

MARIANA CECÍLIA MELO

**IRRIGAÇÃO EM PASTAGENS POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL E  
MODELAGEM DO MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia -Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

RIO PARANAÍBA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca UFV - Campus de Rio Paranaíba**

T

M528i

Melo, Mariana Cecília, 1987-

Irrigação em pastagens por gotejamento subsuperficial e modelagem do movimento de água no solo / Mariana Cecília Melo. – Rio Paranaíba, MG, 2018.  
xi, 81 f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Luis César Dias Drumond.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa-Campus Rio Paranaíba.

Inclui bibliografia

1. Irrigação localizada. 2. *Brachiaria brizantha*. 3. Fluxo de água no solo. I. Universidade Federal de Viçosa-Campus Rio Paranaíba. Centro de Ciências Agrárias. Mestrado em Agronomia-Produção vegetal (Campus CRP). II. Título.

CDD 22. ed. 631.7

**MARIANA CECÍLIA MELO**

**IRRIGAÇÃO EM PASTAGENS POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL E  
MODELAGEM DO MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia -Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de janeiro de 2018.

---

Rejane Nascentes

---

Alberto Carvalho Filho  
(Coorientador)

---

Luís César Dias Drumond  
(Orientador)

*Dedico*

*Ao marido Lucas e filhos Matheus e Maria.*

*Aos meus pais Roza e Gilberto*

*Meus irmãos Fabiano e Jefferson (in memoriam)*

*Pelo amor, carinho, incentivo e confiança.*

*Nasceste no lar que precisavas, vestiste o corpo físico que merecias, moras onde melhor Deus te proporcionou, de acordo com teu adiantamento. Possuis os recursos financeiros coerentes com as tuas necessidades, nem mais, nem menos, mas o justo para as tuas lutas terrenas.*

*Teu ambiente de trabalho é o que elegeste espontaneamente para a tua realização. Teus parentes, amigos são as almas que atraístes, com tua própria afinidade. Portanto, teu destino está constantemente sob teu controle*

*Tu escolhes, recolhes, eleges, atraís, buscas, expulsas, modificas tudo aquilo que te rodeia a existência. Teus pensamentos e vontades são a chave de teus atos e atitudes... São as fontes de atração e repulsão na tua jornada vivência.*

*Não reclames nem te faças de vítima. Antes de tudo, analisa e observa. A mudança está em tuas mãos. Reprograme tua meta, busque o bem e viverás melhor.*

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”*

*Francisco Cândido Xavier*

## AGRADECIMENTOS

O grande e mais esperado momento chegou! Parei...pensei...e me passou um filme de tudo que passei desde o início deste trabalho. A colaboração, força e incentivo que tive da minha família, professores e amigos, independentemente da distância, não tem quantificação. Vocês me acalmaram, me incentivaram, me deram ânimo para que eu pudesse seguir a diante nesta jornada! Vocês compartilharam comigo momentos difíceis e outros de descontração, sempre me apoiando e torcendo para que tudo caminhasse bem. Sou muito grata por tê-los em minha vida! Por isso, primeiramente agradeço a Deus, pai misericordioso, de pura bondade e amor! Obrigada por fortalecer meu espírito, por me iluminar e me guiar. Por sempre estar presente em mim por meio da fé!

Agradeço à minha família, Maria, Mateus e Lucas, pelo amor incondicional. Por me aguentarem 24 horas por dia, há anos! Por compartilharem literalmente todos esses momentos comigo! Vocês são a alegria do meu viver! Vocês são meu alicerce e minha esperança.

Agradeço a meus pais, Roza e Gilberto, principalmente a minha amada mãe, por nunca medir esforços para que eu chegasse até aqui. Por sempre, rezar e torcer por mim. Por ter apoiado meus sonhos e pretensões, mesmo que por vezes não acreditasse! Obrigada mãe por ter esse grande coração. Por ser sinônimo de amor! Não tenho palavras o suficiente para dizer o quanto lhe agradeço e o quanto te amo!

Agradeço aos meus irmãos, Fabiano e Jefferson (*in memoria*) por sempre estarem presentes em mim. Fomos unidos pelo sangue e inseparáveis pelo coração. Lembro-me dos melhores e insubstituíveis momentos de quando éramos crianças! Das brincadeiras na rua, das brigas e implicas, da amizade, do conforto de ter um irmão! Meu irmão Jefferson que hoje está ao lado de Deus, digo-lhe que apesar de sua passagem aqui na Terra ter sido breve, ela foi marcante e inesquecível. Você sempre foi uma pessoa do bem. Foi um empreendedor dos bons! Conquistou tudo o que queria em pouco tempo! Quero lhe dizer que você está vivo em mim! Sei que sempre torceu por mim e que está vendo tudo aí do outro lado. Saudades eternas!! Ao meu irmão Fabiano, também não tenho palavras. Sempre nos demos tão bem!! Você é uma pessoa de grande índole. Muito estudioso e aplicado, querido e amado por todos. Sempre trocamos muitas ideias e rumos que tomaríamos, sempre ligados ao estudo! Obrigada pelo apoio, pela compreensão, pela união e amor existente em nós!

Agradeço a minha grande família, avós, tios e tias, primos e primas. Em especial minha madrinha Odaísa, que desde criança me levava à biblioteca. Embora eu pegasse os livros mais finos para encher logo minha fichinha, acredito que foi lá onde toda a motivação começou! Obrigado família Melo e família Feliz por encherem meu coração de esperança, força e amor!

Agradeço a UFV - Campus Rio Paranaíba, ao seu corpo docente, direção, administração e técnicos por proporcionarem a realização deste sonho.

Agradeço à Capes pela concessão da bolsa e a NaanDanJain pela doação do material.

Agradeço aos meus professores, desde o pré-escolar até a pós-graduação, pelos ensinamentos acadêmicos ao longo desta jornada, em especial aos professores Luís César, Alberto, Liliane, Pedro, Vinícius e André, pelas orientações nos momentos de dúvidas e por acreditarem em meu potencial.

Agradeço imensamente ao professor Lucas, pelos grandes momentos de ensinamento e orientação. Você foi quem mais me acompanhou de perto nesta jornada. Obrigada pelo companheirismo, amor, carinho, amizade, compreensão, por sempre acreditar em meu potencial, por me apoiar e me dar forças para continuar! Foram muitas as emoções, mas finalmente chegamos ao fim de mais uma etapa!!!!

Agradeço aos membros do grupo de pesquisas GEPFOR pelo auxílio na montagem do experimento, em especial ao Marcelo, Daiane e Priscila, que acompanharam e me ajudaram na área experimental do início ao fim.

À Paola e Edu pela grande dedicação na obtenção das curvas do solo trabalhado e pela amizade que construímos ao longo deste estudo!

Aos queridos e adoráveis amigos que Rio Paranaíba me presenteou. Rejis, Ernani, Lili, Pedro, Liloca, Dudu, Camila, Márcio, Fernanda e Marcus, admiro vocês! Obrigada pelos grandes momentos de descontração, risadas, bebidas e histórias! Essa cidade não seria a mesma sem vocês!

A Regiane, minha amiga do pedal e por quem tenho um apreço imenso! Você também ouviu muitos desabafos e histórias desse trabalho ao longo dos quilômetros rodados! Muito obrigada pelos momentos de suor, leveza e ao mesmo tempo força!

À Aparecida minha eterna gratidão por estar/ser presente em nossas vidas e por cuidar com tanto carinho de nossa família.

Aos amigos de profissão, meus queridos Engenheiros Agrícolas e Ambientais com quem tive o prazer de estudar! Ao grupo PET.EAA pelo espírito de grupo e liderança que carrego. Aos amigos do mestrado, em especial a Laene, pelos momentos de estudos e trabalhos.

Aos amigos e amigas de Araújo, em especial as Pimentinhas, amigas de uma vida inteira, que mesmo longe estão sempre presentes nos pensamentos! Obrigada pela amizade de sempre!

Aos meus amigos irmãos de coração, Rafinha, Anex Brow, Claudinha, Ana Paula, obrigada por torcerem e acreditarem em mim.

Enfim, a todos que acreditaram e mandaram vibrações positivas para que essa etapa de minha vida fosse concluída, meus sinceros agradecimentos! Afinal, mesmo que longo, todo carnaval tem seu fim!!!!

## ÍNDICE

|                                                                                                                             |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| RESUMO .....                                                                                                                | viii |
| ABSTRACT .....                                                                                                              | x    |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                                                         | 1    |
| Referências Bibliográficas .....                                                                                            | 2    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                                                              | 4    |
| 2.1. Gramíneas do gênero <i>Brachiaria</i> .....                                                                            | 4    |
| 2.1.1. <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu: origem, importância e utilização .....                                      | 4    |
| 2.1.2. Crescimento de plantas forrageiras e a produção de forragem .....                                                    | 6    |
| 2.2. Irrigação no Brasil .....                                                                                              | 7    |
| 2.2.1. Irrigação em pastagens .....                                                                                         | 8    |
| 2.2.2. Gotejo subsuperficial: perspectivas para o futuro da irrigação em pastagens .....                                    | 11   |
| 2.3. Movimento de água no solo .....                                                                                        | 13   |
| 2.3.1. Relações hídricas no solo.....                                                                                       | 14   |
| 2.3.2. Balanço de água no solo .....                                                                                        | 17   |
| 2.3.3. Modelagem do sistema solo-água-plantas-atmosfera .....                                                               | 18   |
| 2.3.4. O programa VADOSE/W .....                                                                                            | 19   |
| Referências Bibliográficas .....                                                                                            | 20   |
| 3. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM UM LATOSSOLO DO CERRADO .....                                      | 31   |
| 3.1. Resumo .....                                                                                                           | 31   |
| 3.2. Abstract .....                                                                                                         | 31   |
| 3.3. Introdução .....                                                                                                       | 32   |
| 3.4. Material e Métodos .....                                                                                               | 33   |
| 3.5. Resultados e Discussão .....                                                                                           | 37   |
| 3.6. Conclusão .....                                                                                                        | 43   |
| 3.7. Referências Bibliográficas .....                                                                                       | 43   |
| 4. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE VADOSE/W PARA MODELAGEM DO FLUXO DE ÁGUA DE UM SOLO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL ..... | 46   |
| 4.1. Resumo .....                                                                                                           | 46   |
| 4.2. Abstract .....                                                                                                         | 46   |
| 4.3. Introdução .....                                                                                                       | 47   |
| 4.4. Material e Métodos .....                                                                                               | 48   |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5. Resultados e Discussão .....                                                                           | 54 |
| 4.6. Conclusão .....                                                                                        | 59 |
| 4.7. Referências Bibliográficas .....                                                                       | 59 |
| 5. CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA <i>BRACHIARIA</i> ADUBADA E IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL ..... | 63 |
| 5.1. Resumo .....                                                                                           | 63 |
| 5.2. Abstract .....                                                                                         | 63 |
| 5.3. Introdução .....                                                                                       | 64 |
| 5.4. Material e Métodos .....                                                                               | 65 |
| 5.5. Resultados e Discussão .....                                                                           | 69 |
| 5.6. Conclusão .....                                                                                        | 77 |
| 5.7. Referências Bibliográficas .....                                                                       | 77 |

## RESUMO

MELO, Mariana Cecília, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba, janeiro de 2018. **Irrigação em pastagens por gotejamento subsuperficial e modelagem do movimento de água no solo.** Orientador: Luís César Dias Drumond. Coorientadores: Alberto Carvalho Filho, André Mundstock Xavier de Carvalho e Lucas Martins Guimarães.

A irrigação é uma técnica capaz de proporcionar incrementos na produção de culturas em situações de escassez hídrica. Entretanto, muitas das vezes estes sistemas deixam de ser eficientes quanto ao uso da água, gerando desperdício devido a aplicação excessiva da mesma ou por nulidade do sistema de irrigação adotado, ocasionado pelo vazamento de tubulações ou pela baixa uniformidade de distribuição. Como a água é um recurso de uso prioritário humano e passível de conflitos, existe a necessidade de estudos que otimizem esta técnica, bem como seu manejo. Modelos numéricos podem ser uma ferramenta prática e rápida para simular o movimento da água no solo, gerando respostas para que medidas mitigadoras possam ser tomadas. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo obter alguns parâmetros do solo e realizar uma modelagem do movimento de água em um solo cultivado por pastagem e irrigado por gotejamento subsuperficial. Além disso, objetivou-se analisar o crescimento e produção da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu irrigada sob diferentes lâminas de água, monitorando-se variáveis climáticas para análise de sua influência. O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba. Os parâmetros do solo necessários à modelagem foram obtidos a partir de ensaios realizados em campo e laboratório, coletados em cinco pontos e três profundidades (0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m), sendo eles: a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), a função de condutividade hidráulica (FCH), a curva de retenção de água (CRA) e os índices físicos do solo, como o peso específico dos sólidos, granulometria, porosidade e os limites de Atterberg. Para validação da modelagem a área foi monitorada mediante coletas de solo para determinação da umidade pelo método gravimétrico. O experimento para análise de crescimento da pastagem constituiu-se de cinco lâminas de água de um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial (1, 50, 75, 100 e 125% da evapotranspiração de referência -  $ET_0$ ), em seis períodos de coleta (5, 14, 21, 28 e 34 dias após uniformização da pastagem), distribuídos em um delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas no tempo, em três repetições, os quais foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e por análise de regressão. As CRA's nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m possuem comportamento bimodal e os valores de  $K_{sat}$  foram condizentes aos encontrados na literatura. A FCH ajustou-se bem ao modelo, sendo o primeiro trecho da CRA (0-8000 kPa) suficiente em projetos de irrigação. A modelagem realizada, apesar de ter apresentado resultados divergentes em alguns dias do período de avaliação experimental, foi satisfatória em prever

o teor de água de um solo. A maior lâmina de irrigação aplicada (125%ET<sub>0</sub>) proporcionou incrementos na produção de 70,3% em relação a lâmina de 1%ET<sub>0</sub>, sendo a média produzida na maior lâmina igual a 2103,8 kg MS ha<sup>-1</sup> ao longo de 34 dias. A resposta da produtividade e altura da forrageira foram ajustadas por uma função linear positiva. Já a relação folha/colmo (F/C) respondeu a um modelo quadrático para as lâminas 100 e 125%ET<sub>0</sub>, obtendo melhores relações aos 23 e 24 dias com alturas de 23,9 e 27,8 cm respectivamente.

## ABSTRACT

MELO, Mariana Cecília, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba, January, 2018. **Irrigation in subsurface drip pastures and modeling of soil water movement.** Adviser: Luís César Dias Drumond. Co-Advisers: Alberto Carvalho Filho, André Mundstock Xavier de Carvalho and Lucas Martins Guimarães.

Irrigation is a technique capable of providing increases in crop production in situations of water scarcity. However, many times these systems are no longer efficient in the use of water, generating waste due to excessive application of the same or by nullity of the irrigation system adopted, caused by the leakage of pipes or the low uniformity of distribution. As water is a resource of priority human use and subject to conflicts there is a need for studies that optimize this technique as well as its management. Numerical models can be a practical and fast tool to simulate the movement of water in the soil, generating responses so that mitigating measures can be taken. In this sense, the present work had as objective to obtain the parameters and to perform a model of the water movement of a soil planted by pasture and irrigated by subsurface drip irrigation. In addition, the objective was to analyze the growth and yield of *B. brizantha* cv. Marandu irrigated under water slides, monitoring climatic variables to analyze their influence. The study was conducted in the experimental area of the Federal University of Viçosa - Rio Paranaíba *Campus*. The soil parameters required for the modeling were performed in the field and laboratory, collected in five points and three depths (0,00-0,20, 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m). The determinations were, saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ), hydraulic conductivity (FCH), water retention curve (CRA) and soil physical indexes. To validate the modeling the area was monitored by soil sampling to determine the moisture by the gravimetric method. The experiment for pasture growth analysis consisted of five slides of water from a subsurface drip irrigation system (1, 50, 75, 100 and 125% of the reference evapotranspiration - ET<sub>0</sub>) in six sampling periods (5, 14, 21, 28 and 34 days after standardization of the pasture), distributed in a completely randomized design, with plots subdivided in time, in three replications, which were submitted to analysis of variance, and the means were compared by the Tukey test at 5 % probability and by regression analysis. The CRA's in the 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m depths have bimodal behavior and the  $K_{sat}$  values were consistent with those found in the literature. The FCH adjusted well to the model, being the first stretch of CRA (0-8000 kPa) sufficient in irrigation projects. The modeling performed, despite having presented divergent results on some days of the experimental evaluation period, was satisfactory in predicting the moisture content of a soil. The highest irrigation depth (125% ET<sub>0</sub>) provided increases in yield of 70,3% in relation to the 1% ET<sub>0</sub> slide, with the average produced in the highest leaf being 2103,75 kg MS ha<sup>-1</sup> over 34 days. The productivity and height response were adjusted by a positive linear function. The leaf /stem ratio (F/C) responded to a quadratic model for

slides 100 and 125% ET<sub>0</sub>, obtaining better relationships at 23 and 24 days with heights of 23,93 and 27,87 cm, respectively.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema agrícola brasileiro busca desenvolver cada vez mais técnicas com a finalidade de maximizar sua produtividade. Sabe-se que a irrigação e o manejo do solo podem representar um incremento muito importante na produção de alimentos ao tornar mais produtivas áreas anteriormente tidas como pouco adequadas para a atividade agrícola.

No entanto, a situação atual da crise hídrica no Brasil, relacionada com as projeções de crescimento das demandas no futuro, revelam uma condição de escassez iminente, que mostra a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que busquem otimizar os sistemas de irrigação atuais, encontrando-se alternativas para o uso mais eficiente e racional dos recursos hídricos, além de melhorias nas técnicas de manejo. Pesquisas estimam que a demanda hídrica em 2050 será de 55% maior na utilização do recurso (WWAP, 2015).

Atualmente, o setor de irrigação no Brasil é responsável pela maior proporção de demanda consultiva de água, cerca de 75%, sendo a área irrigada em 2014 estimada em 6,11 milhões de hectares ou 21% do potencial nacional, que corresponde a 29,6 milhões de hectares (ANA, 2015). Esse cenário de maior percentual de uso pelo setor agrícola se repete no contexto mundial, em que a irrigação responde por 70% dos usos (FAO, 2011). Além disso, conforme dados apresentados pela ANA (2015), também houve nos últimos anos um incremento da irrigação em todas as regiões hidrográficas, em geral a taxas superiores ao incremento da área total plantada. Por isso, um dos grandes desafios do setor agrícola é o de aliar o incremento da produtividade com o atual contexto da crise hídrica.

A irrigação é uma técnica que permite manter elevadas produções de culturas quando a água passa a ser um fator limitante para seu desenvolvimento. Ultimamente no Brasil, esta técnica vem sendo muito explorada pelo setor pecuário, por atenuar os problemas relacionados à estacionalidade e proporcionar boas produções de pastagens e consequente aumento da produtividade animal ao longo do ano.

Sabe-se que a pecuária nacional, tanto para produção de leite quanto para corte, concentra-se no uso de pastagens. Dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apontam que o efetivo brasileiro de bovinos em 2016 foi de 218,23 milhões de cabeças. Dias et al. (2016) avaliaram os padrões do uso do solo e das mudanças de produtividade dos últimos 70 anos no Brasil. Os mapas gerados revelaram que existem 53 milhões de hectares de pastagens de baixa produtividade em solos em processo de degradação e estimam que a taxa de lotação de bovinos em pelo menos 35% da área total de pastagens, seja inferior a uma cabeça por hectare.

Em contrapartida, resultados de pesquisas em propriedades irrigadas nas regiões nordeste e norte, e em áreas do centro-oeste e sudeste com paralelo inferior a 16° S, e com altitudes inferiores a

600 metros apresentam lotação média anual superior a 10 UA (unidade animal, que representa 450 kg de peso vivo)  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , combinados com ganhos de peso vivo superiores a 0,7 kg  $\text{dia}^{-1}$ , mesmo no período seco do ano (Drumond & Aguiar, 2005).

Os métodos de irrigação mais utilizados em pastagens no Brasil são por aspersão. Contudo, existe uma tendência para que a indústria agropecuária se adeque a métodos de irrigação mais eficientes, principalmente quanto à utilização dos recursos hídricos. Os sistemas de irrigação subsuperficial por gotejamento podem ser uma alternativa, já que apresentam algumas vantagens, sobretudo, quanto à eficiência de aplicação da água. Ayars, Fulton e Taylor (2015) afirmam que o potencial de economia de água por esse sistema é significativo e sua adoção será promovida se houver incentivos financeiros. No gotejamento subsuperficial, água e nutrientes são fornecidos às culturas diretamente na zona radicular, com liberação frequente e gradual da água (1 a 30  $\text{L h}^{-1}$ ), operada por pressões que variam de 20 a 200 kPa. Souza, Coelho e Paz (2007) mostraram o aumento na absorção da água, constatando-se que o bulbo úmido formado em subsuperfície chega a ser 46% maior que o verificado no gotejamento superficial.

O estudo do movimento da água no solo, principalmente em agricultura irrigada, é fundamental para melhor compreensão do fator água no sistema solo-planta-atmosfera, pois eles se interagem e são dinâmicos. A implementação de modelos matemáticos é uma maneira de apresentar essas inter-relações e verificar a atuação de cada um desses fatores no sistema.

Dessa maneira, diante da necessidade de eficiência do uso da água e levando-se em consideração diversos fatores e variáveis que influenciam sua distribuição no solo, acredita-se que o sistema de irrigação subsuperficial por gotejamento possa ser eficiente em uma área de pastagem intensiva, e que a modelagem numérica do perfil de umidade do solo será útil em monitorar o movimento da água no perfil do solo.

## **Referências Bibliográficas**

- ANA – **Agência Nacional de Águas**. Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Informe 2014. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, 2015.
- AYARS, J.E.; FULTON, A; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agricultural Water Management**, v.157, p.39-47, 2015.
- DIAS, L. C. P., PIMENTA, F. M., SANTOS, A. B., COSTA, M. H. AND LADLE, R. J. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, [s.l.], p.1-16, 2016.
- DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. **Irrigação de pastagem**. Uberaba, MG: ed. L.C.D. DRUMOND, 2005. 210 p.

- FAO– **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing systems at risk. London/Rome, Earthscan/FAO. 2011.
- IBGE, 2016 **Produção da Pecuária Municipal 2016**. IBGE: Rio de Janeiro, v. 44, p.1-51.
- SOUZA, E. A., COELHO, E. D., PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, n.4, p.1161-1166, 2007.
- WWAP – (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gramíneas do gênero *Brachiaria*

Muitas espécies de gramíneas forrageiras tropicais apresentam-se como opção para formação de pastagens no Brasil, dentre elas gramíneas do gênero *Brachiaria*, configurando-se como alimentos de suporte essenciais na pecuária de corte e leite.

O principal centro de origem deste gênero é o continente africano (HARLAN; DE WET; RAWAL, 1970; SEIFFERT, 1984). Os capins *Brachiaria* são, desde a década de 50, conhecidos sob o prisma da forragicultura, contando com mais de 100 espécies em regiões tropicais e subtropicais (SANTOS, 2012). Segundo Valle (1991), a primeira introdução oficial no Brasil foi da *Brachiaria decumbens*, em 1952, entretanto após importações de *Brachiaria ruziziensis*, *Brachiaria brizantha* e de grande quantidade de sementes, em 1965, que o gênero conseguiu seu reconhecimento nas Regiões Centro-Oeste, Sudeste e principalmente na Amazônia. Por se adaptar muito bem às mais variadas condições edafoclimáticas, sendo tolerantes a uma série de limitações e/ou condições restritivas de utilização para um grande número de espécies forrageiras (SANTOS, 2012). No Brasil, 80 a 90% das áreas de pastagens são constituídas por espécies forrageiras, do gênero *Brachiaria*, principalmente *B. decumbens* e *B. brizantha* (PACIULLO et al., 2007).

#### 2.1.1 *Brachiaria brizantha* cv. Marandu: origem, importância e utilização

A espécie *brizantha* é originária do Zimbábue, África, uma região vulcânica onde os solos apresentam boa fertilidade e localizam-se numa região com precipitação anual em torno de 700 mm e cerca de 8 meses de seca no ano (BOGDAN, 1977; NUNES et al., 1985; VALLE; EUCLIDES; MACEDO, 2000). De acordo com Nunes et al. (1985), as *brizanthas* são plantas cespitosas, muito robustas e medem de 1,5 a 2,5 m de altura, com colmos iniciais prostrados, mas produzindo perfilhos predominantemente eretos. Rizomas muito curtos e encurvados. Colmos floríferos eretos, frequentemente com perfilhamento nos nós superiores, o que leva à proliferação de inflorescências, especialmente sob regimes de corte ou pastejo. Bainhas pilosas com cílios nas margens, geralmente mais longas que os entrenós, escondendo-os nos nós, o que confere a impressão de haver densa pilosidade nos colmos vegetativos. Além disso, suas sementes são ligeiramente maiores que as das outras espécies do gênero *Braquiária*.

A cultivar Marandu, foi lançada em 1984 pela EMBRAPA-CNPQC e teve sua origem em germoplasmas introduzidos na região de Ibirarema em São Paulo (NUNES et al., 1985 e SKERMAN & RIVEROS, 1990). O nome Marandu, dado a cultivar, significa "novidade" no idioma guarani, e foi aquele que melhor traduzia o destaque dado a esta nova alternativa de forragem para o cerrado

(Nunes et al., 1985) Ela também é conhecida por outras denominações regionais como: brizantão, brizantha, braquiarião, capim-marandu e Marandu (RENVOIZE; CLAYTON; SKABUYE, 1998). Destaca-se por apresentar várias características agrônômicas favoráveis à sua implantação, sendo considerada como uma das espécies forrageiras mais plantadas no país e pelo grande volume de exportação de sementes (JANK et al., 2005).

Meirelles & Mochiutti (1999) afirmam que a cultivar Marandu possui elevada produção de forragem, persistência, resistência à cigarrinha-das-pastagens, tolerância a solos ácidos com baixo pH e altos valores de alumínio tóxico, tolerância à seca e boa capacidade de rebrota. Costa et al. (2004) afirmam que sua grande utilização é devido a características como tolerância à restrição na fertilidade do solo e elevada produtividade quando devidamente adubada e manejada. A literatura reporta também sua tolerância a altos níveis de manganês no solo, recomendando a aplicação de calcário como fonte de cálcio e magnésio (NUNES et al., 1985), entretanto Alcântara & Bufarah, (1999), salientam que a cultivar não responde significativamente bem a calagem. Vilela et al. (2002), sugerem atenção quanto à adubação pois a capacidade de produção desta forrageira depende do manejo e ressalta que as deficiências de nitrogênio e fósforo estão entre os principais fatores responsáveis pela redução da produção de forragem dessa espécie.

Dias-Filho (2002) salientou que a cultivar possui tolerância moderada ao sombreamento. Andrade et al. (2004) disseram que a *B. brizantha* cv. Marandu possui alta capacidade produtiva e diversos autores recomendam esta forrageira para implantação de sistemas silvipastoris e agrosilvipastoris (COSTA; TOWNSEND; MAGALHÃES, 1998; ANDRADE et al., 2001; COSTA; TOWNSEND, 2002; RIBASKI; RAKOCEVIC, 2002)

Santos et al. (2013) avaliaram a capacidade de adaptação e os mecanismos de resposta ao estresse hídrico de duas cultivares de *Brachiaria brizantha* (Marandu e BRS Piatã) submetidas ao déficit hídrico e concluíram que as mesmas apresentaram mecanismos de adaptação ao estresse hídrico. Mattos; Gomide; Carlos (2005) avaliaram quatro espécies de *Brachiaria* e verificaram que a *B. brizantha* cv. Marandu foi a mais tolerante a seca devido ao menor comprometimento das taxas fotossintéticas e por apresentar sistema radicular profundo. Outra característica interessante é que quando a cultivar é utilizada sob pastejo, apresenta menor incidência de fotossensibilização em animais, característica apresentada por outras espécies do gênero (VALLE; EUCLIDES; MACEDO, 2000).

Por outro lado, Caetano & Dias-Filho (2008), estudando diferentes espécies de gramíneas em solos com e sem alagamento, concluíram que a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi mais sensível ao alagamento ao longo do tempo do que as outras gramíneas estudadas, reportando que essa forrageira não possui boa adaptação à solos mal drenados.

### **2.1.2 Crescimento de plantas forrageiras e a produção de forragem**

O uso de pastagens como principal fonte de alimentos para animais é a alternativa mais economicamente viável, quando principalmente se tem condições edafoclimáticas favoráveis a seu cultivo. Assim o conhecimento minucioso de sua formação, crescimento e manejo torna-se imprescindível para que decisões sobre como explorá-las possam potencializar a produção.

De acordo com Hodgson (1990), o perfilho é a unidade básica que compõe as gramíneas forrageiras. O perfilho, segundo Valentine & Matthew (1999), correspondem a uma sucessão de fitômeros em diferentes fases de desenvolvimento, onde são diferenciadas folhas, colmo verdadeiro, gema axilar e sistema radicular formados a partir do meristema apical, evidenciado pelo aparecimento, alongamento e senescência/morte de folhas (HODGSON, 1990). Isso resulta na constante reestruturação de sua área foliar ao longo de seu tempo de vida. A contínua produção dos tecidos foliares é regulado por variáveis ambientais (radiação solar, umidade, temperatura) e características do dossel (CHAPMAN & LEMAIRE, 1993; LEMAIRE & AGNUSDEI, 2000; DURU & DUCROCQ, 2000). Nabinger (1997), enfatiza que o controle da frequência e da intensidade da desfolhação determinam a velocidade de crescimento, produtividade e persistência do sistema, o qual afetam a fisiologia das plantas (LEMAIRE & AGNUSDEI, 2000). Dessa maneira, a capacidade das plantas forrageiras em manter a produção de novas folhas perante periódicas desfolhações é fundamental para manter a produtividade e prolongar sua sobrevivência (SCHNYDER & DEVISSER 1999).

De acordo com Simon & Lemaire (1987) a estrutura do pasto pode ser definida como a distribuição e o arranjo dos componentes como acúmulo de forragem, altura da planta, densidade de folhas, relação folha–colmo, proporção de material senescente da parte aérea da planta. Seu estudo permite verificar como a comunidade vegetal está utilizando os recursos abióticos (luz, água e nutrientes) disponíveis e quais são os efeitos diretos que ocorrem sobre o comportamento ingestivo do animal, especialmente sobre o consumo (NEWMAN; PARSONS; PENNING, 1994.)

A verificação do crescimento baseia-se na descrição matemática de variações da massa seca da planta (MS) e de área foliar em determinado intervalo de tempo (RADFORD, 1967). Verhagen; Wilson; Britten (1963) e Pearce et al. (1965) evidenciaram que a produção de matéria seca é dependente da proporção de luz incidente que é interceptada e da eficiência de utilização e ainda salientam que o arranjo, tamanho, e quantidade das folhas afetam decisivamente a interceptação e a reflexão da luz incidente no relvado. De acordo com Radford (1967), a identificação das respostas das plantas diante diferentes tratamentos e a escolha de genótipos mais eficientes pode ser realizada mediante a análise de seu crescimento. Esta, portanto, é uma ferramenta importante para que se possa compreender e investigar as respostas morfofisiológicas à diversas condições em que são submetidas,

como capacidade produtiva, adaptabilidade em seu ecossistema, efeitos de competição, influência do manejo sobre seu crescimento, entre outros (MAGALHÃES, 1985), contribuindo para a interpretação dos mecanismos que influenciam o processo de acúmulo de forragem (BEADLE, 1993).

## **2.2 Irrigação no Brasil**

A irrigação é uma técnica datada há milhares de anos sendo uma das primeiras modificações no ambiente pelo homem primitivo a fim de assegurar produtividade para sua subsistência, principalmente em regiões áridas onde a produção só era possível graças à irrigação.

Grandes aglomerações desenvolveram-se nas proximidades do rio Nilo no Egito, por volta de 6000 A. C., rio Tigre e Eufrates, na Mesopotâmia, e rios Huang Ho e Iang-tse-Kiang, no império Chinês há mais de 4000 A. C. Na Índia, há indícios da prática de irrigações com represamento da água por meio de diques há 2500 A. C. e assim, ano após ano, a prática se espalhou por várias partes do mundo. Bernardo (2008), relata que possivelmente no Brasil, o primeiro projeto implantado foi implementado pelos padres jesuítas, por volta de 1589, no estado do Rio de Janeiro.

Atualmente, mais da metade da população mundial depende de alimentos produzidos pela agricultura irrigada e a tendência é que a quantidade de áreas irrigadas aumente. O Brasil possui a nona maior área irrigada do mundo, atrás de Tailândia, México, Indonésia, Irã, Paquistão, Estados Unidos da América, Índia e China (FAO, 2012). De acordo com dados dos Censos Agropecuários realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (1960-2006) e da Agência Nacional das Águas - ANA (2014), a irrigação brasileira tem crescido a taxas médias anuais entre 4,4% e 7,3% desde a década de 1960 e estima-se que em 2014 foi superada a marca de 6,1 milhões de hectares sob irrigação.

Um estudo realizado pela ANA juntamente com a Embrapa, por meio de imagens de satélites, identificou cerca de 20 mil pivôs centrais irrigando uma área de 1,275 milhão de hectares, revelando um aumento de 43% no uso de pivôs no Brasil entre 2006 e 2014. Foram identificados pivôs em 22 unidades da federação, sendo que 80% da área irrigada encontra-se em quatro estados: Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo. O estudo também registrou uma forte expansão da atividade nos últimos anos em Mato Grosso e Rio Grande do Sul. Ainda neste estudo, foi relatado que o país tem potencial para aumentar em cinco vezes as lavouras com a tecnologia da irrigação.

O Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2009), apresentou um panorama dos métodos de irrigação mais utilizados, sendo os métodos: inundação, sulcos, aspersão (pivôs centrais), aspersão (outros métodos), localizado (gotejamento, microaspersão, etc.) e outros métodos de irrigação. Foram identificados em 2006 4,45 milhões de hectares equipados para irrigação no País. A irrigação por inundação, concentrada no Sul do Brasil, contribui com 25,7% da área total. Os sistemas por aspersão representam um total de 54,7%, sendo esta subdividida em pivôs centrais (19,6%), localizados no

Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste e outros métodos de aspersão (35,1%) nas regiões Sudeste e Nordeste.

Segundo dados da ANA 2014, as culturas cultivadas no Brasil com mais áreas irrigadas são: cana-de-açúcar (1,7 milhão de hectares); arroz em casca (1,1 milhão de hectares); soja (624 mil hectares); milho em grão (559 mil hectares) e o feijão (195 mil hectares).

Vale salientar que o setor de irrigação no Brasil é responsável pela maior proporção de demanda consultiva de água, cerca de 75% ou 21% do potencial nacional, que corresponde a 29,6 milhões de hectares (ANA, 2014). Esse cenário de maior percentual de uso pelo setor agrícola se repete no contexto mundial, em que a irrigação responde por 70% dos usos (FAO, 2012).

Ainda que a agricultura irrigada seja, geralmente, associada a um elevado nível tecnológico é consenso que a irrigação no Brasil ainda é praticada de forma inadequada, com grande desperdício de água (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2006). De acordo com Christofidis (2004), estima-se que, de toda a água captada para fins de irrigação, não mais que 50% sejam efetivamente utilizados pelas plantas. Isto reflete uma grande preocupação quanto ao uso eficiente da água na agricultura irrigada. Portanto, estudos relacionados à melhoria nas técnicas de irrigação ainda devem ser realizados, especialmente quanto ao uso da água, buscando-se sistemas mais eficientes e melhores critérios técnicos de manejo.

### **2.2.1 Irrigação em pastagens**

O sistema agrícola busca desenvolver cada vez mais técnicas com a finalidade de maximizar sua produtividade, principalmente quando alguns fatores são limitantes à produção. A irrigação em pastagens veio com o objetivo de solucionar os problemas com a estacionalidade de produção provocada pelo déficit hídrico, que associado a outros fatores climáticos, como temperatura e luminosidade reduzem a produção de forragem (DRUMOND & AGUIAR, 2005).

Encontra-se na literatura dados sobre irrigação de pastagens em várias regiões do mundo. Na Austrália, estudam essa técnica desde 1.900 e no ano de 1965 já eram irrigados 1,21 milhão de hectares de pastagens e culturas para a produção de alimentos para os rebanhos de corte e leite explorados intensivamente (MYERS, 1973). No Brasil, os primeiros dados na literatura são da década de 60 e 70, no qual os pesquisadores não se entusiasmaram com os resultados.

Entretanto, em meados da década de noventa, produtores brasileiros começaram a utilizar a irrigação para melhorar a produção de carne e leite, o que chamou a atenção de técnicos e pesquisadores. Logo, percebeu-se que a maioria dos trabalhos realizados no Brasil foram em canteiros com corte mecânico, em longos intervalos de tempo (mais de 60 dias e alguns com a planta no ponto de florescimento) e com baixos a médios níveis de adubação (100 a 150 kg de Nitrogênio por hectare) (DRUMOND & AGUIAR, 2005). Além disso, estes autores relatam que os trabalhos desenvolvidos

foram realizados em locais como Viçosa (MG) e Piracicaba (SP), deixando de lado a pesquisa em regiões com temperatura e luminosidades mais elevadas, como por exemplo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, norte de Minas Gerais e Nordeste, onde as condições climáticas propiciam respostas significativas à irrigação de pastagens.

Posteriormente, vários trabalhos com pastagem irrigada foram publicados. No Estado de Pernambuco, a irrigação do capim Mombaça mostrou viabilidade econômica, possibilitando uma taxa de lotação de 7,0 UA ha<sup>-1</sup> (unidade animal por hectare) com o ganho de peso de 850 g cab<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (ALENCAR, 2001). Aguiar & Silva (2002), que mediram o acúmulo de forragem do capim Braquiarião adubado e irrigado, no município de Selvíria (MS) observaram que a participação da forragem acumulada na estação de inverno foi 61% da acumulada no verão.

Soria et al. (2003), estudando o capim-tanzânia no município de Piracicaba/SP, não encontraram respostas positivas ao aumento da lâmina de irrigação (0; 30; 70; 100 e 150% do coeficiente de cultura) e justificaram essas observações pelas características físicas do solo. Reis Filho (2004) comenta que no Ceará foram alcançadas lotações de 7 a 10 UA ha<sup>-1</sup> em pastos irrigados, propiciando produção acima de 20.000 litros ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Rassini (2004) avaliou as respostas produtivas de diversas plantas forrageiras tropicais submetidas à irrigação por dois anos em São Carlos/SP e observou acréscimo na produção de forragem anual da ordem de 30% a 40% com o uso da irrigação, com destaque para os capins elefante e tanzânia. Andrade et al. (2005), trabalhando com o capim elefante 'Napier' verificaram que a altura média ideal para a entrada dos animais sob irrigação foi alcançada mais rapidamente do que as plantas sem irrigação.

Oliveira Filho (2007), avaliou os capins Tanzânia e Xaraés em Gurupi/TO, e observou aumento da produtividade de MS dos dois capins com aumento da lâmina de irrigação e adubação com N e K<sub>2</sub>O. Balieiro Neto et al. (2007), avaliaram as características agrônômicas e a viabilidade do Tifton 85 irrigado num sistema de produção de leite. Os autores concluíram que a irrigação promoveu aumento na produção de folhas verdes, maior relação folha/caule, maior teor de proteína bruta (PB) na planta inteira e menor porcentagem de fibra em detergente ácido (FDA) na planta inteira, porém concluíram que apesar da produção de leite ter sido maior no período seco os menores gastos com silagem de milho e cana-de-açúcar não foram suficientes para compensar os gastos com energia.

Cunha et al. (2008), observaram as respostas produtivas do capim Tanzânia sob crescentes lâminas de irrigação e três frequências de aplicação e encontraram maior produção de forragem com o uso de 100% de lâmina de irrigação e um dia de frequência de irrigação.

Cóser et al. (2008), avaliaram o efeito da irrigação com adubação de N (300 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), na época seca do ano, sobre as características produção de matéria seca, altura das plantas, cobertura do solo e a qualidade de forragem do capim-elefante em Coronel Pacheco, MG e concluíram que a

produção de matéria seca e a altura das plantas aumentaram com as irrigações iniciadas em julho e agosto. Além disso, as pastagens irrigadas a partir de julho e agosto atingiram condições de pastejo quatro a seis semanas antes que as dos tratamentos não irrigados. Vitor et al. (2009) trabalhando com o mesmo capim na mesma cidade, obteve uma produtividade de MS passível de ser consumida na estação outono/inverno de 30% em relação à produzida na estação primavera/verão, ao avaliar diferentes lâminas de água (0 a 120% da evapotranspiração real) associada a quatro doses de nitrogênio.

Alencar et al. (2009), avaliaram o desempenho de seis gramíneas forrageiras sob diferentes lâminas de irrigação e estações do ano, na região leste de Minas Gerais, e observaram que o capim-Xaraés se destacou pela produtividade de matéria seca (MS) perante às demais, sendo a produção de MS na estação outono/inverno.

Gomes et al. (2015), pesquisaram a produtividade de capim Tifton 85 sob irrigação e doses de nitrogênio no Município de Xambrê, no Paraná, e constataram que a produtividade em matéria seca (MS) foi maior sob irrigação, crescendo de forma linear à adubação nitrogenada. Sanches et al. (2015), verificaram a produtividade e o valor nutritivo do capim Tifton 85 irrigado e sobressemeado com aveia em uma propriedade de produção leiteira no Noroeste do Paraná e verificaram que a irrigação incrementou a produtividade da pastagem com média de 2760,4 kg ha<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>. Ainda neste trabalho os autores concluíram que a irrigação proporcionou maior relação folha/colmo e maiores valores de proteína bruta.

Oliveira et al. (2016) estudando os capins Tifton 85 e Tanzânia verificaram que estes obtiveram maior capacidade de suporte e produziram maior quantidade de matéria seca e lâmina foliar verde em área irrigada durante período seco.

Dentre estes, vários outros trabalhos da literatura apresentaram alguns resultados contrastantes. Embora a maioria dos estudos tenham, por vezes aumentado as produções na época de seca, pode-se perceber que a irrigação não eliminou por completo a ocorrência de estacionalidade de forragens e em alguns estudos ela nem sempre respondeu satisfatoriamente. Este fato pode estar ligado a vários fatores, especialmente os climáticos, como a temperatura e luminosidade que variam ao longo da extensão territorial brasileira nas mesmas épocas do ano. Além disso, várias dessas pesquisas testaram muitas doses de adubo, distintas lâminas de água, diferentes manejos de corte da pastagem, tudo isso em vários solos em diversos anos, entre outras variáveis, o que implica em diferentes resultados. Todavia, de acordo com Drumond e Aguiar (2013), os produtores não estão mais preocupados somente em resolver o problema da estacionalidade de produção das forrageiras, pois eles acreditam que a irrigação da pastagem pode ser uma alternativa para a produção intensiva de carne e leite em áreas reduzidas, com redução de custos de produção e mão-de-obra.

Os métodos de irrigação mais utilizadas em pastagens no Brasil são por aspersão, como pivô central e aspersão em malhas. Drumond (2013), ressalta que os sistemas por aspersão, são muito utilizados devido à elevada uniformidade de distribuição, à adaptabilidade a diversas culturas e solos, ao fácil controle do volume de água aplicado e à possibilidade de aplicação de fertilizantes e outros produtos por meio da irrigação.

A irrigação em malha, também conhecida como irrigação de tubo enterrado normalmente é mais utilizada em áreas pequenas ou em terrenos com topografia irregular. Nestes sistemas toda a tubulação fica enterrada, com mudança de posição apenas dos aspersores. Toda a rede fica pressurizada e onde não tem aspersores funcionando são instalados tampões denominados cap's, impedindo a saída de água nestas posições (DRUMOND, 2013). Este autor afirma que a aspersão em malhas é mais vantajosa para o gado de leite, porque pode ser empregado em diversas situações, com diferentes tipos de solo, topografia e com redução considerável de mão de obra.

Já os pivôs centrais são considerados como os sistemas de irrigação por aspersão mais automatizado disponível no mercado atualmente e com sua utilização é possível aumentar a área irrigada, sendo a divisão dos piquetes no formato “pizza” a opção mais utilizada no manejo. Segundo Drumond (2013), parte da linha lateral se projeta além da última torre e ainda possibilita a instalação de um aspersor de grande raio de alcance em sua parte final, conhecido como balanço.

### **2.2.2 Gotejo subsuperficial: perspectivas para o futuro da irrigação em pastagens**

A irrigação é uma tecnologia muito viável para aumentar a produtividade das culturas minimizando os efeitos da sazonalidade e por isso sua utilização na agropecuária é crescente. Na pecuária, os sistemas mais utilizados são por aspersão, entretanto a necessidade de novas tecnologias que apresentem maior eficiência quanto o uso da água e aplicação de fertilizantes tem despertado o interesse de técnicos e pesquisadores a testarem diferentes sistemas de irrigação, como por exemplo as irrigações localizadas (AYARS; FULTON; TAYLOR, 2015). Neste sentido, a literatura apresenta respostas satisfatórias e significativas de diferentes culturas quanto a utilização de sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. Dessa maneira a implementação destes sistemas poderiam ser viáveis também na produção de forragens.

De acordo com Juan (2000), o gotejamento subsuperficial é mais difundido em locais de grande evapotranspiração e escassez hídrica, como no oeste dos EUA e Israel. Segundo Paulino et al. (2011), no Brasil, a irrigação localizada representa 8% do total das áreas irrigadas, o que correspondia em 2004 a aproximadamente 337 mil hectares (CARVALHO, 2004). Aguiar (2002) comenta que o gotejamento em subsuperfície no Brasil iniciou-se em São Paulo em 1996, sendo atribuído como um método de irrigação moderno, por garantir água disponível apenas para a região radicular das plantas.

Azevedo (1986) e Keller & Bliesner (1990) definem o sistema de irrigação subsuperficial por gotejamento como, aquele que tem o solo como meio de propagação da água, onde os emissores ficam sob a superfície do solo e dentro da camada que representa a zona efetiva do sistema radicular das plantas, cujo objetivo principal é maximizar a eficiência do uso da água. De acordo com Mosca; Testezlaf; Gomes (2005), estes sistemas simbolizam significativa evolução no processo da aplicação de água às culturas. Ayars; Fulton & Taylor (2015), afirmam que o potencial de economia de água por esse sistema é significativo e sua adoção será promovida se houver incentivos financeiros. Os autores salientam ainda que futuras pesquisas em novas culturas contribuirão para expansão de seu uso.

Phene et al. (1987) argumentam que o gotejamento em subsuperfície proporciona o aumento da vida útil do sistema, minimiza custos com mão de obra anualmente empregada, proporciona a redução de doenças e infestação de ervas daninhas, aumenta a trafegabilidade e reduz a compactação do solo devido a menor umidade na superfície. Parkes et al. (2010) abordam quanto ao melhor aproveitamento da água, já que o sistema possibilita o provimento de água às culturas pela aplicação de baixo volume, reduzindo-se assim perdas hídricas nos sistemas de cultivo. Rajput & Patel (2009) comentam que outra vantagem seria a possibilidade de utilização do mesmo sistema para diferentes culturas, com grandes possibilidades de automação e fertirrigação (SOUSA et al., 2011). Além do mais, a água pode ser aplicada uniformemente com alta frequência em relação à irrigação por aspersão e sulco, porém, este potencial é tecnológico e depende do projeto, instalação, operação e manutenção (MAY & HANSON, 2007). Outra vantagem é que as pressões utilizadas nestes sistemas são baixas (6-35 m.c.a.), reduzindo significativamente a demanda de energia (SOUZA FILHO, 2011) e do escoamento superficial (ORON et al., 1991).

A principal limitação desse sistema está relacionada ao estabelecimento inicial da cultura, pois não há umedecimento da superfície do solo, o que prejudica a pega de mudas ou a germinação de sementes, sendo necessário a utilização de outro sistema, em geral aspersão, na fase de estabelecimento da cultura, aumentando os custos e reduzindo o retorno econômico (CAMP, 1998; PAVERO, 2002; GUSHIKEN, 1995). Os entupimentos (REIS et al., 2005) originados por obstruções físicas, precipitados químicos e partículas biológicas (SUAREZ-REI et al., 2000) também são outra limitação. Além disso, o custo de implantação do sistema é significativamente alto e exigem mão de obra qualificada na sua operação e manutenção (TESTEZLAF, 2011).

Ayarsa et al. (1999), revisaram trabalhos de irrigação por gotejo subsuperficial realizados no Laboratório de pesquisas em gerenciamento da água nos EUA ao longo de 15 anos e concluíram que os resultados desses estudos demonstraram rendimento significativo e eficiente quanto o uso da água. Abordaram que estudos de uniformidade após 9 anos de operação foi tão boa quanto no momento da instalação, quando os procedimentos de gerenciamento para evitar intrusões de raízes foram seguidos.

A literatura brasileira apresenta diversos estudos quanto a utilização deste sistema em muitas culturas, com predominância de utilização no tomate e cana-de-açúcar, obtendo-se conclusões satisfatórias tanto no aumento da produção e qualidade das culturas quanto na eficiência do uso da água. Isto pode ser visualizado na revisão feita por Marques; Frizzone & Teixeira (2006).

O uso de sistemas de gotejamento subsuperficial em pastagens no Brasil ainda é remoto, não se encontrando trabalhos na literatura nacional. Porém, internacionalmente pode-se encontrar alguns resultados. Marsalis et al. (2007) realizou um estudo no Oeste do Texas ao longo de dois anos verificando o rendimento e valor nutritivo de seis gramíneas forrageiras do gênero *Cynodon*, irrigadas com gotejamento subsuperficial com lâmina de água estabelecida em 312 mm ano<sup>-1</sup>. Os autores abordam que ao longo destes dois anos a precipitação anual média foi de 110 mm e que a irrigação de 312 mm ano<sup>-1</sup> permitiu a manutenção das forrageiras. Os autores salientam que as gramíneas do gênero *Cynodon*, cultivadas como feno, exibem um potencial para uso em situações de água limitada, podendo contribuir para a sustentabilidade agrícola em regiões onde o recurso hídrico é escasso. Neste trabalho os autores destacaram que o Tifton 85 utilizou a água de irrigação com maior eficiência e afirmaram que a média da produção de MS foi de 18,2 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> quando adubados com 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Os autores afirmam ainda que a elevada produção de algumas dessas cultivares pode ter sido resultado da eficiência do sistema de gotejamento subsuperficial, por aplicar água na zona radicular das gramíneas.

Trabalhos internacionais foram realizados em gramíneas forrageiras e gramados paisagísticos utilizando-se irrigação por gotejamento subsuperficial com aplicação de águas residuárias da suinocultura (STONE et al., 2008) e laticínios (SEVOSTIANOVA & LEINAUER, 2014) concluindo que estes sistemas distribuem a água de forma mais eficiente e uniforme, minimizando a exposição humana ao efluente tratado.

A literatura apresenta resultados satisfatórios quanto a eficiência no uso da água, melhorias na qualidade e rendimentos de algumas culturas, porém produtores, empresas privadas e órgãos governamentais de gerenciamento de recursos hídricos precisam fomentar pesquisas com seu uso em pastagens verificando sua viabilidade, já que a perspectiva de mudança e adesão a esses sistemas por parte de produtores somente será realizada quando dados técnicos embasados na literatura forem realizados e comprovados.

### **2.3 Movimento de água no solo**

Os solos são constituídos por uma fração sólida, conhecida como matriz do solo e outra parte não ocupada por sólidos, denominada espaço poroso ou poros do solo. Este espaço poroso, normalmente é preenchida por uma solução aquosa e uma solução gasosa. Quando o espaço poroso

estiver completamente preenchido pela solução aquosa ele está saturado, caso contrário, ele é dito não saturado.

De acordo com Hillel (1980), o potencial total da água no solo representa a soma dos trabalhos realizados quando um volume ou massa infinitesimal de água num estado padrão é levada isotérmica, isobárica e reversivelmente para o estado considerado no solo, posto que a tendência espontânea da água no solo é sempre adquirir menor estado de energia potencial. Libardi (2005), salienta que o conceito de potencial total da água foi introduzido com o intuito de estabelecer o sentido do movimento da água entre dois pontos num perfil de solo, sem conhecer valores individuais da energia potencial total específica em cada ponto. Ele pode ser expresso em unidade de energia por massa ( $\text{J kg}^{-1}$ ) ou energia por volume ( $\text{J m}^{-3}$ ). Esta última equivale à pressão (Pa, bar, atm, cm H<sub>2</sub>O ou cm Hg).

Cada componente de energia potencial que estiver atuando na água dentro do solo, dará origem a um potencial componente do potencial total da água no solo. São eles, potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ), potencial de pressão ( $\Psi_p$ ), potencial matricial ( $\Psi_m$ ) e potencial osmótico ( $\Psi_o$ ), sendo o potencial total de água no solo ( $\Psi_t$ ) dado como a soma desses componentes, como apresentado na Equação 1.

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o \quad \text{Equação 1}$$

O potencial osmótico é desconsiderado por ser desprezível na maioria dos estudos de movimento da água no solo. Porém, de acordo com Reichardt (1996), em estudos com a presença de membranas semipermeáveis e/ou quando a concentração salina do solo é significativa, ele pode se tornar muito importante.

A quantificação do movimento de água no solo é feita por meio das equações de fluxo de água no solo. Essas equações são definidas para o fluxo em regime estacionário, onde as características do fluxo não variam com o tempo, mas podem variar com a posição e equações em regime transiente, na qual as características variam com o tempo e a posição (LIBARDI, 2005), as quais serão detalhadas a seguir.

### **2.3.1 Relações hídricas no solo saturado e não-saturado**

Henry Darcy, em 1856, realizou vários experimentos para pesquisar o fluxo de água em uma coluna vertical, saturada, em solo homogêneo, isotrópico e com área de secção transversal constante (HILLEL, 1998), esquematizado na Figura 1.

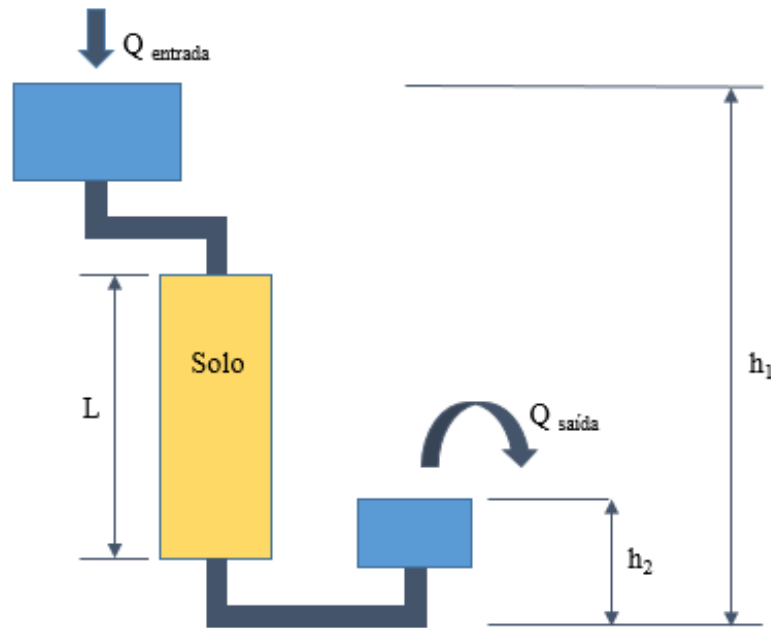


Figura 1 – Representação esquemática do experimento de Darcy, 1856

Darcy verificou que o volume de água que atravessa a coluna por unidade de tempo era diretamente proporcional à área da secção transversal. Concluiu que a vazão  $Q$  comportava-se de maneira proporcional à diferença entre os potenciais hidráulicos através da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna. A partir dos resultados ele formulou a Equação 2.

$$Q = K_0 \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) A \quad \text{Equação 2}$$

Sendo que,  $Q$  é a vazão [ $L^3 T^{-1}$ ],  $A$  é a área da secção transversal [ $L^2$ ],  $L$  é o comprimento da coluna [ $L$ ],  $(h_1 - h_2)$  é a diferença de potencial hidráulico [ $L$ ] e  $K_0$  é uma constante de proporcionalidade, conhecida como condutividade hidráulica do solo saturado [ $L T^{-1}$ ].

Dividindo-se ambos os membros da Equação 2 pela área da secção transversal, transforma-se o membro da esquerda numa vazão por unidade de área. Assim, Darcy estabeleceu o volume de água que passa verticalmente por unidade de área da secção transversal da coluna e por unidade de tempo. (FREEZE & CHERRY, 1979; FETTER, 2001; LIBARDI, 2005), apresentado na Equação 3.

$$q_0 = \frac{Q}{A} = K_0 \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo  $q_0$ , de valor igual a  $Q/A$ , conhecido como densidade de fluxo de água no solo saturado [ $L T^{-1}$ ].

Para a lei de Darcy ser aplicada em qualquer direção no espaço, basta aplicar um “tratamento” matemático a ela, utilizando um sistema de coordenadas cartesianas como apresentado na Equação 4.

$$q_0 = -K_0 \nabla H \quad \text{Equação 4}$$

Em que,  $\nabla H$  representa o gradiente hidráulico nas direções x, y, z, dado pela Equação 5.

$$\nabla H = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} \quad \text{Equação 5}$$

Deve-se salientar que o sinal negativo na Equação 4 indica que a água flui do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial hidráulico.

As condições mais comuns que os solos agrícolas se encontram são em situações de não saturação. Nestas circunstâncias, além do potencial gravitacional deve-se levar em consideração o potencial matricial do solo. Porém, para estes casos, os processos de fluxo são mais difíceis de serem descritos devido às mudanças no estado e quantidade de água durante o fluxo. Assim, de acordo com Libardi (2005), a equação do fluxo de água em solo saturado foi generalizada, principalmente por Buckingham (1907) e Richards (1928) para a condição de fluxo não saturado, como apresentado na Equação 6, sendo esta conhecida por equação de Darcy-Buckingham.

$$q_0 = -K(\theta) \nabla H \quad \text{Equação 6}$$

Onde,  $K(\theta)$  ou  $K(h)$  é a condutividade hidráulica não saturada [ $L T^{-1}$ ], sendo função do conteúdo de umidade,  $\theta$  [ $L^3 L^{-3}$ ] ou do potencial mátrico,  $h$  [ $L$ ].

Embora a equação Darcy-Buckingham leve em consideração a função do potencial mátrico, ela não leva em consideração a variação das características do fluxo ao longo do tempo, ou seja, a mesma só é válida em condições de equilíbrio dinâmico. Baseado no princípio da conservação da matéria, Richards (1931) associou a equação da continuidade com a equação de Darcy-Bunckingham fornecendo a equação diferencial geral que rege o movimento da água em solos não saturados. Quando ela é representada levando-se em consideração apenas uma direção z ela é expressa como apresentado na Equação 7.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ K(\theta) \cdot \frac{\partial \psi_t}{\partial z} \right] \quad \text{Equação 7}$$

Portanto, de acordo com Libardi (2005), pode-se dizer de maneira prática que a variação de armazenagem de água num determinado comprimento de solo, durante certo intervalo de tempo, pode

ser determinada pela diferença entre a densidade de fluxo que sai através de uma das extremidades e a densidade de fluxo que entra pela outra extremidade no intervalo de tempo considerado.

### 2.3.2 Balanço de água no solo

O balanço de água no solo, nada mais é do que a quantificação do volume de água que entra e o que sai em um volume de solo, durante um período de tempo e quando esse balanço é expresso em altura de água estabelece a variação da armazenagem de água e consequentemente, a quantidade líquida de água que nele permanece disponível às plantas (Reichardt, 1985).

Vários pesquisadores desenvolveram modelos para essa quantificação (KONDO; SAIGUSA; SATO, 1990; SCHAAKE et al., 1996; MILLY, 1994), porém o modelo mais utilizado, denominado balanço hídrico agroclimático, foi proposto por Thornthwaite e Mather (1955), no qual a partir dos dados de precipitação, evapotranspiração e capacidade de água disponível chega-se aos valores de armazenamento de água no solo.

Quando se realiza o balanço hídrico na presença de uma cultura agrícola, deve-se levar em consideração ainda o sistema radicular da mesma, uma vez que esta característica é alterada a depender da cultura avaliada sendo alterado então o volume de solo abrangido pela mesma. Em geral os processos envolvidos em fluxo de água se relacionam e muitas vezes ocorrem simultaneamente. As quantidades de água que entram e que saem são representadas esquematicamente na Figura 2 pelos processos: precipitação  $P$ , irrigação  $I$ , deflúvio superficial (de entrada  $R_e$  e saída  $R_s$ ), deflúvio subsuperficial (de entrada  $R_e'$  e saída  $R_s'$ ), drenagem interna  $D$ , ascensão capilar  $AC$  e evapotranspiração real  $ET$ , resultando na Equação 8, para a variação da armazenagem de água  $\Delta h$ , sendo os valores de entrada positivos e os de saída negativos.

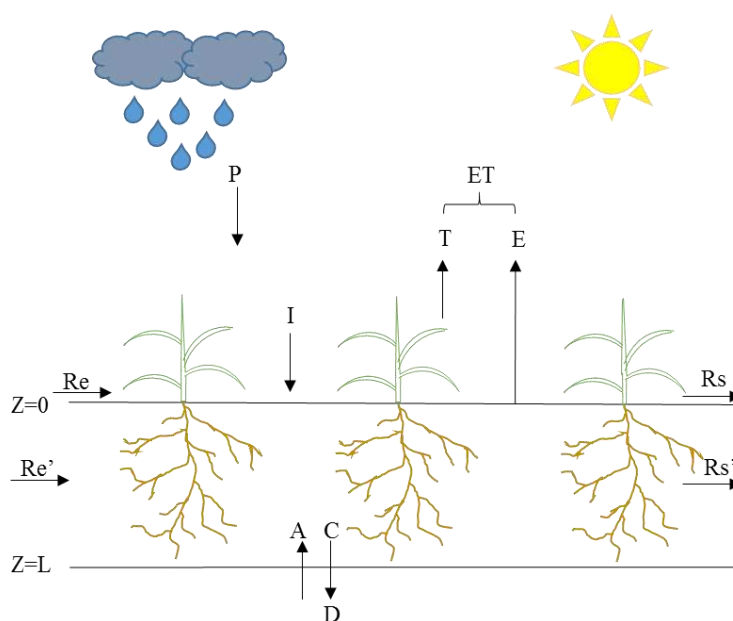


Figura 2 – Esquema da entrada e saída de água no solo com cultura (LIBARDI, 2005).

$$\Delta h = P + I + R_e + R_{e'} + R_s + R_{s'} + AC + D + ET$$

Equação 8

A realização deste balanço é muito importante para o manejo hídrico de culturas, principalmente quando elas são irrigadas, pois estimando-se e contabilizando-se os fatores envolvidos no sistema será possível quantificar adequadamente o volume ideal de água para que as culturas não sofram nem pelo excesso nem por stress hídrico, tornando o cultivo mais produtivo e sustentável (LIBARDI, 2005).

### 2.3.3 Modelagem do sistema solo-água-planta-atmosfera

A interação dinâmica que ocorre na natureza é na maioria dos casos de difícil mensuração, justamente por envolver diversos fatores que ocorrem simultaneamente e que se inter-relacionam. Na prática, essa determinação é realizada isolando-se as variáveis pertencentes ao sistema, o que por vezes pode sub ou superestimar o que de fato acontece. Além disso, a obtenção de um modelo físico, pode demorar meses ou anos para ser construído. No entanto, vários estudos vêm sendo realizados nas últimas décadas como ferramentas para auxiliar no aperfeiçoamento da resolução destes processos, sendo estes os modelos matemáticos.

De acordo com Iritani (1998), baseado no levantamento de dados e observação do sistema, implementa-se a modelagem, a qual pode ser entendida como a reprodução matemática do que ocorre na natureza, a partir de um modelo conceitual, com o propósito de compreender melhor o sistema atual, podendo inclusive calcular condições futuras, buscando-se direcionar ações de resolução. Portanto, um modelo nada mais é que uma abstração do sistema real, empregado para monitoração dos eventos que ocorrem no sistema. Assim, atualmente, modelos de vários graus de complexidade e dimensionalidades vêm sendo utilizados como opções para melhor compreensão e interpretação da interação do sistema solo-água-planta-atmosfera, sobretudo quanto aos princípios e leis que regem os fenômenos físicos.

De acordo com Simunek & Bradford, 2009, a vantagem de se realizar uma modelagem numérica é que os resultados são obtidos rapidamente quando comparadas a um modelo físico, podendo-se prever e simular diversas situações, uma vez que se leva em consideração o estudo de todo um perfil, com diferentes geometrias e condições de contorno. Por outro lado, os modelos matemáticos possuem algumas limitações, já que os resultados são dependentes dos parâmetros de entrada e de algumas condições de contorno que por vezes pode não ser situações reais que ocorrem em campo.

Alguns trabalhos realizados recorrendo-se a modelos computacionais são encontrados na literatura (NIMAH; HANKS, 1973; BELMANS, et al., 1983; TOLK et al., 1999; ROSS 2002; CECÍLIO et al., 2003; BEACH & Mc CRAYS, 2003; LEWANDOWSKA et al., 2004; BEN-GAL et

al., 2004; BORGESSEN et al., 2006; ITURBE et al., 2007; DABACH et al., 2011; HU et al., 2011; DUNBABIN et al., 2013; SUBBAIAH, 2013; KUKLIK & HOANG, 2014; SATCHITHANANTHAM et al., 2014; TAN et al., 2014; ZHUANG et al., 2016; TOUMI et al., 2016; ALBANO et al., 2017; TEJERA et al., 2017; SHAFIE et al., 2017; HERRERA et al., 2017; TABBAGH et al., 2017), os quais baseiam-se nas equações de transporte de água no solo para gestão dos recursos hídricos e manejo de irrigação.

#### **2.3.4 O programa VADOSE/W**

A compreensão do fluxo na zona vadosa é desafiadora diante da complexidade das interações que ocorrem perto da superfície do solo, dada a vegetação, o solo e as condições climáticas. Segundo Wilson (1990), existem três fatores que se relacionam e que controlam o fluxo de água entre solo e atmosfera, sendo eles o abastecimento de água, controlado por condições climáticas como precipitação ou irrigação, a velocidade do vento e radiação solar; a capacidade da superfície de transmitir água, o qual é função da permeabilidade e características do solo e o consumo de água pela vegetação.

O programa VADOSE/W é dos softwares pertencentes ao pacote da GEOSTUDIO, desenvolvidos pela GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canadá, sendo elaborado para soluções de diversos problemas hidrológicos, sendo os mais simples solucionados a partir de uma análise de infiltração de água no solo, escoamento superficial e evaporação e problemas mais complexos levando-se em consideração desde os processos atmosféricos próximos à superfície, bem como a absorção de água pelas raízes e índices de área foliar, fusão de neve, escoamento subsuperficial e transporte de calor e massa (MANUAL VADOSE/W).

Este software realiza simulações em modelos uni e bidimensionais por meio de elementos finitos para análise de fluxo de água em meios porosos (regime transiente e permanente) e o balanço hídrico de um sistema para resolver a Equação de Richards (1931), por meio de equações que estudam o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera, bem como as condições iniciais e de contorno destas equações utilizando o método de Penman (1948) modificado por Wilson (1990), ou método de Penman-Wilson, o qual estima a evaporação real, a partir da pressão de vapor na superfície do solo acoplada com os processos de transferência de massa e calor (Wilson et al., 1993).

Wilson (1990) resolveu as equações fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera usando uma formulação explícita do método das diferenças finitas. Joshi (1993) estudou essa mesma formulação simplificada proposta por Wilson (1990) generalizando-a para o caso bidimensional utilizando o método dos elementos finitos conjugado com o método das diferenças finitas para realizar a integração no tempo. O VADOSE/W segue o uso das equações

simplificadas propostas por Wilson (1990), utilizando a solução numérica bi-dimensional desenvolvida por Joshi (1993).

Ribeiro (2011), realizou análises numéricas de dois sistemas de cobertura de rejeito de mineração sendo um sistema tipo evapotranspirativo com uma camada de barreira capilar, e outro sem barreira capilar. O pesquisador utilizou o software VADOSE/W para simular estes sistemas de cobertura comparando os resultados da modelagem com dados de campo. Observou-se uma boa aproximação de ambos os resultados com os dois tipos de sistema de cobertura. Neste trabalho o autor apresenta detalhes das equações propostas por Wilson (1990), Joshi (1993) e da modelagem.

## **Referências Bibliográficas**

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2013**. Brasília: ANA, 2014, 432 p.
- AGUIAR, A. P. A. e SILVA, A. M. da. Irrigação em pastagens. In: Simpósio De Forragicultura e Pastagens. 3. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002. 320 p. p. 261-320, 2002
- AGUIAR, F. Gotejamento enterrado é novidade na irrigação da cana. **Agrianual** 2002, São Paulo, p. 256-7, 2002.
- ALBANO, R., MANFREDI, S., CELANO, G. MY SIRR: **Minimalist agro-hydrological model for sustainable irrigation management – Soil moisture and crop dynamics**. SoftwareX, v. 6, p. 107, 117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.04.005>
- ALCÂNTARA, P. B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras: gramíneas e leguminosas**. São Paulo: Nobel, 1999. 165 p.
- ALENCAR, C. A. B. Manejo de solo, água e forrageira, visando a intensificação dos sistemas de produção de leite a pasto. In: MARTINS, C. E. et al. (eds.). **Sustentabilidade da produção de leite no Leste Mineiro**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, p.69-87, 2001.
- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 13, n. 6, p. 680–686, 2009.
- ANDRADE, A. C.; FONSECA, D. M.; LOPES, R. S.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; CECILIO, P. R.; QUEIROZ, D. S.; PEREIRA, D. H.; REIS, S. T. Morphogenetic and structural characteristics of ‘Napier’ elephant grass fertilized and irrigated. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p. 150-159, 2005.
- ANDRADE, C. M. S.; GARCIA, R.; COUTO, L. PEREIRA, O. G. Fatores limitantes ao crescimento do capim-tanzânia em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, na região dos cerrados de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, p. 1178-1185, 2001.

- ANDRADE, C. M. S.; VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. C.; VAZ, F. A. Crescimento de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais sob sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 263-270, 2004.
- AYARS, J. E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agricultural Water Management**, v. 157, p. 39-47, 2015.
- AYARSA, C. J.; PHENEB, R. B.; HUTMACHER, K. R.; DAVIS, R. A.; SCHONEMANA, S. S.; VAILA, R. M. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. **Agricultural Water Management**, v. 42, p. 1-27, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00025-6)
- AZEVEDO, H. M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139, p. 40-53, 1986.
- BALIEIRO NETO, G. B.; FERREIRA, J. J.; FERREIRA, M. B. D.; FREIRE, F. M.; VIANA, M. C. M.; RESENDE, M. Características agronômicas e viabilidade do tifton-85 (*Cynodon spp*) irrigado num sistema de produção de leite. **Brazilian Journal Veterinary Research and Animal Science**, São Paulo, v. 44, n. 4, p. 235-242, 2007.
- BEACH, D. N. H., McCRAYS, J. E. Numerical Modeling of Unsaturated Flow in Wastewater Soil Absorption Systems. **Groundwater Monitoring & Remediation**, v. 23, n. 2, p. 64-72, 2003. doi:10.1111/j.1745-6592.2003.tb00672.x
- BEADLE, D.L. Growth analysis. In: HAL, D.O.; BOLHARNORDENKAMPF, H.R.; LEEGOOD, R.C.; LONG, S.P. **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and a laboratory manual**. London: Pergamon Press, p. 36-46, 1993.
- BELMANS, C., WESSELING, J. G., FEDDES R. A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. **Journal of Hydrology**, v. 63, n. 3, p. 271-276, 1983. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90045-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90045-8)
- BEN-GAL, A., LAZOROVITCH, N., SHANI, U. Subsurface Drip Irrigation in Gravel-Filled Cavities. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1407-1413, 2004. doi:10.2136/vzj2004.1407
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**, 8 ed. Viçosa: Imprensa universitária. 2008. 625p.
- BOGDAN, A.V. **Tropical pasture and fodder plants**. London: Longman, 1977. 475p.
- BORGES, C. D., JACOBSEN, O. H., HANSEN, S., SCHAAP, M. G. Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1-4, p. 40-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.014>
- BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soilmoisture. Washington, **USDA: soils Bulletin** v. 38, 1907, 61 p.
- CAETANO, L. P. S.; DIAS-FILHO, M. B. Responses of six *Brachiaria* spp. accessions to root zone flooding. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 795-801, 2008.

- CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transactions of ASAE**, v. 41, n. 5, p. 1353-1376, 1998.
- CARVALHO, D. F. Instituto de Tecnologia - Departamento de Engenharia. **Material de aula**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004.
- CECÍLIO, R. A., SILVA, D. D., PRUSKI, F. F., MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 415-422, 2003. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000300002>
- CHAPMAN, D. F.; LEMAIRE, G. Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation. In: BAKER, M. J. (Ed.) **Grasslands for Our World**. SIR Publishing, Wellington, p. 55-64, 1993.
- CHRISTOFIDIS, D. Como obter a sustentabilidade dos recursos hídricos na agricultura irrigada? **Irrigação & Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, v. 64, p. 30-31, 2004.
- CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; DERESZ, F.; FREITAS, A. F.; PACIULLO, D. S. C.; ALENCAR, C. A. B.; VÍTOR, C. M. T. Produção de forragem e valor nutritivo do capim-elefante, irrigado durante a época seca. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1625-1631, 2008.
- COSTA, N. L.; GONÇALVES, C. A.; OLIVEIRA, J. R. C.; OLIVEIRA, M. A. S.; MAGALHÃES, J. A. Resposta de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu à regimes de cortes. **Comunicado Técnico**, 279, Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2004. 4 p.
- COSTA, N. L.; TOWNSEND, C. R. Desempenho agrônomo de gramíneas forrageiras tropicais sob sombreamento de eucaliptos na Amazônia Ocidental. In: Congresso brasileiro de sistemas agroflorestais: sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos: sustento da vida e sustento de vida, 4, 2002, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 2002. CD-ROM.
- COSTA, N. L.; TOWNSEND, C. R.; MAGALHÃES, J. A. Avaliação agrônoma de gramíneas forrageiras sob sombreamento de seringueira adulta. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 1998, Belém. **Anais...** Belém: Embrapa-CPATU, p.201-203, 1998.
- CUNHA, F. F.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, O. G.; ABREU, F. V. S. Produtividade do capim Tanzânia em diferentes níveis e frequências de irrigação. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 103–108, 2008.
- DIAS-FILHO, M. B. Photosynthetic light response of the C4 grasses *Brachiaria brizantha* and *B. humidicola* under shade. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 65-68, 2002.

- DRUMOND, L. C. D. Irrigação de Pastagem. **Apostila didática**, 2013. Disponível em: <http://www.pecnordestefaec.org.br/2013/wp-content/uploads/2013/08/Luis-C%C3%A9sar-Dias-Drumond-Irriga%C3%A7%C3%A3o-de-Pastagem.pdf>, acessado em: 30/11/2017.
- DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. **Irrigação de pastagem**. Uberaba, MG: ed. L.C.D. DRUMOND, 2005. 210 p.
- DUNBABIN, V. M., POSTMA, J. A., SCHNEPF, A., PAGÈS, L., JAVAUX, M., WU, L., LEITNER, D., CHEN, Y. L., RENGEL, Z., DIGGLE, A. J. Modelling root–soil interactions using three–dimensional models of root growth, architecture and function. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1-2, p. 93-124, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1769-y>
- DURU, M., DUCROCQ, H. Growth and senescence of the successive grass leaves on a tiller. Ontogenic development and effect of temperature. **Annals of Botany**, v. 85, p. 635-643, 2000.
- FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 3rded. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 681 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Information System on Water and Agriculture - AQUASTAT**, 2012.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. New Jersey: Printice-Hall, 1979. 604 p.
- GEO-SLOPE International Ltd. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W. **User's Guide**. Calgary, Alberta, Canadá, 2004.
- GOMES, E. P.; RICKLI, M. E.; CECATO, U.; VIEIRA, C. V.; SAPIA, J. G.; SANCHES, A. C. Produtividade de capim Tifton 85 sob irrigação e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 317–323, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p317-323>
- GUSHIKEN, E.C. Irrigating with reclaimed water through permanent subsurface drip irrigation systems. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5. 1995, St. Joseph. **Proccedings...**St. Joseph: ASAE, p.269-274, 1995.
- HARLAN, J. R.; DE WET, J. M. J.; RAWAL, K. M. Geographic and distribution of the species of *Cynodon* L.C.Rich. (Gramineae). **East African Agriculture and Forestry Journal**, Grahamstown, v. 19, p. 465-469, 1970.
- HERRERA, J., BONILLA, C. A., CASTRO, L., VERA, S., REYES, R., GIRONÁS, J. A model for simulating the performance and irrigation of green stormwater facilities at residential scales in semiarid and Mediterranean regions. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 246-257, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.020>
- HILLEL, D. **Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 494 p.
- HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

- HODGSON, J. Grazing management: science into practice. **United Kingdom: Longman Scientific and Technical**, Longman Group, 1990. 203p.
- HU, R., CHEN, Y., ZHOU, C. Modeling of coupled deformation, water flow and gas transport in soil slopes subjected to rain infiltration. **Science China Technological Sciences**, v. 54, n. 10, p. 2561, 2011. doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4504-z>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estatísticas do Século XX**. Disponível em: Rio de Janeiro: IBGE, 2006, 577 p. Censo Agropecuário 2006. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. <[http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro\\_2006.pdf](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/51/agro_2006.pdf)> Acesso em: 10/07/2017.
- IRITANI, M. A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 200 p.
- ITURBE, I. R., D'ODORICO, P., LAIO, F., RIDOLFI, L., TAMEA, S. Challenges in humid land ecohydrology: Interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation. **Water Resources Research**, v. 43, n. 9, 2007. doi:10.1029/2007WR006073.
- JANK, L.; VALLE, C. B.; KARIA, C. T.; PEREIRA, A. V.; BATISTA, L. A. R.; RESENDE, R. M. S. Opções de novas cultivares de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais para Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 26, n. 226, p. 26-35, 2005.
- JOSHI, B. **A finite element model for the coupled flow of moisture and heat in soils under atmospheric forcing**. M. Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1993.
- JUAN, J. A. M. S. **Riego por goteo: teoría y práctica**. 4ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2000. 302p.
- KELLER, J.; BLIESNER, I.D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.
- KONDO, J.; SAIGUSA, N.; SATO, T. A parametrization of evaporation from bare soil surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, v. 29, n. 5, p. 385-395, 1990.
- KUKLIK, V.; HOANG, T.D. Soil moisture regimes under point irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 134, p. 42-49, 2014.
- LEMAIRE, G., AGNUSDEI, M. Leaf tissue turn-over and efficiency of herbage utilization. In: LEMAIER, G., HODGSON, J., MORAES, A., et al. (Eds.) **Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology**. CAB International, p. 265-288, 2000.
- LEWANDOWSKA, J., SZYMKIEWICZ, A., BURZYŃSKI, K., VAUCLIN, M. Modeling of unsaturated water flow in double-porosity soils by the homogenization approach. **Advances in**

- Water Resources**, v. 27, n. 3, p. 283-296, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2003.12.004>
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. In: GUIMARÃES, M. (Coord.). **Fisiologia vegetal**. 2. ed. São Paulo: EPU, p. 333-350, 1985.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e práticas**. Viçosa: UFV, 2006. 318 p.
- MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A.; TEIXEIRA, M. B. O estado da arte da irrigação por gotejamento subsuperficial: uma revisão. **Colloquium Agrariae**, v. 2, n. 1, p. 17-31, 2006. doi: 10.5747/ca.2006.v02.n1.a20
- MARSALIS, M. A.; ALLEN V. G.; BROWN C. P.; GREEN C. J. Yield and Nutritive Value of Forage Bermudagrasses Grown Using Subsurface Drip Irrigation in the Southern High Plains. **Crop Science**, v. 47, p. 1246-1254, 2007. doi:10.2135/cropsci2006.06.0399
- MATTOS, J. L. S.; GOMIDE, J. A., M. Y. H.; CARLOS, A. Crescimento de espécies do gênero *Brachiaria*, sob déficit hídrico, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, p. 746-754, 2005.
- MAY, D.; HANSON, B. The effect of drip line placement on yield and quality of drip-irrigated processing tomatoes. **Irrigation and Drainage System**, v. 21, p. 109-118, 2007.
- MEIRELLES, P. R. L.; MOCHIUTTI, S. Formação de pastagens com capim marandú (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú) nos cerrados do Amapá. **Recomendações Técnicas**, n. 7, p.1-3, Embrapa Amapá, 1999.
- MILLY, P. C. D. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. **Water Resources Research**, v. 30, n. 7, p. 2143-2156, 1994.
- MOSCA, M. A.; TESTEZLAF, R.; GOMES, E. P. Desenvolvimento de emissores alternativos para irrigação subsuperficial de baixa pressão. **Irriga, Botucatu**, v. 10, n. 3, p. 249-262, 2005.
- MYERS, L. F. Water and irrigated pastures. **Australian grasslands**. Canberra: Australian National University Press, p. 260-73, 1973.
- NABINGER, C. Eficiência do uso de pastagens: disponibilidade e perdas de forragem. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, v. 14, 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, p. 213-251, 1997.
- NEWMAN, J. A.; PARSONS, A. J.; PENNING, P. D. A note on the behavioural strategies used by grazing animals to alter their intake rates. **Grass and Forage Science**, v. 49, p. 502-505, 1994.
- NIMAH, M. N., HANKS, R. J. Model for estimating soil water, plant, atmospheric interrelations: description and sensitivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 4, p. 522-527, 1973. doi:10.2136/sssaj1973.03615995003700040018x

- NUNES, S. G.; BOOCK, A.; PENTEADO, M. I. de O.; GOMES, D. T. **Brachiaria brizantha cv. Marandu**. 2.ed. Campo Grande: EMBRAPA CNPGC, 1985. 31p.
- OLIVEIRA FILHO, J. C. **Produção de duas gramíneas tropicais submetidas a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio e potássio no Estado do Tocantins**. 2007. 121f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.
- OLIVEIRA, V. S.; SANTANA, J. C. S.; MORAIS, J. A. S.; SANTOS, C. B.; LIMA, I. G. S. Capacidade de suporte, produção e composição do dossel forrageiro de três gramíneas irrigadas ou não no período seco. **Veterinária e Zootecnia**, v. 23, n. 1, p. 88-92, 2016.
- ORON, G.; DEMALACH, J.; HOFFMAN, Z.; CIBOTARU, R. Subsurface microirrigation with effluent. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 117, n. 1, p. 25-37, 1991.
- PACIULLO, D. S. C.; CARVALHO, C. A. B.; AROEIRA, L. J. M.; MORENZ, M. J. F.; LOPES, F. C. F.; ROSSIELLO, R. O. P. Morfofisiologia e valor nutritivo do capim-braquiária sob sombreamento natural e a sol pleno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 10, p. 573-579, 2007.
- PARKES, M.; YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 29, p. 331-339, 2010.
- PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; SANCHEZ-ROMAN, R. M.; JOSE, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga, Botucatu**, v. 16, n. 2, p. 163-176, 2011.
- PAVERO, J. Subsurface drip irrigation: Is it a good choice for your operation? **Published by University of Nebraska and the U.S. Department of Agriculture**. Disponível em: <<http://cropwatch.unl.edu/archives/2002/crop02-8.htm#top>>. Acesso em 13 jul. 2017.
- PEARCE, R. B.; BROWN, R. H.; BLASER, R. E. Relationships between leaf area index, light interception and net photosynthesis in orchardgrass. **Crop Science**, v. 5, p. 553-556. 1965.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**, London, v.193, p.120-45, 1948.
- PHENE, C. J.; DAVIS, K. R.; HUTMACHER, R. B.; McCORMIC R. L. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 200, p. 101-114, 1987.
- RADFORD, P.J. Growth analysis formulae – their use and abuse. **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, 1967.
- RAJPUT, T. B. S.; PATEL, N. Effect of subsurface drip irrigation on onion yield. **Irrigation Science**, v. 27, p. 97-108, 2009.
- RASSINI, J. B. Período de estacionalidade de produção de pastagens irrigadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 8, p. 821-825, 2004.

- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ. Depto. Física e Meteorologia, 2nd ed. Piracicaba, 1996. 505p.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 445p.
- REIS FILHO, R. J. C. Leite em clima quente é viável. **Revista Balde Branco**. n. 480 A, p. 84-86, 2004 (edição especial).
- REIS, E. F.; BARROS, F. M.; CAMPANHARO, M.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, MG, v. 13, p. 74-81, 2005.
- RENVOIZE, S. A.; CLAYTON, W. D.; SKABUYE, C. H. Morfología, taxonomía y distribución natural de *Brachiaria* (Trin) Griseb. In: MILLES, J.W.; MASS, B.L.; VALLE, B.C. (Ed.). **Brachiaria: biología, agronomía y mejoramiento**. Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA, CNPGC, p. 1-19, 1998.
- RIBASKI, J.; RAKOCEVIC, M. Disponibilidade e qualidade da forragem de braquiária (*Brachiaria brizantha*) em um sistema silvipastoril com eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) no noroeste do Estado do Paraná. In: Congresso brasileiro de sistemas agroflorestais: 29 sistemas agroflorestais, tendência da agricultura ecológica nos trópicos: sustento da vida e sustento de vida, 4, 2002, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 2002. CD-ROM.
- RIBEIRO, A.G.C. **Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 182 p, 2011.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Physics**, New York, v. 1, p. 318-333, 1931.
- ROSS, P. J. Modeling Soil Water and Solute Transport—Fast, Simplified Numerical Solutions. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 6, p. 1352-1361, 2002. doi:10.2134/agronj2003.1352
- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; RICKLI, M. E.; FASOLIN, J. P.; SOARES, M. R. C.; GOES, R. H. T. B. Produtividade e valor nutritivo do capim Tifton 85 irrigado e sobressemeado com aveia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 126–133, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p126-133>
- SANTOS, M. S. Estrutura e valor nutritivo de pasto de capim Tanzânia e Marandu aos 22 e 36 dias de rebrota para ovinos. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 13, n. 1, p. 35-46, 2012.

- SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G.; ARAÚJO, L. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; VALLE, C. B.; PEZZOPANE, C. G. Response mechanisms of *Brachiaria brizantha* cultivars to water deficit stress. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, n. 11, p. 767-773, 2013.
- SATCHITHANANTHAM, S.; KRAHN, V.; SRI RANJAN, R.; SAGER, S. Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 132, p. 101-110, 2014.
- SCHAAKE, J. C.; KOREN, V. I.; DUAN, Q. Y.; MITCHELL, K.; CHEN, F. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D3, p. 7461-7475, 1996.
- SCHNYDER, H.; DE VISSER, R. Fluxes of reserve-derived and currently assimilated carbon and nitrogen in perennial ryegrass recovering from defoliation. The regrowing tiller and its component functionally distinct zones. **Plant Physiology**, v. 119, p. 1423-1435, 1999.
- SEIFFERT, N. F. Gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria*. Reimpressao. Campo Grande, **Circular Técnica I**, EMBRAPA-CNPQC, 1984. 74p.
- SEVOSTIANOVA, E.; LEINAUER, B. Subsurface-Applied Tailored Water: Combining Nutrient Benefits with Efficient Turfgrass Irrigation. **Crop Science**, v. 54, p. 1926-1938, 2014. doi:10.2135/cropsci2014.01.0014
- SHAFIE, A. F. E., OSAMA, M. A., HUSSEINA, M. M., GINDY, M. E, RAGAB, R. Predicting soil moisture distribution, dry matter, water productivity and potato yield under a modified gated pipe irrigation system: SALTMed model application using field experimental data. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 221-233, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.002>
- SIMON, J. C., LEMAIRE, G. Tillering and leaf area index in grasses in the vegetative phase. **Grass and Forage Science**, v. 42, n. 4, p. 373-380, 1987.
- SKERMAN, P. J.; RIVEROS, F. **Brachiaria**. In: FAO. Tropical grasses. Rome, p. 234-262, 1990.
- SORIA, L. G. T.; COELHO, R. D.; HERLING, V. R.; PINHEIRO, V. Resposta do capim Tanzânia a aplicação de nitrogênio e de lâminas de irrigação. I: Produção de forragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 430-436, 2003.
- SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Embrapa: Informação Tecnológica, Brasília, 2011, 771p.
- SOUZA FILHO, P. **Parâmetros físicos e hídricos relacionados com o avanço da frente de molhamento**. 2011. 74 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

- STONE, K. C.; HUNT, P. G.; MILLEN, J. A.; JOHNSON, M. H.; MATHENY, T. A.; VANOTTI, M. B.; BURNS, J. C. Forage subsurface drip irrigation using treated swine wastewater. **Transactions of the ASABE**, v. 51, n. 2, p. 433-440, 2008.
- SUAREZ-REY, E.; CHOI, C. Y.; WALLER, P. M.; KOPEC, D. M. Comparison of subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation for Bermuda grass turf in Arizona. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, n. 3, p. 631-640, 2000.
- SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 31, n. 3, p. 225-258, 2013. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0309-x>
- TABBAGH, A., CHEVIRON, B., HENINE, H., GUÉRIN, R., BECHKIT, M. A. Numerical determination of vertical water flux based on soil temperature profiles. **Advances in Water Resources**, v. 105, p. 217-226, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.05.003>
- TAN, X.; SHAO, D.; LIU, H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 132, p. 69-78, 2014.
- TEJERA, G. O., BERNAL, Á. L., ORGAZ, F., TESTI, L., VILLALOBOS, F. J. Analysing the combined effect of wetted area and irrigation volume on olive tree transpiration using a SPAC model with a multi-compartment soil solution. **Irrigation Science**, v. 35, n. 5, p. 409-423, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00271-017-0549-5>.
- TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2011. 204p.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publication in climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.
- TOLK, J. A., HOWELL, T. A., EVETT, S. A. Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize. **Soil and Tillage Research**, v. 50, n. 2, p. 137-147, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00011-2)
- TOUMI, J., ER-RAKI, S., EZZAHAR, J., KHABBA, S., JARLAN, L., CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 219-235, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.007>
- VALENTINE, I.; MATTHEW, C. Plant growth, development and yield. In: WHITE, J.; HODGSON, J. (Ed.). **New Zealand Pasture and Crop Science**. Auckland: Oxford University Press, p. 11-27, 1999.

- VALLE, C. B.; EUCLIDES, V. P. B.; MACEDO, M. C. M. Características das plantas forrageiras do gênero *Brachiaria*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DAS PASTAGENS, 17, Piracicaba, 2000. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, p.65-108, 2000.
- VALLE, C.B. Avaliação de Germoplasma e Melhoramento Genético de Braquiárias. In: PAULINO V.T. et al. IN: ENCONTRO PARA DISCUSSÃO SOBRE CAPINS DO GÊNERO *BRACHIARIA*, 2, 1991. **Anais...** Nova Odessa, Instituto de Zootecnia, p. 301-342, 1991.
- VERHAGEN, A. M. W.; WILSON, J. H., BRITTEN, E. J. Plant production in relation to foliage illumination. **Annal of Botany**, N. S., v. 27, n. 108, p. 626- 640. 1963.
- VILELA, L.; LEITE, G. G.; GUERRA, A. F.; MARCELINO, K. R. A.; OLIVEIRA, M. V. F. Produtividade do capim-marandu sob diferentes tensões hídricas no solo e doses de nitrogênio. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Embrapa Cerrados. Planaltina, DF, 2002.
- VITOR, C. M. T.; FONSECA, D. M.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; RIBEIRO JÚNIOR, J. I. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 3, p. 435-442, 2009.
- WILSON, G.W. **Soil Evaporation Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1990.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled soil–atmosphere modeling for soil evaporation. **Canadian Geotechnical Journal** v. 31, p. 151–161, 1993.
- ZHUANG, L., HASSANIZADEH, M. S., VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJNSE, A., RAOOF, A., QIN, C. Modeling of Horizontal Water Redistribution in an Unsaturated Soil. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 3, 2017. doi:10.2136/vzj2015.08.0109

### 3. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM LATOSSOLO DO CERRADO

#### 3.1 Resumo

O estudo dos solos não saturados tem aplicação direta no uso racional da água, sendo essenciais em projetos e manejo da irrigação. Objetivou-se neste trabalho, determinar a função de condutividade hidráulica dos solos (FCH) pelo método indireto ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem para um latossolo da região do Alto Paranaíba. A FCH foi obtida por meio da curva de retenção de água nos solos (CRA) pela técnica do papel filtro e condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ) através do permeâmetro de Guelph, em cinco pontos e três profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 m). As CRA's nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m possuem comportamento bimodal devido a macro e microporosidade deste solo. Os valores de  $K_{sat}$  foram condizentes aos encontrados na literatura. As CRA's e  $K_{sat}$  não apresentaram variabilidade entre os pontos e profundidades, mostrando a boa homogeneidade física deste latossolo ao longo do perfil do solo. A FCH ajustou-se bem ao modelo, sendo o primeiro trecho da CRA (0-8000 kPa) suficiente em projetos de irrigação.

**Palavras-chave:** Van Genuchten-Mualem, curva de retenção de água no solo, papel filtro, permeâmetro de Guelph, irrigação.

#### 3.2 Abstract

The study of unsaturated soils has direct application in the rational use of water, being essential in irrigation projects and management. The objective of this work was to determine by indirect method the hydraulic conductivity of soils (HCS) adjusted by the Van Genuchten-Mualem model for a oxisol of the Alto Paranaíba region. A HCS was obtained by means of the soil water retention curve (SWR) by the filter paper technique and the saturated hydraulic conductivity of the soil ( $K_{sat}$ ) through the Guelph permeameter, in 5 points and three depths (0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 m). The SWR's at depths 0,20-0,40 and 0,40-0,60 m this soil have bimodal behavior due to macro and microporosity of this soil. The  $K_{sat}$  values were consistent with those found in the literature. The SWR's and  $K_{sat}$  did not show variability between the points and depths, showing the good physical homogeneity of this oxisol along the soil profile. The HCS adjusted well to the model, being the first stretch of SWR (0-8000 kPa) sufficient in irrigation projects.

**Keywords:** Van Genuchten-Mualem, soil retention curve, paper filter, Guelph permeameter, irrigation.

### 3.3 Introdução

Os estudos para compreensão e predição do fluxo de água no solo são fundamentais para a solução de problemas e melhorias de técnicas que envolvem a irrigação, com aplicação direta na otimização do uso da água e consequentemente na interação solo-água-planta. De acordo com Marinho (2005), a relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e o grau de saturação é chamada de função de condutividade hidráulica (FCH) e ocorre em condições naturais à medida que poros ocupados por água são substituídos por ar. Segundo McCartney (2007), três variáveis podem ser usadas para caracterizar o comportamento hidráulico dos solos não saturados: a umidade volumétrica, a matriz de sucção (diferença entre a pressão de ar e água), e a resistência que a água encontra para atravessar a camada de solo, dado pelo coeficiente de permeabilidade  $K$ . A partir da FCH pode-se calibrar tensiômetros e realizar modelagens do movimento de água no solo para predição do sistema solo-água-planta-atmosfera.

A relação entre a umidade volumétrica e a matriz de sucção é chamada de curva característica do solo ou curva de retenção de água (CRA). A CRA é dependente dos atributos do solo, como granulometria, teor de matéria orgânica e composição mineralógica, de condições como volume e distribuição dos vazios, micro e macroestrutura, microfissuras, pH, composição da fase líquida, temperatura, dentre outros. Segundo Marinho (2005), muitas críticas podem ser feitas, pois a curva em questão não é somente uma característica do solo ou do material poroso, pois depende de fatores como história de tensões e das trajetórias de drenagem (ou secagem) e umedecimento seguidas durante a variação de umidade. Na descrição do comportamento físico-hídrico de solos nessas condições, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido amplamente utilizado e permite relacionar com ótima precisão a umidade volumétrica (relação entre volume de água e volume total) e a sucção correspondente. Essa equação matemática é caracterizada por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação ( $\theta_s$ ) e ao conteúdo residual ( $\theta_r$ ) e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" $\alpha$ ", " $n$ " e " $m$ ").

A relação entre a umidade volumétrica e o coeficiente de permeabilidade é dado como função de condutividade hidráulica (FCH), as quais podem ser apresentadas em função da sucção, saturação, umidade volumétrica ou até mesmo em função da saturação efetiva. Solos com textura mais grossa apresentam funções nas quais a taxa de decréscimo da condutividade hidráulica é bem maior do que a dos solos com textura mais fina, uma vez que os poros maiores drenam mais facilmente que os menores, reduzindo a área efetiva de drenagem e diminuindo a condutividade hidráulica mais rapidamente.

A determinação da FCH é realizada através de técnicas diretas ou indiretas. As medidas diretas são geralmente feitas por meio de ensaios de permeabilidade desenvolvidos em laboratório e/ou ensaios de campo. Já as medidas indiretas utilizam o coeficiente de permeabilidade saturada ( $K_{sat}$ ) e a CRA do solo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). Em decorrência das dificuldades encontradas na determinação da função de condutividade por meios diretos devido a demanda de tempo e a necessidade de equipamentos especiais que oneram custos, muitas pesquisas têm sido direcionadas para desenvolver procedimentos semi-empíricos, ou indiretos, que determinam a FCH usando a CRA (GARDNER 1958; BROOKS & COREY, 1964; VAN GENUCHTEN, 1980; FREDLUND; XING; HUANG, 1994).

Diante da necessidade de otimização do manejo da irrigação para predição da quantidade real de água necessária às plantas e conhecimento do movimento de água ao longo do perfil do solo, este trabalho teve como objetivo, determinar pelo método indireto a função de condutividade hidráulica dos solos (FCH) ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem para um latossolo da região do Alto Paranaíba - MG.

### 3.4 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na área experimental da Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, MG, nas coordenadas 19° 12' 43" S e 46° 07' 56" W, com altitude média de 1128 m. O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, com estações de inverno e verão bem definidas, chuvas no verão e temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22°C. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado, relevo plano (EMBRAPA, 2006).

Foram coletadas amostras indeformadas de solo em cinco pontos aleatórios nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m em uma área de 10.000 m<sup>2</sup> para caracterização da granulometria conjunta, conforme a norma ABNT NBR-7181/84, determinação dos índices físicos e realização dos ensaios para obtenção da CRA. Dois meses antes da amostragem, o solo foi preparado primeiramente com o arado de discos regulado para trabalhar a 0,20 m de profundidade e posteriormente gradeado duas vezes para destorroamento e nivelamento da área, sendo essas operações realizadas com trator New Holland TL85E, 4x2 TDA, potência de 88 cv e transmissão 12x12 Power Shuttle.

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) do solo foi determinada em campo por meio do permeâmetro de Guelph nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, próximo aos pontos amostrados, utilizando os métodos por uma e por duas cargas hidráulicas. O cálculo da  $K_{sat}$  e do potencial de fluxo matricial  $\Phi_m$  são obtidos através da determinação do valor da taxa de infiltração e da associação deste valor com as dimensões do furo e da altura da coluna d'água em seu interior. A Equação 1 é apresentada para obtenção do  $K_{sat}$  com uma carga hidráulica.

$$K_{sat} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi P^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha}} \quad \text{Equação 1}$$

em que  $K_{sat}$  corresponde à condutividade hidráulica saturada [ $\text{cm s}^{-1}$ ],  $C$  o parâmetro fator de forma, o qual depende do raio do poço [ $P=3 \text{ cm}$ ], da altura da carga hidráulica [ $H=5 \text{ cm}$ ] e da macroporosidade e textura do solo,  $Q$  a vazão do regime permanente dada por  $Q= R \times A$ , sendo  $R$  a taxa de infiltração e  $A$  a área do reservatório [conforme reservatório utilizado externo/interno=  $35,10 \text{ cm}^2$  e interno  $2,14 \text{ cm}^2$ ],  $P$  igual ao raio do poço [ $P=3 \text{ cm}$ ] e  $\alpha$  correspondendo ao parâmetro estimado por avaliação visual in situ da macro porosidade e textura do solo [ $\alpha =0,12 \text{ cm}^{-1}$ ].

Para procedimentos de ensaio com duas cargas hidráulicas com uso de água dos reservatórios interno/externo, tem-se a Equação 2.

$$k_{sat} = (0,0041 * X * R_2) - (0,0054 * X * R_1) \quad \text{Equação 2}$$

em que  $K_{sat}$  corresponde a condutividade hidráulica saturada [ $\text{cm s}^{-1}$ ],  $R_1$  e  $R_2$  a taxa de infiltração corresponde às alturas  $H_1$  e  $H_2$  respectivamente [ $\text{cm s}^{-1}$ ],  $X$  a constante do reservatório, usada quando a combinação de reservatório interno/externo é selecionada, [ $X=35,10 \text{ cm}^2$ ]. Para a determinação do potencial de fluxo matricial ( $\Phi_m$ ), utilizou-se a Equação 3.

$$\Phi_m = (0,0572 * Y * R_2) - (0,0237 * Y * R_1) \quad \text{Equação 3}$$

em que  $\Phi_m$  é o potencial de fluxo matricial [ $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ],  $R_2$  e  $R_1$  a taxa de infiltração corresponde às alturas  $H_1$  e  $H_2$  respectivamente [ $\text{cm s}^{-1}$ ] e  $Y$  a constante do reservatório, usada quando a combinação de reservatório interno/externo é selecionada [ $Y=2,14 \text{ cm}^2$ ].

As curvas de retenção de água no solo (CRA's) foram determinadas em cada ponto utilizando-se a técnica do papel filtro, ensaio padronizado pela ASTM D-5298 (Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper), exceto para a camada de 0,00-0,20 m o qual foi utilizado a mesa de tensão para determinação de sucções até 50 kPa.

Para retirar as amostras indeformadas, foram confeccionados anéis em PVC com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, em média. Os anéis foram biselados para facilitar a cravação. Foram retiradas entre 10 e 14 amostras por profundidade. Foram obtidos os teores de umidade e massa úmida, o que possibilitou a determinação da porosidade, grau de saturação e peso específico seco. Foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42. As CRA's foram obtidas por meio de secagem, onde todas as amostras são umedecidas até saturação completa e expostas as condições ambientais para secagem, até o valor de saturação desejado, sendo esta saturação calculada previamente mediante os índices físicos e controlado por pesagens sucessivas. Os papéis filtro foram colocados cuidadosamente na superfície superior e outro na inferior de cada corpo de prova e imediatamente após o posicionamento

dos papéis filtro, envolveu-se o corpo de prova com filme plástico. Em seguida, os corpos de prova foram identificados e deixados em câmara úmida por 7 dias. Posteriormente, os corpos de prova foram abertos para determinação da umidade do papel filtro, primeiramente pesando-o e depois submetendo-o a estufa, por um período de 2 horas, a uma temperatura de 105°C. Cada valor de sucção calculado foi determinado pela média de três resultados.

Calculado a umidade do papel filtro, a sucção matricial do solo foi determinada utilizando as curvas de calibração do papel filtro Whatman nº 42, obtidas por Chandler et al. (1992), apresentadas na Equação 4, quando as umidades dos papéis filtro eram superiores à 47% e Equação 5 quando as umidades dos papéis filtro eram menores ou iguais à 47%.

$$\psi(\text{kPa})=10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad \text{Equação 4}$$

$$\psi(\text{kPa})=10^{(4,84-0,0622w)} \quad \text{Equação 5}$$

sendo  $\Psi$  a sucção matricial do solo [kPa] e  $w$  a umidade do papel filtro [%].

O modelo de van Genuchten (1980) foi escolhido para o ajuste aos pontos experimentais sendo apresentado na Equação 6. Os parâmetros  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  foram obtidos por otimização, minimizando-se a diferença entre os resultados experimentais e teóricos, como mostra a Equação 7, utilizando-se, para isso, a ferramenta Solver do programa Excel.

$$\theta_w(\psi)=\theta_r+\frac{(\theta_s-\theta_r)}{(1+(\alpha \times \psi)^n)^m} \quad \text{Equação 6}$$

$$\text{Diferença (\%)}=\frac{\sqrt{(\theta_1-\theta_c)^2+(\theta_1-\theta_c)^2+(\theta_1-\theta_c)^2+\dots}}{\sqrt{\theta_{c1}^2+\theta_{c2}^2+\theta_{c3}^2+\dots}} \quad \text{Equação 7}$$

em que  $\Psi$  corresponde a sucção matricial [kPa],  $\theta_w$  umidade volumétrica [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ],  $\theta_s$  a umidade volumétrica de saturação [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ],  $\theta_r$  a umidade volumétrica residual [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ],  $\alpha$  o parâmetro de ajuste da curva [ $\text{cm}^{-1}$ ],  $n$  e  $m$  parâmetros de ajuste cuja relação é  $m=1-1/n$ ,  $\theta_1$  a umidade volumétrica obtida em laboratório e  $\theta_c$  a umidade volumétrica calculado pelo modelo.

O valor da umidade volumétrica obtido em laboratório foi calculado pela Equação 8.

$$\theta_1=\frac{S_r \times e}{1+e} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo,  $S_r$  o grau de saturação e  $e$  o índice de vazios.

Em razão do comportamento bimodal de alguns solos, têm sido propostas modelagens utilizando-se equações capazes de identificar esse comportamento, em que essas classes de poros são

quantificadas por meio de dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (DEXTER et al., 2008) e consequentemente, dois pontos de inflexão, como apresentado na Figura 1.

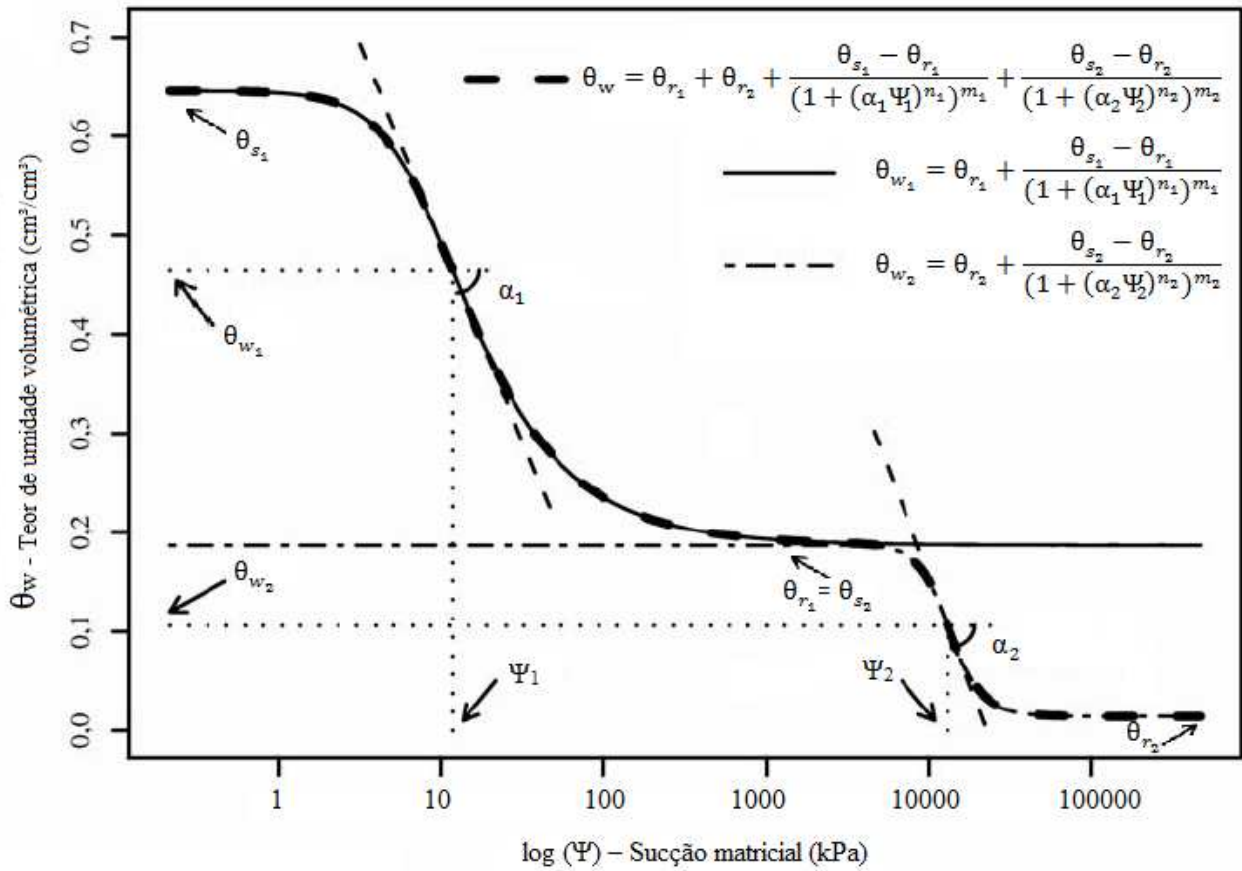


Figura 1 - Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a CRA, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo, sendo potencial matricial ( $\psi_i$ ) e conteúdo de água ( $\theta_{wi}$ ) com a estimativa da primeira e segunda inclinação nos pontos de inflexão. Fonte: Adaptado de Carducci et al. (2011).

Observa-se na Figura 1 algumas características da curva, sendo  $\theta_{s1}$  a umidade volumétrica de saturação da curva 1,  $\theta_{s2}$  a umidade volumétrica de saturação da curva 2,  $\theta_{r1}$  a umidade volumétrica residual da curva 1 (valor igual ao  $\theta_{s2}$ ),  $\theta_{r2}$  a umidade volumétrica residual da curva 2,  $\theta_i$ ,  $m_i$  e  $n_i$  sendo os parâmetros de ajustes das curvas 1 e 2.

Com os resultados obtidos experimentalmente, foi determinada a função de condutividade hidráulica pelo ajuste da curva de van Genuchten-Mualen por meio da Equação 9. Os dados de entrada são o coeficiente de permeabilidade saturada, obtida em campo ( $K_{sat}$ ) e os valores  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  obtidos pela curva de retenção de água no solo.

$$FCH(\Psi) = k_{sat} \times \frac{[1 - (a\Psi^{(n-1)}) \times (1 + (a\Psi)^n)^{-m}]^2}{[(1 + a\Psi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad \text{Equação 9}$$

em que  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica na condição saturada [ $\text{cm s}^{-1}$ ],  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  os parâmetros para ajuste da CRA.

### 3.5 Resultados e Discussão

A curva granulométrica do solo amostrado é apresentada na Figura 2. O teor de argila, silte e areia foram respectivamente iguais a 70%, 18% e 12%. Pode-se observar que a textura deste solo é predominantemente composta por materiais finos, o que o caracteriza como muito argiloso. Camargo & Pires (2015) caracterizaram uma área próxima e encontraram material variando de 62% a 85% de material fino.

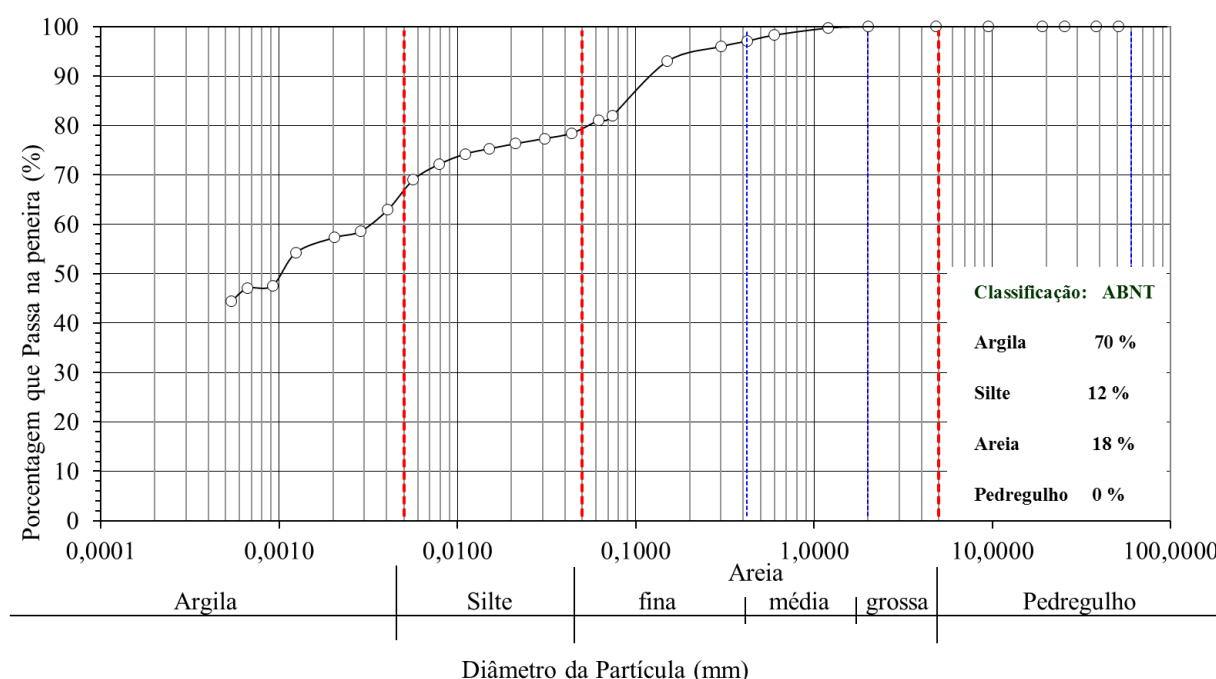


Figura 2 – Curva granulométrica do solo da área experimental

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) de todos os pontos coletados estão apresentados na Tabela 1. Pode-se observar que este solo é bastante permeável, na ordem de  $10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$ , tanto para o método de um estágio, quanto para o de dois estágios. Valores negativos são comumente encontrados nos ensaios de dois estágios. De acordo com Soto; Chang & Vilar (2009), esses resultados são causados pela heterogeneidade ou macroporosidade no meio poroso, resultando em características de fluxo diferentes, entre um e outro estágio de medição. Os mesmos autores analisaram o método do permeâmetro Guelph em um solo arenoso e outro argiloso, empregando os métodos de um e dois estágios. Eles evidenciaram dificuldades em cumprir a condição de isotropia de  $K_{sat}$  no método de dois estágios, porém destacaram que com o uso desta técnica torna-se possível a minimização de erros operacionais.

Tabela 1 – Valores de da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) pelos métodos de um e dois estágios determinados em campo utilizando-se o Permeâmetro de Guelph, nos cinco pontos amostrados.

| <b><math>K_{sat}</math> em <math>cm\ s^{-1}</math> para o método de 1 estágio</b> |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Ponto</b>                                                                      | <b>0,00-0,20 m</b>    | <b>0,20-0,40 m</b>    | <b>0,40-0,60 m</b>    |
| 1                                                                                 | $7,1 \times 10^{-03}$ | $1,8 \times 10^{-03}$ | $5,8 \times 10^{-03}$ |
| 2                                                                                 | $3,2 \times 10^{-03}$ | $9,3 \times 10^{-04}$ | $4,3 \times 10^{-03}$ |
| 3                                                                                 | $2,1 \times 10^{-03}$ | $3,1 \times 10^{-03}$ | $2,7 \times 10^{-03}$ |
| 4                                                                                 | $3,2 \times 10^{-03}$ | $5,6 \times 10^{-03}$ | $2,5 \times 10^{-03}$ |
| 5                                                                                 | $4,0 \times 10^{-03}$ | $3,5 \times 10^{-03}$ | $4,2 \times 10^{-03}$ |
| Média*                                                                            | $3,2 \times 10^{-03}$ | $3,1 \times 10^{-03}$ | $4,3 \times 10^{-03}$ |

| <b><math>K_{sat}</math> em <math>cm\ s^{-1}</math> para o método de 2 estágios</b> |                        |                        |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Pontos</b>                                                                      | <b>0,00-0,20 m</b>     | <b>0,20-0,40 m</b>     | <b>0,40-0,60 m</b>     |
| 1                                                                                  | $-7,5 \times 10^{-04}$ | $2,0 \times 10^{-03}$  | $-2,8 \times 10^{-03}$ |
| 2                                                                                  | $2,0 \times 10^{-03}$  | $2,8 \times 10^{-03}$  | $-2,0 \times 10^{-03}$ |
| 3                                                                                  | $1,7 \times 10^{-03}$  | $2,0 \times 10^{-04}$  | $9,9 \times 10^{-03}$  |
| 4                                                                                  | $2,5 \times 10^{-03}$  | $-1,2 \times 10^{-03}$ | $-5,3 \times 10^{-03}$ |
| 5                                                                                  | $1,2 \times 10^{-04}$  | $2,6 \times 10^{-04}$  | $6,5 \times 10^{-04}$  |
| Média*                                                                             | $1,8 \times 10^{-03}$  | $1,1 \times 10^{-03}$  | $5,3 \times 10^{-03}$  |

Gonçalves & Libardi (2013) determinaram o  $K_{sat}$  pelo método do perfil instantâneo de um latossolo e obtiveram valores na ordem de  $2,0 \times 10^{-4} cm\ s^{-1}$ . Sousa & Alves (2003) avaliaram o movimento de água de um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes manejos e encontraram o  $K_{sat}$  com valores na ordem de  $3,0 \times 10^{-3} cm\ s^{-1}$  entre as profundidades de 0,00 a 0,40 m. Netto & Fernandes (2005), determinaram a condutividade hidráulica de um LATOSSOLO VERMELHO em pousio e cultivo intensivo e encontraram valores de  $K_{sat}$  na ordem de  $1,0 \times 10^{-3} cm\ s^{-1}$ . Pode-se inferir que os resultados da  $K_{sat}$  deste trabalho condizem com os resultados apresentados na literatura para um latossolo. A estrutura destes solos é composta de agregados com formato arredondado, classificado de acordo com Embrapa (2014) como esferoidal, sendo numerosos e distribuídos de maneira a deixarem grande quantidade de macro poros entre eles, o que proporciona uma maior permeabilidade à água, mesmo com elevados teores de argila.

Na Figura 3 é apresentada a CRA na profundidade 0,00-0,20 m determinada pelo método do papel filtro e mesa de tensão as quais foram ajustadas no modelo de Van Genuchten (1980). O preparo do solo realizado nesta camada alterou sua estrutura deixando-o pulverizado e com maior índice de vazios o que causou certa dificuldade para obtenção de baixas sucções pela técnica do papel filtro.

Nas medidas de sucção tanto em laboratório como em campo pode-se ter uma série de dificuldades experimentais e comumente deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio com intuito de se conhecer o potencial matricial dentro de uma faixa ampla, que seja suficiente para utilização prática.

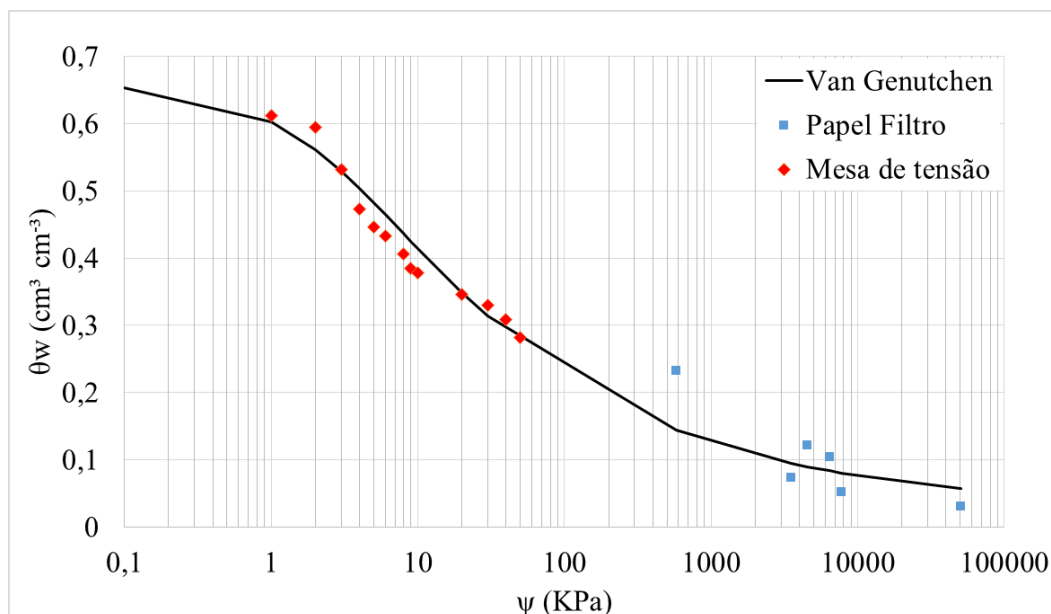


Figura 3 – Curva de retenção de água no solo na profundidade 0,00-0,20 m obtida pela placa de pressão e técnica do papel filtro ajustada pelo método de Van Genuchten

De acordo com Bulut & Leong (2008), o método do papel-filtro é uma técnica simples e confiável para a medição do potencial matricial, desde que seus princípios básicos sejam corretamente compreendidos e um protocolo laboratorial seja cuidadosamente seguido. Apesar da técnica do papel filtro ser de grande confiabilidade, optou-se por utilizar a mesa de tensão na determinação nas sucções (0-50 kPa).

A Figura 4-A e 4-B apresentam as CRAs determinadas pelo método do papel filtro e ajustadas no modelo de Van Genuchten (1980).

Pode-se verificar que as curvas obtidas possuem um comportamento bimodal, diferentemente da CRA de 0,0-0,20 m. De acordo com Severiano et al. (2010), a retenção de água no solo é influenciada principalmente pela textura, estrutura e conteúdo de Carbono orgânico. Rawls et al. (1991) afirmam que a capilaridade é quem governa a retenção de água no solo sob baixos potenciais matriciais, sendo esta influenciada pela distribuição das partículas do solo. Porém, segundo Machado et al. (2008), à medida que o solo seca a granulometria e mineralogia assumem maior importância devido à maior superfície específica para a adsorção das moléculas de água.

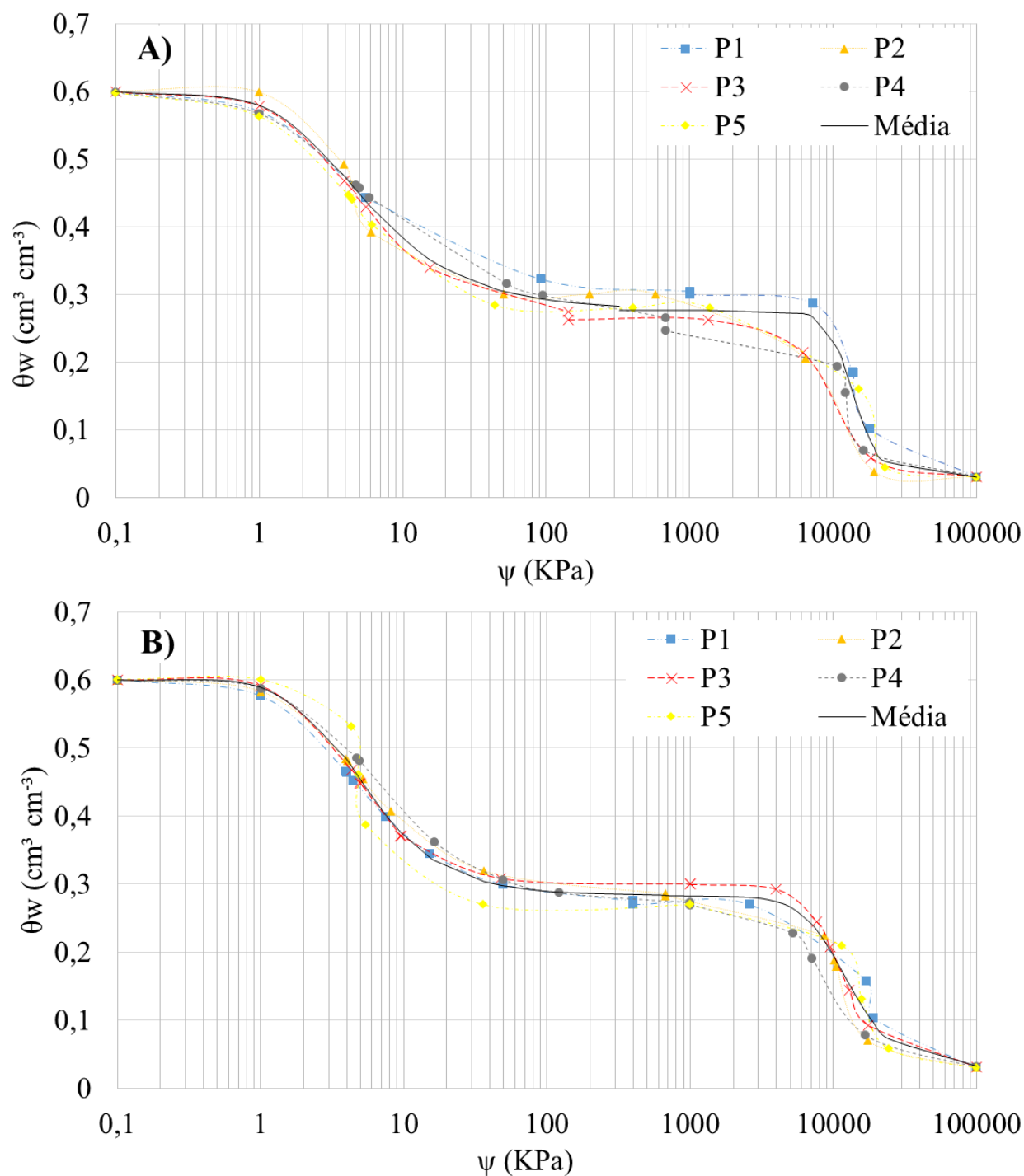


Figura 4 – Curvas de retenção de água no solo nas profundidades A) 0,20-0,40 m e B) 0,40-0,60 m, ajustadas ao modelo duplo de Van Genuchten.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos parâmetros necessários ao modelo de Van Genuchten (1980).

Tabela 3 - Valores médios dos parâmetros de ajustes das curvas 1 e 2 por profundidade pelo modelo de van Genuchten, sendo,  $\theta_{s1}$  a umidade volumétrica de saturação da curva 1,  $\theta_{s2}$  a umidade volumétrica de saturação da curva 2,  $\theta_{r1}$  a umidade volumétrica residual da curva 1,  $\theta_{r2}$  a umidade volumétrica residual da curva 2,  $\theta_i$ ,  $m_i$  e  $n_i$  e os valores  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  obtidos pela curva de retenção.

| Parâmetros   | Profundidades |           |           |
|--------------|---------------|-----------|-----------|
|              | 0,0-0,20 m    | 0,2-0,4 m | 0,4-0,6 m |
| $\theta_r 1$ | 0,03          | 0,27636   | 0,28297   |
| $\theta_s 1$ | 0,66          | 0,60000   | 0,60000   |
| $\alpha 1$   | 0,39          | 0,36543   | 0,28720   |
| $n 1$        | 1,05          | 1,83481   | 2,15993   |
| $m 1$        | 0,3           | 0,45498   | 0,53702   |
| $\theta_r 2$ | -             | 0,03000   | 0,03000   |
| $\theta_s 2$ | -             | 0,27636   | 0,28297   |
| $\alpha 2$   | -             | 0,00008   | 0,00010   |
| $n 2$        | -             | 5,04664   | 3,03627   |
| $m 2$        | -             | 0,80185   | 0,67065   |

Para fins de projetos de irrigação, Carducci et al. (2011), destaca que apesar de ser considerada indisponível às plantas, estudos visando quantificar a água residual retida nos solos tornam-se fundamentais, pois essa pode ser determinante na regulação de processos bioquímicos microbianos no solo, na reindução da tolerância à dessecação de sementes germinadas e plântulas quando submetidas a elevado potencial matricial ( $\psi_m > 1.500$  kPa), além de poder atuar como agente lubrificante entre agregados, quando o solo é submetido a pressões externas durante as operações mecanizadas.

As CRA's de um latossolo estudado por Carducci et al. (2011), também apresentaram comportamento bimodal no intervalo de potencial matricial estudado. Nesse trabalho os pesquisadores abordam que os Latossolos do Cerrado, em função da mineralogia da fração argila e estrutura granular, apresentam elevado volume de poros grandes e de poros extremamente pequenos. A distribuição destes por tamanho é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes distintas: a primeira, relacionada àqueles muito grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo e a segunda, a poros muito pequenos, nos quais a água é retida com energia muito alta, caracterizando-a como água higroscópica (OLIVEIRA et al., 2004).

O comportamento bimodal da curva de retenção de água no solo reflete essas classes de poros, em que o primeiro ponto de inflexão ocorre sob baixos potenciais matriciais (entre 1 e 50 kPa), ao

passo que o segundo ponto ocorre sob potenciais muito altos (entre 8.000 e 20.000 kPa). Portanto, pode-se inferir que a inclinação do primeiro ponto de inflexão das CRA's de 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m estão relacionadas a estrutura e inclinação do segundo ponto de inflexão está relacionado à textura, corroborando com Carducci et al. (2011).

De acordo com Ferreira et al. (1999), em solos tropicais altamente intemperizados, os óxidos de ferro e de alumínio atuam como agentes cimentantes entre as partículas minerais, alterando o arranjo dos seus constituintes. Vollant-Tuduri et al. (2005) e Severiano (2010), salientam que, micromorfologicamente os latossolos apresentam a distribuição dos minerais em relação ao plasma, seguindo o padrão aglutinado, em agregados granulares muito pequenos (diâmetro < 300  $\mu\text{m}$ ), conferindo elevado índice de vazios, por sua vez, organizado em cavidades interconectadas.

A FCH apresentada na Figura 4 é relativa aos dados médios das CRA's nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, os quais foram plotados em função da umidade volumétrica. Os parâmetros utilizados foram obtidos na primeira inflexão da curva ( $\Theta_{s1}$ ,  $\Theta_{r1}$ ,  $\Theta_1$ ,  $m_1$ ,  $n_1$ ) e podem ser consultados na Tabela 3. A pequena diferença existente entre as profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m é explicada perante os diferentes valores de  $K_{\text{sat}}$  determinados e o comportamento das CRAS's nestas profundidades são praticamente iguais, diferentemente da profundidade 0,00-0,20 m.

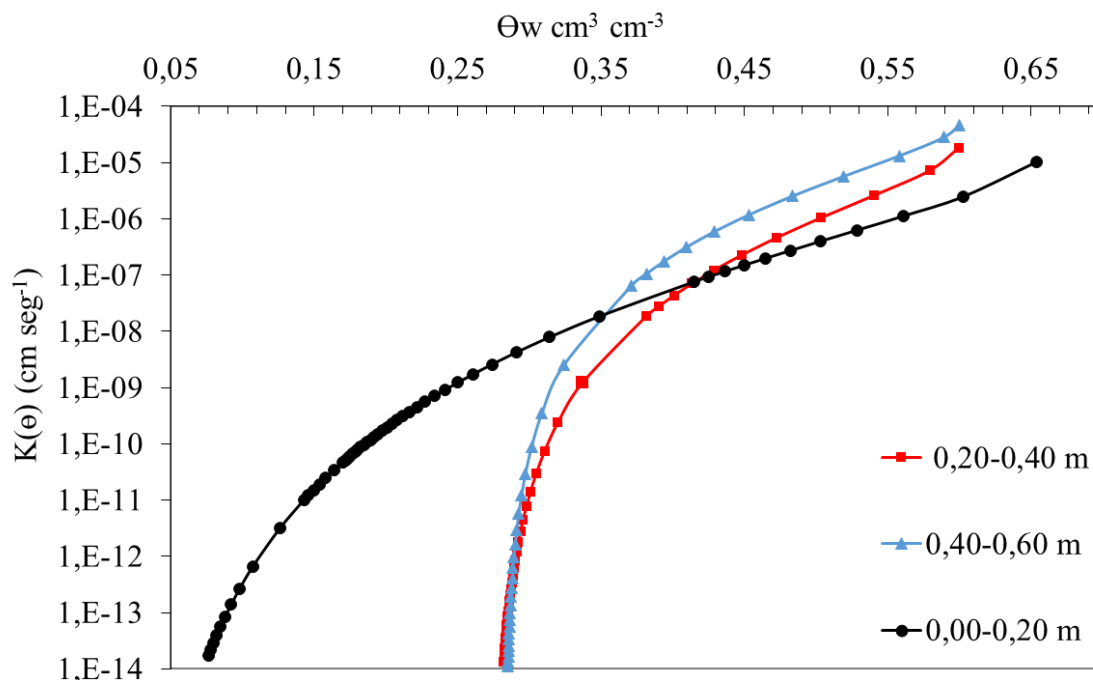


Figura 4 - Função de condutividade hidráulica nas profundidades 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

Como as CRA's das profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m obtidas possuem comportamento bimodal, optou-se por representar a FCH apenas do primeiro trecho na faixa de sucção apresentada

(0-8000 kPa), sendo mais que suficiente para otimização de sistemas de irrigação, pois em geral, a sucção máxima utilizada para determinação da lâmina de água refere-se ao ponto de murcha permanente sendo estes valores próximos a 1500 kPa.

### 3.6 Conclusão

A função de condutividade hidráulica do latossolo estudado, ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem e obtida indiretamente por meio da CRA e  $K_{sat}$  é relativa ao primeiro trecho da curva de retenção de água no solo, referente a sucção de 0-8000 kPa, sendo esta faixa suficiente para elaboração de projetos e manejo da irrigação, além de calibração de tensiômetros e modelagens do fluxo de água no solo.

As CRA's nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m possuem comportamento bimodal devido a macro e microporosidade deste solo e as  $K_{sat}$  não apresentaram variabilidade entre os pontos e profundidades estudadas, mostrando a boa homogeneidade física deste latossolo ao longo do perfil do solo e apresentando resultados condizentes à literatura para essa classe de solo.

### 3.7 Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84. **Solo – Análise Granulométrica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 13 p, 1984.
- ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper**, 2003.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous medium. **Hydrology Paper**, Colorado State University Fort Collins, v. 3. Mar. 1964.
- BULUT, R. & LEONG, E. C. Indirect measurement of suction. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 26, p. 633-644, 2008.
- CAMARGO, D. P.; PIRES, M. V. O. **Confecção da carta de aptidão de fundações de acordo com a proposta metodológica elaborada por Zuquette (1987) para o Campus da UFV – Rio Paranaíba**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, 2015.
- CAMARGO, D. P.; PIRES, M. V. O. **Confecção da carta de aptidão de fundações de acordo com a proposta metodológica elaborada por Zuquette (1987) para o Campus da UFV – Rio Paranaíba**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, 2015.

- CARDUCCI, C. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.35, p. 77-86, 2011.
- CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, v.92, p. 82-89, 1992.
- DEXTER, A. R.; CZY, E. A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v.143, p. 243-253, 2008.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 4 ed. Brasília, 2014.
- FERREIRA, M. M.; FERNADES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n. 3, p. 515-524, 1999.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, John Wiley & Sons, Inc.1993. p. 1 – 6, 1993.
- FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability functions for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n. 4, p. 533 - 546, 1994.
- GARDNER, W. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p. 228-232, 1958.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L.; BRAS, R. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1174-1184, 2013.
- MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J. & SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os Coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.495- 502, 2008.
- MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. 2005. Monografia (Concurso de Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.
- McCARTNEY, J. S. **Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter**. 2007. 388 f. Ph.D. Dissertation, University Texas.
- NETTO, A. A.; FERNANDES, E. J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n. 8, p. 797-802, 2005.

- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 327-336, 2004.
- RAWLS, W. J.; GISH, T. J. & BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advences in Soil Science**, v. 16, p. 213-234, 1991.
- SEVERIANO, E. C. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. Análise do método do permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada. **Águas Subterrâneas**, v.23, p. 137-152, 2009.
- SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p. 18-23, 2003.
- VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annals of Geophysics**, v.3, p. 615–628, 1985.
- VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L.C.; OLIVEIRA, M.I.L.; MARTINS, E. S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v.69, p. 1559- 1564, 2005.

## 4. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE VADOSE/W PARA MODELAGEM DO FLUXO DE ÁGUA DE UM SOLO IRRIGADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

### 4.1 Resumo

Modelos numéricos podem ser uma alternativa precisa e importante para simular e reproduzir cenários atuais e futuros da interação solo-água-planta-atmosfera. Assim, este trabalho teve como objetivo simular a dinâmica da água no solo de uma área cultivada por pastagem e irrigada por gotejamento subsuperficial para as condições climáticas características da região do Alto Paranaíba – MG, comparando os resultados simulados por meio do software VADOSE/W com os obtidos em campo. O monitoramento em campo do teor de água foi realizado pelo método gravimétrico mediante coletas aleatórias de amostras de solo na parcela irrigada equivalente a lâmina de 100% da ET<sub>0</sub>, em três profundidades (0,00-0,10; 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m) e a duas distâncias das fitas gotejadoras (0,25 e 0,50 m) com três repetições, sempre no mesmo horário antes da irrigação. A modelagem do movimento de água no solo, apresentou alguns resultados divergentes ao longo do período de avaliação, sendo os valores mais discrepantes na camada mais próxima à superfície. Porém, em geral, ela foi satisfatória em prever o teor de água de um solo vegetado por *B. brizantha* cv. Marandu e irrigado por gotejamento subsuperficial. A obtenção de parâmetros exigidos nos modelos numéricos é essencial para que os resultados gerados pela mesma possam se assemelhar da melhor maneira possível com os dados de campo.

**Palavras-chave:** movimento de água no solo, solos não saturados, modelo numérico.

### 4.2 Abstract

Numerical models can be an accurate and important alternative to simulate and reproduce current and future scenarios of soil-water-plant-atmosphere interaction. The objective of this work was to simulate soil water dynamics in an area planted by pasture irrigated by subsurface drip irrigation for the climatic conditions characteristic of the Alto Paranaíba - MG region, comparing the simulated results with those obtained in the field through the software VADOSE/W. Field monitoring of the water content was performed by the gravimetric method through random sampling of soil samples in the irrigated plot equivalent to the 100% ET<sub>0</sub> slide, at three depths (0,00-0,10, 0,10-0,30 and 0,30-0,50 m) and at two distances from the drip tapes (0,25 and 0,50 m) with three replicates, always at the same time before irrigation. The modeling of the movement of water in the soil, presented some divergent results throughout the evaluation period, being the most discrepant values in the layer closest to the surface. However, in general, it was satisfactory to predict the water content of a vegetated soil by *B. brizantha* cv. Marandu and irrigated by subsurface drip irrigation. Obtaining

the required parameters in the numerical models is essential so that the results generated by the same can best match the field data.

**Keywords:** movement of soil water, unsaturated soil, numerical models.

### 4.3 Introdução

Um dos grandes desafios do setor agrícola nos dias atuais é aliar o aumento da produtividade com a racionalização do uso dos recursos hídricos. Conforme dados apresentados pela Agência Nacional das Águas - ANA (2015), nos últimos anos, o incremento da irrigação em todas as regiões hidrográficas do Brasil foi maior que o incremento da área total plantada, indicando uma maior adesão à essa técnica por parte dos produtores. Estimativas apontam que a demanda hídrica em 2050 será 55% maior que a atual na utilização deste recurso (WWAP, 2015), o que mostra a necessidade de pesquisas que busquem otimizar os sistemas de irrigação bem como técnicas de manejo para evitar sua escassez e conflitos pelo seu uso.

Neste sentido, a irrigação localizada, apresenta-se como grande alternativa, simbolizando significativa evolução no processo da aplicação de água às culturas (MOSCA, TESTEZLAF & GOMES, 2005) e potencial de economia de água (AYARS et al., 2015).

Modelos numéricos podem ser uma alternativa precisa e importante para simular e reproduzir cenários atuais e futuros da interação solo-água-plantas-atmosfera. Uma vantagem é que os resultados são obtidos rapidamente, já que o desenvolvimento computacional disponível atualmente tem facilitado consideravelmente seu uso (SIMUNEK & BRADFORD, 2009). Por outro lado, as modelagens podem apresentar algumas limitações, já que os resultados são dependentes dos parâmetros de entrada e de algumas condições de contorno que por vezes podem não ser situações reais que ocorrem em campo e pela dificuldade de obtenção dos mesmos, sendo essenciais em alguns softwares. Por isso, sempre que possível, deve-se efetuar a comparação entre dados medidos e simulados como forma de avaliação e validação da mesma (LIMA et al., 2001).

Nas últimas décadas, muitos modelos têm sido desenvolvidos para quantificar o movimento da água em solos não saturados, baseados em equações que governam seu movimento. O VADOSE/W é um software que foi elaborado para soluções de diversos problemas hidrológicos que realiza simulações em modelos uni e bidimensionais por meio de elementos finitos para análise de fluxo de água em meios porosos (regime transiente e permanente) e o balanço hídrico de um sistema para resolver a Equação de Richards (1931). Ele utiliza equações que estudam o fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera utilizando o método de Penman (1948) modificado por Wilson (1990), ou método de Penman-Wilson, o qual estima a evaporação real, a partir da pressão de vapor na superfície do solo acoplada com os processos de transferência de massa

e calor (WILSON et al., 1993). Contudo, seu desempenho ainda precisa ser avaliado em condições específicas de campo e de laboratório.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo comparar a dinâmica da água no solo de uma área cultivada por pastagem irrigada por gotejamento subsuperficial para as condições climáticas características da região do Alto Paranaíba – MG, comparando os resultados simulados com os obtidos em campo.

#### 4.4 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido em área experimental de 1.000 m<sup>2</sup> do *Campus I* (CRP) da Universidade Federal de Viçosa em Rio Paranaíba, MG, nas coordenadas 19° 12' 34" S e 46° 07' 53" W, com altitude média de 1.100 m. O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, com estações de inverno e verão bem definidas, chuvas no verão e temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22°C. O solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado, relevo plano (EMBRAPA, 2006).

Primeiramente o solo da área foi revolvido na profundidade 0,20 m por meio de duas aragens seguidas por duas gradagens. Posteriormente implantou-se o sistema de irrigação, sendo este por gotejamento subsuperficial autocompensante, modelo Top Drip. Na área havia duas linhas de derivação para distribuição de água em quatro parcelas os quais conectavam-se as fitas gotejadoras. No início das linhas de derivação foram instalados cinco registros para controle das lâminas de água. As fitas gotejadoras foram espaçadas entre si a uma distância de 1,0 m, sendo enterradas a 0,20 m de profundidade. A distância entre gotejadores foi de 0,30 m, com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup>, formando uma faixa molhada contínua (Figura 1).

A pressão do sistema foi monitorada por meio de manômetro, o qual variou de 14 a 30 m.c.a. O sistema de irrigação apresentou coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD) na faixa de pressão utilizada em cerca de 93 e 90%, respectivamente.

No local foi semeado à lanço a *B. brizantha* cv. Marandu, na quantidade de 15 Kg ha<sup>-1</sup>, a qual foi irrigada em função de frações da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), correspondentes a (1, 50, 75, 100 e 125% da ET<sub>0</sub>), aplicadas na frequência de três vezes por semana na ausência de chuva, sendo a área total irrigada de 231 m<sup>2</sup> e cada unidade experimental correspondente a 15,12 m<sup>2</sup> (Figura 1).

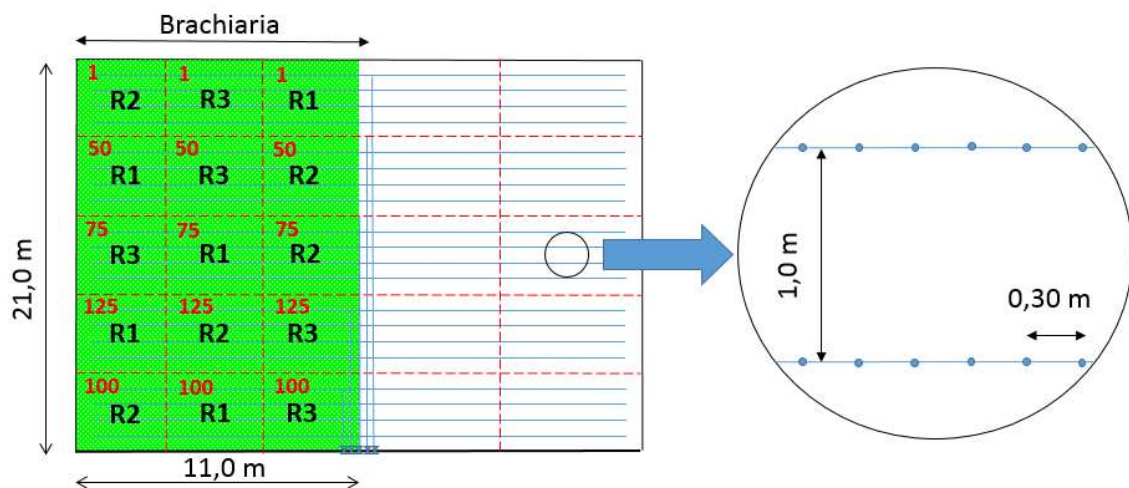


Figura 1 - Esquema do delineamento da forrageira e das lâminas de irrigação.

Geralmente o cálculo do volume de água a ser aplicado nos sistemas de irrigação localizada é realizado como sendo o volume aplicado por planta. Entretanto, a semeadura da espécie *B. brizantha* é realizada à lanço, sendo importante salientar que neste estudo o volume de água aplicado foi calculado como mm de água por  $\text{m}^2$  de planta.

O manejo da irrigação foi realizado mediante coleta diária da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) estimada pelo método de Penman-Monteith - FAO 56 (ALLEN et al., 1998), coletados na estação meteorológica próxima à área irrigada.

Após o preparo do solo e instalação do sistema de irrigação, foram coletadas amostras de solo em cinco pontos aleatórios da área para caracterização de alguns atributos físicos e obtenção dos parâmetros necessários à modelagem.

A análise numérica foi realizada com modelos unidimensionais do movimento de água no solo, com auxílio do programa VADOSE/W do pacote GEOSTUDIO (2007), desenvolvidos pela GEO-SLOPE International Ltd. Este programa abrange equações de fluxo de ar, água, vapor de água e calor no solo e sua interação com a atmosfera, bem como condições iniciais e de contorno por meio de equações semelhantes à formulação simplificada proposta por Wilson (1990). Para a solução numérica, o programa VADOSE/W utilizou o método dos elementos finitos, fazendo a discretização espacial e o método das diferenças finitas implícito com integração no tempo. Para realização da modelagem foi necessário obter parâmetros climáticos, vegetais, do solo e térmicos.

Inicialmente foi admitido que a linha freática é tão profunda que a mesma não possui influência no presente estudo. Os parâmetros climáticos, evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), precipitação pluviométrica, temperatura máxima, mínima e média, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram obtidos diariamente, por meio de uma estação meteorológica localizada a 50 m da área experimental, impostos como condições de contorno no topo da cobertura. Os dados

foram medidos de 15/09/17 a 13/11/17. Nas Figuras 2 a 4 são apresentados os parâmetros climáticos utilizados no modelo.

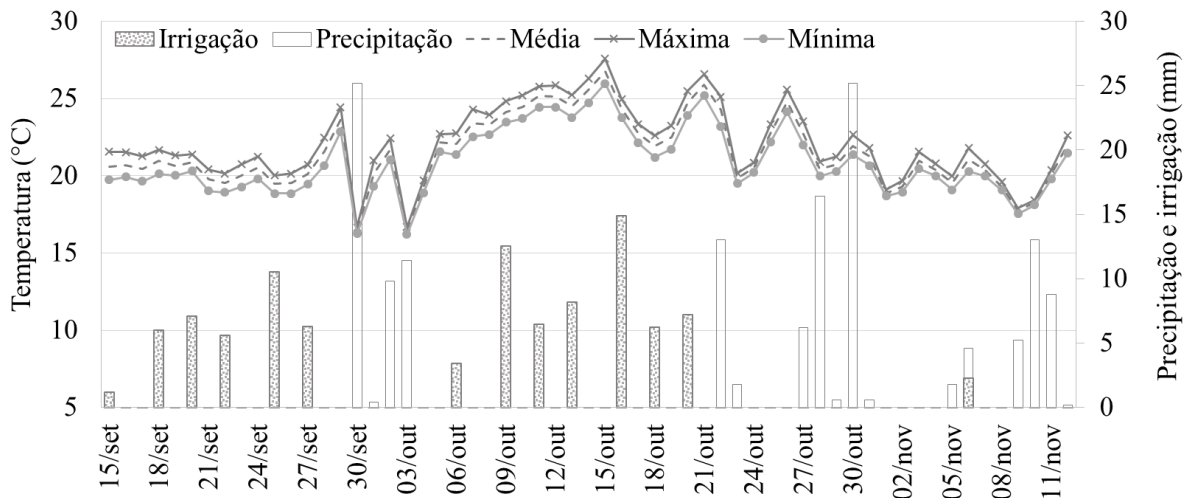


Figura 2 – Precipitação, irrigação e temperaturas máxima, média e mínimas do período de avaliação.

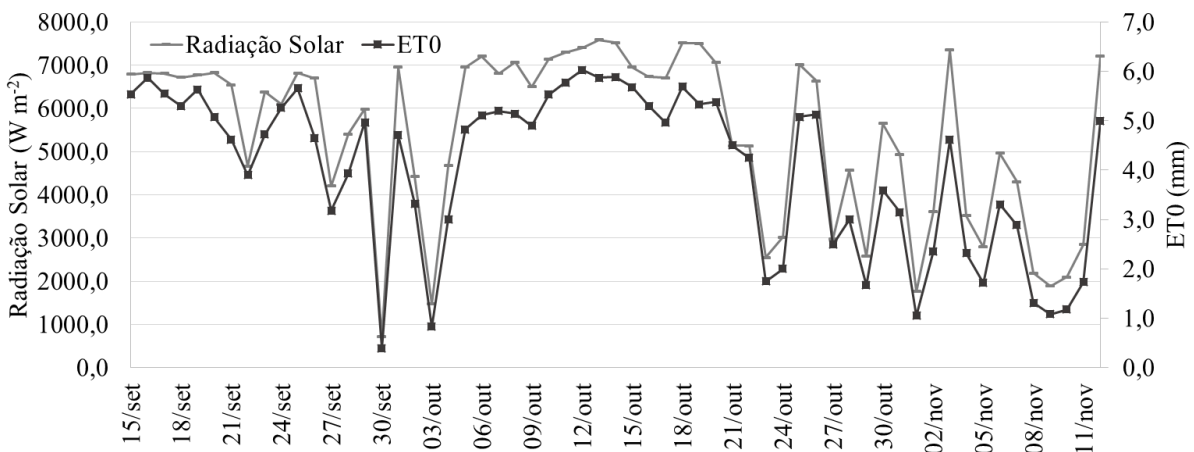


Figura 3 – Saldo de radiação solar e evapotranspiração de referência (ET0).

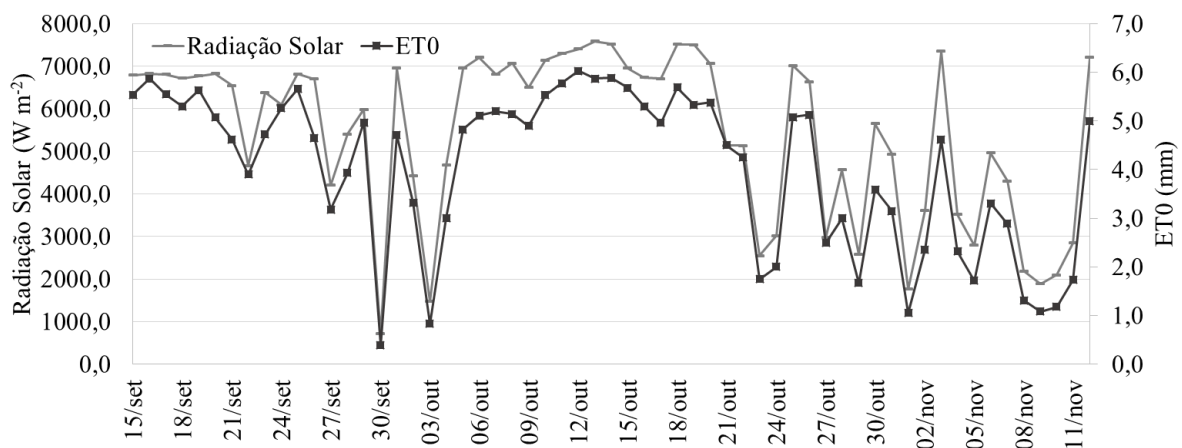


Figura 4 – Umidade relativa do ar média (UR) e velocidade do vento.

Os parâmetros que envolvem o solo foram determinados em campo e laboratório nos cinco pontos nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, sendo eles a granulometria, porosidade ( $e$ ), peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ), limites de liquidez (LL), plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), curva de retenção de água no solo (CRA), e condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_{sat}$ ) e função de condutividade hidráulica (FCH).

A granulometria conjunta, massa específica dos sólidos, LL, LP e IP foram determinadas segundo as normas ABNT NBR-7181/84, ABNT NBR-6508/84, ABNT NBR-6459/84 e ABNT NBR-7180/84, respectivamente, apresentados na Tabela 1. O LL, LP e IP foram determinados utilizando-se uma amostra composta dos cinco pontos.

Tabela 1 – Médias por pontos dos parâmetros de solo, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ), granulometria e porosidade ( $e$ ).

| Pontos | Limites de Atterberg (%) |    |    | $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Granulometria (g kg <sup>-1</sup> ) |       |       | $e$ (%) |
|--------|--------------------------|----|----|---------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|---------|
|        | LL                       | LP | IP |                                 | Argila                              | Silte | Areia |         |
| 1      |                          |    |    | 28,1                            | 700                                 | 120   | 180   | 59,0    |
| 2      |                          |    |    | 26,7                            | 700                                 | 120   | 180   | 62,0    |
| 3      | 44                       | 35 | 9  | 27,1                            | 700                                 | 120   | 180   | 62,0    |
| 4      |                          |    |    | 28,1                            | 700                                 | 120   | 180   | 60,0    |
| 5      |                          |    |    | 25,9                            | 700                                 | 120   | 180   | 58,0    |

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), determinada em campo por meio do permeâmetro de Guelph, pelo método de uma e duas cargas. Os valores de  $K_{sat}$  médios, utilizados como parâmetros de entrada do modelo, estão apresentados na Tabela 2. A FCH, determinada indiretamente por meio dos dados de  $K_{sat}$  e parâmetros de ajuste das CRA's, estão apresentadas na Figura 5.

Tabela 2 – Condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) obtida em campo nos cinco pontos nas profundidades 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

| Profundidade | 1 Carga - $K_{sat}$      | 2 Cargas - $K_{sat}$  | Média $K_{sat}$       |
|--------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
|              | ----- $cm\ s^{-1}$ ----- |                       |                       |
| 0,00 – 0,20  | $3,17 \times 10^{-3}$    | $1,84 \times 10^{-3}$ | $2,50 \times 10^{-3}$ |
| 0,20 – 0,40  | $3,08 \times 10^{-3}$    | $1,11 \times 10^{-3}$ | $2,10 \times 10^{-3}$ |
| 0,40 – 0,60  | $4,32 \times 10^{-3}$    | $5,27 \times 10^{-3}$ | $4,79 \times 10^{-3}$ |

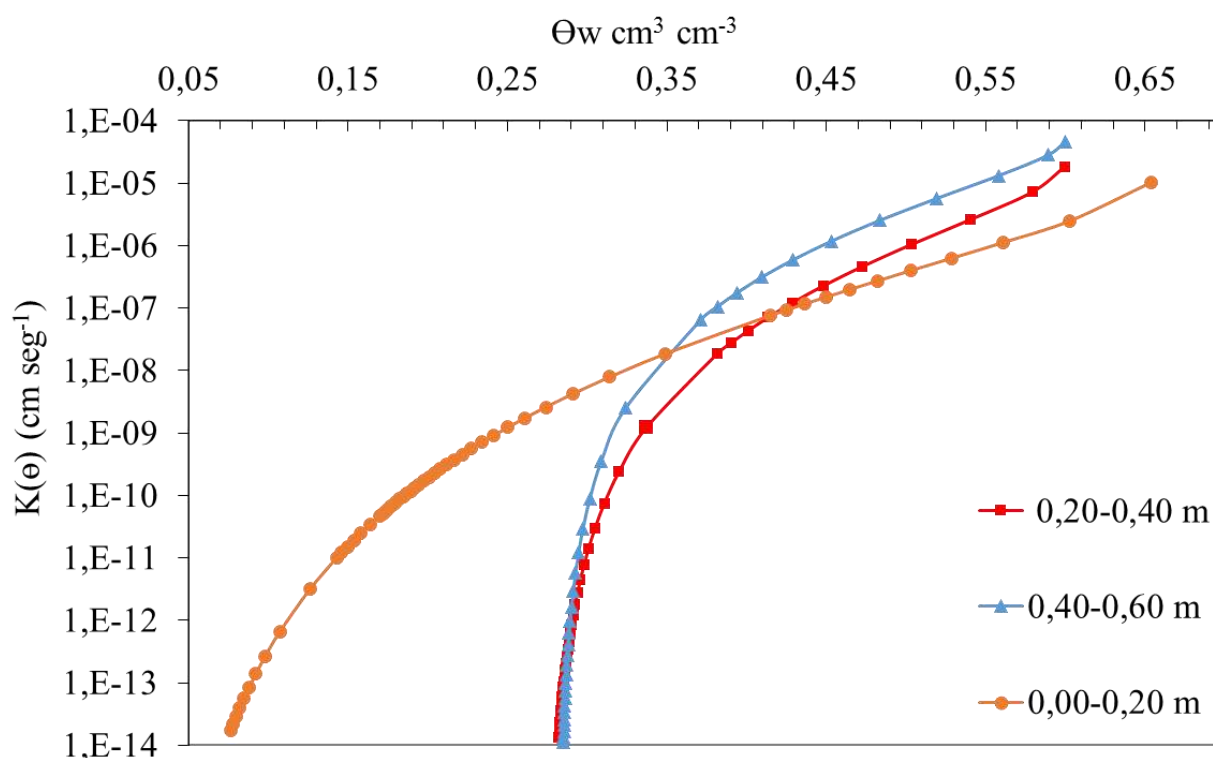


Figura 5 – Função de condutividade hidráulica (FCH) dado pela umidade volumétrica  $\Theta_w$  ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e condutividade hidráulica  $K(\Theta)$ , nas profundidades 0,0-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

As curvas de retenção de água no solo (CRA's) de cada ponto e profundidades, apresentadas na Figura 6 e ajustadas ao modelo de van Genuchten-Mualen, foram determinadas pela técnica do papel filtro, ensaio padronizado pela ASTM D-5298 (*Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*). Devido à frágil estrutura do solo na profundidade 0,0-0,20 m, optou-se por determinar os pontos de sucção de 0-50 kPa por meio de mesa de tensão, sendo as demais sucções obtidas pela técnica do papel filtro.

O VADESE/W requer a especificação da relação entre a condutividade térmica e a umidade volumétrica do solo e ainda a relação entre o calor específico dos minerais dos solos e a umidade volumétrica. A função de condutividade térmica de um solo, baseada em Nixon (1975), pode ser definida como a quantidade de calor que flui através de uma unidade de área de solo em uma unidade de tempo, sob uma unidade de gradiente. Neste trabalho, ela foi estimada constante e igual a  $280 \text{ kJ (dia m } ^\circ\text{C)}^{-1}$ , como recomendado pelo manual do VADOSE/W. Já o calor específico volumétrico do solo, baseado em Vries (1963), pode ser definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do material em uma unidade de grau expressa em unidade de volume, sendo também estimado como uma constante e igual a  $2750 \text{ kJ (m}^3 \text{ } ^\circ\text{C)}^{-1}$ , como recomendado pelo manual do VADOSE/W.

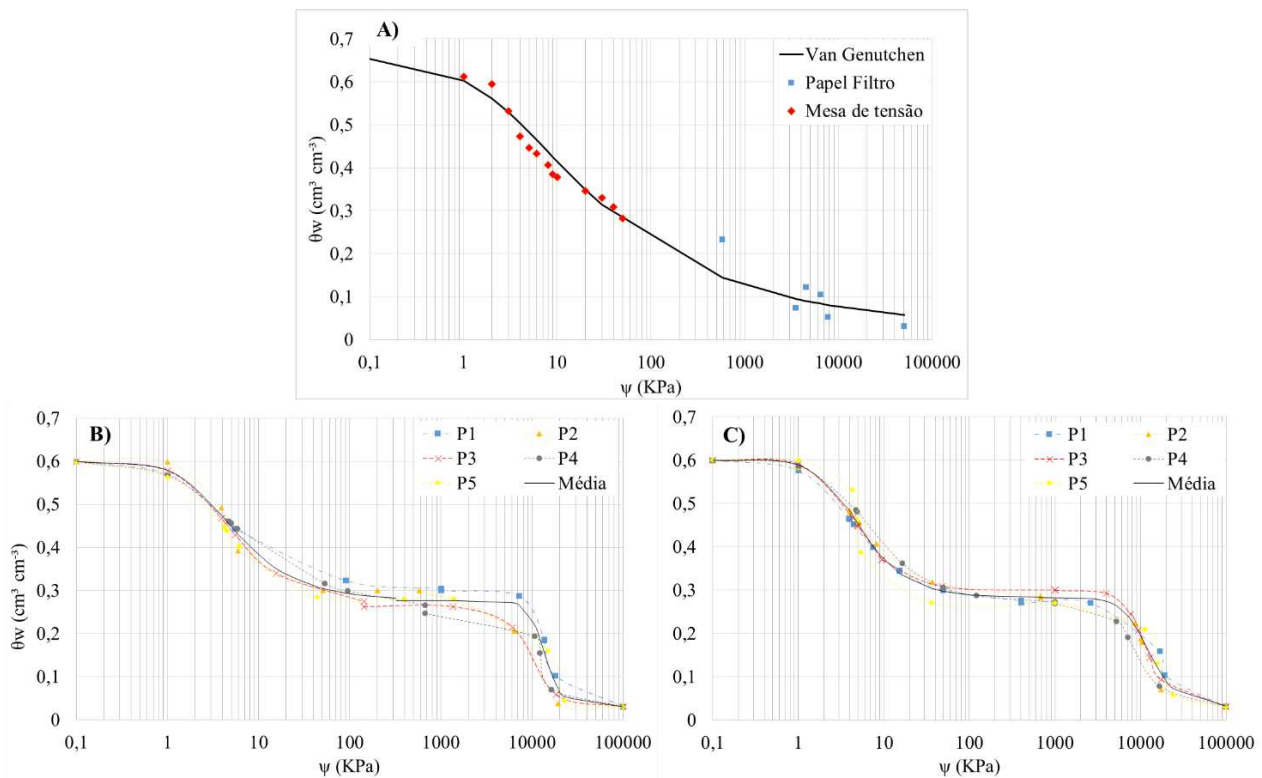


Figura 6 – Curvas de retenção de água no solo (CRA's) nas profundidades A) 0,00-0,20 m B) 0,20-0,40 m e C) 0,40-0,60 m.

A cobertura vegetal foi constituída pela pastagem *B. brizantha* cv. Marandu. O programa exige alguns parâmetros de entrada como, índice de área foliar (IAF), profundidade das raízes e as tensões referentes a capacidade de campo e o ponto de murcha do solo. O IAF foi estimado baseando-se nos resultados do trabalho de Sbrissia et al. (2008). A profundidade média das raízes para a *B. brizantha* cv. Marandu foi igual a 0,46 m, determinado por Cunha et al., (2010). A umidade volumétrica referente a capacidade de campo do solo, sucção correspondente a 6 kPa, nas profundidades 0,0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m foram iguais a 0,43, 0,42 e 0,40  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  respectivamente os valores de umidade volumétrica referentes ao ponto de murcha permanente (PMP) sucção na qual a planta é incapaz de retirar água do solo, estipulada em 1500 kPa, correspondem a 0,12, 0,15 e 0,13  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , valores estes retirados das CRA's nas respectivas profundidades.

Para monitorar o teor de água no perfil foram coletadas aleatoriamente na parcela equivalente a lâmina de 100% da ET0 amostras de solo para determinação da umidade pelo método gravimétrico, sempre no mesmo horário antes da irrigação. Todas as coletas foram realizadas manualmente por meio de trado holandês em 3 três profundidades (0,00-0,10, 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m) em duas distâncias das fitas gotejadoras (0,25 e 0,50 m) e com três repetições, sendo o início e fim das coletas no dia 15/09/17 e 10/11/17, respectivamente.

## 4.5 Resultados e Discussão

A Figura 7 representa a variação do teor de água amostrado pelo método gravimétrico no perfil do solo ao longo da avaliação experimental. A umidade do solo, um dos indicadores de manejo de irrigação, têm sido uma das estratégias mais utilizadas para definição do momento de irrigar, pois além de apontar o momento da irrigação também informa a quantidade de água a ser aplicada por irrigação (MAROUELLI et al., 2011). Sua determinação pode ser feita por vários métodos e equipamentos, sendo o método gravimétrico referência para comparação e calibração de todos os outros métodos indiretos. Porém sua desvantagem é que o fornecimento do resultado é obtido somente após 24 horas após sua amostragem (MAROUELLI et al., 2011) além do oneroso trabalho de coletas constantes no campo.

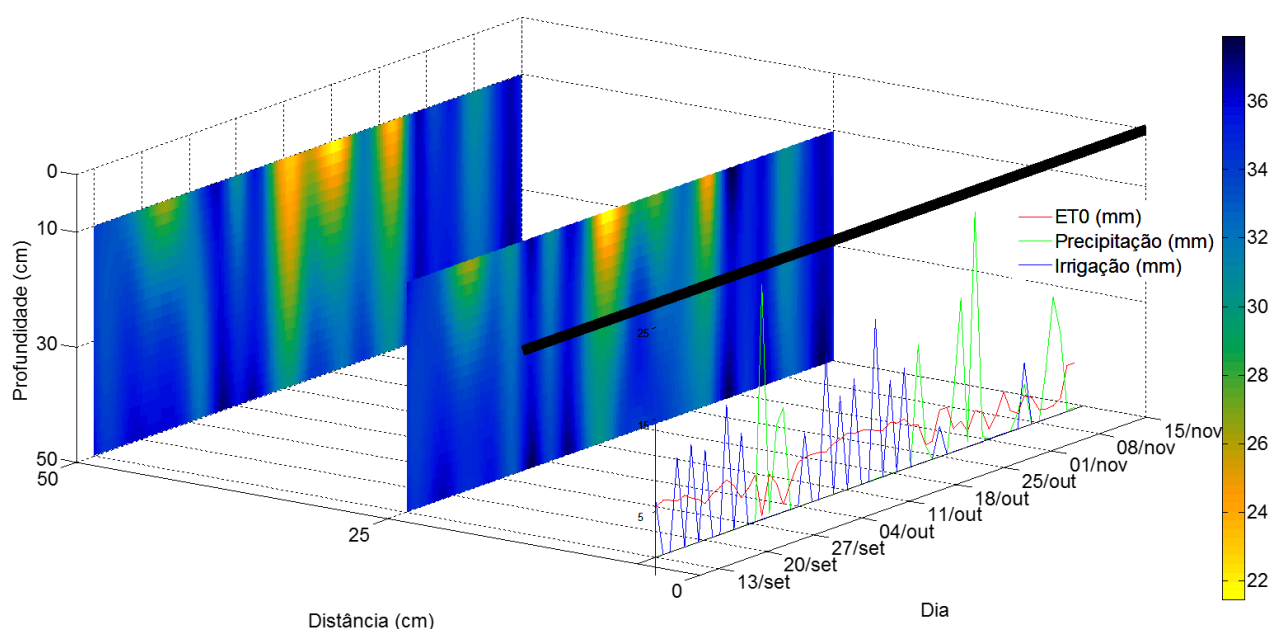


Figura 7 – Variação da umidade do solo nas profundidades 10, 30 e 50 cm coletados à 25 e 50 cm da fita gotejadora ao longo do período experimental.

Pode-se verificar uma maior variação do teor de água nas camadas mais próximas à superfície (10 cm) e mais distantes da fita gotejadora (50 cm), em dias como maior ET0 e principalmente quando a fonte hídrica era apenas a irrigação. Não foram encontrados trabalhos na literatura quanto ao espaçamento de fitas gotejadoras para pastagem semeadas à lanço e cujo cálculo da lâmina tenha sido realizado como mm de água por m<sup>2</sup>. Observa-se por meio das Tabelas 1 e 2 que este solo, apesar de ser muito argiloso, possui como propriedades grande porosidade e permeabilidade, podendo-se inferir que a distância de 1,0 m entre fitas tenha sido grande o suficiente para impedir que a umidade fosse uniformemente distribuída por pelo fluxo capilar nas camadas mais próximas à superfície e mais distantes da fita, o que pode ter gerado menor suprimento de água para as plantas mais distantes da

mesma. Porém, mesmo os menores valores de umidade registrados não chegaram a ser próximos ao ponto de murcha permanente (PMP), o que reflete a boa capacidade deste solo em reter água.

Por outro lado, as CRA's deste solo nas profundidades 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, observadas nas Figura 6 B e C apresentam comportamento bimodal, a qual possui grande amplitude na variação de sucção e baixa variação do teor de água entre 10,0 kPa e 8000,0 kPa. Isto significa que este solo possui boa capacidade de retenção de água. De acordo com Carducci et al. (2011), a inclinação do primeiro ponto de inflexão da CRA está relacionada a estrutura do solo e a inclinação do segundo ponto de inflexão está relacionado à textura. Por isso, nestas profundidades, não foram verificadas grandes reduções da umidade, diferentemente da profundidade 0,0-0,20 m. Nesta camada a estrutura do solo foi alterada devido o preparo do solo, deixando-o mais susceptível às perdas de água tanto por evaporação quanto por drenagem interna.

Na Figura 8 é apresentado os teores de água determinados pelo método gravimétrico à 0,25 e 0,50 m de distância da fita gotejadora e gerados pela modelagem na profundidade de 0,10 m. Para esta profundidade pode-se observar uma grande variação dos dados obtidos em campo em relação aos resultados do modelo. Do dia 15/09/17 até o dia 29/09/17 verifica-se que o modelo subestimou os teores de água determinados em campo. Após a primeira chuva (30/09/17), a situação se inverteu, observando-se maiores teores de água gerados pelo modelo em relação aos dados de campo. Porém, em determinados momentos ao longo do período de avaliação, pode-se observar uma mesma tendência quanto à variação dos valores de umidade.

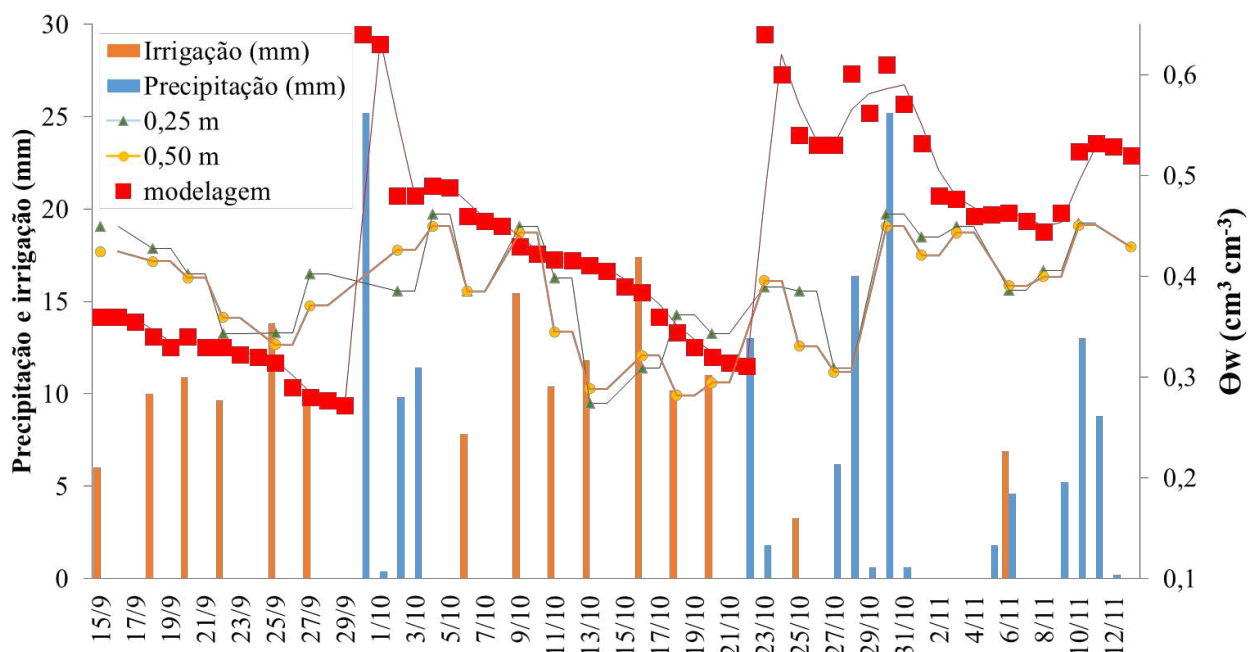


Figura 8 – Umidade do solo à 0,25 e 0,50 m da fita gotejadora determinados pelo método gravimétrico e pela modelagem na profundidade 0,10 m.

A diferença de umidade entre os dados determinados em campo e os gerados pela modelagem podem ser explicados por alguns fatores, como, por exemplo, os parâmetros de entrada exigidos pelo modelo. Alguns destes parâmetros, como IAF, profundidade e distribuição da zona radicular, foram obtidos em literatura, podendo ter proporcionado estas divergências. O sucesso na aplicação de modelos depende, em larga escala, da habilidade em quantificar os parâmetros necessários para simular os diversos processos que ocorrem no sistema solo-água-plantas-atmosfera. Oliveira & Augusto Filho (2006), abordam em seu trabalho sobre a importância da obtenção de parâmetros de entrada em modelagens, salientando que os mesmos precisam estar corretos para oferecer uma base consistente dos resultados gerados, para que dessa forma apresentem uma boa aproximação da realidade.

Um outro motivo das irregularidades dos resultados pode ser explicado pelo momento da coleta de solo. Esta era realizada sempre pela manhã antes das irrigações, porém o modelo estima as umidades diárias e não no momento exato da coleta. Portanto, o teor de água do solo da modelagem já leva em consideração a irrigação e a precipitação que eventualmente ocorreram posteriormente à coleta de solo, o que afeta significativamente os resultados.

Nas Figura 9 e 10 apresentam os teores de água determinado pelo método gravimétrico à 0,25 e 0,50 m de distância da fita gotejadora e gerados pela modelagem para as profundidades 0,30 e 0,50 m respectivamente.

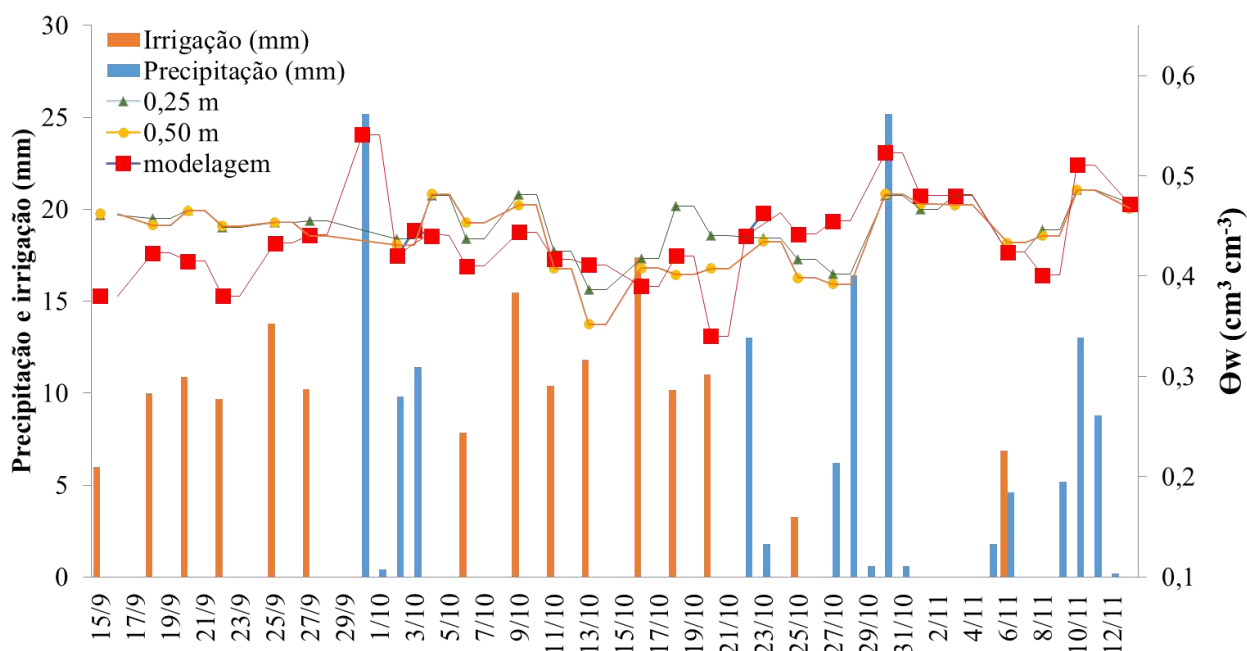


Figura 9 – Umidade do solo à 0,25 e 0,50 m da fita gotejadora determinados pelo método gravimétrico e pela modelagem na profundidade 0,30 m.

Nestas profundidades observa-se menor variação das umidades, podendo-se verificar um mesmo padrão no comportamento da variação dos resultados obtidos em campo e gerados pela modelagem, ao longo dos dias de avaliação. Feltrin et al. (2014) realizaram uma simulação da dinâmica da água no solo com auxílio do software HYDRUS-1D para a região Sul do Brasil e verificaram que a comparação gráfica entre os dados observados e os dados simulados mostraram uma mesma tendência de variação do armazenamento e conteúdo de água no solo para todas as profundidades consideradas.

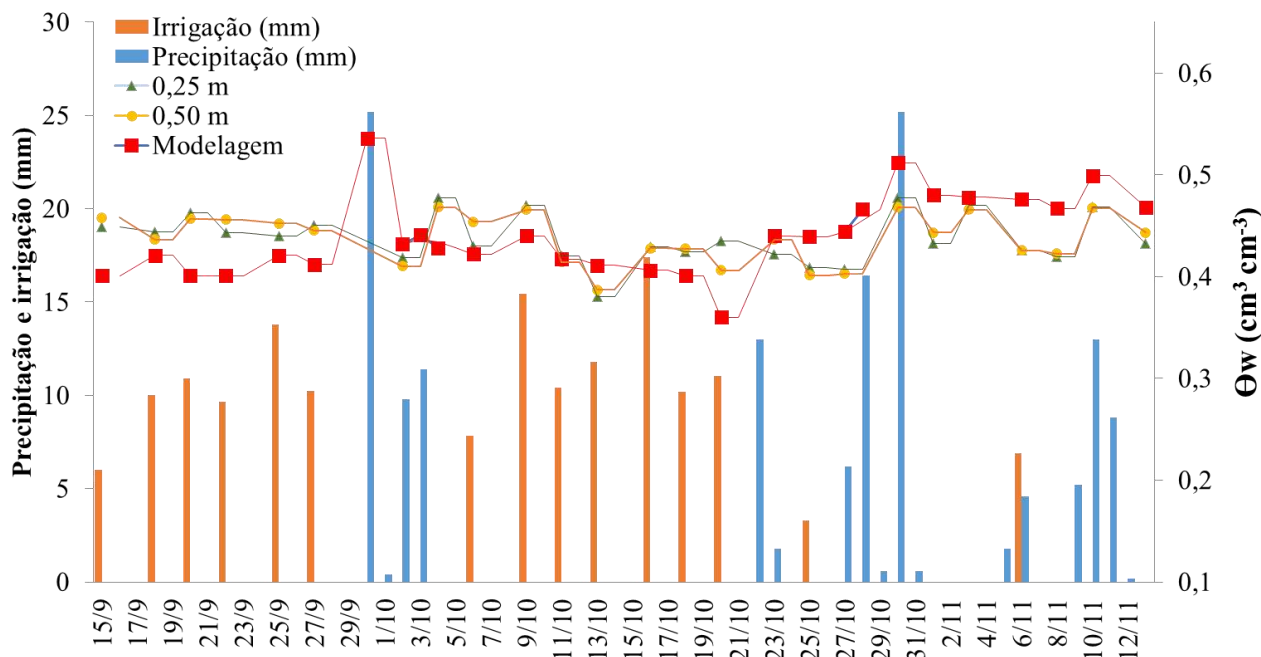


Figura 10– Umidade do solo à 0,25 e 0,50 m da fita gotejadora determinados pelo método gravimétrico e pela modelagem na profundidade 0,50 m.

A Figura 11 apresenta os resultados da variação do teor de água ao longo do perfil do solo, obtidos em campo e gerados pela modelagem para alguns dias aleatórios do período de avaliação. Em geral, as diferenças entre a umidade simulada com a obtida em campo, ao longo da profundidade, foi pequena, principalmente nas profundidades de 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m. Nestas profundidades, uma pequena alteração no teor de água não é capaz de alterar significativamente a sucção, devido à elevada energia pela qual as moléculas de água estão retidas no solo, como pode ser observado nas CRA's das Figuras 6-B e C. De acordo com Severiano et al. (2010), a retenção de água no solo é influenciada principalmente pela textura, estrutura e conteúdo de carbono orgânico. Além disso, Latossolos, em geral, são solos de porosidade elevada, especialmente poros inter-agregados (COOPER & VIDAL-TORRADO, 2005), e apresentam elevada permeabilidade e melhor capacidade de retenção de água profunda. Assim, uma grande quantidade de água pode permanecer presa nestes solos quando submetida a alto potencial matricial, especialmente em solos argilosos (SEVERIANO et al., 2011).

Por outro lado, na profundidade 0,0-0,10 m este fato não pode ser observado, pois pequenas variações na sucção alteram consideravelmente a umidade do solo (Figura 6 A), já que esta camada de solo sofreu alterações físicas mediante ação de equipamentos agrícolas.

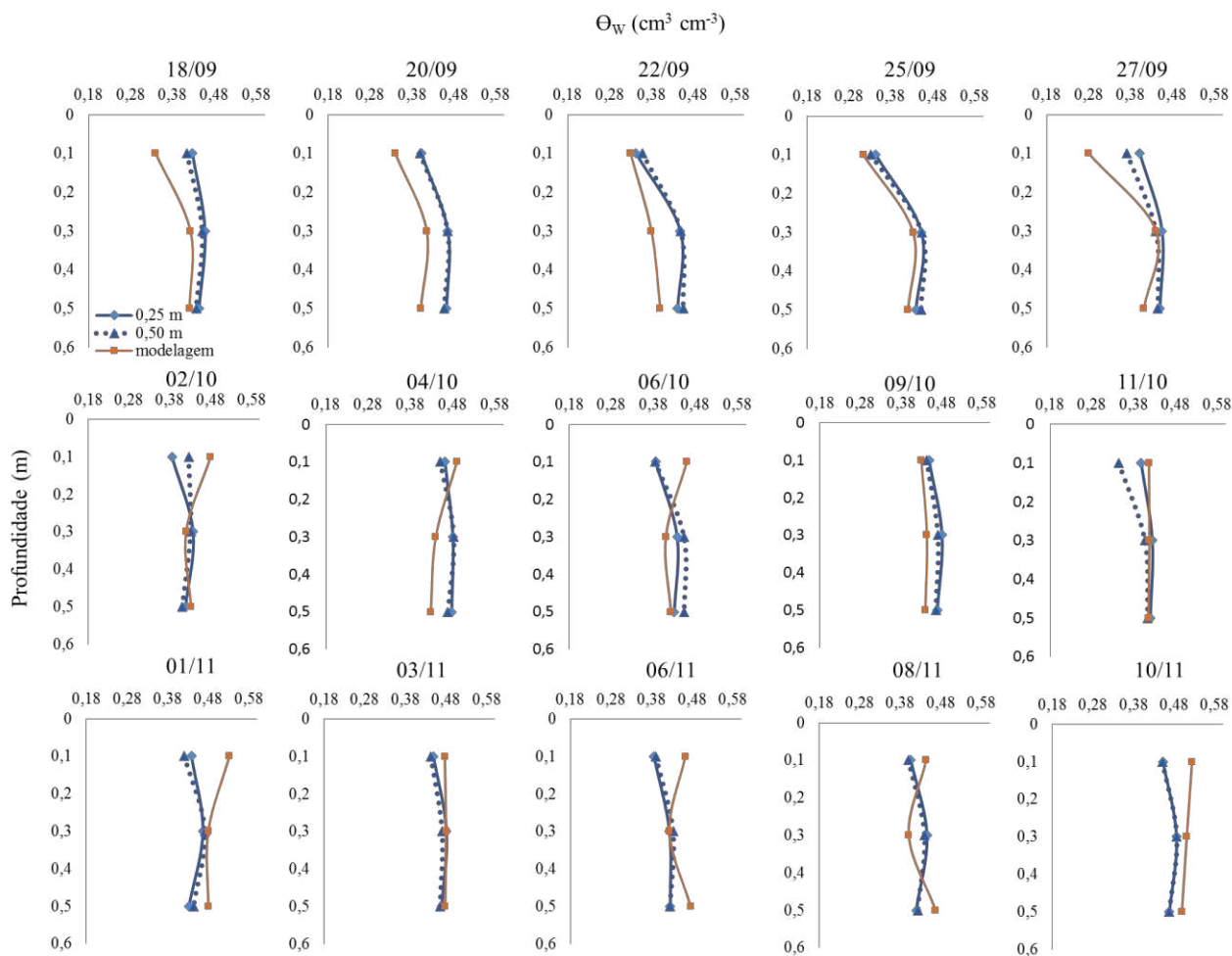


Figura 11 – Umidade de alguns dias selecionados, obtidas pelo método gravimétrico à 0,25 e 0,5 m e geradas pela modelagem nas profundidades 0,10, 0,30 e 0,50 m.

A média dos valores de umidade nas distâncias 0,25 e 0,50 m obtidas em campo e gerados pelo modelo podem ser observados na Tabela 3. A média do teor de água do período de avaliação nas profundidades 0,0-0,10, 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m obtidas em campo foram respectivamente iguais a 0,39, 0,44 e 0,44  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  e a média gerada pelo modelo foram iguais a 0,44, 0,43 e 0,43  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , respectivamente, podendo-se observar que a maior divergência de resultados ocorreu na camada mais próxima à superfície. Estes resultados mostram a importância da correta obtenção dos parâmetros impostos como condições de contorno na superfície do solo. Porém, embora alguns resultados tenham sido diferentes em determinados dias, pode-se afirmar que a modelagem realizada foi satisfatória quanto à estimativa do teor de água do solo em estudo.

Tabela 3 – Média dos valores de umidade obtidos em campo nas distâncias 0,25 e 0,50 m obtidas pelo método gravimétrico e geradas pela modelagem nas profundidades 0,10, 0,30 e 0,50 ao longo do período de observação.

|        | ----- 0,10 m ----- |           | ----- 0,30 m ----- |           | ----- 0,50 m ----- |           |
|--------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
|        | Gravimétrica       | Modelagem | Gravimétrica       | Modelagem | Gravimétrica       | Modelagem |
| 15/set | 0,44               | 0,36      | 0,46               | 0,38      | 0,45               | 0,40      |
| 18/set | 0,42               | 0,34      | 0,45               | 0,42      | 0,44               | 0,42      |
| 20/set | 0,40               | 0,34      | 0,47               | 0,42      | 0,46               | 0,40      |
| 22/set | 0,35               | 0,33      | 0,45               | 0,38      | 0,45               | 0,40      |
| 25/set | 0,34               | 0,31      | 0,45               | 0,43      | 0,45               | 0,42      |
| 27/set | 0,39               | 0,28      | 0,45               | 0,44      | 0,45               | 0,41      |
| 02/out | 0,41               | 0,48      | 0,43               | 0,42      | 0,41               | 0,43      |
| 04/out | 0,46               | 0,49      | 0,48               | 0,44      | 0,47               | 0,43      |
| 06/out | 0,39               | 0,46      | 0,45               | 0,41      | 0,44               | 0,42      |
| 09/out | 0,45               | 0,43      | 0,48               | 0,44      | 0,47               | 0,44      |
| 11/out | 0,37               | 0,42      | 0,42               | 0,42      | 0,42               | 0,42      |
| 13/out | 0,28               | 0,41      | 0,37               | 0,41      | 0,38               | 0,41      |
| 16/out | 0,32               | 0,38      | 0,41               | 0,39      | 0,43               | 0,41      |
| 18/out | 0,32               | 0,34      | 0,44               | 0,42      | 0,43               | 0,40      |
| 20/out | 0,32               | 0,32      | 0,42               | 0,34      | 0,42               | 0,36      |
| 23/out | 0,39               | 0,64      | 0,44               | 0,46      | 0,43               | 0,44      |
| 25/out | 0,36               | 0,54      | 0,41               | 0,44      | 0,41               | 0,44      |
| 27/out | 0,31               | 0,53      | 0,40               | 0,46      | 0,40               | 0,44      |
| 30/out | 0,46               | 0,61      | 0,48               | 0,52      | 0,47               | 0,51      |
| 01/nov | 0,43               | 0,53      | 0,47               | 0,48      | 0,44               | 0,48      |
| 03/nov | 0,45               | 0,48      | 0,48               | 0,48      | 0,47               | 0,48      |
| 06/nov | 0,39               | 0,46      | 0,43               | 0,42      | 0,43               | 0,48      |
| 08/nov | 0,40               | 0,44      | 0,44               | 0,40      | 0,42               | 0,47      |
| 10/nov | 0,45               | 0,52      | 0,49               | 0,51      | 0,47               | 0,50      |

#### 4.6 Conclusão

A modelagem realizada no presente estudo, apesar de ter apresentado resultados divergentes na camada mais próxima à superfície em alguns dias do período de avaliação experimental, foi satisfatória em prever o teor de água de um solo vegetado por *B. brizantha* cv. Marandu e irrigado por gotejamento subsuperficial, ao apresentar mesmo comportamento de variação da umidade coletada com a umidade simulada pelo modelo.

A obtenção dos parâmetros de entrada para modelos numéricos é essencial para que os resultados possam se aproximar da melhor maneira possível com os dados de campo.

#### 4.7 Referências Bibliográficas

ANA – Agência Nacional de Águas. Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Informe 2014. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 2015.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/84. Solo – **Determinação do limite de liquidez – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508/84. Solo – **Determinação da massa específica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180/84. Solo – **Determinação do limite de plasticidade – Procedimento**. Rio de Janeiro, 13 p, 1984
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84. Solo – **Análise Granulométrica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper**, 2003.
- AYARS, J.E.; FULTON, A; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agricultural Water Management**, v.157, p.39-47, 2015.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVERIA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.77-86, 2011.
- CARNEVALLI, R. A. Estratégias de manejo rotacionado de pastagens. Comunicado Técnico 58. Juiz de Fora, EMBRAPA, 4p., 2009.
- COOPER, M. & VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B Nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 581-595, 2005.
- CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010. DOI: 10.4025/actasciagron.v32i2.1020.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. v. 2, Rio de Janeiro, 2006.
- GEO-SLOP. International Ltd. **VADOSE/W User's Manual**, Version 1.01, Calgary, Alberta, Canadá, 2002.
- GEOSTUDIO, GEO-SLOPE International Ltd. **Vadose Zone Modeling with VADOSE/W**. User's Guide. Calgary, Alberta, Canadá, 2007.
- LIMA, J. E. F. W., SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 33-41, 2001. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662001000100007>

- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUSA, V. F. de Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Hortaliças; São Luís: Embrapa Cocais; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura; Petrolina: Embrapa Semiárido, p. 159-232, 2011.
- MOSCA, M. A.; TESTEZLAF, R.; GOMES, E. P. Desenvolvimento de emissores alternativos para irrigação subsuperficial de baixa pressão. **Irriga, Botucatu**, v. 10, n. 3, p. 249-262, 2005.
- NIXON, J. F. The role of convective heat transport in the thawing of frozen soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 12, p. 425-429, 1975.
- OLIVEIRA, A. S.; AUGUSTO FILHO, O. Análise e aplicação de modelos numéricos de simulação do fluxo da água subterrânea e dispersão de contaminantes em ambiente de sistema de informação geográfica (SIG). **Minerva**, v. 5, n. 3, p. 267-276, 2006.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society of London**, London, v.193, p.120-45, 1948.
- RAFAEL M. FELTRIN, R. M; JOÃO B. D. DE PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo hydrus-1d e medida a campo para as condições climáticas do sul do Brasil. **Conference: 11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, At Maputo, Moçambique, 2013.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids though porous médium. **Physics, New York**, v. 1, p. 318-333, 1931.
- SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n.2, p. 212-220, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982008000200006>
- SEVERIANO, E. C. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA K.A.P.; BENITES, V.M. & FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: II - Compressive behavior of soil and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 783-791, 2011.
- SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, M. H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated Media. Version 4.08. Riverside, USA: **University of California, Department of Environmental Sciences**, 332p., 2009.

- SOUZA, E. A., COELHO, E. D., PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.31, n.4, p.1161-1166, 2007.
- VRIES, D. A. Thermal properties of soils. In: **The Physics of Plant Environment**, W. R. Van Wijk (ed.), North Holland Pub. Co., p. 382, 1963.
- WILSON, G.W. Soil Evaporation fluxes for geotechnical engineering problems. PhD. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canadá, 1990.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled soil–atmosphere modeling for soil evaporation. **Canadian Geotechnical Journal** v. 31, p. 151–161, 1993.
- WWAP - United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO, 2015.

## 5. CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE *BRACHIARIA* ADUBADA E IRRIGADA POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

### 5.1 Resumo

A prática da irrigação por meio do gotejamento subsuperficial em pastagens ainda é remoto, porém é promissor ao aliar a racionalização o uso da água com elevadas produções. Objetivou-se neste estudo analisar o crescimento e produção da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu irrigada por gotejamento subsuperficial sob lâminas de água, monitorando-se a umidade do solo, radiação solar e temperatura do ar para análise de sua influência. O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Viçosa- *Campus* Rio Paranaíba, constituindo-se de cinco lâminas de um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial (1, 50, 75, 100 e 125% da evapotranspiração de referência - ET<sub>0</sub>), em seis períodos de coleta (5, 14, 21, 28 e 34 dias após uniformização da pastagem), distribuídos em um delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas no tempo, em três repetições. A irrigação incrementou a produtividade média aos 34 dias em 70,3% em relação à maior (2103,75 kg MS ha<sup>-1</sup>) e menor lâmina (1235,30 kg MS ha<sup>-1</sup>). A resposta da produtividade e altura foram ajustadas por uma função linear positiva. Já a relação folha/colmo (F/C) respondeu a um modelo quadrático para as lâminas 100 e 125% ET<sub>0</sub>, obtendo melhores relações aos 23 e 24 dias com alturas de 23,93 e 27,87 cm respectivamente.

**Palavras-chave:** *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, forragem, irrigação.

### 5.2 Abstract

Irrigation is a technique capable of minimizing the seasonality of forage plants. The practice of irrigation through subsurface drip irrigation in pastures is still remote, but it is promising to combine rationalization of water use with high yields. The objective of this study was to analyze the growth and yield of *B. brizantha* cv. Marandu irrigated by subsurface drip under water slides, monitoring soil moisture, solar radiation and air temperature for analysis of its influence. The study was conducted in the experimental area of University Federal of Viçosa - *Campus* Rio Paranaíba, constituting five levels of a system irrigated by subsurface drip irrigation (1, 50, 75, 100 and 125% reference evapotranspiration - ET<sub>0</sub>), in six periods (5, 14, 21, 28 and 34 days after standardization of forage), distributed in a completely randomized design, with plots subdivided in time, in three replications. The irrigation increased the average yield of the 34 days in 70,3% in relation to the largest (2103,75 kg MS ha<sup>-1</sup>) and lower leaf (1235,30 kg MS ha<sup>-1</sup>) levels of water. The productivity and height response were adjusted by a positive linear function. The F/C ratio responded to a quadratic model for treatments 100 and 125% ET<sub>0</sub>, obtaining better relationships at 23 and 24 days with heights of 23,93 and 27,87 cm respectively.

**Keywords:** *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, forage, irrigation.

### 5.3 Introdução

O uso de pastagens como principal fonte de alimentos para animais é a alternativa mais rentável para produtores brasileiros nos dias atuais, pois as condições climáticas favoráveis do país garantem baixos custos de produção (ALENCAR et al., 2010; DIAS FILHO, 2014). Por isso, o conhecimento minucioso de sua formação, crescimento e manejo aliado aos fatores que influenciam seu desenvolvimento, como o clima, tornam-se imprescindíveis para que decisões sobre como explorá-las possam potencializar a produção.

No Brasil, 80 a 90% das áreas de pastagens são constituídas por espécies forrageiras, do gênero *Brachiaria*, principalmente *B. decumbens* e *B. brizantha* (PACIULLO et al., 2009), por se adaptarem muito bem às mais variadas condições edafoclimáticas e apresentar boa produtividade de forragem, baixo acúmulo de colmos e boa retenção de folhas verdes. Porém, de acordo com Silva et al. (2009) seu cultivo exige técnicas de manejo para que se tenham níveis aceitáveis de desempenho dos animais no período seco do ano. Rodrigues et al. (2008), abordam que em condições de pastejo, o consumo da forrageira é influenciado pela sua estrutura, como por exemplo a relação folha/colmo, devido as porções verdes da planta serem as mais nutritivas da dieta e consumidas preferencialmente pelos animais (WILSON & T'MANNETJE, 1978).

A irrigação é uma tecnologia muito viável para aumentar a produtividade de plantas forrageiras ao minimizar os efeitos da sazonalidade. Por isso, sua utilização na agropecuária é crescente, uma vez que é capaz de proporcionar incrementos e estabilização de produtividade ao suprir e suplementar a demanda hídrica durante as épocas secas e chuvosas do ano (ALENCAR et al., 2009a; LOPES et al., 2014).

Na pecuária, os sistemas mais utilizados são por aspersão, entretanto a necessidade de novas tecnologias que apresentem maior eficiência quanto ao uso da água e aplicação de fertilizantes tem despertado o interesse de técnicos e pesquisadores a testarem diferentes sistemas de irrigação, como, por exemplo, os sistemas por gotejamento subsuperficiais. Segundo Ayars et al. (2015), o potencial de economia de água por esse sistema é significativo e sua adoção será promovida se houver incentivos financeiros.

Azevedo (1986) e Keller & Bliesner (1990) definem o sistema de irrigação subsuperficial por gotejamento como, aquele que tem o solo como meio de propagação da água, onde os emissores ficam sob a superfície do solo e dentro da camada que representa a zona efetiva do sistema radicular das plantas, cujo objetivo principal é maximizar a eficiência do uso da água.

Portanto, este trabalho teve como objetivo analisar o crescimento e produção da *B. Brizantha* cv. Marandu irrigada por gotejamento subsuperficial sob diferentes lâminas de água, monitorando-se

a umidade do solo, radiação solar e temperatura do ar a fim de determinar seus efeitos no crescimento e produtividade desta forrageira.

#### 5.4 Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido na área experimental de 1.000 m<sup>2</sup> do *Campus I* (CRP) da Universidade Federal de Viçosa em Rio Paranaíba, MG, nas coordenadas 19° 12' 34" S e 46° 07' 53" W, com altitude média de 1.100 m (Figura 1).

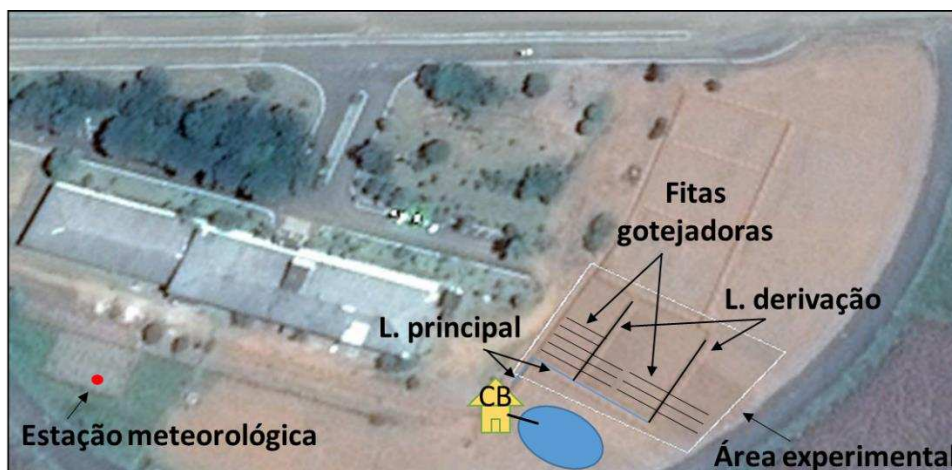


Figura 1 - Área experimental, sendo L. principal a linha principal; L derivação a linha de derivação e CB a casa de bomba. Fonte *Google Earth* (adaptado).

O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, com estações de inverno e verão bem definidas, chuvas no verão e temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22°C. O solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado, textura muito argilosa, fase cerrado, relevo plano (EMBRAPA, 2006). Os tratamentos constituíram-se de cinco lâminas de um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial, em seis períodos de coleta, distribuídos em um delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas no tempo, com três repetições (Figura 2).

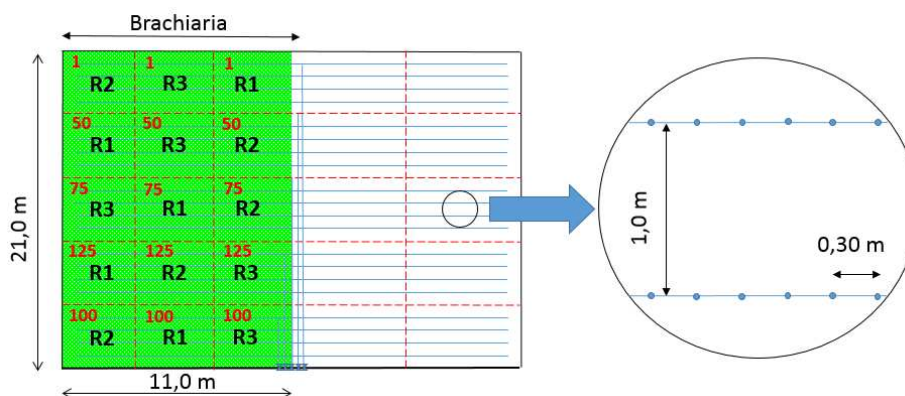


Figura 2 - Esquema do delineamento da forrageira e das lâminas de irrigação

Após o preparo do solo e instalação do sistema de irrigação, foram coletadas amostras de solo em cinco pontos aleatórios para caracterização química, física e hídrica do solo (Tabela 1).

Tabela 1 - Características químicas, físicas e hídricas do solo da área experimental

| <b>Características químicas</b>           |                   |                                           |                                |                   |       |                                          |                           |                |                            |                            |       |
|-------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------|------------------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|-------|
| <b>Prof</b>                               | pH                | P (res)                                   | S-SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | K                 | Ca    | Mg                                       | Al                        | Na             | H+Al                       | M.O.                       | C.O.  |
| <b>cm</b>                                 | CaCl <sub>2</sub> | -----mg dm <sup>-3</sup> -----            | -----                          | -----             | ----- | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- | -----                     | -----          | -----                      | --- g dm <sup>-3</sup> --- | ---   |
| <b>0-20</b>                               | 4,8               | 17,0                                      | 9,0                            | 0,14              | 2,5   | 0,7                                      | 0,05                      | 0,01           | 9,0                        | 41,0                       | 23,8  |
| <b>Prof</b>                               | SB                | t                                         | T                              | V                 | m     | B                                        | Cu                        | Fe             | Mn                         | Zn                         |       |
| <b>cm</b>                                 | -----             | cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> ----- | -----                          | --- % ---         | ----- | -----                                    | mg.dm <sup>-3</sup> ----- | -----          | -----                      | -----                      | ----- |
| <b>0-20</b>                               | 3,35              | 3,40                                      | 12,35                          | 27,1              | 1,5   | 0,23                                     | 1,0                       | 31             | 2,2                        | 1,1                        |       |
| <b>Características físicas e hídricas</b> |                   |                                           |                                |                   |       |                                          |                           |                |                            |                            |       |
| <b>Prof</b>                               | Θ <sub>s</sub>    | Θ <sub>cc</sub>                           | Θ <sub>pmp</sub>               | Ds                | Areia | Silte                                    | Argila                    | Textura        | Ksat                       |                            |       |
| <b>cm</b>                                 | -----             | cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> -----     | -----                          | g cm <sup>3</sup> | ----- | g kg <sup>-1</sup> -----                 | -----                     | -----          | --- cm s <sup>-1</sup> --- |                            |       |
| <b>0-20</b>                               | 0,66              | 0,43                                      | 0,12                           | 0,66              | 180   | 120                                      | 700                       | Muito Argilosa | 2,5 x 10 <sup>-3</sup>     |                            |       |
| <b>20-40</b>                              | 0,60              | 0,42                                      | 0,15                           | 0,60              | 180   | 120                                      | 700                       | Muito Argilosa | 2,1 x 10 <sup>-3</sup>     |                            |       |
| <b>40-60</b>                              | 0,60              | 0,40                                      | 0,13                           | 0,60              | 180   | 120                                      | 700                       | Muito Argilosa | 4,8 x 10 <sup>-3</sup>     |                            |       |

\*Prof. = profundidade; M.O. = matéria orgânica; C.O. = carbono orgânico; Ds = densidade do solo; Θ<sub>s</sub>, Θ<sub>cc</sub> e Θ<sub>pmp</sub> referem-se à umidade na saturação, capacidade de campo e ponto de murcha permanente; Ksat = condutividade hidráulica saturada do solo.

As lâminas de irrigação foram calculadas em função de frações da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), correspondentes a (1, 50, 75, 100 e 125% da ET<sub>0</sub>), aplicadas na frequência de três vezes por semana na ausência de chuva. A coleta da pastagem foi realizada aos 5, 7, 14, 21, 28 e 34 dias após sua uniformização com resíduo de 7 cm de altura. As avaliações da pastagem foram realizadas em uma área total de 231 m<sup>2</sup>, sendo a área de cada unidade experimental correspondente a 15,12 m<sup>2</sup>.

Inicialmente a área experimental em pousio e infestada de plantas daninhas foi dessecada com glifosato na dose de 2,5 L ha<sup>-1</sup>. O solo foi então preparado primeiramente por duas aragens seguidas

de duas gradagens, sendo essas operações realizadas com trator New Holland TL85E, 4x2 TDA, potência de 88 cv e transmissão 12x12 Power Shuttle.

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento subsuperficial autocompensante, modelo Top Drip. Para implantação do sistema de irrigação, o solo foi escavado à uma profundidade de 0,60 m para passagem da tubulação principal, com cano PVC PN 60, diâmetro de 50 mm. Na área havia duas linhas de derivação para distribuição de água em quatro parcelas. Em cada linha de derivação havia 5 tubos de polietileno de 32 mm de diâmetro, os quais conectavam-se as fitas gotejadores. No início das linhas de derivação foram instalados cinco registros para controle das lâminas de água.

As fitas gotejadoras foram espaçadas entre si a uma distância de 1 m entre fitas, sendo enterradas a 0,20 m de profundidade. A distância entre gotejadores é de 0,30 m, com vazão de 1,6 L h<sup>-1</sup>, formando uma faixa molhada contínua. A pressão do sistema foi monitorada por meio de manômetro, o qual variou de 14 a 30 m. c. a. O sistema de irrigação apresentou coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e coeficiente de uniformidade de distribuição de água (CUD) na faixa de pressão utilizada em cerca de 93 e 90%, respectivamente.

Geralmente o cálculo do volume de água a ser aplicado nos sistemas de irrigação localizada é realizado como sendo o volume aplicado por planta. Entretanto, a semeadura da espécie *Brachiaria* é realizada à lanço, sendo importante salientar que neste estudo o volume de água aplicado foi calculado como mm de água por m<sup>2</sup> de planta.

O manejo da irrigação foi realizado mediante coleta diária dos dados meteorológicos da estação agroclimática instalada à 50 m da área irrigada, a qual fornecia dados para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) pelo método de Penman-Monteith - FAO 56, conforme proposto por Allen et al. (1998), bem como os demais dados meteorológicos utilizados na pesquisa (precipitação pluviométrica, temperatura máxima, mínima e média e radiação solar).

O monitoramento da umidade do solo foi realizado aleatoriamente na parcela equivalente a lâmina de 100% da ET<sub>0</sub>, sempre no mesmo horário antes da irrigação. Todas as coletas foram realizadas manualmente por meio de trado holandês em três profundidades (0,00-0,10, 0,10-0,30 e 0,30-0,50 m) em duas distâncias das fitas gotejadoras (0,25 e 0,50 m) e com três repetições.

Duas semanas antes da semeadura da pastagem, o solo foi corrigido com calcário geox, PRNT 125% na dose 4,2 t ha<sup>-1</sup> para elevar a saturação de bases para 70%. No dia 19/04/17 a pastagem *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi semeada à lanço, na quantidade de 15 Kg ha<sup>-1</sup>. Como a época de semeio não era propícia para germinação realizou-se sucessivas irrigações com auxílio de um aspersor para umidificação da camada superficial do solo. O tempo necessário para a cobertura do solo pela forrageira foi de 180 dias, devido ao inverno rigoroso deste ano. As avaliações foram realizadas no decorrer de 34 dias, iniciando-se em 11 de outubro até 13 de novembro de 2017.

A adubação do solo foi realizada com intuito de que a pastagem produzisse 40 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. As dosagens de fertilizantes foram: Ureia 1500 kg ha<sup>-1</sup>, MAP 250 kg ha<sup>-1</sup>, KCL 880 kg ha<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub>SO<sub>4</sub> 220 kg ha<sup>-1</sup>, parcelados em 12 vezes e aplicados a lanço sempre após o corte de uniformização da pastagem.

As variáveis resposta avaliadas aos 5, 7, 14, 21, 28 e 34 dias após uniformização da pastagem foram a produtividade (MS ha<sup>-1</sup>), altura do relvado (H), taxa de expansão foliar (TEF) e relação folha/colmo (F/C).

No momento da coleta foi utilizado um quadrado de amostragem 0,25 m<sup>2</sup>, a qual era jogada aleatoriamente em cada unidade experimental para realização dos cortes. O resíduo da pastagem, em todas as avaliações, foi de sete cm de altura. Após as coletas, as amostras eram acondicionadas em sacos plásticos e levadas imediatamente ao laboratório para pesagem da massa fresca.

A altura da planta foi monitorada nos dias das coletas com auxílio de uma régua graduada em centímetros e uma folha de transparência, posicionada sobre o dossel, medindo-se a altura do solo até o ponto médio da transparência (SOUZA JÚNIOR, 2007). As medidas foram tomadas aleatoriamente em seis posições em cada unidade experimental.

Após pesagem, porções de 20 g foram retiradas aleatoriamente e fracionadas manualmente em lâminas foliares, colmo e material morto, sendo as bainhas foliares incorporadas na fração colmo para determinação da relação F/C. Estas frações foram submetidas a estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas para desidratação (GARDNER, 1986).

A determinação da matéria seca foi realizada utilizando-se subamostras de 50 g, da matéria original, sendo também posteriormente desidratadas em estufa. A produtividade da pastagem foi então calculada com base no valor obtido na área da moldura, estimando-se a matéria seca por hectare por extrapolação simples.

A TEF foi calculada de acordo com a Equação 1 (DRUMOND & AGUIAR, 2005).

$$TEF = \frac{H - Hr}{n} \quad \text{Equação 1}$$

em que:

TEF = Taxa de Expansão da Forragem, [cm dia<sup>-1</sup>];

H = Altura do relvado antes da coleta, [cm];

Hr = Altura do resíduo, [Hr = 7cm];

n = Número de dias de crescimento, [dias].

Os dados foram submetidos aos testes de Bartlett e Jarque-Bera (Jarque & Bera, 1980) para avaliação das condições de homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos, respectivamente. Em seguida, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) sendo as médias

comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e por análise de regressão. Os modelos de regressão foram escolhidos com base na significância do modelo, na não significância da falta de ajuste e na adequação ao sentido teórico dos fenômenos em estudo.

## 5.5 Resultados e Discussão

O clima é o fator mais influente e limitante na produção das plantas forrageiras. A temperatura ao longo do período de avaliação do experimento está apresentada na Figura 3-A. A temperatura média foi igual a 22,09 °C, a máxima 22,65°C e a mínima igual a 17,54°C. Rolim (1994) observou que o efeito da temperatura é mais importante na produção de forragem do que o do fotoperíodo.

Quando a temperatura decresce a determinado valor as plantas forrageiras reduzem drasticamente sua produção e algumas vezes entram até em período reprodutivo. Esta temperatura é conhecida como temperatura base inferior (Tbi). Cooper & Tainton (1968) generalizam entre 10 e 15°C as Tbi para forrageiras tropicais. Porém, Rodrigues (2004) e Lara (2007), estudando o capim-marandu, encontraram valores de temperaturas bases inferiores de 18,6 e 16,3°C, respectivamente. Cruz et al. (2011), determinaram a Tbi desta forrageira por meio de modelos preditores, encontrando a Tbi igual a 17,2 °C. Por outro lado, altas temperatura na faixa de 30-35°C (VILLA NOVA et al., 1999), também comprometem a produção e qualidade de algumas plantas forrageiras. Contudo, esta variável climática, não foi um fator limitante na produção, podendo-se verificar que a mesma permaneceu muito próxima a faixa ótima de produção.

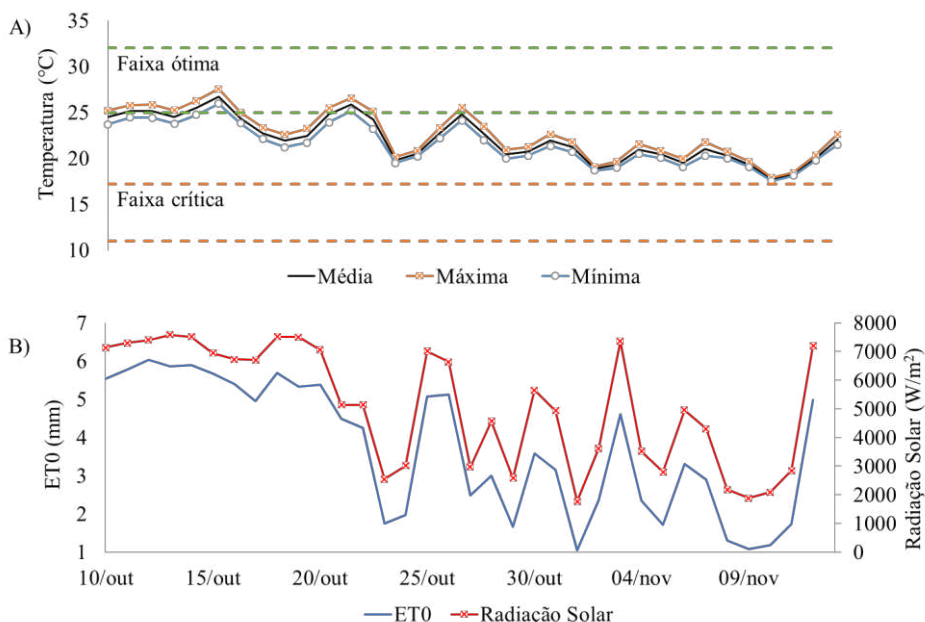


Figura 3 - Dados climáticos do período experimental em Rio Paranaíba de 2017, sendo A) temperaturas máxima, média e mínima e B) radiação solar e evapotranspiração de referência (ET0)

A evapotranspiração de referência (ET0) seguiu o curso da variação de radiação solar e temperatura. O dia de maior ET0 (6,03 mm) e radiação (7584 W m<sup>2</sup>) ocorreram no dia 12/10 e a menor ET0 (1,01 mm) e radiação (1766 W m<sup>2</sup>) no dia 01/11 (Figura 3-B). Durante o período experimental, a ET0 totalizou 126,70 mm, podendo-se observar que a maior evapotranspiração se dava em dias mais quentes, acompanhada pela incidência solar e temperaturas elevadas. Neste período não foram registrados precipitação, como apresentado na Figura 4, sendo a irrigação o único elemento de reposição de água ao solo e consequentemente às plantas.

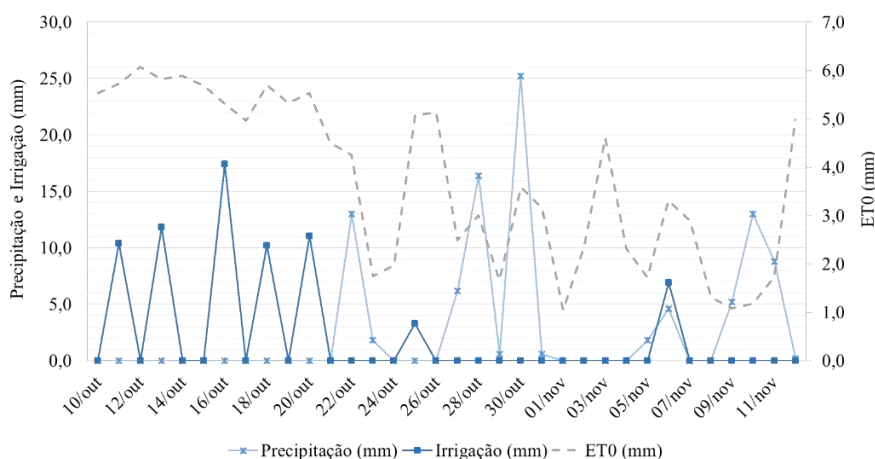


Figura 4 - Precipitação, irrigação e evapotranspiração de referência (ET0) registrados ao longo do período experimental em Rio Paranaíba - MG

Pode-se observar pela Figura 4 que a irrigação constituiu o maior aporte hídrico às plantas até o dia 21/10. Posteriormente, foram realizadas apenas 2 aplicações no dia 26/10 e 07/11. A Tabela 2 apresenta a lâmina total de água aplicada aos tratamentos.

Tabela 2 - Irrigação, precipitação e lâmina total (irrigação + precipitação) aplicada na *Brachiaria brizantha* ao longo da avaliação do experimento, em Rio Paranaíba - MG

|              | Volume aplicado (mm) |         |         |           |           |
|--------------|----------------------|---------|---------|-----------|-----------|
|              | 1% ET0               | 50% ET0 | 75% ET0 | 100 % ET0 | 125 % ET0 |
| Irrigação    | 0,70                 | 35,50   | 53,20   | 71,00     | 88,70     |
| Precipitação | 92,80                | 92,80   | 92,80   | 92,80     | 92,80     |
| Lâmina Total | 93,50                | 128,30  | 146,00  | 163,80    | 181,50    |

A quantidade de água precipitada totalizou 92,80 mm, enquanto a irrigada no tratamento 100% da ET0 foi de 71 mm. Dessa maneira, apesar de não ter sido uniformemente distribuída ao longo do experimento, pode-se verificar que o maior aporte hídrico total do período de avaliação foi a

precipitação. Por isso, a percentagem real de água aplicada nos tratamentos 1, 50, 75, 100 e 125 da ET0, em relação à lâmina total foram respectivamente iguais 55,5, 76,2, 86,7, 97,3 e 107,8%.

A determinação da umidade do solo é fundamental no manejo da água, pois representa a quantidade de água presente em determinado volume de solo. Na Figura 5 é apresentado o monitoramento do teor de água na parcela referente a lâmina de 100% da ET0 em duas distâncias da fita gotejadora (0,25 e 0,50 m) e em três profundidades (0,10, 0,30 e 0,50 m).

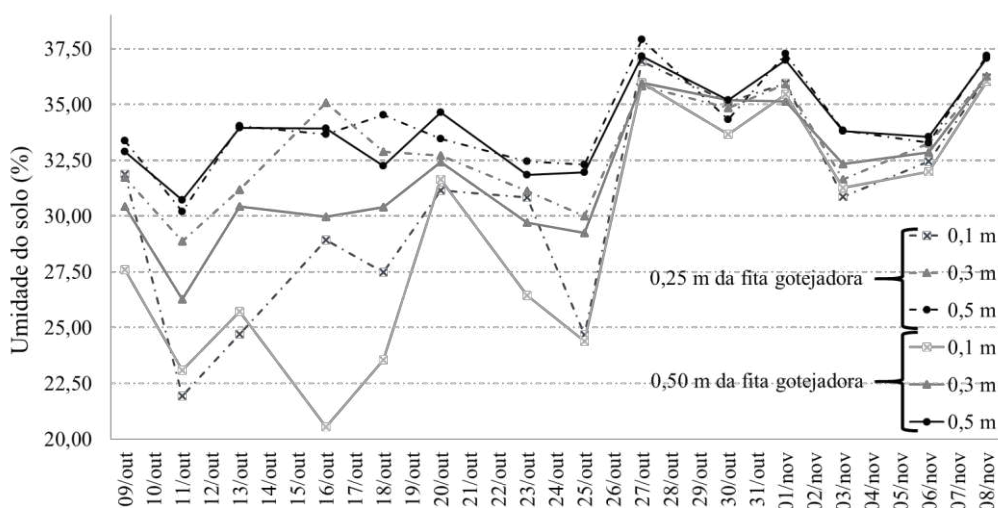


Figura 5 - Média da umidade do solo referente ao tratamento de 100% da ET0, coletado ao longo do período experimental, em duas distâncias da fita gotejadora e em três profundidades

Verifica-se maior variação do teor de água nas camadas mais próximas à superfície (0,10 m) e mais distantes da fita gotejadora (0,50 m), principalmente quando a fonte hídrica é apenas a irrigação. De acordo com Lemon (1956) e Yang & Yanful (2002), os fatores de solo que afetam o teor e o fluxo de água no perfil do solo, bem como a evaporação são a estrutura, a densidade, a porosidade e a condutividade hidráulica não saturada.

Como não encontrado trabalhos na literatura quanto ao espaçamento de fitas gotejadoras de sistemas irrigados em subsuperfície para pastagem plantadas à lanço, cujo cálculo foi realizado como mm de água por m<sup>2</sup>, pode-se inferir que a distância de 1,0 m entre as fitas gotejadoras foi superior à capacidade do solo em transmitir água por capilaridade às camadas mais próximas da superfície, provavelmente devido à boa condutividade hidráulica associada as demais características físicas deste solo. Ou seja, com o sistema de irrigação instalado nesta profundidade em solos de mesmas características físicas e hídricas, mesmo com o aumento da lâmina por m<sup>2</sup> a água está mais sujeita a ser drenada ao longo do perfil do que ser ascendida por capilaridade. Este fato pode ser observado pelo teor de água para as duas distâncias da fita nas profundidades de 0,50 m (Figura 5). Por isso, estudos mais aprofundados quanto ao espaçamento e profundidade de irrigações subsuperficiais em

pastagens sem espaçamento de plantio devem ser realizados, para que de fato a irrigação por gotejamento subsuperficial possa ser eficiente quanto o uso da água.

Por outro lado, os dias de maior variação da umidade ocorreram quando a pastagem estava praticamente rente à superfície do solo. Nestes dias, a demanda hídrica por parte da planta é menor, devido a menor estrutura de seus componentes, mas a exposição da superfície do solo à radiação solar é maior, sendo esta em média igual a 7720 W m<sup>2</sup>. De acordo com Stone et al. (2006), a cobertura do solo altera a relação solo-água-planta, diminuindo a taxa de evapotranspiração. Além disso, Dalmago et al. (2010) afirmam que a evaporação da água do solo é maior sob preparo convencional, preparo este realizado na área experimental.

A análise de variância dos dados de produtividade de massa seca da forragem apresentou efeito significativo das lâminas de irrigação ao longo dos dias avaliados ( $p < 0,001$ ), porém não houve interação significativa entre os fatores ( $p > 0,05$ ) (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância (ANOVA) e comparação de médias de produtividade de massa seca (MS) de *Brachiaria brizantha* (kg ha<sup>-1</sup>), pelo teste de Tukey, em função das lâminas, ao longo dos dias de avaliação

|                                                      |                   | Quadrado médio |                              |           |           |            |  |
|------------------------------------------------------|-------------------|----------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|--|
| Fontes de Variação                                   |                   | GL             | Produtividade MS             |           |           |            |  |
| Lâmina (L)                                           |                   | 4              | <1,8 x 10 <sup>-5</sup> ***  |           |           |            |  |
| Tempo (T)                                            |                   | 4              | <2,2 x 10 <sup>-16</sup> *** |           |           |            |  |
| Lâmina x Tempo (L x T)                               |                   | 16             | 0,05305*                     |           |           |            |  |
| CV (L) (%)                                           |                   |                | 17,68                        |           |           |            |  |
| CV (T) (%)                                           |                   |                | 15,19                        |           |           |            |  |
| Produtividade de Matéria Seca (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   |                |                              |           |           |            |  |
| Lâminas                                              | Dias de avaliação |                |                              |           |           |            |  |
|                                                      | 5                 | 14             | 21                           | 28        | 34        | Média      |  |
| 1                                                    | 193,29            | 1082,97        | 1429,67                      | 1581,60   | 1888,96   | 1235,30 d  |  |
| 50                                                   | 364,00            | 1219,39        | 1545,07                      | 1771,12   | 2021,89   | 1384,29 cd |  |
| 75                                                   | 361,90            | 1476,61        | 1903,31                      | 2034,85   | 2345,21   | 1624,37 bc |  |
| 100                                                  | 544,38            | 1529,83        | 1932,87                      | 2259,36   | 2811,74   | 1815,64 ab |  |
| 125                                                  | 538,12            | 1725,08        | 2388,08                      | 2559,77   | 3307,68   | 2103,75 a  |  |
| Média                                                | 400 d             | 1406,78 c      | 1839,80 b                    | 2041,34 b | 2475,10 a |            |  |

GL - grau de liberdade; Significativo a 0,1 (\*) e 0,001 (\*\*\*) de probabilidade; CV - coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si ( $p < 0,001$ ), pelo teste de Tukey

Nos primeiros 21 dias de avaliação, a temperatura média do ar e a radiação solar média foram maiores que o período dos 21 a 34 dias. A taxa de acúmulo de massa seca da pastagem aos 21 dias foi igual a 87,61 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> sendo aos 34 dias igual a 72,80 kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, podendo-se inferir que o efeito destes fatores climáticos influenciou nestes resultados. Drumond & Aguiar (2005) afirmam que espécies tropicais têm crescimento ótimo dentro de uma faixa de temperatura, sendo esta um dos principais fatores responsáveis pela estacionalidade da produção das pastagens (TONATO 2003). Santos et al. (2014), concluíram que a redução de 1% da radiação fotossintética ativa nas plantas promoveu a redução de 1,35% na massa seca de forragem, mostrando a importância e influência desta variável climática na produção de plantas forrageiras.

Apesar do significativo volume de água precipitado no período de avaliação, pode-se verificar que a irrigação proporcionou incrementos na produtividade à medida que se disponibilizava mais água à pastagem (Tabela 3), ou seja, a maior média de produtividade ocorreu aos 34 dias na lâmina equivalente 125% da ET<sub>0</sub>, apesar desta lâmina ser estatisticamente igual à de 100% da ET<sub>0</sub>. Comparando-se a produção média dos tratamentos 1% da ET<sub>0</sub> e 125% da ET<sub>0</sub>, constata-se que 48,48% a mais de água, proporcionou o aumento de 70,3% da produção. Melo et al. (2009), verificaram que a produção de massa seca dos capins mombaça e marandu aumentaram linearmente de acordo com o aumento dos percentuais de umidade do solo. Além disso, Dantas et al. (2016), ao estudarem a *Brachiaria brizantha* com diferentes lâminas de irrigação, abordam que esta forrageira exige a manutenção do armazenamento de água no solo acima de 50% da água disponível no período de outono e inverno para suprir suas necessidades hídricas.

Na Figura 6 são apresentados a função de resposta entre a produtividade média de massa seca e lâminas de água e produtividade média de massa seca ao longo dos dias de avaliação.

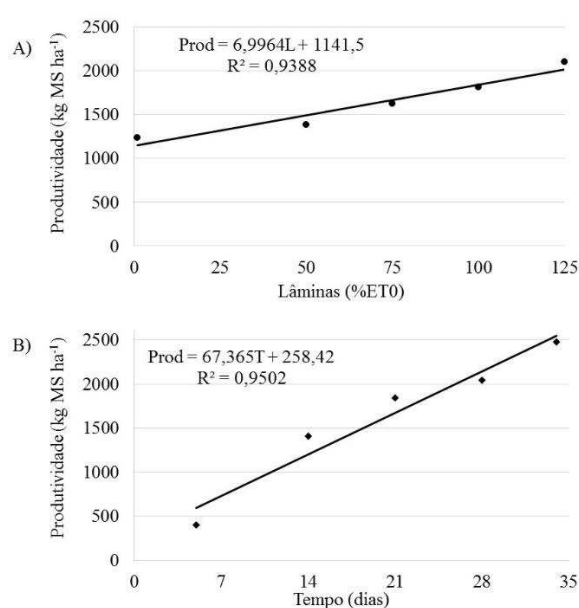


Figura 6 - Produtividade de matéria seca de forragem de *Brachiaria brizantha* em função A) das lâminas de água recebidas e B) ao longo dos dias de avaliação

Com base na significância e ajustes do modelo, a função de resposta entre a produtividade média de massa seca e lâminas de água (Figura 6-A) apresentou comportamento linear, apresentando máxima produção média com a aplicação da lâmina de 125% ET<sub>0</sub> igual a 2016,06 kg MS ha<sup>-1</sup>. A função de resposta entre a produtividade média de massa seca ao longo dos dias de avaliação (Figura 6-B) também apresentou comportamento linear, com maior produção aos 34 dias correspondendo a 2548,83 kg MS ha<sup>-1</sup>. Respostas como esta também foram encontradas por Lopes et al. (2014) e Alencar et al. (2009b).

Na Tabela 4 é apresentado os resultados da altura e taxa de expansão da forragem *B. Brizantha* sob diferentes lâminas de irrigação ao longo dos dias de avaliação.

Tabela 4 - Altura (cm) e taxa de expansão da forragem TEF (cm dia<sup>-1</sup>) da *Brachiaria Brizantha* sob diferentes lâminas de irrigação ao longo dos dias de avaliação

| Altura (cm)                                          |                 |                      |                     |                      |                     |                                |        |
|------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|--------|
|                                                      | 0               | 5                    | 14                  | 21                   | 28                  | 34                             | CV (%) |
| Lâminas                                              | Dias            |                      |                     |                      |                     |                                |        |
| 1                                                    | 7 <sup>ns</sup> | 8,67 <sup>Bcd</sup>  | 10,83 <sup>Bc</sup> | 13,33 <sup>Cb</sup>  | 15,33 <sup>Db</sup> | 22,67 <sup>Ea</sup>            | 8,66   |
| 50                                                   | 7 <sup>ns</sup> | 10,67 <sup>ABd</sup> | 12,67 <sup>Bd</sup> | 15,00 <sup>BCc</sup> | 18,33 <sup>Cb</sup> | 26,00 <sup>Da</sup>            |        |
| 75                                                   | 7 <sup>ns</sup> | 10,67 <sup>ABd</sup> | 12,67 <sup>Bd</sup> | 16,33 <sup>Bc</sup>  | 20,33 <sup>Cb</sup> | 29,00 <sup>Ca</sup>            |        |
| 100                                                  | 7 <sup>ns</sup> | 11,33 <sup>Ae</sup>  | 16,00 <sup>Ad</sup> | 22,00 <sup>Ac</sup>  | 24,33 <sup>Bb</sup> | 37,00 <sup>Ba</sup>            |        |
| 125                                                  | 7 <sup>ns</sup> | 12,17 <sup>Ae</sup>  | 16,67 <sup>Ad</sup> | 23,33 <sup>Ac</sup>  | 27,00 <sup>Ab</sup> | 43,33 <sup>Aa</sup>            |        |
| CV (%)                                               | 5,304           |                      |                     |                      |                     |                                |        |
| Taxa de expansão da forragem (cm dia <sup>-1</sup> ) |                 |                      |                     |                      |                     |                                |        |
|                                                      | 0               | 5                    | 14                  | 21                   | 28                  | 34                             | CV (%) |
| Lâminas                                              | Dias            |                      |                     |                      |                     |                                |        |
| 1                                                    | -               | 0,33 <sup>Cab</sup>  | 0,30 <sup>Bb</sup>  | 0,30 <sup>Bab</sup>  | 0,30 <sup>Cab</sup> | 0,46 <sup>Da</sup>             | 15,10  |
| 50                                                   | -               | 0,73 <sup>Ba</sup>   | 0,38 <sup>Bbc</sup> | 0,38 <sup>Bc</sup>   | 0,40 <sup>Cbc</sup> | 0,56 <sup>C<sup>Db</sup></sup> |        |
| 75                                                   | -               | 0,73 <sup>Ba</sup>   | 0,44 <sup>Bb</sup>  | 0,44 <sup>Bb</sup>   | 0,48 <sup>BCb</sup> | 0,65 <sup>Ca</sup>             |        |
| 100                                                  | -               | 0,87 <sup>ABab</sup> | 0,71 <sup>Ac</sup>  | 0,71 <sup>Abc</sup>  | 0,62 <sup>Abc</sup> | 0,88 <sup>Ba</sup>             |        |
| 125                                                  | -               | 1,03 <sup>Aa</sup>   | 0,78 <sup>Ab</sup>  | 0,78 <sup>Ab</sup>   | 0,71 <sup>Ab</sup>  | 1,07 <sup>Aa</sup>             |        |
| CV (%)                                               | 11,93           |                      |                     |                      |                     |                                |        |

CV - coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra maiúsculas na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si ( $p < 0,05$ ), pelo teste de Tukey

A altura e a taxa de expansão da forragem (TEF) diferiram significativamente em função das lâminas de irrigação ao longo dos dias avaliados ( $p < 0,001$ ), havendo interação entre estes fatores

( $p < 0,001$ ), como observado na Tabela 4. Aos 5 dias após a uniformização, pôde-se verificar que a *Brachiaria Brizantha* teve melhor capacidade de rebrota dos perfilhos nas lâminas correspondentes a 100 e 125% da ET<sub>0</sub> (Tabela 4). Como a radiação e temperatura eram as mesmas para todos os tratamentos, pode-se inferir que a disponibilidade hídrica foi a variável climática que influenciou nestes resultados.

O crescimento aos 5 dias, nas duas maiores lâminas 100 e 125% da ET<sub>0</sub>, permitiu que a forrageira se expandisse 67,96 e 62,07% a mais que o tratamento à 1% da ET<sub>0</sub>, mostrando a influência da água quanto ao vigor e potencial de crescimento. De acordo com Paiva & Oliveira (2006), a umidade no solo é fundamental para o crescimento vegetal, o qual se dá pelo aumento de volume das células, provocado por fatores bioquímicos como afrouxamento da estrutura da parede celular, aumento da síntese proteica e da respiração e, principalmente, pela ação física da entrada de água nas células, causando grande expansão das estruturas do vegetal.

A função de resposta do crescimento ao longo dos dias de avaliação (Figura 7-A) e sob lâminas de água (Figura 7-B) apresentaram comportamento linear ( $p < 0,001$ ). Os tratamentos 100 e 125% da ET<sub>0</sub> foram as lâminas cujas regressões apresentaram maior coeficiente angular da reta, respectivamente iguais a 0,94 e 0,97, com crescimento máximo aos 34 dias iguais a 43,33 e 37,00 cm respectivamente. Aguiar et al. (2005), Luz et al. (2008), Alencar et al. (2009c) e Melo et al. (2009) também encontraram aumento das alturas nos tratamentos com maior disponibilidade hídrica. Alencar et al. (2009b) obtiveram resposta linear positiva para altura das plantas com a elevação nas lâminas de irrigação ao estudar as gramíneas dos gêneros *Brachiaria* (capim-xaraés), *Panicum* (capim-tanzânia e capim-mombaça), *Pennisetum* (capim-pioneiro) e *Cynodon* (capim estrela) na estação outono/inverno.

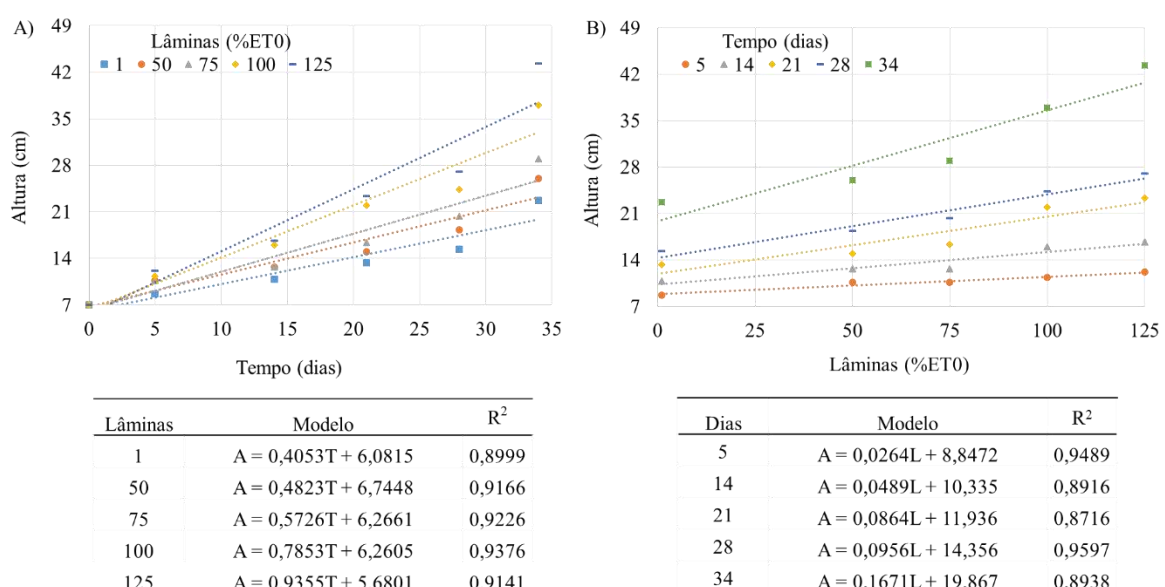


Figura 7 - Modelo da resposta do crescimento da *Brachiaria Brizantha* A) ao longo dos dias de avaliação nas diferentes lâminas de água e B) sob lâminas de água ao longo dos dias de avaliação

A resposta da relação folha/colmo em função da altura do relvado da *Brachiaria Brizantha* ao longo dos dias de avaliação nas diferentes lâminas são apresentadas na Figura 8-A. Todas as lâminas se ajustaram ao modelo quadrático (Figura 8-B), porém, nas lâminas referentes a 1, 50 e 75% da ET0, não houve adequação ao sentido teórico dos fenômenos em estudo.

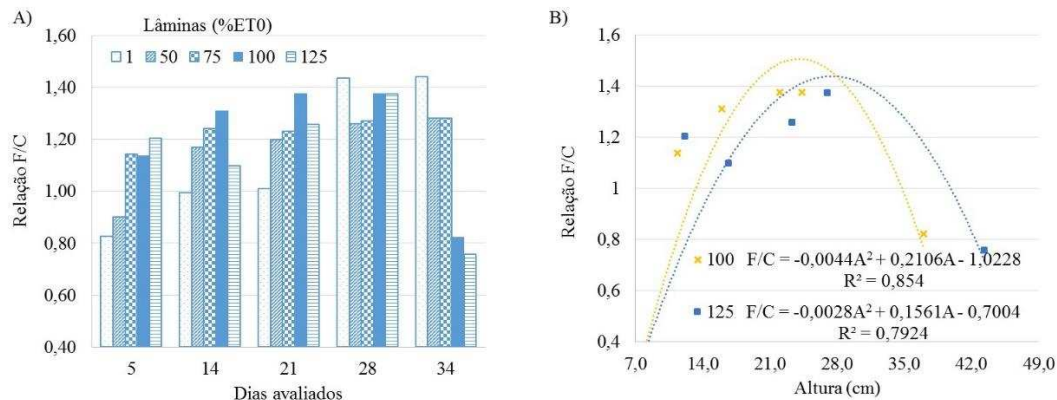


Figura 8 - Relação folha/colmo (F/C) da *Brachiaria Brizantha* A) ao longo dos dias de avaliação sob lâminas de irrigação e B) resposta da relação F/C em função da altura para os tratamentos 100 e 125% ET0.

Pode-se verificar que a relação F/C variou ao longo dos dias nas diferentes lâminas (Figura 8-A). As lâminas 1, 50 e 75% da ET0 obtiveram máxima relação aos 34 dias. Já nos tratamentos 100 e 125% da ET0 essa relação foi máxima aos 28 dias. Esta diferença está relacionada a dois fatores climáticos: água e radiação solar. A disponibilidade hídrica permitiu que a planta expressasse seu potencial. Com o aumento da massa de forragem as folhas começaram a se sobrepor e se sombrearem. Na busca pela maior luminosidade, as forrageiras acabaram aumentando suas proporções de colmo. Segundo Pereira et al. (2014), no interior de dosséis altos, ocorre maior sombreamento, o que gera competição entre os perfilhos por luz. Como resposta, os perfilhos alongam seu colmo a fim de expor as novas folhas na porção superior do dossel, onde a luminosidade é maior.

Pinto et al. (1994), abordam que o limite crítico da relação F/C é considerado igual a 1,0 e este considera a qualidade e quantidade de forragem produzida. No presente estudo, a relação F/C foi superior a 1 para todos os tratamentos aos 14, 21 e 28 dias, porém na próxima coleta, aos 34 dias, a relação F/C dos tratamentos 100 e 125% da ET0 reduziram drasticamente. Santos et al. (2010) abordam que a maior participação relativa de colmo vivo na massa de forragem é desfavorável à produção animal em pastagem, porque prejudica o consumo dos animais em pastejo e o valor nutritivo da planta. Sendo assim, é recomendável que cada espécie forrageira tenha uma altura ideal de entrada dos animais, representada pela máxima relação F/C.

De acordo com Euclides et al. (2010) e Da Silva (2011), o momento adequado para pastejo é quando o relvado está interceptando em torno de 95 % da luz incidente. Neste trabalho, apesar do

ajuste do modelo quadrático da resposta da relação F/C, em função da altura em todas as lâminas, pode-se observar que a relação F/C dos tratamentos 1, 50 e 75% não diminuiu no intervalo de tempo estudado (Figura 8-A), impossibilitando a adequação ao sentido teórico da relação F/C e altura, ou seja, aos 34 dias, como a relação F/C ainda é superior a 1, as alturas de pré-pastejo correspondentes a estes tratamentos são respectivamente iguais a 22,67, 26,00 e 29,00 cm (Tabela 4).

Para as lâminas 100 e 125% ET<sub>0</sub>, o ponto de máximo da equação (Figura 8-B) representa o tempo necessário para que a relação F/C seja máxima, sendo as alturas respectivamente iguais a 23,93 e 27,87 cm. Substituindo-se estas alturas nos modelos ajustados na Figura 7-A, verifica-se que os tratamentos de 100 e 125% ET<sub>0</sub> necessitam de 23 e 24 dias respectivamente para alcançarem a melhor relação F/C no mês que representa a primavera de 2017 de Rio Paranaíba. Giacomini et al. (2009), estabeleceu alturas de pré e pós pastejo da *Brachiaria Brizantha* à lotação rotacionada iguais a 25 e 15 cm respectivamente, sendo estas alturas bem próximas às encontradas neste trabalho.

## 5.6 CONCLUSÃO

Os fatores climáticos, temperatura e radiação solar, não foram limitantes à produção da forrageira em estudo.

Para aumentar a eficiência quanto ao uso da água, em cultivos de pastagens intensivas plantadas à lanço, o espaçamento entre fitas gotejadoras de sistemas irrigados subsuperficialmente, devem ser melhor estudados para garantir que toda a lâmina aplicada seja fornecida as plantas. Além disso, apesar do considerável volume de água precipitado ao longo da avaliação da pastagem, conclui-se que a irrigação foi determinante em aumentar a produtividade de matéria seca da forrageira.

A maior lâmina aplicada (125% ET<sub>0</sub>) proporcionou incrementos na produção de 70,3% em relação a lâmina de 1% ET<sub>0</sub>, sendo a média produzida na maior lâmina igual a 2103,75 kg MS ha<sup>-1</sup> ao longo de 34 dias.

A produtividade e altura da forrageira em relação às lâminas no período de 34 dias apresentaram respostas lineares positivas.

A relação F/C das lâminas 100 e 125% ET<sub>0</sub> se ajustaram ao modelo quadrático, sendo a melhor relação aos 23 dias com altura de 23,93 cm para a lâmina 100% ET<sub>0</sub> e aos 24 dias com altura de 27,78 cm para a lâmina 125% ET<sub>0</sub>.

## 5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P. A.; DRUMOND, L. C. D.; FELIPINI, T. M.; PONTES, P. O.; SILVA, A. M. Características de crescimento de pastagens irrigadas e não irrigadas em ambiente de cerrado. **Fazu em Revista**, Uberaba, v.2, n.1, p. 22-26, 2005.

- ALENCAR, C. A. B.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; OLIVEIRA, R. A. Altura de capins e cobertura do solo sob adubação nitrogenada, irrigação e pastejo nas estações do ano irrigação e pastejo nas estações do ano. **Acta Scientiarum, Agronomy**, Maringá, v. 32, n.1, p. 21-27, 2010.
- ALENCAR, C. A. B.; CUNHA, F. F.; MARTINS, C. E. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, p. 98-108, 2009a. Suplemento Especial.
- ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; FIGUEIREDO, J. L. A.; CUNHA, F. F. Lâminas de irrigação e estações anuais na cobertura do solo e altura de gramíneas cultivadas sob corte. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.31, n.3, p.467-472, 2009b.
- ALENCAR, C. A. B; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de seis gramíneas manejadas por corte sob efeito de diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Ciência Agrotécnológica**, Lavras, v.33, n.5, p.1307-1313, 2009c.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper 56).
- AYARS, J.E.; FULTON, A; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California - Here to stay? **Agricultural Water Management**, v. 157, p. 39-47, 2015.
- AZEVEDO, H. M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139, p. 40-53, 1986.
- COOPER, J. P.; TANTON, N. M. Ligth and temperature requeriments for growth of tropical and temperate grasses. Review article. **Herbage Abstracts**, v. 38, p. 167-176, 1968.
- CRUZ, P. G.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ARAUJO, L. C. Modelos empíricos para estimar o acúmulo de matéria seca de capim-marandu com variáveis agrometeorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 7, p.6 75-681, 2011.
- DA SILVA, S. C. Uso da interceptação de luz como critério de manejo do pastejo. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 8. Lavras, 2011. **Anais ...** Lavras: UFLA, p. 79-98. 2011.
- DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C. A. M. B.; BERGONCI, J. I.; FLÁVIA COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 780-790, 2010.
- DANTAS, G. F.; FARIA, R. T.; SANTOS, G. O.; DALRI, A. B.; PALARETTI, L. F. Produtividade e qualidade da brachiaria irrigada no outono/inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36,

n. 3, p. 469-481, 2016. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p469-481/2016>

- DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia, 2014.
- DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. **Irrigação de pastagens**. Uberaba: FAZU, 2005.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. v. 2, Rio de Janeiro, 2006.
- EUCLIDES, V. P. B.; VALLE, C. B.; MACEDO, M. C. M.; ALMEIDA, R. G.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A. Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 151-168, 2010.
- GARDNER, A. L. **Técnicas de pesquisa em pastagens e aplicabilidade de resultados em sistema de produção**. Brasília: IICA/EMBRAPA-CNPGL, p.197, 1986.
- GIACOMINI A. A; DA SILVA, S. C.; SARMENTO, D. O. L.; ZEFERINO, C. V.; SOUZA JÚNIOR, S. J.; TRINDADE, J. K.; GUARDA, V. A.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Growth of marandu palisadegrass subjected to strategies of intermitente stocking. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 733-741, 2009.
- JARQUE, C., BERA, A. Efficient tests for normality homoskedasticity and serial independence of regression residuals. **Econometric Letters**, v. 6, p. 255-259, 1980.
- KELLER, J.; BLIESNER, I. D. Sprinkler and trickle irrigation. **New York: Van Nostrand Reinhold**, 1990. 652p.
- LARA, M. A. S. **Respostas morfofisiológicas de cinco cultivares de Brachiaria spp. às variações estacionais da temperatura do ar e do fotoperíodo**. 2007. 91p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, p. 120-125, 1956.
- LOPES, M. N.; POMPEU, R. C. F. F.; SILVA, R. G.; REGADAS FILHO, J. G. L.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, M. A. Fluxo de biomassa e estrutura do dossel em capim braquiária manejado, sob lâminas de irrigação e idades de crescimento. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 2, p. 490-500, 2014.
- LUZ, P. H. C.; HERLING, V. R.; BRAGA, G. J.; NOGUEIRA FILHO, J. C. M.; FARIA, L. A.; LIMA, C. G. Resposta da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) à irrigação por aspersão e adubação nitrogenada. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 421-426, 2008.
- MELO, J. C.; SANTOS, A. C.; ALMEIDA, J. A.; MORAIS NETO, L. R. Desenvolvimento e produtividade dos capins mombaça e marandu cultivadas em dois solos típicos do Tocantins com diferentes regimes hídricos. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 10, n. 4, p. 786-800, 2009.

- PACIULLO, D. S. C.; LOPES, F. C. F.; MALAQUIAS JUNIOR, J. D.; VIANA FILHO, A.; RODRIGUEZ, N. M.; MORENZ, M. J. F.; AROEIRA, L. J. M. Características do pasto e desempenho de novilhas em sistema silvipastoril e pastagem de braquiária em monocultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1528-1535, 2009.
- PAIVA, R.; OLIVEIRA L.M. **Fisiologia e produção vegetal**. Lavras: UFLA, 2006.
- PEREIRA, L. E. T.; PAIVA, A. J.; GEREMIA, E. V.; SILVA, S. C. Components of herbage accumulation in elephant grass cvr Napier subjected to strategies of intermittent stocking management. **Journal of Agricultural Science**, v. 152, p. 954-966, 2014. <https://doi.org/10.1017/S0021859613000695>
- PINTO, J. C.; GOMIDE, J. A.; MAESTRI, M. Produção de matéria seca e relação folha/caule de gramíneas forrageiras tropicais, cultivadas em vasos, com duas doses de nitrogênio. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v. 23, p. 313-326, 1994.
- RODRIGUES, D. C. **Produção de forragem de cultivares de Brachiaria brizantha (Hochst ex A. Rich) Stapf e modelagem de respostas produtivas em função de variáveis climáticas**. 2004. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- RODRIGUES, R. C.; MOURÃO, G. B.; BRENNECKE, K.; LUZ, P. H. de C.; HERLING, V. R. Produção de matéria seca, relação folha/colmo e alguns índices de crescimento do Brachiaria brizanthacv. Xaraés cultivado com a combinação de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 3, p. 394-400, 2008.
- ROLIM, F.A. Estacionalidade de produção de forrageiras. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C. de; FARIA, V.P. de (Ed.). **Pastagens: fundamentos da exploração racional**. 2.ed. Piracicaba: FEALQ, 1994. p.533-565.
- SANTOS, D. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; VILELA, L.; FERNANDES, F. D.; FRANÇA, A. F. S.; GOETZ, B. P.; OVÍDIO, S. L. S.; LEMOS, R. L. Radiação solar e sua influência na massa seca de forragem do capim Piatã em sistema silvipastoril. **XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA** - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória ES, 12 a 14 de maio de 2014.
- SANTOS, M. E. R.; FONSECA, D. M.; BALBINO, E. M.; SILVA, S. P.; MONNERAT, J. P. S. Valor nutritivo de perfilhos e componentes morfológicos em pastos de capim-braquiária diferidos e adubados com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 1919-1927, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000900009>
- SILVA, F. F.; SÁ, J. F.; SCHIO, A. R.; ÍTAVO, L. C. V.; SILVA, R. R.; MATEUS, R. G. Suplementação a pasto: disponibilidade e qualidade x níveis de suplementação x desempenho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, p. 371-389, 2009.

- SOUZA JUNIOR, S. J. **Estrutura do dossel, interceptação de luz e acúmulo de forragem em pastos de capim-marandu submetidos a estratégias de pastejo rotativo por bovinos de corte**. 2007. 122f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 577-582, 2006.
- TONATO, F. **Determinação de parâmetros produtivos de Cynodon spp. em função de variáveis climáticas**. 2003. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- VILLA NOVA, N. A.; BARIONI, L. G.; PEDREIRA, C. G. S.; PEREIRA, A. R. Modelo para previsão da produtividade de capim elefante em função da temperatura do ar, fotoperíodo e frequência de desfolha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 75-79, 1999.
- WILSON, J.R.; T'MANNETJE, L. Senescence, digestibility and carbohydrate content of buffel grass and green panic leaves in swards. **Australian Journal Agricultural Research**, v. 29, p. 503-519, 1978.
- YANG, M.D.; YANFUL, E.K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water Table conditions. **Advances in Environmental Research**, v. 6, p. 505-521, 2002.