

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENÉTICOS VEGETAIS
CURSO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO PRECOCE E DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE
PREDIÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM
MANDIOCA**

Alison Borges Vitor

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2018**

AVALIAÇÃO PRECOCE E DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE PREDIÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM MANDIOCA

Alison Borges Vitor

Licenciado em Ciências Biológicas
Universidade de Pernambuco Petrolina, 2015.

Dissertação apresentada ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia e Embrapa Mandioca e Fruticultura, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Recursos Genéticos Vegetais.

Orientador: Dr. Eder Jorge de Oliveira
Coorientadora: Dra. Carolina Vianna Morgante
Coorientadora: Dra. Rafaela Priscila Antônio

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

V845a Vitor, Alison Borges.
Avaliação precoce e definição de métodos de predição da tolerância ao déficit hídrico em mandioca / Alison Borges Vitor. – Cruz das Almas, BA, 2018. 110f.; il.

Orientador: Éder Jorge de Oliveira.
Coorientadora: Carolina Vianna Morgante.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas.

1.Mandioca – Cultivo. 2.Mandioca – Melhoramento genético. 3.Deficiência hídrica – Avaliação.
I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.
II.Antônio, Rafaela Priscila. III.Título.

CDD: 633.682

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas – UFRB.
Responsável pela Elaboração – Antonio Marcos Samento das Chagas (Bibliotecário – CRB5 / 1615).
Os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENÉTICOS VEGETAIS
CURSO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO PRECOCE E DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE PREDIÇÃO DA
TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM MANDIOCA**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação

Alison Borges Vitor

Aprovada em: 31 de Agosto de 2018

Prof. Dr. Eder Jorge de Oliveira
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Orientador

Dr. Onildo Nunes de Jesus
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Examinador Externo

Dr. Saulo Alves Santos de Oliveira
Embrapa Mandioca e Fruticultura
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Creio que Deus, não é um Deus de barganha, mas de valores reais que preza o esforço de cada um na busca constante de coisas melhores para a vida tais como estudo, carreira, sonhos e conquistas. Está escrito: “Porque qualquer que pede recebe; e quem busca acha; e a quem bate abrir-se-lhe-á. Lucas: 11-10”. (pai, mãe, *in-memorian* padrasto, irmãs, sobrinhos, avôs, avós e amigos e colaboradores).

A todos, eu dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força, coragem e sabedoria que adquiri nas batalhas e vitórias.

À minha família por todo apoio e confiança, em especial, às minhas mães, Inajara Borges da Silva, Anatalia Vitor, Carmem Borges. Aos meus pais José Vitor Barbosa, Antônio Vitor e Domingos da Silva e Ivanildo Macedo. Agradeço às minhas irmãs Alice Borges e Alexandra Borges e aos pequenos do tio, Ana Clara, Marcos Antônio, Tayla e Gabriel. Todos eles refletem o sentido da minha existência.

A todos os amigos e parceiros de campo da Embrapa Semiárido, entre eles: Ludimila Macedo, Robson da Silva, Benjamim Neto, Brígida Gomes, Ítalo Santana, Danubia Leal e Savio Nunes. Todos os estagiários da equipe do laboratório de agrometeorologia contribuíram para a coleta dos dados.

À equipe de pesquisadores da Embrapa Semiárido, Dr. Agnaldo Chaves, Dr. Saulo de Tarso, Dra. Magda Aparecida. Especialmente, às Dras. Carolina Vianna Morgante e Rafaela Priscila pelos conhecimentos repassados e por contribuírem com minha formação durante todos esses anos.

Ao meu orientador, Dr. Eder Jorge de Oliveira pela oportunidade de crescimento acadêmico nesses cinco anos de projeto, muito obrigado pela confiança, paciência e ensinamentos.

À equipe da mandioca, da Embrapa Mandioca e Fruticultura por me receber tão bem. De fato, foi uma experiência ímpar. Em especial, ao Dr. Rafael Parreira Diniz, ou “Jovem”, um exemplo de profissionalismo e dedicação, e à Ma. Cátia Dias, mais uma mãe que o destino colocou em minhas veredas, sempre disposta a ajudar.

Há sempre o que se aprender, às vezes, o vento é forte e os desafios parecem não ter um fim, mas tudo isso se torna pequeno diante da imensidão do amor, da solidariedade, do companheirismo e da confiança. O que é verdadeiro nunca morre, as incertezas tornam-se certezas, a angústia se desfaz em coragem e força quando temos uma mão na qual podemos segurar. Obrigado, Tiago Jesus dos Anjos por tudo o que você fez em minha vida. Obrigado, Jucieny Ferreira de Sá,

que conheço desde a graduação, fazendo-se presente em todas as horas durante este processo.

Agradeço aos meus amigos, Eduarda Campos e Robson da Silva, que moram em meu coração.

Aos meus colegas do Mestrado por todas as experiências trocadas, especialmente aos meus amigos, José Henrique Bernardino, Lorena Kruschewsky e Rhavena Rocha, o meu muito obrigado pela amizade de cada um, vocês são muito especiais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais da UFRB pela oportunidade de me tornar mestre e por todos os ensinamentos que foram transmitidos pelos professores.

À Embrapa Semiárido e Embrapa Mandioca e Fruticultura por toda a estrutura e suporte desde o campo até o laboratório, sendo essencial para a realização de todo o trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa

EPÍGRAFE

Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.

Odes de Ricardo Reis. Fernando Pessoa.

AVALIAÇÃO PRECOCE E DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE PREDIÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO EM MANDIOCA

RESUMO: A avaliação do desempenho agronômico da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) de forma precoce é de suma importância para a maximização da produção em condições de deficiência hídrica. Os objetivos deste trabalho foram: correlacionar o desempenho agronômico de dez genótipos de mandioca em duas condições hídricas em quatro épocas de colheita 4, 5, 7 e 12 meses após o plantio (MAP), além de obter modelos de predição da produtividade de raízes (PTR) aos 12 MAP, com base em dados agronômicos das colheitas precoces. Genótipos de mandioca foram avaliados em delineamento de blocos casualizados sob esquema fatorial 2 (irrigado e déficit hídrico) × 4 (épocas de colheita) para diversas características agronômicas e fisiológicas. Os dados foram submetidos à análise de variância seguidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e correlação de Pearson entre o ISEH (índice de seleção para estresse hídrico) e os períodos de colheita dos experimentos irrigados e sob déficit hídrico. Para a predição da PTR foram utilizadas cinco características fisiológicas e nove morfológicas ambas mensuradas aos 4 MAP, com base em seis modelos de predição, cuja eficiência foi avaliada pelo erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). Todas as características agronômicas foram influenciadas pelo tratamento com déficit hídrico, em todas as épocas de colheita. Entretanto, o menor desempenho agronômico nas condições de déficit hídrico não afetou a direção da correlação entre estes experimentos e as épocas de colheita. O ranqueamento dos genótipos aos 4 e 5 MAP nos experimentos irrigados e de sequeiro, respectivamente, foi bastante similar ao ranqueamento dos genótipos aos 12 MAP. Em relação à predição da PTR aos 12 MAP, o modelo de quadrados mínimos parciais (PLS) apresentou elevado R^2 (0,86 a 0,92) associado ao menor RMSE (0,76 a 0,88). O uso de dados fisiológicos e agronômicos coletados de forma precoce, foi capaz de prever com grande eficiência a produtividade final de raízes. Portanto, a predição precoce da produtividade final de raízes poderá reduzir o custo da fenotipagem para tolerância ao déficit hídrico em mandioca.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, semiárido, produtividade, precocidade, melhoramento.

EARLY EVALUATION AND DEFINITION OF METHODS TO PREDICT THE CASSAVA TOLERANCE TO WATER DEFICIT

ABSTRACT: The evaluation of the agronomic performance of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) at early stage is of paramount importance to optimize the production under water deficit conditions. The objective of this work were: to correlate the agronomic performance of cassava genotypes evaluated in two hydric conditions and at four different harvesting times (4, 5, 7, and 12 months after planting - MAP), as well as to obtain prediction models of root yield (RoY) at 12 MAP based on the agronomic data from early harvests. Cassava genotypes were evaluated in complete randomized block design under factorial scheme 2 (well-watered e water deficit) × 4 (harvesting times) for morphological and physiological traits. Data were submitted to analysis of variance, followed by the means of Tukey test ($p < 0.05$) and the Pearson correlation between SIWS (selection index for water stress) and the harvest times for the irrigated and water deficit experiments. For the RoY prediction, five physiological and nine morphological traits were used, both measured at 4 MAP, based on six prediction models, whose efficiency was evaluated by the root-mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). All agronomic traits were influenced by the the water deficit treatment, in all harvest periods. However, the lower agronomic performance in the water deficit conditions did not affect the direction of the correlation between these experiments and the harvest periods. The rankings of the genotypes at 4 and 5 MAP in we-watered and water deficit experiments, respectively, were very similar to the rankings of the genotypes at 12 MAP. Regarding the RoY prediction at 12 MAP, the partial least squares (PLS) model presented high R^2 (0.86 to 0.92) and low RMSE (0.76 to 0.88). The use of physiological and agronomic data collected at an early stage was able to predict with great efficiency the fresh root yield at 12 MAP. Therefore, the early prediction of final root yield may reduce the cost of phenotyping cassava germplasma for water deficit tolerance.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, semi-arid, productivity, precocity, breeding.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
 CAPÍTULO 1	
DESEMPENHO AGRONÔMICO DE GENÓTIPOS DE MANDIOCA EM FASE PRECOSES DE DESENVOLVIMENTO COMO PREDITOR DA PRODUTIVIDADE FINAL DE RAIZES SOB DÉFICIT HÍDRICO.....	22
 CAPÍTULO 2	
MODELOS PARA A PREDIÇÃO PRECOCE DA PRODUTIVIDADE DE RAIZES DE MANDIOCA EM DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS.....	58
 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 98

INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da mandioca destaca-se por sua rusticidade e ampla adaptabilidade aos diversos ecossistemas e condições ambientais, sendo cultivada em regiões com baixos índices pluviométricos, altas temperaturas e solos com baixos índices de fertilidade. Esta cultura tem sido utilizada como alternativa para mitigar problemas sociais e econômicos causados pela seca (EL-SHARKAWY, 2014), apesar das condições de déficit hídrico limitarem sua produtividade (LABAN et al., 2013; ADJEBENG-DANQUAH et al., 2016; TURAYGYENDA et al., 2013).

Via de regra, a cultura da mandioca possui maior exigência hídrica nas fases iniciais de desenvolvimento, sobretudo nos três primeiros meses. Neste período, ocorre a formação das raízes de armazenamento, e por isso acredita-se que seja possível prever o potencial produtivo dos genótipos com base em colheitas precoces (ALVES, 2006). Além de maximizar as chances de sucesso e adoção de novas variedades de mandioca com estas características tendo em vista que nas regiões semiáridas a distribuição de chuvas ocorre de forma muito concentrada em determinadas épocas do ano. Assim, o uso de variedades com rápido crescimento inicial e o aproveitamento de condições de umidade adequada podem ser uma estratégia para maior acúmulo de raízes e matéria seca.

Por conseguinte, definir o potencial produtivo dos genótipos de forma precoce pode ser uma alternativa relevante para aperfeiçoar a seleção de clones mais produtivos sob condições de estresse hídrico, e com isso reduzir os custos associados às avaliações em campo de longa duração. Embora a genotipagem de alta produtividade tenha sido alcançada, esse, raramente, é o caso da fenotipagem para adaptação à seca (OKOGBENIN et al., 2013). Desta forma, encurtar o ciclo de reprodução utilizando protocolos de fenotipagem minimizados, eficientes e rápidos é uma alternativa para o melhoramento.

Os objetivos deste trabalho foram: i) correlacionar o desempenho agrônomico de genótipos de mandioca avaliados em duas condições hídricas e em diferentes épocas de colheita e; ii) estabelecer um modelo de predição da produtividade de raízes final (no momento da colheita), com base em dados agrônomicos obtidos em fases precoces de crescimento das plantas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Importância econômica e social da mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz, Família Euphorbiaceae) é uma espécie nativa da América do Sul, amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais da África, Ásia e América Latina, sendo considerada a quarta cultura de maior importância mundial em termos de produção de carboidratos (OLSEN, 2004; HOWELER et al., 2013; NJOKU et al., 2015; FAO, 2016). O Brasil é o terceiro produtor mundial com produção aproximada de 21,2 milhões de toneladas, ficando atrás apenas da Nigéria que ocupa a primeira colocação com aproximadamente 57,1 milhões de toneladas e da Tailândia em segundo, com produção de 31,1 milhões de toneladas (FAO, 2017).

As regiões Norte e Nordeste possuem as maiores áreas plantadas, com aproximadamente 486,5 mil ha e 526,2 mil ha, respectivamente. Em âmbito nacional a estimativa de produção de mandioca para 2018 é de aproximadamente 20,9 milhões de toneladas, um aumento de apenas de 1,6% em relação ao ano anterior. Os estados que mais devem contribuir para a produção são o Pará, Paraná e Bahia com participação de 20,6%, 14,8% e 10,1%, respectivamente, sendo a Bahia o principal produtor da região Nordeste, com cerca de 2,07 milhões de toneladas (IBGE, 2018). No Nordeste do país, a mandioca é conhecida pelo papel social que desempenha por ser cultivada em muitas regiões semiáridas e ser utilizada como uma cultura de subsistência para populações mais carentes (KUNKEAW et al., 2011).

Nos últimos 20 anos, o aumento na produtividade de mandioca no Brasil foi de apenas 0,5% ao ano, enquanto a Tailândia, Indonésia, República Democrática do Congo e Gana, apresentam crescimento superior a 4 % ao ano (BILIERI et al., 2014; FAO, 2017). Tais estatísticas são resultados de maciços investimentos em pesquisas públicas e privadas, especialmente para desenvolver variedades adaptadas às condições de clima e de solo locais. Portanto, para que o Brasil possa aumentar sua produtividade será preciso investir muito no desenvolvimento de tecnologias para fazer com que as extensas áreas plantadas no Norte e Nordeste do país possam ter produtividades semelhantes às do Centro-Sul do país. Certamente o desenvolvimento de novas variedades adaptadas ao cultivo nestas regiões é um

componente tecnológico bastante importante para garantir aumentos sustentáveis de produtividade (BILIERI et al., 2014).

Características de consumo e uso

O consumo das raízes de mandioca depende da quantidade de compostos cianogênicos (HCN), fator determinante para o seu grau de toxicidade. Teores abaixo de 100 mg kg⁻¹ de HCN (em base úmida), são classificadas como doces ou mansas, raízes com teores acima deste valor são consideradas amargas ou bravas (BURNS et al., 2010). Portanto, de modo geral, a maioria das variedades com alto teor de compostos cianogênicos (conhecidas como mandioca brava) são direcionadas para o processamento de amido ou farinha, enquanto aquelas com baixo teor de compostos cianogênicos (conhecidas como mandioca mansa) para o consumo humano na forma *in natura*.

Além das raízes, todas as partes da planta são utilizadas, pois as folhas são importantes fontes de proteína, minerais e vitaminas, utilizadas na alimentação humana e também para produção de feno ou silagem para alimentação animal. As hastes são utilizadas para alimentação animal e, sobretudo como material propagativo em novos plantios (LATIF; MULLER, 2015).

No que compete ao setor industrial, as raízes de mandioca são utilizadas como matéria-prima para os mais variados produtos, tendo como principal componente o amido que apresenta grânulos, com tamanho e formato bastante dependentes do genótipo e cujas diferenças de uso estão relacionadas com a relação entre amilose e amilopectinas, que influenciam diretamente nas estruturas cristalinas do amido (NUWAMANYA et al., 2010).

O amido de mandioca possui algumas vantagens em relação a outros tipos de amido por apresentar propriedades especiais como clareza, viscosidade, gelatinização e sabor suave, em relação ao amido presente no milho, trigo e na batata, sendo assim bastante utilizado para fabricação de papel, embalagem, borracha, produtos farmacêuticos entre outros (CEBALLOS et al., 2006; SINGH et al., 2007). Sob déficit hídrico a planta de mandioca consegue manter as concentrações de amido relativamente altas nas raízes até o momento da colheita. Por estas e outras vantagens competitivas, a mandioca é considerada a cultura do século, servindo como fonte de alimento para milhões de pessoas devido a sua capacidade produtiva em regiões onde a seca predomina (SALVADOR et al., 2014).

Recursos genéticos de mandioca

Os recursos genéticos de mandioca são representados pelas variedades locais de *M. esculenta* e 98 espécies silvestres de *Manihot* cuja maior parte da diversificação genética é encontrada nas Américas (OLSEN, 2004; ORLANDIN; LIMA, 2014). Durante a década de 70 foi instalada a primeira grande coleção internacional de mandioca na América Latina, no Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) considerado um dos maiores do mundo que preserva aproximadamente 6.592 genótipos de *Manihot*. No Brasil, a Embrapa Mandioca e Fruticultura (CNPMPF), em Cruz das Almas (BA), mantém um banco ativo de germoplasma com uma grande diversidade de genótipos de *M. esculenta* (cerca de 1.600 acessos), conservados em condições de campo (*ex situ*) e de laboratório (*in vitro*) (CIAT, 2017). Na África, o IITA (Instituto Internacional de Agricultura Tropical, Nigéria) também possui uma importante coleção de germoplasma de mandioca com aproximadamente 4.000 genótipos (DUMET et al., 2011)

Os diversos genótipos de mandioca mantidos *on farm* (quintais, roçados e sistemas agroflorestais) e *in situ* (floresta e capoeiras) possibilitaram uma seleção e conservação de algumas variedades de mandioca ao longo do processo de domesticação (DUPUTIE et al., 2009). Aproximadamente dois terços da diversidade genética de mandioca existem *in situ* e o restante tem sido conservado *ex situ* (HERSHEY, 2008).

A maior parte do germoplasma de mandioca tem sido caracterizada, multiplicada e conservada nos respectivos bancos ativos de germoplasma, cujo propósito é a disponibilização da diversidade genética da cultura para os programas de melhoramento genético. Muitos desses genótipos possuem resistência a pragas, doenças e adaptação às diversas condições climáticas, que podem ser selecionados como os mais promissores para os cruzamentos, a fim de desenvolver variedades de mandioca mais produtivas em ambientes sujeitos à deficiência hídrica (CACH et al., 2006; KAMAU et al., 2011). As características mais desejáveis para o melhoramento genético de mandioca são a elevada produtividade de raiz, alto teor matéria seca e amido, tolerância à pós-colheita de deterioração fisiológica, resistência a pragas ou doenças (LENIS et al., 2006; OJULONG et al., 2010), e em alguns programas de biofortificação, maior teor de carotenoides (ESUMA et al., 2016).

Desenvolvimento de variedades de mandioca

O desenvolvimento de variedades melhoradas é um desafio enorme devido à natureza heterozigótica da espécie e longos ciclo de melhoramento (CEBALLOS et al., 2015). Como a mandioca é propagada vegetativamente por meio de estacas (comumente chamadas de manivas), são necessários vários anos para se atingir um volume de material necessário para que se possa realizar ensaios de competição com grande número de plantas por parcela, em várias repetições e ambientes de cultivo. (OKOGBENIN et al., 2007; UDENSI et al., 2011).

Os principais métodos de melhoramento empregados na mandioca são a seleção de cultivares locais com aptidão de uso em macrorregiões e a hibridação intra e interespecífica. Em termos de recombinação para geração de novas combinações alélicas, a hibridação intraespecífica é o método mais utilizado no melhoramento da mandioca, cujos cruzamentos são feitos entre parentais elite identificados nas atividades rotineiras de caracterização e avaliação de germoplasma, seguidos da seleção fenotípica dos clones, baseando-se em seu comportamento agrônômico em diversos anos e locais de cultivo (BREDESON et al., 2016).

Recentemente diversas técnicas vêm sendo implementadas nos programas de melhoramento genético da mandioca, a exemplo da seleção assistida por marcadores moleculares, sobretudo por proporcionarem um aumento no ganho por unidade de tempo comparado com a seleção fenotípica (EATHINGTON et al., 2007; WOLFE et al., 2017). Contudo, seu uso ainda não tem trazido os resultados prometidos para características de herança complexa, como a produtividade de raízes, possivelmente por ser uma estratégia recente que precisa de validação e aperfeiçoamento metodológico para lidar com informações genotípicas distribuídas em todo o genoma e não especificamente em regiões específicas como é o caso de heranças monogênicas ou com poucos genes envolvidos. A principal meta é desenvolver variedades que combinem rendimentos altos e estáveis com características de boa qualidade, de acordo com as práticas de cultivo adotadas em regiões específicas.

Fatores limitantes da produtividade: estresse hídrico

A limitação da produtividade de mandioca pode ser devida a diversos fatores como baixo uso de insumos agrícolas, cultivo em regiões com baixos índices

pluviométricos, altas temperaturas e em solos de baixa fertilidade. Em relação ao uso de insumos agrícolas, embora a adoção de técnicas modernas de cultivo e uso de fertilizantes e pesticidas seja bastante reduzido, sobretudo em plantios de pequena escala, o uso de variedades melhoradas é considerado o insumo de maior adoção (HERRERA et al., 2011; REDDY, 2015; VENTURINI et al., 2016).

Tendo em vista que a mandioca é cultivada em climas bastante adversos, que vão desde regiões semiáridas (< 500 mm de chuvas anuais) a regiões de com excesso de umidade (> 3000 mm de precipitação anual), é preciso disponibilizar uma ampla gama de variedades que possuam adaptação específica a estes tipos de ambiente. Em sua maioria, as regiões semiáridas do Brasil, se enquadram em condições edafoclimáticas caracterizadas por períodos de longa estiagem, na qual o déficit hídrico tende a reduzir o crescimento da planta com forte redução na expansão celular, condutância estomática, fotossíntese e, conseqüentemente, no acúmulo de matéria seca (CEBALLOS et al. 2011). Portanto, para ser cultivada nestas regiões é preciso desenvolver e selecionar variedades que possuam algum nível de tolerância ao déficit hídrico para garantir um mínimo de produtividade.

Ao longo do processo evolutivo, a mandioca desenvolveu vários mecanismos de tolerância à seca, que estão relacionados à redução da abertura estomática para evitar a perda de água por transpiração, embora as taxas fotossintéticas sejam drasticamente afetadas em função do decréscimo de CO₂ no interior da folha, interferindo diretamente no crescimento da planta (EL-SHARKAWY, 2006; IHEMERE et al., 2006; ROSENTHAL et al., 2011; ZHAO et al., 2017). Outras respostas ao estresse hídrico na mandioca são a redução da área foliar que pode ser resultante da redução do número de folhas, tendo como conseqüências a diminuição da interceptação de luz para o processo fotossintético (EL-SHARKAWY, 2007; EL-SHARKAWY, TAFUR, 2010; ZHAO et al., 2014).

Apesar destes mecanismos serem primordiais para a sobrevivência das plantas, em longos períodos de estiagem, sobretudo nos primeiros meses após o plantio (3-4 meses), geralmente existem perdas significativas na produtividade da cultura mesmo em condições de estresse moderado, tendo em vista a redução na brotação das manivas, número de plantas, e número de raízes (OKOGBENIN et al., 2013). As reduções na produtividade de raízes podem variar de acordo com o genótipo em estudo e o tempo com que as plantas são submetidas ao estresse, mas de modo geral podem variar de 22% a 75% (LABAN et al., 2013; OKOGBENIN et al.,

2013; OLIVEIRA et al., 2015). Diante da grande variabilidade genética da espécie com diferentes mecanismos fisiológicos e agronômicos de adaptação à seca, é possível selecionar genótipos que apresentem baixo decréscimo na produtividade de raízes sob condições de déficit hídrico.

Mitigação do estresse hídrico

De modo geral, os principais objetivos dos programas de melhoramento genético de mandioca para aumento da tolerância ao déficit hídrico são: (1) caracterização do germoplasma para tolerância ao estresse hídrico e a solos de baixa fertilidade; (2) caracterização de germoplasma para maior vigor e produção precoce; e (3) identificação de características morfológicas e agronômicas que possam ajudar na seleção precoce de genótipos tolerantes a seca, com maior eficiência no método e baixo custo. Entretanto, existem alguns entraves neste processo, pois a resposta ao estresse hídrico em mandioca é uma característica quantitativa expressa por vários genes, o que dificulta a seleção precoce e reduz os ganhos genéticos em programas de melhoramento (UTSUMI et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2015).

Diversos estudos apontam avanços importantes na associação de marcadores moleculares ao estresse hídrico, pois nos últimos anos, mais de 30.000 transcritos codificadores de proteínas em *M. esculenta* (BREDESON et al., 2016), tem sido utilizados para identificar genes e mesmo fatores de transcrição relacionados a resistência ao déficit hídrico nesta espécie (UTSUMI et al., 2012; TURAYGYENDA et al., 2013; ZHAO et al., 2014). Entretanto, a fenotipagem em condições de estresse hídrico ainda é essencial para gerar informações acuradas para os estudos de associação genotípica, bem como para o desenvolvimento de variedades tolerantes (OLIVEIRA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2015; LONG et al., 2006; EL-SHARKAWY, 2007). Portanto, é fundamental ampliar os estudos que descrevam as características genéticas e fisiológicas mais importantes para o entendimento dos mecanismos de tolerância à seca, assim como o desenvolvimento de novas metodologias de fenotipagem para facilitar o desenvolvimento de variedades com alta produtividade, considerando parâmetros de simplicidade e rapidez nas avaliações sob déficit hídrico.

Características agronômicas e morfológicas com forte associação com a produtividade em déficit hídrico podem ajudar na seleção precoce de genótipos

tolerantes, considerando os altos custos envolvidos na fenotipagem de grande número de acessos até o final do ciclo da cultura. De acordo com El-Sharkawy (2006), algumas características fenotípicas e fisiológicas de *M. esculenta* como taxas fotossintéticas, condutância estomática, transpiração e eficiência no uso da água estabelecem diferenças significativas entre genótipos e podem ser utilizadas para indicar aqueles mais promissores quanto à tolerância ao estresse hídrico.

Adicionalmente, prolongados períodos de estiagem em regiões semiáridas tem aumentado a demanda por variedades de mandioca com ciclo precoce, como uma alternativa para escapar deste estresse. Neste caso, os agricultores podem se beneficiar de chuvas que se concentram nos quatro a cinco primeiros meses de cultivo e proceder colheitas precoces (8-10 meses após o plantio). Entretanto, as variedades de mandioca atualmente utilizadas nas regiões semiáridas se colhidas precocemente tendem a apresentar diminuição no rendimento da cultura e no teor de matéria seca das raízes (ADJEBENG-DANQUAH et al., 2016).

O peso fresco da parte aérea, número de raízes de reserva, peso fresco das raízes de reserva e percentagem de matéria seca (MS) das raízes são características altamente relacionadas com tolerância ao déficit hídrico, uma vez que o crescimento do sistema radicular para maior captação de água contribui para a sobrevivência da planta (EL-SHARKAWY, 2006; TUMUHIMBISE et al., 2014). Por isso, é possível que genótipos que consigam emitir raízes e iniciar o processo de tuberização de forma precoce durante o crescimento inicial das plantas sem restrições hídricas, possam também ser os genótipos mais produtivos no final do ciclo da cultura.

ADJEBENG-DANQUA, SAFO-KANTANKA (2013) avaliaram diferentes genótipos de mandioca em diferentes épocas de colheitas ao longo de todo o ciclo da cultura (um ano), e relataram correlação positiva entre a produtividade inicial de raízes e a produtividade final, concluindo que há possibilidade de selecionar genótipos com maturação precoce, e com alto potencial de produção. Estas observações também foram corroboradas por outros autores (DUQUE, SETTER, 2013; TARDIEU et al., 2013), que mostraram que o volume inicial de raízes, o índice de colheita e teor de amido nas hastes podem ser importantes características para o melhoramento da mandioca em condições de estresse hídrico, por apresentarem alto potencial preditivo da produtividade de raízes e maior eficiência na fenotipagem dentro de um ciclo de avaliação de 7 a 8 meses, em contraste com um ciclo de 12 a

18 meses. Isso demonstra que avaliação precoce pode ser uma boa característica para identificar genótipos de mandioca tolerantes ao déficit hídrico.

Modelos de predição

Métodos de predição da produtividade tem sido utilizados em diversos programas de melhoramento genético como uma alternativa para otimizar o processo de seleção de plantas (HESLOT et al., 2011; SINGH et al., 2016). Estes métodos são capazes de auxiliar na compreensão das interações genéticas, fisiológicas e do ambiente, assim como práticas de manejo que podem influenciar na produtividade das culturas (QUIRING, 2009; FANG et al., 2010; CHENU et al., 2011).

Dentre estes modelos, a regressão linear múltipla é uma das principais ferramentas de modelagem estatística utilizada para estimação de uma variável dependente por seus preditores. Embora as regressões sejam eficazes para predição, sua utilidade na análise e interpretação da contribuição dos preditores individuais é limitada pela ocorrência dos efeitos de multicolinearidade (LIPOVETSKY, 2009). Por outro lado, várias técnicas foram desenvolvidas para superar os efeitos da multicolinearidade, como aplicação de métodos de penalização da regressão ou métodos de aprendizado de máquina (ACHARJEE et al., 2013).

Os métodos de regressão essencialmente envolvem ajuste das curvas de regressão e o método de mínimos quadrados é utilizado para minimizar a soma das distâncias quadradas entre as respostas observadas e as respostas ajustadas pelo modelo de regressão (MONTGOMERY e PECK, 1992). O método dos mínimos quadrados pode ser modelado por: $\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2$, em que $y =$ é o vetor de resposta; $\beta =$ coeficientes de regressão; $x =$ variáveis predictoras.

A regressão *ridge* reduz os coeficientes de regressão impondo uma penalidade na soma dos quadrados dos coeficientes de regressão (norma L2), sendo $\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j^2$, em que λ_2 é um *shrinkage* fator aplicado à soma dos quadrados dos valores dos coeficientes de regressão. Quanto maior o λ_2 , maior será a penalidade nos coeficientes de regressão e mais eles serão reduzidos a zero. Na regressão *ridge*, todas as variáveis regressoras permanecem

no modelo, uma vez que os coeficientes de regressão não se tornam exatamente zero (HOERL e KENNARD, 1970).

A regressão Lasso (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*), é outro método de regularização, cuja penalidade é aplicada à soma dos valores absolutos dos coeficientes de regressão (norma L1), sendo: sendo $\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p |\beta_j|$, em que o parâmetro *shrinkage* λ_1 é tem que que ser definido, usando validação cruzada. Com a penalização dos valores absolutos dos coeficientes de regressão alguns coeficientes estimados podem ter valores zeros, e com isso são eliminados do modelo de regressão, ocorrendo seleção de variáveis (TIBSHIRANI, 1996).

O método de quadrados mínimos parciais (PLS) relaciona uma única variável resposta ou uma matriz de variáveis resposta a uma matriz de variáveis regressoras. O PLS é um método de redução de dimensão, que utiliza o critério de maximização da covariância entre as variáveis latentes e a resposta. Geralmente o número ideal de componentes latentes é escolhido por validação cruzada. Como o número ideal de componentes latentes é um número discreto, esse método também é um método discreto de penalização (GELADI e KOWLASKI, 1986; HOSKULDSON, 1988).

Os métodos de aprendizado de máquina (SVM) não assumem normalidade dos dados e podem lidar com não-linearidade entre as variáveis resposta e de predição, tendo como objetivo construir um sistema de computador que possa se adaptar e aprender com a experiência (DEMIRIZ et al., 2001). O SVM foi originalmente desenvolvido para modelos de classificação para maximizar a acurácia preditiva, evitando o *overfitting* dos dados. Os parâmetros épsilon (zona insensível) e o parâmetro de regularização "C", são otimizados, embora o SVM também pode ser usado em modelos de regressão (HASTIE et al., 2009; CRISTIANINI e SHAWE-TAYLOR, 2000). Considerando os dados de entrada $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, o SVM encontra uma função que ajusta a equação: $f(x) = wx + b$, em que w é um vetor de peso e b é uma constante. O objetivo da regressão vetorial de suporte (SVR) é encontrar uma função $f(x)$ que possua o desvio máximo ϵ das variáveis resposta para todos os preditores e, ao mesmo tempo, minimize a distância entre os valores preditos e os reais. O SVR não leva ao agrupamento ou seleção de variáveis. Alguns trabalhos utilizando o SVM já foram desenvolvidos para a predição de produtividade como exemplo em cana-de-açúcar,

trigo e soja este ultimo foi realizada a predição de rendimentos através dos nutrientes presentes nas folhas (RUB et al., 2010).

As redes neurais artificiais (ANN) são sistemas computacionais que simulam redes neurais biológicas (BISHOP, 1995). A arquitetura da rede neural artificial é um conjunto interconectado de elementos de processamento individuais chamados preceptores: “nós únicos” ou “neurônios artificiais”. Cada neurônio artificial recebe uma ou mais informações dos nós vizinhos, processa as informações e produz uma saída a ser transmitida para o próximo nó. Os pontos fortes das conexões entre duas unidades são chamados de “pesos”, que devem ser definidos pela abordagem computacional para resolver um dado problema (TAKAYAMA et al., 1999). Ao computar a saída, a informação de entrada (x_i) é pesada positiva ou negativamente. A abordagem computacional também deve atribuir um valor limite interno (θ) para simular a ação de saída. Em cada nó, os valores de entrada (x_n) são multiplicados pelo seu peso associado (W_n) para fornecer um resultado, que é ajustado pelo seu valor de retorno. A saída é então determinada usando a soma não linear ponderada como o argumento em uma função “ f ” denominada função de transferência ou função de ativação, dada por: $y_i = f(\sum W_n - X_n - \theta_i)$. Entre as funções que podem ser aplicadas, a sigmoide é a mais comumente usada. A função sigmoide $f(y_i)$ é conduzida para a etapa seguinte como um valor de saída. O α é parâmetro relacionado à forma da função sigmoide. A não linearidade da função sigmoide é reforçada com um aumento em α , sendo $f(y_i) = 1/[1 + \exp(-\alpha y_i)]$. Ao conectar vários neurônios artificiais (muitas centenas de milhares) ou nós simples, obtém-se uma rede neural artificial complexa (GALLEGO et al., 2011).

Apesar de trabalhos utilizando NeNet relacionados à produtividade de raízes de mandioca ainda serem incipientes, este modelo é bastante utilizado para modelagem desenvolvimento de cultivos, avaliações de perdas de pesticidas e nutrientes, e predição de doenças e para previsão de produtividade de grãos de trigo e arroz e milho (GOLHANI et al. , 2018; MICHELON et al., 2018). Por conseguinte, Goyal (2013) identificou que é possível prever a produtividade de raízes utilizando o modelo de redes neurais, considerando o bom desempenho dos dados de experimentos replicados em campo ao longo de três anos para predição da produtividade de tubérculos 9, 10 e 11 semanas antes da colheita. A não linearidade do processo de modelagem, resultou em uma estimativa mais precisa para o

crescimento de tubérculos de batata, sendo forte potencial para aplicação deste modelo na agricultura de precisão, considerando os dados climáticos ou fisiológicos.

Os modelos de predição necessitam de uma etapa de pré-processamento dos dados, e uma das mais utilizadas é a seleção de variáveis que visa identificar e selecionar amostras que sejam realmente representativas para construção dos modelos de predição, com real importância para explicar a variabilidade da variável dependente (ALLEGRINI; OLVIERI, 2014). A seleção de variáveis, sobretudo para os modelos lineares, é de fato muito importante para evitar a utilização de valores fora do intervalo que podem prejudicar o desempenho dos modelos.

A eficiência dos modelos de predição geralmente é realizada com base nas estimativas do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de determinação (r^2), e o erro absoluto médio (MAE). O RMSE é a raiz quadrada da variância dos resíduos e indica o ajuste absoluto do modelo aos dados, ou seja, o quão próximo os dados observados estão dos valores preditos pelo modelo em análise sendo, portanto, uma medida absoluta do ajuste. Assim, baixos valores de RMSE indicam melhor ajuste do modelo (QUIRING, PAPAKYRIAKOU 2003; WILLMOTT et al., 2012; MAGNEY et al., 2016). O r^2 compreende a relação linear entre os dados preditos no modelo de regressão e os valores reais, portanto possui escala intuitiva que varia de zero a um, com zero indicando que o modelo proposto não melhora a predição sobre o modelo médio e um que indica predição perfeita. O MAE mede a magnitude média dos erros em um conjunto de predições, sem considerar sua direção (SHAFI et al., 2018).

Um dos métodos para verificação da eficácia dos modelos de predição é a validação cruzada de um subconjunto de dados, que tem como propósito testar a capacidade do modelo de prever novos dados que não foram usados no conjunto de treinamento, identificando possíveis problemas associados ao desempenho dos modelos (ARLOT; CELISSE, 2010). Desta forma os dados são divididos em N partes aleatoriamente iguais, nos quais são treinados $N-1$ subconjuntos e a outra parte não é utilizada nos modelos de predição (CHEKROUD et al., 2016). Esta metodologia é repetida N vezes até se avaliar e treinar todos os dados com a finalidade de desenvolver o melhor modelo.

Outra ferramenta importante para diagnóstico dos modelos de predição é a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*), que se refere à curva ajustada entre a taxa positiva verdadeira (TPR) e a taxa de falsos positivos (FPR). A TPR é conhecida como sensibilidade ou probabilidade de detecção, enquanto que a

FPR é conhecida como *fall-out* ou probabilidade de alarme falso (1 - especificidade) (KUHN et al., 2008).

REFERÊNCIAS

ACHARJEE, A.; FINKERS, R.; VISSER, R.G.F.; MALIEPAARD, C. Comparison of regularized regression methods for omics data. **Metabolomics**, v.3, a.126, 2013.

ADJEBENG-DANQUAH, J.; SAFO-KANTANKA, O. Genetic variation in foliage and protein yield of some elite cassava (*Manihot esculenta* Crantz) genotypes in Ghana. **Journal of Plant Breeding and Genetics**, v.1, p.46-55, 2013.

ADJEBENG-DANQUAH, J.; GRACEN, V.E.; OFFEI, S.K.; ASANTE, I.K.; MANU-ADUENING, J. Genetic variability in storage root bulking of cassava genotypes under irrigation and no irrigation. **Agriculture & Food Security**, v.5, p.9, 2016.

ALLEGRINI, F.; OLIVIERI, A. C. IUPAC-Consistent approach to the limit of detection in partial least-squares calibration. **Analytical Chemistry**, v. 86, p. 7858- 7866, 2014

ALVES, A.A.C. Fisiologia da mandioca. In: Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. Cap.7, p.138-169.

ARLOT, S.; CELISSE, A. A survey of cross-validation procedures for model selection. **Statistics Surveys**, v. 4, p. 40-79, 2010.

BILIERI, C. E.; SILVA, R. H.; GOMES, C. M.; CARDOZO, C. J.; YAMASHITA, O. M.; CARVALHO, M. A. C.; ROBOREDO, D.; GERVAZIO, W. Organoleptic quality in different varieties of cassava, implemented in consortium with the pineapple in the municipality of Alta Floresta – MT. **Cadernos de Agroecologia**, v. 9, p. 1-9. 2014.

BISHOP, C. M. **Neural networks for pattern recognition**. Oxford University Press: Oxford, 1995.

BREDESON, J. V.; LYONS, J. B.; PROCHNIK, S. E.; WU, G. A.; HA, C. M.; EDSINGER-GONZALES, E.; GRIMWOOD, J.; SCHMUTZ, J.; RABBI, I. Y.; EGESI, C.; NAULUVULA, P.; LEBOT, V.; NDUNGURU, J.; MKAMILO, G.; BART, R. S.; SETTER, T. L.; GLEADOW, R. M.; KULAKOW, P.; FERGUSON, M. E.; ROUNSLEY, S.; ROKHSAR, D. S. Sequencing wild and cultivated cassava and related species reveals extensive interspecific hybridization and genetic diversity. **Nature**, v. 34, p. 562-571, 2016.

BURNS, A.; GLEADOW, R.; CLIFF, J.; ZACARIAS, A.; CAVAGNARO, T. Cassava: the drought, war and famine crop in a changing world. **Sustainability**, v. 2, p.3572-3607, 2010.

CACH, N.T.; LENIS, J.I.; PEREZ, J.C.; MORANTE, N.; CALLE, F.; CEBALLOS, H. Inheritance of useful traits in cassava grow in subhumid conditions. **Plant Breeding**, v. 125, n. 2, p. 177-182, 2006.

CEBALLOS, H.; KAWUKI, R. S.; GRACEN, V. E.; YENCHO, G. C.; HERSHEY, C. H. Conventional breeding, marker assisted selection, genomic selection and inbreeding in clonally propagated crops: a case study for cassava. **Theoretical Applied Genetics**, v. 128, p. 1647–1667, 2015.

CEBALLOS, H.; RAMIREZ, J.; BELLOTTI, A.C.; JARVIS, A.; ALVAREZ, E. Adaptation of cassava to changing climates. In: YADAV, S.S.; REDDEN, R.J.; HATFIELD, J.L.; LOTZE-CAMPEN, H.; HALL, A.E. (eds.), **Crop Adaptation to Climate Change**, Wiley, New York, pp. 411-425, 2011.

CEBALLOS, H.; SANCHES, T.; CHAVEZ, A. L.; IGLESIAS, C.; DEBOUCK, D.; MAFLA, G.; TOHME, J. Variation in crude protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) roots. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 19, n. 6-7, p. 589-593, 2006.

CHEKROUD, A.M.; ZOTTI, R.J.; SHEHZAD, S.; GUEORGUIEVA, R.; JOHNSON, K; TRIVEDI, M.H.; CONNON, T.D.; KRYSTAL, J.H.; CORLETT, P.R. Cross-trial prediction of treatment outcome in depression: a machine learning approach. **The Lancet Psychiatry**, v. 3, p. 243-250, 2016.

CHENU, K.; COOPER, M.; HAMMER, G. L.; MATHEWS, K. L.; DRECCER, M. F.; CHAPMAN, S. C. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modeling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. **Journal of Experimental Botany, Oxford**, v.62, p.1743-1755, 2011.

CIAT – International Center for Tropical Agriculture. Crop conservation & use. Disponível em < <https://ciat.cgiar.org/what-we-do/crop-conservation-and-use/>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2017.

CRISTIANINI, N.; SHAW-TAYLOR, J. **An introduction to support vector machines**. Cambridge University Press, UK, 2000.

DEMIRIZ, A.; BENNETT, K.P.; BRENNEMAN, C.M.; EMBRECHTS, M.J. Support vector machine regression in chemometrics. **Computing Science and Statistics**, v.33, p.289-296, 2001.

DUMET, D.; KORIE, S.; ADEYEMI, A. Cryobanking Cassava Germplasm at IITA. **Acta Horticulturae**, v. 908, p. 439-446, 2011.

DUPUTIE, A. M.; DAVID, F.; HAXAIRE, P. C.; MCKEY, D. Traditional amerindian cultivators combine directional and ideotypic selection for sustainable management of cassava genetic diversity. **Evolutionary Biology**, v. 22, p.1317-1325, 2009.

DUQUE L, O.; SETTER, T.L. Cassava response to water deficit in deep pots: root and shoot growth, ABA, and carbohydrate reserves in stems, leaves and storage roots. **Tropical Plant Biology**, v.6, p. 199-209, 2013.

EATHINGTON, S.R.; CROSBIE, T.M.; EDWARDS, M.D.; REITER, R.D.; BULL, J.K. Molecular markers in a commercial breeding program. **Crop Science**, v. 47, p.154-163, 2007.

EI-SHARKAWY, M. A. Cassava: International research on cassava photosynthesis, productivity, eco-physiology, and responses to environmental stresses in the tropics. **Photosynthetica**, v.44, p. 418-512, 2006.

EL- SHARKAWY, M. A; DE TAFUR, S. M. Comparative photosynthesis, growth, productivity, and nutrient use efficiency among tall and short stemmed rain-fed cassava cultivars. **Photosynthetica**, v. 48, p 173- 88, 2010.

EL-SHARKAWY, M. A Global warming: causes and impact on agroecosystems productivity and food security with emphasis on cassava comparative advantage in the tropics/subtropics. **Photosynthetica**, v.52, p. 161-178, 2014.

EL-SHARKAWY, M.A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.257-286, 2007.

ESUMA, W.; KAWUKI, R.; HERSELMAN, L.; ABUSCHAGNE, M. Diallel analysis of provitamin A carotenoid and dry matter content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Breed Science**, v. 66, p. 627-635, 2016.

FANG, Q.; MA, L.; YU, Q.; AHUJA, L.R.; MALONE, R. W.; HOOGENBOOM, G. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat–maize double cropping systems in North China Plain. **Science Direct**, v.97, p. 1165–1174, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT Data base**. Disponível em <<http://faostat3.fao.org/analysis/Q/QC/E>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2017.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **A mandioca tem um grande potencial de ser a cultura do século XXI**. 2013. Disponível em: <<https://www.fao.org.br/mtgpcsXXI.asp>> Acessado em: 10 de Agosto 2016.

GALLEGO, P.P.; GAGO, J.; LANDÍN, M. **Artificial neural networks technology to model and predict plant biology process**. Rijeka, Croatia: Intech Open Access Publisher. pp. 197–217. 2011.

GELADI, P.; KOWLASKI, B. Partial least square regression: A tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v.35, p.1-17, 1986.

GOLHANI, K.; BALASUNDRAMA, S.K.; VADAMALAI, G.; PRADHAN, B. A review of neural networks in plant disease detection using hyperspectral data. **Information Processing in Agriculture**, v.5, p.354-371, 2018.

GOYAL, S. Artificial neural networks in vegetables: A comprehensive review. **Scientific Journal of Crop Science**, v. 2, p. 75-94, 2013.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction**. (2nd ed), Springer, New York, USA, 2009.

HERRERA, C.M.; BAZAGA, P. Untangling individual variation in natural populations: ecological, genetic and epigenetic correlates of long-term inequality in herbivory. **Molecular Ecology**, v. 20, p. 1675–1688, 2011.

HERSHEY, C.; DEBOUCK, D. A global conservation strategy for cassava (*Manihot esculenta*) and wild *Manihot* species. 2008. **Summary of stakeholder deliberations and recommendations prepared for the Global Crop Diversity Trust**. Disponível em: <http://isa.ciat.cgiar.org/urg/urgweb_folder/files/unitfiles/A%20Global%20Conservation%20Strategy%20for%20Manihot%20%20August%202008-2.pdf>. Acessado em: 20 de junho. 2018.

HESLOT, N.; YANG, H-P; SORRELL, M.E.; JANNINK, J-L. Genomic Selection in Plant Breeding: A Comparison of Models. **Crop Science**, v.52, p. 146-160, 2011.

HOERL, A.E.; KENNARD, R.W. Ridge regression: Biased estimation for non-orthogonal problems. **Technometrics**, v.12, p.55-67, 1970.

HOSKULDSON, A. PLS regression methods. **Journal of Chemometrics**, v.2, p.211-228, 1988.

HOWELER, R.; LUTALADIO, N.; THOMAS, G. Cassava, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. **Save and Grow: Cassava**, 2013.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agropecuária**. 2017. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>>. Acesso em: 05 Maio de 2018.

IHEMERE, U.; ARIAS-GARZON, D.; LAWRENCE, S.; SAYRE, R. Genetic modification of cassava for enhanced starch production. **Plant Biotechnology Journal**, v.4, p. 453-465, 2006.

KAMAU, J.; MELIS, R.; LAING, M.; DERERA, J.; SHANAHAN, P.; NGUGI, E.C.K. Farmers' participatory selection for early bulking cassava genotypes in semi-arid Eastern Kenya. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 3, p. 44- 52, 2011.

KUHN, M. Building predictive models in r using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v. 28, p. 1-26, 2008.

KUNKEAW, S.; YOOCHA, T.; SRAPHET, S.; BOONCHANAWIWAT, A.; BOONSENG, O.; LIGHTFOOT, D. A.; TRIWITAYAKORN, K.; TANGPHATSORNRUANG, S. Construction of a genetic linkage map using simple sequence repeat markers from expressed sequence tags for cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Molecular Breeding**, v. 27, p. 67-75, 2011.

LABAN, T.F.; KIZITO, E.B.; BAGUMA, Y.; OSIRU, D. Evaluation of Ugandan cassava germplasm for drought tolerance. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v.5, p.212-226, 2013.

LATIF, S.; MULLER, J. Potential of cassava leaves in human nutrition: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 44, p. 147-158, 2015.

LENIS, J.I.; CALLE, F.; JAMARILLO, G.; PEREZ, J.C.; CEBALLOS, H.; COCK, J.H. Leaf retention and cassava productivity. **Field Crops Research**, v. 95, p. 126-134, 2006.

LIPOVETSKY, S. Linear regression with special coefficient features attained via parameterization in exponential, logistic, and multinomial logit forms. **Mathematical and Computer Modelling**, v.49, p.1427-1435, 2009.

LONG, S.P.; AINSWORTH, E.A.; LEAKEY, A.D.B.; NOSBERGER, J.; ORT, D.R. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. **Science**, v.312, p. 1918–1921, 2006.

MAGNEY, T.S.; EITEL, J.U.H.; HUGGINS, D.R.; VIERLING, L.A. Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 217, p.46-60, 2016.

MICHELON, G.K.; MENEZES, P.L.; BAZZI, C.L.; JASSE, E.P.; MAGALHÃES, P.S.G.; BORGES, L.F. Artificial neural networks to estimate the productivity of soybeans and corn by chlorophyll readings. **Journal of Plant Nutrition**, v.41, p.1285-1292, 2018.

MONTGOMERY, C.D.; PECK, E, A. **Introduction to linear regression analysis**. Wiley, New York, USA, 1992.

NJOKU, N. D.; GRACEN, E. V.; OFFEI, K. S.; ASANTE, K. I.; EGESI, N. C.; KULAKOW, P.; CABALLOS, H. Parent-offspring regression analysis for total carotenoids and some agronomic traits in cassava. **Euphytica**, v. 205, p. 1-10, 2015.

NUWAMANYA, E.; BAGUMA, Y.; EMMAMBUX, N.; RUBAIHAYO, P. Crystalline and pasting properties of cassava starch are influenced by its molecular properties. **African Journal of Food Science**, v. 4, p. 8-15, 2010.

OJULONG, H.F.; LABUSCHAGNE, M.T.; HERSELMAN, L.; FREGENE, M. Yield traits as selection indices in seedling populations of cassava. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 10, p. 191-196, 2010.

OKOGBENIN, E.; PORTO, M. C. M. EGESI, C.; MBA, C.; ESPINOSA, E.; SANTOS, L. G.; OSPINA, C.; MARÍN, J.; BARRERA, E.; GUTIÉRREZ, J.; EKANAYAKE, I.; IGLESIAS, C.; FREGENE, M. A. Marker-assisted introgression of resistance to cassava mosaic disease into Latin American germplasm for the genetic improvement of cassava in Africa. **Crop Science**, v.47, p. 1895-1904, 2007.

OKOGBENIN, E.; SETTER, T.L.; FERGUSON, M.; MUTEKI, R.; CEBALLOS, H.; OLASANMI, B.; FREGENE, M. Phenotypic approaches to drought in cassava: review. **Frontiers in Physiology**, v.4, p.1-15, 2013.

OLIVEIRA, E.J.; MORGANTE, C.V.; AIDAR, S.T.; CHAVES, A.R.M.; ANTONIO, R.P.; CRUZ, J.L.; COELHO FILHO, M.A. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v.213, p.188, 2017.

OLIVEIRA, E.J.; MORGANTE, C.V.; AIDAR, S.T.; CHAVES, A.C.; CRUZ, J.C.; FILHO, M.A.C. Genetic parameters for drought-tolerance in cassava. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 233-241, 2015.

OLSEN, K. M. SNPs, SSRs and inferences on cassava's origin. **Plant Molecular Biology**, v. 56, p. 517–526, 2004.

ORLANDIN, P.; LIMA, L. R. Sinopse do gênero *Manihot* Mill. (*Euphorbiaceae*) no Estado de São Paulo, Brasil. **Hoehnea**.v.41, p.51-60, 2014.

QUIRING, S.M. Monitoring drought: an evaluation of meteorological drought indices. **Geography Compass**, v. 3, p. 64–88, 2009.

QUIRING, S.M.; PAPAKYRIAKOU, T.N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, p. 49–62, 2003.

REDDY, P. P. Plant protection in tropical root and tuber crops. **Springer**, India, p. 1–15, 2015.

ROSENTHAL, D. M.; LOCKE, A. M.; KHOZAI, M.; RAINES, C. A.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Overexpressing the C3 photosynthesis cycle enzyme sedoheptulose-1-7 bisphosphatase improves photosynthetic carbon gain and yield under fully open-air CO₂ fumigation (FACE). **Plant Biology**, v.11, p.123-134, 2011.

RUB, G.; KRUSE, R. Feature selection for wheat yield prediction. In: BRAMER M., ELLIS R., PETRIDIS M. (eds) Research and development in intelligent systems XXVI. Springer, London

SALVADOR, E.M.; STEENKAMP, V.; MCCRINDLE, C.M.E. Production, Consumption and nutritional value of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Mozambique: an overview. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, v.6, p.29-39, 2014.

SHAFI, J.; SUN, Z.; JI, M.; GU, Z.; AHMAD, W.; ANN and RSM based modelling for optimization of cell dry mass of Bacillus sp. strain B67 and its antifungal activity against *Botrytis cinerea*. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v. 32, p.58-68, 2018.

SINGH, A.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A.K.; SARKAR, S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. **Trends in Plant Science**, v.21, p. 110-124, 2016.

SINGH, J; KAUR, L.; MCCARTHY, O. J. Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: a review. **Food Hydrocolloids**, v.21, p.1-22, 2007.

TAKAYAMA, K., FUJIKAWA, M., NAGAI, T. Artificial neural networks as a novel method to optimize pharmaceutical formulations. **Pharmaceutical Research**, v.16, p.1–6, 1999.

TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. **Frontiers in Physiology**, v.4, p.1-11, 2013.

TIBSHIRANI, R. Regression shrinkage and selection via the LASSO. **Journal of Royal Statistics Society**, v.58, p.267-288, 1996.

TUMUHIMBISE, T.; MELIS, R.; SHANAHAN, P.; KAWUKI, R. Genotype x environment interaction effects on early fresh storage root yield and related traits in cassava. **The Crop Journal**, v. 2, p. 329-337, 2014.

TURYAGYENDA, L.F.; KIZITO, E.B.; FERGUSON, M. BAGUMA, Y.; AGABA, M.; HARVEY, J.W.; OSIRU, D. S.O. Physiological and molecular characterization of drought responses and identification of candidate tolerance genes in cassava. **AoB Plants**, v.5, p. 1-17, 2013.

UDENSI, U.; TARAWALI, G.; FAVOUR, E.; ASUMUGHA, G.; EZEDINMA, C.; OKOYE, B.; DIXON, A. Adoption of selected improved cassava varieties among smallholder farmers in South-Eastern Nigeria. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 9, p. 329–335, 2011.

UTSUMI, Y.; TANAKA, M.; MOROSAWA, T.; KUROTANI, A.; YOSHIDA, T.; MOCHIDA, K.; MATSUI, A.; UMEMURA, Y.; ISHITANI, M.; SHINOZAKI, K.; SAKURAI, T.; SEKI, M. Transcriptome analysis using a high-density oligomicroarray under drought stress in various genotypes of cassava: Na important tropical crop. **DNA Research**, v. 19, p. 335-345, 2012.

VENTURINI, M. T.; ARAÚJO, T. S.; ABREU, E. F. M.; ANDRADE, E. C.; SANTOS, V. S.; SILVA, M. R.; OLIVEIRA, E. J. Crop losses in Brazilian cassava varieties induced by the cassava common mosaic virus. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 520-524, 2016.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012.

WOLFE, M.D.; CARPIO, D.C.; ALAB, O.; EZENWAKA, L.C.; IKEOGU, N.U.; KAYONDO, I.K.; LOZANO, R.; OKEKE, U.G.; OZIMATI, A.A.; WILLIAMS, E.; EGESI, C.; KAWUKI, R.; KULAKOW, P.; RABBI, I.Y.; JEAN-LUC, J. Prospects for Genomic Selection in Cassava Breeding. **The plant genome**, v. 10, p.1-19, 2017.

ZHAO, N.; MENG, P.; HE, Y.; YU, X. Interaction of CO₂ concentrations and water stress in semiarid plants causes diverging response in instantaneous water use efficiency and carbon isotope composition. **Biogeosciences**, v.14, p. 3431–3444, 2017.

ZHAO, P.; LIU, P.; SHAO, J.; LI, C.; WANG, B.; GUO, X.; YAN, B.; XIA, Y.; PENG, M. Analysis of different strategies adapted by two cassava cultivars in response to drought stress: ensuring survival or continuing growth. **Journal of Experimental Botany**, v.66, p. 1477-1488, 2014.

CAPÍTULO 1

DESEMPENHO AGRONÔMICO DE GENÓTIPOS DE MANDIOCA EM FASES PRECOCES DE DESENVOLVIMENTO SOB DÉFICIT HÍDRICO¹

¹Artigo a ser submetido ao Comitê Editorial do periódico científico Scientia Agricola

Desempenho agronômico de genótipos de mandioca em fases precoces de desenvolvimento sob déficit hídrico

RESUMO: A fenotipagem da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) em condições de déficit hídrico é uma tarefa laboriosa e de alto custo em função do ciclo da cultura. Desta forma este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho agronômico de genótipos de mandioca submetidos ao déficit hídrico e sob irrigação, em diferentes épocas de colheita. O delineamento foi o de blocos completos casualizados, em esquema fatorial triplo com quatro épocas de colheita (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio), dez genótipos de mandioca, e dois tratamentos hídricos (déficit hídrico e irrigado). As características avaliadas foram: altura da planta (AP), produtividade da parte aérea (PPA) e raízes (PTR), diâmetro do caule (DC), número de raízes por planta (NRP) e retenção foliar (RF). Para verificar o desempenho dos genótipos, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas por meio do teste de Tukey ($p < 0,05$). Todas as características agronômicas foram influenciadas pelo tratamento com déficit hídrico, em todas as épocas de colheita. Entretanto, o menor desempenho agronômico nas condições de déficit hídrico não afetou a direção da correlação entre estes experimentos e as épocas de colheita. O ranqueamento dos genótipos variou em função das diferentes épocas de colheita, porém a manutenção daqueles com melhor e pior ranqueamento praticamente permaneceu inalterado, indicando a possibilidade de realização de colheitas precoces como estratégia para otimizar a seleção de genótipos produtivos e tolerantes ao déficit hídrico. O ranqueamento realizado pela seleção precoce aos 4 e 5 meses após o plantio (MAP) nos experimentos irrigados e de sequeiro, respectivamente, foi bastante similar ao ranqueamento dos genótipos aos 12 MAP. A avaliação precoce pode identificar genótipos de mandioca com alto desempenho agronômico em condições de déficit hídrico, de forma a reduzir o tempo de experimentação e aumentar a eficiência de seleção.

Palavras-chave: *Manihot esculenta* Crantz, tolerância à seca, produtividade, correlação, precocidade.

Agronomic performance of cassava genotypes in early stages of development under water deficit

ABSTRACT: The phenotyping of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) aiming to identify sources of tolerance to water deficit is a very complex and costly task due to the long crop cycle. The objective of this work was to evaluate the agronomic performance of cassava genotypes subjected to water deficit and under irrigation at different harvest times, and to identify critical periods for early phenotyping. Two experiments were implanted, using a randomized block design, in a triple factorial scheme with 4 harvest times (4, 5, 7 and 12 months after planting), 10 cassava genotypes, and 2 water treatments (water deficit and well-watered). The evaluated traits were: plant height (PIHe), shoot (ShY) and fresh root yield (FRY), stem diameter (StDi), number of roots per plant (NRP), and leaf retention (LeRe). Data were submitted to analysis of variance and means test (Tukey, $p < 0.05$). All agronomic traits were influenced by the treatment with water deficit, in all harvest seasons. However, the lower agronomic performance in the water deficit conditions did not affect the direction of the correlation between these experiments and the harvesting times. The genotypes rankings varied according to the different harvesting times, but the maintenance of those with better and worse rankings practically remained unchanged, indicating the possibility of realizing early harvests as a strategy to optimize the selection of productive and tolerant genotypes to the water deficit. The rankings performed by the early selection at 4 and 5 months after planting (MAP) in the irrigated and water deficit experiments, respectively, were very similar to the rankings of the 12 MAP genotypes. The early evaluation can identify cassava genotypes with high agronomic performance under water deficit conditions, in order to reduce the time of experimentation and to increase the selection efficiency.

Keywords: *Manihot esculenta* Crantz, drought tolerance, productivity, correlation, precocity.

INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é considerada a terceira mais importante fonte de calorias para a alimentação humana e animal em países em desenvolvimento, superada apenas pelo milho e arroz (PEREZ et al., 2011). É amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais da África, Ásia e América Latina, sendo o Brasil o ocupante do terceiro lugar na produção mundial com 21,2 milhões de toneladas, superado apenas pela Nigéria e Tailândia (FAO, 2017).

Embora seja considerada uma cultura rústica bem adaptada a condições marginais de cultivo, as plantas de mandioca podem sofrer reduções significativas na produtividade em condições de deficiência hídrica. Oliveira et al. (2015) avaliaram 47 variedades de mandioca sob restrição hídrica e relataram perdas de mais de 75% na produção de raízes de alguns genótipos. Resultados semelhantes foram reportados por Laban et al. (2013), Okogbenin et al. (2003), Adjebeng-Danquah et al. (2016), Turyagyenda et al. (2013), os quais observaram reduções médias no peso de raízes variando entre 22% a 38% em função do déficit hídrico.

Considerando as perdas provocadas pelo déficit hídrico em mandioca, a seleção de variedades melhoradas e novos clones com maior tolerância a esse estresse tem sido alvo de pesquisa nos programas de melhoramento da cultura. De acordo com Osundare e Oyebamiji (2017), existe ampla variabilidade genética no germoplasma de mandioca que é a matéria prima para se obter ganhos com a seleção. Mesmo com baixa magnitude em condições de restrição hídrica, as estimativas dos parâmetros genéticos de herdabilidade e acurácia seletiva para a produtividade de raízes e amido demonstram a possibilidade de obtenção de ganhos genéticos nos programas de melhoramento de mandioca (OLIVEIRA et al., 2015).

Na seleção de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico diversas características são mensuradas na tentativa de se estabelecer alguma associação com a tolerância ao estresse. Okogbenin et al. (2013) destacaram que características como teor de carboidratos nas folhas, caule e pecíolos, condutância estomática e concentração de ácido abscísico nas folhas e caules, número de hastes primárias, entre outras, possuem relação direta com a tolerância ao déficit hídrico e podem ser mensuradas a partir do terceiro mês após o plantio. Por outro lado, características como produtividade da parte aérea, diâmetro da haste, número de raízes, produtividade total de raízes, entre outras características agronômicas,

geralmente são avaliadas apenas aos 12 meses após o plantio, ou seja, no momento da colheita das plantas e, portanto, de forma tardia. O fato de algumas características chave para a classificação de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico somente serem avaliadas no período de colheita reduz a eficiência da seleção e do ganho genético, uma vez que o tempo é um dos componentes da equação de predição do ganho genético (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010). Nesse sentido, é fundamental elucidar as relações entre as características que podem explicar a tolerância ao déficit hídrico em diferentes fases do desenvolvimento das plantas.

Adjebeng-Danquah e Safo-Kantanka (2013), avaliaram diversos acessos de mandioca em condições normais de desenvolvimento das plantas, em colheitas realizadas em quatro épocas (6, 8, 10 e 12 meses). Os resultados demonstraram uma correlação significativa, positiva e de alta magnitude entre a produtividade de raízes e as épocas de colheita aos 6 e 12 meses, demonstrando a possibilidade de seleção de genótipos com maior potencial produtivo de forma precoce. Colheitas precoces são bastante úteis na pesquisa para avaliar o ranqueamento dos genótipos em diferentes épocas de plantio, embora na prática colheitas antecipadas não sejam recomendadas aos agricultores em muitas regiões semiáridas em função do forte decréscimo na produtividade de raízes, sobretudo nos meses iniciais de crescimento (PEREZ et al., 2011).

As variedades de mandioca tendem a apresentar alta produtividade de raízes com elevado teor de matéria seca quando a deficiência hídrica não ultrapassa o período de seis meses após o plantio (BAKAYOKO et al., 2009). Em outro estudo, Adjebeng-Danquah et al. (2016) relacionaram a produtividade de raízes de mandioca em condições de deficiência hídrica e relataram apenas um crescimento marginal na produtividade de raízes do 8^o ao 12^o mês após o plantio, enquanto que uma forte correlação entre a produtividade de raízes e épocas de colheita ocorreu apenas entre o 10^o e 12^o mês após o plantio.

A seleção de genótipos de mandioca para a tolerância a seca é um processo bastante difícil uma vez que, o déficit hídrico é uma variável quantitativa complexa, que apresenta alto nível de regulação gênica, diferenciada em várias partes da planta (EL-SHARKAWY, 2007; OKOGBENIN et al., 2013; PUTPEERAWIT et al., 2017). Métodos tradicionais de melhoramento que utilizam a produtividade como índice de seleção em vários experimentos (em nível de campo com e sem irrigação),

apresentam-se como alternativa de alto custo devido ao longo tempo necessário para manutenção, coleta e obtenção dos dados fenotípicos (VENUPRASAD et al., 2009). Em virtude das dificuldades enfrentadas, o programa de melhoramento busca cada vez mais aprimorar a seleção fenotípica para a deficiência hídrica, potencializando a intensidade de seleção através do aumento das populações, aumento da herdabilidade, garantia da alta correlação genética com a estabilidade no rendimento (MULUALEM; BEKEKO, 2015).

Trabalhos que exploram a relação entre o desempenho precoce de genótipos de mandioca e épocas de colheita em condições de déficit hídrico ainda são incipientes. Além disso, a definição de protocolos de fenotipagem que permitam a predição do comportamento de genótipos com potencial produtivo para maior tolerância à seca, em um curto período de avaliação, ainda é um desafio. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho agrônômico de genótipos de mandioca avaliados sob dois tratamentos hídricos (déficit hídrico e irrigado) e em diferentes épocas de colheita, além de identificar o potencial produtivo de genótipos contrastantes de mandioca para tolerância ao déficit hídrico e o período crítico para realização de fenotipagens precoces de forma a otimizar o processo de seleção nestas condições.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimentais

Dois experimentos foram instalados no campo experimental da Embrapa Semiárido, localizado no perímetro irrigado de Bebedouro, Petrolina (PE, Brasil, coordenadas geográficas 9°19'35" de latitude Sul, 40°32'53" de longitude Oeste e altitude de 365,5 m). O clima na região, de acordo com a classificação de Köppen, caracteriza-se com "BSwh" com baixa frequência chuvas e grande amplitude térmica. O experimento foi conduzido de dezembro de 2015 a dezembro de 2016.

Um total de dez genótipos foram selecionados com base em experimentos anteriores, sendo cinco acessos de germoplasma (BGM0089, BGM0163, BGM0785, BGM0815, BGM0279) e cinco genótipos melhorados com maior tolerância ao déficit hídrico (GCP001, 9624-09, Cacau, BRS Formosa e BRS Dourada) (OLIVEIRA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2017). Os genótipos pertencem ao banco de germoplasma da Embrapa Mandioca e Fruticultura. O delineamento utilizado para este experimento foi o de blocos completos casualizados, em esquema fatorial 2 × 4 ×

10, sendo o primeiro fator constituído pelos dois tratamentos hídricos, o segundo pelas quatro épocas de colheita (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio) e o terceiro pelos dez génotipos. As parcelas experimentais foram constituídas por duas linhas com cinco plantas cada, com espaçamento de 0,90 m entre linhas e 0,80 m entre plantas.

Os experimentos foram instalados e mantidos sob irrigação, com base na evapotranspiração da cultura, durante os três primeiros meses após o plantio (MAP). Após este período, houve a interrupção da irrigação em um dos experimentos, não sendo aplicada qualquer lâmina líquida até a colheita, enquanto no outro experimento foi mantida a irrigação. A irrigação do tipo localizada foi realizada de acordo com as medidas de precipitação e evapotranspiração de referência (ET₀), do dia anterior, utilizando-se fitas cotejadoras com espaçamento em intervalos de 0,20 m e vazão de 0,86 L h⁻¹. As condições climáticas durante o período de condução dos experimentos foram monitoradas pela estação meteorológica instalada no Campo Experimental de Bebedouro (EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2016), por meio de dados de precipitação pluviométrica, temperatura, umidade do ar e evapotranspiração (Figura 1).

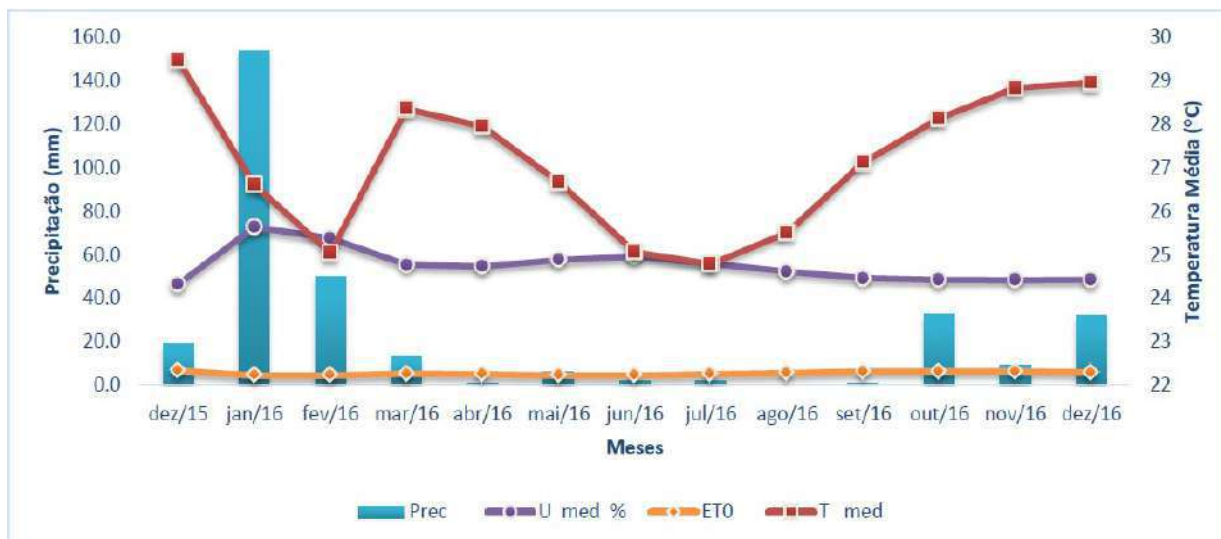


Figura 1. Dados climatológicos registrados durante o período de avaliação dos génotipos de mandioca em condições semiáridas (dezembro 2015 a dezembro de 2016). Prec - precipitação pluviométrica média (mm); U med - umidade relativa do ar média (%); ET₀ - evapotranspiração de referência (mm); T med - temperatura média (°C).

Avaliações agronômicas

Em cada época de colheita foram realizadas as seguintes avaliações, para os dois experimentos: altura da planta (AP, em m), a partir do solo até a primeira folha apical; produtividade da parte aérea (PPA, em t ha⁻¹), obtida mediante pesagem da parte aérea de todas as plantas da parcela, a partir de corte realizados a 0,10 m do solo, com auxílio de uma balança digital suspensa; diâmetro do caule (DC, em mm), medido com auxílio de um paquímetro digital a 0,20 m de altura do solo; número de raízes por planta (NRP); produtividade total de raízes (PTR, em t ha⁻¹), obtida mediante pesagem de todas as raízes da parcela com auxílio de uma balança digital suspensa.

Também foi avaliada a retenção foliar (RF), adotando-se uma escala de notas que levou em consideração a presença e distribuição das folhas ao longo da planta: Nota 1 = folhas presentes apenas na parte superior, cobrindo menos de 10% da altura da planta; Nota 2 = folhas presentes na parte superior e mediana, cobrindo entre 11 e 25% da altura da planta; Nota 3 = folhas presentes na parte superior e mediana, cobrindo entre 26 e 50% da altura da planta; Nota 4 = folhas presentes na parte superior, mediana e inferior, cobrindo entre 51 e 75% da altura da planta; Nota 5 = folhas presentes em praticamente toda a planta, cobrindo mais de 75% da altura da planta.

Os genótipos foram ranqueados com base no índice de seleção de MULAMBA e MOCK (1978) para cada uma das características atribuindo-se valores absolutos mais elevados àqueles de melhor desempenho. Uma vez classificados, foram somadas as ordens de cada genótipo referente à cada característica avaliada, resultando em uma medida adicional, denominada índice de seleção para o estresse hídrico (ISEH). O ISEH foi utilizado posteriormente na análise de correlação de Pearson, bem como no ranqueamento dos genótipos com base nas diferentes épocas de colheitas nos tratamentos irrigados e sob déficit hídrico.

Análise dos dados

Os dados do experimento foram submetidos a análises de variância e em seguida as médias das fontes de variação significativas foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Estas análises foram realizadas com auxílio do pacote *easynova* (ARNHOLD, 2013), implementado no software R 3.4.3 (R CORE TEAM, 2017).

A partir dos valores do ISEH foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as épocas de colheitas para os ensaios irrigados e sob déficit hídrico. Esta análise foi realizada com auxílio do pacote *corrgram*, implementado no software R 3.4.3 (R CORE TEAM, 2017).

Com intuito de verificar as alterações no ranking dos genótipos ao longo das épocas de colheita, foi estimada a correlação de Spearman para os valores do ISEH. Para isso, uma classificação sequencial do maior para o menor valor do índice de seleção foi realizada, sendo o maior valor considerado como ranking 1 e o menor como 10.

A partir das médias ajustadas para PTR aos 12 MAP no tratamento com déficit hídrico, três grupos relacionados a tolerância à seca foram definidos: Suscetíveis ao déficit hídrico: constituído pelos genótipos BGM0089, BGM0163 e BGM0785; Moderadamente tolerantes: formado pelos genótipos 9624-09, Cacau, BGM0279, BGM0815; Tolerantes: composto pelos genótipos BRS Dourada, BRS Formosa e GCP001.

RESULTADOS

Caracterização do estresse hídrico

Durante os 12 meses de avaliação em campo a precipitação total foi de 281,51mm (Figura 1), no entanto, para o tratamento irrigado, um volume adicional de 552,2 mm de água foi aplicado no solo via irrigação. A temperatura média anual foi de 27°C e a umidade relativa do ar média variou de 46,3% a 72,6% no período. A maior precipitação pluviométrica (222,0 mm) foi registrada no período de dezembro de 2015 a janeiro de 2016, época em que foi realizada a instalação dos experimentos. Após o terceiro mês de plantio (março de 2016), quando a irrigação do experimento sob déficit hídrico foi suspensa, houve um período de estiagem marcante, em que a precipitação total pluvial registrada foi de apenas 66,51 mm até o momento da colheita dos experimentos (Figura 1). Portanto, na maior parte do desenvolvimento, as plantas dos genótipos no experimento sob déficit hídrico receberam uma pequena lâmina líquida natural.

Análise de variância das características agronômicas

As estimativas do coeficiente de variação (CV) variaram entre 6,57% e 26,85% para AP e PTR, respectivamente (Tabela 1), e portanto, foram de baixa magnitude, mesmo se tratando de características que normalmente são muito afetadas pelo ambiente, o que demonstra um bom controle experimental. As fontes de variação tratamento (irrigado ou sob déficit hídrico), genótipo e época de colheita apresentaram diferenças significativas importantes na expressão de todas as características analisadas (Tabela 1).

Por outro lado, o desempenho não consistente dos genótipos em condição irrigada ou de sequeiro resultou na significância da interação tratamento × genótipo para quatro características agronômicas, sendo três relacionadas à parte aérea (AP, PPA e RF) e uma à raiz (PTR) (Tabela 1). A significância da interação tratamento × genótipo demonstrou que os genótipos apresentaram comportamentos diferenciados nos experimentos irrigado × sequeiro, certamente como consequência da maior tolerância de alguns genótipos de mandioca ao déficit hídrico.

A interação tratamento × época de colheita foi significativa para todas as características avaliadas, exceto para RF (Tabela 1). Possivelmente, esta interação ocorreu em função do aumento do efeito do estresse hídrico ao longo do período de das épocas de colheita, afetando de maneira diferenciada os genótipos tolerantes e suscetíveis ao déficit hídrico. Isso também refletiu na significância da interação genótipo × época de colheita, em todas as características relacionadas à parte aérea e raiz (Tabela 1). Já a interação tripla entre os fatores tratamento, genótipo e época de colheita foi significativa para todas as características, exceto para DC (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância conjunta, coeficiente de variação (CV) e média geral para seis características agrônomicas avaliadas em dez genótipos de mandioca sob irrigação ou déficit hídrico, colhidos em diferentes épocas após o plantio.

Fonte de Variação	GL ¹	Quadrado Médio					
		AP	PPA	RF	DC	NRP	PTR
Tratamento (T)	1	1478,33**	1505,08**	52,46**	289,14**	60,30**	924,64**
Genótipo (G)	9	49,95**	139,79**	25,62**	23,77**	23,82**	251,85**
Época de colheita (EC)	3	726,43**	83,43**	307,82**	103,28**	42,89**	274,37**
Blocos	3	12,93 ^{ns}	16,69 ^{ns}	0,17 ^{ns}	25,25 ^{ns}	1,43 ^{ns}	20,94 ^{ns}
T x G	9	4,56**	16,37**	4,39**	0,44 ^{ns}	0,88 ^{ns}	64,03**
T x EC	3	58,41**	57,16**	1,26 ^{ns}	34,65**	5,36*	180,40**
G x EC	27	5,33**	8,75**	8,03**	2,72*	3,06**	25,27**
T x G x EC	27	4,65**	4,00**	3,90 ^{ns}	12,66**	3,54**	20,33**
Resíduo	234	0,01	10,86	0,27	4,64	4,08	1,63
CV (%)		6,57	14,01	16,67	8,48	19,19	26,85
Média Geral		1,82	23,50	3,12	14,87	3,80	4,73

¹GL: grau de liberdade; ns, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; AP - altura da planta (m); PPA - produtividade da parte aérea (t ha⁻¹); RF - retenção foliar (escala notas de 1 a 5); DC- diâmetro do caule (mm); NRP - número de raízes por planta; PTR - produtividade total de raízes (t ha⁻¹).

Desempenho dos genótipos sob diferentes condições hídricas e épocas de colheita

Todas as características agronômicas avaliadas foram influenciadas pelo tratamento com déficit hídrico, em todas as épocas de colheita, em pelo menos um dos genótipos avaliados (Tabelas 2, 3 e 4). Todos os genótipos no tratamento irrigado apresentaram maiores valores de AP, quando comparados com o de sequeiro, com exceção do BGM0279, na qual as médias não diferiram aos 4 MAP (Tabela 2). No tratamento irrigado, a AP máxima dos genótipos 9624-09, BGM0089, BGM0163, BGM0279, BGM0785 e BGM0815 e Cacau, foi atingida aos 7 MAP, enquanto para os demais genótipos isso ocorreu apenas aos 12 MAP. Por outro lado, no tratamento de sequeiro a máxima AP ocorreu aos 12 MAP para a maioria dos genótipos, exceto BGM0089, BGM0163, Cacau e BRS Formosa. Isso demonstra certa estabilização do crescimento das plantas aos 7 MAP, sobretudo na condição irrigada (Tabela 2).

Assim como para AP, todos os genótipos mantidos no experimento irrigado apresentaram maior PPA em comparação com o experimento de sequeiro, em todas as épocas de colheita, com exceção do acesso BGM0785, que não foi influenciado pelo déficit aos 5 MAP (Tabela 2). Dentre os genótipos, apenas a Cacau apresentou consistência no desempenho para PPA tanto no experimento irrigado quanto no sequeiro, com maiores médias em todas as épocas de colheita, com variação de 34,39 t ha⁻¹ (5 MAP) a 54,83 t ha⁻¹ (12 MAP) no experimento irrigado e de 18,48 t ha⁻¹ (4 MAP) a 36,04 t ha⁻¹ (7 MAP) no experimento com déficit hídrico. Em ambos os experimentos (irrigado e sequeiro) máxima PPA foi atingida aos 7 MAP, embora em alguns casos isso tenha ocorrido aos 4 MAP (BGM0089 e BRS Formosa). Apenas no caso do BGM0089, o máximo de PPA ocorreu aos 7 MAP (irrigado) e 5 MAP (sequeiro) e em seguida, as plantas reduziram bastante a biomassa da parte aérea, em função da sua alta suscetibilidade ao déficit hídrico.

A resposta dos genótipos em relação à RF foi influenciada pela idade da planta, uma vez que todos os genótipos no experimento irrigado apresentaram tendência à redução dos valores de RF ao longo das épocas de colheita, embora os genótipos BGM0089 e GCP001 tenham apresentado médias de RF semelhantes aos 5, 7 e 12 MAP (Tabela 3).

Tabela 2. Média das características altura da planta e produtividade da parte aérea em dez genótipos de mandioca sob tratamento irrigado (Irrigado) e de déficit hídrico (Déficit), colhidos em diferentes épocas (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio, MAP).

Genótipo	Altura da planta (m)																							
	4 MAP				5 MAP				7 MAP				12 MAP											
	Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit									
9624-09	1,58*	ac	<u>C</u>	1,21	bcd	C	1,72*	ab	<u>C</u>	1,53	a	B	2,51*	ab	<u>A</u>	1,72	ab	B	2,22*	cd	<u>B</u>	1,98	ac	A
BGM0089	1,50*	ac	<u>C</u>	1,07	d	B	1,65*	b	<u>C</u>	1,20	b	AB	2,42*	ac	<u>A</u>	1,22	d	AB	1,93*	e	<u>B</u>	1,32	e	A
BGM0163	1,72*	a	<u>B</u>	1,45	ac	B	1,87*	ab	<u>B</u>	1,57	a	B	2,50*	ac	<u>A</u>	1,96	a	A	2,62*	ab	<u>A</u>	2,10	ab	A
BGM0279	1,65	ac	<u>C</u>	1,57	a	C	1,99*	a	<u>B</u>	1,56	a	C	2,67*	a	<u>A</u>	1,94	a	B	2,77*	a	<u>A</u>	2,24	a	A
BGM0785	1,44*	c	<u>D</u>	1,15	d	C	1,67*	b	<u>C</u>	1,30	ab	BC	2,48*	ac	<u>A</u>	1,41	cd	B	2,03*	de	<u>B</u>	1,79	cd	A
BGM0815	1,48*	ac	<u>C</u>	1,19	cd	C	1,90*	ab	<u>B</u>	1,36	ab	C	2,47*	ac	<u>A</u>	1,71	ab	B	2,44*	bc	<u>A</u>	2,03	ac	A
Cacau	1,56*	ac	<u>D</u>	1,18	cd	C	1,97*	a	<u>C</u>	1,45	ab	B	2,49*	ac	<u>B</u>	1,79	ab	A	2,77*	a	<u>A</u>	1,89	bcd	A
BRS Dourada	1,71*	ab	<u>C</u>	1,48	ab	C	1,91*	ab	<u>C</u>	1,31	ab	C	2,34*	bc	<u>B</u>	1,72	ab	B	2,82*	a	<u>A</u>	1,98	ac	A
BRS Formosa	1,44*	bc	<u>D</u>	1,12	d	B	1,67*	b	<u>C</u>	1,30	ab	B	2,24*	c	<u>B</u>	1,58	bc	A	2,59*	ab	<u>A</u>	1,62	d	A
GCP001	1,53*	ac	<u>D</u>	1,31	ab	C	1,95*	a	<u>C</u>	1,51	a	BC	2,25*	bc	<u>B</u>	1,69	ab	B	2,68*	ab	<u>A</u>	2,04	ac	A
Produtividade da parte aérea (t ha ⁻¹)																								
9624-09	22,58*	cd	<u>B</u>	11,98	ac	BC	24,27*	cd	<u>B</u>	17,26	ab	B	34,89*	cde	<u>A</u>	27,52	bc	A	27,03*	cd	<u>B</u>	10,11	bc	C
BGM0089	19,27*	d	<u>AB</u>	6,90	c	A	13,57	e	<u>B</u>	11,33	bc	A	19,19*	h	<u>AB</u>	5,89	f	AB	21,45*	de	<u>A</u>	0,00	d	B
BGM0163	25,65*	bd	<u>B</u>	15,59	ab	B	26,56*	c	<u>B</u>	17,20	ab	B	31,49*	df	<u>AB</u>	23,87	cd	A	32,79*	c	<u>A</u>	16,15	ac	B
BGM0279	30,17*	b	<u>B</u>	17,91	a	B	37,51*	a	<u>A</u>	17,01	ab	B	41,68*	bc	<u>A</u>	24,97	bd	A	40,59*	b	<u>A</u>	15,63	ac	B
BGM0785	21,47*	d	<u>B</u>	13,03	ac	AB	17,08	de	<u>B</u>	17,43	ab	A	28,89*	efg	<u>A</u>	18,00	de	A	17,61*	e	<u>B</u>	10,69	bc	B
BGM0815	38,08*	a	<u>A</u>	18,77	a	B	39,28*	a	<u>A</u>	20,07	a	B	42,91*	b	<u>A</u>	32,34	ab	A	43,61*	b	<u>A</u>	15,07	bc	B
Cacau	40,56*	a	<u>B</u>	18,48	a	B	34,39*	ab	<u>C</u>	21,67	a	B	51,08*	a	<u>A</u>	36,04	a	A	54,82*	a	<u>A</u>	22,67	a	B
BRS Dourada	29,97*	bc	<u>B</u>	17,23	ab	AB	27,47*	bc	<u>B</u>	11,29	bc	B	38,92*	bd	<u>A</u>	21,18	cd	A	43,91*	b	<u>A</u>	16,95	ab	AB
BRS Formosa	23,26*	bd	<u>A</u>	9,92	bc	A	15,70*	e	<u>B</u>	9,46	c	A	22,71*	gh	<u>A</u>	12,80	ef	A	25,14*	d	<u>A</u>	9,28	c	A
GCP001	21,60*	d	<u>B</u>	11,37	ac	B	24,09*	cd	<u>B</u>	16,43	ac	AB	25,53*	fh	<u>B</u>	18,07	de	A	47,49*	ab	<u>A</u>	12,88	bc	AB

*Diferença significativa entre médias de um mesmo genótipo, na mesma época de colheita, em diferentes tratamentos hídricos (irrigado e déficit); letras minúsculas na mesma coluna indicam diferenças significativas entre as médias dos genótipos, na mesma época de colheita, em um mesmo tratamento hídrico; letras maiúsculas na mesma linha indicam diferenças significativas de um mesmo genótipo entre as diferentes épocas de colheita pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), sendo letras em itálico e sublinhadas relacionadas ao tratamento irrigado e itálico para o tratamento com déficit hídrico.

A mesma tendência de redução da RF observada no experimento irrigado também foi observada para genótipos no experimento de déficit hídrico. Somente o genótipo BGM0785 não apresentou diferença significativa entre os valores de RF nos tratamentos irrigado e déficit, em todas as épocas de colheita. Além disso, o genótipo BGM0815 apresentou maior consistência nos dois experimentos avaliados, com diferença significativa apenas aos 7 MAP. Além disso, este genótipo apresentou alta RF, em comparação aos demais, em todas as épocas de colheita e experimentos (irrigado e sequeiro). De maneira geral, o efeito do déficit hídrico na RF foi mais pronunciado a partir dos 7 MAP.

Para DC, poucos genótipos foram influenciados pela ocorrência do déficit hídrico até os 5 MAP, tendo em vista que o DC foi bastante semelhante ao experimento irrigado. Diferenças significativas entre médias no experimento irrigado e de sequeiro foram observadas para quatro genótipos (BGM0163, BGM0279, BGM0815 e BRS Formosa) aos 4 MAP e somente para a BRS Dourada aos 5 MAP (Tabela 3). A partir dos 7 MAP, as diferenças tornaram-se mais acentuadas, de modo que em todos os genótipos foram observadas reduções nas estimativas do DC que variou de 3,10 mm (Cacau) até 7,65 mm (BGM0785). Exceção a esta observação ocorreu nos genótipos BGM0279, BRS Dourada e BRS Formosa. Aos 12 MAP todos os genótipos apresentaram redução no DC em função do déficit hídrico, com valores variando de 5,20 mm (BGM0785) a 11,40 mm (BGM0089). No experimento irrigado, houve uma tendência de aumento no DC ao longo das diferentes épocas de colheita, sendo que para os genótipos 9624-09, BGM0163, BGM0785, BRS Formosa e GCP001 os valores aos 7 e 12 MAP não diferenciaram entre si. Por outro lado, o aumento do DC no experimento de déficit hídrico a partir dos 4 MAP foi significativo para cinco genótipos (BGM0089, BGM0785, Cacau, BRS Formosa e GCP001).

Quanto à característica NRP, a influência do déficit hídrico foi variável ao longo das épocas de colheita, sendo mais marcante aos 5 MAP, período no qual, com exceção dos genótipos BGM0815 e GCP001, todos os demais apresentaram maior NRP no experimento irrigado, quando comparado ao experimento de sequeiro (Tabela 4).

Tabela 3. Média das características retenção foliar e diâmetro do caule em dez genótipos de mandioca sob tratamento irrigado (Irrigado) e de déficit hídrico (déficit), colhidos em diferentes épocas (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio, MAP).

Genótipo	Retenção foliar																	
	4 MAP		5 MAP		7 MAP		12 MAP		4 MAP		5 MAP		7 MAP		12 MAP			
	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit		
9624-09	4,75	a <u>A</u>	4,75	ab A	4,25	ab <u>A</u>	4,50	ab A	3,25	bc <u>B</u>	3,25	ab B	2,00*	a <u>C</u>	1,25	ab C		
BGM0089	5,00	a <u>A</u>	4,66	abc A	2,65*	d <u>B</u>	1,00	e B	2,75*	bd <u>B</u>	1,50	d B	2,00*	a <u>B</u>	1,00	ab B		
BGM0163	5,00	a <u>A</u>	5,00	a A	4,00	ac <u>B</u>	3,50	bc B	3,25	bc <u>B</u>	3,25	ab B	2,25*	a <u>C</u>	1,50	ab C		
BGM0279	4,00	ab <u>A</u>	3,50	cd A	3,25*	bcd <u>A</u>	2,50	cd B	2,25*	cd <u>B</u>	3,25	ab AB	2,00	a <u>B</u>	1,50	ab C		
BGM0785	5,00	a <u>A</u>	4,50	abc A	3,00	cd <u>B</u>	3,25	cd B	3,25	bc <u>B</u>	3,25	ab B	1,75	a <u>C</u>	1,50	ab C		
BGM0815	4,25	ab <u>A</u>	4,75	ab A	4,50	a <u>A</u>	5,00	a A	5,00*	A <u>A</u>	4,25	a A	2,25	a <u>B</u>	2,25	a B		
Cacau	3,25	b <u>A</u>	3,25	d A	3,00*	cd <u>A</u>	1,99	de B	2,00	D <u>B</u>	2,00	cd B	2,00	a <u>B</u>	2,00	ab B		
BRS Dourada	4,75	a <u>A</u>	4,75	ab A	4,00*	ac <u>AB</u>	1,00	e C	3,75*	B <u>B</u>	2,75	bc B	2,25	a <u>C</u>	2,00	ab B		
BRS Formosa	4,50*	a <u>A</u>	3,75	bd A	2,75	d <u>B</u>	3,25	cd A	3,75*	B <u>A</u>	3,00	bc A	2,25*	a <u>B</u>	1,00	b B		
GCP001	4,75*	a <u>A</u>	3,50	cd A	2,75	d <u>B</u>	3,25	cd A	3,00*	bd <u>B</u>	2,25	bd B	2,75*	a <u>B</u>	1,75	ab B		
Diâmetro do caule (mm)																		
9624-09	21,25	b <u>B</u>	19,95	b B	24,14	ab <u>B</u>	23,27	a AB	32,16*	A <u>A</u>	27,10	ab A	31,07*	ab <u>A</u>	24,24	ac A		
BGM0089	22,83	ab <u>B</u>	21,45	ab A	21,59	b <u>B</u>	21,42	a A	25,81*	bc <u>B</u>	18,90	d A	31,16*	ab <u>A</u>	19,76	c A		
BGM0163	24,10*	ab <u>C</u>	20,71	ab B	25,10	ab <u>BC</u>	22,78	a AB	28,41*	ac <u>AB</u>	25,16	abc A	31,32*	ab <u>A</u>	22,09	bc AB		
BGM0279	26,96*	a <u>B</u>	23,42	ab B	26,33	ab <u>B</u>	23,99	a AB	29,55	ac <u>B</u>	26,91	ab AB	34,96*	a <u>A</u>	27,66	a A		
BGM0785	22,30	ab <u>B</u>	20,07	b A	22,19	b <u>B</u>	22,67	a A	29,35*	ac <u>A</u>	21,71	cd A	27,59*	b <u>A</u>	22,40	bc A		
BGM0815	23,82*	ab <u>C</u>	20,22	ab B	23,46	ab <u>C</u>	21,40	a B	29,81*	ab <u>B</u>	24,07	abc AB	34,43*	a <u>A</u>	26,43	ab A		
Cacau	26,34	a <u>C</u>	25,03	a A	25,65	ab <u>C</u>	24,02	a A	30,80*	a <u>B</u>	27,71	a A	34,87*	a <u>A</u>	26,43	ab A		
BRS Dourada	26,25	a <u>B</u>	23,75	ab B	27,94*	a <u>B</u>	23,59	a B	30,04	ab <u>B</u>	28,84	a A	34,23*	a <u>A</u>	25,20	ab AB		
BRS Formosa	23,61*	ab <u>AB</u>	19,93	b A	22,74	b <u>B</u>	20,71	a A	24,71	c <u>AB</u>	22,27	bd A	27,35*	b <u>A</u>	19,84	c A		
GCP001	24,18	ab <u>B</u>	23,47	ab A	25,18	ab <u>B</u>	22,92	a A	29,60*	ab <u>A</u>	25,02	abc A	33,47*	a <u>A</u>	25,45	ab A		

*Diferença significativa entre médias de um mesmo genótipo, na mesma época de colheita, em diferentes tratamentos (controle e sequeiro); letras minúsculas na mesma coluna indicam diferenças significativas entre as médias dos genótipos, na mesma época de colheita, em um mesmo tratamento hídrico; letras maiúsculas na mesma linha indicam diferenças significativas de um mesmo genótipo entre as diferentes épocas de colheita pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), sendo letras em itálico e sublinhadas relacionadas ao controle e itálico para o experimento com déficit hídrico.

Para a maioria dos genótipos de mandioca, houve um aumento no NRP dos 4 ao 5 MAP, e em seguida uma redução/estabilização desta característica. Possivelmente isso ocorreu em função do direcionamento da tuberização a apenas algumas das raízes produzidas nesta fase, independente do experimento (irrigado ou sequeiro). Para as épocas de colheita de 4, 7 e 12 MAP poucos genótipos apresentaram diferenças no NRP no experimento irrigado e de sequeiro. Aos 4 MAP somente BGM0089 apresentou o dobro de raízes no experimento irrigado (6,58) em comparação com o experimento de sequeiro (3,19). Aos 7 MAP, apenas os genótipos BGM0089 e BGM0815 apresentaram maior NR no experimento irrigado. Aos 12 MAP, apenas dois genótipos, apresentaram diferenças significativas no NR entre os diferentes experimentos, sendo que neste caso o genótipo BRS Formosa apresentou maior NRP no experimento de sequeiro (9,58) em comparação com o irrigado (6,66), enquanto o GCP001 apresentou 11,33 e 7,75 raízes por planta nos experimentos irrigados e de sequeiro, respectivamente.

Diferenças na PTR em função do déficit hídrico foram mais evidentes aos 12 MAP, tendo em vista que oito dos dez genótipos apresentaram maior PTR no experimento irrigado em comparação com o sequeiro (Tabela 4). Além disso, os dois genótipos que não apresentaram diferenças significativas nos experimentos contrastantes para tolerância ao déficit hídrico (BGM0089 e BGM0785) foram os que apresentaram os menores PTR aos 12 MAP no experimento irrigado (Tabela 4). No geral, os efeitos do déficit hídrico em PTR foram mais pronunciados em genótipos que apresentaram maiores PTR no experimento irrigado.

De maneira geral, os genótipos BGM0279, GCP001 e BRS Formosa apresentaram maior PTR em todas as épocas de colheita, independente da condição hídrica. Enquanto para BRS Dourada e GCP001, os efeitos do déficit hídrico foram mais significativos a partir dos 5 MAP. Os genótipos 9624-09, BGM0163 e Cacau apresentaram elevada PTR em experimento irrigado somente aos 12 MAP. Já os genótipos BGM0089 e BGM0785 não apresentaram diferenças significativas entre as médias de PTR em nenhuma condição. No experimento de sequeiro, o potencial produtivo de quatro genótipos foi praticamente definido aos 4 MAP, sendo que dois deles caracterizam-se por apresentarem baixa PTR (BGM0089 e BGM0785) e outros dois PTR de média magnitude (BGM0279 e BRS Dourada). Para os demais genótipos a PTR foi basicamente definido aos 7 MAP.

Tabela 4. Média das características número de raízes por planta e produtividade total de raízes de dez genótipos de mandioca sob tratamento irrigado (Irrigado) e de déficit hídrico (Déficit), colhidos em diferentes épocas (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio, MAP).

Genótipo	Número de raízes por planta																							
	4 MAP				5 MAP				7 MAP				12 MAP											
	Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit		Irrigado		Déficit									
9624-09	9,50	ac	<u>B</u>	7,75	bcd	<i>B</i>	15,25*	cd	<u>A</u>	10,50	ac	<i>AB</i>	13,00	ab	<u>AB</u>	11,83	ab	<i>A</i>	4,92	bc	<u>C</u>	3,50	bd	<i>C</i>
BGM0089	6,58*	c	<u>B</u>	3,19	d	<i>BC</i>	4,96*	f	<u>BC</u>	9,58	bc	<i>A</i>	12,33*	ab	<u>A</u>	6,75	c	<i>AB</i>	1,56	c	<u>C</u>	0,00	d	<i>C</i>
BGM0163	7,83	bc	<u>BC</u>	7,58	bcd	<i>AB</i>	14,59*	cd	<u>A</u>	7,67	c	<i>AB</i>	10,50	b	<u>B</u>	8,25	bc	<i>A</i>	5,33	bc	<u>C</u>	4,00	bd	<i>B</i>
BGM0279	11,09	ac	<u>B</u>	10,33	ac	<i>A</i>	21,33*	a	<u>A</u>	13,42	ab	<i>A</i>	14,25	ab	<u>B</u>	13,75	a	<i>A</i>	6,92	ac	<u>C</u>	5,58	abc	<i>B</i>
BGM0785	8,08	ac	<u>B</u>	6,33	cd	<i>B</i>	12,92*	ce	<u>A</u>	9,50	bc	<i>AB</i>	12,84	ab	<u>A</u>	10,50	ac	<i>A</i>	3,02	bc	<u>C</u>	1,57	cd	<i>C</i>
BGM0815	11,92	ab	<u>B</u>	9,17	ac	<i>AB</i>	9,67	ef	<u>BC</u>	10,50	ac	<i>A</i>	16,08*	a	<u>A</u>	9,67	ac	<i>A</i>	6,92	ac	<u>C</u>	5,50	abc	<i>B</i>
Cacau	11,92	ab	<u>B</u>	12,50	a	<i>A</i>	20,83*	ab	<u>A</u>	14,17	a	<i>A</i>	14,67	ab	<u>B</u>	13,75	a	<i>A</i>	7,42	ab	<u>C</u>	6,50	abc	<i>B</i>
BRS Dourada	12,42	a	<u>B</u>	11,17	ab	<i>AB</i>	16,58*	bc	<u>A</u>	11,92	ac	<i>A</i>	12,92	ab	<u>AB</u>	12,67	ab	<i>A</i>	6,75	bc	<u>C</u>	7,50	ab	<i>B</i>
BRS Formosa	11,17	ab	<u>A</u>	9,59	ac	<i>A</i>	12,00*	de	<u>A</u>	9,09	bc	<i>A</i>	11,75	ab	<u>A</u>	10,34	ac	<i>A</i>	6,66*	bc	<u>B</u>	9,58	a	<i>A</i>
GCP001	10,17	ac	<u>B</u>	12,42	a	<i>A</i>	14,09	ce	<u>A</u>	12,17	ac	<i>A</i>	13,67	ab	<u>AB</u>	12,42	ab	<i>A</i>	11,33*	a	<u>AB</u>	7,75	ab	<i>B</i>
Produtividade total de raízes (t ha ⁻¹)																								
9624-09	1,29	cd	<u>B</u>	1,48	b	<i>B</i>	2,49	de	<u>B</u>	1,34	b	<i>B</i>	5,50	bc	<u>A</u>	5,08	bc	<i>A</i>	6,54*	f	<u>A</u>	1,35	cd	<i>B</i>
BGM0089	0,52	d	<u>A</u>	0,14	b	<i>A</i>	0,35	e	<u>A</u>	0,40	b	<i>A</i>	0,63	d	<u>A</u>	0,50	e	<i>A</i>	1,57	g	<u>A</u>	0,00	d	<i>A</i>
BGM0163	1,78	cd	<u>A</u>	0,81	b	<i>B</i>	3,00*	de	<u>A</u>	0,86	b	<i>B</i>	3,03	cd	<u>A</u>	3,61	bc	<i>A</i>	3,90*	fg	<u>A</u>	0,56	cd	<i>B</i>
BGM0279	5,54*	ab	<u>C</u>	2,29	b	<i>A</i>	7,84*	b	<u>C</u>	1,59	b	<i>A</i>	16,73*	a	<u>A</u>	3,11	ce	<i>A</i>	12,71*	de	<u>B</u>	1,51	cd	<i>A</i>
BGM0785	1,05	cd	<u>A</u>	0,77	b	<i>A</i>	1,07	e	<u>A</u>	0,55	b	<i>A</i>	1,61	d	<u>A</u>	0,64	de	<i>A</i>	1,70	g	<u>A</u>	0,71	cd	<i>A</i>
BGM0815	2,94*	bd	<u>C</u>	0,95	b	<i>B</i>	2,04	de	<u>C</u>	1,29	b	<i>AB</i>	5,96*	b	<u>B</u>	3,47	bcd	<i>A</i>	13,34*	d	<u>A</u>	2,95	bc	<i>AB</i>
Cacau	2,88	bd	<u>BC</u>	1,19	b	<i>B</i>	1,20	e	<u>C</u>	1,30	b	<i>B</i>	5,13	bc	<u>B</u>	5,57	bc	<i>A</i>	10,04*	e	<u>A</u>	1,47	cd	<i>B</i>
BRS Dourada	3,76	bc	<u>C</u>	2,16	b	<i>AB</i>	4,61*	cd	<u>C</u>	1,22	b	<i>B</i>	7,07*	b	<u>B</u>	3,96	bc	<i>A</i>	17,99*	c	<u>A</u>	3,35	bc	<i>AB</i>
BRS Formosa	7,36*	a	<u>C</u>	2,35	b	<i>B</i>	6,32*	bc	<u>C</u>	1,64	b	<i>B</i>	16,66*	a	<u>B</u>	6,05	b	<i>A</i>	21,73*	b	<u>A</u>	5,26	ab	<i>A</i>
GCP001	5,24	ab	<u>D</u>	5,62	a	<i>B</i>	12,56*	a	<u>C</u>	6,97	a	<i>B</i>	15,93*	a	<u>B</u>	11,10	a	<i>A</i>	35,69*	a	<u>A</u>	6,55	a	<i>B</i>

*Diferença significativa entre médias de um mesmo genótipo, na mesma época de colheita, em diferentes tratamentos (controle e sequeiro); letras minúsculas na mesma coluna indicam diferenças significativas entre as médias dos genótipos, na mesma época de colheita, em um mesmo tratamento hídrico; letras maiúsculas na mesma linha indicam diferenças significativas de um mesmo genótipo entre as diferentes épocas de colheita pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), sendo letras em itálico e sublinhadas relacionadas ao controle e itálico para o experimento com déficit hídrico.

Ranqueamento dos genótipos e correlação com base no índice de seleção

Independente da época de colheita e da condição hídrica, os genótipos GCP001 e BGM0089 não sofreram alterações no ranqueamento, tendo sido classificados em primeiro e décimo, respectivamente (Tabela 5). Em contrapartida, pode-se observar que os demais genótipos variaram de posição entre as diferentes épocas de colheita. Entretanto, considerando a seleção de 50% dos genótipos (5) em cada época de colheita no experimento irrigado aos 4 MAP houveram quatro genótipos que também seriam selecionados aos 12 MAP (BGM0815, BRS Dourada, BRS Formosa e GCP001), enquanto que aos 5 MAP somente haveria dois genótipos em comum (BRS Dourada e GCP001) e aos 7 MAP apenas três (BGM0815, BRS Formosa e GCP001). Por outro lado, a seleção aos 4 MAP praticada no experimento de sequeiro resultaria na seleção de apenas um genótipo comum aos 12 MAP (GCP001), enquanto que a seleção aos 5 MAP resultaria em três genótipos comuns (GCP001, Cacau e 9624-09) e a seleção aos 7 MAP resultaria em quatro genótipos comuns (GCP001, BGM0815, Cacau e 9624-09) (Tabela 5).

Tabela 5. Ranqueamento dos dez genótipos de mandioca baseado no índice de seleção de Mulamba e Mock (1978) avaliados em seis características agrônômicas em plantas de mandioca colhidas em quatro épocas (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio) e dois tratamentos hídricos (irrigado e déficit).

Genótipo	4 MAP		5 MAP		7 MAP		12 MAP	
	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit	Irrigado	Déficit
9624-09	6	8	4	3	5	2	7	5
BGM0089	10	10	10	10	10	10	10	10
BGM0163	7	5	5	8	7	6	8	9
BGM0279	2	2	2	2	2	4	6	6
BGM0785	8	4	7	5	9	9	9	8
BGM0815	5	7	8	7	4	5	3	3
Cacau	9	9	9	4	8	3	4	4
BRS Dourada	4	3	3	9	6	8	5	7
BRS Formosa	3	6	6	6	3	7	2	2
GCP001	1	1	1	1	1	1	1	1

Correlação entre as épocas de colheitas e tratamentos hídricos

As estimativas da correlação de Pearson entre todas as combinações de experimentos (irrigado e déficit hídrico) e diferentes épocas de colheita

apresentaram valores positivos, variando de 0,61 a 0,98 (Figura 2). Portanto, embora nos experimentos com déficit hídrico os genótipos tenderam a apresentar menor desempenho agrônômico para a maioria das características, isso não afetou a direção da correlação entre estes experimentos e as épocas de colheita.

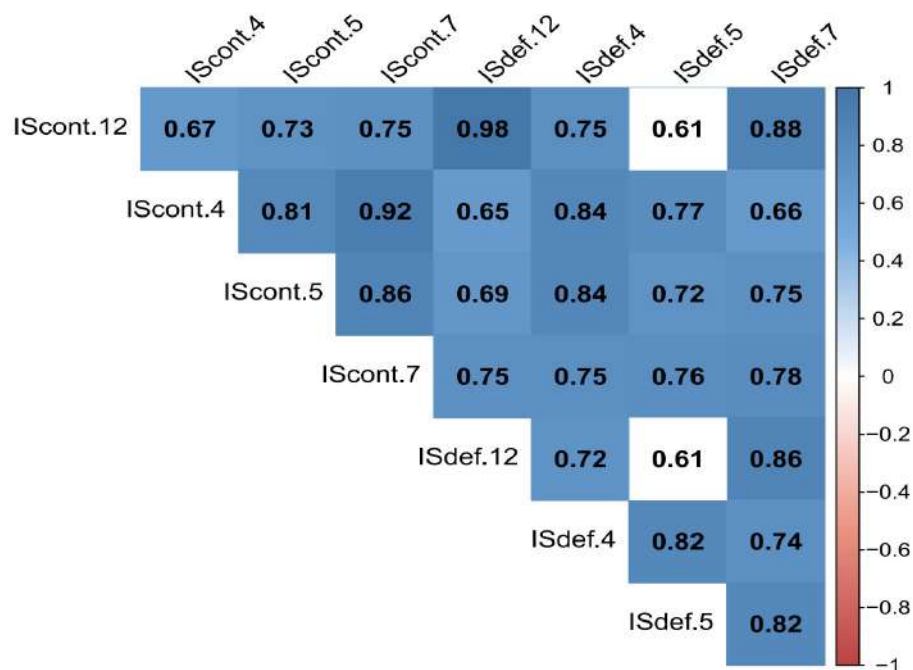


Figura 2. Correlações de Pearson entre o índice de seleção e quatro épocas de colheita, em dois tratamentos hídricos (irrigado e déficit hídrico). Experimento irrigado: com colheita aos 4 meses após o plantio (MAP) (IScont.4), 5 MAP (IScont.5), 7 MAP (IScont.7), 12 MAP (IScont.12); Experimento de sequeiro: com colheita aos 4 MAP (ISdef.4), 5 MAP (ISdef.5), 7 MAP (ISdef.7) e 12 MAP (ISdef.12).

Considerando apenas o experimento irrigado, as estimativas da correlação do índice de seleção aos 12 MAP (IScont.12) com as épocas de colheita aos 4 MAP (IScont.4), 5 MAP (IScont.5) e 7 MAP (IScont.7) aumentaram ligeiramente ao longo das épocas, com valores de 0,67, 0,73 e 0,75, respectivamente (Figura 2). Por outro lado, no tratamento de déficit hídrico as estimativas da correlação do índice de seleção aos 12 MAP (ISdef.12) com as épocas de 4 MAP (ISdef.4), 5 MAP (ISdef.5) e 7 MAP (ISdef.7) foram de 0,72, 0,61 e 0,86, respectivamente. Portanto, independente da condição hídrica houve uma tendência de aumento na correlação dos atributos agrônômicos com as épocas de colheita, sendo que houve maior correlação entre 7 MAP e 12 MAP. Entretanto, é possível especular se os pequenos

aumentos nestas correlações em relação aos 4 MAP e 5 MAP justifiquem de fato ter que esperar mais dois ou três meses para selecionar os melhores genótipos para tolerância ao déficit hídrico.

Adicionalmente, as correlações de Pearson para uma mesma época considerando as duas condições hídricas, foram de elevada magnitude, ou seja, 0,84 (IScont.4 x ISdef.4), 0,75 (IScont.5 x ISdef.5), 0,78 (IScont.7 x ISdef.7) e 0,98 (IScont.12 x ISdef.12) (Figura 2). Isto indica uma forte correlação na seleção dos genótipos de mandioca nos dois tratamentos hídricos.

Desempenho dos grupos de tolerância e suscetibilidade ao estresse hídrico

A dispersão dos dados referentes ao desempenho dos três grupos contrastantes para tolerância ao déficit hídrico (susceptível, moderadamente tolerante e tolerante) nos diferentes períodos de colheita, demonstrou um incremento na AP ao longo das épocas de colheita, tanto nas condições de déficit hídrico (déficit) como nos ensaios irrigados (controle), embora o incremento na AP tenha sido maior no tratamento irrigado (Figura 3). À exceção da colheita aos 12 MAP na condição irrigada, não houve diferenças significativas na altura das plantas considerando o padrão de tolerância ao déficit hídrico estabelecido.

Para DC também houve uma tendência de aumento gradual ao longo das épocas de colheita em ambos as condições hídricas com aumento menos pronunciado no experimento sob déficit hídrico (Figura 3). As médias dos três grupos de tolerância ao déficit hídrico apresentaram a maior amplitude e dispersão no tratamento irrigado aos 12 MAP, quando comparadas ao sequeiro, e de modo geral, não houve incremento para esta característica no experimento de sequeiro do 7 para 12 MAP. Outra observação importante é que não houve grandes diferenças no DC nos genótipos pertencentes aos três grupos de tolerância ao déficit hídrico até os 5 MAP.

Em relação à RF, as notas atribuídas aos genótipos tolerantes aos 4 MAP foram bastante discrepantes nos experimentos com e sem déficit hídrico (Figura 3). Aos 5 MAP a maior RF dos acessos tolerantes ao déficit hídrico não foi verificada, embora aos 7 e 12 MAP esta diferença tenha sido novamente observada neste grupo de genótipos. Independentemente da época de avaliação, a maior dispersão dos dados de RF foi observada nos ensaios submetidos ao déficit hídrico, certamente como resposta diferencial dos genótipos não somente entre, mas

também dentro destes grupos. Em alguns acessos do grupo suscetível, a RF chegou à sua escala mais baixa (nota 1) à partir do 5 MAP, como resultado do forte estresse hídrico. Por outro lado, nas plantas no tratamento irrigado a menor nota de RF foi observada somente aos 12 MAP, estando neste caso associada à maturação das plantas que resulta em queda natural das folhas. Os genótipos do grupo moderadamente tolerante apresentaram maiores valores médios para RF aos 4, 5 e 7 MAP, no entanto, aos 12 MAP o desempenho foi semelhante ao dos genótipos do grupo suscetível independente da condição hídrica.

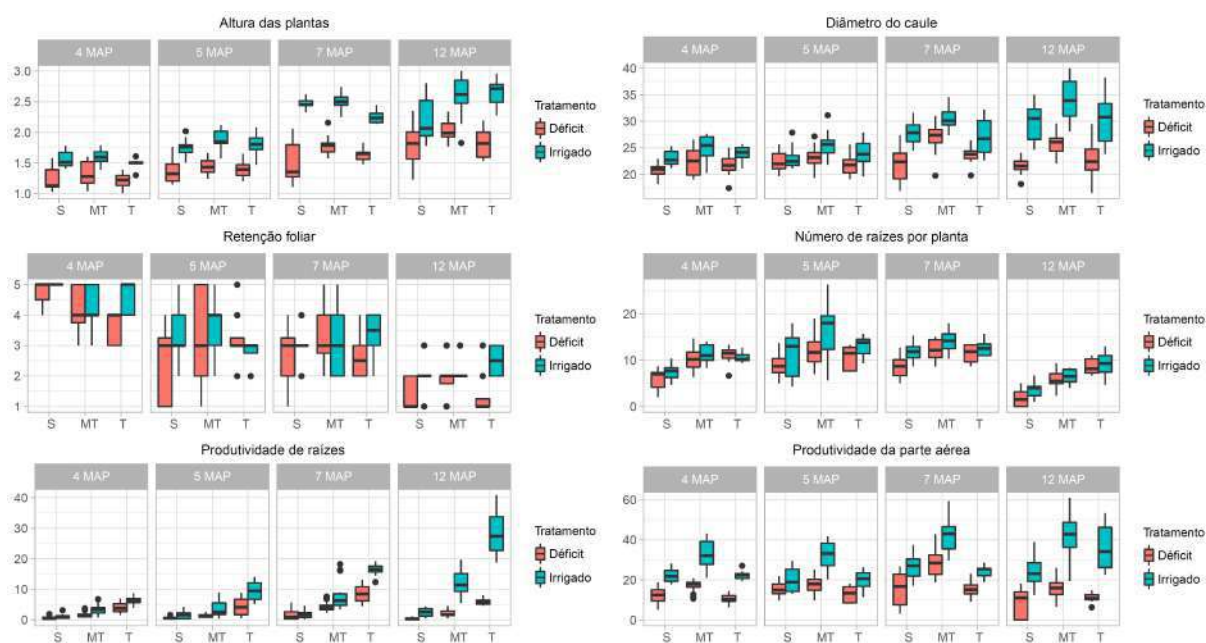


Figura 3. Boxplots de seis características agrônômicas avaliadas em genótipos de mandioca, divididos em três grupos com base na sua tolerância ao déficit hídrico, sendo S: suscetível, MT: moderadamente tolerante, e T: tolerante. Avaliações realizadas em experimentos irrigados (Controle) e de sequeiro (déficit), colhidas em diferentes épocas após o plantio (4, 5, 7 e 12 meses após o plantio - MAP).

O NRP apresentou tendência à redução ao longo das épocas de colheita em ambas as condições hídricas, com valores máximos observados aos 5 MAP (Figura 3). Esta tendência é esperada considerando que o início da tuberização das raízes ocorre entre 3 e 4 MAP na maioria das variedades de mandioca (ALVES, 2002). Com isso, nem todas as raízes emitidas nesta fase vão se tornar raízes de reserva, de modo que existe uma tendência natural de manutenção apenas daquelas que

iniciaram a tuberização nesta etapa do desenvolvimento. A diferença entre os grupos de tolerância foi baixa nos dois tratamentos hídricos aos 12 MAP, embora os genótipos do grupo tolerante apresentaram maior NRP em comparação com os demais grupos, independente da condição hídrica. Outra observação importante foi que o NRP nas duas condições hídricas foi muito semelhante, sobretudo nas fases mais tardias (7 e 12 MAP). Isso evidencia que mesmo sob intenso estresse hídrico as plantas de mandioca tendem a manter as raízes que foram formadas na fase inicial de crescimento, quando as condições hídricas não foram restritivas.

No tratamento irrigado, houve tendência de aumento de PTR ao longo das épocas de colheita, com valores máximos observados aos 12 MAP (Figura 3). Além disso, houve maior dispersão dos dados, sobretudo a partir do 5 MAP, possivelmente como resposta diferenciada dos genótipos para este tipo de condição hídrica. Por outro lado, no experimento sob déficit hídrico, houve apenas um ligeiro aumento da PTR ao longo do ciclo da cultura, com dispersão máxima registrada aos 7 MAP. Considerando o desempenho dos três grupos, os genótipos tolerantes ao déficit hídrico apresentaram as maiores médias de PTR em todas as épocas de colheita e em ambas as condições hídricas, embora não tenha sido observada diferença na PTR do 7 para o 12 MAP.

Para PPA, de maneira geral, também houve tendência ao incremento ao longo dos meses nos dois tratamentos (controle e déficit), porém sempre com máxima produtividade nos tratamentos controle (Figura 3). A maior variação no desempenho das plantas na condição irrigada foi observada aos 12 MAP, enquanto no experimento sob déficit hídrico, os incrementos em PPA foram discretos, sendo que a maioria apresentou valores máximos de PPA aos 7 MAP. De forma semelhante à PTR a PPA não aumentou do 7 para o 12 MAP no experimento com déficit hídrico, indicando que o platô de produtividade para estas duas características já foi atingido aos 7 MAP e que ganhos de produtividade nestas condições de semiárido à partir deste período não foram observadas, mesmo em clones com maior tolerância ao déficit hídrico.

DISCUSSÃO

Efeito do estresse hídrico

Embora a mandioca seja considerada uma espécie com capacidade de se desenvolver bem em condições marginais de cultivo, não existe na literatura um

consenso sobre quais seriam os limites deste déficit hídrico, para garantir produtividades mínimas. Adjebeng-Danquah et al. (2016) consideraram que uma precipitação anual de cerca de 1.100 mm com longos períodos de seca (4-5 meses) e temperaturas médias de 33,67°C, foram suficientes para a imposição de condições adversas ao desenvolvimento das plantas. Outros autores, como Bakayoko et al. (2009) e Laban et al. (2013) também relataram que mesmo com precipitação anual acima de 1.000 mm, a distribuição desuniforme desta precipitação resultou em períodos propensos de déficit hídrico para seleção de genótipos mais tolerantes. Por outro lado, condições mais adversas de estresse hídrico foram impostas nos experimentos conduzidos por Oliveira et al. (2017) no Nordeste do Brasil (Petrolina - PE), que registraram precipitação anual de apenas 164 mm e 289 mm nos anos de 2013 e 2014, respectivamente.

Entre os meses de abril e setembro de 2016, a precipitação foi inexpressiva (Figura 1), garantindo a imposição de déficit hídrico intenso. Portanto, o estresse hídrico imposto no presente trabalho foi drástico o suficiente para possibilitar uma diferenciação dos genótipos e o entendimento das correlações entre características agrônômicas avaliadas em colheitas precoces com o ranqueamento final dos genótipos aos 12 MAP.

Todos os genótipos e características relacionadas à parte aérea e raiz foram influenciadas pela época de colheita, conforme evidenciado pela significância da interação genótipo × época de colheita. Isso nos permite inferir que a expressão fenotípica tanto de características associadas à parte aérea como de raiz é resultado da atuação conjunta de diversos fatores associados às condições ambientais e à genética da variedade utilizada. A não significância dessa interação para DC e NRP indicou certa estabilidade na expressão destas duas características independente da condição hídrica. Isso certamente só foi possível porque foram dadas condições adequadas de crescimento das plantas até os três primeiros meses de desenvolvimento, sobretudo no tratamento com déficit hídrico.

A mandioca é considerada uma cultura que não possui ciclo de crescimento determinado, como o milho e sorgo, por exemplo, de modo que é esperado que a altura média das plantas aumente com o avanço da idade das plantas, dentro de certos limites. Entretanto, de acordo com Oliveira et al. (2017) sob condições de déficit hídrico, a AP foi 30% menor quando comparado com plantas desenvolvidas em condição irrigada. No presente trabalho as reduções médias variaram conforme

a época de colheita, ou seja, 19%, 23%, 31% e 23% aos 4, 5, 7 e 12 MAP, respectivamente. De acordo com Alves (2006), até os 6 MAP ocorre a definição do padrão de ramificação e arquitetura da planta, o que ajuda a explicar a baixa amplitude da AP até os 7 MAP no experimento irrigado. Após esse período, as diferenças genótípicas influenciam diretamente na expressão fenotípica da arquitetura das plantas, resultando em maior amplitude na AP para a maioria dos genótipos. Por outro lado, no experimento de sequeiro as maiores amplitudes entre as médias da AP ocorreram à partir dos 7 MAP. Assim, é possível que prolongados períodos de seca também influenciem na expressão de atributos morfológicos de crescimento das plantas.

O desenvolvimento e crescimento da mandioca em condições ideais de cultivo, sobretudo em condições irrigadas, influenciam diretamente no aumento da produtividade da parte aérea e raízes. Isso porque o crescimento é contínuo com o aumento gradual do número de folhas e, para alguns genótipos, aumento do número de hastes e ramificações (EL-SHARKAWY, 2007). Estes relatos corroboram os resultados obtidos no experimento irrigado, em que houve um aumento na PPA ao longo das diferentes épocas colheita, não havendo diferença significativa para esta característica aos 7 e 12 MAP. Essa correlação é possível uma vez que aos 7 MAP a planta da mandioca já tem suas características anatômicas bem definidas e, aos 12 MAP, tendem a estabilizar o crescimento para início de um novo ciclo (ZHAO et al., 2014).

As plantas de mandioca possuem maior demanda por fotoassimilados nas fases iniciais de desenvolvimento, principalmente nos três primeiros meses, época de formação das raízes de armazenamento. Após este período, uma deficiência hídrica severa faz com que as plantas tendam a utilizar o máximo de carboidratos e proteínas da parte aérea para serem alocadas nas raízes (ADJEBENG-DANQUAH et al., 2016). Isso ajuda a explicar os baixos incrementos observados para PPA aos 7 e 12 MAP, período em que houve forte limitação hídrica. De acordo com El-Sharkawy (2007), em períodos prolongados de seca, a mandioca reduz a área da copa por meio da perda das folhas mais velhas e indução da formação de novas folhas fotossinteticamente mais ativas. Esta estratégia de adaptação à seca contribui para redução da PPA, porém é uma forma de compensar as perdas da produtividade assim que água estiver disponível.

A tendência de redução nos valores de RF ao longo das épocas de colheita deve-se ao fato de que, sob condições normais de disponibilidade de água, a mandioca produz folhas novas até 10 MAP, ocorrendo uma redução após esse período em função do ciclo de maturação das hastes (ALVES, 2002; ALVES; SETTER, 2004; HUE et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2017). Entretanto, na presença do estresse hídrico, e dependendo do genótipo, esta redução na RF foi bastante pronunciada à partir de 5 MAP, quando as menores notas (valor igual a um) foram observadas.

A retenção foliar influencia diretamente o desempenho dos genótipos de mandioca, sobretudo em condições de deficiência hídrica, nas quais a abscisão da folha reduz a transpiração e a perda de água pela planta, embora haja prejuízos na interceptação de irradiação solar e a assimilação de carbono, afetando diretamente a produtividade de raízes (LENIS et al., 2006; ZHANG et al., 2010). De fato, com a restrição hídrica, muitos genótipos não apresentaram um índice de área foliar suficiente para alcançar elevada produtividade de raiz, sobretudo nos últimos meses antecedentes à colheita. Entretanto, de acordo com El-Sharkawy e Tafur (2010), o aumento da retenção foliar pode ser uma estratégia interessante para aumentar a produtividade da mandioca, sobretudo quando submetida a prolongados períodos de seca. Assim, os genótipos BRS Formosa, GCP001 foram bastante promissores para aumento da RF no sistema de produção da mandioca nas condições semiáridas.

O diâmetro de caule é uma característica que pode ser utilizada como indicador de qualidade do material de plantio, uma vez que caules mais espessos apresentam as maiores quantidades de reservas nutritivas, tais como amido, que resulta em desenvolvimento inicial mais vigoroso das plantas (DUQUE; SETTER, 2013). Ao longo do desenvolvimento das plantas de mandioca, o caule torna-se um dreno de fotoassimilados, havendo deposição de substâncias de reserva, que resulta em aumento do DC ao longo das diferentes fases de desenvolvimento e crescimento das plantas (WEI et al., 2016). Em condições ideais, o particionamento de fotoassimilados nas plantas de mandioca ocorre normalmente entre a parte aérea e radicular. Isso explica o fato de que em condições irrigadas as plantas apresentaram um crescimento contínuo em função das épocas de colheita. Por outro lado, a imposição do estresse hídrico tende a reduzir a alocação de biomassa no caule das plantas e aumentar a biomassa das raízes (LEBOT, 2009). Isso pode explicar o baixo incremento no DC após o início da aplicação do estresse hídrico.

O maior número de raízes observado aos 5 MAP pode ser devido ao fato de que grande parte das raízes fibrosas produzidas até este período iniciaram o processo de tuberização e, portanto, foram contabilizadas nas avaliações. Com o desenvolvimento das plantas apenas uma parte destas raízes continuam o processo de tuberização até o final do ciclo da cultura, o que explica a redução na contagem do NRP aos 7 e 12 MAP. De fato, alguns autores já relataram que até os 3 MAP, a mandioca produz raízes fibrosas na qual apenas uma parte delas é transformada em raízes de reserva por meio do processo de tuberização (CHAWEEWAN; TAYLOR, 2015; FIGUEIREDO et al., 2015), enquanto que a tuberização é mais intensa entre os 6 a 10 MAP (EL-SHARKAWY, 2007).

Além disso, como após os 3 MAP foram registrados os menores índices pluviométricos, é possível especular que este fator pode ter resultado na priorização da tuberização apenas de algumas raízes, como mecanismo natural de sobrevivência neste tipo de estresse abiótico. Outros autores já relataram situações parecidas, em que as plantas de mandioca reduziram em média o número de raízes em cerca 28% (LABAN et al., 2013) e 42% (OLIVEIRA et al., 2015) em condições de déficit hídrico, quando comparado com condições favoráveis de desenvolvimento das plantas. Os genótipos BRS Formosa e GCP001 apresentaram os maiores valores de NR nas duas condições hídricas, corroborando com os estudos reportados por Oliveira et al. (2015), nos quais esses genótipos são considerados tolerante à seca e com bom desempenho em condições normais de desenvolvimento das plantas.

O aumento da PTR ao longo das épocas de colheitas e maior PTR no experimento irrigado em relação ao de déficit hídrico é resultado do suprimento adequado de água durante o desenvolvimento das culturas, tendo como consequência máxima expressão do potencial genético. A produtividade de raízes acima de 10 t ha^{-1} observada no experimento irrigado aos 5 e 7 MAP podem estar relacionadas à capacidade de alguns genótipos iniciarem a tuberização de forma precoce, conforme demonstrado por Olasanmi et al. (2017). De acordo com Alves (2006), o déficit hídrico após 5 MAP faz com que as plantas estabilizem os processos de assimilação de nutrientes nas raízes e passe a utilizá-los para o crescimento da parte aérea, explicando as maiores médias da produtividade de raízes dos genótipos Cacau e GCP001 aos 7 MAP, quando comparado com as demais épocas de colheita.

Relação entre as épocas de colheitas e os tratamentos hídricos

A seleção de genótipos de mandioca de alto desempenho agrônômico é um processo oneroso, com tempo médio de oito a dez anos, desde o início da seleção até a recomendação de cultivo (CEBALLOS et al., 2004). Nesse sentido, a redução do tempo de experimentação é um desejo dos melhoristas, pois isso reflete em maior eficiência e aumento dos ganhos genéticos com a seleção. Para condições de déficit hídrico, em geral, os trabalhos avaliam os genótipos até o momento da colheita, realizada aos 12 MAP (AIDAR et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2017), sendo posteriormente realizada a seleção dos genótipos mais promissores. No entanto, poucos trabalhos enfatizam a seleção precoce em clones de mandioca visando à tolerância ao déficit hídrico, relacionando o desempenho desses clones com diferentes épocas de colheita (ADJEBENG-DANQUAH et al., 2016; OLASANMI et al., 2017).

Correlações de alta magnitude (0,86) entre os índices de seleção aos 7 e 12 MAP no experimento de sequeiro demonstram que colheitas precoces podem ser um bom indicador dos atributos produtivos do período de máxima maturidade fisiológica das plantas. Outros experimentos conduzidos na Guiné com 32 genótipos de mandioca também demonstraram que as avaliações aos 7 MAP são bons preditores da produtividade final (12 MAP) (OLASANMI et al., 2017). Embora de menor magnitude com comparação com a colheita aos 7 MAP, as correlações dos índices de seleção das colheitas dos experimentos de sequeiro 4 MAP × 12 MAP (0,72) e 5 MAP × 12 MAP (0,61) foram consideradas elevadas e bastante úteis para uso rotineiro dos programas de desenvolvimento de germoplasma com maior tolerância ao déficit hídrico.

As principais vantagens das colheitas e seleções aos 4 ou 5 MAP seriam a realização de até três ciclos de avaliação anuais em condições de déficit hídrico; e a fenotipagem de um grande número de genótipos de mandioca, tendo em vista que entre 4 e 5 MAP as plantas de mandioca não estão completamente desenvolvidas e com isso o esforço dispendido nas mensurações dos atributos agrônômicos é bastante reduzido, o que resulta em maior otimização da mão-de-obra empregada nas avaliações. De fato, nas condições de sequeiro, entre 4 e 5 MAP as características agrônômicas avaliadas variaram de: 1,07 a 1,57 m para AP; 6,90 a

21,67 t ha⁻¹ para PPA; notas de 1,00 a 5,00 para RF; 19,93 a 25,03 mm (DC); 3,19 a 14,17 (NRP); e 0,14 a 6,97 t ha⁻¹ (PTR).

A estabilidade do desempenho dos genótipos ao longo das épocas de plantio é um dos fatores chave para a seleção com alta acurácia de genótipos tolerantes à seca. Os resultados mostraram que os genótipos com melhor e pior desempenho possuem estabilidade, não apresentando grandes alterações no ranqueamento devido à época de colheita e condições de disponibilidade de água. Portanto, a indicação da possibilidade de realização de colheitas precoces também foi corroborada com base no ranqueamento dos genótipos de mandioca em diferentes épocas de colheita. De modo geral, a colheita aos 4 MAP revelou que a maioria dos genótipos superiores identificados pelas colheitas com máximo crescimento vegetativo (12 MAP) seriam selecionados nesta fase no experimento irrigado, enquanto que no experimento de sequeiro isso ocorreria aos 5 MAP. De modo geral, é possível que a seleção precoce em populações de mandioca pode ser eficiente para selecionar genótipos com melhor desempenho e descartar aqueles com piores desempenhos. Assim, estas indicações podem orientar e otimizar o esforço de fenotipagem dos trabalhos de desenvolvimento de germoplasma ou mesmo a avaliação em grandes populações segregantes para tolerância ao déficit hídrico.

Ao avaliarem doze genótipos de mandioca 5 a 13 meses após o plantio, Tumuhimbise et al. (2015), relataram que o desenvolvimento de raízes foi dependente do tempo, mas que na maioria dos genótipos o comportamento produtivo não foi muito alterado entre 5 e 9 MAP e que este período poderia ser indicado para seleção precoce com alta eficiência. Adicionalmente, Adjebeng-Danquah et al., (2016) observaram que dos vinte genótipos avaliados em condições de deficiência hídrica a maioria apresentou uma tendência de aumento na correlação de produtividade inicial com a época de colheita em 12 MAP, apontando ainda que aos 6 MAP a maioria dos genótipos acumulou mais de 50% de sua produção final de raízes.

De fato, o déficit hídrico severo pode afetar drasticamente as características relativas à produtividade, mas aquelas que conseguem manter um padrão de desenvolvimento ao longo do ciclo apresentam-se como promissores para uma avaliação precoce. Apesar de ser considerada uma cultura de ciclo longo este estudo demonstra que, independente da condição hídrica houve uma tendência de aumento na correlação dos atributos agronômicos com as épocas de colheita, havendo maior

correlação entre 7 MAP e 12 MAP. Mesmo não sendo experimentos desenvolvidos em condições semiáridas, Kamau et al. (2011) também observaram a possibilidade de selecionar genótipos precoces com elevada produtividade de raízes aos 7 MAP. Em outro estudo, Akpan et al. (2017) reportaram que três genótipos de mandioca foram capazes de produzir mais de 30 t ha⁻¹ de raízes aos 8 MAP.

Em condições de cultivo sem restrições hídricas o tempo de colheita é um fator de suma importância para otimizar a produtividade e lucratividade das lavouras de mandioca, além de atender às exigências comerciais e indústrias. O desenvolvimento de variedades melhoradas com capacidade de produção precoce e manutenção das qualidades da raiz por longos períodos é uma demanda frequente do setor produtivo, pois permitiria a comercialização das raízes em condições de preços mais elevados e com isso haveria maximização dos lucros. Por outro lado, havendo restrições hídricas, o desenvolvimento de variedades precoces possibilitaria que os plantios no semiárido brasileiro fossem realizados no curto período chuvoso (2-3 meses) e com isso as plantas teriam suprimento de água no período mais crítico do seu desenvolvimento. Com isso, os agricultores poderiam realizar colheitas precoces para fugir dos períodos seguintes de estiagem extrema, tendo assim uma garantia mínima de produtividade de raízes.

Padrão de resposta dos grupos de tolerância ao estresse hídrico

A variação fenotípica observada por Oliveira et al. (2015) a partir da avaliação de 49 genótipos de mandioca nestas mesmas condições climáticas também foi verificada no presente trabalho. De modo geral, o agrupamento dos genótipos de mandioca com base tolerância ao déficit hídrico considerando a maior PTR aos 12 MAP sob déficit hídrico, permitiu a verificação dos padrões de respostas destes genótipos para seis características agrônômicas. Os genótipos pertencentes ao grupo suscetível (BGM0089, BGM0163 e BGM0785) apresentaram PTR abaixo de 1,0 t ha⁻¹, enquanto que os genótipos do grupo moderadamente tolerante (9624-09, Cacau, BGM0279 e BGM0815) entre 1,0 e 3,0 t ha⁻¹, e os genótipos tolerantes (BRS Dourada, BRS Formosa e GCP001) apresentaram PTR entre 3,0 e 7,0 t ha⁻¹. No trabalho de Oliveira et al. (2017) os genótipos BRS Formosa e BRS Dourada apresentaram médias genotípicas para PTR de 6,86 e 9,94 t ha⁻¹, sendo considerados tolerantes ao déficit hídrico, de forma semelhante aos resultados do presente trabalho.

A definição e padrões de respostas dos genótipos tolerantes e suscetíveis ao déficit hídrico é escasso na literatura, embora exista um vasto número de pesquisas sobre o efeito do estresse hídrico na produtividade de raízes de mandioca. Assim, ao definir grupos de tolerância ao déficit hídrico, o presente trabalho permite que associações entre tolerância e desempenho de características agrônômicas sejam melhor exploradas. Os genótipos do grupo suscetível apresentaram maior amplitude para as características AP e PPA aos 7 e 12 MAP no experimento sob déficit hídrico. Isso indica que os genótipos do grupo suscetível tenderam a priorizar o desenvolvimento da parte aérea, alocando os fotoassimilados no caule e folhas, e não nas raízes.

Em geral, os genótipos do grupo moderadamente tolerante apresentaram maior AP, PPA, RF e DC a partir de 5 MAP no tratamento sob déficit hídrico. Isso evidenciou que esses genótipos, mesmo tendo a capacidade de manter as taxas de crescimento superiores aos demais, não foram eficientes em converter os fotoassimilados produzidos em amido nas raízes, em função das menores médias de NRP e PTR em relação ao grupo tolerante. Por outro lado, o grupo tolerante apresentou valores intermediários para as características da parte aérea a partir do 5 MAP no experimento sob déficit hídrico, porém os genótipos deste grupo apresentaram maior produtividade de raízes desde os 4 MAP. Portanto, é esperado que a seleção de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico, tendo como principal critério a maior produtividade de raízes, possa ser realizada de forma precoce já aos 4 MAP.

Perspectivas para uso no melhoramento para aumento da tolerância ao déficit hídrico

Apesar de ser considerada uma cultura tolerante a seca, a mandioca sofre perdas consideráveis de até 80% na produtividade, sobretudo nos meses iniciais de crescimento (BEYENE, 2012; EL-SHARKAWY, 2007). Diante deste agravante, um dos principais objetivos dos programas de melhoramento genético da mandioca é identificar genótipos que tenham a capacidade de produzir e se desenvolver em regiões onde a seca é um fator limitante na produtividade (LENIS et al., 2006; BUDAK et al., 2013).

A obtenção de novas variedades com maior tolerância ao déficit hídrico é atualmente uma meta principal no melhoramento de mandioca, já que a água é o

principal fator que limita a produtividade de raízes, sobretudo em regiões semiáridas no Nordeste do Brasil. Portanto, métodos que permitam acelerar a identificação dos genótipos mais tolerantes podem trazer enormes vantagens para redução do custo do programa de pesquisa. Neste contexto, ferramentas/estratégias que possibilitem a implementação de fenotipagem eficiente tem sido um ponto-chave para alcançar esse objetivo.

A fenotipagem é atualmente um dos principais gargalos no melhoramento visando tolerância ao déficit hídrico em diversas espécies (PEIRONE et al., 2018), tendo em vista que os procedimentos convencionais para fenotipagem de características complexas geralmente são trabalhosos, demorados e de baixo rendimento (CHEN et al., 2014). Atualmente, diversas plataformas de fenotipagem em condições ambientais controladas têm sido desenvolvidas com intuito de prever o desempenho agrônomo dos genótipos em condições de campo. Contudo, os dados fenotípicos coletados em condições controladas em estágios vegetativos não têm apresentado alta correlação com o desempenho destes genótipos em condições de campo (ARAUS; CAIRNS, 2014; JUNKER et al., 2015).

Dado que a fenotipagem em ambientes controlados visando a predição do desempenho agrônomo em campo é usualmente questionada, neste trabalho foi avaliado o comportamento produtivo de diversos genótipos em campo, em diferentes colheitas precoces visando identificar sua correlação com o potencial produtivo das plantas no final de ciclo. Portanto, a avaliação ocorreu em campo e nas mesmas condições ambientais onde as plantas serão selecionadas.

Outro aspecto importante na fenotipagem das características mais relevantes do ponto de vista do melhoramento é a identificação do estágio de crescimento na qual o desempenho das características-alvo possui um papel mais prevalente na performance agrônoma final da cultura. Este é o estágio no qual a correlação entre a característica e a produtividade final é maior e, portanto, pode ser mais diagnóstica e efetiva para seleção precoce dos genótipos de interesse. Em nosso estudo, foi verificado que: 1) o ranqueamento dos genótipos de mandioca variou em função das diferentes épocas de colheita, porém a manutenção daqueles com melhor e pior ranqueamento praticamente permaneceu inalterado, indicando a possibilidade de realização de colheitas precoces como estratégia para otimizar a seleção de genótipos produtivos e tolerantes ao déficit hídrico; 2) embora os experimentos com déficit hídrico tenham apresentado menor desempenho agrônomo, isto não afetou

a direção da correlação entre estes experimentos e as épocas de colheita; 3) o ranqueamento realizado pela seleção precoce aos 4 e 5 MAP nos experimentos irrigados e de sequeiro, respectivamente, foi bastante similar ao ranqueamento dos genótipos aos 12 MAP.

De acordo com Tuberosa (2012), as características a serem consideradas como potenciais alvos de seleção para aumento da tolerância ao déficit hídrico devem possuir alta herdabilidade e ser geneticamente correlacionadas com a produtividade. No presente estudo, as características sob seleção precoce foram as mesmas utilizadas na avaliação final e, portanto, as chances de sucesso na indicação dos materiais mais promissores certamente serão maximizadas.

REFERÊNCIAS

ADJEBENG-DANQUAH, J.; GRACEN, V.E.; OFFEI S.K.; ASANTE I.K.; MANUADUENING, J. Agronomic performance and genotypic diversity for morphological traits among cassava genotypes in the Guinea Savannah Ecology of Ghana. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 19, p. 99 -108, 2016.

ADJEBENG-DANQUAH, J.; SAFO-KANTANKA, O. Genetic variation in foliage and protein yield of some elite cassava (*Manihot esculenta* Crantz) genotypes in Ghana. **Journal of Plant Breeding and Genetics**, v.1, p.46-55, 2013.

AIDAR, S.T.; MORGANTE, C.V.; MELO CHAVES, A. R.; NETO, B. P. C.; VITOR, A. B.; MARTINS, D. R. P. S.; OLIVEIRA, E. J. Características fisiológicas, produção total de raízes e de parte aérea em acessos de *Manihot esculenta* em condições de déficit hídrico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 685-696, 2015.

AKPAN, E.A. UDOH, V.S. Evaluation of cassava (*Manihot Esculenta* crantz) genotype for yield and yield component, tuber bulking, early maturity in cross river basin flood plains, Itu, Akwa Ibom State, Nigeria. **Canadian Journal of Agriculture and Crops**, v. 2, p. 68 -73, 2017.

ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. Cassava: Biology, production and utilization. Oxon: **CABI Publishing**, p.67-89, 2002.

ALVES, A. A. C.; SETTER, T. L. Abscisic acid accumulation and osmotic adjustment in cassava under water deficit. **Environmental and Experimental Botany**, v. 51, n. 3, p. 259-271, 2004.

ALVES, A.A.C. Fisiologia da mandioca. In: **EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical. Aspectos socioeconômicos e agronômicos da mandioca**, Cap.7, p.138-169, 2006.

ARAUS, J. L.; CAIRNS, J. E. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. **Trends in Plant Science**, v.19, p.52–61, 2014.

ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. **Brazilian Journal Veterinary Research Animal Science**, v.50, p.488-492, 2013.

BAKAYOKO, S.; TSCHANNEN A, NINDJIN, C.; DAO D.; GIRARDIN O.; ASSA A. Impact of water stress on fresh tuber yield and dry matter content of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Côte d'Ivoire. **African Journal of Agricultural Research**, v.4, p. 21-27, 2009.

BEYENE, T.M.; Production, storage and post-harvest utilization system of cassava: postharvest physiology, handling and utilization of cassava. **Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Germany**, p.1-68, 2012.

BUDAK, H.; KANTAR, M.; KURTOGLU, K.Y. Drought tolerance in modern and wild wheat. **The Scientific World Journal**, v. 8, p. 1 -16, 2013.

CEBALLOS, H.; IGLESIAS, C.A.; PEREZ J.C.; DIXON, A.G.O. Cassava breeding: opportunities and challenges. **Plant Molecular Biology**, v.56, p. 503-515, 2004.

CHAWEEWAN, Y.; TAYLOR, N. Anatomical assessment of root formation and tuberization in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Tropical Plant Biology**, v.8, p. 1–8, 2015.

CHEN, D.; NEUMANN, K.; FRIEDEL, S.; KILIAN, B.; CHEN, M.; ALTMANN, T.; KLUKAS C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. **Plant Cell**, v.26, p.4636–4655, 2014.

DUQUE, O.; SETTER, T.L. Cassava Response to water deficit in deep pots: root and shoot growth, ABA, and carbohydrate reserves in stems, leaves and storage roots. **Tropical Plant Biology**, v.6, p. 199–209, 2013.

EL- SHARKAWY, M.A; TAFUR, S.M. Comparative photosynthesis, growth, productivity, and nutrient use efficiency among tall and short stemmed rain-fed cassava cultivars. **Photosynthetica**, v. 48, p 173 - 188, 2010.

EL-SHARKAWY, M.A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.257-286, 2007.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Documento disponível em: <http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/index.php?op=dadosmet>. 2016. Acesso em 22 de Março de 2018.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT Data base**. Disponível em <<http://faostat3.fao.org/analysis/Q/QC/E>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2017.

FIGUEIREDO, P.G; MORAES-DALLAQUA M.A.D.; BICUDO, S.J.; TANAMATI, F.Y.; AGUIAR, E.B. Development of tuberous cassava roots under different tillage systems: descriptive anatomy. **Plant Production Science**, v.18, p. 241-245, 2015.

HALLAUER, A.R.; CARENA, M.J.; MIRANDA FILHO, J.D. Quantitative genetics in maize breeding. **Springer**, v.1, p.664, 2010.

HUE, K. T.; VAN, H.T.; LEDIN, I.; WREDLE, E.; SPÖRNDLY, E. Effect of harvesting frequency, variety and leaf maturity on nutrient composition, hydrogen cyanide content and cassava foliage yield. **Australian Journal Animal Science**, v. 25, n.12, p.1691-170. 2012.

JUNKER, A.; MURAYA, M.M.; WEIGELT-FISCHER, K.; ARANA-CEBALLOS, F.; KLUKAS, C.; MELCHINGER, A.E.; MEYER, R.C.; RIEWE, D, ALTMANN, T. Optimizing experimental procedures for quantitative evaluation of crop plant performance in high throughput phenotyping systems. *Frontiers in Plant Science*, v.5, p.770, 2015.

KAMAU, J.; MELIS, R.; LAING, M.; DERERA, J.; SHANAHAN, P.; NGUGI, E.C.K. Farmers' participatory selection for early bulking cassava genotypes in semi-arid Eastern Kenya. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 3, p. 44-52. 2011.

LABAN, T. F.; KIZITO, E. B.; BAGUMA, Y.; OSIRU, D. Evaluation of Ugandan cassava germplasm for drought tolerance. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v.5, p.212-226, 2013.

LEBOT, V. Tropical root and tuber crops: cassava, sweet potato, yams and aroids. **Cambridge: CABI**, p. 413, 2009.

LENIS, J.I.; CALLE, F.; JARAMILLO, G.; PEREZ, J.C.; CEBALLOS, H.; COCK, J.H. Leaf retention and cassava productivity. **Field Crops Research**, v.95, p.126-134, 2006.

MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egypt Journal of Genetics and Cytology**, v.7, p.40-51, 1978.

MULUALEM, T.; BEKEKO, Z. Assessment of conventional breeding on cassava and its physiological adaptive mechanisms: implication for moisture stress. **Asian Journal of Agricultural Research**, v. 9, p. 38-54, 2015.

OKOGBENIN, E.; EKANYAKE, I.J.; PORTO, M.C.M. Genotypic variability in adaptation responses of cassava to drought stress in the Sudan Savanna zone of Nigeria. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 189, p. 376-389, 2003.

OKOGBENIN, E.; SETTER, T. L.; FERGUSON, M.; MUTEKI, R.; CEBALLOS, H.; OLASANMI, B.; FREGENE, M. Phenotypic approaches to drought in cassava: review. **Frontiers Physiology**, v.4, p.1-15, 2013.

OLASANMIA, B.; AKORODA, M.O.; OKOGBENIN.E.; EGESI, C.; NWAOGU, A. S.; TOKULA M. H.; UKAA G. T.; AGBA, A. J.; OGBUEKIRI, H.; NWAKOR, W.; NWAGUMA, F.; EKE-OKORO, O. N.; FREGENE, M. Identification of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) genotypes with early storage root bulking. **Journal of Crop Improvement**, v.31, p.173-182, 2017.

OLIVEIRA, E.J.; MORGANTE, C.V.; TARSO; AIDAR.; CHAVES, A.C.; CRUZ, J.C.; FILHO, M.A.C. Genetic parameters for drought-tolerance in cassava. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 233-241, 2015.

OLIVEIRA, E.J.; MORGANTE, C.V; AIDAR, S.T; CHAVES, A.R.M.; ANTONIO, R.P.; CRUZ, J.L.; FILHO, M. A.C. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v.214, p. 213-188, 2017.

OSUNDARE, O.T.; OYEBAMIJI, K.J. Variability for drought resistance on the growth and yield of five selected cultivars of cassava (*Manihot esculenta*) in Ekiti State, Nigeria. **Journal of Biotechnology and Bioengineering**, v.1, p.1-9, 2017.

PEIRONE, L.S.; IRUJO, G.A.P.; BOLTON, A.; ERREGUERENA, I.; AGUIRREZÁBAL, L.A.N. Assessing the efficiency of phenotyping early traits in a greenhouse automated platform for predicting drought tolerance of soybean in the field. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.587, 2018.

PEREZ, J.C.; LENIS J.I.; CALLE, F.; MORANTE, N.; SANCHEZ, T.; DEBOUCK, D.; CEBALLOS, H. Genetic variability of root peel thickness and its influence in extractable starch from cassava (*Manihot esculenta* Crantz) roots. **Plant Breeding**, v.130, n.6, p.688-693, 2011.

PUTPEERAWIT, P.; SOJIKUL, P.; THITAMADEE, S.; NARANGAJAVANA, J. Genome-wide analysis of aquaporin gene family and their responses to water-deficit stress conditions in cassava. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.121, p.118–127, 2017.

R Core Team. “R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria”. Disponível em: <https://www.R-project.org/>, Acesso em: 20/12/2017.

TUBEROSA, R. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. **Frontiers in Physiology**, v.347, p.1-26, 2012.

TUMUHIMBISE, R.; SHANAHAN, P.; MELIS, R.; KAWUKI, R. Genetic variation and association among factors influencing storage root bulking in cassava. **Journal of Agricultural Science**, v.153, p.1267-1280, 2015.

TURYAGYENDA, L.F.; KIZITO, E.B.; FERGUSON, M. BAGUMA, Y.; AGABA, M.; HARVEY, J.W.; OSIRU, D.S.O. Physiological and molecular characterization of drought responses and identification of candidate tolerance genes in cassava. **AoB Plants**, v.5, p. 1-17, 2013.

VENUPRASAD, R.; DALID, C.; DEL VALLE, M.; BOOL, M.E.; ZHAO, D.; ESPIRITU, M. STA.; CRUZ, T.; AMANTE, M.; ATLIN, G.; KUMAR, A. Identification and characterization of large-effect quantitative trait loci (QTL) for grain yield under lowland drought stress in rice using bulk-segregant analysis (BSA). **Theoretical and Applied Genetics**, v.120, p. 177-190, 2009.

WEI, Y.; SHI, H.; XIA, Z.; TIE, W.; DING, Z.; YAN, Y.; WANG, W.; HU, W.; LI, K. Genome-wide identification and expression analysis of the wrky gene family in cassava. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p. 1–25, 2016.

ZHANG, P.; WANG, W. Q.; ZHANG, G.L.; KAMINEK, M.; DOBREV, P.; XU, J.; GRUISSEM, W. Senescence-inducible expression of isopentenyl transferase extends leaf life, increases drought stress resistance and alters cytokinin metabolism in cassava. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.52, p. 653-669, 2010.

ZHAO, P.; LIU, P.; SHAO, J.; LI, C.; WANG, B.; GUO, X.; YAN, B.; XIA, Y.; PENG, M. Analysis of different strategies adapted by two cassava cultivars in response to drought stress: ensuring survival or continuing growth. **Journal of Experimental Botany**, v.66, p. 1477-1488, 2014.

CAPÍTULO 2

MODELOS PARA PREDIÇÃO PRECOCE DA PRODUTIVIDADE DE RAIZES DE MANDIOCA EM DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS¹

¹Artigo a ser submetido ao Comitê Editorial do periódico científico Euphytica

Modelos para a predição precoce da produtividade de raízes de mandioca em diferentes regimes hídricos

RESUMO: O desenvolvimento de variedades de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) com maior tolerância ao déficit hídrico depende de ferramentas otimizadas de fenotipagem. Este trabalho teve como objetivo desenvolver modelos de predição precoce da produtividade final de raízes (12 meses após plantio – MAP), com uso de dados fisiológicos e agronômicas obtidos aos 4 MAP, em dois regimes hídricos. Nove genótipos de mandioca foram avaliados em experimento, utilizando o delineamento experimental de blocos completos casualizados, em esquema fatorial dois tratamentos hídricos (déficit hídrico e irrigado), 2 épocas de colheitas (colheita aos 4 e 12MAP) × 9 genótipos, com quatro repetições. O experimento foi irrigado até o 3 MAP. Após este período, foi encerrada a irrigação da metade do stand experimental. Quatorze características fisiológicas e agronômicas foram avaliadas em todas as épocas de colheita. Seis modelos de predição foram avaliados: regressão linear com seleção *stepwise* (LRSS), regressão linear com seleção *backward* (LRB), rede neural (NeNet), máquinas de vetores de suporte (SVM), regressão *ridge* *Bayesiana* (BRR) e quadrados mínimos parciais (PLS). A maioria dos modelos apresentou alta capacidade preditiva da produtividade final de raízes (R^2 variando de 0,84 a 0,92). Entretanto, em todos os cenários de predição, o modelo PLS apresentou elevado R^2 (0,86 a 0,92) associado ao menor erro quadrático médio - RMSE (0,76 a 0,88). Diferenças na capacidade preditiva dos modelos podem ter ocorrido em função da importância relativa das características avaliadas precocemente. No caso do PLS, as características de maior importância para o modelo foram condutância estomática, produtividade de raízes aos 4MAP, índice de área foliar e número de raízes. Independentemente da condição hídrica, o uso de dados fisiológicos e agronômicos coletados de forma precoce, foi capaz de prever com grande eficiência a produtividade final de raízes. Esta estratégia pode reduzir o custo da fenotipagem, para aumentar a capacidade de análise e de otimização dos ganhos genéticos para tolerância à seca em mandioca.

Palavras-chave: Déficit hídrico, *Manihot esculenta* Crantz, fisiologia, melhoramento, capacidade preditiva.

Early prediction models for cassava root yield in different water regimes

ABSTRACT: The development of cassava varieties (*Manihot esculenta* Crantz) with greater tolerance to water deficit depends on optimized phenotyping tools. The objective of this work was to develop early prediction models of the final root yield (12 months after planting - MAP) using physiological and agronomic data obtained at 4 MAP in two water regimes. Nine genotypes of cassava were evaluated in two experiments (irrigated and with water deficit), using the complete randomized block design, in factorial scheme 2 (harvest at 4 and 12MAP) × 9 genotypes, with four replications. The two experiments were irrigated until 3 MAP. After this period, the irrigation of the experiment with water deficit was closed. Eleven physiological and agronomic traits were evaluated at all harvest times. Six prediction models were evaluated: linear regression with stepwise selection (LRSS), linear regression with backward selection (LRB), neural network (NeNet), support vector machines (SVM), Bayesian ridge regression (BRR), and partial least squares (PLS). Most of the models presented high predictive ability of final root yield (R^2 ranging from 0.84 to 0.92). However, in all prediction scenarios, the PLS model presented a high R^2 (0.86 to 0.92) associated with the lowest root-mean-square error (RMSE) (0.76 to 0.88). Differences in the predictive ability of the models may have occurred due to the relative importance of the early traits. In the case of PLS, the most important traits for the model were stomatal conductance, root yield at 4 MAP, leaf area index and number of roots. Regardless of the water condition, the use of physiological and agronomic data collected at an early stage was able to predict the final root yield with great efficiency. This strategy can reduce the cost of phenotyping, to increase the capacity of analysis and optimization of genetic gains for tolerance to drought in cassava.

Keywords: Water deficit, *Manihot esculenta* Crantz, physiology, breeding, predictive ability.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm desencadeado diversos estresses abióticos, que podem trazer impactos negativos sobre a produção agrícola e a segurança alimentar nas principais culturas alimentares, incluindo a mandioca. Dentre os estresses abióticos, o déficit hídrico promove mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares nas plantas, afetando negativamente o crescimento e a produtividade em diversas espécies. A redução da performance agrônômica da mandioca em condições de déficit hídrico depende da característica, mas de modo geral as estimativas de perdas são da ordem de 26% para teor de matéria seca nas raízes, 33 a 47% para altura de planta, 37 a 55% para produtividade da parte aérea, 31% para índice de colheita e 38 a 87% para produtividade de raízes (AINA et al., 2007; OKOGBENIN et al., 2013; ADJEBENG-DANQUAH et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017).

Os desafios futuros da mandioca como uma espécie de elevada importância na segurança alimentar global serão moldados pela sua capacidade de manter ou mesmo aumentar o potencial produtivo e a qualidade das raízes, para os mais diversos mercados consumidores e ao mesmo tempo tolerar múltiplos estresses bióticos e abióticos. Em termos globais, a taxa de crescimento da produtividade de raízes de mandioca nos últimos 10 anos foi negativa (- 0,35%), embora tenha havido importante aumento na América do Sul (3,74%) e na Ásia (16,07%). Por outro lado, como uma das principais regiões produtoras de mandioca (56% da produção mundial), o continente africano tem enfrentado fortes reduções na produtividade de raízes (- 4,10%) contribuído assim, de forma mais acentuada para a redução da produtividade mundial (FAO, 2016).

A redução no crescimento da produtividade da mandioca, causada por estresses bióticos e abióticos, pode complicar ainda mais a crescente demanda das raízes de mandioca para diversos usos industriais (JERUMEH e OMONONA, 2018). Apesar da tolerância ao déficit hídrico ser uma característica quantitativa com fenotipagem complexa, por se tratar de uma característica multigênica, baixa herdabilidade e alta interação genótipo × ambiente, os programas de melhoramento tem dado contribuições importantes para identificar genótipos mais responsivos em função do estresse hídrico (OLIVEIRA et al., 2015, 2017), sobretudo porque a mandioca possui ampla variabilidade natural e uma notável capacidade de tolerar e

se recuperar de estresses bióticos e abióticos (OKOGBENIN et al., 2013). Os principais mecanismos associados à adaptação da mandioca à seca combinam estratégias para evitar a desidratação, como fechamento estomático, redução na produção de várias proteínas fotossintéticas e abscisão foliar (ZHAO et al., 2015).

Além do entendimento dos mecanismos de resistência e das variantes ambientais, um programa de pesquisa para aumento da tolerância ao déficit hídrico deve considerar a fenologia das plantas. Geralmente entre 3-4 meses após o plantio (MAP) observa-se intenso desenvolvimento do aparato fotossintético e da parte aérea das plantas de mandioca e, conseqüentemente, o déficit hídrico provoca as maiores perdas nesta fase, em função da diminuição nas brotações das manivas com conseqüente perda de estande, redução no número e na produtividade de raízes (EL-SHARKAWY, 2007). Por outro lado, em termos de fenotipagem para tolerância à seca, a maioria dos trabalhos tentam correlacionar dados morfológicos e fisiológicos com o potencial produtivo dos genótipos no final do ciclo da cultura. Isto faz com que os experimentos tenham que ser mantidos por longos períodos em condições de campo (12-18 meses), acarretando em altos custos de manutenção e longos ciclos para seleção e validação de fontes de tolerância a este estresse.

A busca pela seleção precoce nos programas de pesquisa em mandioca tem sido prioridade e por isso, diversos grupos tem buscado diferentes alternativas para reduzir o ciclo de seleção e os custos associados à fenotipagem de características complexas e de difícil mensuração em campo. Alguns exemplos recentes na literatura são: i) o entendimento da herança de algumas características para seleção precoce e indireta e do valor genético dos parentais (OJULONG et al., 2010; CEBALLOS et al., 2016; NDUWUMUREMYI et al., 2018); ii) uso do mapeamento associativo e da seleção genômica (OLIVEIRA et al., 2012; WOLFE et al., 2017; ELIAS et al., 2018; KAYONDO et al., 2018), e iii) uso do radar de penetração no solo para predição das taxas de crescimento de raízes por meio da detecção da biomassa total das raízes durante o ciclo de crescimento (DELGADO et al., 2017).

Mesmo com a implementação destas metodologias, poucos estudos têm sido dedicados à criação de modelos de predição da produtividade com base em dados fenotípicos obtidos em fases precoces de desenvolvimento da mandioca. Geralmente os métodos de predição permitem uma avaliação antecipada da produtividade das lavouras para melhorar o planejamento e a gestão agrícola, bem como a alocação adequada de recursos. Nos programas de melhoramento genético,

o estabelecimento de modelos de predição acurados pode permitir a seleção precoce apenas dos genótipos de maior interesse, possibilitando otimização dos recursos.

Em outras culturas, o desenvolvimento de modelos de predição com base em caracteres morfológicos utilizando redes neurais artificiais (RNAs) foi capaz de prever a produtividade de palma forrageira com alta precisão ($R^2=0,87$) (GUIMARÃES et al., 2018). Azevedo et al. (2015) também reportaram elevado r^2 (0,92 a 0,96) ao avaliarem o potencial de uso de modelos de predição para seleção indireta contra o florescimento utilizando seis características preditoras. Em milho, Soares et al. (2015), avaliaram o desempenho de redes neurais artificiais na predição da produtividade da cultura do milho, com base em variáveis morfológicas da cultura. De acordo com estes autores, houve alta capacidade preditiva ($R^2=1,00$) evidenciando a forte correlação entre os valores estimados e os dados reais da produtividade de grãos obtidos nos experimentos de campo.

Os modelos de predição podem contribuir para melhor planejamento experimental e tomada de decisões de manejo, além de otimizar o tempo nas avaliações e os recursos alocados nos programas de pesquisa. Entretanto, de acordo com nosso conhecimento, não existem modelos de predição da produtividade de raízes de mandioca em condições de déficit hídrico. Portanto, este trabalho teve como objetivo utilizar avaliações agronômicas oriundos de colheitas precoces em diferentes genótipos de mandioca obtidos em duas condições hídricas no semiárido do Nordeste brasileiro para construção de modelos de predição da produtividade final de raízes.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental e do material vegetal

Os experimentos foram instalados na área experimental da Embrapa Semiárido, localizada no perímetro irrigado de Bebedouro, Petrolina-PE (09° 09' de latitude Sul e 40° 29' de longitude Oeste e altitude de 365 m). O clima da região é caracterizado por baixa frequência de chuvas e grande amplitude térmica, sendo classificado por Köppen como BSwH. O período de condução dos experimentos foi de 12 meses (2015/2016), no qual foi registrada uma precipitação total de 281,51 mm, sendo 215 mm distribuídos nos três primeiros meses após o plantio, e um

volume de 66,51 mm nos outros 9 meses. A temperatura média variou de 25,0 °C a 29,5 °C e a umidade relativa do ar, entre 46,3% e 72,6%.

Nove genótipos foram avaliados, sendo quatro variedades locais (BGM0163, BGM0785, BGM0815 e BGM0279) e cinco variedades melhoradas (GCP001, 9624-09, Cacau, BRS Formosa e BRS Dourada). A escolha destes genótipos foi feita com base no contraste para tolerância ao déficit hídrico, considerando atributos produtivos e índices de tolerância (OLIVEIRA et al., 2015; 2017).

Os genótipos de mandioca foram avaliados em experimento colhido em duas épocas distintas, sendo a primeira aos quatro meses após o plantio (MAP) e a segunda aos 12 MAP. O delineamento utilizado no experimento foi o de blocos completos casualizados, em esquema fatorial 2 (épocas de colheita) × 9 (genótipos de mandioca) sob 2 tratamentos hídricos (com déficit e irrigado) com quatro repetições. As parcelas experimentais foram compostas por duas linhas com cinco plantas, com espaçamento de 0,90 m entre linhas e 0,80 m entre plantas.

Os dois experimentos foram mantidos sob irrigação durante os 3 primeiros meses após o plantio. Após esse período, houve a interrupção da irrigação na metade do estande experimental, não sendo aplicada qualquer lâmina líquida até a colheita. No tratamento irrigado a lâmina de irrigação foi mantida durante todo o desenvolvimento da cultura até o momento da colheita. A irrigação do tipo localizada foi realizada com base na evapotranspiração da cultura, utilizando-se fitas gotejadoras espaçadas em intervalos de 0,20 m com vazão de aproximadamente (0,86 L h⁻¹).

Durante a condução do experimento, as variações climáticas foram monitoradas por meio de uma estação meteorológica instalada próxima da área experimental. Foram obtidos os dados diários da precipitação pluviométrica, temperatura, umidade do ar e evapotranspiração, considerando-se as medidas de precipitação e evapotranspiração dos dias anteriores.

Avaliações das características fisiológicas

A colheita foi realizada em duas épocas, sendo a primeira realizada aos 4 MAP, 30 dias após o início do estresse hídrico, enquanto a segunda colheita ocorreu aos 12 MAP. Em cada época de colheita foram avaliadas as seguintes características fisiológicas: 1) temperatura foliar e condutância estomática (CondEsto – mmol kg⁻¹) foram determinadas com auxílio de porômetro SC-1 LEAF

POROMETER. As avaliações foram realizadas em folhas completamente expandidas, localizadas na parte apical da planta, expostas à radiação solar, nos horários entre 10 e 12 h. Foram avaliadas três plantas ao acaso em cada parcela; 2) temperatura foliar mensurada com auxílio de uma câmera infravermelha E6, FLIR (Templnfr - °C), em folhas completamente expandidas; 3) índice de área foliar (IAF) avaliado por meio do uso do Ceptômetro Accupar, que mede a radiação fotossinteticamente ativa, sob e acima do dossel da planta. Essa avaliação foi realizada em todas as parcelas no mesmo dia no período compreendido entre 9:00 às 12:00. 4) potencial osmótico foliar (PO – mmol kg⁻¹). Foi realizada a coleta da primeira folha completamente expandida na orientação leste e armazenamento a -80°C. Em seguida, pequenos segmentos de folhas (5 cm) foram macerados à seco, e a seiva foliar foi centrifugada a 10000 x g durante 10 min a 4°C. O sobrenadante resultante foi utilizado para determinar a osmolalidade (€) com auxílio de um osmômetro de pressão de vapor Vapro 5600. O potencial osmótico foi obtido a partir da osmolalidade (mmol kg⁻¹) da seiva do tecido foliar, com base na equação de Van't Hoff (SOUZA et al., 2012): $\Psi = -R_x T_x C$, em que Ψ = potencial osmótico da solução (kPa); R = constante universal dos gases (8,2 L.kPa.°K⁻¹.mol⁻¹); T = temperatura absoluta da solução (°K); C = Concentração de solutos na solução (mol L⁻¹).

Avaliação das características agronômicas

Em ambos os experimentos e épocas de colheita foram mensuradas as seguintes características agronômicas: 1) altura da planta (AP, em m), medida a partir do nível do solo até a primeira folha apical; 2) produtividade da parte aérea (PPA, em t ha⁻¹), obtida por meio da pesagem da parte aérea de todas as plantas da parcela, após a retirada das raízes; 3) diâmetro do caule (DC, em mm), medido com auxílio de um paquímetro digital a 0,20 m de altura do solo; 4) número de raízes por planta (NRP), determinado a partir da média obtida pela contagem das raízes de cinco plantas por parcela; 5) produtividade de raízes (PTR, em t ha⁻¹), obtida por meio da pesagem de todas as raízes da parcela com auxílio de uma balança digital suspensa; 6) comprimento de raízes (CR, em cm); 7) diâmetro de raízes (DR, em mm), mensurado com auxílio de um paquímetro digital; 8) teor de matéria seca das

raízes (MS, em %), por meio da secagem de uma amostra homogênea com 500 g de raízes, em estufa com circulação de ar forçada a 65°C até atingir peso constante.

A retenção foliar (RF) foi mensurada com auxílio de uma escala de notas considerando a presença e distribuição das folhas ao longo da planta: Nota 1 = folhas presentes apenas na parte superior, cobrindo menos de 10% da altura da planta; Nota 2 = folhas presentes na parte superior e mediana, cobrindo entre 11 e 25% da altura da planta; Nota 3 = folhas presentes na parte superior e mediana, cobrindo entre 26 e 50% da altura da planta; Nota 4 = folhas presentes na parte superior, mediana e inferior, cobrindo entre 51 e 75% da altura da planta; Nota 5 = folhas presentes em praticamente toda a planta, cobrindo entre mais de 75% da altura da planta.

Análise dos dados

As variáveis fisiológicas e agrônômicas foram submetidas à análise de variância (ANOVA) no ambiente computacional R v.3.3 (R CORE TEAM, 2017) com auxílio dos pacotes *easynova* (ARNHOLD, 2013) e *lattice* (SARKAR, 2008). A predição dos melhor predição linear não viesada (*best linear unbiased prediction* - BLUP) para cada característica foi realizada por meio da abordagem de modelos lineares mistos. Os efeitos de repetições, épocas de colheita e de genótipos foram assumidos como aleatórios, enquanto que o tratamento hídrico foi considerado como efeito fixo. O modelo matemático empregado foi: $y = Xr + Zg + \varepsilon$, no qual: y é o vetor dos dados; r é o vetor de efeito de repetição (assumido como corrigido) adicionado à média geral; g é o vetor de efeitos genotípicos (assumido como aleatório); ε é um vetor de erros e resíduos (aleatório); X é a matriz de incidência para efeitos fixos; Z é a matriz de incidência para efeitos aleatórios.

Modelos de predição

Os dados morfológicos e fisiológicos da colheita aos 4 MAP foram utilizados para prever a produtividade de raízes na colheita aos 12 MAP. Os dados fisiológicos e morfológicos da colheita aos 4 MAP do ambiente irrigado foram utilizados na predição da PTR no ambiente irrigado (TC.C) e sob déficit hídrico (TC.D). Da mesma forma, os dados de 4 MAP no ambiente sob déficit hídrico foram

utilizados para a predição da produtividade de raízes no ambiente irrigado (TD.C) e sob déficit hídrico (TD.D).

Seis modelos de predição foram testados para verificar a eficiência de predição da produtividade de raízes de mandioca em experimentos submetidos a diferentes estresses hídricos:

- Regressão linear com seleção *stepwise* (LRSS)

A regressão linear *stepwise* (ou *stepwise selection*) consiste basicamente em adicionar e remover iterativamente preditores, no modelo preditivo, para encontrar o subconjunto de variáveis no conjunto de dados que resulta no modelo de melhor desempenho, ou seja, no modelo com o menor erro de predição (GARETH et al., 2014). Na seleção *stepwise* as variáveis são adicionadas sequencialmente, e aqueles com maior contribuição são mantidos no modelo. Em seguida as variáveis que não são capazes de melhorar o ajuste do modelo são descartadas.

- Regressão linear com seleção *backward* (LRB)

Na seleção *backward*, o modelo se inicia com todos os preditores (modelo completo), e a cada etapa ocorre remoção iterativa de variáveis que menos contribuem para o modelo. A remoção termina quando todas as variáveis são estatisticamente significativas.

Os modelos LRSS e LRB foram implementados no pacote *caret* do software R v.3.3 (R CORE TEAM, 2017), tendo como parâmetro de ajuste a função *nvmax* que especifica o número máximo de preditores a serem incorporados no modelo. A função *train* fornece um fluxo de trabalho fácil para realizar seleções *stepwise* e *backward* usando os pacotes *leaps* e *MASS*.

- Regressão *ridge bayesiana*

Técnicas de regressão bayesiana são utilizadas para incluir parâmetros de regularização na obtenção das estimativas, que são definidos em função dos dados disponíveis. Isso pode ser feito introduzindo priori não informativos nos hiper parâmetros do modelo. A regularização L2 usada na regressão *ridge* encontra uma estimativa máxima a posteriori sob uma *priori* Gaussiana para os parâmetros ω com precisão λ^{-1} , estimado à partir dos dados como uma variável aleatória. O modelo probabilístico completo é: $p(y|X, \omega, \alpha) = N(y|X\omega, \alpha)$, assumindo y como tendo distribuição Gaussiana em torno de $X\omega$. O α é tratada como uma variável aleatória que deve ser estimada a partir dos dados. A regressão *ridge bayesiana* estima um

modelo probabilístico da regressão, na qual a priori do parâmetro ω é dado por um gaussiano esférico: $p(\omega|\lambda) = \mathcal{N}(\omega|0, \lambda^{-1}I_p)$. As priori α e a são escolhidas para serem distribuições gama.

- Rede Neural (NeNet)

O modelo perceptron Multilayer é composto por um número de neurônios (ou nós) que são distribuídos em uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma saída camada. Cada neurônio processa suas entradas (de maneira não linear) e gera um valor de saída que é transmitido aos neurônios na camada subsequente.

Redes neurais *feedforward*, também conhecidas como *multilayer perceptron* (MLP), com saída determinística $y = y(x, \omega)$ foram utilizadas nas análises. A ativação a de cada nó é calculada como uma combinação linear de todos os nós conectados $a_i = \sum_j \omega_{ij} x_j$, em que x_i é a saída do nó i na camada anterior, e ω_{ij} é o peso dado à conexão do nó i ao atual nó j . A saída x_j é produzida pela função de ativação: $x_j = \frac{1}{1 + \exp(-a_j)}$. Um algoritmo comum para atualizar os pesos é o

backpropagation, que é uma técnica de gradiente descendente, que significa que mudanças de peso são feitas na proposição do gradiente da função de erro. O erro de uma saída de rede f , em um único padrão de entrada, é: $e_{net} = \frac{1}{2}(f - d)^2$.

Atualizações dos pesos ω_{ij} dentro da rede que produz saída f são realizadas por:

$\omega_{ij}^{new} = \omega_{ij}^{old} + \Delta\omega_{ij}$, $\Delta\omega_{ij} = -\alpha \frac{\partial e_{net}}{\partial \omega_{ij}}$, em que α é uma taxa de aprendizado. As atualizações

são realizadas iterativamente, fazendo pequenas atualizações em cada peso na rede até que valores mínimos sejam obtidos na função de erro. $z_j z_j = h(a_j y(x, \omega) \omega_{t+1} = \omega_t - \eta \nabla E(\omega) \nabla E(\omega)$ No que diz respeito à estrutura da rede e à regra da cadeia, derivadas parciais são calculadas para cada nó na rede e propagadas para trás na rede (GÜNTHER e FRITSCH, 2010).

- Máquinas de Vetores de Suporte (SVM)

O SVM consiste em construir um ou vários hiperplanos para separar diferentes grupos, utilizando um hiperplano ideal definido como a função de decisão linear com margem máxima entre os vetores das duas classes. Um hiperplano ideal é aquele que discrimina os exemplos sem erro e cuja distância entre o exemplo mais

próximo e o hiperplano é máxima. O objetivo do SVM é determinar a função $f(x)$ que tolera o desvio ε dos alvos y_i para todos os dados de treinamento. A função de estimativa do SVR é: $f(x) = (\omega^* \Phi(x)) + b$, $\omega \in X, b \in \mathcal{R}$, em que Φ é a transformação não linear de n para espaço de alta dimensão. O dado de entrada x é inicialmente apresentado em um espaço de características m -dimensional usando uma representação não linear especificada. Usando uma representação matemática, o modelo linear (no espaço de recurso) $f(x, \omega)$ é dado por: $f(x, \omega) = (\omega^T \Phi(x)) + b$, em que $\Phi(x)$ é a função de mapeamento, ω representa o vetor de pesos e b o viés do termo.

A regressão SVM deve minimizar a função: $Rreg(f) = C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) + \frac{1}{2} \|\omega\|^2$ e o parâmetro do hiperplano ótimo $f(x, \omega)$ pode ser determinado por:

$$\omega = \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_i^*) \Phi(x_i) \quad \omega^T x + b = 0, x \in \mathbb{R}^d, \omega \in \mathbb{R}^d \quad (\text{CORTES; VAPNIK, 1995}).$$

Neste estudo foi utilizado o SVM baseado na função *radial basis kernel* (RBF). Os parâmetros de penalidade do RBF kernel são o C e σ , em que: $k(x_i, x_j) = \exp(-\sigma \|x_i - x_j\|^2)$, $\sigma > 0$. O parâmetro σ tem um papel importante no desempenho do kernel e deve ser cuidadosamente ajustado. No pacote *caret*, o parâmetro σ foi estimado utilizando a função *sigest* no pacote *kernlab* (KARATZOGLU et al., 2004), e o parâmetro C foi ajustado ao executar o algoritmo.

- Quadrados mínimos parciais (PLS)

A solução de mínimos quadrados para a regressão linear múltipla: $Y = XB + \varepsilon$ é dada por $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$. Contudo, os problemas neste caso são devidos a: 1) $X^T X$ é singular, porque o número de variáveis (colunas) em X excede o número de objetos (linhas); 2) existe multicolinearidade no modelo. Neste caso, a PLS contorna estes problemas por decompor X em escores ortogonais T e carregamentos P , sendo $X = TP$, além de regredir Y não no próprio X , mas na primeira coluna a dos escores T . O PLS visa incorporar informações sobre X e Y na definição das pontuações e cargas (WEHRENS; MEVIK, 2007).

Avaliação dos modelos

Para validar a qualidade do ajuste dos modelos foi realizada uma validação cruzada com 10-folds em quatro repetições. A eficiência dos modelos foi avaliada

por: 1) erro quadrático médio (RMSE), que é a medida da magnitude média dos erros estimados, i.e.: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$, em que \hat{y}_i e y_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, e n é o número de observações; 2) coeficiente de determinação (R^2) que descreve a proporção da

variância total nos dados observados de acordo com o modelo: $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$,

em que $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ corresponde à variação explicada, e $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

corresponde à variação não explicada pelo modelo. Todas as análises foram realizadas no ambiente de programação R 3.4.3 (R CORE TEAM, 2017) com auxílio dos pacotes *caret* (KUHNS et al., 2008).

RESULTADOS

Varição das características fisiológicas e agronômicas

Para as características fisiológicas, houve efeito significativo nos dois tratamentos (irrigado e déficit hídrico), exceto para potencial osmótico foliar (PO) e temperatura foliar mensurado por infravermelho (TempInfr). Também houve diferença significativa no comportamento dos genótipos de mandioca para todas as características, exceto temperatura foliar medida pelo porômetro (TempPo) (Tabela 1). Além disso, houveram algumas interações entre tratamento hídrico × genótipos para TempPo, TempInfr e índice de área foliar (IAF); entre tratamento hídrico × época de colheita para todas as características, exceto PO; e genótipos × época de colheita para todas as características, exceto TempPo. Estas interações significativas indicam que os efeitos destes fatores nestas características fisiológicas não podem ser analisados de forma isolada.

Em geral, foi observada maior variação nos valores de condutância estomática e índice de área foliar entre os dois tratamentos hídricos e as duas épocas de colheita (Figura 1). De modo geral, a condutância estomática foi mais elevada nos experimentos irrigados em comparação com o déficit hídrico. Outra observação importante é a maior discrepância da condutância estomática entre os tratamentos irrigados e com déficit hídrico aos 12 MAP. Aos 4 MAP os genótipos de

mandioca mantidos sob déficit hídrico apresentaram valores condutância estomática entre 100 e 800 mmol kg⁻¹, enquanto que aos 12 MAP no mesmo tratamento, os valores não excederam 375 mmol kg⁻¹ (Figura 1 A). Esta mesma tendência foi observada para o índice de área foliar, no qual aos 4 MAP as plantas desenvolvidas sob déficit hídrico apresentaram valores acima de 3,00, enquanto aos 12 MAP as plantas nesse mesmo tratamento apresentaram valores abaixo de 1,00, possivelmente como resultado do estresse hídrico severo.

Tabela 1- Resumo da análise de variância para cinco características fisiológicas obtidas da avaliação de nove genótipos de mandioca em condições irrigada e de déficit hídrico, colhidos aos 4 e 12 meses após plantio (MAP). Petrolina-PE (2017).

Fonte de Variação	GL ¹	Quadrado Médio				
		CondEsto	TempPo	Templnfr	IAF	PO
Tratamento hídrico (T)	1	572,65**	28,28**	8,38	475,11**	0,39
Genótipos (G)	8	4,79**	1,22	10,02**	5,00**	3,45**
Época de colheita (EC)	1	162,16**	374,99**	232,68**	219,62**	31,70**
Blocos (B)	3	2,67	12,14**	8,15**	1,13	2,14
T x G	8	2,60	1,22**	5,85**	8,10**	1,60
T x EC	1	49,26**	51,66**	57,76**	31,02**	0,37
G x EC	8	15,18**	1,87	6,33**	5,76**	2,84**
T x G x EC	8	5,00**	2,14	1,57	2,01	4,17
Resíduo	103	14696,03	4158,37	19,87	10,18	4158,37
CV (%)		20,75%	2,41%	3,82%	22,59%	10,75%
Média Geral		526,30	37,50	37,00	4,50	599,80

¹GL – grau de liberdade; **, * - Significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; CondEsto: condutância estomática; TempPo: Temperatura foliar medida com auxílio do porômetro (°C); Templnfr: temperatura foliar medida com câmera infravermelho (°C); IAF: índice de área foliar; PO: potencial osmótico foliar (mmol kg⁻¹).

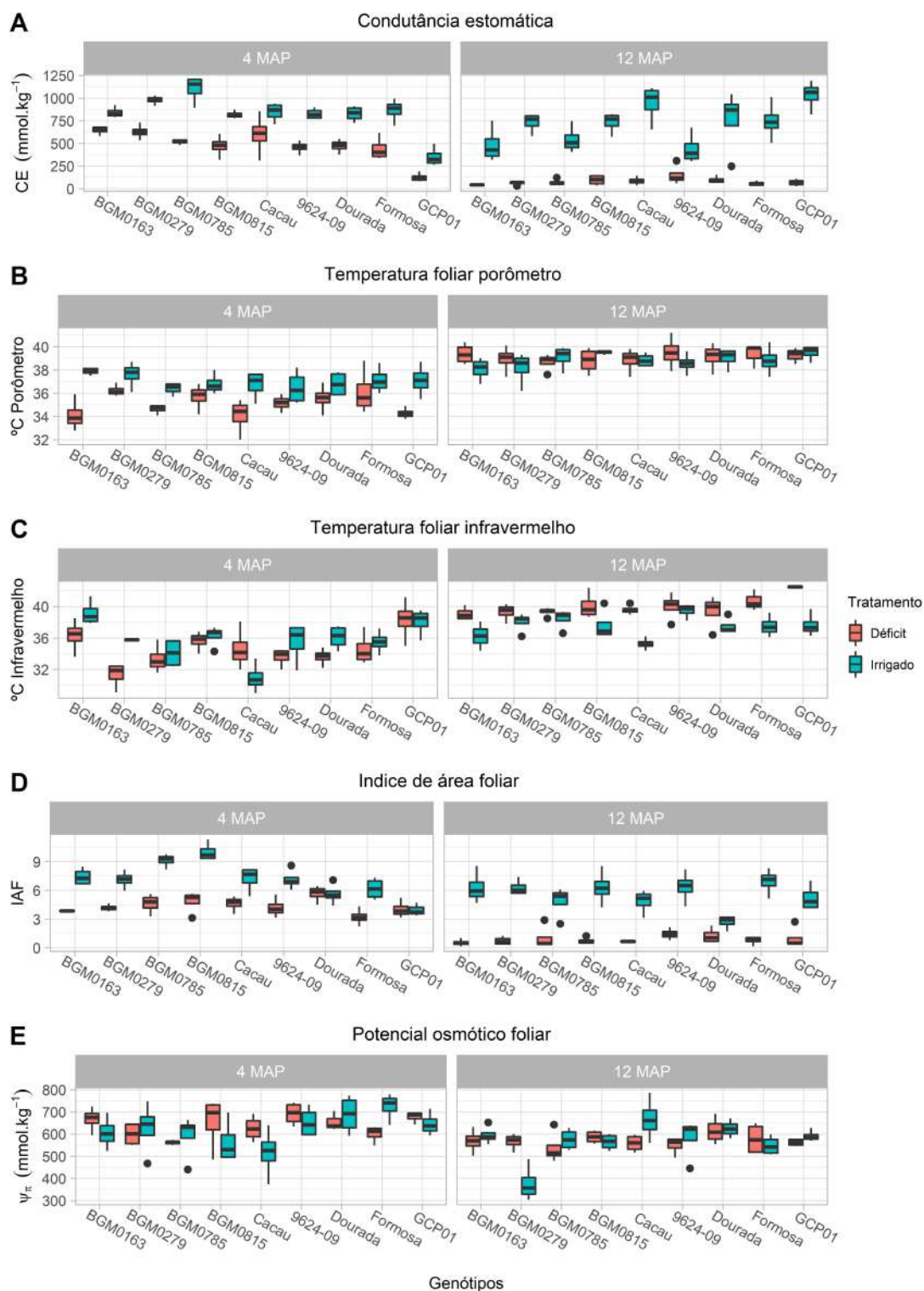


Figura 1. BoxPlot das características fisiológicas avaliadas em diferentes genótipos de mandioca em dois tratamentos hídricos (irrigado e déficit hídrico), em em duas épocas de colheita (4 e 12 meses após o plantio - MAP): (A) condutância estomática (mmol.kg^{-1}); (B): temperatura foliar medida com auxílio do porômetro ($^{\circ}\text{C}$); (C): temperatura foliar medida com câmera infravermelho ($^{\circ}\text{C}$); (D) índice de área foliar; (E): potencial osmótico foliar (mmol.kg^{-1}).

A temperatura foliar foi mais elevada aos 12 MAP em comparação com os 4 MAP, independentemente do método de mensuração. Possivelmente este resultado, esteja relacionado com maior temperatura do ambiente e menor índice de área foliar no final do ciclo da cultura. Outra observação importante refere-se à maior variação da temperatura foliar avaliada pelo infravermelho em comparação com o porômetro (Figura 1 C). Em relação ao potencial osmótico, houve grande variação nos genótipos de mandioca avaliados, nas diferentes épocas de colheita, embora aos 12 MAP as diferenças genotípicas entre o tratamento irrigado e com déficit hídrico não foram muitas acentuadas, à exceção do BGM0279 e Cacao (Figura 1E).

Em relação à ANOVA dos dados agronômicos (Tabela 2), à exceção de número de raízes por planta (NRP), todas as características foram significativas nos dois tratamentos (controle e irrigado). Os efeitos dos genótipos de mandioca e das diferentes épocas de colheita também foram significativos para todas as características agronômicas, indicando a presença de variabilidade genética nestes genótipos quanto ao comportamento produtivo em condições de déficit hídrico, além do efeito do estresse hídrico nestes materiais em função do tempo de permanência das plantas no campo. Também houve interação significativa entre tratamento hídrico × genótipos para altura de planta (AP), produtividade da parte aérea (PPA) e produtividade de raízes (PTR) e teor de matéria seca nas raízes (MS); entre tratamento hídrico × época de colheita para AP, PPA, diâmetro do caule (DC), PTR, comprimento (CR) e diâmetro da raiz (DR) e MS; além da interação genótipos × época de colheita para PPA, retenção foliar (RF), PTR, CR, DR e MS. Assim como observado nas características fisiológicas, à exceção de NRP, o entendimento dos fatores deve ser realizado de forma conjunta para verificar os efeitos das interações no comportamento produtivo das variedades de mandioca no semiárido nordestino.

Para as características agronômicas da parte aérea, a maior variação entre os tratamentos hídricos ocorreu aos 12 MAP, quando os genótipos apresentaram máxima capacidade produtiva e de crescimento, sobretudo no tratamento irrigado para todas as características, exceto retenção foliar (Figura 2 C).

Tabela 2- Resumo da análise de variância para seis características agrônômicas obtidas da avaliação de nove genótipos de mandioca em condições irrigada e de déficit hídrico, colhidos aos 4 e 12 meses após plantio (MAP). Petrolina-PE

Fonte de Variação	GL ¹	Quadrado Médio								
		AP	PPA	RF	DC	NRP	PTR	CR	DR	MS (%)
Tratamento (T)	1	407,57**	1207,35**	26,84**	184,71**	10,85	667,15**	1115,61**	6907,81**	349,19**
Genótipo (G)	8	21,79**	62,40**	6,64**	14,25**	24,56**	110,02**	189,76**	508,75**	62,85**
Época de colheita (EC)	1	1478,19**	64,89**	977,69**	191,96**	243,83**	491,64**	23,07	18821,56**	518,13**
Blocos (B)	3	3,23	2,17	0,63	3,32	1,08	1,87	6,20	25,81	1,57
T x G	8	4,96**	15,60**	3,57	0,63	1,27	35,02**	19,19	34,48	25,72**
T x EC	1	53,72**	82,79**	2,58	48,97**	0,005	375,79**	222,63**	5232,55**	882,01**
G x EC	8	3,16	10,85**	7,83**	2,87	2,75	42,28**	32,74**	135,32**	30,52**
T x G x EC	8	4,88**	5,78**	0,72	0,49	3,63	33,03**	25,27*	44,24	11,23**
Resíduo	103	0,16	9,58	0,21	5,07	0,24	2,10	7,47	15,54	1,75
CV (%)		6,97%	13,11%	14,96%	8,78%	18,15%	26,25%	11,80%	15,54%	4,72%
Média Geral		1,8	23,6	3,1	25,7	8,18	5,5	23,15	29,14	27,76

¹GL – grau de liberdade; **, * - Significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; AP: altura da planta; PPA: produtividade da parte área; RF: retenção foliar; DC: diâmetro do caule; NRP: número de raízes por planta; PTR: produtividade de raízes. CR: comprimento de raízes; DR: diâmetro de raízes; MS (%): Índice de matéria seca de raízes.

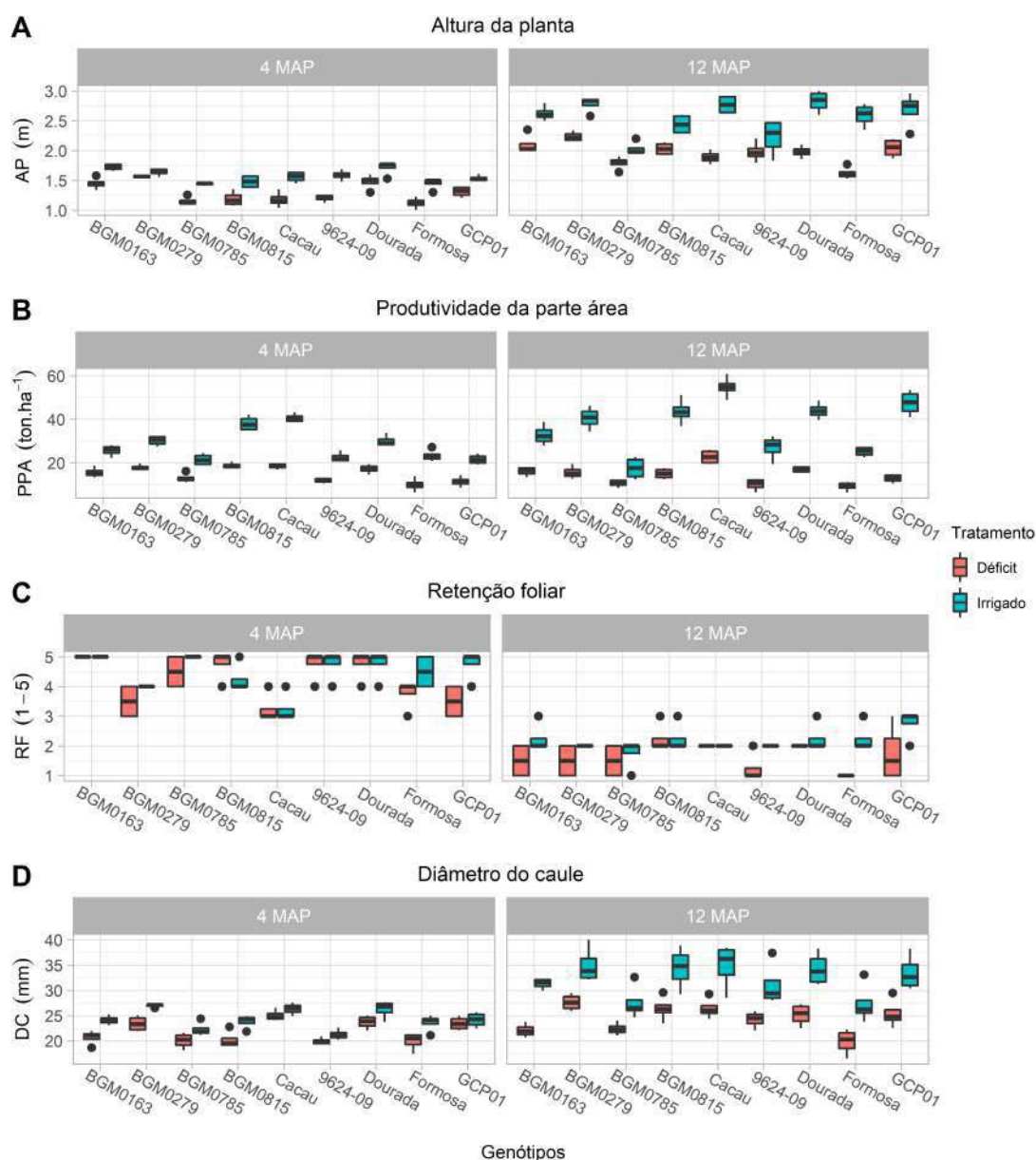


Figura 2. BoxPlot das características agrônômicas da parte aérea das plantas avaliadas em diferentes genótipos de mandioca em dois tratamentos hídricos (irrigado e déficit hídrico) e colhidos aos quatro e doze meses após o plantio (4 MAP e 12 MAP).

Para todas as características agrônômicas da raiz, as maiores variações aos 12 MAP ocorreram para a produtividade, diâmetro e índice de matéria seca das raízes (Figuras 2 e 3). Independentemente do regime hídrico, foi contabilizado maior número de raízes aos 4MAP em comparação com 12MAP, possivelmente pelo fato de que muitas raízes foram formadas na fase inicial de desenvolvimento das plantas, mas não seguiram adiante no processo de tuberização.

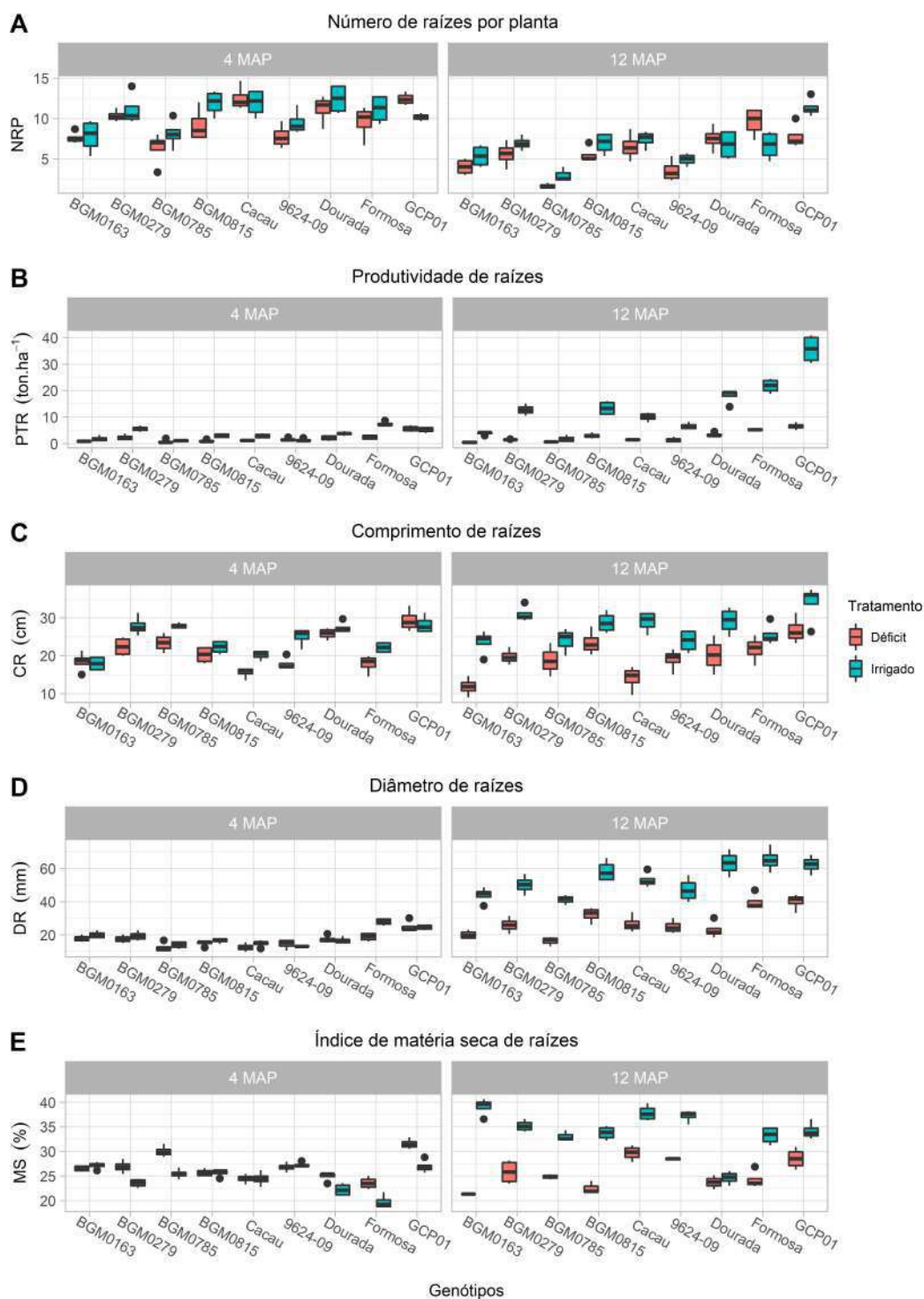


Figura 3. BoxPlot das características agrônômicas das raízes de mandioca avaliadas em diferentes genótipos em dois tratamentos hídricos (irrigado e déficit hídrico) e colhidos aos quatro e doze meses após o plantio (4 MAP e 12 MAP)

Em relação à produtividade de raízes, não houve um grande acréscimo dos 4 MAP para os 12 MAP, em função do crescimento e maturação fisiológica das

plantas no experimento com deficit hídrico. Isto ocorreu basicamente no tratamento irrigado para a maioria dos genótipos (exceto BGM0785) (Figura 3). Outra observação importante é que o comprimento das raízes permaneceu praticamente inalterado dos 4 para os 12 MAP (Figura 3 C). O contrário foi observado para o diâmetro das raízes. Estes resultados são consistentes com as observações de campo que demonstram que a partir dos 4 MAP as raízes estão praticamente formadas e a partir desta fase ocorre basicamente a sua tuberização.

Eficiência dos modelos de predição

Em relação à predição da PTR utilizado apenas os dados fisiológicos e agrônômicos dos experimentos irrigados verificou-se uma capacidade preditiva bastante elevada com R^2 variando de 0,85 (modelo SVM) a 0,90 (modelo LRBS), enquanto que o RMSE variou de 0,76 (PLS) a 1,06 (LRBS) (Figura 4). Os modelos LRBS e PLS apresentaram os maiores R^2 (valor 0,90 e 0,87) e menor RMSE (0,69 e 0,76, respectivamente) quando a predição da PTR foi realizada nos experimentos irrigados aos 12 MAP. Nesta condição de predição, o método LRSS apresentou uma maior variação do R^2 e RMSE na validação cruzada.

Para a predição da PTR no experimento com déficit hídrico aos 12 MAP utilizando os dados fenotípicos coletados aos 4 MAP nestas mesmas condições, também se verificou uma elevada capacidade preditiva, sobretudo dos modelos BRR e PLS, em função do elevado R^2 (valor 0,90 e 0,86) e menor RMSE (valor 0,96 e 0,82) (Figura 4). Portanto, independentemente da condição hídrica, o uso de dados fisiológicos e agrônômicos coletados de forma precoce foram capazes de predizer com grande eficiência a PTR final. Embora todos os modelos de predição tenham apresentado R^2 elevado (0,92), as informações da validação cruzada pelo modelo SVM indicaram uma maior variação na predição deste modelo. Além disso, assim como no experimento irrigado, o modelo LRBS apresentou maior média e variação no RMSE.

A capacidade preditiva ainda se manteve bastante elevada para a maioria dos modelos nas predições cruzadas, ou seja, ao utilizar os dados fisiológicos e agrônômicos dos experimentos irrigados aos 4 MAP para predição da PTR aos 12 MAP no experimento com déficit hídrico e vice-versa. Entretanto, nestes casos, a variação no R^2 foi mais elevada (variação de 0,85 a 0,92) para alguns modelos como LRBS e NeNet (Figura 4). Os modelos BRR e PLS apresentaram os maiores

R^2 (valor 0,92) e menor RMSE (valor 0,73 e 0,76) quando a predição da PTR ocorreu no experimento com déficit hídrico a partir dos dados do experimento irrigado colhido aos 4MAP. No outro caso, predição da PTR no experimento irrigado a partir dos dados do experimento com déficit hídrico colhido aos 4MAP, além de BRR e PLS, o modelo LRSS também foi bastante eficiente na predição pelo baixo RMSE.

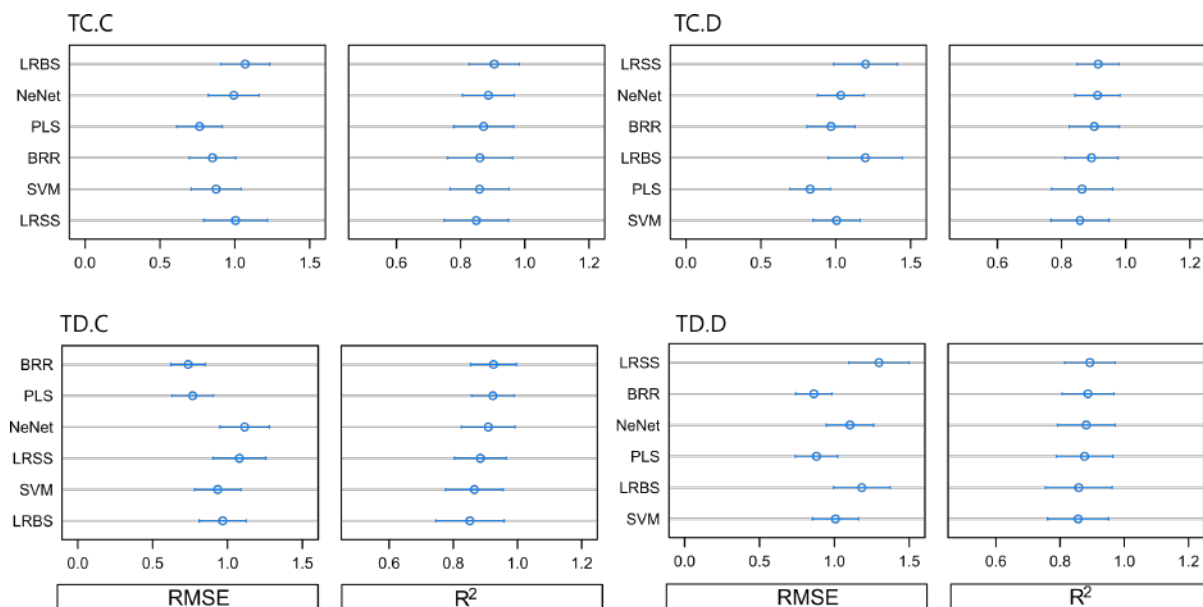


Figura 4. Desempenho dos modelos de predição: *linear regression with stepwise Selection* (LRSS), *linear regression with backward selection* (LRBS), *neural network* (NeNet), *support vector machines* (SVM), *bayesian ridge regression* (BRR) e *partial least squares* (PLS), avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e erro quadrático médio (RMSE). TC. C: dados do tramento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TC. D: dados do tramento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados déficit. TD. C: dados do tramento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TD. D: dados do tramento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados de déficit.

Apesar dos modelos NeNet, BRR e PLS terem apresentado elevadas capacidades preditivas no treinamento dos dados irrigados aos 4 MAP e na validação destes mesmos experimentos aos 12 MAP, verificou-se que o modelo PLS foi mais acurado em comparação com BRR e SVM (Figura 5). De forma

análoga, o treinamento no conjunto de genótipos submetidos ao déficit hídrico coletados aos 4 MAP e a validação nesta mesma condição de estresse hídrico demonstrou maior acurácia de predição do modelo PLS em comparação com SVM e LRSS, SVM em comparação com LRSS, NeNet em comparação com LRSS, e LRBS em comparação com LRSS.

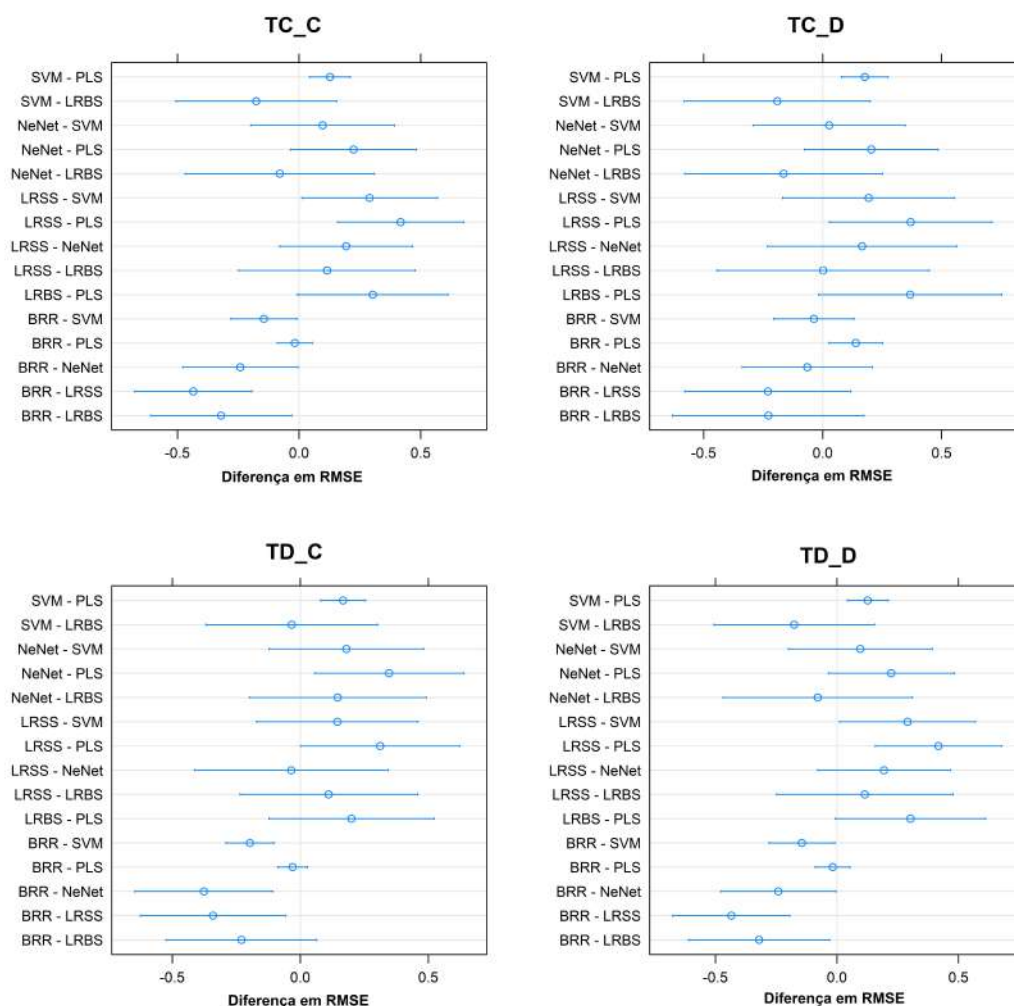


Figura 5. Comparação do erro médio quadrático (RMSE) dos modelos de predição da produtividade de raízes aos 12 meses após o plantio (MAP). *Linear regression with stepwise Selection* (LRSS), *linear regression with backward selection* (LRBS), *neural network* (NeNet), *support vector machines* (SVM), *bayesian ridge regression* (BRR) e *partial least squares* (PLS), ao nível de confiança de 0,997. TC. C: dados do tramento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TC. D: dados do tramento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados déficit. TD. C: dados do tramento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TD. D: dados do tramento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados de déficit.

Na predição cruzada, envolvendo o treinamento nos dados irrigados aos 4 MAP e validação nos mesmos experimentos de déficit hídrico aos 12 MAP, novamente o PLS foi mais acurado na predição da PTR em comparação com os modelos SVM, NeNet, LRSS, LRBS e BRR. A predição inversa (treinamento nos dados de déficit hídrico aos 4 MAP e validação nos mesmos experimentos irrigados aos 12 MAP), também demonstrou maior acurácia do PLS em comparação com os modelos SVM, NeNet, LRSS e LRBS (Figura 5).

Em relação aos valores preditos e observados (Figura 6), os modelos BRR, SVM e PLS mostraram-se mais eficientes quanto ao conjunto de validações realizadas para todas as condições de treinamentos. Diferentemente dos modelos LRSS e LRBS que apresentaram alta variação nos dados em todas os cenários de predição. Apesar do NeNet apresentar pouca variação entre os dados preditos e observados, este modelo apresentou maior variação do R^2 e RMSE nos procedimentos de validação cruzada.

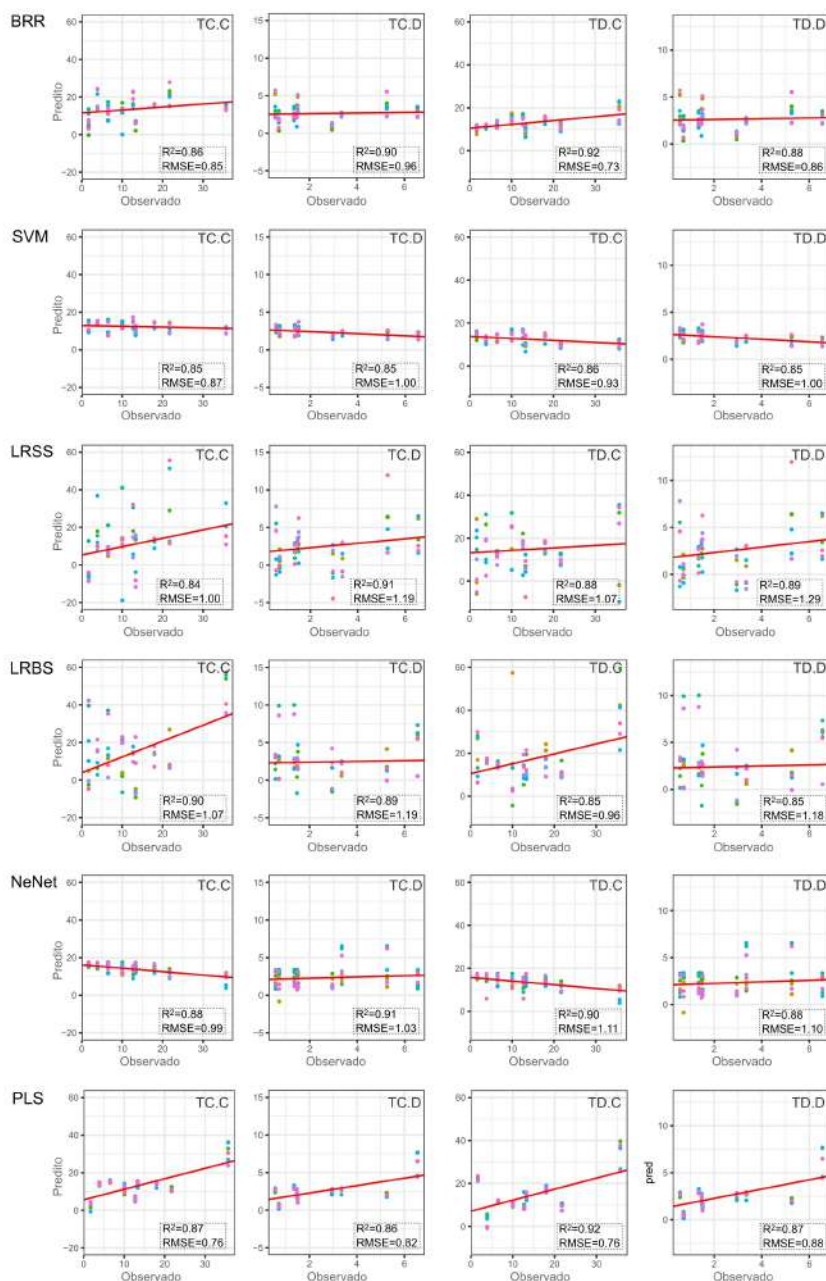


Figura 6. Regressão entre os valores observados e preditos para a produtividade final de raízes de mandioca (12 meses após o plantio – MAP), com base em dados agrônômicos avaliados aos 4MAP em experimentos irrigados e com déficit hídrico. A predição foi realizada com base em seis diferentes modelos utilizando validação cruzada. TC. C: dados do tratamento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TC. D: dados do tratamento controle colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados déficit. TD. C: dados do tratamento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados controle. TD. D: dados do tratamento com déficit colhidos aos 4 MAP para predição aos 12 MAP com dados de déficit. Cores diferentes representam cada repetição da validação cruzada.

Principais características preditivas

As características mais importantes (importância relativa acima de 80%) na predição da PTR aos 12 MAP, independentemente do regime hídrico, foram CondEsto, PTR e DR quando se utilizou o modelo PLS nos dados fisiológicos e agronômicos obtidos em experimentos irrigados (4 MAP) para treinamento (Figura 7). Por outro lado, além da CondEsto, PTR e IAF, os demais modelos de predição indicaram as características: TempPo, NR, DR, MS e TempInfr como de alta importância nestas condições de predição (Figura 7).

Na predição da PTR aos 12 MAP, tendo os dados fisiológicos e agronômicos obtidos em experimentos com déficit hídrico (4 MAP) como população de treinamento, verificou-se que as características PTR, DR e CondEsto apresentaram alta importância relativa no modelo PLS, independente do regime hídrico de validação. Entretanto, NR também foi importante no modelo PLS na predição da PTR nos ensaios irrigados. De forma semelhante aos dados dos experimentos irrigados como treinamento, as características CondEsto e PTR mantiveram sua importância relativa nos demais modelos de predição, enquanto que a característica NR apresentou maior importância relativa nos experimentos de déficit hídrico como treinamento (Figura 7).

Independente do regime hídrico de validação, e considerando o modelo de maior capacidade preditiva (PLS), as características CondEsto, PTR e DR aos 4 MAP foram as mais importantes para predição da produtividade final de raízes. Por outro lado, a característica IAF apresentou alta importância relativa na validação da PTR nos experimentos irrigados e DR nos experimentos com déficit hídrico. Portanto, além das altas acurácias preditivas, o modelo PLS indicou que das 14 características avaliadas, apenas quatro delas (CondEsto, PTR, IAF e DR) poderiam ser utilizadas nas avaliações precoces para predição da PTR.

Para os demais modelos de predição e independente do regime hídrico de validação, as características IAF, CondEsto e DR foram comuns para as diferentes predições da produtividade final de raízes. Para os modelos de predição os outros modelos (LRSS, LRBS, NeNet, SVM e BRR) das 14 características fisiológicas e agronômicas sete delas (CondEsto, IAF, DR, MS, NR, PTR, TempInfr e TempPo) foram as de maior importância relativa (Figura 7)

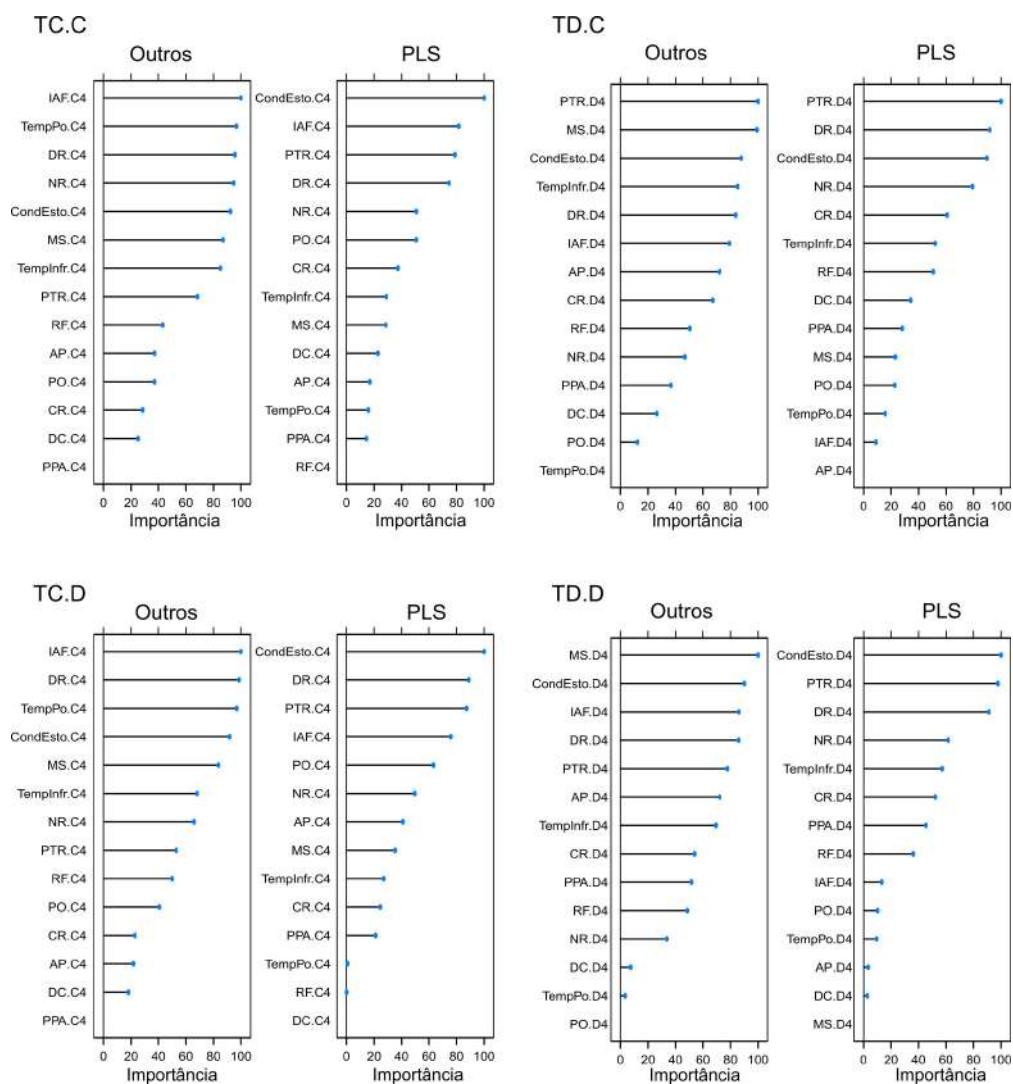


Figura 7. Importância das características agrônômicas e fisiológicas na predição dos modelos de predição *Partial Least Squares* (PLS), *Linear Regression with Stepwise Selection* (LRSS), *Linear Regression with Backwards Selection* (LRBS), *Neural Network* (NeNet), *Support Vector Machines* (SVM), *Bayesian Ridge Regression* (BRR). TC. C e TC. D: treinamento com os dados fisiológicos e agrônômicos obtidos em experimentos irrigados colhidos aos 4 MAP para predição no experimento irrigado e com déficit hídrico aos 12 MAP, respectivamente. TD.C e TD.D: treinamento com os dados fisiológicos e agrônômicos obtidos em experimentos com déficit hídrico colhidos aos 4 MAP para predição no experimento irrigado e com déficit hídrico aos 12 MAP, respectivamente. CondEsto: condutância estomática; TempPo: Temperatura foliar medida com auxílio do porômetro ($^{\circ}\text{C}$); TempInfr: temperatura foliar medida com câmera infravermelho ($^{\circ}\text{C}$); IAF: índice de área foliar; PO: potencial osmótico foliar (mmol kg^{-1}); AP: altura da planta; PPA: produtividade da parte área; RF: retenção foliar; DC: diâmetro do caule; NRP: número de raízes por planta; PTR: produtividade de raízes; CR: comprimento de raízes; DR: diâmetro de raízes; MS(%): índice de matéria seca de raízes.

De modo geral, independentemente do modelo de predição, da população de treinamento e validação, as características PPA, DC, PO, AP e RF apresentaram as menores importâncias relativas na predição da PTR tanto nos experimentos irrigados quanto de déficit hídrico.

DISCUSSÃO

Variação das características fisiológicas e agronômicas

Plantas de mandioca submetidas à restrição hídrica tendem a reduzir a atividade fisiológica, culminando com a redução na produtividade de raízes e parte aérea (EL-SHARKAWY, 2006). De modo geral, a restrição hídrica por 30 dias não influenciou drasticamente as características: TempPo, TempIfr e PO. Contudo, para CondEsto e IAF houve maior variação na resposta dos genótipos em relação aos valores obtidos no experimento irrigado. Aos 12 MAP a mesma tendência dos valores aos 4 MAP foi observada. Isso evidencia que já no primeiro mês de restrição hídrica as plantas manifestam respostas fisiológicas que serão mantidas ao longo do período de restrição hídrica. Nos primeiros meses estresse, a mandioca pode reduzir a CondEsto em até 43%, pois este mecanismo possibilita a retenção de água para manutenção de atividades celulares básicas até 12 MAP (EL-SHARKAWY, 2006). No entanto, a redução da abertura estomática pode diminuir a quantidade de CO_2 na folha, com efeitos diretos sobre a fotossíntese e o crescimento (ALVES, 2002; EL-SHARKAWY, 2007).

Para as características da parte aérea, a imposição do estresse hídrico nas plantas resultou em alteração na variação dos dados aos 4 MAP, com exceção da retenção foliar que não foi influenciada. A redução do crescimento das plantas submetidas ao déficit hídrico é consequência da menor disponibilidade de água que é necessária para promover o transporte de nutrientes em regiões de crescimento e multiplicação celular. Por outro lado, a abscisão foliar provocada pelo estresse é uma alternativa das plantas quando o estresse hídrico ocorre por mais de 150 dias, explicando a baixa variação nos valores dessa característica entre os dois tratamentos hídricos. Por outro lado, a baixa variação dos valores da retenção foliar aos 12 MAP nos dois tratamentos é decorrente da queda natural das folhas das plantas de mandioca nessa idade. De acordo com Alves (2002) a abscisão foliar

ocorrer de 40 a 210 dias a depender da severidade do estresse hídrico e da suscetibilidade do genótipo.

A baixa variação das características relacionadas às raízes aos 4 MAP, possivelmente se deve ao fato de que, independentemente do genótipo, o desenvolvimento das raízes das plantas de mandioca ocorre nos primeiros 3-4 meses, havendo intensa produção de raízes fibrosas para captação de água e nutrientes para crescimento (ALVES, 2002). Por outro lado, aos 12 MAP a resposta das plantas é genótipo-dependente da sua resposta quanto à tolerância ao déficit hídrico, resultando assim em grande variação na produtividade de raízes e outras características relacionados.

Predição da produtividade de raízes em regiões semiáridas

A capacidade de produção da mandioca em ambientes marginais e desfavoráveis faz com que esta espécie tenha grande importância como segurança alimentar nas regiões que a utilizam como alimento básico, a exemplo da África Subsaariana e em algumas regiões do nordeste brasileiro (OKOGBENIN et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2017). Portanto, a avaliação da produtividade de raízes de mandioca é uma característica-chave para seu cultivo em regiões semiáridas, embora procedimentos convencionais para estimá-la sejam demorados e caros, sobretudo quando os experimentos de campo são conduzidos até o final do ciclo da cultura.

Neste trabalho, foram utilizados dados fisiológicos e agronômicos coletados de forma precoce (4 MAP) em experimentos mantidos em condições irrigados e com déficit hídrico para a predição da produtividade de raízes no final do ciclo de produção (12 MAP). A maioria dos modelos de predição apresentou elevada capacidade preditiva (R^2 variando de 0,84 a 0,92, e RMSE variando de 0,73 a 1,29).

Entre os modelos, o PLS foi o que apresentou a maior capacidade preditiva e menor RMSE em todos os cenários de predição da PTR (R^2 variando de 0,86 a 0,92, e RMSE variando de 0,76 a 0,88). Resultados similares também foram observados em outras espécies, na qual o modelo PLS apresentou elevada predição na produtividade de grãos de milho ($R^2 = 0,99$ e RMSE = 17,73) utilizando características fenológicas (SHAIBU et al., 2015). De acordo com estes autores, a elevada capacidade preditiva das características fenológicas avaliadas antes da

colheita, associadas ao modelo PLS para predição da produtividade de grãos de milho podem reduzir o tempo para o desenvolvimento de variedades de milho tolerantes ao déficit hídrico.

Mesmo considerando o uso de outros tipos de dados (imagem de fluorescência hiperespectral) o modelo PLS foi bastante acurado na predição dos efeitos do estresse hídrico em cultivares de soja (MO et al., 2015). Os resultados da validação cruzada do PLS demonstraram alta capacidade preditiva, ou seja, $R^2=0,973$ e $0,969$ quando as imagens hiperespectrais foram tomadas a intervalos entre 8 e 6 dias, respectivamente na fase de desenvolvimento das plantas. Por outro lado, geralmente não há um consenso sobre o melhor método de predição para aplicação em todas as situações (espécies, tipo de dado fenotípico, ambiente de cultivo, etc). Por exemplo, Zaefizadeh et al. (2011) avaliaram o impacto de diferentes genótipos de cevada e a interação genótipo \times ambiente na produtividade da cultura, e verificaram que o modelo de redes neurais apresentou maior capacidade preditiva em comparação com métodos baseados em regressão linear.

A avaliação dos dados fisiológicos e agrônômicos nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas de mandioca para posterior predição da produtividade de raízes no final do ciclo pode ser uma ferramenta de grande utilidade para o melhorista, por reduzir em muito o esforço necessário para a obtenção dos dados fenotípicos. Neste caso, mesmo que a estimativa da produtividade de raízes não seja de elevada acurácia, o ranqueamento e separação dos genótipos de melhor e pior desempenho, já se constitui em um resultado de grande impacto na redução do trabalho e dos custos associados à fenotipagem para tolerância à seca. Além disso, com o *screening* de germoplasma e populações segregantes realizada a cada quatro meses, será possível triplicar a capacidade anual de avaliação de genótipos em condições de campo e obviamente contribuir para redução dos ciclos de melhoramento da espécie.

Em trigo, Garriga et al. (2017), realizaram a fenotipagem de diversos genótipos de trigo, com uso de técnicas de sensoriamento remoto e proximal, para diversas características agrônômicas e fisiológicos associados com a produtividade de grãos e adaptação à seca. Estes autores demonstraram que: 1) as características com maior capacidade preditiva foram a produtividade de grãos e a discriminação isotópica de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$), tanto nos experimentos irrigados quanto de sequeiro; 2) para estas características, o método de classificação *partial least*

square discriminant analysis (PLS-DA), apresentou excelente desempenho na classificação dos genótipos de trigo em duas classes, de menor (80%) e maior desempenho agronômico (20% elite). Portanto, este estudo corrobora a possibilidade de uso dos modelos de predição dos dados fenotípicos (fisiológicos e agronômicos) avaliados em fases precoces para prever e classificar o comportamento e o ranqueamento dos genótipos de mandioca com base em atributos produtivos em condições de déficit hídrico.

Portanto, embora a avaliação dos dados fisiológicos e agronômicos nos estágios iniciais de desenvolvimento das plantas de mandioca para posterior predição da produtividade de raízes no final do ciclo ainda continue sendo um processo de alto custo, certamente existem diversas vantagens comparativas em relação ao procedimento tradicional de colheitas e avaliações anuais. Além disso, o risco de erros na seleção dos genótipos é minimizado pelo fato do *screening* ocorrer no próprio ambiente de adaptação dos materiais genéticos.

Contribuição das características fisiológicas e agronômicas para a predição da produtividade de raízes

Algumas das diferenças na capacidade preditiva dos modelos de predição podem ter ocorrido em função da importância relativa das diferentes características fisiológicas e agronômicas avaliadas precocemente. Por exemplo, no caso do PLS, as características CondEsto e PTR aos 4 MAP foram as mais importantes para predição da produtividade de raízes no final do ciclo, independente do experimento (irrigado ou com déficit hídrico). Por outro lado, a característica IAF apresentou alta importância relativa na validação da PTR nos experimentos irrigados e NR nos experimentos com déficit hídrico. Assim, no PLS apenas quatro delas (CondEsto, PTR, IAF e NR) explicaram a maior parte da variância dos dados nas avaliações precoces para predição da produtividade de raízes no final do ciclo.

De fato, a condutância estomática e a assimilação fotossintética de CO₂ são atributos fisiológicos de extrema importância quando as plantas de mandioca são submetidas ao estresse hídrico, pois ocorre uma forte redução nestas características levando à depleção de carbono, que é um desafio adicional à sobrevivência da mandioca durante longos períodos de seca (DUQUE, 2012). Entretanto, outros mecanismos ajudam a mandioca a sobreviver nestas situações, pois as reservas de carboidratos armazenadas no caule e pecíolos são remobilizadas durante o estresse

hídrico, fornecendo uma fonte de carboidratos para a continuidade da atividade metabólica (DUQUE; SETTER, 2005). Embora o fechamento estomático durante o estresse hídrico possa resultar em maior temperatura da copa das plantas, as características TempPo e TempInfr tiveram uma menor importância relativa no modelo PLS. Entretanto, a mandioca apresenta grande sensibilidade nas respostas estomáticas, pois o fechamento estomático pode ocorrer sob altas exigências evaporativas, mesmo em condições irrigadas, e em níveis moderados de escassez de água (EL-SHARKAWY, 2006).

As outras duas características agrônômicas identificadas pelo PLS como de elevada importância relativa para predição do modelo foram PTR e NR aos 4 MAP. De certa forma é esperado que a produtividade de raízes em estádios precoces de desenvolvimento reflita o potencial produtivo no ciclo final da cultura, sobretudo na cultura da mandioca, tendo em vista que a formação das raízes e início do processo de tuberização ocorre até os quatro meses após o plantio (ALVES, 2006). À partir deste período, ocorre basicamente o enchimento das raízes. Portanto, o potencial produtivo é definido até esta fase no desenvolvimento das plantas de mandioca. Adicionalmente, diversos autores têm demonstrado que o número de raízes de mandioca possui correlação positiva com a produtividade de raízes (SILVA et al., 2016), e portanto, tem alto potencial para seleção indireta da produtividade.

Para os modelos de predição LRSS, LRBS, NeNet, SVM, e BRR, as características IAF, CondEsto, DR e MS apresentaram maior importância relativa (>80%) nos dois experimentos. Adicionalmente, TempPo e NR foram mais importantes nos experimentos irrigados, enquanto PTR e TempInfr apresentaram elevada importância nos experimentos com déficit hídrico como população de treinamento. De acordo com Duque (2012), a temperatura do dossel é o resultado do resfriamento evaporativo das folhas devido à abertura dos estômatos, assim diferenças na temperatura foliar das plantas submetidas ao estresse hídrico fornecem uma ideia das diferenças genotípicas na condutância estomática. Geralmente menor temperatura do dossel em plantas submetidas ao estresse hídrico pode indicar que a umidade do solo ainda está disponível. Portanto, as diferenças na temperatura foliar capturadas pelas medidas TempPo e TempInfr, como resultado do estresse hídrico, explicaram boa parte da variação dos dados nos modelos de predição LRSS, LRBS, NeNet, SVM e BRR.

No nosso estudo, as características PPA, DC, PO, AP e RF apresentaram as menores importâncias relativas para predição da produtividade final de raízes, tanto nos experimentos irrigados quanto de déficit hídrico. Estas observações são contraditórias a diversos relatos na literatura que demonstram os primeiros processos de resposta ao déficit hídrico são a redução no crescimento e expansão de folhas e brotos, associados ao fechamento estomático e abscisão foliar. Isto faz com que as plantas conservem a água disponível e limitem a demanda respiratória e de carboidratos durante o estresse (EL-SHARKAWY, 2006; SETTER; FREGENE, 2007).

Outra característica afetada pelo estresse hídrico é a altura da planta, cuja correlação negativa como a produtividade de raízes em condições de estresse hídrico, pode ser uma vantagem pelo favorecimento do crescimento das raízes em detrimento da parte aérea (DUQUE, 2012). Por outro lado, de acordo com este último autor, a retenção foliar não foi significativamente associada à produtividade de raízes, embora Lenis et al. (2006) tenham relatado que a retenção foliar é chave para alcançar alta produtividade de raízes. Diante destes relatos, é possível especular que a menor variabilidade genética dos genótipos de mandioca avaliados no presente estudo pode ter contribuído para a baixa importância relativa das características PPA, DC, PO, AP e RF para predição da produtividade final de raízes. Além disso, após um mês de estresse hídrico severo (terceiro para o quarto mês após plantio), todos genótipos submetidos ao estresse hídrico mantiveram um pequeno número de folhas no ápice da parte aérea, o que provavelmente deve ter proporcionado uma taxa fotossintética suficiente para sobrevivência das plantas nestas condições.

Perspectivas para uso na seleção de genótipos de mandioca tolerantes ao déficit hídrico

Os efeitos atuais da mudança climática sobre os padrões climáticos e a ocorrência de eventos inesperados estão os ganhos de produtividade em diversas espécies vegetais (HERNÁNDEZ-BARRERA et al., 2017). Portanto, este cenário relativamente recente tem desafiado os melhoristas de mandioca a acelerar o desenvolvimento e recomendação de novas variedades com alta produtividade e qualidade de raízes, além da adaptação a condições ambientais de cultivo mais

complexas, que envolvem altas temperatura e longos períodos de estiagem, sobretudo nas regiões semiáridos.

Pesquisas genômicas tem produzido muitas informações sobre a genética de várias espécies vegetais, com evoluções cada vez mais importantes na geração de grande quantidade de informações moleculares com baixo custo, associadas a grandes plataformas de análise e armazenamento de dados. Entretanto, estas informações moleculares superam em muito a atual capacidade de fenotipagem de plantas (YANG et al., 2014), sobretudo em condições de campo. Este “gargalo de fenotipagem” tem limitado a capacidade de entender como os fenótipos expressos se correlacionam com fatores genéticos e ambientais, culminando com o reduzido avanço no entendimento de características complexas nos programas de melhoramento genético, a exemplo da tolerância à seca (GROßKINSKY et al., 2015; UBBENS; STAVNESS, 2017). Portanto, melhorias constantes nas metodologias de fenotipagem e seleção de plantas sob estresse hídrico devem ser realizadas, para acompanhar a evolução genômica e ao mesmo tempo continuar trazendo resultados práticos no aumento da produtividade das culturas.

É de consenso na literatura que a tolerância da mandioca ao déficit hídrico seja devida a vários mecanismos fisiológicos que permitem que a espécie suportar longos períodos de estiagem. De modo geral, os principais mecanismos envolvem: 1) fechamento estomático das folhas para evitar danos ao sistema fotossintético e manutenção da atividade fotossintética quando houver suprimento de água; 2) redução drástica no crescimento foliar; 3) abscisão das folhas mais velhas e manutenção de folhas no ápice da planta para que haja um mínimo necessário de fotossíntese ativa; e 4) desenvolvimento de raízes em áreas mais profundas do solo para extração de água (EL-SHARKAWY, 2004; LENIS et al., 2006; DUQUE, 2012; OKOGBENIN et al., 2013; MULUALEM; BEKEKO, 2015).

Considerando os mecanismos mencionados acima, diversas características fisiológicas e agronômicas têm sido utilizadas na avaliação de germoplasma tolerantes ao déficit hídrico. Entretanto, a adoção de variedade tolerantes ao estresse hídrico depende do interesse e da vontade dos agricultores em testar e continuar utilizando estas variedades. Assim, os critérios de seleção destas novas variedades devem levar em consideração características que efetivamente atendam aos anseios e expectativas dos agricultores. Isto é necessário porque o aumento na adoção de variedades melhoradas ocorre quando diferenças na produtividade ou

mesmo na qualidade das raízes entre as novas variedades e as variedades locais (tradicionalmente cultivadas) são percebidas pelos agricultores. Portanto, as características utilizadas no presente trabalho são aquelas consideradas mais importantes para recomendações futuras de novas variedades para condições semiáridas de cultivo, pois envolvem atributos produtivos tanto das raízes quanto da parte aérea que são buscados pelos agricultores no momento da adoção das variedades de mandioca.

Embora nossos dados sejam oriundos de apenas um ano de cultivo, os resultados desta prova de conceito foram suficientes para determinar o potencial de uso desta abordagem de predição precoce da produtividade final de raízes de mandioca em programas de melhoramento da espécie, ou mesmo programas de pesquisa que visem simplesmente a seleção de variedades locais com maior tolerância ao déficit hídrico. Em outras espécies, como o milho, mesmo utilizando menor número de genótipos (6) houve uma elevada predição na produtividade de grãos ($R^2 = 0,99$) utilizando características fenológicas como preditores (SHAIBU et al., 2015). Portanto, mesmo sendo necessária a realização de estudos adicionais com um maior número de genótipos de mandioca e em diferentes anos de cultivo para validação da metodologia, nossos resultados sugerem a possibilidade de identificar genótipos elite com maior capacidade de produção em condições de déficit hídrico, com avaliação de dados fenotípicos aos quatro meses após o plantio. Além disso, a avaliação de características fisiológicas e agrônômicas de maior importância relativa, como CondEsto, PTR, IAF e NR, poderá contribuir para maior eficiência dos programas de melhoramento de plantas por acelerar a seleção e liberação de variedades elite com maior adaptação a condições ambientais adversas de seca.

A estratégia proposta neste estudo pode reduzir o custo da fenotipagem para tolerância ao déficit hídrico em mandioca, considerando diversos aspectos: 1) a quantidade de biomassa (parte aérea e raízes) produzida aos 4 MAP é muito menor do que aquela produzida no final do ciclo da cultura, com isso, o tempo necessário nas avaliações fenotípicas é muito menor; 2) a fenotipagem da tolerância ao déficit hídrico aos 4 MAP permitiria a realização de pelo menos três ciclos anuais de avaliação na mesma área, contribuindo para otimização do uso da área e para rápido *screening* de germoplasma e populações segregantes; 3) os custos da montagem e manutenção dos experimentos de campo seriam menores, pelo fato de

ter que manter as plantas apenas por 4 meses ao invés de 12 meses; 4) redução do ciclo de melhoramento da mandioca para maior tolerância do estresse hídrico; 5) maximização das chances de adoção das novas variedades de mandioca pelo fato da seleção para tolerância ao déficit hídrico estar sendo realizada no próprio local de adaptação.

Por outro lado, embora a metodologia proposta não envolva estratégias de fenotipagem de alto rendimento, é possível associar uma ampla gama de tecnologias para obtenção de informações biométricas de maneira não destrutiva, a exemplo, de imagens térmicas, coloridas, fluorescência, infravermelho próximo (NIR) e imagens hiperespectrais para aumentar a capacidade de análise e de otimização dos processos de fenotipagem para tolerância a seca em mandioca (ROUSSEAU et al., 2013; MO et al., 2015).

REFERÊNCIAS

ADJEBENG-DANQUAH, J. GRACEN, V.E.; OFFEI, S.K.; ASANTE, I.K.; MANU-ADUENING, J. Genetic variability in storage root bulking of cassava genotypes under irrigation and no irrigation. **Agriculture & Food Security**, v.5, a.9, 2016.

AINA, O.O.; DIXON, A.G.O.; AKINRINDE, E.A. Effect of soil moisture stress on growth and yield of cassava in Nigeria. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.10, p.3085-3090, 2007.

ALVES, A. A. C. Cassava botany and physiology. In: HILLOCKS, R. J.; THRESH, J. M.; BELLOTTI, A. C. Cassava: Biology, production and utilization. Oxon: **CABI Publishing**, p.67-89, 2002.

ALVES, A.A.C. Fisiologia da mandioca. In: SOUZA, L.S.; FARIAS, A.R.; MATTOS, P.L.P.; FUKUDA, W.M.G. (Ed.). **Aspectos socioeconômicos e agrônômicos da mandioca**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2006. p. 138-169.

ARNHOLD, E. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. **Brazilian Journal Veterinary Research Animal Science**, v.50, p.488-492, 2013.

AZEVEDO, A.M.; ANDRADE JÚNIOR, V.C.; PEDROSA, C.E.; OLIVEIRA, C.M.; DORNAS, M.F.S.; CRUZ, C.D.; VALADARES, N.R. Application of artificial neural networks in indirect selection: a case study on the breeding of lettuce. **Bragantia**, v.74, p.387-393, 2015.

CEBALLOS, H.; PÉREZ, J.C.; JOAQUI BARANDICA, O.; LENIS, J.I.; MORANTE, N.; CALLE, F.; PINO, L.; HERSHEY, C.H. Cassava breeding I: the value of breeding value. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1227, 2016.

CORTES, C.; VAPNIK, V.N. Support vector networks. **Machine Learning**, v.20, p.273-297, 1995.

DELGADO, A.; HAYS, D.B.; BRUTON, R.K.; CEBALLOS, H.; NOVO, A.; BOI, E.; SELVARAJ, M.G. Ground penetrating radar: a case study for estimating root bulking rate in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Plant Methods**, v.13, p1-11, 2017.

DUQUE, L. Cassava drought tolerance mechanisms re-visited: evaluation of drought tolerance in contrasting cassava genotypes under water stressed environments. PhD thesis, Cornell Univ. (2012).

DUQUE, L.O.; SETTER, T.L. Response of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) to terminal water stress: ABA, sugar and starch accumulation/partitioning and root growth under different water regime treatments. pp.L 5.09, Interdrought II, 2005, Rome, Italy.

ELIAS, A.A.; RABBI, I.; KULAKOW, P.; JANNINK, J.L. Improving genomic prediction in cassava field experiments by accounting for interplot competition. **G3**, v.8, p.933–944, 2018.

EL-SHARKAWY, M. A. Cassava biology and Physiology. **Plant Molecular Biology**, v. 56, p. 481-501, 2004.

EL-SHARKAWY, M.A. International research on cassava photosynthesis, productivity, ecophysiology, and responses to environmental stresses in the tropics. **Photosynthetica** 44:481-512, 2006.

EL-SHARKAWY, M.A. Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: Implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.257-286, 2007

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT database. Disponível em <<http://faostat3.fao.org/analysis/Q/QC/E>>. Acesso em: 20-de novembro de 2017.

GARETH, J.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R**. Springer Publishing Company, Incorporated, 426p. 2014.

GARRIGA, M.; ROMERO-BRAVO, S.; ESTRADA, F.; ESCOBAR, A.; MATUS, I.A.; POZO, A.D.; ASTUDILLO, C.A.; LOBOS, G.A. Assessing wheat traits by spectral reflectance: do we really need to focus on predicted trait-values or directly identify the elite genotypes group? **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1-12, 2017.

GROßKINSKY, D.K.; SVENSGAARD, J.; CHRISTENSEN, S.; ROITSCH, T. Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap. **Journal of Experimental Botany**, v.66, p.5429–5440, 2015.

GUIMARÃES, B.V.C.; DONATO, S.L.R.; AZEVEDO, A.M.; ASPIAZÚ, I.; SILVA JUNIOR, A.A. Prediction of ‘Gigante’ cactus pear yield by morphological characters and artificial neural networks. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.5, p.315-319, 2018.

GÜNTHER, F.; FRITSCH, S. neuralnet: Training of neural networks. **The R Journal**, v.2, p.30-38, 2010.

HERNÁNDEZ-BARRERA, S.; RODRÍGUEZ-PUEBLA, C.; CHALLINOR, A.J. Effects of diurnal temperature range and drought on wheat yield in Spain. **Theoretical and Applied Climatology**, v.129, p.503–519, 2017.

JERUMEH, T.R.; OMONONA, B.T. Determinants of transition in farm size among cassava-based farmers in Nigeria. **Kasetsart Journal of Social Sciences**, in press, p.1-7, 2018.

KARATZOGLOU, A.; SMOLA, A.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. kernlab – an S4 package for kernel methods in R. **Journal of Statistical Software**, v.11, p.1-20, 2004.

KAYONDO, S.I.; DEL CARPIO, D.P.; LOZANO, R.; OZIMATI, A.; WOLFE, M.; BAGUMA, I.; GRACEN, V.; OFFEI, S.; FERGUSON, M.; KAWUKI, R.; JANNINK, J.L. Genome-wide association mapping and genomic prediction for CBSD resistance in *Manihot esculenta*. **Scientific Reports**, v.8, a.1549, 2018.

KUHN M. Caret package. **Journal of Statistical Software**, v.28, p.1-26, 2008.

LENIS, J.I.; CALLE, F.; JARAMILLO, G.; PEREZ, J.C.; CEBALLOS, H.; COCK, J.H. Leaf retention and cassava productivity. **Field Crops Research**, v.95, p.126-134, 2006.

MO, C.; KIM, M.S.; KIM, G.; CHEONG, E.J.; YANG, J.; LIM, J. Detecting drought stress in soybean plants using hyperspectral fluorescence imaging. **Journal of Biosystems Engineering**, v.40, p.335-344, 2015.

MULUALEM, T.; BEKEKO, Z. Assessment of conventional breeding on cassava and its physiological adaptive mechanisms: implication for moisture stress. **Asian Journal of Agricultural Research**, v.9, p.38-54, 2015.

NDUWUMUREMYI, A.; MELIS, R.; SHANAHAN, P.; THEODORE, A. Genetic inheritance of pulp colour and selected traits of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) at early generation selection. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.98, p.3190-3197, 2018.

OJULONG, H.; LABUSCHAGNE, M.T.; HERSELMAN, L.; FREGENE, M.A. Yield traits as selection indices in seedling populations of cassava. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.10, p.191-196, 2010.

OKOGBENIN, E.; SETTER, T.L.; FERGUSON, M.; MUTEKI, R.; CEBALLOS, H.; OLASANMI, B.; FREGENE, M. Phenotypic approaches to drought in cassava:

review. **Frontiers in Physiology**, v.4, p.1-15, 2013.

OLIVEIRA, E.J.; AIDAR, S.T.; MORGANTE, C.V.; CHAVES, A.R.M.; CRUZ, J.L.; COELHO FILHO, M.A. Genetic parameters for drought-tolerance in cassava. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.233-241, 2015.

OLIVEIRA, E.J.; MORGANTE, C.V.; AIDAR, S.T.; CHAVES, A.R.M.; ANTONIO, R.P.; CRUZ, J.L.; COELHO FILHO, M.A. Evaluation of cassava germplasm for drought tolerance under field conditions. **Euphytica**, v.213, a.188, 2017.

OLIVEIRA, E.J.; RESENDE, M.D.V.; SANTOS, V.S.; FERREIRA, C.F.; OLIVEIRA, G.A.F.; SILVA, M.S.; OLIVEIRA, L.A.; AGUILAR-VILDOSO, C.I. Genome-wide selection in cassava. **Euphytica**, v.187, p. 263–276, 2012.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 20/12/2017.

ROUSSEAU, C.; BELIN, E.; BOVE, E.; ROUSSEAU, D.; FABRE, F.; BERRUYER, R.; GUILLAUMÈS, J.; MANCEAU, C.; JACQUES, M.A.; BOUREAU, T. High

throughput quantitative phenotyping of plant resistance using chlorophyll fluorescence image analysis. **Plant Methods**, v.9, a.17, 2013.

SARKAR, D. **Lattice: multivariate data visualization with R**. Springer-Verlag, New York, NY, ISBN 978-0-387-75968-5. 268 pp, 2008.

SETTER, T.L.; FREGENE, M.A. Recent advances in molecular breeding of cassava for improved drought stress tolerance, in: *Advances in molecular-breeding toward drought and salt tolerant crops*, eds Jenks M., Hasegawa P., Jain M., editors. (Berlin, Germany: Springer), 701–711, 2007.

SHAIBU, A. S.; ADNAN A. A.; UMAR I. R.; Predicting grain yield of maize using drought tolerance traits. **African Journal of Agricultural**, v.10, p.3332-3337, 2015.

SILVA, R.S.; MOURA, E.F.; FARIAS NETO, J.T.; SAMPAIO, J.E. Genetic parameters and agronomic evaluation of cassava genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.7, p.834-841, 2016.

SOARES, F.C.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; RUSSI, J.L. Predição da produtividade da cultura do milho utilizando rede neural artificial. **Ciência Rural**, v.45, p.1987-1993, 2015.

SOUZA, E.R.; FREIRE, M.B.G.S.; CUNHA, K.P.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; RUIZ, H. A.; LINS, C.M.T. Biomass, anatomical change and osmotic potential in *Atriplex numulária* L. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.82, p.20-27, 2012

UBBENS, J.R.; STAVNESS, I. Deep plant phenomics: a deep learning platform for complex plant phenotyping tasks. **Frontiers in Plant Science**, v.8, a.1190, 2017.

WEHRENS, R.; MEVIK, B. The pls Package: principal component and partial least squares regression in R. **Journal of Statistical Software**, v.8, p.1-23, 2007.

WOLFE, M.D.; DEL CARPIO, D.P.; ALABI, O.; EZENWAKA, L.C.; IKEOGU, U.N.; KAYONDO, I.S.; LOZANO, R.; OKEKE, U.G.; OZIMATI, A.A.; WILLIAMS, E.; EGESI, C.; KAWUKI, R.S.; KULAKOW, P.; RABBI, I.Y.; JANNINK, J.L. Prospects for genomic selection in cassava breeding. **Plant Genome**, v.10, p.1-19, 2017.

YANG, W.; GUO, Z.; HUANG, C.; DUAN, L.; CHEN, G.; JIANG, N.; FANG, W.; FENG, H.; XIE, W.; LIAN, X.; WANG, G.; LUO, Q.; ZHANG, Q.; LIU, Q.; XIONG, L. Combining high-throughput phenotyping and genome-wide association studies to reveal natural genetic variation in rice. **Nature Communication**, v.5, a.5087, 2014.

ZAEFIZADEH, M.; KHAYATNEZHAD, M.; GHOLAMIN, R. Comparison of multiple linear regressions (MLR) and artificial neural network (ANN) in predicting the yield using its components in the hulless barley. **American-Eurasian Journal of Agriculture & Environment Science**, v.10, p.60-64, 2011.

ZHAO, P.; LIU, P.; SHAO, J.; LI, C.; WANG, B.; GUO, X.; YAN, B.; XIA, Y.; PENG, M. Analysis of different strategies adapted by two cassava cultivars in response to drought stress: ensuring survival or continuing growth. **Journal of Experimental Botany**, v.66, p.1477–1488, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estabelecimento de protocolos de fenotipagem que permitam a predição do comportamento de genótipos com potencial produtivo para maior tolerância à seca, em um curto período de avaliação, ainda é um desafio na cultura da mandioca. O desempenho precoce de genótipos de mandioca e épocas de colheita em condições de déficit hídrico não tem sido explorado para otimizar as ferramentas de fenotipagem e análise para mitigação do estresse hídrico.

No presente estudo, foram avaliados o desempenho agrônomico de genótipos de mandioca em duas condições hídricas (irrigado e sob déficit hídrico) e em diferentes épocas de colheita, para: 1) identificar o potencial produtivo de genótipos contrastantes de mandioca para tolerância ao déficit hídrico e o período crítico para realização de fenotipagens precoces de forma a otimizar o processo de seleção nestas condições; e 2) construir modelos de predição da produtividade final de raízes, com base em dados fisiológicos e agrônomicas oriundos de colheitas precoces em diferentes genótipos de mandioca obtidos em duas condições hídricas no semiárido do Nordeste brasileiro.

Em relação ao primeiro objetivo, verificou-se que todas as características agrônomicas foram influenciadas pelo tratamento com déficit hídrico, em todas as épocas de colheita. O ranqueamento dos genótipos variou em função das diferentes épocas de colheita, porém a manutenção daqueles com melhor e pior ranqueamento praticamente permaneceu inalterado, indicando a possibilidade de realização de colheitas precoces como estratégia para otimizar a seleção de genótipos produtivos e tolerantes ao déficit hídrico. O ranqueamento realizado pela seleção precoce aos 4 e 5 meses após o plantio (MAP) nos experimentos irrigados e de sequeiro, respectivamente, foi bastante similar ao ranqueamento dos genótipos aos 12 MAP.

Para o segundo objetivo, verificou-se que a maioria dos modelos apresentou alta capacidade preditiva da produtividade final de raízes (R^2 variando de 0,86 a 0,92), embora o PLS tenha resultado em elevado R^2 (0,76 a 0,92) associado ao menor *root-mean-square error* - RMSE (0,76 a 0,88). Independentemente da condição hídrica, o uso de dados fisiológicos e agrônomicos coletados de forma precoce, foi capaz de prever com grande eficiência a produtividade final de raízes. Portanto, a predição precoce da produtividade final de raízes poderá reduzir o custo da fenotipagem para tolerância ao déficit hídrico em mandioca, sobretudo

pela menor quantidade de biomassa (parte aérea e raízes) a ser mensurada; possibilidade de realização de pelo menos três ciclos anuais de avaliação na mesma área; menores custos da montagem e manutenção dos experimentos de campo; maximização das chances de adoção das novas variedades de mandioca por utilizar e selecionar os genótipos com base em atributos agronômicos mais percebidos pelos agricultores, e no próprio ambiente de cultivo; e principalmente pela possibilidade de redução do ciclo de melhoramento da mandioca para maior tolerância do estresse hídrico.