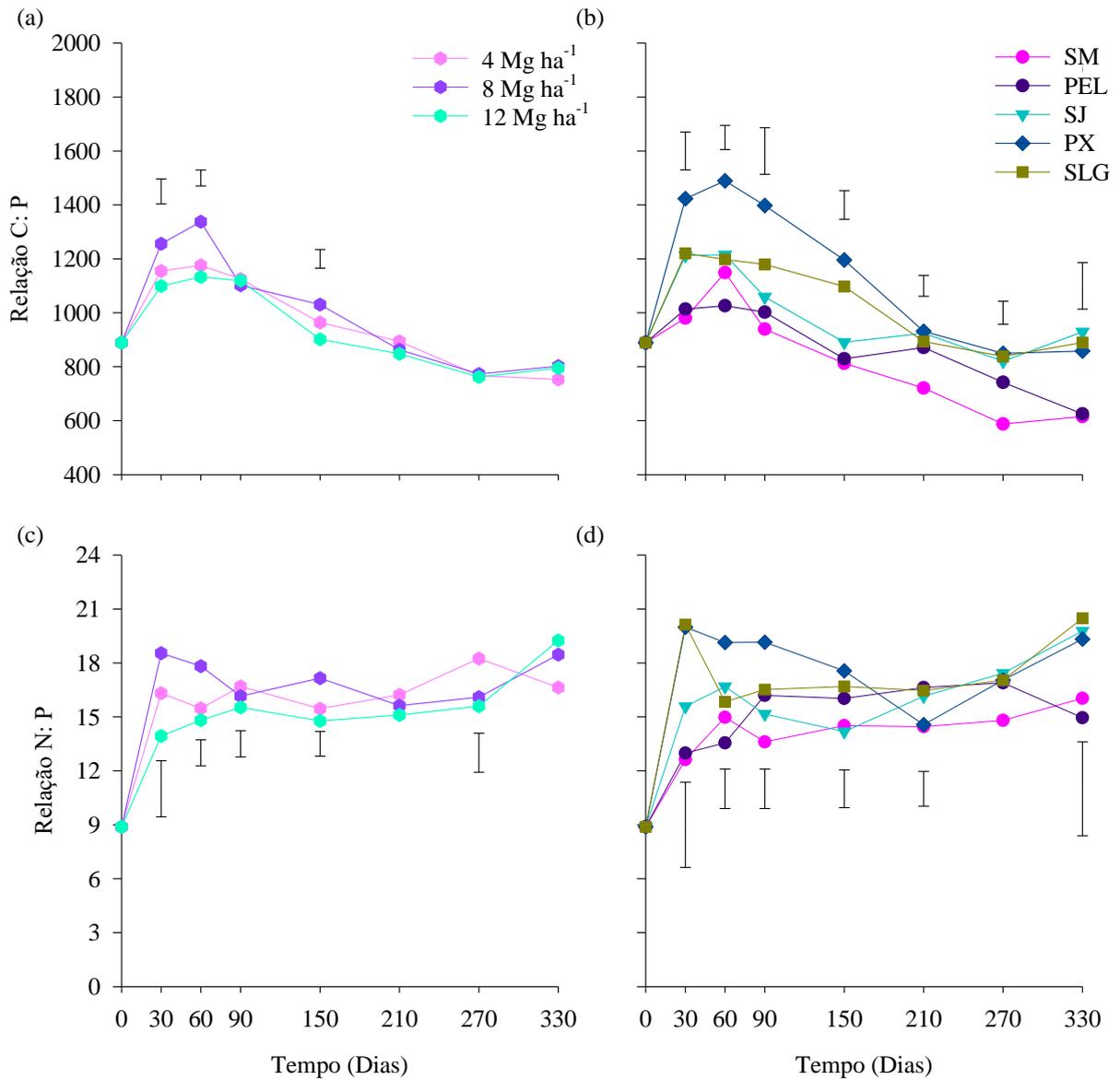
**Figura 3** - Precipitação acumulada (a) e temperatura média (b) durante o período do Experimento II.



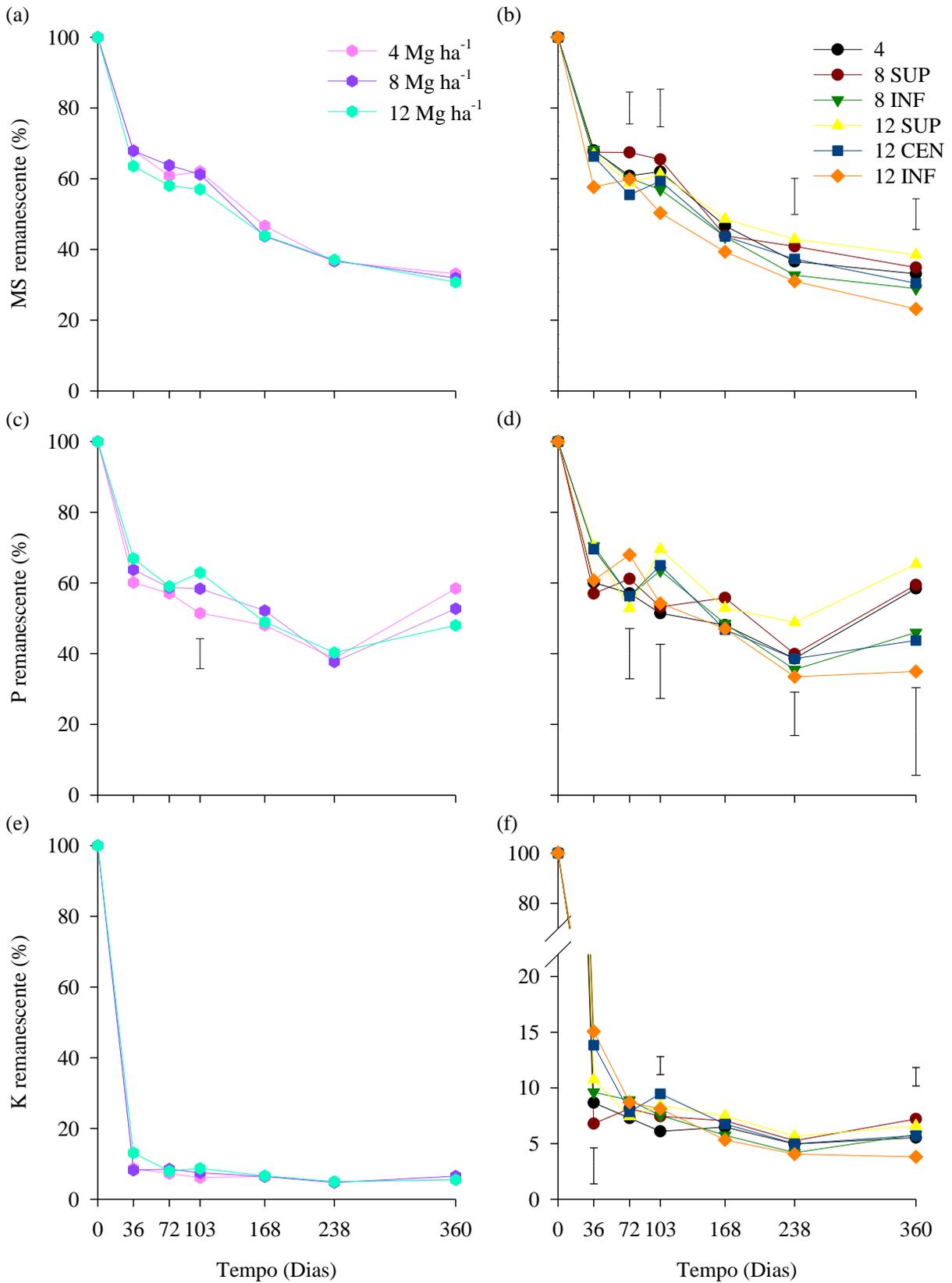
**Figura 4** - MS (a, b), P total (c, d) e K total (e, f) remanescentes nas três quantidades de palha (a, c, e) e nos cinco locais de estudo (b, d, f). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).



**Figura 5** - Quantidades cumulativas de P (a, b) e K (c, d) liberadas nas três quantidades de palha (a, c) e nos cinco locais de estudo (b, d). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).



**Figura 6** - Evolução das relações C: P (a, b) e N: P (c, d) na palha remanescente das três quantidades de palha (a, c) e nos cinco locais de estudo (b, d). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).



**Figura 7** - MS (a, b), P total (c, d) e K total (e, f) remanescentes nas três quantidades de palha (a, c, e) e posições da palha no interior do *mulch* (b, d, f). As barras verticais no gráfico indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

## REFERÊNCIAS

- ABIVEN, Samuel; RECOUS, Sylvie. Mineralisation of crop residues on the soil surface or incorporated in the soil under controlled conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 6, p. 849-852, 2007.
- BENEDETTI, Marcelo Muniz. **Palhada de cana-de-açúcar em condição de cerrado: decomposição e disponibilidade de nutrientes**. 2014. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.
- BOER, Carlos Adriano et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1269-1276, 2007.
- CALONEGO, Juliano Carlos et al. Persistência e liberação de nutrientes da palha de milho, braquiária e labe-labe. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 8, n. 5, p. 770-781, 2012.
- CAMPOS, Dinailson Côrrea. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2003.
- CHERUBIN, Maurício R. et al. Sugarcane straw removal: Implications to soil fertility and fertilizer demand in Brazil. **Bioenergy Research**, v. 12, n. 4, p. 888-900, 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: 3º levantamento da Safra 2021/22**. v. 8, n. 3, p. 1-63. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Acesso em: 16 dez. 2021.
- CONDE, A. J.; PENATTI, C. P.; BELLINASSO, I. F. Impacts on soil. In: HASSUANI, Suleiman José; LEAL, Manoel Régis Lima Verde; MACEDO, Isaías de Carvalho. **Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba, SP: PNUD-CTC, 2005. p. 161-166.
- COTRUFO, M. Francesca et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.
- DAMON, Paul M. et al. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127-137, 2014.
- DIETRICH, Guilherme et al. Sugarcane mulch C and N dynamics during decomposition under different rates of trash removal. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 243, p. 123–131, 2017.
- DIETRICH, Guilherme et al. Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 66-75, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2021-2030**. Disponível em: < [https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030\\_19428846-en](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en) >. Acesso em: 15 dez. 2021.

FORTES, Carlos; TRIVELIN, Paulo Cesar Ocheuze; VITTI, André Cesar. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. **Biomass & Bioenergy**. v. 42, p.189-198, 2012.

GIACOMINI, Sandro José et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003.

GIACOMINI, Sandro José et al. Carbon mineralization of straw and pig manure with and without incorporation of soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v. 32, p. 2661-2668, 2008.

HALDE, Caroline, ENTZ, Martin H. Plant species and mulch application rate affected decomposition of cover crop mulches used in organic rotational no-till systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v.96, n. 1, p.59-71, 2016.

HAWKESFORD, Malcolm; HORST, Walter; KICHEY, Thomas; LAMBERS, Hans; SCHJOERRIN, Jan; MØLLER, Inge Skrumsager; WHITE, Philip. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, Petra. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2012. p. 135-189.

LEAL, Manoel Regis L. V. et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**. v.53, p. 11-19, 2013.

LIU, Junguo et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 17, p. 8035-8040, 2010.

MOREIRA, Fátima M. S.; SIQUEIRA, José Oswaldo. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2010. 729 p.

NOACK, Sara R. et al. Crop residue phosphorus: speciation and potential bio-availability. **Plant and Soil**, v. 359, n. 1, p. 375-385, 2012.

NUNES, Raquel de Moura et al. Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil. **Revista Liberato**. v.14, n. 22, p. 113-150, 2013.

OLIVEIRA, Mauro Wagner et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, 1999.

OLIVEIRA, Mauro Wagner et al. Decomposition and release of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. In: **Proceedings of the 2002 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists held at Cairns, Queensland, Australia, 29 April-2 May 2002**. PK Editorial Services Pty Ltd, 2002. p. 290-296.

POPIN, Gustavo Vicentini. **Efeito do manejo da palha de cana-de-açúcar nas relações solo – planta em Igarapé do Tietê – SP.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2017.

RAMOS, Patrícia Nilza et al. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1492-1500, 2016.

RECOUS, Sylvie; LASHERMES, Gwenaëlle; BERTRAND, Isabelle; DURU, Michel; PELLERIN, Sylvain. C-N-P decoupling processes linked to arable cropping management systems in relation with intensification of production. In: LEMAIRE, Gilles; CARVALHO, Paulo Cesar de Faccio; KRONBERG, Scott; RECOUS, Sylvie. **Agrosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality.** Academic Press: Elsevier; 2018. p. 35-45

ROBERTSON, Fiona A.; THORBURN, Peter J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 13-23, 2007.

SANTOS, Fernando A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**. v.35, p.1004-1010, 2012.

SANTOS, Flávia Cristina et al. Decomposição e liberação de macronutrientes da palhada de milho e braquiária, sob integração lavoura-pecuária no cerrado baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1855-1861, 2014.

SCHMATZ, Raquel. **Decomposição e emissão de N<sub>2</sub>O em função da qualidade e quantidade de resíduos culturais na superfície do solo.** 2019. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

STEINER, J. L., et al. Crop residue decomposition in no-tillage small-grain fields. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 6, p. 1817-1824, 1999.

STOTT, D. E., et al. Wheat residue loss from fields under no-till management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 92-98, 1990.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Sugar Production Up Globally in 2021/22, Stable in the United States and Mexico.** 2021. Disponível em: <<https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/z029p472x/k356b149h/th83mv036/sugar.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2021.

VARANDA, Letícia L.; CHERUBIN, Maurício R.; CERRI, Carlos E. P. Decomposition dynamics altered by straw removal management in the sugarcane-expansion regions in Brazil. **Soil Research**, v. 47, n. 1, p. 41-52, 2018.

VARELA, María Florencia et al. Biomass decomposition and phosphorus release from residues of cover crops under no-tillage. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 317-326, 2017.

WILLIAMS, Alwyn et al. Establishing the relationship of soil nitrogen immobilization to cereal rye residues in a mulched system. **Plant and Soil**, v. 426, n. 1, p. 95-107, 2018.