



**FERNANDA MARIA RODRIGUES CASTRO**

**ACÚMULO DE BIOMASSA E COMPOSTOS  
LIGNOCELULÓSICOS EM HÍBRIDOS DE SORGO  
SENSÍVEIS AO FOTOPERÍODO**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**FERNANDA MARIA RODRIGUES CASTRO**

**ACÚMULO DE BIOMASSA E COMPOSTOS LIGNOCELULÓSICOS EM  
HÍBRIDOS DE SORGO SENSÍVEIS AO FOTOPERÍODO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi

Coorientadores

Prof. Dr. José Airton Rodrigues Nunes

Prof. Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella

**LAVRAS – MG**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Castro, Fernanda Maria Rodrigues.

Acúmulo de biomassa e compostos lignocelulósicos em  
híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo / Fernanda Maria  
Rodrigues Castro. - 2018.

75 p. : il.

Orientador(a): Adriano Teodoro Bruzi.

Coorientador(a): José Airton Rodrigues Nunes, Rafael Augusto  
da Costa Parrella.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Sorghum bicolor. 2. Modelo logístico. 3. Taxa de  
crescimento. I. Bruzi, Adriano Teodoro. II. Nunes, José Airton  
Rodrigues. III. Parrella, Rafael Augusto da Costa. IV. Título.

**FERNANDA MARIA RODRIGUES CASTRO**

**ACÚMULO DE BIOMASSA E COMPOSTOS LIGNOCELULÓSICOS EM  
HÍBRIDOS DE SORGO SENSÍVEIS AO FOTOPERÍODO**

**BIOMASS AND LIGNOCELLULOSIC ACCUMULATION IN PHOTOPERIOD  
SENSITIVE SORGHUM HYBRIDS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 26 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Rafael Augusto da Costa Parrella EMBRAPA

Prof. Dr. Renzo Garcia Von Pinho UFLA

Prof. Dr. Antônio Chalfun Júnior UFLA

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira UFLA

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2018**

*À minha filha Catarina*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, gratidão infinita.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Agricultura – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade concedida para realização do doutorado.

À Embrapa Milho e Sorgo pela parceria e a todos os estudantes, técnicos e pesquisadores que contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial ao pessoal do “galpão” do sorgo.

À Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de doutorado e apoio financeiro para condução do experimento.

Ao professor Dr. Adriano Bruzi pela amizade, paciência, compreensão e ensinamentos, que foram fundamentais.

Ao professor Dr. José Airton Rodrigues Nunes, pela coorientação, dedicação, disponibilidade, ensinamentos e amizade.

Ao pesquisador e coorientador Rafael Augusto da Costa Parrella, pela grande contribuição, solicitude e entusiasmo para realização deste trabalho.

Ao professor Augusto Ramalho, do Departamento de Estatística da UFLA, pela gentileza e atenção.

Aos funcionários de campo do Departamento de Agricultura e ao Grupo “G-Sorgo”, pelo apoio e ajuda na condução dos experimentos.

À Catarina, pelo incentivo, pelo amor incondicional, pelos sorrisos e abraços na chegada, pelas lágrimas nas despedidas e por ser meu motivo maior para querer sempre mais!

Aos meus pais, que, de forma preciosa, fizeram este sonho se tornar realidade, sendo minha base de amor, carinho, consolo e financeira, sempre que precisei. Além de serem os melhores avós do mundo!!!

Aos meus irmãos, Samuel e Saulo, por dividirem essa caminhada comigo, por serem meus amigos e companheiros mais que especiais! Às minhas cunhadas, Mariana e Sofia.

Ao meu sobrinho João Vitor, e minhas sobrinhas Lia e Athina, pelo amor sem fim.

Aos familiares, amigos e amigas, de forma especial ao grupo “XX”, aos “Apáticos”, às queridas da “Rep”, à Ruane, Crislene, Lívia. Enfim, a todos que me apoiaram e torceram por mim.

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

O sorgo biomassa apresenta particularidades que permitem sua utilização como matéria-prima para a produção de bioenergia, porém sua aptidão para uso industrial é resultado da associação de caracteres agronômicos e tecnológicos, relacionados à produtividade e à concentração de compostos lignocelulósicos. Objetivou-se, portanto, analisar o crescimento, o acúmulo de biomassa e de compostos lignocelulósicos em híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo, bem como avaliar as interações com o ambiente em diferentes fases fenológicas, utilizando taxas de crescimento absoluto e relativo da cultura. Os experimentos foram conduzidos em Lavras e Sete Lagoas no estado de Minas Gerais, nas safras 2014/2015 e 2015/2016. Utilizou-se delineamento de blocos completos casualizados com tratamentos no esquema fatorial 4 x 6, sendo quatro híbridos (BRS716, CMSXS7027, CMSXS7045, CMSXS7046) e seis épocas de avaliação (30, 60, 90, 120, 150, 180 dias após o plantio), com três repetições. Avaliaram-se os caracteres agronômicos: altura (ALT), produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS); e os caracteres tecnológicos: celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LIG). Os desempenhos médios dos híbridos ao longo das épocas de avaliação nas safras e locais testados foram ajustados por meio de modelo de regressão logístico e, posteriormente, foram estimadas as taxas de crescimento absoluto (TCC) e relativo da cultura (TCR). Para os caracteres que não se ajustaram ao modelo logístico, realizou-se o ajuste pelo modelo de regressão polinomial. Os híbridos apresentaram comportamento diferenciado para os caracteres ALT, CEL e LIG. A partir das taxas de crescimento absoluto e relativo, verificaram-se incrementos consideráveis nas fases iniciais do ciclo vegetativo para estes caracteres, destacando-se o híbrido BRS716 por apresentar taxa de crescimento em relação à ALT e acúmulo de CEL superior aos demais. O híbrido CMSXS7045 demonstrou maior variação ao longo das épocas para o teor de LIG. Os híbridos de sorgo biomassa, sensíveis ao fotoperíodo, apresentam comportamento dessemelhante ao longo das épocas de avaliação para os caracteres ALT, CEL e LIG. Por meio das taxas de crescimento absoluto e relativo determinam-se incrementos consideráveis nas fases iniciais do ciclo vegetativo (30 a 90 DAP) para os caracteres ALT, CEL e LIG. Verifica-se a influência dos ambientes no comportamento dos genótipos ao longo das épocas de avaliação para os caracteres ALT, PMV, PMS e LIG. Observa-se maior incremento em ALT, PMV e PMS até os 90 dias após o plantio, destacando uma taxa de crescimento acelerada e maior acúmulo de biomassa para o ambiente de Sete Lagoas em ambas as safras.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*. Modelo logístico. Interação genótipo x ambiente. Fases fenológicas. Taxa de crescimento.

## ABSTRACT

Biomass sorghum has particularities that allow its use as raw material for bioenergy production, but its industrial destination is the result of agronomic and technological factors association, related to the productivity and the lignocellulosic compounds concentration. The objective in this study was to analyze the growth, accumulation of biomass and lignocellulosic compounds in biomass sorghum hybrids sensitive to the photoperiod, as well to evaluate the interactions with the environment in different phenological phases, using growth rates absolute and relative of the culture. The experiments were conducted in *Lavras* and *Sete Lagoas* in the *Minas Gerais* state, in the crop seasons 2014/2015 and 2015/2016. A complete randomized block design with a factorial scheme 4 x 6, being four hybrids (BRS716, CMSXS7027, CMSXS7045, CMSXS7046) and six evaluation periods (30, 60, 90, 120, 150, 180 days after planting), with three replications. The agronomic assessed traits were: plant height (PH), green mass yield (GMY), dry mass yield (DMY); and the technological traits: cellulose (CEL), hemicellulose (HEM) and lignin (LIG). The average performance of the hybrids throughout the evaluation periods in the harvests and tested sites were adjusted by means of a logistic regression model and, posteriorly, absolute crop growth (AGR) and relative crop growth (RGR) rates were estimated. The traits that did not fit to the logistic model were adjusted to the polynomial regression model. The hybrids showed different behavior for the PH, CEL and LIG traits. From the absolute and relative growth rates, there were considerable increases in the initial phases of the vegetative cycle for these traits, standing out the BRS716 hybrid because it presents growth rate in relation to PH and accumulation of CEL higher than the others. The CMSXS7045 hybrid showed greater variation over time for the LIG content. Biomass sorghum hybrids, sensitive to the photoperiod, show a similar behavior during the evaluation periods for the PH, CEL and LIG traits. Through absolute and relative growth rates, considerable increase are observed in the early stages of the vegetative cycle (30 to 90 DAP) for the PH, CEL and LIG traits. It is verified the influence of the environments on the genotypes behavior during the evaluation periods for the PH, GMY, DMY and LIG traits. It is observed a greater increase in PH, GMY and DMY up to 90 days after planting, highlighting an accelerated growth rate and greater biomass accumulation for the environment of *Sete Lagoas* in both crop seasons.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*. Logistic model. Genotype x environment interaction. Phenological phases. Growth rate.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Conversão da biomassa em biorrefinarias.....	13
Figura 2	Etapas de crescimento 1 (EC1), 2 (EC2) e 3(EC3) da planta de sorgo em função do número de dias após a semeadura. ....	16
Figura 3	Comparação da composição bioquímica do colmo de híbridos de sorgo sacarino (Della) e sorgo biomassa (TX08001), utilizando-se dados apresentados por Stefaniak et al. (2012). ....	22
Figura 4	Dados pluviométricos cumulativos e de temperatura média mensais nas safras 2014/2015 e 2015/2016 em Lavras/MG e Sete Lagoas/MG. ....	24
Figura 5	Médias semanais do comprimento do dia (horas de luz), nas safras 2014/2015 e 2015/2016 em Lavras/MG e Sete Lagoas/MG. ....	25
Figura 6	Ajuste do modelo logístico à altura de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP). ....	35
Figura 7	Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável altura dos híbridos avaliados, nas diferentes épocas de colheita. ....	36
Figura 8	Ajuste do modelo logístico ao teor de celulose de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP). ....	38
Figura 9	Ajuste do modelo logístico ao teor de lignina de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP). ....	40
Figura 10	Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável lignina dos genótipos avaliados, nas diferentes épocas de colheita. ....	41
Figura 11	Ajuste do modelo logístico da altura de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D). ....	43
Figura 12	Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável altura em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16. ....	45
Figura 13	Ajuste do modelo logístico da produção de massa verde de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D). ....	47
Figura 14	Ajuste do modelo logístico da produção de massa seca de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D). ....	49
Figura 15	Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável produção de massa seca (PMS) em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16. ....	51

Figura 16	Ajuste do modelo logístico da produção de lignina de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).....	53
Figura 17	Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável lignina em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16. ....	54
Figura 18	Regressão cúbica para porcentagem de celulose em plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).....	56
Figura 19	Regressão cúbica para porcentagem de hemicelulose em plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).....	58

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo da análise química de solo das áreas experimentais de Lavras/MG e Sete Lagoas/MG (SL) na profundidade de 0 a 20 cm, nos anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016.....	26
Tabela 2	Resumo da análise de variância conjunta com quadrados médios dos caracteres agrônômicos: altura de plantas (ALT, m), produção de massa verde (PMV, t ha <sup>-1</sup> ) e produção de massa seca (PMS, t ha <sup>-1</sup> ), porcentagem de matéria seca (% MS); e dos caracteres tecnológicos celulose (CEL, %), hemicelulose (HEM, %) e lignina (LIG, %), relativo à avaliação de híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo em seis épocas de colheita em Lavras-MG e Sete Lagoas-MG nas safras 2014/2015 e 2015/2016.....	33
Tabela 3	Estimativas dos parâmetros ( $\alpha$ , $k$ , $\gamma$ ) do modelo logístico ajustado à altura (ALT), teor de celulose (CEL) e lignina (LIG) dos híbridos de sorgo biomassa quanto ao desdobramento da interação genótipo x épocas.....	36
Tabela 4	Estimativas dos parâmetros ( $\alpha$ , $k$ , $\gamma$ ) do modelo logístico ajustado à altura (ALT), produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS) e lignina (LIG) dos genótipos de sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16. ....	44
Tabela 5	Tabela de médias dos caracteres altura (ALT), produção de massa verde (PMV), porcentagem de matéria seca (% MS), celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LIG) dos genótipos de sorgo biomassa em Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16.....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
<b>2.1</b>	<b>Aspectos gerais do uso da biomassa</b> .....	12
<b>2.2</b>	<b>A cultura do sorgo</b> .....	13
<b>2.2.1</b>	<b>Análise de crescimento do sorgo biomassa</b> .....	15
<b>2.2.2</b>	<b>Ganho em biomassa</b> .....	18
<b>2.2.3</b>	<b>Mudanças na composição química</b> .....	20
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
<b>3.1</b>	<b>Locais de condução dos experimentos</b> .....	23
<b>3.2</b>	<b>Híbridos avaliados, planejamento e condução dos experimentos</b> .....	26
<b>3.3</b>	<b>Caracteres agronômicos e tecnológicos</b> .....	27
<b>3.4</b>	<b>Análise estatística dos dados</b> .....	27
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	32
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	60
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	68
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
	<b>APÊNDICE</b> .....	74

## 1 INTRODUÇÃO

Com foco na produção de energia, o uso da biomassa dedicada como fonte de matéria-prima em substituição aos combustíveis fósseis, tanto para a geração quanto para a cogeração de energia, é considerada uma solução promissora. Dentre as culturas cultivadas para esta finalidade destaca-se o sorgo biomassa [*Sorghum bicolor* (L) Moench], que apresenta particularidades como sensibilidade ao fotoperíodo, manejo facilitado pelo uso de maquinário, tolerância a estresses abióticos, ciclo curto, altos rendimentos de biomassa por unidade de área, dentre outras (PARRELLA et al., 2010; PERRIER et al., 2017).

O alto desempenho produtivo dos híbridos de sorgo biomassa, por si só, não determinam a qualidade da biomassa produzida, sendo que os compostos estruturais influenciam diretamente no propósito final de uso dessa matéria-prima. A análise de crescimento é utilizada com o intuito de descrever as condições morfofisiológicas da planta em diferentes etapas fenológicas, tornando possível verificar diferenças, tanto genéticas quanto resultantes da interação dos genótipos com o ambiente. Esse é o meio mais acessível para avaliar o crescimento e desenvolvimento das plantas e inferir sobre a contribuição de diferentes processos fisiológicos no comportamento vegetal, como o acúmulo de biomassa e a atuação de compostos estruturais como celulose, hemicelulose e lignina, que favoreçam o aumento de rendimento energético.

Relatos na literatura reportam o emprego da análise de crescimento para as culturas do café (FERNANDES; PEREIRA; MUNIZ, 2017), forrageiras (BARBERO et al., 2013), milho (MORAIS et al., 2017), coqueiro anão (PRADO; SAVIAN; MUNIZ, 2013), mas sem relatos para o sorgo biomassa no Brasil. Contudo, alguns trabalhos foram realizados visando quantificar e analisar o potencial agrônômico e tecnológico desses híbridos sensíveis ao fotoperíodo (CASTRO et al., 2015; DAMASCENO et al., 2013; PARRELLA et al., 2010; SOUZA et al., 2014). No entanto, não há relatos na literatura sobre o acúmulo de biomassa, como também de compostos lignocelulósicos em função dos estádios fenológicos da cultura.

Diante do exposto, realizou-se o presente estudo com o objetivo de analisar o crescimento, o acúmulo de biomassa e de compostos lignocelulósicos em híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo, bem como avaliar as interações com o ambiente em diferentes fases fenológicas utilizando taxas de crescimento absoluto e relativo da cultura.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos gerais do uso da biomassa

Estimativas da Organização das Nações Unidas – ONU (2013) indicam que até 2050 haverá, aproximadamente, 9 bilhões de pessoas no mundo; número que indica o aumento significativo da demanda por alimentos, fibras e energia. Outra estimativa da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura – FAO (2017), ainda mais alarmante, é que para este mesmo período duas de cada três pessoas sofrerão com a falta de água devido a impactos causados pelo mau uso do recurso e efeitos decorrentes das mudanças climáticas.

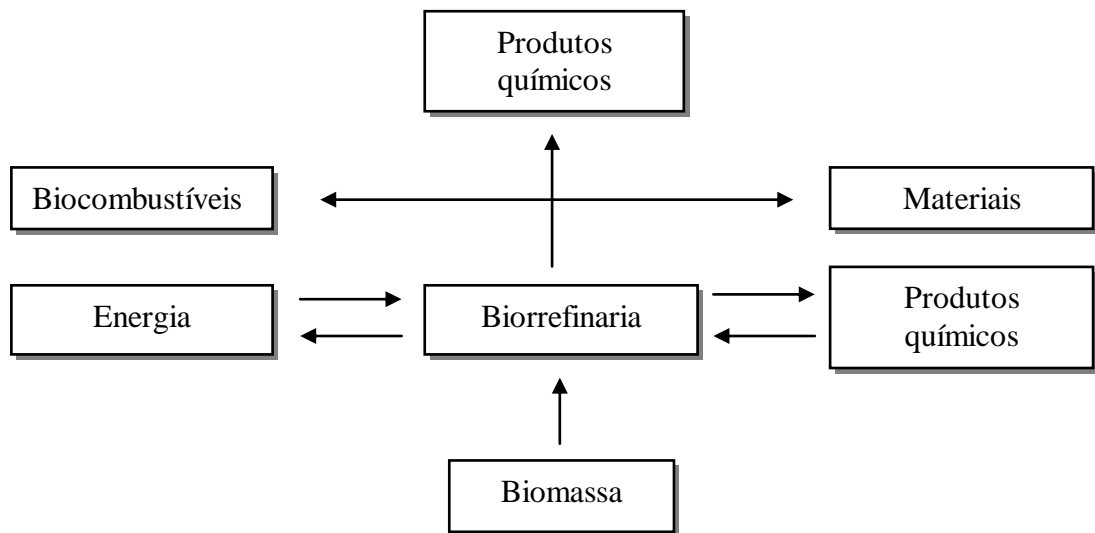
De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), pela abundância de grandes cursos d'água espalhados pelo território brasileiro, a fonte hidrelétrica está no topo da matriz elétrica do país. Porém, mudanças cada vez mais acentuadas no clima têm afetado sobremaneira a disponibilidade de água, principalmente nos períodos de inverno, quando a maioria dos estados apresenta escassez de chuva. Assim, fontes alternativas de energia, como a biomassa, podem desempenhar papel de importância para manter o abastecimento energético da população. Segundo o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2017), houve um incremento de 7,2% do uso de biomassas para geração de energia do ano de 2015 para o ano de 2016, sendo considerada a segunda maior fonte de energia nesse último ano, totalizando 25,8% da Oferta Interna de Energia (OIE).

A utilização da fibra da biomassa como matéria-prima para fins energéticos pode ser feita segundo quatro plataformas básicas em biorrefinarias: combustão direta para a produção de energia térmica (vapor) e elétrica (cogeração); hidrólise química ou enzimática da fibra (celulose e hemicelulose) para obtenção de açúcares fermentáveis e produção de combustíveis líquidos como o etanol de segunda geração; gaseificação para produção de gás de síntese (monóxido de carbono e hidrogênio) ou geração de biogás; e pirólise para produção de bio-óleo ou carvão/coque (MAMEDES; RODRIGUES; VANISSANG, 2010; NAIK et al., 2017).

As biorrefinarias são instalações que integram os processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, insumos químicos, materiais, alimentos, rações e energia (FIGURA 1). As possibilidades advindas do desenvolvimento das biorrefinarias e do aproveitamento eficiente da biomassa, dos resíduos agrícolas e agroindustriais (palhas, bagaço, serragens, etc.) ressaltam o potencial econômico e energético dessas instalações para o Brasil, país que ainda possui uma grande demanda tecnológica em setores químicos e agroindustriais, apesar de ocupar posição

de destaque no agronegócio e na produção de biocombustíveis, principalmente derivados da cana-de-açúcar (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA AGROENERGIA, 2017).

Figura 1 Conversão da biomassa em biorrefinarias.



Fonte: Adaptado de Embrapa Agroenergia (2017).

As atividades de pesquisa para obtenção de fontes renováveis de energia por muito tempo ficaram limitadas a crises energéticas relacionadas principalmente ao uso de combustíveis fósseis. Porém, com o passar dos anos, a percepção da necessidade de mitigar os efeitos negativos gerados pela emissão de gases poluentes, conservação do meio ambiente e geração de energia sustentável, fizeram com que novos projetos relacionados a essa temática fossem estabelecidos. Diversas culturas como, por exemplo, a cana-de-açúcar, o milho, eucalipto, dentre outras; com finalidade de produção de combustíveis renováveis, geração e cogeração de energia já foram consagradas pela comunidade científica e, dentre as culturas recentemente estudadas, estão os chamados “sorgo energia”, ou seja, o sorgo sacarino e o sorgo biomassa (AMEEN et al., 2016; ZEGADA-LIZARAZU; MONTI, 2011).

## 2.2 A cultura do sorgo

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L) Moench] pertence ao gênero *Sorghum* e à família Poaceae, sendo uma cultura muito versátil e de grande utilidade em regiões onde não se é possível alcançar boa produtividade de grãos ou de biomassa cultivando outras espécies, como

o milho e a cana-de-açúcar. Possui como centro de origem provável a Etiópia, sendo que o cultivo do sorgo evoluiu em uma ampla gama de ambientes devido à intervenção do homem que domesticou a espécie ao longo das gerações. Há relatos de que o processo se iniciou nas regiões áridas do Noroeste da África e na África Oriental; porém não se sabe precisamente a data em que o sorgo foi domesticado. Acredita-se, de acordo com estudos arqueológicos, que se deu há cerca de 7.000 anos atrás (RIBAS, 2014; WALL; ROSS, 1975). O processo de domesticação, combinado com intercâmbio ocasional e seleção de variedades para regiões distintas, resultou em uma grande variação no sorgo (ROONEY et al., 2007), sendo que hoje temos como produtos de interesse comercial quatro tipos agrônômicos: sorgo granífero, sorgo forrageiro, sorgo sacarino e sorgo biomassa. De uma forma menos expressiva, também pode ser destinado à produção de aguardentes e cervejas a partir da fermentação dos grãos; à produção de vassouras artesanais utilizando-se as panículas das variedades conhecidas como “sorgo vassoura”; e também à indústria, utilizando-se o amido de sorgo no processo produtivo de tintas, colas e plásticos biodegradáveis (RIBAS, 2014).

A cultura do sorgo exibe uma grande diversidade fenotípica e características de resistência para estresses abióticos e bióticos, principalmente potencial para tolerância a estresses hídricos e altas temperaturas (ENCISO et al., 2015). É o quinto cereal mais cultivado no mundo apesar de ser considerada uma cultura marginal, ou seja, manejada sob condições de estresse, com baixa aplicação de tecnologia (RIBAS, 2014), não sendo considerada uma cultura competitiva por áreas agricultáveis com culturas que são cultivadas para garantir a segurança alimentar (AMEEN et al., 2016). No Brasil, o sorgo possui baixa expressividade, quando comparado a outras culturas como a soja e o milho, sendo cultivado, principalmente, em sucessão de culturas na segunda safra, tendo sua semeadura definida de acordo com a situação do mercado.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2017), em seu décimo segundo levantamento em relação à safra 2016/2017, a cultura do sorgo foi implantada em uma área de 628,5 mil hectares, sendo Goiás o estado que ocupa a posição de maior produtor de sorgo no Brasil, seguido por Minas Gerais e Bahia. As estatísticas de produção envolvem somente a produção de grãos, sendo difícil, portanto, mensurar a produção total de sorgo incluindo a produção de sorgo forrageiro, sorgo sacarino e biomassa.

O levantamento de questões ambientais envolvendo a necessidade de se buscar fontes alternativas de energia e culturas que apresentem maior resiliência às adversidades edafoclimáticas, fez com que o sorgo surgisse no cenário energético como uma cultura

promissora, devido às suas características agrônômicas e tecnológicas: potencial de produção de biomassa e composição lignocelulósica; uso eficiente da água e tolerância à seca; sistemas de produção estabelecidos; e potencial de melhoria genética usando abordagens tradicionais e genômicas (ROONEY et al., 2007). Essas características ressaltam o potencial energético dessa cultura e ampliam as possibilidades de explorar a variabilidade genética e obtenção de novos híbridos (CASTRO et al., 2015; MEKI et al., 2017; PARRELLA et al., 2010).

O sorgo biomassa, dentre os vários tipos de sorgo cultivados, é destinado à geração e cogeração de energia. Possui variedades que apresentam colmos grossos e fibrosos, ricos em carboidratos estruturais (hemicelulose, celulose e lignina); são de porte muito alto (até 6 m); com produção de matéria seca superior a 50 t ha<sup>-1</sup> por ciclo (6 meses); apresenta robustez produtiva, rapidez e flexibilidade em seu ciclo de crescimento, podendo ser utilizado de forma eficiente em termelétricas devido atingir teor de umidade ~ 50%, por ocasião da colheita; além de apresentar poder calorífico superior competitivo (~ 4.400 kcal kg<sup>-1</sup>), quando comparado a outras culturas destinadas (CASTRO et al., 2015; MAY et al., 2016; NAKAI et al., 2016; PARRELLA et al., 2010, 2011; ROONEY et al., 2007).

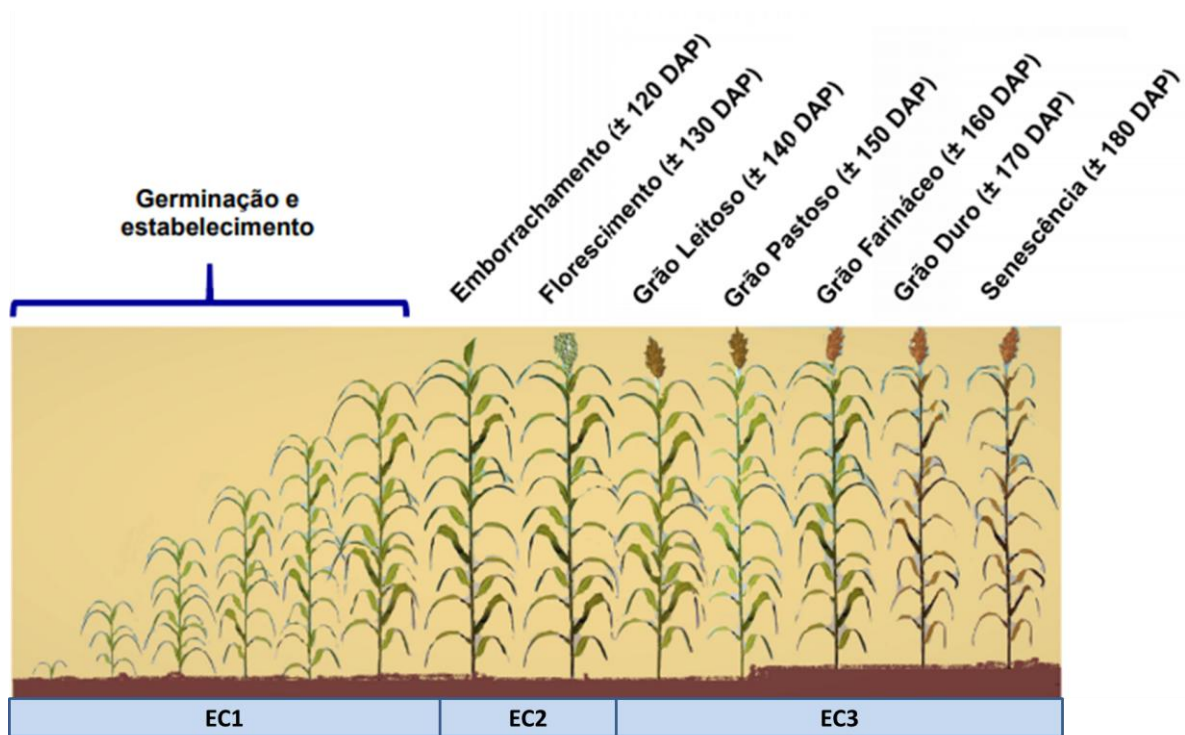
Segundo Truong, Mc Corminck e Mullet (2017), o melhoramento genético e obtenção de híbridos de sorgo biomassa ainda é muito recente, aproximadamente 15 anos de pesquisas. Assim, há ainda muitas oportunidades inexploradas para ganho em produtividade da cultura, principalmente otimizando a arquitetura da planta e aumentando a fixação de carbono e eficiência fotossintética, aprimorando a aquisição/uso de água e nutrientes, melhorando a distribuição de biomassa e umidade no colmo, favorecendo maiores rendimentos.

### **2.2.1 Análise de crescimento do sorgo biomassa**

O sorgo é uma planta monoica, autógama, de cultivo anual e que apresenta metabolismo fotossintético do tipo C4, que proporciona uma maior eficiência na produção de fotoassimilados, e conseqüentemente maiores produtividades; além de proporcionar melhor aproveitamento do nitrogênio e melhor adaptabilidade a ambientes quentes e com limitações de disponibilidade de água (MULLET et al., 2014). Seu ciclo de crescimento e desenvolvimento pode ser dividido em três fases: vegetativa, reprodutiva e de maturação do grão (FIGURA 2). O período de duração de cada etapa pode variar de acordo com fatores genéticos e ambientais (VON PINHO; FIORINI; SANTOS, 2014).



Figura 2 Etapas de crescimento e desenvolvimento 1 (EC1), 2 (EC2) e 3 (EC3) da planta de sorgo sensível ao fotoperíodo em função do número de dias após o plantio (DAP).



Fonte: Adaptado de Teixeira (2017).

A etapa de crescimento 1 é caracterizada pela germinação, aparecimento da plântula, crescimento das folhas e estabelecimento do sistema radicular fasciculado. Nessa fase, alguns fatores podem ser considerados obstáculos para um bom rendimento produtivo, como a competição por luz, água, nutrientes e presença de pragas e patógenos, o que provoca a redução do número de espiguetas viáveis que serão produzidas na próxima etapa de crescimento.

A etapa 2 se inicia com a diferenciação do meristema apical em meristema floral e finaliza com a antese, ou seja, quando ocorre cerca de 50% do florescimento da panícula. Nessa fase há o acúmulo de matéria seca a uma taxa quase que constante até a maturação, quando a planta atinge 60 a 70% do seu peso seco total. O meristema apical apresenta a panícula completa, quando o alongamento dos entrenós atinge o seu tamanho potencial, determinando a altura final da planta. Qualquer estresse durante essa fase pode ocasionar consequências negativas sobre o rendimento, redução do tamanho da planta, especialmente da área foliar e do número de sementes por panícula.

A etapa de crescimento 3 é caracterizada pela maturação dos grãos e senescência das folhas. É uma etapa decisiva para o rendimento e qualidade dos grãos formados, dependendo

da duração deste período e da taxa de acumulação de matéria seca no grão em desenvolvimento. É durante essa fase que a planta atinge sua maturação fisiológica e, para os genótipos sensíveis ao fotoperíodo, esta ocorre em 135 a 180 dias e chegam ao ponto de colheita entre 140 a 210 dias após a semeadura (VON PINHO; FIORINI; SANTOS, 2014).

A análise das etapas de crescimento, ou fenologia da planta, é um método que descreve as condições morfofisiológicas em diferentes intervalos de tempo, entre amostragens sucessivas, tornando possível acompanhar a dinâmica da produção fotossintética avaliada por meio do acúmulo de matéria seca. É o meio mais eficiente para inferir sobre a contribuição dos processos fisiológicos, nos diferentes estádios da cultura, fornecendo ainda subsídio para avaliar a produtividade e as respostas das plantas às variações ambientais e de manejo. Além de ser possível conhecer diferenças funcionais e estruturais entre cultivares de uma mesma espécie, o que favorece a seleção de materiais superiores dentro de um programa de melhoramento genético (BARBERO et al., 2013).

Para a finalidade de produção de biomassa, o conhecimento das etapas de crescimento é determinante na avaliação de aspectos agrônômicos relevantes, como o perfilhamento, altura de plantas, diâmetro de colmos, florescimento e também mudanças na composição química da biomassa. Esta análise se fundamenta no desenvolvimento de testes e modelos de simulação do crescimento e produtividade da cultura, baseado em vários índices fisiológicos, como a taxa de crescimento absoluto e a taxa de crescimento relativo. Estas inferências se fundamentam no fato de que, em média, 90% da matéria orgânica acumulada ao longo do crescimento da planta resultam da atividade fotossintética e o restante, da absorção mineral do solo (LIMA; PEIXOTO; LEDO, 2007).

As curvas de crescimento normalmente são mais bem descritas por modelos estatísticos que de regressão não linear os quais apresentam algumas vantagens em relação aos lineares, tais como a origem na teoria e princípios biológicos, físicos e químicos e aplicados em situações que podem ser descritas por um menor número de parâmetros. Entretanto, existem desvantagens, já que requerem algoritmos iterativos de ajuste, uso de estimativas iniciais para o ajuste dos parâmetros, que permitem apenas aproximações em vez de inferências mais precisas e requerem sólida compreensão acerca do fenômeno em estudo (SCHABENBERGER; PIERCE, 2002). Um dos modelos utilizados é o logístico, que define curvas sigmóides, nas quais a curva de crescimento se expande lentamente no início do desenvolvimento, passa por um ponto de inflexão e atinge um máximo em uma assíntota superior (MEAD; CURNOW; HASTED, 1993).

Na literatura há vários relatos de aplicação do modelo logístico envolvendo diversas culturas. Morais et al. (2017) utilizaram este modelo para gerar estimativas para a cultura do milho relativas à altura das plantas e índice de área foliar, com o objetivo de determinar a melhor época de semeadura. Em estudos com a cultura do coqueiro anão verde, Prado, Savian e Muniz (2013), realizaram o ajuste ao modelo logístico para descrição do desenvolvimento de frutos, com base nos dados de diâmetros externos, longitudinal e transversal. Assim como Fernandes, Pereira e Muniz (2017) que utilizaram desta ferramenta estatística para ajustar as fases de crescimento dos grãos de cafeeiros cultivados em diferentes espaçamentos.

A análise de regressão não linear logística também foi abordada por Mummey, Stoffel e Ramsey (2018), ao estudarem a espécie *Antelope Bitterbrush* (*Purshia tridentata* Pursh), avaliando a influência da distância e direcionamento de plantas preestabelecidas no processo de dispersão de sementes e produção de biomassa. Na área de fruticultura, Lima, Peixoto e Ledo (2007) fizeram estudos com o objetivo de avaliar o crescimento inicial de plantas de mamoeiro, em casa de vegetação, por meio de índices fisiológicos obtidos a partir do modelo logístico, como parâmetros indicativos do rendimento. Barbero et al. (2013) fizeram referência aos parâmetros do modelo logístico utilizados para estabelecer índices morfofisiológicos em plantas forrageiras, como a taxa de crescimento absoluto, taxa crescimento relativo, dentre outros. Porém, para a cultura do sorgo biomassa, ainda não foram encontrados relatos sobre o ajuste deste modelo para a análise de crescimento e desenvolvimento.

### **2.2.2 Ganho em biomassa**

Uma das particularidades do sorgo biomassa, que faz com que se diferencie dos demais tipos de sorgo é sua sensibilidade ao fotoperíodo. De acordo com Rooney e Aydin (1999), o controle da sensibilidade ao fotoperiodismo e de maturação (indução de floração) em sorgo, está associado ao efeito de dois alelos em seis loci: Ma1,ma1; Ma2,ma2; Ma3,ma3; Ma4,ma4; Ma5,ma5; e Ma6,ma6. Os loci Ma1 a Ma4 controlam o ciclo, enquanto os loci Ma5 e Ma6 são responsáveis pela sensibilidade ao fotoperiodismo. Os genótipos Ma5Ma5ma6ma6; ma5ma5Ma6Ma6 são insensíveis ao fotoperíodo e florescem entre 60 e 70 dias após germinação e os híbridos derivados de cruzamentos entre linhagens com estes genótipos são sensíveis (Ma5ma5Ma6ma6) ao fotoperíodo e têm indução floral somente em períodos em que os dias apresentem menos de 12 horas e 20 minutos de luz. Parrella et al. (2010), desenvolveram híbridos a partir do cruzamento entre um conjunto de linhagens insensíveis

(ma1ma1) e um grupo de linhagens sensíveis (Ma1Ma1) obtendo híbridos sensíveis ao fotoperíodo com a constituição genética Ma1ma1.

A sensibilidade ao fotoperíodo proporciona um ciclo vegetativo prolongado quando as plantas são cultivadas em períodos de dias longos, fazendo com que o acúmulo de biomassa, segundo Mullet et al. (2014), seja mais do que o dobro quando comparado ao acúmulo de biomassa do sorgo granífero ou de variedades insensíveis ao fotoperíodo. A maior proporção de biomassa favorece também uma maior interceptação da radiação solar e conseqüentemente melhor eficiência fotossintética. Rooney e Aydin (1999) salientam que a data de florescimento é dependente da data de semeadura e do comprimento do dia, que varia de acordo com a latitude e com as estações do ano.

O processo de florescimento do sorgo biomassa se inicia através da ativação de genes florígenos (CN8, CN12, CN15) que são diretamente influenciados pelo fotoperíodo e pelo ciclo circadiano (MULLET, 2017). A identificação do momento de expressão desses genes contribui para um melhor acompanhamento do processo de ganho de biomassa nas fases fenológicas vegetativas e reprodutivas.

Além do florescimento, outras características agronômicas definem o maior ou menor acúmulo de biomassa, como o perfilhamento que é influenciado pelo grau de dominância apical, regulado por fatores genéticos, ambientais e hormonais; além de ser influenciado por métodos de manejo como irrigação, poda e estande de plantas. Perazzo et al. (2014) consideram que o caracter número de colmos por hectare representa a população de sorgo por unidade de área e pode ser associado à produção de matéria seca, quando avaliado juntamente com diâmetro de colmos e altura de plantas.

Segundo Hoffmann Júnior e Rooney (2014), a altura das plantas pode ser utilizada como um indicador útil de produção em híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo, uma vez que apresentam maior período vegetativo, o que contribui para maior crescimento e produção de massa verde. Porém, plantas muito altas podem aumentar o índice de acamamento e perdas. No caso do sorgo biomassa a altura pode variar de 3,5 a 6m.

Estudos avaliando híbridos de sorgo biomassa verificaram altas produtividades em um curto período de tempo, por consequência da associação de fatores relacionados à morfologia e fisiologia das plantas cultivadas, condições edafoclimáticas favoráveis e manejo correto da cultura. Ameen et al. (2016) obtiveram uma média de 11 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca em cultivos de 180 dias; já Castro et al. (2015), para o mesmo período de cultivo, obtiveram rendimento médio de mais de 50 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca; Enciso et al. (2015) após 126 dias obtiveram

produtividade média de 16 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca; Meki et al. (2017) observaram rendimento médio nos genótipos avaliados de 37 t ha<sup>-1</sup> com 148 dias de cultivo. De forma geral, registros avaliados por Mullet et al. (2014) e Parrella et al. (2010) mostraram que a produtividade de biomassa pode variar de 15 a >50 t ha<sup>-1</sup> de matéria seca, devido à associação de vários fatores genéticos e ambientais.

Durante a implantação de biorrefinarias, o sorgo biomassa pode ser utilizado como fonte de matéria prima temporária até o estabelecimento e produção dos cultivos perenes. Além disso, o cultivo do sorgo pode ser ajustado anualmente, reduzindo os riscos associados às culturas perenes, que exigem alocação de terra em longo prazo para uma safra que leva vários anos para alcançar o melhor rendimento, como o eucalipto, que demora em média quatro anos até o primeiro corte (MULLET et al., 2014).

### 2.2.3 Mudanças na composição química

A composição química do sorgo pode variar de acordo com o genótipo cultivado e com o ambiente. Amaducci, Monti e Venturi (2004) verificaram que o ambiente influencia principalmente a concentração de celulose, hemicelulose e sacarose; enquanto o teor de lignina se mantém relativamente constante.

Conforme a destinação final da matéria prima, é que se definem os parâmetros de qualidade da biomassa formada durante o desenvolvimento da cultura, considerando a produção e acúmulo de hemicelulose, celulose e lignina. Um alto teor de lignina pode ser um fator limitante se a biomassa for utilizada com a finalidade de produção de biocombustíveis líquidos, pois este componente pode afetar diretamente o processo de sacarificação da biomassa em açúcares fermentáveis e a sua conversão em etanol (HOFFMANN JÚNIOR; ROONEY, 2014; MISHRA et al., 2017; SATTLER et al., 2009). Porém, em outro cenário, o alto teor de lignina será favorável, aumentando o potencial calorífico da biomassa para ser utilizada na geração e cogeração de energia (CASTRO et al., 2015; MAY et al., 2015).

A influência genética na composição de todos os tipos de sorgo pode ser determinante através da manipulação humana, realizada a partir de cruzamentos e obtenção de híbridos, principalmente devido ao fato de o sorgo possuir mutantes que podem apresentar até 50% menos lignina que a cultivar original, os sorgos chamados de sorgo de nervura marrom (*bmr - brown midrib*), os quais apresentam nervura central marrom-avermelhada. Esses mutantes recessivos *bmr* já estão sendo utilizados no programa de melhoramento de sorgo para

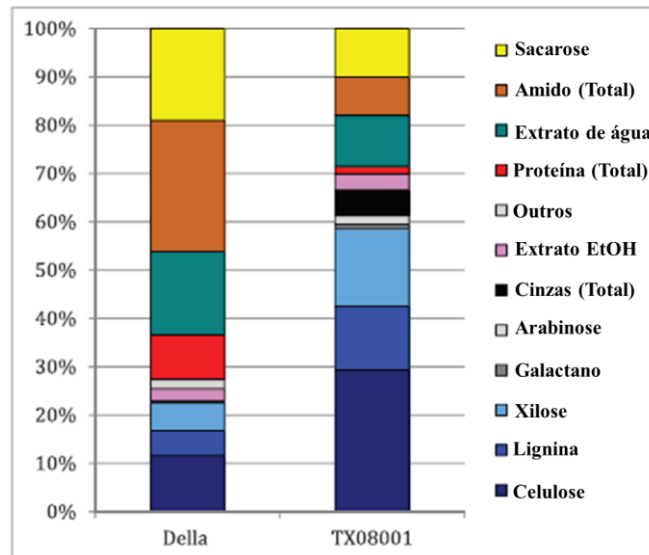
produção de cultivares com alta biomassa e menores teores de lignina (DAMASCENO et al., 2013; MAY et al., 2016; ROONEY et al., 2007). Os híbridos que apresentam a nervura central da folha na cor branca, possuem maior teor de lignina e colmos com menor teor de umidade por ocasião da colheita (MAY et al., 2015).

Na avaliação de um painel contendo 100 genótipos de sorgo energia, Damasceno et al. (2013) observaram que o teor de celulose apresentou valores de 23,49 a 44,79%, o teor de hemicelulose variou de 18,79 a 29,44% e o teor de lignina variou de 1,69 a 9,22%. Com base nesses resultados, foi possível confirmar a existência de variabilidade entre os materiais em relação à composição bioquímica e o potencial de exploração para o melhoramento genético de biomassas dedicadas. Rooney et al. (2007) também destacam a superioridade dos híbridos sensíveis ao fotoperíodo na produção de carboidratos estruturais.

Hoffmann Júnior e Rooney (2014), avaliando o acúmulo e mudanças na composição da biomassa de seis híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo durante um ano agrícola, realizando 13 colheitas espaçadas a cada 15 dias; verificaram que as concentrações de lignina e celulose aumentaram com o passar do tempo até atingirem seu ponto máximo, que foi entre o 180° e 225° dias após o plantio, com valores de 14,5 a 15,5% para lignina e de 31 a 32% para celulose.

Uma comparação da composição bioquímica do colmo de um híbrido de sorgo sacarino (Della) e do colmo de um híbrido de sorgo biomassa (TX08001) (FIGURA 3) revela um contraste significativo entre eles, sendo que o sorgo biomassa acumula níveis muito baixos de sacarose, monossacarídeos e amido (~ 20 - 25%) e proteína, acumulando-se proporcionalmente mais materiais de parede celular e cinzas (~ 60%); reforçando assim o potencial imediato desses híbridos como matéria prima bioenergética, e também a possibilidade de desenvolvimento de projetos de melhoramento direcionados para ganhos relacionados às características fenotípicas de interesse agroindustrial (MULLET et al., 2014; STEFANIAK et al., 2012).

Figura 3 Comparação da composição bioquímica do colmo de híbridos de sorgo sacarino (Della) e sorgo biomassa (TX08001), utilizando-se dados apresentados por Stefaniak et al. (2012).



Fonte: Adaptado de Mullet et al. (2014) e Stefaniak et al. (2012).

O pré-tratamento e avaliação de processos de secagem do bagaço de sorgo energia, têm sido estudados para utilização em longo prazo, conforme demanda energética, tanto para a produção de etanol de segunda-geração quanto para a utilização da fibra para a queima em caldeiras de biorrefinarias que priorizam o aproveitamento da biomassa de modo que se tenham cadeias de valor, similares às daquelas dos derivados do petróleo, mas com menor impacto no meio ambiente (IQBAL et al., 2017).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Locais de condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos em dois locais e em dois anos agrícolas, 2014/2015 e 2015/2016, conforme descrição apresentada a seguir:

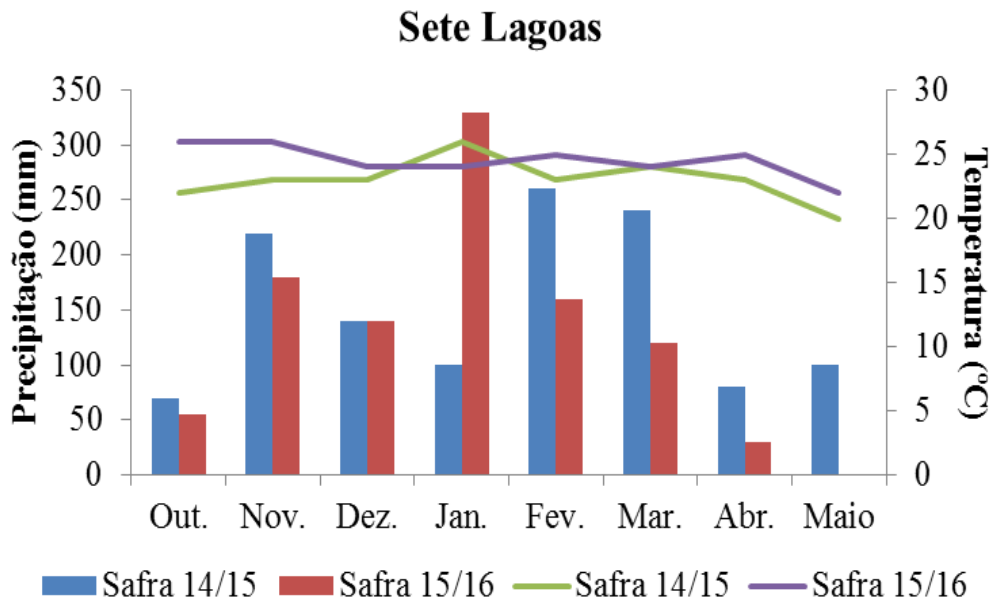
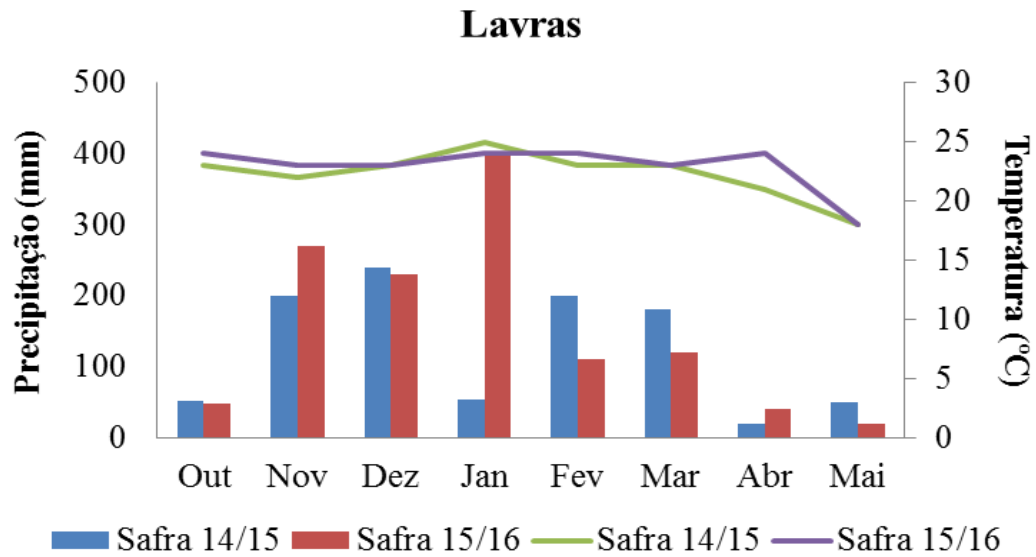
i) Área experimental situada no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária – Fazenda Muquém da Universidade Federal de Lavras-UFLA, localizada na cidade de Lavras a 21°14' de latitude sul e 45°00' de longitude oeste. O município de Lavras está situado ao sul do Estado de Minas Gerais, apresenta temperatura média anual de 19,4°C e a precipitação pluviométrica média anual de 1.529,7mm (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

ii) Área experimental da Embrapa Milho e Sorgo no município de Sete Lagoas, região central do Estado de Minas Gerais a 19°27' de latitude sul e 44°14'49" de longitude oeste. A região apresenta clima ameno com temperatura média anual em torno de 23°C. O período chuvoso vai de outubro a março com índice médio pluviométrico anual de 1.403mm (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2014).

Na safra 2014/2015, os experimentos foram implantados em novembro de 2014 e a última colheita foi realizada em maio de 2015. Por sua vez, na safra 2015/2016 os experimentos foram implantados em novembro de 2015, com a última colheita de parcelas em maio de 2016. Os dados pluviométricos e de temperatura, bem como o comprimento do dia durante o período de condução dos experimentos e as características químicas do solo das áreas experimentais estão apresentados na Figura , Figura 5 e Tabela 1, respectivamente.

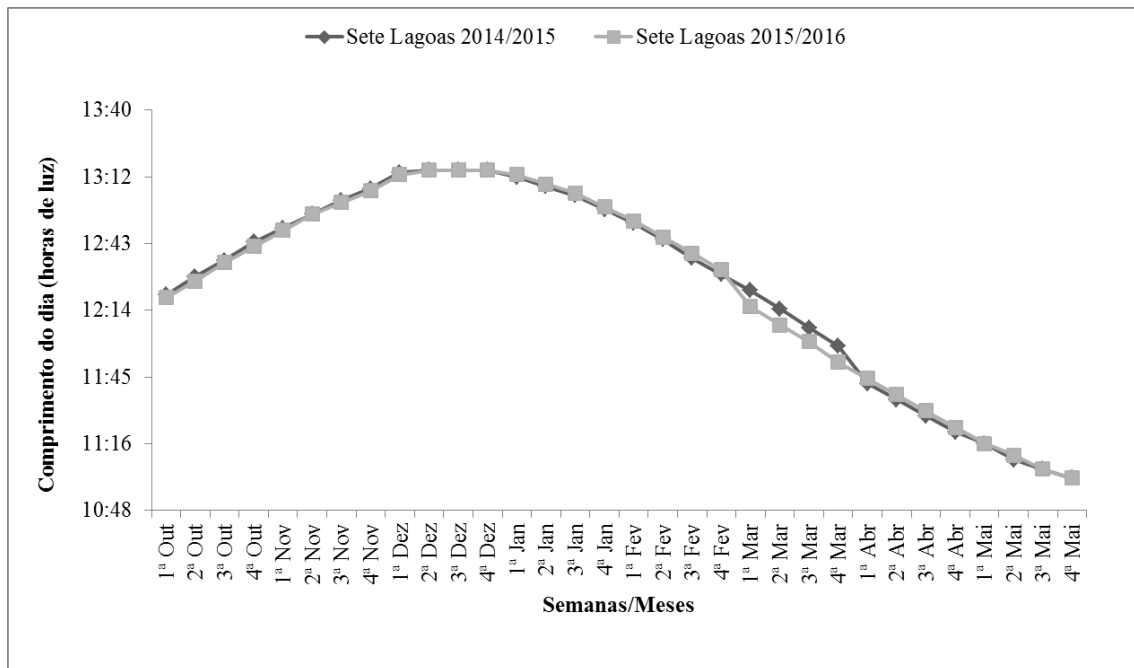
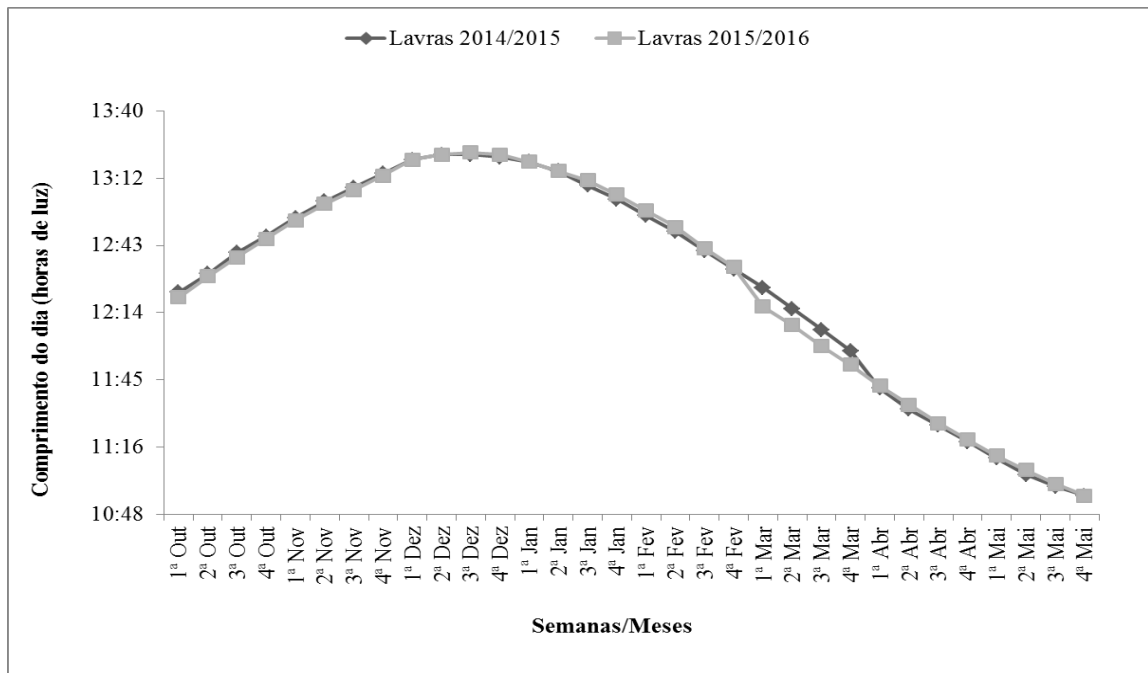


Figura 4 Dados pluviométricos cumulativos e de temperatura média mensais nas safras 2014/2015 e 2015/2016 em Lavras/MG e Sete Lagoas/MG.



Fonte: INMET (2014).

Figura 5 Médias semanais do comprimento do dia (horas de luz), nas safras 2014/2015 e 2015/2016 em Lavras/MG e Sete Lagoas/MG.



Fonte: COMPRIMENTO... (2017).

Tabela 1 Resumo da análise química de solo das áreas experimentais de Lavras/MG e Sete Lagoas/MG (SL) na profundidade de 0 a 20 cm, nos anos agrícolas 2014/2015 e 2015/2016.

	Safra	Prof.	pH	Ca	Mg	K	Al	SB <sup>1</sup>	t	T	m	V	P-rem.
		(cm)	(H <sub>2</sub> O)	-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----						----%---		(mg.L <sup>-1</sup> )	
				--									
<b>Lavras</b>	14/15	0-20	5,8	2,46	0,45	80,62	0,5	3,12	3,62	6,43	13	48	19,91
	15/16	0-20	5,6	1,9	0,33	61,43	0,3	2,39	2,69	5,97	11	40	18,34
<b>SL</b>	14/15	0-20	6	9,1	0,8	246,7	0,04	10,6	10,64	17,9	38	59	22,02
	15/16	0-20	6,1	8,9	0,8	206,9	0,05	10,3	10,35	17,7	48	58	21,86

<sup>1</sup>SB = soma de bases; t = CTC efetiva; T = CTC à pH 7; m = saturação por alumínio; V = saturação por bases; P-rem = fósforo remanescente.

Fonte: Da autora (2017).

### 3.2 Híbridos avaliados, planejamento e condução dos experimentos

Foram avaliados quatro híbridos sensíveis ao fotoperíodo, que são considerados híbridos elite, provenientes do Programa de Melhoramento de Sorgo Biomassa da Embrapa Milho e Sorgo (PARRELLA et al., 2010), localizada no município de Sete Lagoas/MG. São eles: BRS716 (comercial) = Genótipo 1, CMSXS7027 = Genótipo 2, CMSXS7045 = Genótipo 3, CMSXS7046 = Genótipo 4. Todos apresentam características semelhantes como: alta produtividade (120 a 150 t ha<sup>-1</sup>); ciclo de cultivo de 180 dias; 5 a 6 metros de altura; alto teor de fibra (22 a 28%); teor de umidade na colheita de aproximadamente 50%.

O sistema de cultivo adotado foi o de semeadura direta, com dessecação prévia da área com glifosato. Foram feitas as aberturas dos sulcos no solo, espaçados em 0,60 m entre si para Lavras e 0,70 m para Sete Lagoas. Foi realizada simultânea adubação de semeadura com 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação NPK 08:28:16 para Lavras na safra 14/15 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16, e 375 kg ha<sup>-1</sup> para Lavras na safra 15/16. A semeadura foi realizada de forma manual, com densidade de 12 sementes/metro linear. Após 20 dias da semeadura, foi realizado o desbaste deixando-se 10 plantas/metro linear. A adubação de cobertura ocorreu 30 dias após o plantio com aplicação de 200 kg de uréia ha<sup>-1</sup>.

Os experimentos foram conduzidos no delineamento de blocos completos casualizados com tratamentos no esquema fatorial 4 x 6, sendo os quatro híbridos testados em seis épocas de colheita

(30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias após o plantio - DAP), com três repetições. As parcelas foram constituídas por quatro linhas de 5,0 m lineares, sendo consideradas apenas as duas linhas centrais, como área útil.

O controle químico de plantas daninhas foi realizado com o uso de herbicida à base de Atrazina (3,0 kg ha<sup>-1</sup> do ingrediente ativo), complementado pelo controle mecânico, quando necessário (CASTRO et al., 2015).

### 3.3 Caracteres agronômicos e tecnológicos

As características agronômicas mensuradas em cada época de avaliação foram:

- a) **Altura de plantas (ALT):** altura média, em metros, de cinco plantas da área útil da parcela, medidas da superfície do solo ao ápice da panícula antes da colheita;
- b) **Produção de massa verde total (PMV):** determinada em kg/parcela por meio da pesagem de todas as plantas (completas) da área útil de cada parcela. Os dados de PMV foram convertidos para t ha<sup>-1</sup>.
- c) **Produção de massa seca total (PMS):** determinada pela diferença de peso existente entre amostras de material recém-colhido triturado em picadora e após ser submetido à secagem em estufa com ventilação forçada a 60°C (ZHAO et al., 2009). Os dados de PMS foram convertidos para t ha<sup>-1</sup>.

As avaliações tecnológicas foram realizadas no laboratório da Embrapa Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas. Os caracteres avaliados foram: celulose, hemicelulose e lignina. Para as análises laboratoriais, utilizou-se o equipamento de Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR), que utiliza como base para modelagem valores de referência dos caracteres tecnológicos associados a amostras de qualidade, que posteriormente serão correlacionados com o espectro da amostra que se deseja avaliar; obtendo assim valores confiáveis que determinam de forma rápida e eficiente parâmetros de interesse (PASQUINI, 2003; WOLFRUM et al., 2013).

### 3.4 Análise estatística dos dados

Os dados inicialmente foram submetidos à análise de variância individual dos locais e das respectivas safras de acordo com o seguinte modelo:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_k + h_i + \tau_j + h\tau_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Em que:

$y_{ijk}$ : é o valor observado na parcela que recebeu o híbrido  $i$  do fator  $h$  e a época de colheita  $j$  no bloco  $k$ ;

$\mu$ : constante geral;

$\beta_k$ : efeito do bloco  $k$ ;

$h_i$ : efeito do híbrido  $i$ ;

$\tau_j$ : efeito da época de colheita  $j$ ;

$h\tau_{ij}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$  e a época de colheita  $j$ ;

$\varepsilon_{ijk}$ : erro experimental associado à observação  $y_{ijk}$ , sendo  $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$ .

Posteriormente, foi realizada a análise de variância conjunta dos dados considerando os dois locais e as duas safras, adotando-se o modelo descrito a seguir:

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_{(ls)k} + h_i + \tau_j + \omega_l + \eta_s + h\alpha_j + h\omega_{il} + h\eta_{is} + \tau\omega_{jl} + \tau\eta_{js} + \omega\eta_{ls} + h\tau\omega_{ijl} + h\tau\eta_{ijs} + \tau\omega\eta_{jls} + h\tau\omega\eta_{ijls} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2)$$

Em que:

$y_{ijkl}$ : é o valor observado na parcela experimental que recebeu o híbrido  $i$  e época de colheita  $j$  no bloco  $k$ , no local  $l$ , na safra  $s$ ;

$\mu$ : constante geral;

$\beta_{(ls)k}$ : efeito do bloco  $k$ , dentro do local  $l$ , na safra  $s$ ;

$h_i$ : efeito do híbrido  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, t$ );

$\tau_j$ : efeito das épocas de colheita  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, g$ );

$\omega_l$ : efeito do local  $l$ ;

$\eta_s$ : efeito da safra  $s$ ;

$h\tau_{ij}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$  a época de colheita  $j$ ;

$h\omega_{il}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$  e o local  $l$ ;

$h\eta_{is}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$  e a safra  $s$ ;

$\tau\omega_{lj}$ : efeito da interação entre a época de colheita  $j$  e o local  $l$ ;

$\tau\eta_{js}$ : efeito da interação entre a época de colheita  $j$  e a safra  $s$ ;

$\omega\eta_{sl}$ : efeito da interação entre o local  $l$  e a safra  $s$ ;

$h\tau\omega_{lij}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$ , com a época de colheita  $j$  e o local  $l$ ;

$h\tau\eta_{sij}$ : efeito da interação entre o híbrido  $i$ , com a época de colheita  $j$  e a safra  $s$ ;

$\tau\omega_{slj}$ : efeito da interação entre a época de colheita  $j$ , com o local  $l$  e a safra  $s$ ;  
 $h\tau\omega_{islj}$ : efeito da interação entre os genótipos  $i$ , a época de colheita  $j$ , o local  $l$  e a safra  $s$ ;  
 $\varepsilon_{ijkl}$ : erro experimental associado à observação  $y_{ijkl}$ , sendo  $\varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma_e^2)$ .

Para aferir a qualidade experimental adotou-se a estimativa da acurácia seletiva (RESENDE; DUARTE, 2007), determinada a partir do seguinte estimador:

$$\hat{r}_{gg} = \sqrt{1 - \frac{1}{F_c}} \quad (1.1)$$

Em que:

$F_c$ : é o valor do teste de F para o efeito dos genótipos na análise de variância.

Adotou-se também o coeficiente de variação (GARCIA, 1989; PIMENTEL-GOMES, 1985), determinado pela expressão a seguir:

$$CV = \frac{s}{\mu} 100 \quad (1.2)$$

Em que:

$s$ : é a estimativa do desvio padrão do erro experimental;

$\mu$ : é a estimativa da média geral.

Para descrever o efeito das épocas de avaliação sobre o comportamento dos híbridos testados, nos diferentes locais e safras, foram realizados os ajustes pelos modelos ou equações de regressão não linear e polinomial. O modelo não linear utilizado para descrever o desempenho dos híbridos de sorgo biomassa em função das épocas em relação às variáveis mensuradas foi o logístico (FERNANDES; PEREIRA; MUNIZ, 2017; MEAD; CURNOW; HASTED, 1993), dado por:

$$y_{ti} = \frac{\alpha}{(1 + e^{-k(\tau_i - \gamma)})} + \varepsilon_i \quad (1.3)$$

Em que:

$y_{ii}$ : média do híbrido para o caráter na época de avaliação/colheita  $t_i$ ;

$\alpha$ : é o valor assintótico correspondente ao valor máximo obtido para a expressão fenotípica do caráter;

$\gamma$ : é um parâmetro de locação, sem interpretação biológica;

$k$ : é a taxa de crescimento. Quanto maior for o valor de  $k$  menos tempo será necessário para o híbrido atingir o valor assintótico ( $\alpha$ );

$t_i$ : refere-se à época de avaliação tempo em dias após o plantio;

$\varepsilon_i$ : erro experimental desvio associado à  $y_{ii}$ ,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_e^2)$ .

O ajuste do modelo logístico foi empregado para realizar os desdobramentos das interações duplas e triplas que apresentaram significância pelo teste F na análise de variância e que são de interesse para o estudo, sendo que o processo de ajuste foi realizado para cada um dos caracteres mensurados. Para o ajuste do modelo logístico, foram utilizadas rotinas desenvolvidas no *software* R (R CORE TEAM, 2017).

Para verificar a qualidade do ajuste dos dados ao modelo logístico em cada desdobramento efetuado, foi calculado o coeficiente de determinação ajustado que, diferentemente do coeficiente de determinação, faz uma ponderação pelo número de parâmetros utilizados, dado pela seguinte fórmula (TERRA; MUNIZ; SAVIAN, 2010):

$$R^2_{aj:1} = 1 - \left[ \frac{(n-1)(1-R^2)}{(n-p)} \right] \quad (1.4)$$

Em que:

$R^2$ : é o coeficiente de determinação não ajustado;

$n$ : é o número de observações;

$p$ : é o número de parâmetros do modelo.

Tem-se que quanto maior for o coeficiente de determinação ajustado, ou seja, mais próximo de 100%, melhor é a qualidade do ajuste do modelo logístico selecionado.

A taxa de crescimento absoluto instantâneo da cultura (TCI ou TCC) que Portes e Castro Junior (1991) nomeiam ao se trabalhar com dados de crescimento vegetal, estima o incremento do caráter estudado por unidade de tempo. Considerando o modelo logístico é estimada por:

$$TCC = \frac{\alpha k e^{-k(t-\gamma)}}{[1 + e^{-k(t-\gamma)}]^2} \quad (1.5)$$

Em que:

$\alpha$ : é o valor assintótico que pode ser interpretado como o valor máximo obtido pela variável;

$\gamma$ : é um parâmetro de locação, sem interpretação biológica;

$k$ : é a taxa de crescimento;

$t$ : refere-se ao tempo em dias após o plantio dos genótipos, ou seja, às épocas de avaliação.

A taxa de crescimento relativo instantânea (TCR), de acordo com Hunt (1978), é a razão entre a taxa de crescimento absoluta instantânea e a unidade de peso inicial no tempo  $t$ , sendo uma medida apropriada para avaliação do crescimento vegetal, que é dependente da quantidade acumulada gradativamente. Assim para o modelo logístico esta taxa é estimada por:

$$TCR = \frac{k e^{-k(t-\gamma)}}{1 + e^{-k(t-\gamma)}} \quad (1.6)$$

Em que:

$\gamma$ : é um parâmetro de locação, sem interpretação biológica;

$k$ : é a taxa de crescimento;

$t$ : refere-se ao tempo em dias após o plantio dos genótipos, ou seja, às épocas de avaliação.

Para as interações significativas envolvendo híbridos e épocas de colheita pelo teste F em que os caracteres não se ajustaram ao modelo logístico, foi utilizada a análise de regressão pelo *software* Sisvar (FERREIRA, 2006), com o objetivo de ajustar os dados a modelos de regressão polinomial de segundo ou terceiro grau.



## 4 RESULTADOS

Considerando as análises de variância individuais, relacionadas a cada local e safra, a precisão experimental foi avaliada por meio das estimativas do coeficiente de variação (CV) e da acurácia seletiva (APÊNDICE – TABELA 1, TABELA 2, TABELA 3, TABELA 4). Para os caracteres ALT, PMV e PMS os valores mensurados do CV variaram de 4,98% para Lavras na safra 15/16 a 29,44% para Sete Lagoas na safra 14/15. Para os caracteres tecnológicos, o valor mínimo do CV foi observado para o caráter HEM (4,03%) em Lavras 14/15 e o valor máximo foi de 16,42% em Sete Lagoas 15/16 para LIG.

Já a acurácia, apresentou valores para os caracteres agrônômicos que variaram de 59,98 % para PMS em Lavras 15/16 a 96,10% para ALT em Lavras na safra 15/16. Para os tecnológicos, os valores observados foram de 60,08% para HEM em Sete Lagoas 15/16 a 92,33% para Sete Lagoas 14/15.

Na Tabela 1 do Apêndice é possível verificar que, para a fonte de variação genótipos, houve significância para os caracteres ALT, PMV, CEL, HEM. Já para as épocas de avaliação, todos os caracteres apresentaram diferenças significativas. Não houve interação entre os genótipos e as épocas. Considerando o ambiente de Lavras na safra 2015/2016 (APÊNDICE – TABELA 2), foi observado diferença entre os genótipos apenas para ALT e PMV. Para épocas, todos os caracteres apresentaram significância. A interação entre genótipos e épocas, influenciou apenas os caracteres ALT e PMS.

Para Sete Lagoas, quando analisado o comportamento dos genótipos nas diferentes safras, foram observadas diferenças para os caracteres CEL e LIG na safra 14/15 e para os caracteres ALT, PMV, PMS e HEM na safra 15/16. Em relação às épocas de avaliação, na safra 14/15, houve significância para os caracteres PMV, CEL, HEM e LIG; na safra 15/16 todos foram significativos. Na primeira safra, não houve interação entre genótipos e épocas, porém, na segunda safra detectou-se interação para HEM (APÊNDICE – TABELA 3, TABELA 4). Após verificar os pressupostos da análise de variância procedeu-se a análise conjunta (TABELA 2).

Tabela 2 Resumo da análise de variância conjunta com quadrados médios dos caracteres agronômicos: altura de plantas (ALT, m), produção de massa verde (PMV, t ha<sup>-1</sup>) e produção de massa seca (PMS, t ha<sup>-1</sup>) porcentagem de matéria seca (% MS); e dos caracteres tecnológicos celulose (CEL, %), hemicelulose (HEM, %) e lignina (LIG, %), relativo à avaliação de híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo em seis épocas de colheita em Lavras-MG e Sete Lagoas-MG nas safras 2014/2015 e 2015/2016.

FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Agronômicos				Tecnológicos		
		ALT	PMV	PMS	%MS	CEL	HEM	LIG
Genótipo (G)	3	1,06**	1980,19**	49,85*	18,4**	16,69**	12,85**	0,71
Colheita (DAP)	5	192,71*	90558,09*	9958,34*	4850,3*	1865,41**	18,20**	59,6**
Local (L)	1	2,32**	17922,89*	2548,31*	127,8**	12,17*	17,04**	48,13**
Safra (S)	1	9,73**	1574,50**	31,48	180,4**	313,33**	34,11**	45,42**
G x DAP	15	0,18**	333,01	10,13	7,0	5,6*	2,81	0,92*
G x L	3	0,06	107,83	9,29	1,2	0,12	2,68	0,17
G x S	3	0,15	66,99	13,23	11,8*	6,95	4,01	0,19
DAP x L	5	4,39**	2374,01**	400,11**	339,9**	184,95**	12,99**	12,59**
DAP x S	5	1,25**	1064,83**	23,38	254,1**	15,16**	10,85**	21,58**
L x S	1	1,17**	3199,61**	55,18	36,5**	640,72**	48,34**	154,53*
G x DAP x L	15	0,09	244,63	23,26	5,8	2,64	1,68	0,48
G x DAP x S	15	0,10	189,64	19,49	3,2	1,46	2,46	0,84
G x L x S	3	0,09	376,37	14,83	1,6	11,99**	0,97	2,39**
DAP x L x S	5	0,99**	1738,83**	16,29	139,6**	46,98**	31,97**	14,73**
G x DAP x L x S	15	0,08	149,82	11,53	5,2	3,52	2,75	0,59
Erro	184	0,08	225,16	19,64	4,1	2,81	2,11	0,51
Média Geral		3,21	78,99	19,44	36,43	22,13	26,88	6,40
CV (%)		8,71	19,00	22,75	4,6	9,19	5,41	11,15
Acurácia Máx. (%)		96,10	93,15	83,57	83,86	85,78	92,33	
Acurácia Mín. (%)		77,36	80,5	59,98	60,08	84,67	76,96	-

<sup>(1)</sup>Fonte de Variação; <sup>(2)</sup>Grau de Liberdade; \*,\*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2018).

A magnitude da acurácia para os caracteres agronômicos na análise de variância conjunta variou de 96,10% para ALT a 59,98% para PMS. Para os caracteres tecnológicos, a variação foi de 60,08% para CEL a 92,33% para HEM. O coeficiente de variação apresentou valores considerados baixos para os caracteres ALT, % MS, CEL e HEM (8,71%; 4,6%,

5,41%), médios para os caracteres PMV e LIG (19%; 11,15%) e alto para o caráter PMS (22,75%) (TABELA 2).

Foram detectadas diferenças entre os genótipos (G) tanto para caracteres agronômicos quanto para tecnológicos, exceto para LIG. Quando avaliadas as épocas de colheita (DAP) e os locais (L), houve diferença entre o comportamento dos genótipos para todos os caracteres avaliados. Em relação às safras (S) somente para o caráter PMS não se detectou diferença significativa.

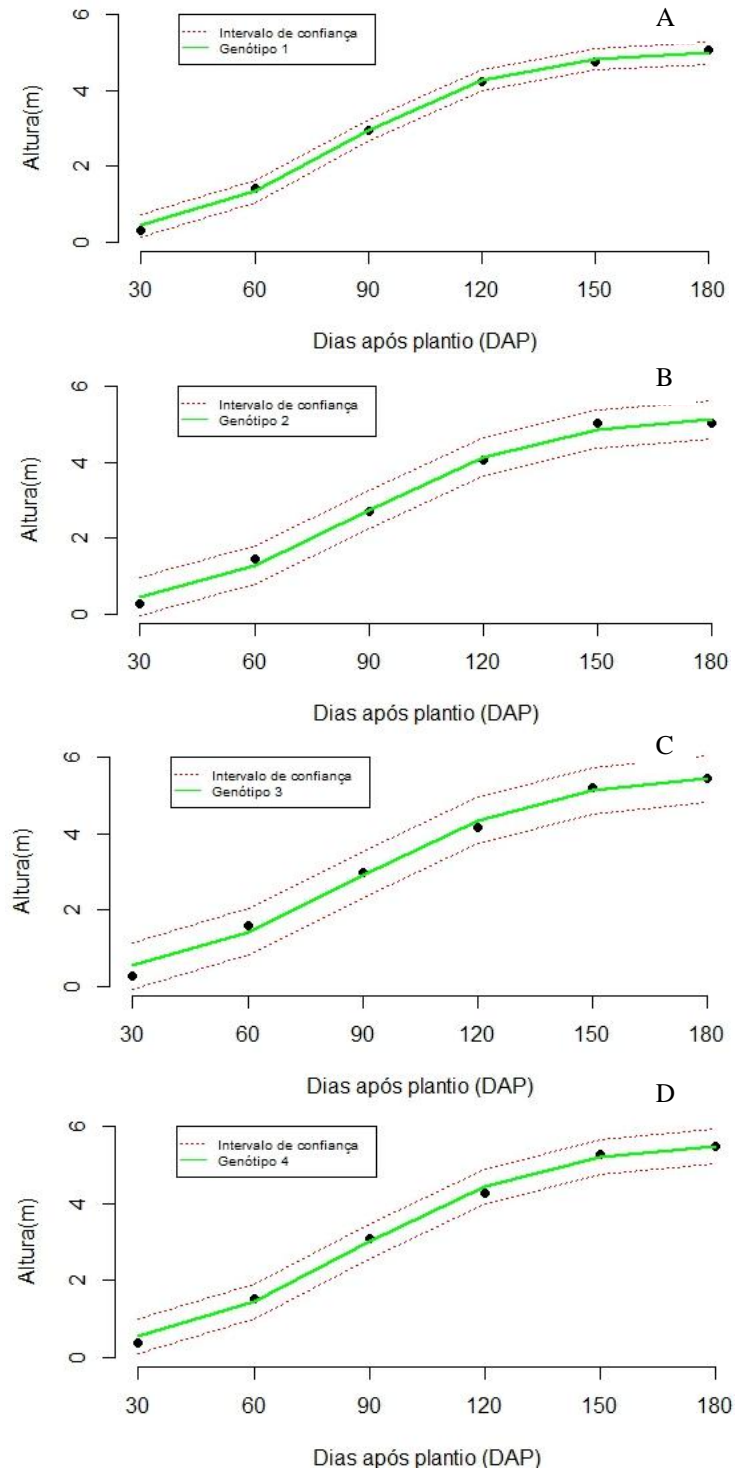
Os fatores DAP, locais e safras e suas interações (DAP x L, DAP x S, L x S, DAP x L x S) tiveram participação expressiva na variação fenotípica dos caracteres mensurados, denotando que há divergência de desempenho dos híbridos em relação às épocas de colheita tanto para locais quanto para safras, para todos os caracteres, excetuando-se PMS na interação (DAP x S) e (L x S). No que concerne às interações dos genótipos com épocas de colheita, locais e safras envolvendo os híbridos, a interação (G x DAP) foi significativa apenas para ALT, CEL e LIG, e as interações (G x L) e (G x S), não apresentaram significância tanto para as características agronômicas quanto para as tecnológicas.

As interações triplas foram menos efetivas com destaque apenas para a interação existente entre (DAP x L x S), constatando a interdependência desses fatores. Para a interação (G x L x S), houve significância apenas para os caracteres tecnológicos CEL e LIG. Não houve interação entre (G x DAP x L x S), demonstrando uma estabilidade de comportamento dos genótipos durante seu ciclo de desenvolvimento, nos diferentes locais e anos agrícolas.

Considerando as interações duplas, procedeu-se o desdobramento por meio da análise de regressão, utilizando o modelo não linear logístico para representação gráfica e identificação dos parâmetros para interpretação biológica. Para este tipo de estudo, o desdobramento de interesse considerado foi a interação entre genótipos e épocas de avaliação (G x DAP), estudando o comportamento dos híbridos em cada nível de época para os caracteres significativos ALT, CEL e LIG.

O ajuste do modelo para o caráter ALT foi classificado como muito bom, uma vez que o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) apresentou valores de 99% para os genótipos 1, 2 e 4 e 98% para o genótipo 3. Os híbridos apresentaram um comportamento de crescimento análogo, com uma curva progressiva ao decorrer do tempo, tendendo à estabilização após 150 dias (FIGURA 6).

Figura 6 Ajuste do modelo logístico à altura de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP).



Fonte: Da autora (2018).

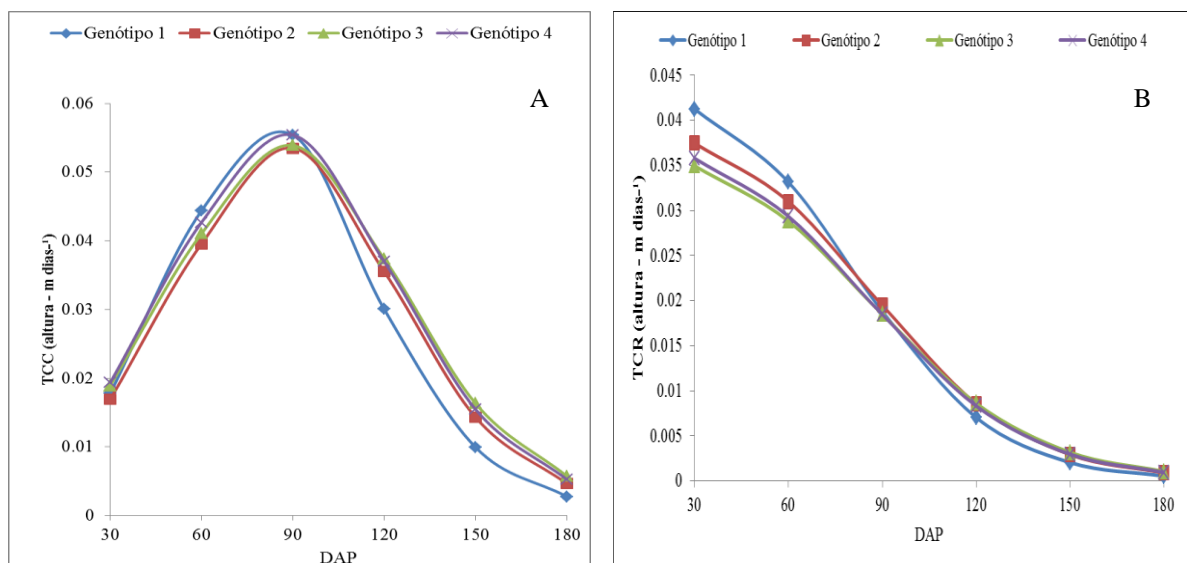
As estimativas dos parâmetros ( $\alpha$ ,  $k$ ,  $\gamma$ ) do modelo logístico da interação (G x DAP) para o caráter ALT estão na Tabela 3. A maior ALT assintótica foi observada para o genótipo 4 (5,62 m), muito embora não foram verificadas diferenças expressivas entre as alturas assintóticas dos híbridos avaliados. Ao analisar a taxa de crescimento ( $k$ ), foi possível observar que o genótipo 1 apresentou um maior valor (0,0451) para este parâmetro, indicando que este atingiu sua ALT máxima em um menor período de tempo, quando comparado aos demais (FIGURA 7).

Tabela 3 Estimativas dos parâmetros ( $\alpha$ ,  $k$ ,  $\gamma$ ) do modelo logístico ajustado à altura (ALT), teor de celulose (CEL) e lignina (LIG) dos híbridos de sorgo biomassa quanto ao desdobramento da interação genótipo x épocas.

		Genótipo 1	Genótipo 2	Genótipo 3	Genótipo 4
ALT	$\alpha$	5,05	5,23	5,58	5,62
	$k$	0,0451	0,0410	0,0387	0,0396
	$\gamma$	82,61	87,59	87,69	86,59
CEL	$\alpha$	38,98	38,74	39,17	40,19
	$k$	0,0828	0,1143	0,0989	0,0846
	$\gamma$	24,15	26,42	25,24	25,51
LIG	$\alpha$	8,13	8,52	7,99	8,21
	$k$	0,0145	0,0120	0,0189	0,0151
	$\gamma$	13,06	13,37	15,42	10,62

Fonte: Da autora (2018).

Figura 7 Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável altura dos híbridos avaliados, nas diferentes épocas de colheita.

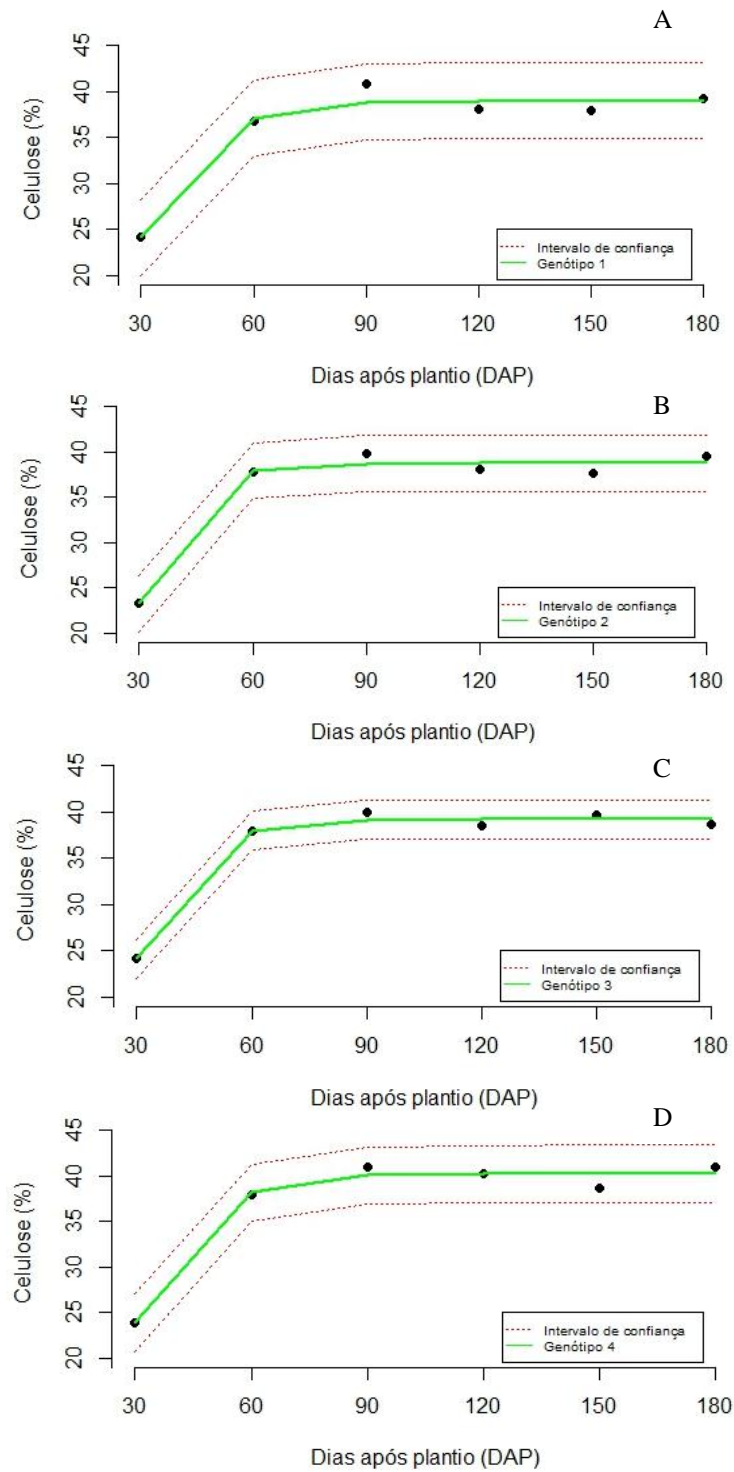


Fonte: Da autora (2018).

Em relação à Figura 7 e avaliando a TCC, é possível inferir que o incremento em altura de plantas de sorgo biomassa ocorreu de forma mais expressiva nas primeiras etapas de crescimento ( $\sim 0,04 \text{ m dia}^{-1}$ ), atingindo seu máximo para todos os híbridos, em média, entre os 80 a 100 DAP. Após este período o crescimento da planta em relação foi pouco expressivo ( $\sim 0,005 \text{ m dia}^{-1}$ ). A TCR denota um aumento do crescimento nas fases iniciais dos genótipos, com destaque para o genótipo 1 ( $0,041 \text{ m g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  aos 30 DAP), com diminuição na taxa de ganho com o passar do tempo ( $0,0006 \text{ m g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  aos 180 DAP).

Considerando o caráter CEL, observou-se que o ajuste do modelo foi considerado bom para os genótipos 1, 2 e 4 que apresentaram o valor de coeficiente de determinação superior a 90%, e razoavelmente bom para o genótipo 3, que apresentou valor de 84%. Todos os híbridos demonstraram um rápido incremento de CEL entre os 30 e 60 dias após o plantio, tendo pouca variação após este período, mantendo um teor entre 35 e 40% até a última colheita aos 180 dias (FIGURA 8).

Figura 8 Ajuste do modelo logístico ao teor de celulose de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP).



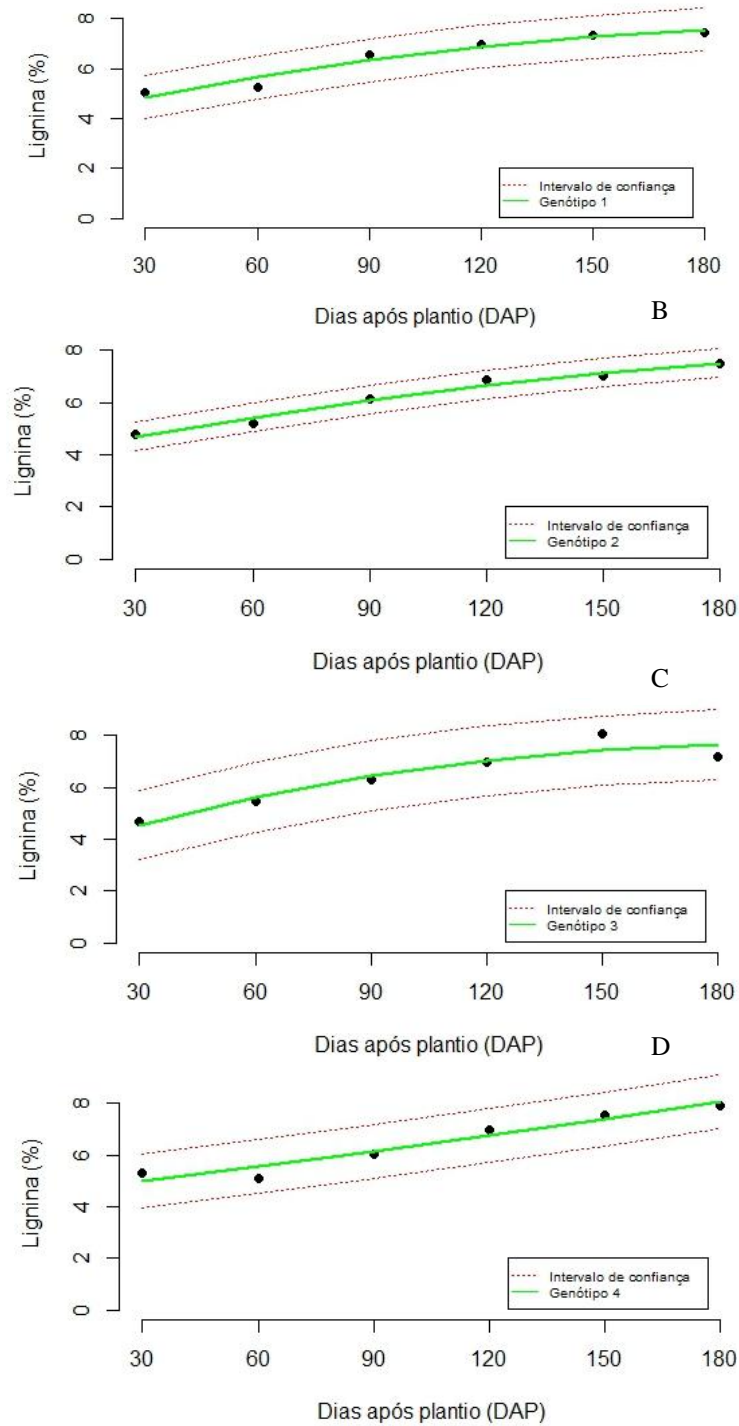
Fonte: Da autora (2018).

Considerando as estimativas dos parâmetros do modelo para CEL na Tabela 3, foi possível observar um maior teor assintótico para o genótipo 4 (40,19%), seguido pelos genótipos 3 (39,17%), 1 (38,98%) e 2 (38,74%). Analisando também a taxa de crescimento, verificou-se que o genótipo 2 apresentou maior valor para o parâmetro  $k$  (0,1143) indicando que, comparado aos outros, este atingiu seu teor máximo de CEL precocemente.

Para o caráter LIG, que influencia diretamente na destinação final da matéria prima, o ajuste do modelo logístico foi considerado muito bom para os genótipos 1 ( $R^2_{aj} = 91\%$ ), 2 ( $R^2_{aj} = 97\%$ ), 4 ( $R^2_{aj} = 94\%$ ); e razoavelmente bom para o genótipo 3 ( $R^2_{aj} = 84\%$ ). De acordo com o modelo os genótipos apresentaram pouca variação durante o período de avaliação mantendo os valores entre 4 e 9% (FIGURA 9).



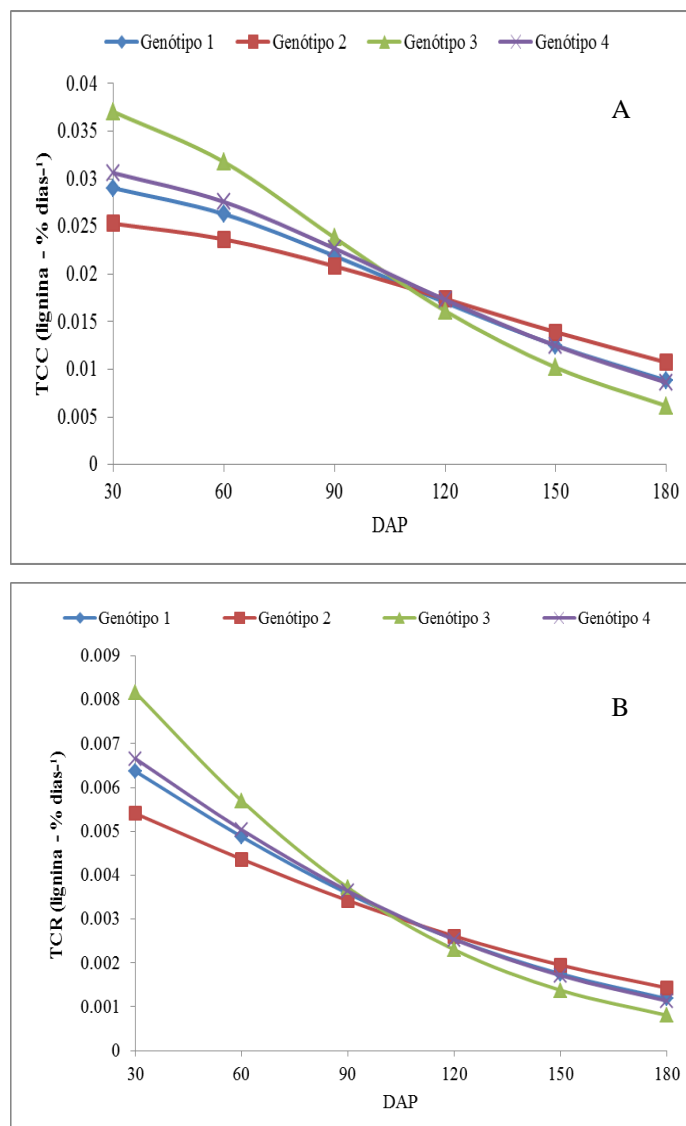
Figura 9 Ajuste do modelo logístico ao teor de lignina de plantas do sorgo biomassa considerando o comportamento dos genótipos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D); em cada época de avaliação (DAP).



Fonte: Da autora (2018).

De acordo com os parâmetros analisados para LIG (TABELA 3), o genótipo 2 foi aquele que registrou maior teor assintótico (8,52%) para este caráter; e o genótipo 3 foi aquele que atingiu o seu máximo (7,99%) em um menor tempo de avaliação, devido ao parâmetro  $k$  de maior valor (0,0189), corroborando com o gráfico obtido a partir da taxa de crescimento da cultura. O incremento para o genótipo 3 apresentou redução expressiva, de 0,037% dia<sup>-1</sup> aos 30 DAP a 0,006% dia<sup>-1</sup> aos 180 DAP, sendo que os demais híbridos apresentaram comportamento bem semelhante, com uma menor variação de LIG ao longo da safra (~ 0,028% dia<sup>-1</sup> aos 30 DAP a 0,009% dia<sup>-1</sup> aos 180 DAP). Com relação à TCR, o comportamento dos genótipos foi semelhante ao descrito para TCC (FIGURA 10).

Figura 10 Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável lignina dos genótipos avaliados, nas diferentes épocas de colheita.

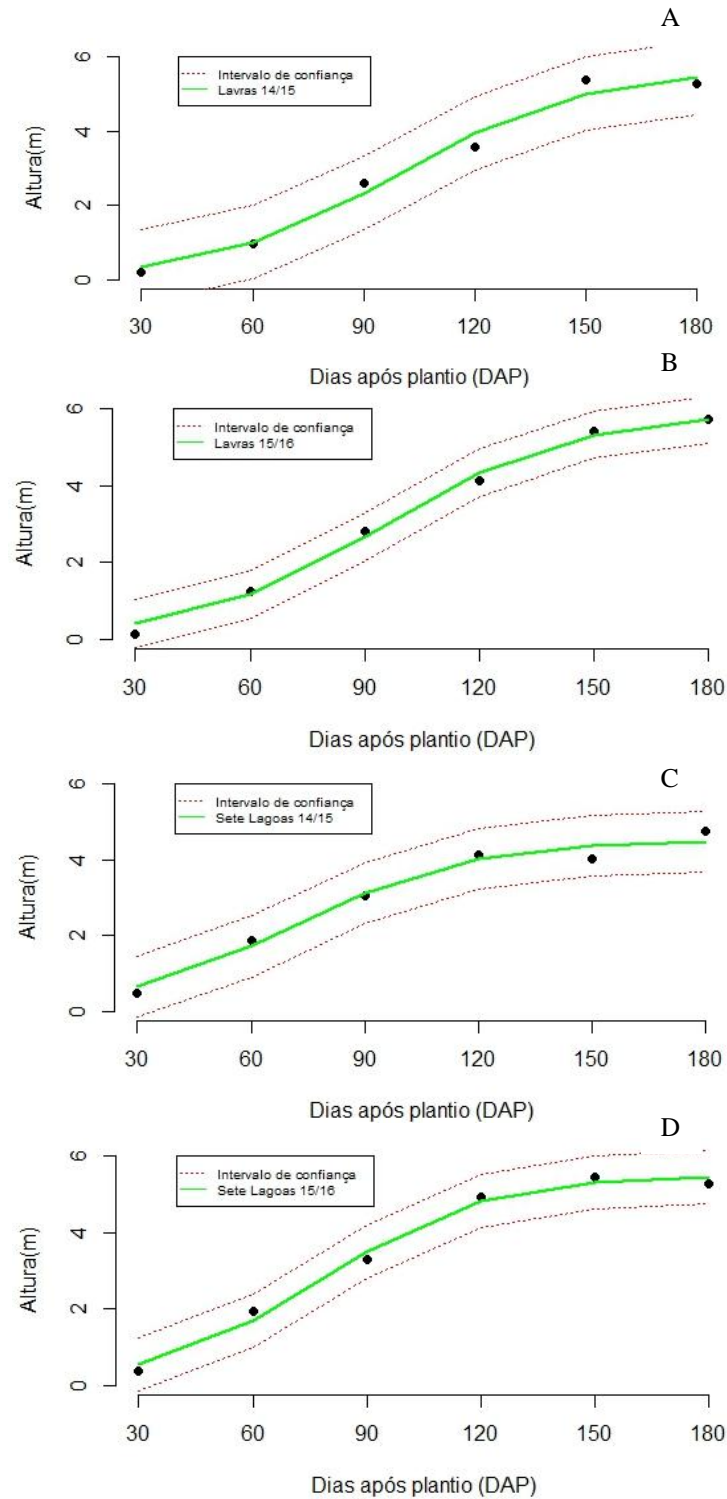


Fonte: Da autora (2018).

A análise de regressão não linear, através do ajuste ao modelo logístico, também foi utilizada para desdobrar a interação entre (DAP x L x S), que foi estudada avaliando-se o comportamento das épocas em cada nível de local e safras. Para este estudo foram avaliados os caracteres ALT, PMV, PMS e LIG.

Para ALT, houve ajuste considerado muito bom do modelo logístico para o desdobramento do desempenho das médias dos genótipos quando se avaliou épocas em relação às safras e aos locais. Os valores do coeficiente de determinação ajustado encontrados foram acima de 97%. Os gráficos de ajuste ao modelo logístico demonstraram um comportamento crescente da curva, acompanhando as épocas de avaliação de forma análoga para todos os ambientes, com tendência à estabilização após 150 DAP (FIGURA 11).

Figura 11 Ajuste do modelo logístico da altura de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).



Fonte: Da autora (2018).

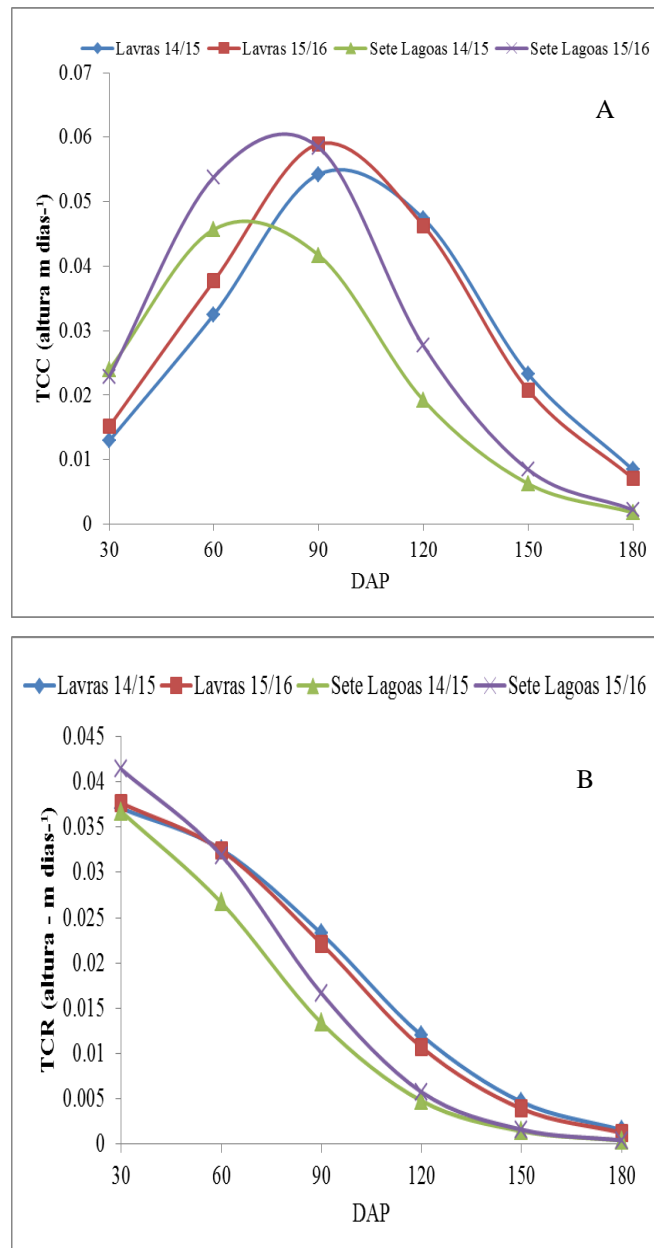
Tendo em relação os parâmetros obtidos a partir do modelo, foi possível observar que a ALT máxima média dos genótipos foi obtida em Lavras na safra 15/16, igual a 5,89 m. O ambiente em que os genótipos apresentaram precocidade, ou seja, atingiram ALT limite de 5,5m, em um menor tempo de avaliação, foi em Sete Lagoas na safra 15/16 devido ao maior valor do parâmetro  $k$  (0,046) (TABELA 4, FIGURA 12).

Tabela 4 Estimativas dos parâmetros ( $\alpha$ ,  $k$ ,  $\gamma$ ) do modelo logístico ajustado à altura (ALT), produção de massa verde (PMV), produção de massa seca (PMS) e lignina (LIG) dos genótipos de sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16

		Lavras 14/15	Lavras 15/16	Sete Lagoas 14/15	Sete Lagoas 15/16
ALT	$\alpha$	5,67	5,89	4,53	5,5
	$k$	0,0395	0,0404	0,0429	0,046
	$\gamma$	99,05	94,71	71,57	77,69
PMV	$\alpha$	102,54	93,67	118,79	106,45
	$k$	0,1205	0,1847	0,1369	0,1232
	$\gamma$	71,59	57,57	55,69	57,44
PMS	$\alpha$	30,44	32,97	39,33	37,79
	$k$	0,043	0,0409	0,0557	0,061
	$\gamma$	101,34	99,31	92,14	88,51
LIG	$\alpha$	7,3	8,66	7,14	9,62
	$k$	0,0291	0,0319	0,0431	0,0113
	$\gamma$	42,86	34,5	24,21	70,81

Fonte: Da autora (2018).

Figura 12 Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável altura em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16.



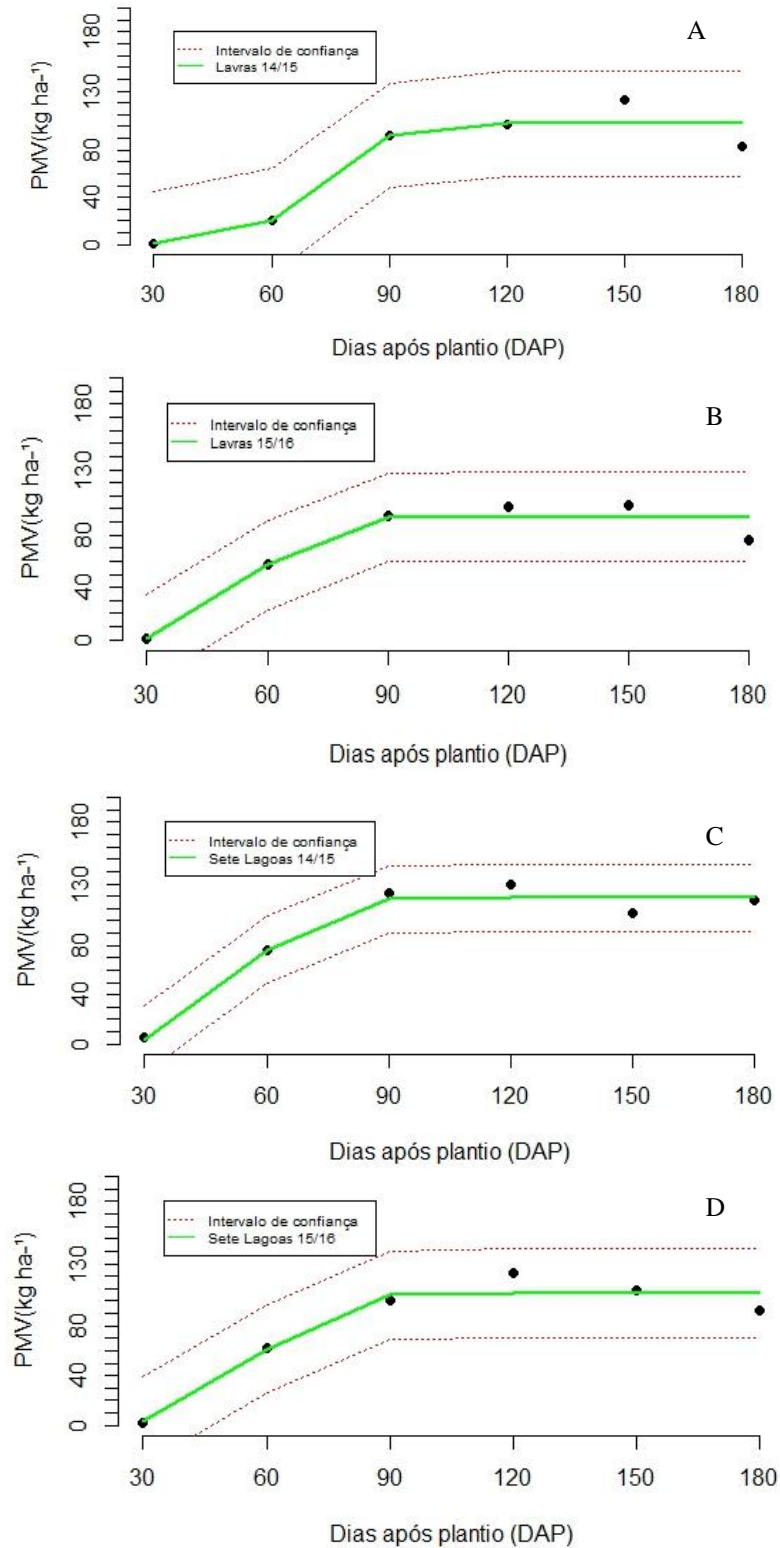
Fonte: Da autora (2018).

A Figura 12 representa a taxa de crescimento da cultura (TCC) para o caráter ALT. Há um rápido crescimento nas etapas iniciais, para o ambiente de Lavras até aproximadamente 95 DAP em média, um ganho de 0,04 m dia<sup>-1</sup>; para o ambiente de Sete Lagoas até 75 DAP um incremento médio de 0,03 m dia<sup>-1</sup>. Alcançando um aumento pouco expressivo aos 180 DAP, de 0,008 m dia<sup>-1</sup> para Lavras e 0,0002 m dia<sup>-1</sup> para Sete Lagoas. No ambiente de Sete Lagoas

safra 15/16, os híbridos apresentaram uma maior taxa de crescimento relativo ( $0,04 \text{ m g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) aos 30 DAP quando comparado com os outros ambientes.

Os valores de coeficiente de determinação ajustado para PMV variaram de 89% para Lavras na safra 14/15 a 96% para Sete Lagoas na safra 14/15, sendo considerado um bom ajuste para o modelo logístico. A Figura 13 representa o ajuste do modelo para os diferentes ambientes, demonstrando uma curva crescente com tendência de estabilização após os 90 DAP. A produção média assintótica foi alcançada em Sete Lagoas, na safra 14/15, com valor de  $\alpha$  de  $118,79 \text{ t ha}^{-1}$ . Em Lavras, na safra 15/16, foi alcançada a média superior ( $93,67 \text{ t ha}^{-1}$ ) em um menor período de avaliação de acordo com o parâmetro  $k$  ( $0,1847$ ) (TABELA 4).

Figura 13 Ajuste do modelo logístico da produção de massa verde de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).

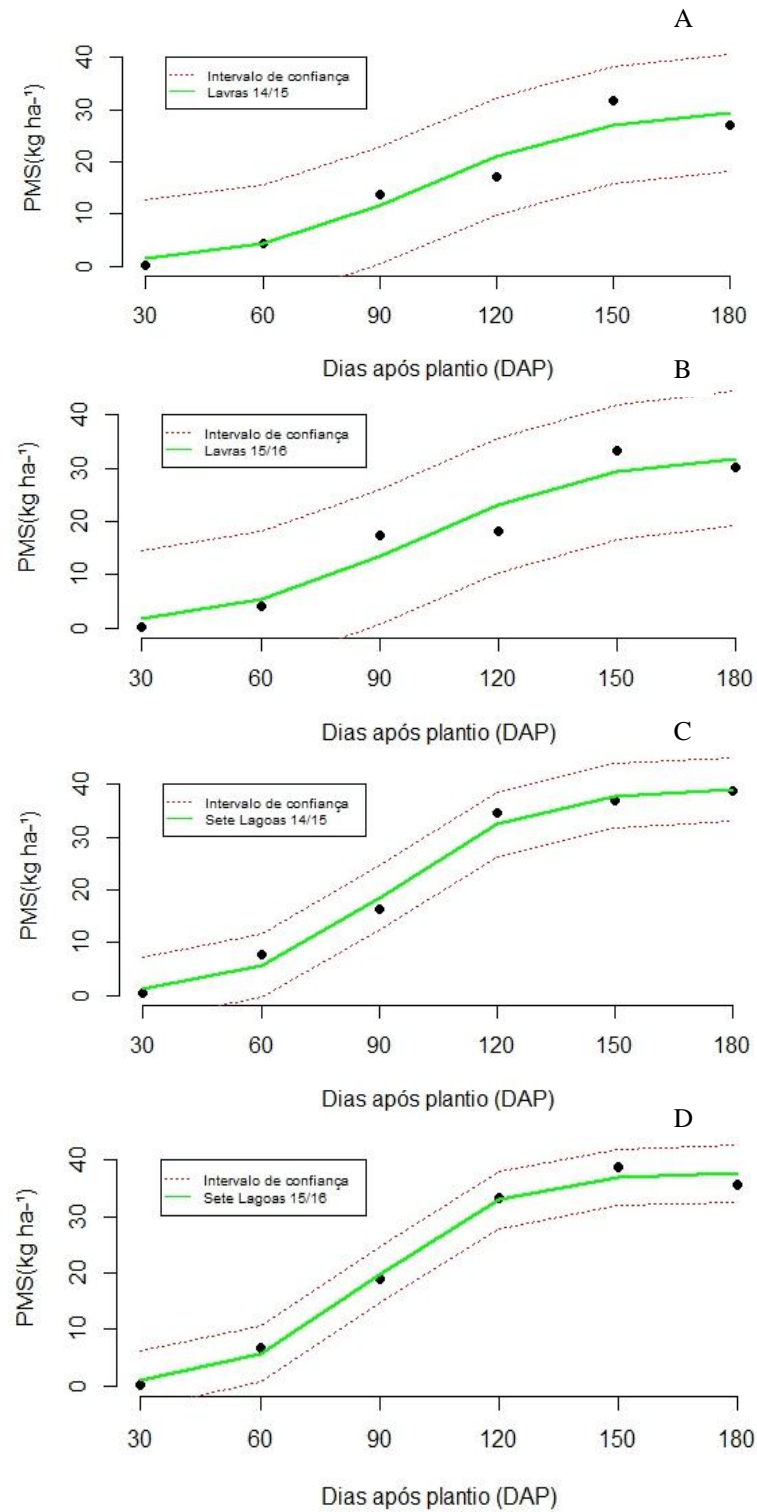


Fonte: Da autora (2018).



O caráter PMS apresentou valores de coeficiente de determinação ajustado que variaram de 88% para Lavras 15/16 a 99% para Sete Lagoas 15/16 (FIGURA 14). Segundo os parâmetros do modelo, a produção máxima ocorreu em Sete Lagoas, na safra de 2014/2015, com valor de 39,33 t ha<sup>-1</sup>. As plantas cultivadas no ambiente de Sete Lagoas, na safra de 2015/2016, atingiram sua máxima produção (37,79 t ha<sup>-1</sup>) antecipadamente, quando comparado aos outros ambientes pelo seu valor de k superior (0,061) (TABELA 4).

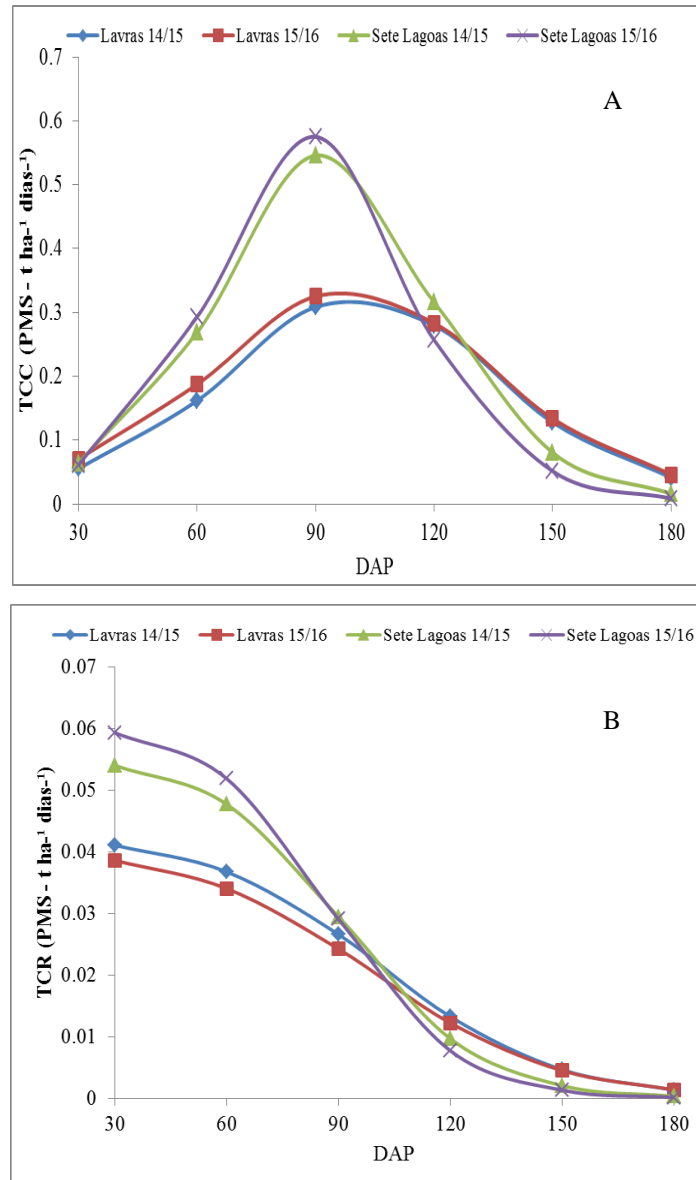
Figura 14 Ajuste do modelo logístico da produção de massa seca de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).



Fonte: Da autora (2018).

A taxa de crescimento absoluto e a taxa de crescimento relativo da cultura demonstraram um comportamento de incremento de massa seca mais acelerado dos híbridos em relação ao ambiente de Sete Lagoas na safra 15/16, apresentando uma TCC que compreendeu maior taxa de ganho entre os 70 e 100 DAP ( $0,05 \text{ t ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) e uma TCR com ganho considerável ( $\sim 0,06 \text{ t g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) nos primeiros dias para o mesmo ambiente mencionado anteriormente, e posterior redução ( $\sim 0,0002 \text{ t g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  aos 180 DAP). No ambiente de Sete Lagoas, na safra 14/15, o comportamento foi análogo à safra de 15/16, porém com uma velocidade e incremento um pouco menor. Os ganhos em massa seca de Lavras, em ambas as safras, foram similares, concentrando a TCC máxima entre 85 e 130 DAP, com uma TCR que indicou baixo incremento inicial de massa seca ( $\sim 0,04 \text{ t g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ), comparada a Sete Lagoas e redução mais considerável após os 90 DAP, estabilizando em uma média de aproximadamente  $0,004 \text{ t g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  após os 150 DAP (FIGURA 15).

Figura 15 Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável produção de massa seca (PMS) em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16.



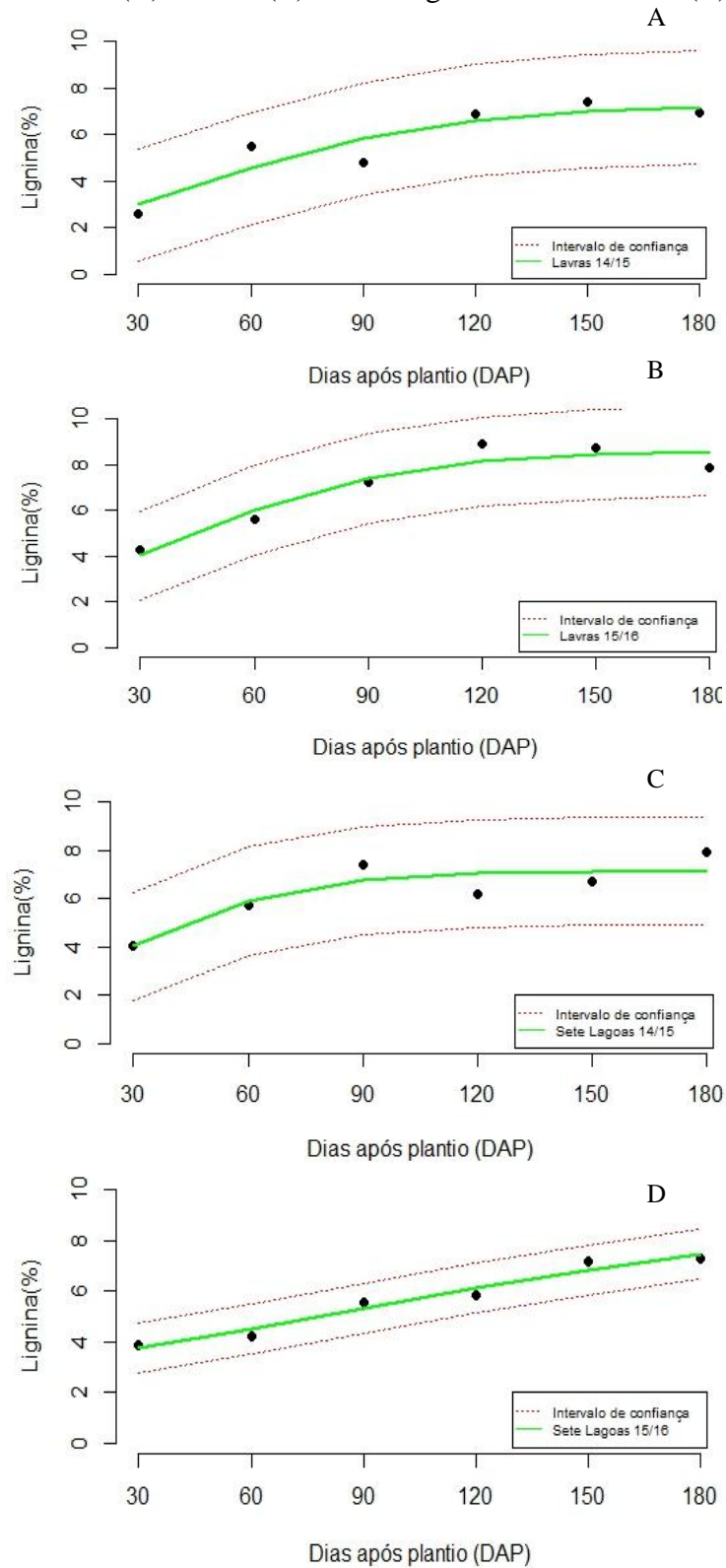
Fonte: Da autora (2018).

Em relação à LIG, o ajuste ao modelo logístico apresentou coeficiente de determinação ajustado muito bom para o ambiente de Sete Lagoas na safra 2015/2016 (94%); razoavelmente bom para Lavras na safra 2015/2016 (85%); e valores mais baixos para Lavras na safra 2014/2015 (77%) e Sete Lagoas na safra 2014/2015 (66%). A Figura 16 representa o ajuste

dos dados ao modelo, demonstrando uma maior dispersão dos dados em relação à curva para os ambientes que apresentaram menor  $R^2_{aj}$ .

Os parâmetros encontrados a partir do modelo logístico (TABELA 4) indicaram que o máximo teor médio de LIG foi registrado em Sete Lagoas, na safra 2015/2016 (9,62%) e que em Sete Lagoas, na safra 2014/2015, foi obtida a maior taxa de crescimento (0,0431), mostrando que neste ambiente o teor assintótico foi alcançado em um menor período de tempo de desenvolvimento da cultura.

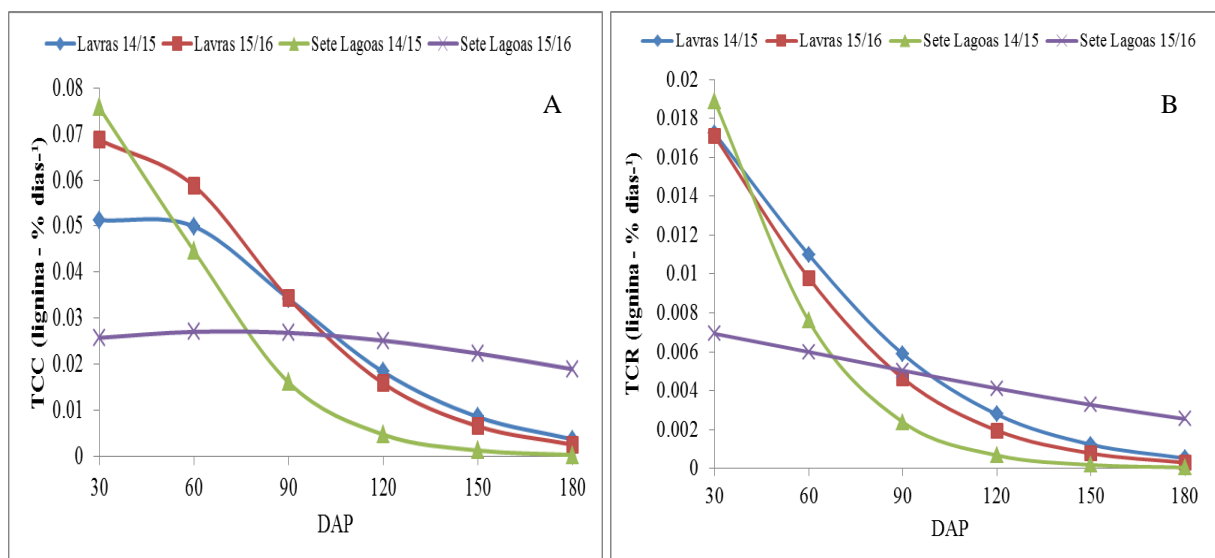
Figura 16 Ajuste do modelo logístico da produção de lignina de plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).



Fonte: Da autora (2018).

De acordo com os parâmetros de taxa de crescimento, a Figura 17 representa as TCC e a TCR, demonstrando um desempenho dos híbridos no ambiente de Sete Lagoas na safra 2014/2015, que expressa um acúmulo mais acelerado de LIG quando comparado aos outros ambientes; apresentando maior incremento nos períodos de 57 a 95 DAP para crescimento absoluto e taxa de ganho relativo inicial considerável ( $0,018\% \text{ g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) com posterior redução com o passar do tempo. O ambiente de Sete Lagoas 15/16 apresentou comportamento linear de incremento, tendo pouca variação com o passar do tempo ( $\sim 0,025\% \text{ dia}^{-1}$ ). Para Lavras, o incremento relativo para as duas safras foi semelhante, sendo que aos 30 DAP a média de ganho foi de  $0,017\% \text{ g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  e ao final o ganho foi insignificante, tendendo a 0%.

Figura 17 Taxa de crescimento absoluto (A) e taxa de crescimento relativo (B) da cultura para a variável lignina em relação às épocas de avaliação nos diferentes ambientes: Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16.



Fonte: Da autora (2018).

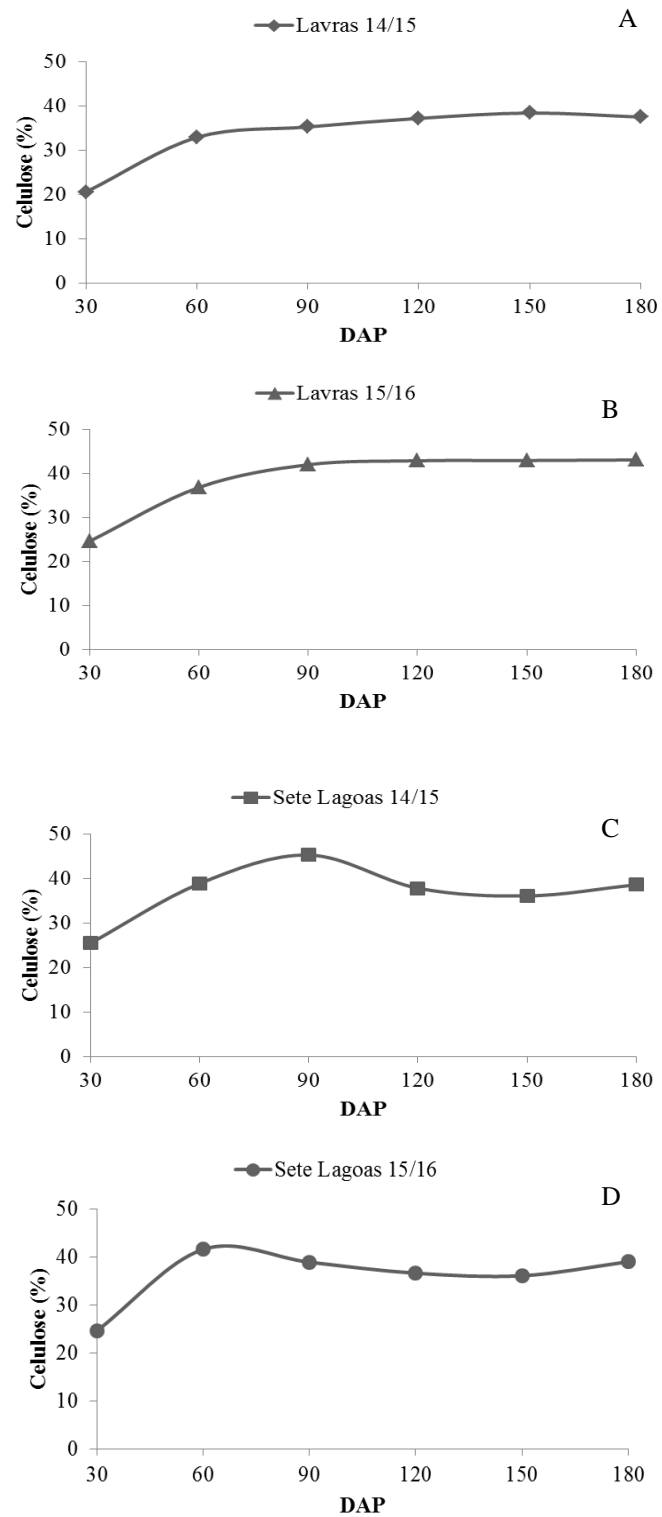
Os dados referentes aos caracteres tecnológicos de CEL e HEM não se ajustaram ao modelo logístico para a interação estudada, sendo, portanto, utilizado o método de regressão polinomial na representação. O modelo de regressão polinomial de terceiro grau ou cúbico, foi o que mostrou um maior coeficiente de determinação para o ajuste dos dados referentes ao teor de CEL e HEM para representar o comportamento dos híbridos, quando se avaliou a interação entre épocas x locais x safras, com significância para estas

variáveis, indicando divergência entre o comportamento dos mesmos nas épocas de avaliação para os diferentes ambientes.

Para o caráter CEL, o coeficiente de determinação foi muito bom, apresentando valores de 99% para os ambientes de Lavras 14/15, Lavras 15/16, Sete Lagoas 15/16; e 95% para o ambiente de Sete Lagoas 14/15. Segundo os gráficos, a partir dos resultados da análise de regressão (FIGURA 18), os híbridos quando avaliados em Lavras, na safra 14/15, apresentaram um incremento significativo no teor de CEL até completarem os 60 DAP, com posterior estabilização deste teor em aproximadamente 30% até o final do ciclo. Quando os genótipos foram avaliados no mesmo local, porém na safra 2015/2016, foi observado um período maior de acréscimo até os 90 DAP, com tendência de estabilização após este período, com valores próximos a 40%.



Figura 18 Regressão cúbica para porcentagem de celulose em plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).



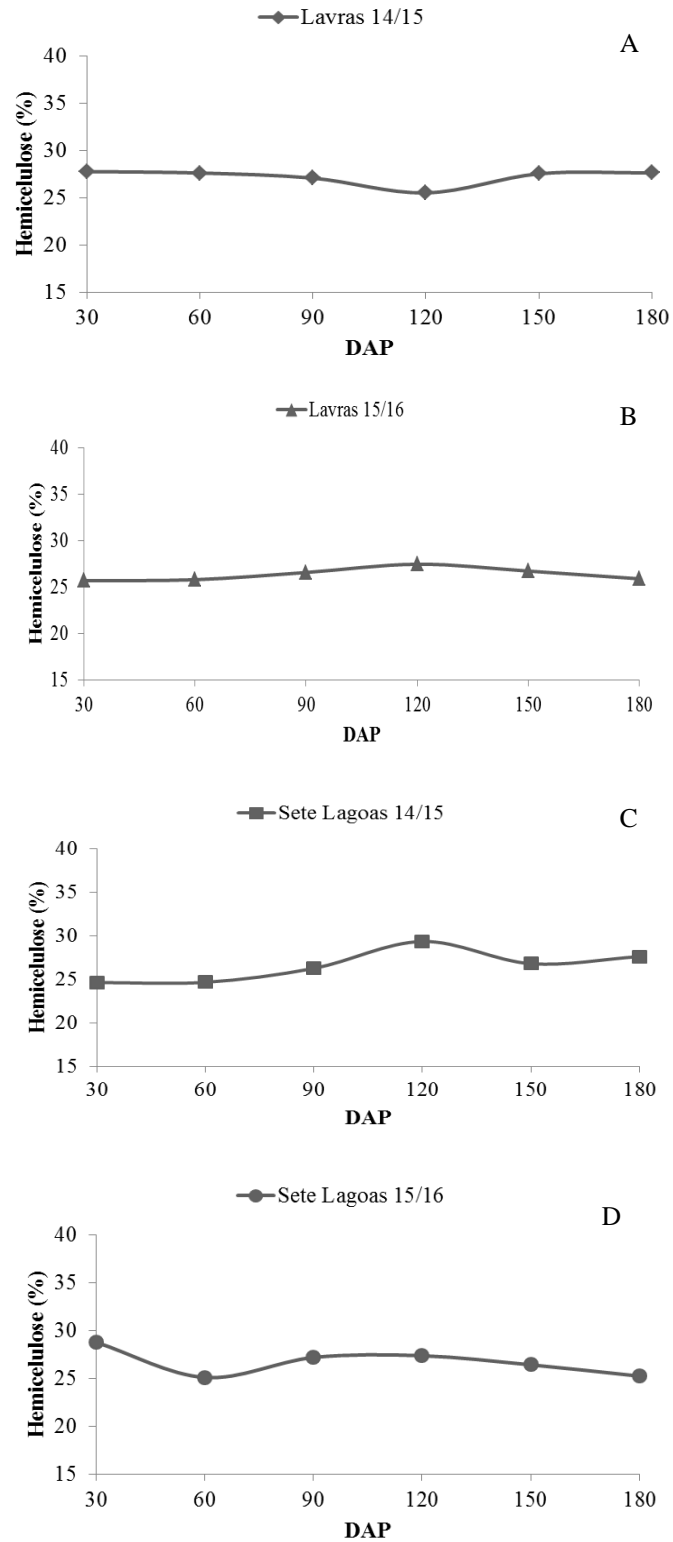
Fonte: Da autora (2018).

No ambiente de Sete Lagoas houve maior variação dos dados quando comparado ao de Lavras. Na safra 2014/2015, houve ganho percentual de CEL até os 90 DAP, seguido de pequena queda até os 120 dias e posterior estabilização até o final do ciclo com médias aproximadas a 40%. Na safra 2015/2016, o comportamento dos híbridos também foi de aumento de CEL até os 60 DAP, pequena queda até os 90 DAP e estabilização em torno de 40%.

Em relação ao teor de HEM, os ajustes ao modelo polinomial apresentaram valores de coeficiente de determinação considerados razoavelmente bons para Lavras e Sete Lagoas nas safras 2014/2015 com valores de 87%; e ajuste muito bom para ambos os locais na safra 2015/2016 com valores de 97%. Para Lavras, os híbridos tiveram, na primeira safra, maior teor de HEM durante o ciclo de avaliação do que na segunda safra. Em 2014/2015, os híbridos apresentaram uma pequena oscilação de queda percentual após os 90 DAP, com retomada após os 120 DAP e estabilização até o final do período dos 180 dias com valores em torno dos 27%. Já na safra de 2015/2016, os híbridos mantiveram comportamento estável, sem oscilações consideráveis durante todo o período de avaliação com valores aproximados de 25% (FIGURA 19).

Quando comparados os dois locais, houve maior variação dos dados em Sete Lagoas, sendo que na safra 2014/2015 houve um pequeno incremento no teor de HEM após os 90 DAP, e posterior queda e estabilização após os 120 dias com valores próximos a 25%. Já na safra 2015/2016, os híbridos exibiram teores mais elevados de HEM no início do ciclo (~ 28%), com decréscimo percentual até os 60 DAP (~ 25%), sendo que após este período houve novamente um pequeno incremento e posterior queda, finalizando o ciclo com uma média de 25% de HEM.

Figura 19 Regressão cúbica para porcentagem de hemicelulose em plantas do sorgo biomassa considerando o desdobramento de épocas em relação à média dos genótipos em Lavras nas safras 14/15 (A) e 15/16 (B) e Sete Lagoas nas safras 14/15 (C) e 15/16 (D).



Fonte: Da autora (2018).

Contudo, corroborando com os dados já apresentados, as médias observadas durante o período de avaliação, demonstram que para Lavras e Sete Lagoas, a partir dos 150 DAP não houve ganho significativo para ALT e LIG. Em relação à PMV, houve incremento até os 180 DAP para ambos os locais e também de % MS para Lavras. Os caracteres CEL e HEM apresentaram pequena variação no ambiente de Lavras, com incremento somente no início do ciclo e Sete Lagoas apresentou maior acúmulo de CEL aos 180 DAP (TABELA 5).

Tabela 5 Tabela de médias dos caracteres altura (ALT), produção de massa verde (PMV), porcentagem de matéria seca (% MS), celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LIG) dos genótipos de sorgo biomassa em Lavras nas safras 14/15 e 15/16 e Sete Lagoas nas safras 14/15 e 15/16.

DAP	LAVRAS						SETE LAGOAS					
	ALT	PMV	% MS	CEL	HEM	LIG	ALT	PMV	% MS	CEL	HEM	LIG
30	0,17 a*	0,76 a	15,22 a	22,63 a	27,25 a	5,94 a	0,43 a	3,28 a	11,51 a	25,09 a	26,73 a	3,97 a
60	1,10 b	38,76 b	14,37 ab	34,91 b	27,22 a	5,53 a	1,89 b	69,08 b	10,7 a	40,30 b	24,9 b	4,95 b
90	2,69 c	79,71 c	16,56 bc	38,67 c	26,85 a	6,02 a	3,17 c	111,21 c	16,2 b	42,15 b	26,74 b	6,48 c
120	3,85 d	93,42 d	17,47 c	40,08 c	27,51 a	7,88 b	4,52 d	126,02 c	26,99 c	37,28 c	28,38 b	6,02 cd
150	5,39 e	101,35 d	29,27 d	40,72 c	27,15 a	8,07 b	4,74 de	107,40 c	35,32 d	36,14 d	26,63 b	6,94 de
180	5,50 e	112,63 e	36,23 e	40,33 c	26,78 a	7,42 b	5,02 e	104,31 d	36,07 d	38,86 e	26,46 c	7,61 e

\*Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05% de probabilidade.

Fonte: Da autora (2018).

## 5 DISCUSSÃO

Para mensurar a precisão experimental, foram utilizados parâmetros como a acurácia e o coeficiente de variação, baseados na determinação de valores que foram estabelecidos pela estatística, como:

i) acurácia ( $\hat{f}gg$ ): varia de 0 a 1, sendo a precisão classificada como muito alta ( $\hat{f}gg \geq 0,90$ ), alta ( $0,70 \leq \hat{f}gg < 0,90$ ), moderada ( $0,50 \leq \hat{f}gg < 0,70$ ) e baixa ( $\hat{f}gg < 0,50$ ) (RESENDE; DUARTE, 2007);

ii) coeficiente de variação (CV): baixos  $CV < 10\%$ ; médios  $10\% < CV < 20\%$ ; altos  $20\% < CV < 30\%$ ; muito altos  $> 30\%$ . Valores mais baixos indicam uma maior precisão (PIMENTEL-GOMES, 1985).

Dando ênfase à precisão da análise conjunta de dados, os valores obtidos para a acurácia são considerados de moderados a muito altos. Da mesma forma, o coeficiente de variação apresentou, principalmente, valores baixos e médios. Portanto, foi possível inferir que os experimentos foram bem conduzidos e que as análises laboratoriais foram realizadas com precisão. É factível que os caracteres tecnológicos apresentem valores associados à maior precisão, pois as análises laboratoriais normalmente são realizadas em ambientes controlados e com menor interferência de fatores externos quando comparadas às amostragens dos caracteres agrônômicos, que são realizadas a campo. Hoffman Júnior e Rooney (2014), em seus experimentos, também registraram valores de coeficiente de variação para os caracteres agrônômicos superiores em relação aos caracteres tecnológicos, porém, de modo geral, os experimentos tiveram boa precisão. Assim como Souza et al. (2014), que alcançaram resultados satisfatórios de precisão em suas avaliações de produção de biomassa em vários ambientes.

A diferença entre os genótipos foi observada através da significância para todos os caracteres, exceto LIG. Esse comportamento diferenciado demonstra que, mesmo apresentando características afins, como a sensibilidade ao fotoperíodo, existem, ainda, outras características genéticas que, associadas ao ambiente no qual estes híbridos estão inseridos, denotam respostas fenotípicas dessemelhantes. Com isso, é possível identificar híbridos que se adaptam melhor a determinadas condições ambientais, proporcionando um maior potencial de exploração não só produtivo, mas também qualitativo, uma vez que os caracteres tecnológicos também sofreram essa influência. Contudo, foi observado comportamento análogo em relação ao teor de LIG, demonstrando que, independentemente do híbrido cultivado, todos

demonstram aptidão para serem utilizados como matéria prima nos mesmos processos industriais que visam utilizar genótipos com elevado teor de LIG que, de acordo com Rooney et al. (2007), é uma característica das variedades de sorgo biomassa cultivadas como culturas destinadas à produção de bioenergia.

Como já mencionado anteriormente (FIGURA 2), a cultura do sorgo possui diferentes estádios fenológicos que envolvem tanto o processo de crescimento, ou seja, aumento celular, quanto o processo de desenvolvimento ou diferenciação celular, sendo estes complexos e associados tanto a fatores internos quanto externos. Portanto, cada etapa apresentará características específicas e determinantes para todos os caracteres avaliados corroborando para a significância verificada a partir das diferentes épocas de avaliação experimental. Resultado análogo foi encontrado por Hoffmann Júnior e Rooney (2014) e corrobora com os obtidos neste trabalho.

Quando comparados os locais e as safras, também houve significância para os caracteres. Esse fato já era esperado, uma vez que as diferenças não estão relacionadas somente ao desempenho dos genótipos *per se* e às diferenças morfofisiológicas existentes entre os estádios fenológicos, mas também aos aspectos edafoclimáticos dos locais e das safras. Conforme os dados climatológicos verificados durante a condução dos experimentos (FIGURA 4) houve variação, tanto pluviométrica, quanto de temperatura para os locais e as respectivas safras. As condições de fertilidade do solo observadas também foram diferentes (TABELA 1), destacando uma maior fertilidade natural para o solo de Sete Lagoas. Estes fatores colocaram em destaque uma instabilidade ambiental, que possivelmente favoreceu a expressão dessemelhante dos caracteres agrônômicos e tecnológicos estudados (TABELA 2). Souza et al. (2014), avaliando a adaptabilidade e estabilidade de híbridos de sorgo biomassa em cinco ambientes, também obtiveram respostas distintas relacionadas aos caracteres avaliados para os diferentes locais, corroborando com os dados presentes neste trabalho.

A interação dupla não significativa entre genótipos com locais (G x L) e safras (G x S), denotou desempenho equivalente dos híbridos nos diferentes ambientes. Uma possível explicação para esta ocorrência pode estar associada ao fato de que os híbridos utilizados no presente estudo são híbridos elite, e também devido à semelhança das condições relacionadas ao comprimento do dia para ambos os locais e safras (FIGURA 5). Hoffmann Júnior e Rooney (2014), avaliando genótipos sensíveis ao fotoperíodo em diferentes locais, também não encontraram diferenças relevantes para os caracteres avaliados, exceto para HEM.

Quando avaliada a interação dupla entre os genótipos e as épocas de avaliação (G x DAP), a significância encontrada para os caracteres ALT, CEL e LIG, denota um comportamento diferenciado dos genótipos em relação a essas variáveis ao longo das épocas. Assim, a análise de regressão com o ajuste do modelo logístico identificou que a média de altura assintótica do genótipo 4 foi superior em relação aos demais. Porém, o genótipo que apresentou uma taxa de crescimento mais acelerada foi o genótipo 1, ou seja, a passagem de um estágio fenológico para outro foi mais rápida, ou seja, com certa precocidade e ciclo mais curto. Esse fato é evidenciado quando se observa a taxa de crescimento da cultura e a taxa de crescimento relativo, que demonstram um incremento de tamanho em menor período de tempo para este genótipo, que já é um híbrido comercial de destaque.

Por sua vez, após o período de 120 DAP, o incremento em ALT passa a ser menos significativo, o que já é esperado, uma vez que, após os 120 dias, alguns genótipos podem manifestar início de florescimento e maturidade fisiológica, cessando o crescimento para priorizar a formação de grãos, uma vez que para ambos os locais a partir do mês de fevereiro (~120 DAP), já foram observadas médias de comprimento do dia menores do que 12h e 20 min de luz. Rocateli et al. (2012) avaliando sorgo sensível ao fotoperíodo, juntamente com sorgo granífero e forrageiro insensíveis, verificaram que houve uma maior fase vegetativa até o início do florescimento para o sorgo sensível em detrimento dos outros, resultando em uma maior ALT de plantas. O que também foi constatado por Castro et al. (2015), avaliando híbridos de sorgo biomassa, que apresentaram em média 115 dias de ciclo vegetativo, tanto para Lavras quanto para Sete Lagoas, corroborando com as médias de ALT verificadas no presente trabalho.

Para o caráter CEL, o bom ajuste ao modelo fez com que fosse possível identificar o genótipo 4 como sendo o que obteve maior percentagem média de CEL, e o genótipo 1 como aquele que apresentou uma taxa de acúmulo de CEL mais acelerada. Perrier et al. (2017) avaliando dois genótipos com composições lignocelulósicas distintas, ao longo de duas safras, verificaram um acúmulo de CEL semelhante aos observados neste trabalho.

O teor de LIG médio foi maior para o genótipo 2, exibindo comportamento distinto dos demais e superioridade de acúmulo celular deste composto durante o ciclo. Porém, o genótipo que revelou um maior acúmulo em um menor período de tempo foi o genótipo 3. Essas diferenças encontradas podem ser devido aos processos de diferenciação celular, que são dependentes do processo fenológico da cultura, e são responsáveis pela especialização das células e tecidos, bem como armazenamento de substâncias. Segundo Taiz e Zeiger (2013)

primeiro ocorrem os processos de alongamento celular para depois ocorrerem as diferenciações. Assim, a taxa de crescimento da cultura demonstra que, para a LIG, o incremento inicial é baixo, tendo um acréscimo após os 90 DAP para os genótipos 2, 3 e 4, seguido de pequena redução. O mesmo não aconteceu para o genótipo 1, provavelmente por, de modo geral, apresentar um ciclo mais curto, atingindo seu máximo teor aos 90 DAP, com posterior diminuição no incremento de LIG. Avaliando a TCR, o genótipo 3 se destacou com crescimento mais expressivo para este caráter, podendo ser resultado não só de intervenção genética, mas também ambiental. Hoffmann Júnior e Rooney (2014) avaliaram que a queda do teor de lignina no final do ciclo, supostamente é devido ao início do processo de degradação da planta, dependendo das condições do ambiente de cultivo. Embora não tenham sido observadas durante a condução do presente trabalho, os autores também relatam que esta queda pode ser resultado do aparecimento de doenças de final de ciclo, como a ferrugem e a doença açucarada do sorgo (“ergot”).

A interação tripla pode ser avaliada de três formas: para estudar o comportamento dos locais em cada combinação de níveis de épocas e safras, para estudar o comportamento de cada safra em cada nível de local e época e, por fim, para estudar o comportamento das épocas em cada nível de local e safras. No presente estudo, a última opção foi considerada a mais adequada para explorar a interação de forma a obter resultados mais relevantes.

Quando analisada a interação entre (G x DAP x L) e (G x DAP x S), não foram observadas diferenças entre as variáveis, denotando que esses arranjos favoreceram o desempenho análogo dos genótipos, ou seja, eles não apresentaram divergência ao longo do período de avaliação tanto para os diferentes locais quanto para as safras. Essa falta de interação pode ter ocorrido devido à utilização de híbridos com características produtivas bem definidas e por apresentarem, todos eles, características fisiológicas semelhantes, como a sensibilidade ao fotoperíodo. Porém, quando avaliada a interação entre (G x L x S), houve mudança de comportamento relacionada aos caracteres teor de CEL e LIG, ou seja, os genótipos apresentaram variação desses teores quando foram avaliados considerando os locais e as safras. Essa distinção pode ter ocorrido devido às influências edafoclimáticas de cada ambiente, uma vez que foram constatadas alterações pluviométricas e de temperatura entre os locais e nas duas safras, como também diferenças relacionadas à fertilidade do solo, corroborando com os estudos de Joshi, Singla-Pareek e Pareek (2018) que estabelecem que fatores abióticos causadores de estresse, são determinantes para a produção de biomassa e influenciam diretamente nas respostas dos genes e suas interações nas diferentes fases de



desenvolvimento das plantas. Destacando também a importância do comprimento do dia para os híbridos que apresentam a característica de serem sensíveis à quantidade de horas de escuro a que estão submetidos.

A interação (DAP x L x S) demonstrou expressiva significância para os caracteres avaliados, o que sugere que as etapas fenológicas da cultura do sorgo biomassa são significativamente afetadas pela sua interação com o ambiente (locais e safras), refletindo no desempenho dos híbridos em relação aos caracteres mensurados durante cada fase de crescimento e desenvolvimento da planta. Tendo em relação o caráter ALT, os parâmetros biológicos obtidos a partir do modelo logístico indicaram que no ambiente de Lavras, na safra 15/16, os genótipos apresentaram uma maior média de altura, o que pode ser justificado devido à precipitação acumulada (1238 mm) ter sido superior nesse ambiente durante o período de condução dos experimentos. O ambiente Lavras, na safra 14/15, foi no qual os genótipos tiveram um índice de crescimento mais lento e coincidentemente foi o ambiente em que houve uma menor precipitação acumulada (996 mm). A disponibilidade hídrica pode ter influenciado a absorção de nutrientes e o desempenho dos híbridos para o incremento em altura de acordo com Rocateli et al. (2012). Em seus estudos utilizando diferentes taxas de irrigação para o sorgo biomassa, os autores confirmam a influência direta da disponibilidade de água na ALT das plantas.

O ambiente, Sete Lagoas 15/16, apresentou uma taxa de crescimento da cultura e crescimento relativo superior aos demais, com precipitação acumulada de 1015 mm e média de temperatura (24,5°C) durante o período de avaliação, o que possivelmente corroborou para que fossem obtidos maiores valores de TCC e TCR. Por apresentar médias gerais maiores de pluviosidade e temperatura, bem como maior fertilidade do solo, o ambiente de Sete Lagoas favoreceu um comportamento dos genótipos com relação à transição entre os estádios fenológicos, mais rápido do que o ambiente de Lavras, sendo que o ponto de inflexão da TCC para o ambiente de Sete Lagoas foi aos 90 DAP e para Lavras foi aos 120 DAP, o que indica que o aumento em ALT foi expressivo até este período e posteriormente houve baixo incremento. Esses dados refletiram diretamente na TCR que apresentou declínio provavelmente devido ao aumento da taxa respiratória, competição entre plantas por luz, água e nutrientes, diferenciação de tecidos e maturidade fisiológica da cultura (SERRA; COLAUZZI; AMADUCCI, 2017).

A ALT e a produção de biomassa são parâmetros de alta correlação (KUMARI et al., 2016), podendo ser fortemente influenciados pelo fotoperiodismo, uma vez que os híbridos

estudados apresentam sensibilidade ao comprimento do dia, que devido às condições de cultivo adversas pode ser influenciado, alterando o ciclo vegetativo do híbrido reduzindo ou aumentando os dias entre a semeadura e o início do florescimento e, conseqüentemente, afetando a ALT, PMV e PMS. De acordo com Childs et al. (1997) devido à capacidade de se alterar o tempo de florescimento do sorgo, foi possível que se cultivasse a espécie em ambientes diferentes daquele em que originalmente evoluiu.

Diante disso, o caráter PMV também apresentou comportamento dessemelhante dos genótipos ao longo das épocas para os diferentes ambientes de cultivo, demonstrando a interferência de fatores externos na produção de biomassa. Apesar de o ambiente de Lavras 15/16 ter registrado o maior acúmulo de chuva durante a safra, foi observado que no período em que as plantas apresentam maior acúmulo de biomassa, etapa fenológica 2 (FIGURA 2), houve um menor índice de precipitação em relação aos outros ambientes (FIGURA 4). O que pode ter afetado o rendimento final da cultura apresentando, portanto, a menor média assintótica de PMV. Isso pode também ser reflexo de um ciclo produtivo mais acelerado para este ambiente. Sete Lagoas 14/15 foi o ambiente que mais se destacou em relação à produtividade final, certamente devido à associação de fatores climáticos e nutricionais que favoreceram o melhor desempenho dos híbridos ao longo das épocas de avaliação neste ambiente.

A matéria prima de interesse industrial é a % MS. Vale destacar que, como já era esperado, o ambiente de Sete Lagoas em que as plantas apresentaram maior PMV, conseqüentemente, foi o que apresentou maior média de PMS (39,33 t ha<sup>-1</sup>). De acordo com os parâmetros observados, foi no ambiente de Sete Lagoas 15/16 que os híbridos tiveram um ganho mais acelerado de massa seca ao longo das épocas, quando comparados aos outros (locais x safras), possivelmente devido à maior média de temperatura (24,5°C) e devido à apresentar uma melhor condição de fertilidade do solo, favorecendo a obtenção de nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Da mesma forma do que para a ALT, as plantas cultivadas no ambiente de Sete Lagoas apresentaram maior taxa de crescimento e transição fenológica mais acelerada, para PMS isso também ocorreu, sendo que para o ambiente de Sete Lagoas os teores máximos foram até aproximadamente 90 DAP, com um declínio significativo após este período.

Por seu turno, em Lavras, a TCC foi mais suave, atingindo o máximo acúmulo aproximadamente aos 120 DAP, porém com queda branda após atingir esse valor. Essa diferença denota a relação de PMV da cultura, sendo que maiores temperaturas, pluviosidade,

estado nutricional do solo, taxa fotossintética, ou seja, condições ambientais e de manejo favoráveis, influenciam na PMV e rendimento de massa seca nos diferentes ambientes. Serra, Colauzzi e Amaducci (2017) trabalhando com três tipos de sorgo biomassa, avaliando o potencial produtivo para produção de eletricidade, verificaram que o genótipo precoce apresentou variação de massa seca ao longo dos anos de produção de 11,6 a 27,6 t ha<sup>-1</sup>, o genótipo médio-tardio de 10,8 a 31,7 t ha<sup>-1</sup> e o tardio de 11,7 a 34 t ha<sup>-1</sup>. Identificaram também menores produtividades quando a semeadura do sorgo foi realizada no sistema de sucessão de cultura, envolvendo épocas com baixos índices pluviométricos.

Tendo em relação o teor de LIG, que remete a qualidade da biomassa produzida em relação aos genótipos avaliados, por envolver questões morfológicas e fisiológicas específicas, além de suas interações com o ambiente, as explicações para as variações observadas no presente estudo são complexas (JOSHI; SINGLA-PAREEK; PAREEK, 2018; TAIZ; ZEIGER, 2013). Em conformidade com os parâmetros oferecidos pelo modelo logístico, a associação dos fatores internos e externos favoreceu uma maior média do caráter para o ambiente de Sete Lagoas 15/16.

A taxa de crescimento da cultura, o aumento no teor de LIG ao longo do ciclo, comparando o desempenho dos híbridos nas diferentes épocas e ambientes, os gráficos refletem um comportamento discordante, sendo que para o ambiente de Lavras na safra 2014/2015, as plantas apresentaram um aumento de LIG um pouco mais lento. O que pode ter ocorrido devido ao menor acúmulo pluviométrico que possivelmente pode ter resultado em um tempo maior para se iniciar processos de diferenciação e acúmulo de LIG (JOSHI; SINGLA-PAREEK; PAREEK, 2018). Para Sete Lagoas 14/15, as plantas tiveram um ganho expressivo dos 30 aos 60 DAP. Esse fato também ocorreu em relação à TCR, uma vez que apresentou declínio sistemático do ganho em porcentagem de LIG por dia de avaliação, o que pode ser resultado de influências externas, como também de atividades metabólicas celulares uma vez que a via de biossíntese da LIG envolve pelo menos dez enzimas diferentes (DAMASCENO et al., 2010).

Em Lavras 15/16 os genótipos tiveram crescimento mais acelerado até os 90 DAP com maior incremento verificado até os 130 DAP, tendendo à redução e estabilização após este período, demonstrada também através da TCR. O comportamento ao longo das épocas para o ambiente de Sete Lagoas na safra 2015/2016 foi o mais divergente, apresentando um teor estável ao longo de todo o ciclo. Essa inexistência de variação pode ter ocorrido devido ao manejo e às condições climáticas daquele (ano/safra), que podem ter favorecido a estabilidade de LIG. Relatos de Rocateli et al. (2012) destacam a influência ambiental na concentração de

LIG, com variações ao longo das épocas para o teor deste composto em plantas de sorgo e milho, demonstrando um comportamento irregular ao longo das safras avaliadas e em relação a parcelas irrigadas e não irrigadas, sendo que a maior disponibilidade de água resultou em maior concentração.

Os teores de CEL e HEM também representam a qualidade da biomassa e expressam seu potencial para ser utilizada como biocombustível. Por não terem se ajustado ao modelo logístico, foi utilizado o método de regressão polinomial, que apresentou a partir dos gráficos um ganho de CEL mais estável para o ambiente de Lavras do que para o ambiente de Sete Lagoas. A provável explicação é a associação de fatores genéticos e ambientais que permitiram a expressão diferenciada do genótipo para este caráter, favorecendo maior constância no teor de CEL. O mesmo fato ocorreu em relação ao teor de HEM, com as mesmas características de invariabilidade para Lavras e pequena oscilação para Sete Lagoas, muito possivelmente pelos motivos mencionados anteriormente. Akao et al. (2018), avaliando os teores de CEL e HEM, também observaram uma pequena variação percentual nas diferentes épocas de avaliação, corroborando com os resultados obtidos no presente trabalho. Hoffmann Júnior e Rooney (2014) também observaram respostas diferenciadas para estes compostos para a interação entre locais e épocas de avaliação, resultando em um comportamento gráfico que denota um acúmulo considerável de CEL no início do ciclo, com o máximo atingido até o final (~ 31%). Para HEM os resultados foram menos expressivos, demonstrando pouca variação entre os teores do início e do final do ciclo vegetativo (~ 16%).

## 6 CONCLUSÕES

Os híbridos de sorgo biomassa, sensíveis ao fotoperíodo, apresentam comportamento dessemelhante ao longo das épocas de avaliação para os caracteres ALT, CEL e LIG. Por meio das taxas de crescimento absoluto e relativo, determinam-se incrementos consideráveis nas fases iniciais do ciclo vegetativo (30 a 90 DAP) para os caracteres ALT, CEL e LIG.

Verifica-se a influência dos ambientes no comportamento dos genótipos ao longo das épocas de avaliação para os caracteres ALT, PMV, PMS e LIG. Observa-se maior incremento em ALT, PMV e PMS até os 90 dias após o plantio, destacando uma taxa de crescimento acelerada e maior acúmulo de biomassa para o ambiente de Sete Lagoas em ambas as safras.

## REFERÊNCIAS

- AKAO, S. et al. Effects of cultivation period on catch crop chemical composition and potential for bioenergy production. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 111, p. 787-793, 2018.
- AMADUCCI, S.; MONTI, A.; VENTURI, G. Non-structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 20, p. 111–118, 2004.
- AMEEN, A. et al. **Biomass yield and nutrient uptake of energy sorghum in response to nitrogen fertilizer rate on marginal land in a Semi-Arid Region**. 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/310516588\\_Biomass\\_Yield\\_and\\_Nutrient\\_Uptake\\_of\\_Energy\\_Sorghum\\_in\\_Response\\_to\\_Nitrogen\\_Fertilizer\\_Rate\\_on\\_Marginal\\_Land\\_in\\_a\\_Semi-Arid\\_Region](https://www.researchgate.net/publication/310516588_Biomass_Yield_and_Nutrient_Uptake_of_Energy_Sorghum_in_Response_to_Nitrogen_Fertilizer_Rate_on_Marginal_Land_in_a_Semi-Arid_Region)>. Acesso em: 22 nov. 2017
- BARBERO, L. M. et al. Análise de crescimento em plantas forrageiras aplicada ao manejo de pastagens. **Veterinária Notícias**, Uberlândia, v. 19, n. 2, p. 71-85 jul./dez. 2013.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Em 2016, biomassa é a segunda maior fonte de energia**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/em-2016-biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- CASTRO, F. M. R. et al. Agronomic and energetic potential of biomass sorghum Genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, Wuhan, v. 6, p. 1862-1873, 2015.
- CHILDS, K. L. et al. The sorghum photoperiod sensitivity gene, *Ma<sub>3</sub>*, encodes a phytochrome B'. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 113, n. 61, p. 1-619, 1997.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira, grãos: Monitoramento agrícola - safra 2016/17: décimo segundo levantamento. **Observatório Agrícola**, Brasília, v. 4, n. 10, p. 1-171, jul. 2017.
- COMPRIMENTO do dia, o nascer e o pôr do sol calculadora. Disponível em: <<http://www.solartopo.com/duracao-do-dia.htm>>. Acesso em: 22 dez. 2017.
- DAMASCENO, C. M. B. et al. **A importância da lignina para a produção de etanol de segunda geração**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.
- DAMASCENO, C. M. B. et al. **Análise morfoagronômica e bioquímica de um painel de sorgo energia para características relacionadas à qualidade da biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa, 2013. 7 p. (Circular Técnica, 190).
- DANTAS, A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA AGROENERGIA. **Biorrefinarias**. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/908142/1/biorrefinariamodificadoweb.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

ENCISO, J. et al. Yield, water use efficiency and economic analysis of energy sorghum in South Texas. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 81, p. 339-344, 2015.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A. Double sigmoidal models describing the growth of coffee berries. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 8, p. 1-7, 2017.

FERREIRA, D. F. **SISVAR**: sistema de análise de variância. Lavras: UFLA, 2006. (1 Soft.).

HOFFMANN JÚNIOR, L.; ROONEY, W. L. Accumulation of biomass and compositional change over the growth season for six photoperiod sorghum lines. **Bioenergy Research**, Berlin, v. 7, p. 811–815, 2014.

HUNT, R. **Plant growth analysis**. Londres: E. Arnold, 1978. 67 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Gráficos das condições registradas**. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em: 4 dez. 2017.

IQBAL, T. et al. Biomass conservation using an optimized drying process for energy Sorghum Bagasse. **Renewable Energy Focus**, Amsterdam, v. 19/20, p. 1-7, 2017.

JOSHI, R.; SINGLA-PAREEK, S. L.; PAREEK, A. **Engineering abiotic stress response in plants for biomass production**. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29339553>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

KUMARI, P. et al. Evaluation for morphological and biochemical traits related to quality biomass production among MS based forage sorghum hybrids. **Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics**, Ankara, v. 2, n. 2, p. 33-40, 2016.

LIMA, J. F. de; PEIXOTO, C. P.; LEDO, C. A. da S. Índices fisiológicos e crescimento inicial de mamoeiro (*Carica papaya* L.) em casa de vegetação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1358-1363, set./out. 2007.

MAMEDES, J. A.; RODRIGUES, M. P. J.; VANISSANG, C. A. Biomassa no Brasil. **Bolsista de Valor**, Campos dos Goytacazes, v. 1, p. 65-73, 2010.

MAY, A. et al. Plant population and row spacing on biomass sorghum yield performance. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 3, p. 434-439, 2016.

MAY, A. et al. **Sorgo biomassa para a cogeração de energia**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 7 p. (Circular Técnica, 211).

MEAD, R.; CURNOW, R. N.; HASTED, A. M. **Statistical methods in agriculture and experimental biology**. 2nd ed. New Delhi: Springer, 1993. 415 p.

MEKI, M. N. et al. Performance evaluation of biomass sorghum in Hawaii and Texas. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 103, p. 257-266, 2017.

MISHRA, V. et al. Enhancement in multiple lignolytic enzymes production for optimized lignin degradation and selectivity in fungal pretreatment of sweet sorghum bagasse. **Bioresource Technology**, Essex, v. 236, p. 49-59, 2017.

MORAIS, R. B. G. de. et al. Crescimento e produtividade de milho em diferentes épocas de plantio, nos tabuleiros costeiros de alagoas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 16, n. 1, p. 109-119, 2017.

MULLET, J. E. et al. Energy Sorghum: a genetic model for the design of C4 grass bioenergy crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 65, n. 13, p. 3479–3489, 2014.

MULLET, J. E. High-Biomass C4 grasses – Filling the yield gap. **Plant Science**, Limerick, v. 261, p. 10-17, 2017.

MUMMEY, D. L.; STOFFEL, L.; RAMSEY, P.W. Preestablished plant influences on antelope bitterbrush (*Purshia tridentata* Pursh) seedling recruitment and growth: analysis of species and positional effects. **Natural Areas Journal**, Washington, v. 38, n. 1, p. 44-53, 2018.

NAIK, D. K. et al. Pyrolysis of sorghum bagasse biomass into bio-char and bio-oil products. A thorough physicochemical characterization. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 127, n. 2, p. 1277-1289, 2017.

NAKAI, D. K. et al. **Uso do sorgo biomassa em caldeiras de combustão: cuidados, precauções e fatores relacionados à qualidade da matéria-prima**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 18 p. (Documentos, 205).

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. Disponível em: <<http://www.fao.org/news/story/pt/item/283456/icode/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **População mundial deve atingir 9,6 bilhões em 2050, diz novo relatório da ONU**. 2013. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-atingir-96-bilhoes-em-2050-diz-novo-relatorio-da-onu/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PARRELLA, R. A. da C. et al. **Desempenho agrônomo de híbridos de sorgo biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 19 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 41).

PARRELLA, R. A. da C. et al. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal Of The Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003.

PERAZZO, A. F. et al. Agronomic evaluation of 32 sorghum cultivars in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 43, n. 5, p. 232-237, 2014.



- PERRIER, L. et al. Plasticity of Sorghum stem biomass accumulation in response to water deficit: a multiscale analysis from internode tissue to plant level. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, 2017. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5585773/>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.
- PORTES, T. A.; CASTRO JUNIOR, L. G. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 3, n. 1, p. 53-56, jun. 1991.
- PRADO, T. K. L. do; SAVIAN, T. V.; MUNIZ, J. A. Ajuste dos modelos Gompertz e Logístico aos dados de crescimento de frutos de coqueiro anão verde. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 5, p. 803-809, 2013.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- RESENDE, M.D.V. de; DUARTE, J.B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, p.182-194, 2007.
- RIBAS, P. M. Origem e importância econômica. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. C. (Ed.). **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2014. 275 p.
- ROCATELI, A. C. et al. Biomass sorghum production and components under different irrigation/tillage systems for the southeastern U.S. **Industrial Crops and Products**, St Martin d'Heres, v. 36, p. 589–598, 2012.
- ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 397-400, 1999.
- ROONEY, W. L. et al. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Chichester, v. 1, p. 147–157, 2007.
- SATTLER, S. E. et al. A nonsense mutation in a cinnamyl alcohol dehydrogenase gene is responsible for the sorghum brown midrib6 phenotype. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 150, p. 584–595, 2009.
- SCHABENBERGER, O.; PIERCE, F.J. **Contemporary statistical models**. Boca Raton: CRC, 2002. 738 p.
- SERRA, P.; COLAUZZI, M.; AMADUCCI, S. Biomass sorghum production risk assessment analysis: A case study on electricity production in the Po Valley. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 96, p. 75-86, 2017.
- SOUZA, V. F. de. et al. Influência da correção de estande na adaptabilidade e na estabilidade de sorgo biomassa. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 3, p. 371-381, 2014.

STEFANIAK, T. R. et al. Variation in biomass composition components among forage, biomass, Sorghum-sudangrass, and sweet Sorghum types. **Crop Science**, Madison, v. 52, p. 1949–1954, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TEIXEIRA, T. P. M. **Estudo da maturação e ponto de colheita em materiais de sorgo destinados à bioenergia**. 2017. 72 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

TERRA, M. F.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Ajuste dos modelos logístico e Gompertz aos dados de crescimento de frutos da tamareira-anã (*Phoenix roebelenii* O'BRIEN). **Magistra**, Cruz das Almas, v. 22, n. 1, p. 1-7, 2010.

TRUONG, S. K.; MC CORMINCK, R. F.; MULLET, J. E. Bioenergy sorghum crop model predicts VPD-limited transpiration traits enhance biomass yield in water-limited environments. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, p. 17, 2017.

VON PINHO, R. G.; FIORINI, I. V. A.; SANTOS, A. de O. Botânica. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. C. (Ed.). **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2014. 275 p.

ZEGADA-LIZARAZU, W.; MONTI, A. Energy crops in rotation. a review. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, p. 12-25, 2011.

ZHAO, Y. L. et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 111, p. 55–64, 2009.

WALL, J. S.; ROSS, W. M. **Produccion y usos del sorgo**. Buenos Aires: Editorial Hemisfério Sur, 1975.

WOLFRUM, E. et al. **Multivariate calibration models for Sorghum cmposition using Near-infrared spectroscopy**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013. 14 p.

### APÊNDICE – Análises de variância individuais

Tabela 1 Resumo da análise de variância para caracteres agronômicos e tecnológicos avaliados em Lavras/MG na safra 2014/2015.

FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Agronômicos				Tecnológicos		
		ALT	PMV	PMS	%MS	CEL	HEM	LIG
Genótipo (G)	3	0,39**	656,87*	12,63	1,34	8,82*	5,84**	0,17
Colheita (DAP)	5	55,84**	28132,78**	1847,67**	614,69**	538,43**	5,51**	38,55**
G x DAP	15	0,08	195,41	10,15	6,03**	2,46	1,58	0,49
Erro	46	0,06	231,21	13,69	2,07	2,62	1,26	0,28
Média Geral		2,99	70,11	15,69	21,03	33,69	27,88	5,68
CV (%)		8,43	21,69	13,45	6,84	4,8	4,03	9,24
Acurácia (%)		91,42	80,5			83,86	88,53	

<sup>(1)</sup>Fonte de Variação; <sup>(2)</sup>Grau de Liberdade; \*,\*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2018).

Tabela 2 Resumo da análise de variância para caracteres agronômicos e tecnológicos avaliados em Lavras/MG na safra 2015/2016.

FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Agronômicos				Tecnológico		
		ALT	PMV	PMS	%MS	CEL	HEM	LIG
Genótipo (G)	3	0,34**	635,45**	12,79	20,40*	8,14	7,45	0,74
Colheita (DAP)	5	61,3**	18202,07**	2144,91**	1723,68**	795,49**	21,83*	18,98**
G x DAP	15	0,07**	181,08	19,25*	9,42	10,47	9,71	2,26
Erro	46	0,03	107,77	8,19	6,09	13,68	9,26	1,33
Média Geral		3,24	72,09	17,23	21,90	38,40	26,01	7,82
CV (%)		4,98	14,4	16,61	11,27	9,63	11,70	14,75
Acurácia (%)		96,10	91,13	59,98	84,67			

<sup>(1)</sup>Fonte de Variação; <sup>(2)</sup>Grau de Liberdade; \*,\*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2018).

Tabela 3 Resumo da análise de variância para caracteres agronômicos e tecnológicos avaliados Sete Lagoas/MG na safra 2014/2015.

FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Agronômicos				Tecnológicos		
		ALT	PMV	PMS	%MS	CEL	HEM	LIG
Genótipo (G)	3	0,39	277,7	19,65	0,68	17,80**	7,07	1,98*
Colheita (DAP)	5	31,13	26243,75**	3249,13	1531,83**	502,62**	39,37**	22,69**
G x DAP	15	0,19	359,05	24,74	2,32	4,31	3,01	0,91
Erro	46	0,15	434,57	43,96	6,86	2,62	4,52	0,63
Média Geral		3,04	92,55	22,52	21,65	37,08	26,57	6,33
CV (%)		13,09	22,52	29,44	12,10	4,37	8,00	12,57
Acurácia (%)		77,36				92,33	60,08	82,5

<sup>(1)</sup>Fonte de Variação; <sup>(2)</sup>Grau de Liberdade; \*,\*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2018).

Tabela 4 Resumo da análise de variância para caracteres agronômicos e tecnológicos avaliados Sete Lagoas/MG na safra 2015/2016.

FV <sup>(1)</sup>	GL <sup>(2)</sup>	Agronômicos				Tecnológicos		
		ALT	PMV	PMS	%MS	CEL	HEM	LIG
Genótipo (G)	3	0,244*	961,34**	42,12*	10,64**	5,89	7,21*	0,47
Colheita (DAP)	5	51,06**	23157,17**	3156,40**	1713,62**	429,21**	23,42**	24,65**
G x DAP	15	0,11	181,55	10,26	3,42*	2,82	4,77*	1,06
Erro	46	0,06	127,12	12,70	1,51	2,40	2,32	0,86
Média Geral		3,54	81,21	22,30	23,95	36,19	26,71	5,66
CV (%)		7,07	13,88	15,98	5,14	4,28	5,70	16,42
Acurácia (%)		86,25	93,15	83,57	85,78	76,96	82,34	

<sup>(1)</sup>Fonte de Variação; <sup>(2)</sup>Grau de Liberdade; \*,\*\* significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Da autora (2018).