



JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA
ASSOCIADA A UM POVOAMENTO CLONAL
DE EUCALIPTO**

LAVRAS-MG

2016

JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA ASSOCIADA A UM
POVOAMENTO CLONAL DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

Co-orientador

Dr. José Márcio de Mello

LAVRAS-MG

2016

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

Melo Neto, José de Oliveira.

Modelagem hidrometeorológica associada a um povoamento
clonal de eucalipto / José de Oliveira Melo Neto. – Lavras : UFLA,
2016.

264 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Balanço hídrico florestal. 2. Perdas por interceptação. 3.
Precipitação interna. 4. Escoamento pelo tronco. 5. Umidade do
solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**MODELAGEM HIDROMETEOROLÓGICA ASSOCIADA A UM
POVOAMENTO CLONAL DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 18 de março de 2016.

Dr. José Márcio de Mello	UFLA
Dr. Marcelo Ribeiro Viola	UFLA
Dr. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi	UFLA
Dr. Antônio Marciano da Silva	UNIFAL-MG/ICT

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

**LAVRAS-MG
2016**

A minha amada mãe Maria José Souza Melo (*in memorian*) que nunca mediu esforços para que eu alcançasse todos os meus sonhos e com muito amor e dedicação foi a minha orientadora da vida pregando o caminho da retidão e sensatez.

A meu pai José Carlos Santos Melo e a meu irmão Matheus Eusek Souza Melo, pilares fundamentais da minha vida, pelo carinho e paciência a mim cedidos nestes anos em que estive distante geograficamente.

A minha avó Maria da Graças Santos (*in memorian*) e a meu avô José de Oliveira Melo (*in memorian*) pelo conforto e apoio incondicional em minhas decisões.

À FAMÍLIA, instituição divina que, apesar de singela como uma flor, é forte como uma rocha e nunca nos falta nos momentos de maior necessidade.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela formação profissional e estrutura física fornecida para realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo ao longo do doutorado.

A meu orientador, Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello, pela confiança dedicada a mim ao longo desta jornada.

A todos os professores do PPGRHSA e em especial, aos professores José Márcio e Marcelo Viola pelos ensinamentos e dedicação em solucionar os desafios encontrados ao longo da realização deste estudo.

A minha “namorada”, Danielle Guimarães, que com muita paciência, compreensão e atenção me ajudou a chegar neste momento contribuindo pessoalmente e profissionalmente com este trabalho.

Aos colegas de pesquisa Sérgio, Rubens, Uilson, Gustavo, André e Renato que contribuíram diretamente com a execução deste trabalho, me auxiliando nas atividades de campo e aos colegas Alisson, José Alves e Matheus nos vários momentos de discussão deste estudo.

A todos os colegas do PPGRHSA pela convivência proporcionada e pelos momentos de descontração.

A todos aqueles que contribuíram de forma indireta para a conquista deste título.

Muito Obrigado!

“Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura!”

Ditado popular que expressa a dinâmica complexa da água no meio

“Não é nossa função controlar todas as marés do mundo, mas sim fazer o que pudermos para socorrer os tempos em que estamos inseridos, erradicando o mal dos campos que conhecemos, para que aqueles que viverem depois tenham terra limpa para cultivar. Que tempo encontrarão não é nossa função determinar.”

Gandalf – O Senhor dos Anéis. J. R. R. Tolkien

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano!”

Sir Isaac Newton

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a análise detalhada do processo de redistribuição da água da chuva para o solo a partir da interceptação do dossel de uma floresta clonal de *Eucalyptus* e como esta afeta as condições hidrometeorológicas do seu entorno. Foram realizadas as caracterizações dendrométrica e edafoclimática da área e relacionando estas características a três espaçamentos (3 x 2, 3 x 3 e 3 x 5 metros) e aos seus efeitos no balanço hídrico florestal (BHF). Para realização do BHF foram estudadas as variáveis: precipitação interna (Pi), escoamento pelo tronco (EsT), escoamento superficial direto (ESd) e variação do armazenamento de água no perfil do solo (Δ Arm) aplicados na estimativa da evapotranspiração real (ETr). A ETr foi decomposta em perdas por interceptação (IL), evaporação da água do solo (Es) e transpiração real (Tr). O maior incremento em volume de madeira ocorreu no espaçamento 3 x 2 metros enquanto que o menor se deu no 3 x 5 metros. A Pi observada foi 72,7 % da precipitação externa (PG), enquanto que o EsT foi 3,1 % da PG. A Pi apresentou-se estruturada espacialmente com forte grau de dependência espacial e baixos erros entre os dados observados e estimados. Foi observado um aumento gradual da Pi com o aumento do espaçamento atingindo uma diferença de 10,43 % entre os espaçamentos 3 x 2 e 3 x 5 metros. O EsT apresenta incremento com o aumento do volume precipitado. As perdas por interceptação da precipitação foram maiores no espaçamento 3 x 2 metros (601,5 mm), seguida pelo 3 x 3 metros (539,9 mm) e 3 x 5 metros (342,9 mm). A lâmina total de ESd foi de 163,1 mm no período analisado. O armazenamento de água no perfil do solo tende a reduzir no sentido Nordeste/Sudoeste no povoamento, com o espaçamento 3 x 2 metros apresentando o maior armazenamento (42,7 mm) e o 3 x 5 metros o menor armazenamento (18,8 mm). A ETr estimada no período foi de 1631,3 mm, equivalente a 102,7 % da precipitação incidente (PG),

indicando retirada de água no perfil do solo. A Es foi de 82,8 mm (5,2 % da PG). A Tr estimada para o povoamento foi de 1107,3 mm (69,7 % da PG). O espaçamento 3 x 2 metros mostrou-se mais eficiente com consumo de 14,4 mm.m⁻³, seguido do 3 x3 metros (28,0 mm.m⁻³) e 3 x 5 metros (31,7 mm.m⁻³).

Palavras-chave: Balanço hídrico florestal. Perdas por interceptação. Precipitação interna. Escoamento pelo tronco. Umidade do solo.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the rainfall partitioning process from a clonal *Eucalyptus* forest canopy to the soil as well as its effect over the hydro-meteorological conditions of the area. It were carried out both dendrometric and edapho-climatic characterizations of the area relating them to three spacing of plantation (3 x 2; 3 x 3; 3 x 5 m) and to the effects in the water budget of the forest. For water budget conduction, the following variables were studied: throughfall (Pi), stemflow (EsT), overland flow (ESd) and soil-water storage variation in the soil profile (Δ Arm), having the evapotranspiration as output (ETr). ETr was split into canopy interception (IL), soil evaporation (Es) and transpiration (Tr). A greater increase in the volume of the trees was observed for 3 x 2 m spacing while the lesser was observed for 3 x 5 m. Observed throughfall accounted for 72.7% of gross precipitation and steamflow, 3.1%. Applying geostatistical procedures, we observed that throughfall has presented spatially structured with strong spatial dependence degree and low estimated errors. It was also observed a gradual increase in the throughfall values as the spacing is increased, being observed a difference of 10.43% between 3 x 2 m spacing compared to 3 x 5 m spacing. In addition, the greater the total rainfall the greater observed stemflow. Greater interception losses were observed for 3 x 2 m spacing (601.5 mm), followed by 3 x 3 m (539.9 mm) and 3 x 5 m (342.9 mm). Observed overland flow throughout the studied period accounted for 163.1 mm. Water storage in the soil profile tends to decrease in the Northeastern/Southwestern direction whereas 3 x 2 spacing presented greater storage (42.7 mm) and 3 x 5 m, the lesser storage (18.8 mm). Observed evapotranspiration in the period was 1631.1 mm (from water budget), which means 102.7% of the gross precipitation, showing that the roots were supplied by water storage in the soil. Soil evaporation corresponded in the observed

period to 82.8 mm (5.2 % of the gross precipitation). Estimated transpiration was 1107.3 mm (69.7% of gross precipitation), with 3 x 2 m spacing showing greater efficient in terms of water use (14.4 mm.m^{-3}), followed by 3 x 3 m (28.0 mm.m^{-3}) and 3 x 5 m (31.7 mm.m^{-3}).

Keywords: Forest water balance. Interception losses. Throughfall. Stemflow. Soil moisture.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1 Componentes do ciclo hidrológico em ambiente florestal34

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA E EDAFOCLIMÁTICA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus* NO SUL DE MINAS GERAIS

Figura 1 Localização da área experimental 60

Figura 2 Distribuição espacial dos espaçamentos no povoamento 61

Figura 3 Coletor de biomassa depositada na serrapilheira..... 65

Figura 4 Distribuição espacial dos postos meteorológicos 66

Figura 5 Distribuição dos pontos amostrados para caracterização da densidade e porosidade do solo em profundidade 68

Figura 6 Distribuição dos pontos para caracterização da condutividade hidráulica do solo saturado 70

Figura 7 Mapa hipsométrico do eucaliptal..... 72

Figura 8 Mapa de declividade do eucaliptal 73

Figura 9 Estimativa da altura total no povoamento de eucalipto em 2013 (a) e 2015 (b)..... 75

Figura 10 Distribuição espacial das classes de solo do eucaliptal 86

Figura 11 Distribuição espacial da densidade do solo nas profundidades de 10 (a), 20 (b), 30 (c), 40 (d) e 100 cm (e) 90

Figura 12 Distribuição espacial da porosidade do solo nas profundidades de 10 (a), 20 (b), 30 (c), 40 (d) e 100 cm (e) 91

Figura 13 Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado no eucaliptal..... 92

CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO DA PRECIPITAÇÃO INTERNA E ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO TRONCO EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus*

Figura 1 Localização geográfica da área experimental e dos postos pluviométricos utilizados	107
Figura 2 Distribuição espacial dos pluviômetros no interior do povoamento de eucalipto.....	111
Figura 3 Pluviômetros “Ville de Paris” (a) e automático (b) e calha (c)	112
Figura 4 Coletor de escoamento no tronco utilizado no monitoramento	116
Figura 5 Projeção vertical da copa e suas subdivisões em função do eixo do tronco da árvore	117
Figura 6 Gráficos utilizados na análise exploratória para o mês de março.....	129
Figura 7 Semivariogramas ajustados para os dados de porcentagem média da precipitação interna no período de janeiro a junho no povoamento de eucalipto	132
Figura 8 Semivariogramas ajustados para os dados de porcentagem média da precipitação interna no período de julho a dezembro no povoamento de eucalipto	133
Figura 9 Semivariogramas ajustados para os dados de porcentagem da precipitação interna para os totais anuais, período chuvoso e seco dos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 no povoamento de eucalipto.....	134
Figura 10 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os meses de janeiro a junho.....	136
Figura 11 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os meses de julho a dezembro	137
Figura 12 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os períodos chuvosos, secos e os anos hidrológicos de 13/14 e 14/15.....	138

Figura 13 Espacialização da porcentagem das perdas por interceptação para os períodos chuvosos, secos e os anos hidrológicos de 13/14 e 14/15 150

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DAS PERDAS POR INTERCEPTAÇÃO EM UM PLANTIO DE *Eucalyptus*

Figura 1 Fluxograma do modelo de Gash para florestas esparsas 167

Figura 2 Pontos de monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco no povoamento de eucalipto 172

Figura 3 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os períodos secos dos anos hidrológicos de 2013/2014 (*a, c e e*) e 2014/2015 (*b, d e f*), respectivamente..... 190

Figura 4 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os períodos chuvosos dos anos hidrológicos de 2013/2014 (*a, c e e*) e 2014/2015 (*b, d e f*), respectivamente 191

Figura 5 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os totais anuais dos anos hidrológicos de 2013/2014 (*a, c e e*) e 2014/2015 (*b, d e f*), respectivamente..... 192

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO E MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM FLORESTA DE EUCALIPTO

Figura 1 Distribuição espacial das parcelas de monitoramento do ESd (a) e detalhes da parcela (b) 209

Figura 2 Distribuição espacial dos pontos de monitoramento da umidade do solo no povoamento de eucalipto 212

Figura 3 Distribuição espacial da variação de armazenamento de água no perfil do solo no povoamento de eucalipto..... 231

CAPÍTULO 6 – BALANÇO HÍDRICO EM UMA FLORESTA PLANTADA DE *Eucalyptus*

Figura 1 Localização geográfica da área experimental..... 241

Figura 2 Pontos de monitoramento da P_i , E_sT e θ no eucaliptal242

Figura 3 Monitoramento da precipitação interna (a), escoamento pelo tronco (b),
escoamento superficial direto (c) e umidade do solo (d) na área experimental
.....244

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA E EDAFOCLIMÁTICA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus* NO SUL DE MINAS GERAIS

Gráfico 1 Distribuição diamétrica do povoamento no início e fim do monitoramento..... 74

Gráfico 2 Produção de biomassa e estoque de carbono no eucaliptal..... 78

Gráfico 3 Temperaturas médias (a), mínimas (b) e máximas (c) para os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 em Lavras 79

Gráfico 4 Distribuição mensal e anual da velocidade do vento para o município de Lavras..... 80

Gráfico 5 Distribuição mensal e anual da umidade relativa do ar para o município de Lavras..... 81

Gráfico 6 Distribuição mensal da precipitação pluvial para o município de Lavras 82

Gráfico 7 Distribuição mensal da evapotranspiração da cultura do eucalipto para o município de Lavras..... 82

Gráfico 8 Distribuição média mensal e anual das temperaturas médias (a), mínimas (b) e máximas (c) e umidade relativa do ar (d) externa e interna ao povoamento de eucalipto em Lavras..... 85

CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO DA PRECIPITAÇÃO INTERNA E ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO TRONCO EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus*

Gráfico 1 Número de eventos (a) e lâmina total precipitada (b) por classe de chuva..... 120

Gráfico 2 Intensidade média dos eventos por classe de chuva 122

Gráfico 3 Distribuição dos padrões hidrológicos da precipitação externa e interna em um povoamento de eucalipto	123
Gráfico 4 Erosividade média mensal externa e interna ao povoamento de eucalipto.....	126
Gráfico 5 Escoamento no tronco em função de classes diamétricas em um povoamento de eucalipto	141
Gráfico 6 Lâmina (a) e porcentagem (b) do escoamento pelo tronco por classe de chuva em povoamento de eucalipto.....	142
Gráfico 7 Série simulada de escoamento pelo tronco para o povoamento de eucalipto.....	144
Gráfico 8 Regressões entre lâmina precipitada (PE) e escoada pelo tronco (EsT) por classe diamétrica em povoamento de eucalipto.....	145
Gráfico 9 Lâmina (a) e porcentagem (b) do escoamento pelo tronco por classe diamétrica para os períodos secos e chuvosos em povoamento de eucalipto ...	147
Gráfico 10 Regressões entre lâmina precipitada externa (PG) e escoada pelo tronco (EsT) para os períodos seco e chuvoso em um povoamento de eucalipto	148

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DAS PERDAS POR INTERCEPTAÇÃO EM UM PLANTIO DE *Eucalyptus*

Gráfico 1 Perdas por interceptação observadas e estimadas e estatísticas de precisão associados ao modelo de Gash para florestas com dossel esparso ajustado para um povoamento de eucalipto	184
Gráfico 2 Escoamento pelo tronco observados e estimados e estatísticas de precisão associados ao modelo de Gash para florestas com dossel esparso ajustado para um povoamento de eucalipto	185
Gráfico 3 Precipitação interna observada e estimada e estatísticas de precisão associados ao modelo de Gash para florestas com dossel esparso ajustado para um povoamento de eucalipto	186

Gráfico 4 Perdas por interceptação da precipitação observadas e estimadas para os períodos analisados em um povoamento de eucalipto 188

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO E MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM FLORESTA DE EUCALIPTO

Gráfico 1 Distribuição temporal do escoamento superficial direto observado na área..... 216

Gráfico 2 Distribuição empírica dos dados de umidade do solo por camada ... 220

Gráfico 3 Séries históricas da umidade média do solo por camada no povoamento de eucalipto 221

Gráfico 4 Diferença média relativa e desvio padrão da umidade do solo para as camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-30 cm (c) 222

Gráfico 5 Diferença média relativa e desvio padrão da umidade do solo para as camadas de 30-40 cm (a) e 60-100 cm (b)..... 223

Gráfico 6 Correlação entre a umidade média do solo e os pontos representativos encontrados para cada camada de solo no eucaliptal..... 225

Gráfico 7 DRm da umidade do solo para o período chuvoso em um povoamento de eucalipto 228

Gráfico 8 DRm da umidade do solo para o período seco em um povoamento de eucalipto..... 229

CAPÍTULO 6 – BALANÇO HÍDRICO EM UMA FLORESTA PLANTADA DE *Eucalyptus*

Gráfico 1 Séries de umidade média e variação do armazenamento no perfil do solo no povoamento de eucalipto..... 250

Gráfico 2 Séries de evapotranspiração real e precipitação para o povoamento de eucalipto..... 251

Gráfico 3 Relação entre ETr e PG para os períodos secos e chuvoso em função do manejo empregado no eucaliptal 252

Gráfico 4 Séries de Tr e Etr para o povoamento de eucalipto	255
Gráfico 5 Relação entre os índices ITr e S θ para o eucaliptal	256

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA E EDAFOCLIMÁTICA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus* NO SUL DE MINAS GERAIS

Tabela 1 Limites das classes diamétricas aplicadas neste estudo	63
Tabela 2 Características dendrométricas em função do espaçamento	76
Tabela 3 Valores médios, máximos e mínimos do IAF no plantio de eucalipto	76
Tabela 4 Dados da análise de solo no eucaliptal.....	87
Tabela 5 Dados médios, máximos e mínimos de densidade e porosidade do solo em perfil no eucaliptal	87
Tabela 6 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos físicos do solo no eucaliptal	88

CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO DA PRECIPITAÇÃO INTERNA E ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO TRONCO EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus*

Tabela 1 Intervalos de classe para precipitação diária.....	108
Tabela 2 Quantidade de coletores de escoamento no tronco em função da distribuição diamétrica do povoamento	115
Tabela 3 Características físicas da precipitação externa por padrão de chuva para o município de Lavras entre 2013 e 2015.....	124
Tabela 4 Características físicas da precipitação interna por padrão de chuva para o povoamento de eucalipto entre 2013 e 2015.....	125
Tabela 5 Estatística descritiva da porcentagem da precipitação interna para o povoamento de eucalipto	127
Tabela 6 Estatísticas de precisão aplicadas na análise espacial da porcentagem da precipitação interna em um povoamento de eucalipto	130

Tabela 7 Porcentagem e lâmina correspondente em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto 139

Tabela 8 Peso de cada classe diamétrica na geração da série simulada de escoamento pelo tronco no povoamento de eucalipto 143

Tabela 9 Razão de afunilamento para cada classe diamétrica no povoamento de eucalipto..... 148

Tabela 10 Porcentagem e lâmina correspondente das perdas por interceptação em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto..... 151

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DAS PERDAS POR INTERCEPTAÇÃO EM UM PLANTIO DE *Eucalyptus*

Tabela 1 Amplitude dos parâmetros aplicados ao modelo de Gash para florestas esparsas em um povoamento de eucalipto 179

Tabela 2 Valores médios por espaçamento do plantio de eucalipto dos parâmetros aplicados no modelo de Gash para florestas com dossel esparso... 182

Tabela 3 Aplicações do modelo de Gash para florestas com dossel esparso.... 193

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO E MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM FLORESTA DE EUCALIPTO

Tabela 1 Características físico-hídricas do solo e topográficas para as parcelas de monitoramento do ESd 210

Tabela 2 Classes de chuva aplicadas na análise do ESd 211

Tabela 3 Valores médios de C e Cr em função da LAS para o eucalipto 218

Tabela 4 Estatísticas descritivas da umidade média do solo para o povoamento de eucalipto 219

Tabela 5 Diferença Média Relativa da umidade do solo por espaçamento no povoamento de eucalipto 226

Tabela 6 Variação do armazenamento de água por camada de solo no povoamento de eucalipto	230
------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CAPÍTULO 6 – BALANÇO HÍDRICO EM UMA FLORESTA PLANTADA DE Eucalyptus

Tabela 1 Variáveis de entrada do balanço hídrico por manejo florestal empregado no povoamento de eucalipto estudado	248
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Tabela 2 Variáveis de entrada do balanço hídrico para os períodos seco e chuvoso no povoamento de eucalipto estudado.....	249
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Tabela 3 Dados de transpiração real estimados em função do espaçamento e dos períodos secos e chuvoso estudados	255
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Tabela 4 Relação entre incremento de madeira e consumo hídrico em função do espaçamento em um povoamento de eucalipto.....	257
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

LISTA DE SIGLAS

AB	Área basal
BHF	Balanço hídrico florestal
BS	Biomassa da serrapilheira
c	Fator de cobertura
C	Coefficiente de escoamento superficial
CAP	Circunferência a 1,3 m de altura com casca
Cr	Coefficiente de escoamento superficial real
DAP	Diâmetro a 1,3 metros de altura
Ds	Densidade do solo
\bar{E}	Taxa média de evaporação
\bar{E}_c	Taxa média de evaporação do dossel por unidade de área coberta
Ec	Energia cinética
E_{c_i}	Energia cinética de cada incremento de chuva
ECS	Estoque de carbono na serrapilheira
EI_{30}	Erosividade da chuva
EM	Erro Médio
EMR	Erro Médio Relativo
Es	Evaporação da água do solo
ES	Espessura da serrapilheira
ESd	Escoamento superficial direto
EsT	Escoamento no tronco
ETr	Evapotranspiração real
ETP	Evapotranspiração potencial
F	Razão de Afunilamento
GD	Grau de Dependência Espacial
HT	Altura total das árvores

I	Intensidade média da chuva
I_{30}	Intensidade máxima consecutiva em 30 minutos
IAF	Índice de área foliar
IL	Perdas por interceptação
ITr	Proporção da transpiração em função da evapotranspiração potencial
k	Coefficiente de extinção
L	Índice de área foliar
LAS	Lâmina real de água que atinge o solo
K_{SAT}	Condutividade hidráulica do solo saturado
LP	Lâmina precipitada do incremento de chuva
p	Coefficiente de precipitação livre
PG	precipitação externa ou incidente
Pi	Precipitação interna
$P'g$	Quantidade de precipitação necessária para saturar o dossel
$P''g$	Quantidade de precipitação incidente necessária para saturar o tronco
R	Intensidade média da precipitação externa
ra	Resistência aerodinâmica
rs	Resistência estomática
Sc	Capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área coberta
S_{ER}	Desvio Padrão dos Erros Reduzidos
SF	Lâmina escoada pelo tronco
TE	Tendência de Estimativa
TF	Precipitação interna
Tr	Transpiração real
VM	Volume de madeira

VTP	Volume total de poros
ΔArm	Variação do armazenamento de água no perfil do solo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	29
1 INTRODUÇÃO	29
2 REFERENCIAL TEÓRICO	31
2.1 Hidrologia Florestal	32
2.2 Florestas plantadas de eucalipto.....	39
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA E EDAFOCLIMÁTICA EM UM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus</i> NO SUL DE MINAS GERAIS	50
1 INTRODUÇÃO	53
1.1 Relações clima e floresta	55
1.2 Relações solo e floresta.....	57
2 MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1 Mensurações florestais.....	62
2.2 Análises meteorológicas	65
2.3 Análises edáficas.....	67
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
3.1 Caracterização dendrométrica.....	73
3.2 Caracterização climática	78
3.3 Caracterização edáfica	86

4 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS.....	94
CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO DA PRECIPITAÇÃO INTERNA E ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO TRONCO EM UM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus</i>	100
1 INTRODUÇÃO	103
2 MATERIAL E MÉTODOS	107
2.1 Erosividade e padrão hidrológico da precipitação	108
2.2 Variabilidade espacial da precipitação interna.....	110
2.3 escoamento no tronco.....	115
2.4 Perdas por interceptação	118
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
3.1 Análise da erosividade e padrões hidrológicos da precipitação interna..	121
3.2 Análise exploratória dos dados de precipitação interna.....	127
3.3 Mapeamento da precipitação interna	129
3.4 Dinâmica do escoamento no tronco.....	140
3.5 Perdas por interceptação da precipitação	149
4 CONCLUSÕES	153
REFERÊNCIAS.....	154
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DAS PERDAS POR INTERCEPTAÇÃO EM UM PLANTIO DE <i>Eucalyptus</i>	160
1 INTRODUÇÃO	162
1.1 Modelagem das perdas por interceptação da precipitação.....	164

2 MATERIAL E MÉTODOS	169
2.1 Modelagem das perdas por interceptação	172
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	179
3.1 Parametrização do modelo de Gash para florestas esparsas	179
3.2 Análise de desempenho do modelo de Gash esparsa para um povoamento de eucalipto	183
4 CONCLUSÕES	194
REFERÊNCIAS.....	195
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO E MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM FLORESTA DE EUCALIPTO.....	202
1 INTRODUÇÃO	205
2 MATERIAL E MÉTODOS	209
2.1 Monitoramento do escoamento superficial direto (ESd)	209
2.2 Monitoramento da umidade do solo	211
2.3 Estudo da estabilidade temporal da umidade e variação do armazenamento no perfil do solo	213
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	216
3.1 Comportamento do escoamento superficial direto.....	216
3.2 Caracterização da umidade do solo.....	219
3.3 Estabilidade temporal da umidade do solo em Latossolo ocupado por eucalipto.....	222
3.4 Variação de armazenamento da água no solo	230
4 CONCLUSÕES	232

REFERÊNCIAS.....	233
CAPÍTULO 6 – BALANÇO HÍDRICO EM UMA FLORESTA PLANTADA DE <i>Eucalyptus</i>	236
1 INTRODUÇÃO	238
2 MATERIAL E MÉTODOS	241
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	248
3.1 Análise dos componentes do balanço hídrico florestal.....	248
3.2 Estimativa da evapotranspiração real.....	250
3.3 Análise da transpiração real e consumo hídrico por um povoamento de eucalipto.....	254
4 CONCLUSÕES	259
REFERÊNCIAS.....	260

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

A essencialidade da água está intrinsecamente ligada à manutenção da vida na Terra, seja na dinâmica climática global, produção de alimentos, dessedentação da grande maioria dos organismos vivos ou na manutenção dos processos fisiológicos destes.

Por sua vez, as atividades antrópicas desenvolvidas ao longo do tempo não deram enfoque ao uso sustentável deste recurso, promovendo grandes modificações na cobertura do solo, alterações no fluxo natural de rios, despejo de resíduos diversos sem tratamento, fatores estes que promovem a depreciação dos recursos hídricos e favorecem o conflito entre seus usuários.

O aumento populacional tem como consequência a elevada demanda por matéria-prima e expansão das fronteiras de produção agrícola e silvícola. Neste cenário, os plantios de florestas homogêneas representam uma alternativa para reduzir a exploração vegetal das florestas nativas, além de atender de modo mais eficaz a demanda madeireira, uma vez que esses plantios possuem elevada produtividade.

Entretanto, vários questionamentos associados à perda de diversidade dos ecossistemas naturais com respectivo aumento da fragilidade ambiental, principalmente no tocante aos recursos hídricos, surgem com a implantação de empreendimentos florestais comerciais em larga escala.

A hidrologia florestal trata da dinâmica da água no ambiente de uma floresta e suas interações com as variáveis ambientais locais. Tradicionalmente, a floresta é vista como eficaz para estabilizar e manter o regime hídrico de uma determinada área, uma vez que melhora a estrutura do solo, favorecendo os

processos de infiltração e armazenamento de água, e reduz os impactos decorrentes da erosão do solo.

Os ecossistemas florestais desempenham uma importante função na captação e redistribuição de água da chuva, e, conseqüentemente, no processo de suprimento de água para a recarga dos aquíferos. Assim, as florestas apresentam estreita relação com o ciclo hidrológico, atuando de forma significativa no balanço vertical da água e, conseqüentemente, na distribuição de água que abastece os aquíferos.

Desta maneira, compreender os efeitos dinâmicos das interações entre a cobertura florestal e os componentes do ciclo hidrológico e como a floresta atua efetivamente no particionamento destes componentes traz informações imprescindíveis para uma gestão eficiente dos recursos água/floresta em uma bacia hidrográfica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A água é um dos elementos essenciais para a manutenção da vida, ocorrendo naturalmente em todos os estados físicos e percorrendo os diferentes sistemas atmosféricos, terrestres e subterrâneos, através de ciclos contínuos, impulsionados pela ação da energia solar associada à força gravitacional (SALGUEIRO, 2005).

A limitação dos recursos hídricos tem papel fundamental no desenvolvimento econômico e social de uma região. A Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura (UNESCO, 2003) apresentou em relatório uma ampla análise da disponibilidade dos recursos hídricos, sendo mencionado que para 1,1 bilhão de habitantes não existe água em quantidade suficiente para garantir nem mesmo as necessidades básicas.

O Brasil nesse sentido é considerado um país privilegiado, pois apresenta grande disponibilidade hídrica, porém, a sua distribuição espacial, é moldada por uma acentuada distorção. A região Norte tem 68,5% dos recursos hídricos, com 7% da população nacional, enquanto que o Sudeste tem apenas 6% do total das águas para abastecer 42,6% da população (EUCLYDES; FERREIRA; FARIA FILHO, 2005).

De acordo com Tucci (2007), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

Para Melo Neto (2012) a análise do ciclo hidrológico, com base na compreensão dos diversos fenômenos e processos que o regem, é crucial para o desenvolvimento de ações de exploração e conservação dos recursos hídricos, tornando fundamental a discretização dos componentes do ciclo hidrológico e a

indicação das inter-relações destes com o ambiente no qual interagem a fim de caracterizar o comportamento dinâmico da água na paisagem.

Para Tundisi (2001), superpondo-se ao ciclo hidrológico há um ciclo hidrossocial de grande dimensão e impacto ecológico e econômico que advém da diversidade de usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos representados pelas alterações promovidas pelo homem nas diferentes características do ciclo hidrológico.

Dentre os fatores que afetam o ciclo hidrológico tem-se destacado como prioritários em estudos hidrológicos o uso e ocupação dos solos, as classes de solos, o clima e a geomorfologia da área de estudo.

2.1 Hidrologia Florestal

De acordo com Balbinot et al. (2008), os ecossistemas florestais constituídos por parte aérea (árvores) e parte terrestre (solos florestais), desempenham inúmeras funções: (1) mitigação do clima (temperatura e umidade); (2) diminuição do pico do hidrograma (redução de enchentes e recarga para os rios); (3) controle de erosão; (4) melhoramento da qualidade da água no solo e nos rios; (5) atenuação da poluição atmosférica; (6) fornecimento do oxigênio (O_2) e absorção do gás carbônico (CO_2); (7) prevenção contra ação do vento e ruídos; (8) recreação e educação; (9) produção de biomassa; e (10) fornecimento de energia.

A produção de uma floresta é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada pela copa e pela eficiência de conversão dessa radiação em biomassa, em que essa eficiência é influenciada, principalmente, pela disponibilidade de água e de nutrientes (SANTANA et al., 2008).

Para Lima (2008), a hidrologia florestal trata das relações floresta-água, abordando os efeitos da floresta sobre o ciclo hidrológico, incluindo os efeitos sobre a erosão e a qualidade da água nas bacias hidrográficas.

A cobertura vegetal tem um papel importante na regulação dos ciclos biogeoquímicos em bacias hidrográficas principalmente no tocante a interface água-planta (TUNDISI; TUNDISI, 2010).

Segundo Arcova, Cicco e Rocha (2003), a cobertura florestal apresenta uma estreita relação com o ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica, afetando a dinâmica da água na paisagem e em como se dá a sua transferência para a rede de drenagem e atmosfera.

Ávila (2011) afirma que as inter-relações entre a floresta e o ciclo hidrológico tendem a ser afetadas por ações antrópicas podendo acarretar em alterações no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, no potencial hídrico de uma bacia hidrográfica.

Para Almeida, Ribeiro e Leite (2013), conhecer os processos de perda de água e os componentes que atuam de forma efetiva no balanço hídrico expõem informações de grande importância para a realização de um manejo florestal adequado em microbacias com atividade silvicultural.

Desta maneira, torna-se fundamental a compreensão de todos os fenômenos e processos que atuam nas relações água-floresta e como o manejo destes ambientes afetam estas relações. Para tanto, faz-se necessária a caracterização de todos os componentes do ciclo hidrológico tomando como ferramenta o balanço hídrico florestal. Na Figura 1 são apresentados os componentes do ciclo hidrológico sob o prisma florestal, abordagem esta que será utilizada neste estudo.

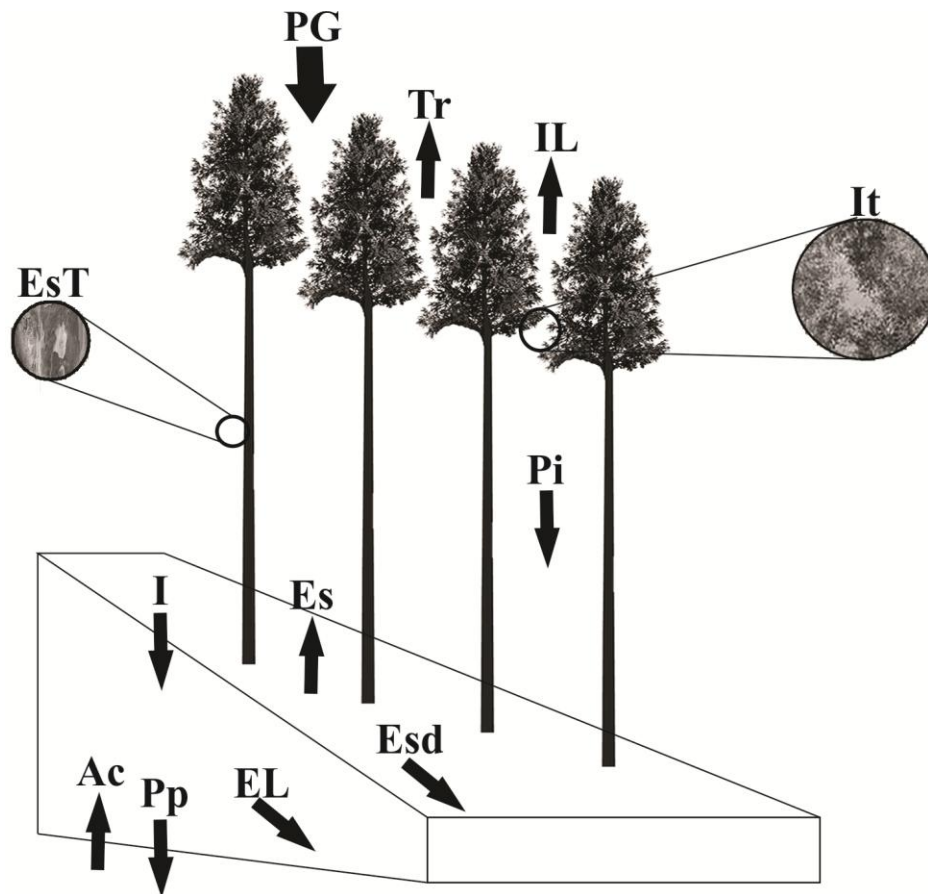


Figura 1 Componentes do ciclo hidrológico em ambiente florestal

O balanço hídrico em ambientes florestais representa uma análise quantitativa dos fluxos de água em áreas com predominância de cobertura florestal onde são avaliadas as entradas de água no sistema (precipitação incidente ou externa - PG, ascensão capilar - Ac, e fluxos laterais de água no solo - EL), as interações com a cobertura e piso florestal (interceptação - It, escoamento pelo tronco - EsT, precipitação interna - Pi, e infiltração da água no solo - I) e as saídas de água no sistema (escoamento superficial direto - ESd,

drenagem profunda - Pp, evaporação da água no solo - Es, evaporação da água armazenada nas superfícies vegetais – IL, e transpiração - Tr).

Tendo a chuva como o principal componente de entrada, a primeira interação com o ambiente florestal se dá com o conjunto de copas que formam o dossel florestal. Esta precipitação incidente é interceptada pelo dossel que redistribui a água por meio do escoamento que ocorre nos troncos e a precipitação interna. Parte da água interceptada é devolvida à atmosfera através da evaporação direta enquanto a mesma encontra-se no dossel florestal.

Segundo Pacheco e Mafra (2012), a interceptação florestal pode ser definida como a capacidade que a floresta possui de reter a chuva nas copas das árvores que, posteriormente, goteja no solo, escoar pelo tronco ou evapora diretamente para a atmosfera.

O processo de interceptação da precipitação pela vegetação descrito por Arcova, Cicco e Rocha (2003) é parte integrante do ciclo hidrológico, entretanto, Oliveira et al. (2008) citam que em muitos estudos esta variável tem sido desprezada. Todavia, estes mesmos autores apontam para grande importância desta variável para o balanço hídrico, sobretudo em áreas com florestas de grande porte.

Crockford e Richardson (2000) afirmam que as características da chuva, principalmente, e outras condições meteorológicas, dificultam a determinação das perdas por interceptação em ambientes florestais. Castro et al. (1983) também admitem que as características da chuva são os elementos de maior influência no processo de interceptação, enquanto que as características do dossel afetam o processo de redistribuição da água da chuva.

A evapotranspiração representa o conjunto formado pelas perdas por evaporação da água retida no dossel, evaporação da água do solo e a transpiração. Em ambientes florestais a evapotranspiração é dinâmica e bastante complexa de ser estimada, enquanto que a mensuração é restrita a escala de

indivíduo apresentando várias condições de contorno, quase sempre em ambiente controlado. Avaliando somente a evaporação, esta é controlada pelas características meteorológicas do ambiente. Já a transpiração, além destes, ocorre como função de fatores biológicos e de manejo.

Para Allen et al. (1998) os condicionantes meteorológicos de maior influência são: radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. Já os fatores biológicos estão basicamente em função da arquitetura do dossel e fase de desenvolvimento do indivíduo, enquanto que os fatores associados ao manejo de maior importância são: a densidade de plantas, fertilidade da área e disponibilidade hídrica.

Souza (2006) afirma que o conhecimento da evapotranspiração contribui para uma utilização mais racional da água em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pela disponibilidade hídrica. Este uso racional é regulado pelo indivíduo por meio dos mecanismos de trocas gasosas, em especial os estômatos.

Avaliar os mecanismos fisiológicos e morfológicos, além da forma como estes respondem ao meio ambiente, é essencial para avaliar a eficiência produtiva da espécie tomando como base o consumo de água para produção de biomassa.

A precipitação interna, também denominada "transprecipitação" (RODRIGUES, 2009), é um componente que apresenta grande variabilidade espacial dentro da floresta. Sua ordem de grandeza varia entre 70 e 80% (RODRIGUES, 2008; PYPKER; TARASOFF; KOH, 2012) do balanço hídrico anual.

Gênova, Honda e Durigan (2007), concluíram que algumas características estruturais e ecológicas do dossel exercem influência sobre os processos hidrológicos em plantios de recuperação da mata ciliar, contudo,

maior interceptação e menor umidade do solo tendem a ocorrer em florestas perenifólias, especialmente naquelas com alta densidade de árvores.

Rodrigues e Costa (2009) mensuraram 9,11% de interceptação e 90,89% de precipitação interna para um povoamento de eucalipto com seis anos de idade. Giglio e Kobiyama (2013), ao analisarem diversos estudos sobre interceptação em florestas plantadas no Brasil, encontraram como medianas para os dados de interceptação e precipitação interna os valores 12,3% e 83,1%, respectivamente.

O compartimento da água oriunda de precipitação e escoada pelo fuste das árvores é de suma importância para a descrição da dinâmica hídrica e de nutrientes sob formação florestal ou agroflorestal. No entanto, segundo Hofhansl et al. (2012), o escoamento pelo tronco tem sido menosprezado em estudos de ecologia de ecossistemas, dentre outros estudos, já que geralmente contribui com menos de 10% da entrada hidrológica no piso florestal.

Um dos pioneiros a estudar o escoamento pelo tronco foi Horton (1919). O autor relata em seu trabalho centenário que esta variável, apesar de ser normalmente desconsiderada, tem sua importância no ciclo hidrológico como uma eficiente forma de reposição de água no solo, alcançando-o em baixa velocidade devido ao atrito com a superfície dos troncos, direcionando-se próximo às raízes e reduzindo o escoamento superficial. Essa parcela de água infiltra-se mais facilmente no solo e favorece o reabastecimento do lençol freático e dos reservatórios subterrâneos.

Cicco et al. (2007) descrevem que o escoamento pelo tronco representa uma pequena parte da precipitação total, variando de 1 a 15% desta. Germer et al. (2012) citam que a porcentagem do escoamento pelo tronco de chuvas incidentes varia de acordo com as florestas e suas diferentes espécies arbóreas.

Hildebrandt, Bawain e Friesen (2012) salientaram que além da quantidade e intensidade das chuvas, a rugosidade do tronco, características

morfológicas da planta, idade do povoamento, diâmetro do tronco e posição da espécie dentro do ecossistema influenciam o escoamento de água pelo tronco.

Após a interação da precipitação incidente com o dossel vegetativo, os volumes da precipitação interna e do escoamento no tronco atingem o solo. As condições de cobertura da superfície do solo associado ao volume recebido irão influenciar no particionamento da água que escoar sobre a superfície e infiltra, dando início ao processo de redistribuição da água no perfil do solo.

No tocante ao escoamento superficial direto, em florestas densas, este componente é desconsiderado na análise do balanço hídrico devido ao forte fechamento do dossel, presença de sub-bosque e serapilheira densa, além de alta condutividade hidráulica saturada do solo, fatores estes que inibem a formação deste componente do escoamento. Entretanto, em ambientes de florestas plantadas faz-se necessária a observação desta variável para identificar como as práticas de manejo afetam a formação da serapilheira e a interação da água com a camada superficial do solo.

Martins et al. (2003) e Trevisan et al. (2012), ao estudarem o efeito de um povoamento de eucalipto no escoamento superficial direto, observaram coeficiente de escoamento superficial entorno de 2%, indicando uma boa cobertura do solo e favorecimento do processo de infiltração em detrimento do escoamento superficial direto.

Outro aspecto relevante no estudo dos efeitos de povoamentos plantados em relação ao escoamento superficial é a análise da erosão hídrica em solos florestais. Silva et al. (2011), avaliaram os efeitos do manejo nas perdas de água e solo em florestas de eucalipto e concluíram que os sistemas de manejo testados (Eucalipto em nível e eucalipto em desnível) são coberturas eficientes na contenção da erosão hídrica, onde os efeitos destas são potencializados com o desenvolvimento da cultura.

O manejo do solo afeta de forma considerável as características físicas do mesmo, interferindo nos processos de infiltração e redistribuição da água no seu perfil. A compreensão da variabilidade da umidade do solo, empregando as escalas espacial e temporal, é fundamental na quantificação da variação do armazenamento de água no perfil do solo, informação esta fundamental em estudos de predição e previsão de cheias, modelagem climática e agrícola (ALBERGEL et al., 2010; BOLTEN et al., 2010; KOSTER et al., 2010; FAMIGLIETTI et al., 2008).

Guswa (2012) atesta que a variabilidade horizontal da umidade do solo é afetada, principalmente, pela variação da precipitação interna e escoamento pelos troncos, enquanto que a variabilidade vertical fica em função das características físicas do perfil do solo e, principalmente, da distribuição do sistema radicular da cobertura vegetal.

Almeida et al. (2014), encontraram valores de infiltração da água no solo em plantios de eucalipto variando entre 78 e 165 mm.h⁻¹ na bacia hidrográfica do Rio Doce, Minas Gerais, valores estes indicativos de boa estrutura dos solos analisados, possivelmente preservada pela floresta. Cabe salientar que a cobertura florestal afeta positivamente as características físico-hídricas do solo devido o grande aporte de material orgânico e desenvolvimento do sistema radicular.

Facco et al. (2012) destacam que são raros os trabalhos que levam em consideração os efeitos da silvicultura sobre os recursos hídricos devido as dificuldades para quantificação dos mesmos. Desta maneira, a compreensão do uso da água pela cobertura vegetal e a análise de suas dependências escalares apresenta potencial para explicar uma parte significativa do balanço hídrico e sua variabilidade (THOMPSON et al., 2011).

2.2 Florestas plantadas de eucalipto

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2014), o Brasil possui 9.364.427 hectares de plantios florestais, dos quais 74,2 % correspondem à cultura de eucalipto. O valor bruto da produção florestal atingiu, em 2011, 53,91 bilhões de reais e foram gerados 4,7 milhões de empregos diretos (ABRAF, 2012).

De acordo com Lima (2008), desde o início do século XX, devido ao aumento populacional, houve uma elevação considerável da demanda de madeira e da necessidade do uso de espécies de eucalipto para geração de produtos madeireiros como lenha, madeira, moirões, entre outros. O exposto justifica o destaque do cultivo de eucalipto na economia brasileira, bem como o aumento das áreas plantadas com esta espécie.

Algumas espécies de *Eucalyptus* podem suportar solos com elevada acidez (VALE, 1982), com baixa fertilidade (BARROS; NOVAIS, 1990) e regime hídrico irregular (GOMES, 1994). Algumas espécies do gênero *Eucalyptus*, a exemplo de outras espécies arbóreas, apresentam mecanismos de economia de água (PRYOR, 1976). Alguns desses mecanismos envolvem a presença de tecido foliar coriáceo espessado, alinhamento vertical das folhas, fechamento rápido dos estômatos, baixas taxas de transpiração e elevada razão raiz/parte aérea (SILVA et al., 2004). Tais autores afirmam que a adaptação de espécies aos efeitos do clima pode ajudar no manejo de água em condições de diferente umidade, razão pela qual o uso da água reflete a complexidade de fatores envolvidos na interação planta/ambiente.

As espécies do gênero *Eucalyptus*, introduzidas no Brasil para fins de reflorestamento, permitem um ciclo de corte relativamente curto e elevada produtividade (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tendo em vista a análise integrada dos recursos naturais, o entendimento dos processos que regem o ciclo hidrológico é de fundamental importância para o meio ambiente, permitindo a quantificação da água nas diversas etapas do ciclo e sua interação com o meio ambiente.

Nesse sentido, a compreensão do papel da floresta como agente de redistribuição de água no meio ambiente é crucial para elaboração de práticas de manejo florestal a fim de manter a estabilidade dos ecossistemas e favorecer o desenvolvimento sustentável das atividades antrópicas.

Dessa maneira, uma análise detalhada do balanço hídrico, a partir de dados hidrológicos e micro-meteorológicos, visando identificar como um povoamento florestal, para fins comerciais, interfere no processo de transferência da água no sistema solo-planta-atmosfera permitirá o entendimento com maior grau de detalhamento do real papel do componente arbóreo no particionamento da precipitação, bem como, seu comportamento no tocante à evaporação do dossel e sua transpiração.

Diante das explanações acima, tomou-se como objetivo principal deste estudo a análise detalhada do processo de redistribuição da água da chuva para o solo a partir da interceptação do dossel de uma floresta clonal de eucalipto e como esta afeta as condições hidrometeorológicas do seu entorno.

Para atender o objetivo principal este trabalho foi estruturado da seguinte maneira: o primeiro capítulo trata de uma revisão bibliográfica sobre a importância da água e sua forte interação com a vegetação e como o manejo florestal pode afetar a conservação da água e do solo. O segundo capítulo aborda algumas questões da paisagem que podem afetar a dinâmica da água, características de um povoamento florestal manejado, além das diferenças entre

o comportamento climático da região estudada e as observações meteorológicas no interior do povoamento florestal.

O capítulo 3 trata da análise da variabilidade espacial da precipitação interna e quais os efeitos da densidade de plantio do povoamento nesta variável, além de estudar a variabilidade do escoamento no tronco em florestas plantadas de *Eucalyptus* e como este escoamento é afetado por características dendrométricas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados da modelagem da interceptação da precipitação incidente no dossel e como estes afetam a redistribuição da água para o interior do povoamento aplicando-se o modelo de Gash para florestas com dossel esparso.

No capítulo 5 foram realizadas análises sobre a dinâmica do escoamento superficial direto e sua relação com as características físicas da precipitação interna e a caracterização do movimento da água no perfil do solo com foco no estudo da estabilidade temporal da umidade do solo e variação sazonal do armazenamento de água no perfil.

Por fim, no capítulo 6 é realizada a análise do balanço hídrico em um povoamento florestal clonal de eucalipto com foco na caracterização da evapotranspiração real e fragmentação desta na transpiração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERGEL, C.; CALVET, J. C.; DE ROSNAY, P.; BALSAMO, G.; WAGNER, W.; HASENAUER, S.; NAEIMI, V.; MARTIN, E.; BAZILE, E.; BOUYSSSEL, F.; MAHFOUF, J. F. Cross-evaluation of modeled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in Southwestern France. **Hydrology and Earth System Science**, v. 14, p. 2177-2191, 2010.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998, 300 p.

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; LEITE, F. P. Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no leste de Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 547-556, 2013.

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; RODY, Y. P.; SILVA, W. C. M.; LEITE, F. P. Modeling of water infiltration in soil cultivated with Eucalyptus and pasture. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 1, p. 148-153, Jan./Mar., 2014.

Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF. **Anuário estatístico 2012**: Ano base 2011. Brasil. 2012.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - SP. **Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 257- 262, 2003.

ÁVILA, L. F. **Balanço hídrico em um remanescente de Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira**. 2011. 179 f. Tese (Doutorado em recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2011.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.

BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. **Relações solo-eucalipto**. Viçosa, MG, Folha de Viçosa, 1990. 330p.

BOLTEN, J. D.; CROW, W. T.; JACKSON, T. J.; ZHAN, X., REYNOLDS, C. A. Evaluating the utility of remotely-sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 57-66, 2010.

CASTRO, P.S.; VALENTE, O.F.; COELHO, D.T.; RAMALHO, R.S. Interceptação da chuva por mata natural secundária na região de Viçosa, MG. **Árvore**, Viçosa, v.7, n.1, p.76—89, 1983.

CICCO, V. et al. Recursos hídricos na Mata Atlântica: estudo de caso do Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, Cunha -SP. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL, 1., 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007. p. 25-81.

CROCKFORD, R.H.; RICHARDSON, D.P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrol. Process.**, West Sussex, v.14, p.2903-2920, 2000.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa: UFV/RURALMINAS/IGAM, 2005. 78 p.

FACCO, A. G.; RIBEIRO, A.; PRUSKI, F. F.; MONTEIRO, W. C.; LEITE, F. P.; ANDRADE, R. G.; MENEZES, S. J. M. C. Técnicas de geoinformação para estimativa do balanço hídrico em eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1243-1250, 2012.

FAMIGLIETTI, J. S.; RYU, D.; BERG, A. A.; RODELL, M.; JACKSON, T. J. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, p. 1-16, 2008.

GÊNOVA, K. B.; HONDA, E. A.; DURIGAN, G. Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de cerrado. **Revista do Instituto Florestal**, v. 19, n. 2, p. 189-200, 2007.

GERMER, S.; BLUME, T.; ANDRÉ, F.; JONARD, M.; CAIGNET, I.; COENDERS-GERRITS, M. **Pan-European beech (*Fagus sylvatica*) stemflow data comparison**. EGU General Assembly 2012, Viena, Austria, held 22-27, p. 12761, april, 2012.

GIGLIO, J. N.; KOBAYAMA, M. Interceptação da chuva: Uma revisão com ênfase no monitoramento em florestas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 297-317, Abr/Jun, 2013.

GOMES, R. T. **Efeito do espaçamento no crescimento e nas relações hídricas de *Eucalyptus spp.* na região de cerrado de Minas Gerais**. 1994. 85 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1994.

GUSWA, A. J. Canopy vs. Root: Production and destruction of variability in soil moisture and hydrologic fluxes. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2012.

HILDEBRANDT, A.; BAWAIN, A.; FRIESEN, J. **Hot spots os canopy drainage in a semiarid cloud forest**. EGU General Assembly 2012, held 22-27 April, 2012 in Viena, Austria, p. 12295.

HOFHANSL, F.; WANEK, W.; DRAGE, S.; HUBER, W.; WEISSENHOFER, A.; RICHTER, A. Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical lowland rainforests: Effects of meteorology and vegetation characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 452-453, n. 25, p. 247-258, 2012.

HORTON, R. E. **Rainfall interception**. Monthly Weather Review, v. 47, n. 9, p. 603-623, 1919.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2014**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>. Acesso em: 25 mar. 2015.

KOSTER, R. D.; MAHANAMA, S. P. P.; LIVNEH, B.; LETTENMAIER, D. P.; REICHLER, R. H. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. **Nature Geoscience**, London, v. 3, n. 9, p. 613-616, 2010.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2 ed. Piracicaba:ESALQ, 2008. 253p.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz, estado do Espírito Santo – Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 395-403, 2003.

MELO NETO, J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2012.

OLIVEIRA, L. L.; FERREIRA DA COSTA, R. SOUZA, F. A. S. de.; COSTA, A. C. L.; BRAGA, A. P. Precipitação efetiva e interceptação em Caxiamã, na Amazônia Oriental. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 4, p. 723-732, 2008.

PACHECO, M. V.; MAFRA, M. V. P. Interceptação Florestal em Fragmento Florestal Urbano de Manaus. **Geonorte**, v. 2, n. 4, p. 932-942, 2012.

PRYOR, L.D. **The biology of eucalyptus**. London, Edward Arnold, 1976. 82p.

PYPKER, T. G.; TARASOFF, C. S.; KOH, HONG-SUK. Assessing the efficacy of two indirect methods for quantifying canopy variables associated with the interception loss of rainfall in temperate hardwood forests. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 2, p. 29-40, 2012.

RODRIGUES, V. A. Redistribuição da precipitação em seringueiras. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 566-575, 2008.

RODRIGUES, V. A. Redistribuição das chuvas pelas copas de um povoamento de seringueira, José Bonifácio, SP. **Revista do Instituto Florestal**, v. 21, n. 1, p. 19-26, 2009.

RODRIGUES, V. A.; COSTA, P. N. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas em povoamento de eucalipto. **BioEng**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 77-86, Jan/Abr, 2009.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação**: estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. 2005. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, 2008.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 765-776, Out./Dez., 2011.

SILVA, W.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A.; CARDOSO, A. A. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 325-335, 2004.

SCHUMACHER, M. W.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, v. 3, n. 1, p. 21-34, 1993.

SOUZA, W. G. **Modelagem da evapotranspiração em plantios de eucalipto em fase inicial de desenvolvimento com cobertura parcial do solo**. 2006. 56 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

THOMPSON, S. E.; HARMAN, C. J.; TROCH, P. A.; BROOKS, P. D.; SIVAPALAN, M. Spatial scale dependence of ecohydrologically mediated water balance partitioning: A synthesis framework for catchment ecohydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 10, p. 1-20, 2011.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; GROppo, J. D.; SILVA, R. W. C.; MARTINELLI, L. A. Dinâmica da água em uma microbacia com cobertura florestal de eucalipto localizada na Serra do Mar no Vale do Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 207-216, Out./Dez., 2012.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia, Ciências e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. 943 p.

TUNDISI, J. G. Limnologia e gerenciamento integrado de recursos hídricos: Avanços conceituais e metodológicos. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, n. 21, p. 9-20, 2001.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 10, n. 4, p. 67-76, 2010.

UNESCO. **Water for people, water for life: UN world water development report (WWDR)**. Paris: UNESCO Publishing, nov., 2003. 136 p.

VALE, F. R. Efeito do alumínio sobre a cinética de absorção de nitrato, amônio e fosfato em milho (*Zea mays*, L.) e em clone de eucalipto (*Eucalyptus alba*). Viçosa, MG: UFV, 1982. 71 f. Tese (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.

**CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA E
EDAFOCLIMÁTICA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus* NO SUL
DE MINAS GERAIS**

RESUMO

Dentre os diversos fatores que influenciam no estabelecimento e desenvolvimento de um povoamento florestal, destacam-se aqueles associados à dinâmica climática da região e às características do solo. As variáveis dendrométricas são ferramentas excelentes para avaliar a resposta de uma espécie florestal às condições edafoclimáticas de uma região. A proposta neste capítulo foi realizar a caracterização dendrométrica e edafoclimática de um povoamento de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Foram avaliadas as variáveis Diâmetro a Altura do Peito (DAP), altura total (HT), volume de madeira (VM) e Índice de Área Foliar (IAF) entre 01/11/2013 e 31/10/2015. Para compreensão da dinâmica climática foram avaliadas as variáveis temperatura, umidade relativa do ar e precipitação, tanto fora quanto no interior do povoamento e o seu comportamento em relação às médias históricas. O solo foi caracterizado em termos de densidade (D_s), porosidade (VTP) e condutividade hidráulica saturada do solo (K_{SAT}). Foi registrado um maior incremento do DAP, VM e IAF no espaçamento 3 x 2 metros, enquanto que a HT teve maior incremento no espaçamento 3 x 5 metros. A temperatura apresentou aumento, enquanto que a umidade relativa do ar e precipitação pluvial reduziram em relação às médias históricas. O dossel do eucaliptal alterou o microclima no interior do povoamento reduzindo as amplitudes em relação aos dados externos. Os atributos físicos do solo D_s e VTP apresentam forte continuidade espacial, enquanto que a K_{SAT} tem alta variabilidade em toda a área de estudo.

Palavras-chave: Manejo florestal. Microclima. Solos florestais.

ABSTRACT

Among the various factors that influence the establishment and development of a forest stand, out are those associated with climate dynamics of the region and soil characteristics. The dendrometric variables are excellent tools to assess the response of a forest essence soil and climatic conditions of a region. The proposal in this chapter was to perform the dendrometric and edapho-climatic characterization of a *Eucalyptus* stand in southern Minas Gerais. Was evaluated the variables diameter at breast height (DBH), total height (TH), timber volume (TV) and Leaf Area Index (LAI) between 01/11/2013 and 10/31/2015. To understand the climate dynamics were evaluated variables temperature, relative humidity and precipitation, both outside and inside the stand and their behavior in relation to historical averages. The soil was characterized in terms of density (SB), porosity (TP) and saturated soil hydraulic conductivity (K_{SAT}). A greater increase in DBH was recorded, TV and LAI spaced 3 x 2 meters, while the TH had greater increase in the spacing 3 x 5 meters. The temperature had increased, while the relative humidity and rainfall reduced compared to historical averages. The eucalypt canopy changed the microclimate inside the stand reducing the amplitudes for external data. The soil physical attributes SB and TP feature strong spatial continuity, while K_{SAT} has high variability across the study area.

Keywords: Forest management. Microclimate. Forest soils.

1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* tem sua origem na Austrália e foi difundido por todo o mundo devido à qualidade de sua madeira e diversidade de aplicações em variadas cadeias produtivas. No Brasil, os primeiros povoamentos de eucalipto foram implementados no início do século XX e, devido às condições edafoclimáticas associado ao melhoramento genético, hoje é a espécie florestal mais cultivada no país.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2014), o Brasil possui 9.364.427 hectares de plantios florestais, dos quais 74,2 % correspondem à cultura de eucalipto, destacando o estado de Minas Gerais com a maior área plantada de eucalipto. O setor florestal foi responsável por gerar em 2014 uma receita bruta de 60,6 bilhões de reais (5,5% do PIB Industrial), 3,8% das exportações brasileiras, 0,8% da receita de impostos e geração de 4,2 milhões de empregos nas cadeias produtivas ligadas ao setor (IBÁ, 2015).

O excelente desempenho, em termos de produtividade, das florestas de eucalipto está associado ao trabalho de melhoramento genético das espécies bem como a aplicação de técnicas de manejo florestal que podem proporcionar alterações na qualidade da madeira, influenciando o produto final desejado e aumentando seu valor comercial (GONÇALVES et al., 2010).

Para análise de eficiência das técnicas de manejo florestal empregadas em um dado povoamento são observadas características específicas dos indivíduos que são correlacionadas à produtividade em volume do povoamento. O levantamento destas características é realizado, geralmente, por meio de inventários florestais que, segundo Husch, Miller e Beers (1993), são procedimentos amostrais para obtenção de informações quali-quantitativas dos

recursos florestais e de características sobre as áreas as quais os indivíduos estão se desenvolvendo.

De acordo com Scolforo e Mello (2006), a eficiência da amostragem para estimar as características desejadas em uma floresta está relacionada à forma e, principalmente, à intensidade amostral. Os métodos estatísticos tradicionais aplicados em inventários florestais têm como base uma medida central (média) e uma medida de dispersão (variância), utilizadas para descrever uma dada variável dendrométrica (MELLO et al., 2009).

Dentre as características dendrométricas destacam-se o diâmetro a altura do peito (DAP) e a altura total do indivíduo (HT). O DAP representa a medição do diâmetro de uma árvore à altura de 1,30 metros sobre o nível do solo (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2007), sendo uma característica de fácil avaliação.

O agrupamento dos DAPs em classes e análise destes por meio de uma distribuição de probabilidade permite avaliar o potencial de utilização do povoamento florestal (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010) e o estoque em função do crescimento ao longo do tempo.

A altura total de uma árvore representa a distância entre o nível do solo e o final da copa da árvore. Esta é uma variável bastante empregada na estimativa do volume do fuste e qualidade do sítio (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2007).

Entretanto, as medições de altura são mais susceptíveis a erros e demandam um maior tempo de mensuração. Para contornar estas dificuldades, geralmente, são estabelecidas relações matemáticas para explicar a variação da altura em função do diâmetro (THIERSCH et al., 2013).

Dentre os diversos fatores que influenciam no estabelecimento e desenvolvimento de um povoamento florestal destacam-se aqueles associados à

dinâmica climática da região e às características do solo (fertilidade e propriedades físico-hídricas).

1.1 Relações clima e floresta

A compreensão do clima e seu comportamento dinâmico são imprescindíveis para o estabelecimento e desenvolvimento de diversas atividades antrópicas. Esta dinâmica climática é alterada devido às modificações, principalmente, no balanço de energia no planeta.

O clima representa, segundo Vianello e Alves (2012), a integração das condições meteorológicas em um dado período de tempo e determinada localização geográfica. Já a condição meteorológica corresponde a um estado instantâneo da atmosfera estando em constante modificação ao longo do dia.

Torna-se relevante avaliar os efeitos sazonais dos elementos meteorológicos no clima e possíveis tendências de modificação deste. As modificações no clima de uma região podem ser provocadas por causas naturais recebendo a denominação de variabilidade climática ou antrópicas sendo esta denominada de mudança climática (TUCCI; BRAGA, 2003).

Identificar a resposta das diversas espécies florestais as condições climáticas e sua variabilidade é fundamental para o desenvolvimento do setor florestal.

Dentre os elementos meteorológicos que influenciam o crescimento das plantas destacam-se a luminosidade, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e vento (SOARES; BATISTA, 2004).

Hartmann et al. (2013) afirmam que a temperatura média da superfície global aumentou 0,85°C no período entre 1880 e 2012. Diante deste cenário o componente arbóreo assume uma maior evidência devido à suavização das

temperaturas máximas e manutenção da umidade relativa do ar quando comparado a ambientes com solo exposto e/ou centros urbanos.

A maioria das espécies vegetais possui a capacidade de compensar variações ambientais através de ajustes fisiológicos permitindo uma aclimação adequada e manutenção da atividade fotossintética (CROUS et al., 2013). Para Ghannoum e Way (2011), entretanto, as espécies apresentam uma capacidade de adaptação limitada e em condições de aumento da temperatura os indivíduos podem sofrer efeitos negativos sobre o ganho líquido de carbono com impacto no crescimento.

O melhoramento genético das espécies de eucalipto permitiu ampliar a distribuição espacial do gênero pelo globo com boa adaptação a variadas condições climáticas. Para Drake et al. (2015), às espécies de eucalipto representam um modelo útil para se testar os efeitos das mudanças climáticas na temperatura ambiente e nos mecanismos fisiológicos dos indivíduos nas regiões temperadas e tropicais.

Para Baesso, Ribeiro e Silva (2010), admitindo-se que um cenário de aquecimento global é inevitável, faz-se necessário conhecer os fatos que o provocam, monitorar localmente as mudanças e traçar estratégias que garantam a sustentabilidade do setor florestal.

Os povoamentos florestais traduzem-se em alternativas eficientes como mecanismos de mitigação do aumento da temperatura, quando esta é provocada principalmente por dióxido de carbono na atmosfera.

Devido ao ciclo de corte comumente aplicado no Brasil (sete anos), os povoamentos encontram-se em constante crescimento e sequestrando grandes quantidades de carbono. Para Lemos, Vital e Pinto (2010) um eucaliptal com produtividade média de $42 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ irá armazenar 105 toneladas de carbono por hectare ao final de 10 anos de crescimento.

Outro fator ambiental com forte influência em povoamentos florestais é o vento. Além de influenciar na forma das árvores, o vento afeta as taxas de transpiração e características tecnológicas da madeira.

Para Ataíde et al. (2015), o efeito mais significativo na quebra de árvores está associado ao vento climatológico, o qual é caracterizado como o vento médio de uma região não associado às chuvas. Rosado (2006) afirma que quanto maior for a diferença entre os ventos fortes da região em relação ao vento climatológico, maior será a chance dos ventos danificarem as árvores.

1.2 Relações solo e floresta

A caracterização dos solos apresenta grande relevância para o setor florestal, pois este é a base para o desenvolvimento das culturas e afeta diretamente os índices de produtividade de um povoamento.

Dentre as diversas possibilidades de definir o solo como elemento da paisagem, Wilde (1958) define solo florestal como uma porção da superfície terrestre que serve como meio de sustentação da floresta, constituído por material mineral e orgânico, permeado por diferentes teores de água e ar, além de ser habitado por organismos e exibir características peculiares adquiridas sob influência de três fatores pedogenéticos não comumente encontrados em outros solos: resíduos florestais, raízes das árvores e organismos específicos, cuja existência depende da presença da cobertura florestal.

Para Rovedder et al. (2013) a produtividade de um povoamento florestal está diretamente ligada à qualidade do solo onde um ou mais fatores podem atuar como limitadores no crescimento da floresta. Estes autores afirmam que a interação destes fatores produz padrões específicos de produtividade que irão variar de um sítio para outro.

As características mais relevantes na avaliação da qualidade do solo estão associadas às propriedades físico-hídricas do solo (densidade, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica, profundidade do perfil e presença de camadas de impedimento), diversidade biológica da microfauna do solo na rizosfera e fertilidade (conteúdo de matéria orgânica e disponibilidade de micro e macro nutrientes).

Cavichiolo, Dedecek e Gava (2005) encontraram forte correlação entre porosidade de aeração de um solo argiloso com o incremento do diâmetro a altura do peito. Yang et al. (2009) afirmam que as espécies florestais contribuem de maneira positiva para a formação e estabilização de agregados devido à presença de sistema radicular denso e grande aporte de matéria orgânica no solo.

Outra contribuição importante dos ecossistemas florestais aos solos em que estão inseridos está relacionada a formação da serapilheira (camada formada pela senescência de folhas e galhos sobre a superfície do solo). A serapilheira representa o primeiro estágio de transferência de nutrientes no sistema solo-planta, bem como reduz a incidência de radiação solar direta sobre o solo e aumenta a resistência ao escoamento superficial direto com consequente aumento na retenção de umidade (CALDEIRA et al., 2008; JARAMILLO-BOTERO et al., 2008).

Zinn, Resck e Silva (2002) observaram em áreas de Latossolos 44% mais carbono estocado quando comparadas a áreas de Cambissolos em plantações de *Eucalyptus grandis* no Cerrado mineiro. Já Freitas et al. (2013) identificaram que práticas de manejo afetam a deposição da serapilheira em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto.

A presença da cobertura florestal também favorece a conservação do solo reduzindo os efeitos do escoamento superficial direto e perdas de solo pela erosão hídrica. Oliveira et al. (2013) apontam que, no Brasil, alguns estudos

sobre erosão hídrica em povoamentos florestais há perdas de solo abaixo dos níveis de tolerância.

Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho, realizar a caracterização dendrométrica e edafoclimática de um povoamento de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Em termos específicos buscou-se: (i) avaliar o comportamento das variáveis meteorológicas (Temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e evapotranspiração) nos anos hidrológicos 2013/2014 e 2014/2015 em relação às normais climatológicas da região; (ii) analisar as diferenças entre o comportamento climático da região e o microclima interno do povoamento florestal e (iii) avaliar a variabilidade espacial das características físico-hídricas do solo no povoamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em um povoamento de eucalipto localizado na unidade experimental do Laboratório de Estudo e Projetos em Manejo Florestal (LEMAF) no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA) conforme a Figura 1.

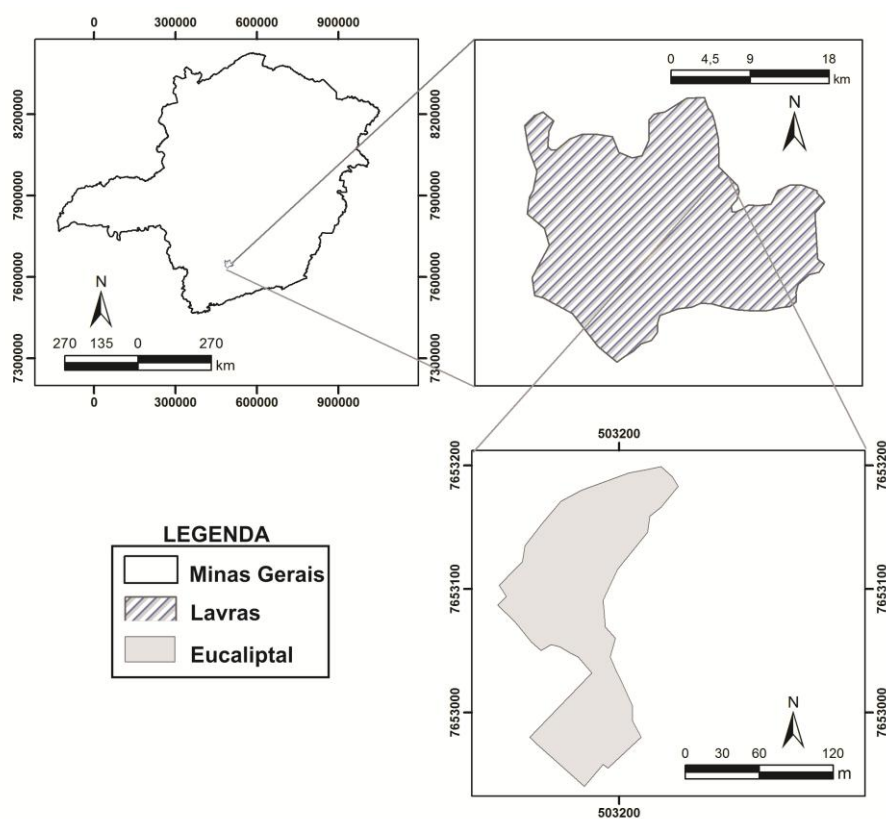


Figura 1 Localização da área experimental

O povoamento florestal é formado por clones híbridos do gênero *Eucalyptus*, em que as espécies que serviram de base genética foram a *urophilla* e *grandis*, sendo este híbrido comumente identificado como Urograndis. Os

indivíduos foram distribuídos na área em função de três espaçamentos: 3x2, 3x3 e 3x5 metros (Entre linhas x Entre plantas) conforme esquema ilustrado na Figura 2.

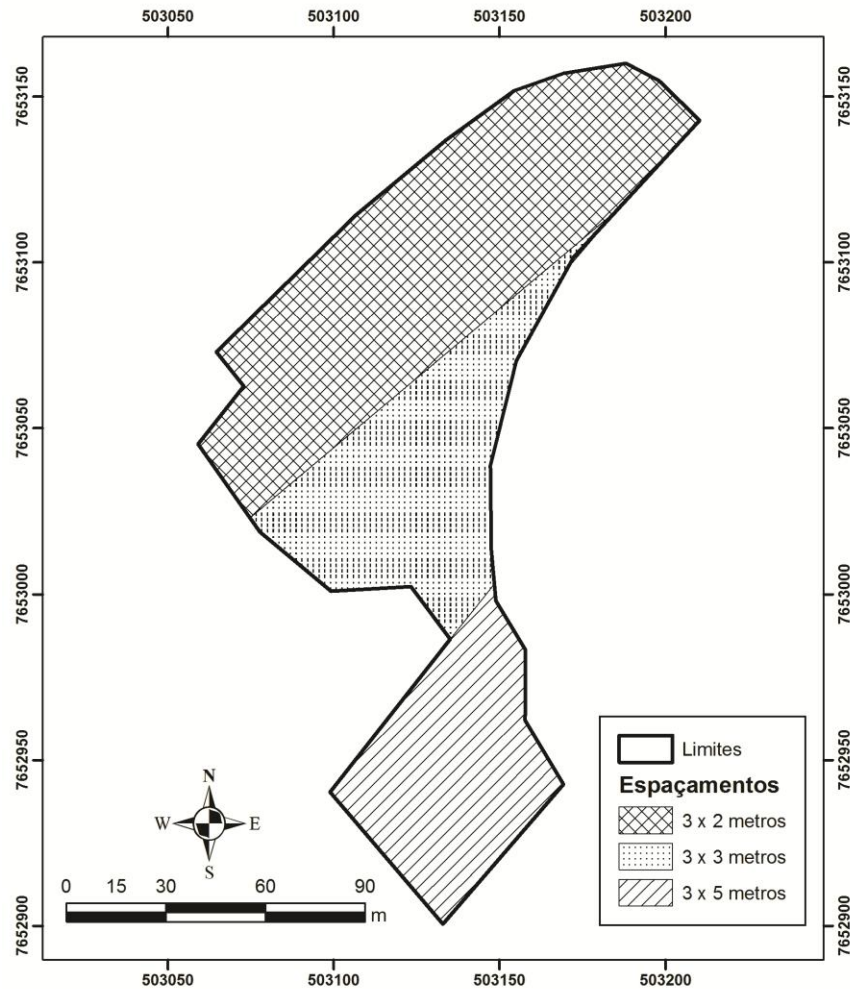


Figura 2 Distribuição espacial dos espaçamentos no povoamento

O povoamento com 9 anos de idade ocupa uma área de 1,54 ha com 1685 indivíduos. A região apresenta como tipo climático uma transição entre

Cwa e Cwb, segundo a classificação climática de Köppen (SPAROVEK; VAN LIER; DOURADO NETO, 2007), apresentando inverno seco e verão chuvoso.

Para delimitação da área de estudo, locação dos pontos de monitoramento e elaboração do mapa hipsométrico e de declividade em função de curvas de nível foram realizados levantamentos empregando um GPS da marca TOPCON modelo Hyper Light plus.

2.1 Mensurações florestais

Para caracterização dendrométrica foram realizadas campanhas para obtenção das variáveis florestais: diâmetro a 1,3 metros de altura (DAP), área basal (AB), altura total das árvores (HT), volume de madeira (VM), índice de área foliar (IAF), biomassa da serrapilheira (BS), estoque de carbono na serrapilheira (ECS) e espessura da serrapilheira (ES).

Para obtenção do DAP foram realizadas duas campanhas de medição da circunferência a 1,3 m de altura (CAP) com casca. Na primeira campanha, em agosto de 2013, foi realizado um censo no povoamento para identificação do padrão de distribuição diamétrica dos indivíduos no povoamento e escolha das árvores representativas para monitoramento dos componentes do balanço hídrico florestal (BHF). A segunda campanha foi realizada em agosto de 2015 e foi realizado um novo censo para medição das CAP's e nova avaliação da distribuição diamétrica do povoamento.

Para medição da CAP foram utilizados um bastão com tamanho padrão de 1,3 metros de altura e fitas métricas. Os valores de DAP foram obtidos a partir da Equação 1.

$$DAP_i = \frac{CAP_i}{\pi} \quad (1)$$

Em que DAP_i (cm) representa o diâmetro a altura de 1,3 m em relação ao nível do solo de cada indivíduo do povoamento e CAP_i (cm) representa a circunferência a altura de 1,3 m em relação ao nível do solo para cada indivíduo do povoamento.

Os DAP's foram agrupados em classes com intervalos de 5 cm para análise da distribuição diamétrica em ambas as campanhas conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Limites das classes diamétricas aplicadas neste estudo

Classe	Limite inferior	Limite superior	Centro da classe
C01	2,50	7,49	5,0
C02	7,50	12,49	10,0
C03	12,50	17,49	15,0
C04	17,50	22,49	20,0
C05	22,50	27,49	25,0
C06	27,50	32,49	30,0
C07	32,50	37,49	35,0
C08	37,50	42,49	40,0

Para análise de densidade do povoamento foi determinada a área basal (AB) do mesmo no início e final do monitoramento do povoamento. Foram obtidas as áreas seccionais (g_i) de cada indivíduo (Equação 2) para obtenção da área basal (Equação 3).

$$g_i = \frac{\pi \times DAP^2}{40000} \quad (2)$$

$$AB = \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

Em que g_i representa a área seccional a 1,3 m de altura (m^2) e AB representa a área basal (m^2) do povoamento.

Para análise da altura total (HT) dos indivíduos foram avaliadas as 30 árvores definidas como representativas do povoamento e realizadas duas

medições (agosto de 2013 e agosto de 2015) utilizando um hipsômetro de Blume-Leiss.

Os valores de altura total de todos os indivíduos do povoamento foram estimados a partir de relações hipsométricas (Altura x DAP) obtidas em função do ajuste do modelo Henriksen (Equação 4).

$$\hat{H}T = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(DAP_i) + \varepsilon_i \quad (4)$$

Em que $\hat{H}T$ representa a altura total da árvore (m), DAP corresponde ao diâmetro a 1,3 metros de altura (cm) e β_0 e β_1 são parâmetros estimados do modelo pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO).

O volume de madeira de cada indivíduo (VM) foi obtido a partir da Equação 5.

$$VM = g_i \times \hat{H}T_i \times f \quad (5)$$

Em que VM corresponde ao volume de madeira (m³), g_i representa a área seccional (m²), $\hat{H}T_i$ refere-se à altura total (m) para cada indivíduo, e f corresponde ao fator de forma (0,46).

O índice de área foliar (IAF) foi estimado em 38 pontos distribuídos no interior do povoamento em função da localização dos sensores de monitoramento de precipitação interna. Para estimativa do IAF foi utilizado um sensor LAI-2000 da LICOR. Em cada ponto foram coletadas 10 leituras e posteriormente calculada uma média destas.

Para monitoramento da biomassa armazenada na serrapilheira foram instalados 10 recipientes coletores (Figura 3) com área de 0,06158 m² distribuídos ao longo do povoamento visando representar a diversidade da área. Foram realizadas 12 coletas entre fevereiro de 2014 e fevereiro de 2015.



Figura 3 Coletor de biomassa depositada na serrapilheira

O material (folhas e fragmentos de galhos) recolhido em cada coleta foi levado à estufa com ventilação forçada e mantido a uma temperatura constante de 65 °C por 48 horas e posteriormente pesado. O estoque de carbono na serrapilheira foi obtido multiplicando o valor da biomassa média de cada coleta (kg) por 0,477 (LEMOS; VITAL; PINTO, 2010).

A espessura da camada de serrapilheira foi medida utilizando uma régua graduada de 30 cm em 36 pontos (12 pontos em cada espaçamento) distribuídos aleatoriamente no povoamento.

2.2 Análises meteorológicas

Para caracterização climática da região foram utilizados os dados das normais climatológicas (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009) do posto de monitoramento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizado no campus da UFLA.

O monitoramento das variáveis meteorológicas foi realizado em dois postos: para as informações externas foram utilizados os dados do posto do INMET no campus da UFLA enquanto que para caracterização dos efeitos da

cobertura de eucalipto nas variáveis meteorológicas foi instalada uma estação no interior do povoamento (FIGURA 4).

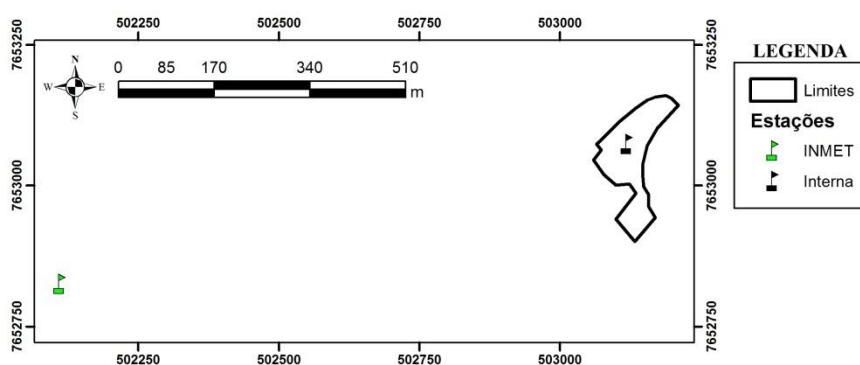


Figura 4 Distribuição espacial dos postos meteorológicos

O período de monitoramento das variáveis meteorológicas foi de 01 de novembro de 2013 a 31 de outubro de 2015, compreendendo dois anos hidrológicos (2013/2014 e 2014/2015).

No posto do INMET foram levantadas as informações de temperatura média, máxima e mínima do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e insolação, todos na escala diária. A evapotranspiração potencial foi estimada aplicando-se a equação de Penman-Monteith (Equação 6).

$$ETP = \frac{\Delta \times Rn}{(\Delta + \gamma^*) \times \lambda} + \frac{\gamma \times 900 \times U_2 \times (e_s - e_a)}{(\Delta + \gamma^*) \times (T + 273)} \quad (6)$$

Em que ETP representa a evapotranspiração potencial ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$), Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor de água ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), Rn o saldo de radiação ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), γ^* a constante psicométrica modificada ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), λ o calor latente vaporização ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), U_2 a velocidade do vento

medida a 2 metros de altura ($m.s^{-1}$), e_s a pressão de saturação de vapor de água (kPa) e e_a a pressão parcial de vapor de água (kPa), T a temperatura do ar ($^{\circ}C$).

Já para a estação localizada internamente no povoamento, foram mensuradas as variáveis temperatura média, máxima e mínima do ar e umidade relativa, máxima e mínima do ar, onde estas medidas foram realizadas com intervalo de 10 minutos entre leituras e posteriormente trabalhadas para a escala diária.

Os dados meteorológicos observados neste estudo foram comparados aos valores da última normal climatológica (1961 a 1990) extraídos de Ramos, Santos e Fortes (2009).

Por fim, foram realizadas comparações entre os dados meteorológicos externos e internos ao povoamento para identificar como o dossel florestal afeta a dinâmica micrometeorológica na área.

2.3 Análises edáficas

Para caracterização edáfica da área foi realizado um levantamento prévio e identificados três pontos representativos onde foram abertas trincheiras para análise e descrição das classes de solo, além de coleta de amostras. Em cada ponto foram coletadas duas amostras representando as camadas de 0 a 10 cm e de 20 a 30 cm, caracterizando o horizonte A e porção superior do horizonte B.

As amostras foram levadas para análise no Laboratório de Análise de Solos da UFLA onde foram levantadas as informações de matéria orgânica e textura (porcentagens de areia, silte e argila) de cada amostra. As classes de solo então foram identificadas segundo SANTOS, CURI e SHIMIZU (2015).

Para caracterização da densidade e porosidade do solo foram amostrados 12 pontos distribuídos na área (Figura 5), onde em cada ponto foram coletadas 5

amostras indeformadas representando as camadas de 0 – 10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 30 cm, 30 – 40 cm e 60 – 100 cm.

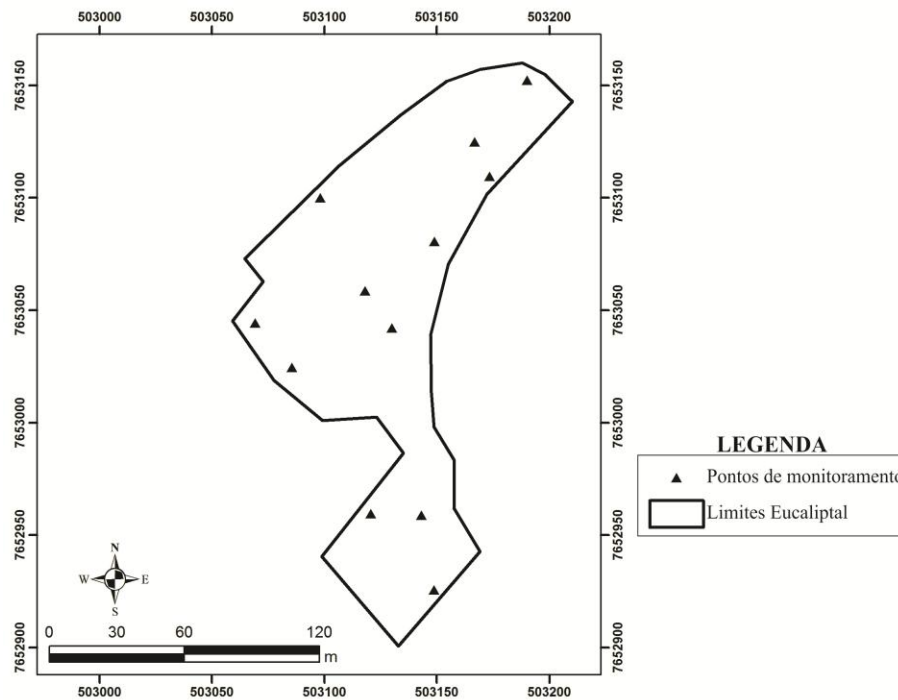


Figura 5 Distribuição dos pontos amostrados para caracterização da densidade e porosidade do solo em profundidade

Os procedimentos de análise seguiram as recomendações do Manual de métodos de análise de solo (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo foi determinada a partir da Equação 7.

$$Ds = \frac{m_s}{V} \quad (7)$$

Em que Ds representa a densidade do solo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), m_s a massa de solo seco (g) e V o volume do cilindro (cm^3). Já a porosidade do solo foi obtida multiplicando-se a umidade de saturação ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$) por 100.

Aos dados de densidade do solo e porosidade foram aplicadas análises exploratórias e procedimentos geoestatísticos em que foram testados três modelos de semivariograma (Esférico, Exponencial e Gaussiano) onde aquele que apresentou o melhor Erro Médio Relativo (EMR – Equação 8) foi utilizado para espacialização da informação por meio de Krigagem Ordinária.

$$EMR = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)}{DP} \right)}{N} \quad (8)$$

Em que O_i e E_i representam os dados observados e estimados, respectivamente, DP o desvio padrão da amostra e N o número de elementos na amostra.

Para levantamento da informação de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}) foram realizados testes de infiltração de acordo com a grade apresentada na Figura 6 para a camada de 0 – 20 cm.

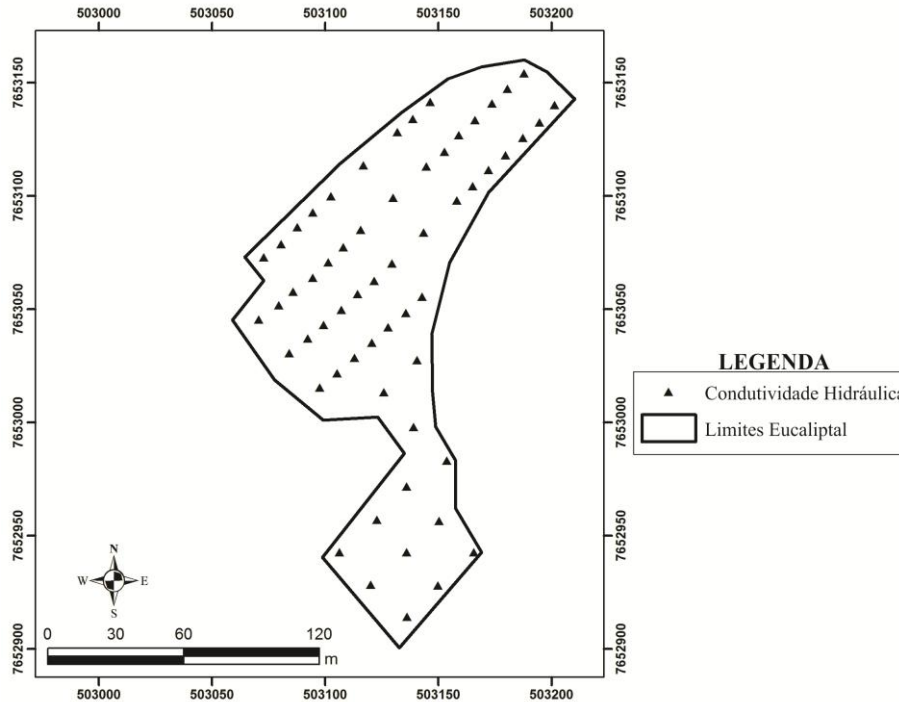


Figura 6 Distribuição dos pontos para caracterização da condutividade hidráulica do solo saturado

Foi utilizado um permeâmetro de Gelpi com reservatório combinado aplicando-se duas cargas constantes (5 e 10 cm) por ponto. A K_{SAT} foi obtida a partir da Equação 9.

$$K_{SAT} = ((0,0041 \times X \times R_1) - (0,0054 \times X \times R_2)) \times CT \quad (9)$$

Em que K_{SAT} corresponde a condutividade hidráulica do solo saturado (m.dia^{-1}), X representa a área do reservatório combinado ($35,59 \text{ cm}^2$), R_1 e R_2 tratam da relação lâmina infiltrada no tempo para as cargas de 5 e 10 cm (cm.s^{-1}), respectivamente, e CT representa uma constante para conversão de unidade (864).

Para espacialização da condutividade hidráulica do solo saturado foi aplicado o método do Inverso Quadrado da Distância (IQD – Equação 10).

$$K_{SAT} = \frac{\sum_1^n \left(\frac{1}{d_i^2} \times y_i \right)}{\sum_1^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (10)$$

Em que d_i^2 representa a distância euclidiana do i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado e y_i a K_{SAT} da i -ésima localidade vizinha.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O povoamento foi implementado com as linhas em nível em que a menor altitude da área é de 928,4 metros e a máxima de 942,3 metros. A altitude média é de 933,5 metros crescendo no povoamento no sentido Noroeste-Sudeste (Figura 7).

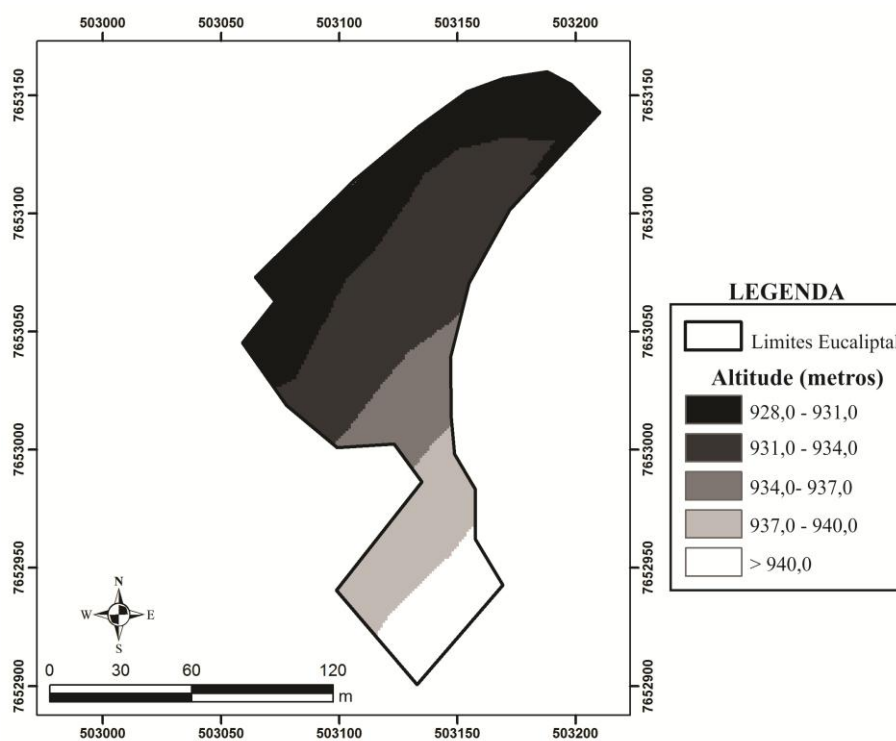


Figura 7 Mapa hipsométrico do eucaliptal

A declividade do terreno (Figura 8) foi classificada segundo EMBRAPA (1979) como moderada, apresentando declividade média de 8,1% com predomínio do relevo suavemente ondulado, favorecendo o processo de infiltração da água no solo e apresentando escoamento superficial difuso e lento.

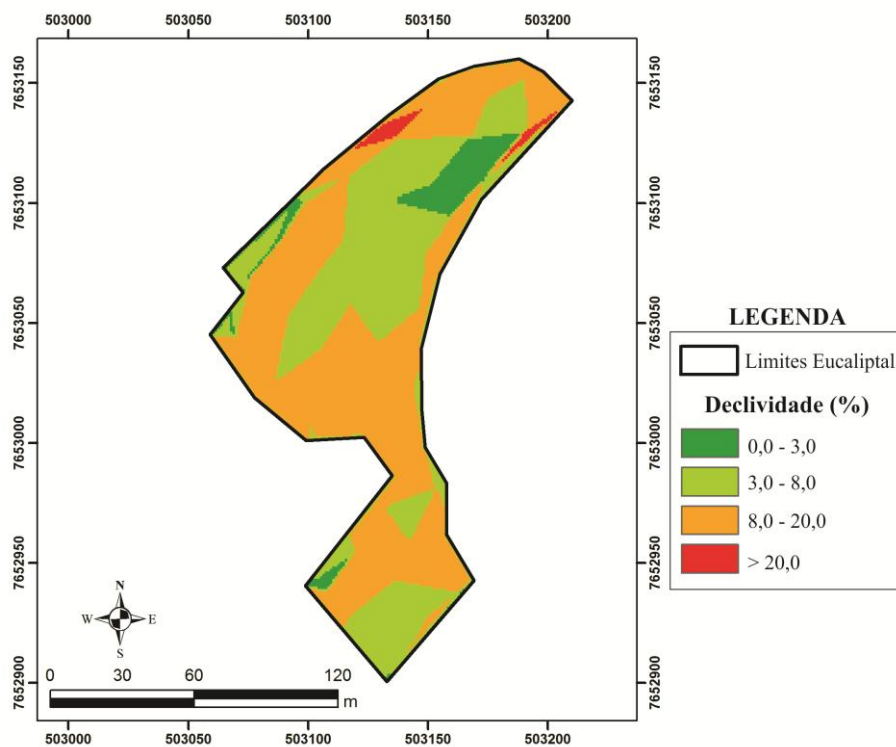


Figura 8 Mapa de declividade do eucaliptal

3.1 Caracterização dendrométrica

No Gráfico 1 está detalhada a distribuição diamétrica do povoamento no início (2013) e fim do monitoramento (2015). Os dados em ambos os períodos avaliados apresentam distribuição aproximadamente normal, com 53,6% e 51,3% dos indivíduos nas classes centrais nos levantamentos de 2013 e 2015, respectivamente. Husch, Miller e Beers (1993) afirmam que este é o comportamento clássico de um povoamento equiâneo.

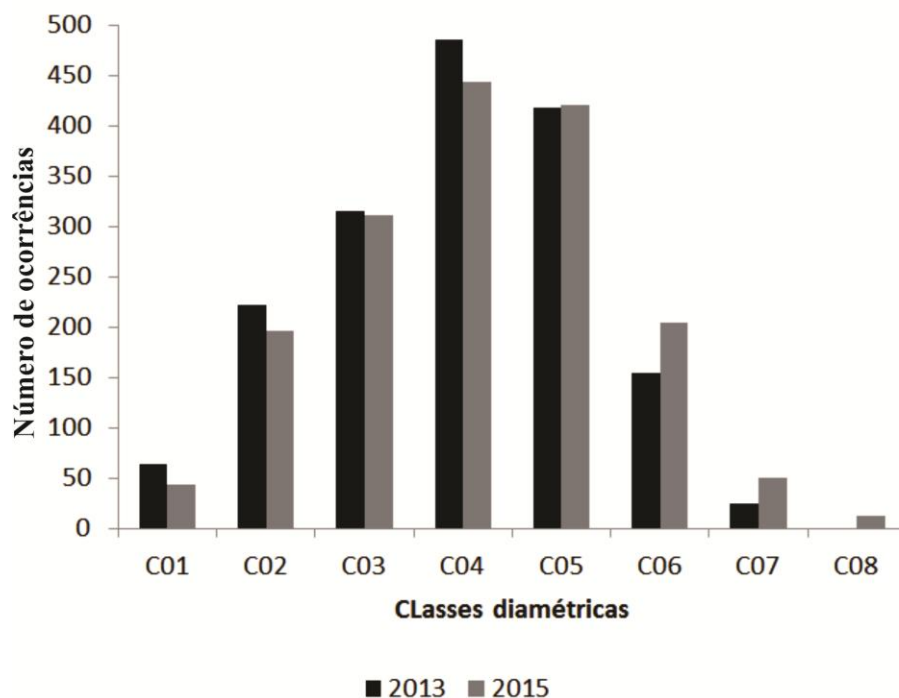


Gráfico 1 Distribuição diamétrica do povoamento no início e fim do monitoramento

Percebe-se um aumento no número de indivíduos nas classes superiores em detrimento das inferiores, representado pelo aumento do coeficiente de assimetria de 0,12 (2013) para 0,17 (2015) com incremento médio do DAP de 1,11 cm no período analisado.

No tocante a área basal (AB), houve um incremento de 6,56 m² (4,26 m².ha⁻¹), saindo de 55,96 m² (36,34 m².ha⁻¹) em 2013 para 62,52 m² (40,60 m².ha⁻¹) em 2015.

As Equações 11 e 12 correspondem à parametrização do modelo de Henriksen ajustados aos anos de 2013 e 2015, respectivamente, para estimativa da altura total dos indivíduos no povoamento.

$$HT = -17,0029 + 15,7358 \times \ln(DAP) \quad (11)$$

$$HT = -16,8909 + 15,2785 \times \ln(DAP) \quad (12)$$

A Figura 9 apresenta a relação entre as alturas totais observadas e estimadas para os períodos analisados bem como o coeficiente de determinação (R^2) obtido. Os modelos ajustados apresentaram desempenho satisfatório na estimativa da altura com R^2 de 0,82 (2013) e 0,81 (2015) e incremento de altura no período de 10 cm indicando a estabilização do crescimento em altura do povoamento que tem 9 anos de idade.

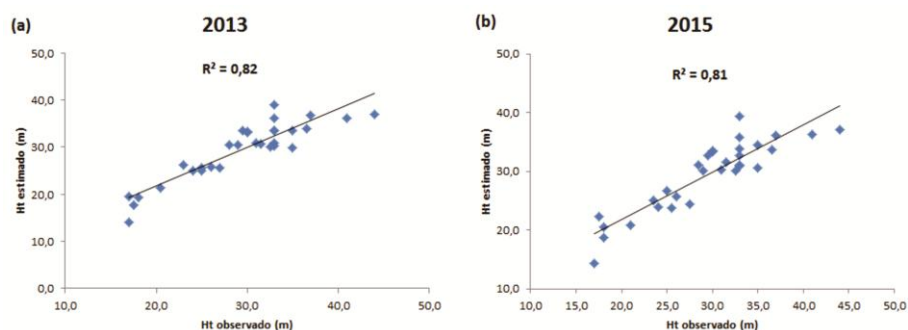


Figura 9 Estimativa da altura total no povoamento de eucalipto em 2013 (a) e 2015 (b)

Ao analisar as variáveis DAP, AB, HT e VM em função do espaçamento são perceptíveis os efeitos do manejo no crescimento do povoamento ao longo do tempo. O espaçamento 3 x 2 representa 60,8% da área (1025 indivíduos), enquanto que o espaçamento 3 x 3 possui 23,6% (398 indivíduos) e o 3 x 5 contém 15,6% (262 indivíduos).

O maior incremento de DAP (5,9%), AB (13,0%) e VM (11,8%) se deram, em termos médios, no espaçamento 3 x 2. Já o maior incremento em altura (2,3%), ocorreu nos indivíduos do espaçamento 3 x 5. Na Tabela 2 são apresentados os valores médios das variáveis dendrométricas em função do espaçamento ao longo do período analisado.

Tabela 2 Características dendrométricas em função do espaçamento

Espaçamento	Ano	DAP (cm)	AB (m²)	HT (m)	VM (m³.ha)
3x2	2013	18,6	31,15	27,6	586,2
	2015	19,7	35,20	27,7	655,2
3x3	2013	20,1	13,91	28,7	493,1
	2015	21,1	15,37	29,2	536,3
3x5	2013	22,3	10,90	30,5	476,0
	2015	23,3	11,95	31,2	512,9

O Índice de Área Foliar (IAF) médio do povoamento foi de 1,97 m².m⁻², com valores máximo e mínimo de 3,43 e 1,30 m².m⁻², respectivamente. Xavier, Vettorazzi e Machado (2004) encontraram valores similares para a cultura do eucalipto variando entre 1,99 e 3,11 m².m⁻².

Na Tabela 3 estão expostas as informações dos valores médios, máximos e mínimos do IAF em função do espaçamento e localização da coleta no povoamento.

Tabela 3 Valores médios, máximos e mínimos do IAF no plantio de eucalipto

Localização		IAF (m².m⁻²)		
		Médio	Máximo	Mínimo
Espaçamento	3x2	2,17	3,43	1,54
	3x3	1,70	2,15	1,30
	3x5	1,66	2,07	1,34
Borda do povoamento		2,00	3,43	1,30
Centro do povoamento		1,93	2,53	1,32

Ao avaliar o IAF em função dos espaçamentos implementados no povoamento percebe-se uma relação inversa entre a área por plantas e o índice propriamente dito. Como as leituras foram efetuadas nas entrelinhas o menor espaçamento possibilita um maior fechamento do dossel e conseqüentemente um maior IAF. Em contrapartida, o maior espaçamento permite maior abertura do dossel e menor sobreposição das folhas.

As leituras realizadas na borda do povoamento apresentam maiores valores de IAF quando comparadas as leituras mais centrais. Isto se dá pela maior emissão de ramos e folhas dos indivíduos localizados nas bordas causada pela maior disponibilidade de radiação para estes.

A camada da serrapilheira também foi influenciada pelos espaçamentos do povoamento. No menor espaçamento (3 x 2) a altura média da camada foi de 4,2 cm, seguida do espaçamento 3 x 3 com 3,8 cm e por fim o 3x5 com 2,9 cm de espessura da serrapilheira. A espessura média da camada no povoamento foi de 3,6 cm.

A biomassa armazenada ao longo de 13 meses na serrapilheira foi de 5,64 Mg (5,21 Mg.ano⁻¹) no povoamento com estoque de 2,69 Mg de carbono (2,48 Mg.ano⁻¹). O mês de maio de 2014 apresentou a maior produção de biomassa enquanto que o mês de dezembro do mesmo ano a menor produção. O mês de maio corresponde ao outono na região, que é seco e frio, fazendo com que as árvores percam parte da folhagem para aumentar a eficiência fotossintética.

No Gráfico 2 estão apresentados os dados mensais da produção de biomassa e estoque de carbono para o povoamento de eucalipto.

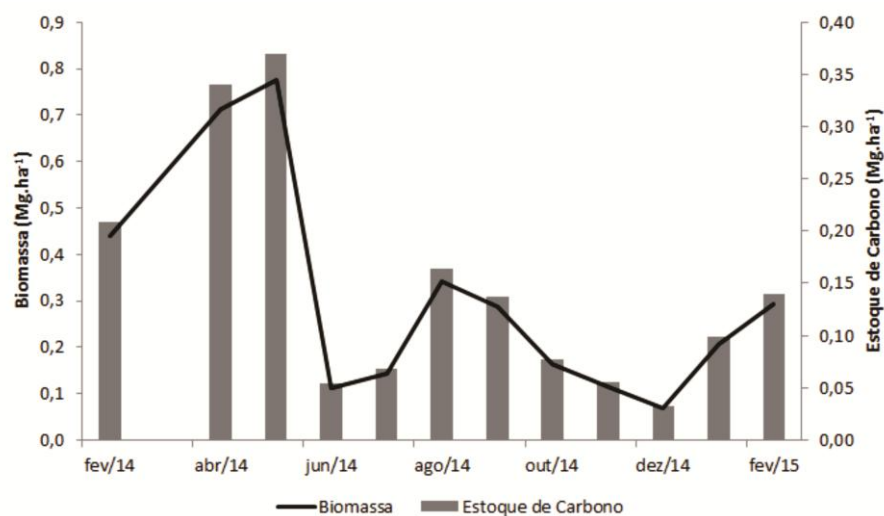


Gráfico 2 Produção de biomassa e estoque de carbono no eucaliptal

3.2 Caracterização climática

Os anos hidrológicos 2013/2014 e 2014/2015 apresentaram um comportamento diferenciado quando comparadas às normais climatológicas do município de Lavras (NC). Ao analisar as temperaturas (média, máxima e mínima do ar), observou-se que todas ficaram acima dos valores normais para a região de Lavras, tanto na escala mensal quanto na anual conforme expresso no Gráfico 3.

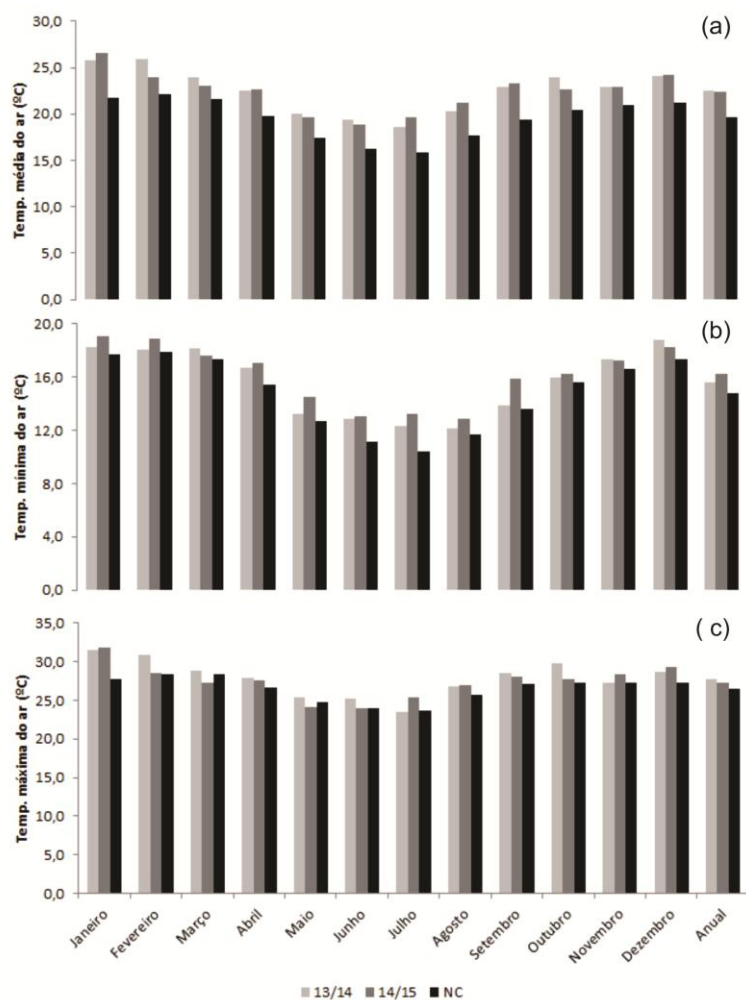


Gráfico 3 Temperaturas médias (a), mínimas (b) e máximas (c) para os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 em Lavras

A temperatura média anual do ar no período analisado ficou 2,9 °C acima da normal climatológica enquanto que as temperaturas máxima e mínima anual do ar ficaram 1,1 °C acima da normal climatológica.

A variável meteorológica velocidade do vento também apresentou comportamento acima da média, com média anual entre 2013 e 2015 de 2,2 m.s⁻¹, correspondendo a um acréscimo de 19,6% em relação à normal climatológica.

Destaque para os meses de fevereiro e março de 2014 que apresentaram aumento de 68% e 70% da velocidade do vento, respectivamente, em relação a normal climatológica (Gráfico 4). A direção predominante do vento entre 2013 e 2015 foi a Norte enquanto que para a normal climatológica é Leste.

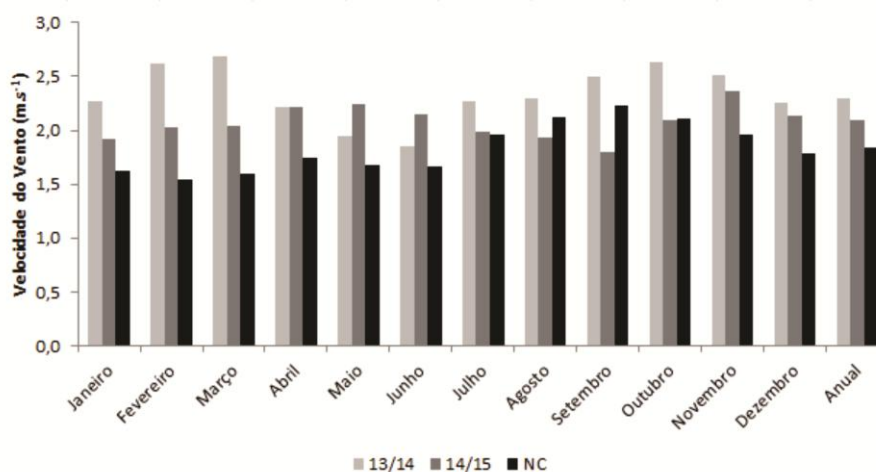


Gráfico 4 Distribuição mensal e anual da velocidade do vento para o município de Lavras

A umidade relativa do ar apresentou queda em relação à normal climatológica com 65,1% para o ano de 2013/2014 e 70,5% para 2014/2015. Destaque para os meses de janeiro do período analisado em que houve uma queda de aproximadamente 20%. O Gráfico 5 apresenta a distribuição mensal e anual da umidade relativa do ar.

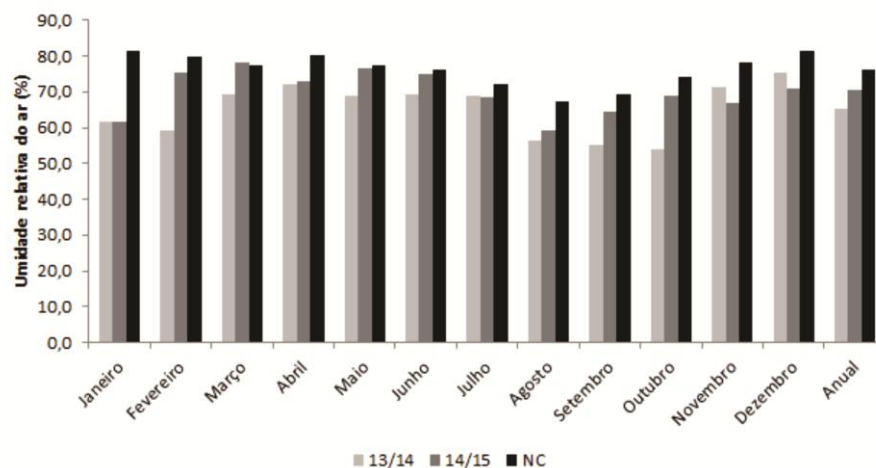


Gráfico 5 Distribuição mensal e anual da umidade relativa do ar para o município de Lavras

A precipitação pluvial foi outra variável meteorológica que apresentou comportamento abaixo da média entre 2013 e 2015. Em termos totais, os anos 2013/2014 e 2014/2015 ficaram 39% e 22%, respectivamente, abaixo da normal climatológica. O destaque negativo foram os meses de dezembro, fevereiro e março do ano 2013/2014 com apenas 55%, 17% e 20%, respectivamente, da precipitação esperada para o período.

Considerando apenas o período chuvoso que na região vai de novembro a abril, o ano hidrológico 2013/2014 acumulou 54% da média no período. Já o ano 2014/2015 apresentou melhora, porém, fechou o período com 72% do volume esperado.

O Gráfico 6 apresenta a distribuição mensal da precipitação pluvial observada no período bem como a normal climatológica para o município de Lavras.

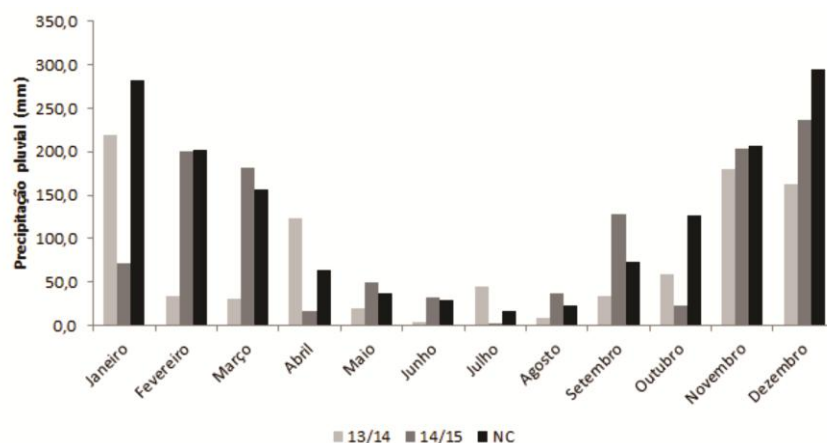


Gráfico 6 Distribuição mensal da precipitação pluvial para o município de Lavras

A estimativa da evapotranspiração potencial no período de 2013 a 2015 apresentou uma média diária de 3,44 mm, 39% superior aos valores encontrados por Dantas, Carvalho e Ferreira (2007) para o município de Lavras com a normal climatológica tendo-se como base o período de 1961 a 1990. O período chuvoso representou 58% da demanda anual. O Gráfico 7 apresenta a distribuição mensal da evapotranspiração potencial do eucalipto em Lavras no período analisado.

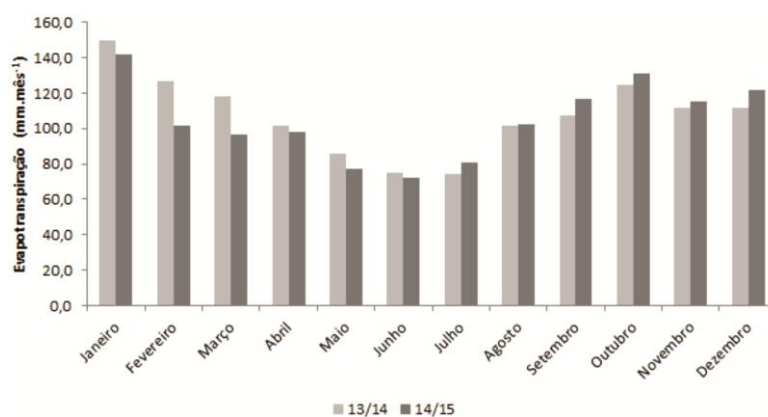


Gráfico 7 Distribuição mensal da evapotranspiração da cultura do eucalipto para o município de Lavras

Observa-se que o comportamento das variáveis meteorológicas entre 2013 e 2015 ficou destoante das condições climatológicas normais esperadas para a região de Lavras, MG. Estas divergências podem ser explicadas pela ação de alguns fenômenos climáticos de larga escala que atuaram na América do Sul neste período, caracterizando-o como um dos mais secos já registrados no sudeste do Brasil (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2015).

Segundo o Boletim de Monitoramento e Análise Climática do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTECa, 2015) entre novembro de 2013 e março de 2014 ocorreu a predominância de anomalias negativas de precipitação na região sul de Minas Gerais com forte presença de bloqueios atmosféricos que dificultaram a formação de episódios bem configurados da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), bem como do avanço de frentes frias sobre a região, ambas responsáveis pela ocorrência de chuvas na região Sudeste do Brasil. A redução de massas de ar úmido favoreceu o aumento das temperaturas e consequente redução da umidade relativa do ar.

Entre maio e setembro de 2014 observou-se a configuração do fenômeno El-Niño com variações em sua intensidade (fraca a moderada), o que pode ter colaborado para intensificação do déficit pluviométrico no período e, principalmente, aumento das temperaturas mesmo durante o inverno. Em outubro de 2014, a inibição das chuvas foi provocada por uma circulação anticiclônica anômala sobre a parte central da América do Sul (CPTECb, 2015).

O mês de novembro de 2014 foi favorecido pela passagem de ondas atmosféricas intrassazonais que favoreceram a formação de três episódios de ZCAS que contribuíram para chuvas próximas da média na região sul de Minas Gerais. Entretanto, entre dezembro de 2014 e janeiro de 2015 um bloqueio atmosférico tomou força na região favorecendo o aumento das temperaturas e redução dos totais pluviais em relação às médias históricas (CPTECb, 2015).

Nos meses de fevereiro e março de 2015 houve um enfraquecimento do bloqueio atmosférico permitindo o estabelecimento de um canal de umidade entre a região Norte e o Sudeste do Brasil facilitando a formação de eventos de ZCAS. Entre os meses de abril e agosto, a predominância do bloqueio atmosférico voltou trazendo temperaturas superiores a normal climatológica e déficit pluviométrico (CPTECb, 2015).

Apesar destas condições meteorológicas diferenciadas, os dois anos hidrológicos apresentaram condições favoráveis em termos de exigência climática para a espécie de *Eucalyptus urograndis*. Segundo Sperandio et al. (2010) a temperatura média anual deve estar entre 18 e 25 °C, enquanto que a precipitação total anual pode variar entre 720 e 1800 mm. No período, a temperatura média anual foi de 22,4 °C e a precipitação média anual de 1035,7 mm registrados no posto do INMET em Lavras.

A cobertura florestal promove modificações significativas nas variáveis meteorológicas no interior do povoamento. A temperatura média anual é 1,4 °C menor em relação à observada em campo aberto. A média anual da umidade relativa do ar é 16,4% maior no interior do povoamento. Já a temperatura média máxima anual é 0,6 °C superior e a temperatura média mínima anual é 0,1 °C superior no interior do povoamento.

Uma característica interessante observada foi uma menor amplitude das variáveis meteorológicas no interior do povoamento em relação ao ambiente externo, apresentando uma mudança mais suavizada entre os extremos de cada fenômeno meteorológico, característica esta muito importante para a manutenção da atividade microbiológica.

No Gráfico 8 são apresentadas as distribuições mensais e anuais das temperaturas médias (a), mínimas (b) e máximas do ar (c) e da umidade relativa do ar (d) para o interior do eucaliptal e o ambiente externo.

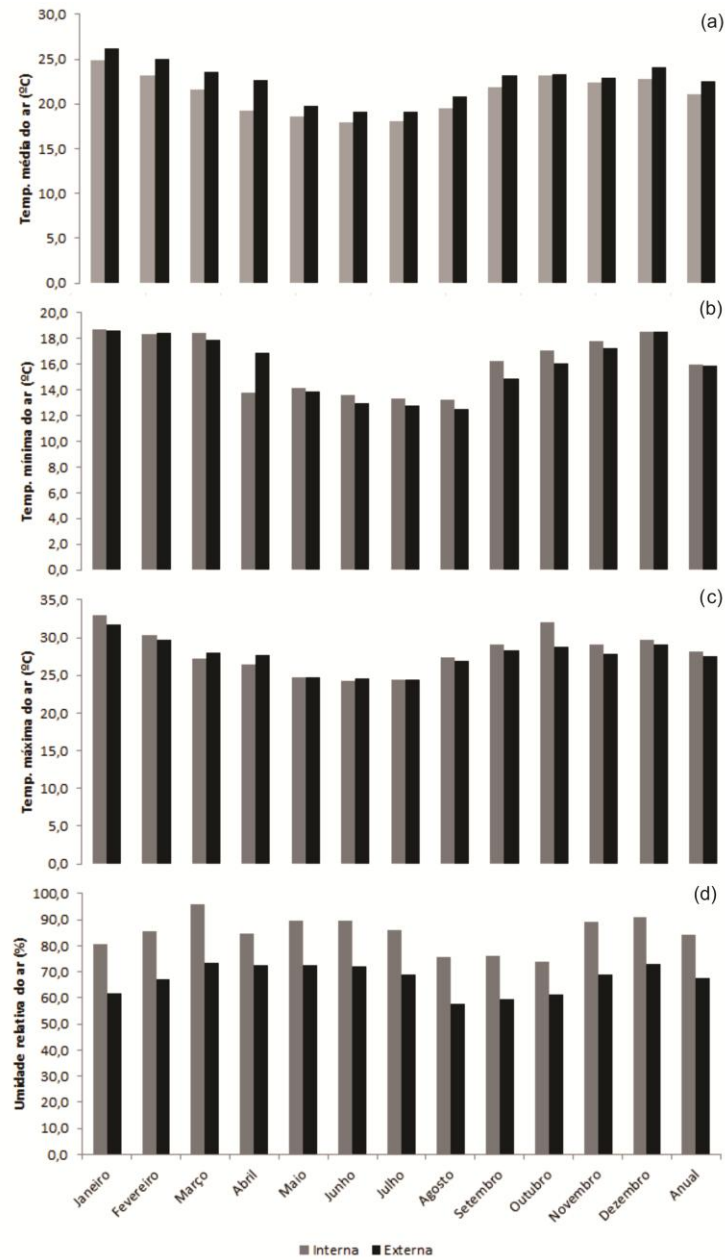


Gráfico 8 Distribuição média mensal e anual das temperaturas médias (a), mínimas (b) e máximas (c) e umidade relativa do ar (d) externa e interna ao povoamento de eucalipto em Lavras

3.3 Caracterização edáfica

A partir de levantamento pedológico realizado na área do eucaliptal foram identificadas duas classes de solo. O Latossolo Vermelho-Amarelo predomina na área, ocupando 78,6% (1,21 ha). Esta classe apresenta estrutura em blocos com drenagem moderada e apresenta o Granito-gnaiss Leucocrático como material de origem. Foram encontradas duas matizes na área para esta classe de solo: 5/8YR e 5YR.

A outra classe de solo presente na área é a do Latossolo Vermelho que ocupa 21,4% da área (0,33 ha). É um solo com estrutura granular, bem drenado e tem o Granito-gnaiss Mesocrático como material de origem. A matiz deste solo é a 10R.

A Figura 10 representa a distribuição espacial das classes de solo presentes na área de estudo.

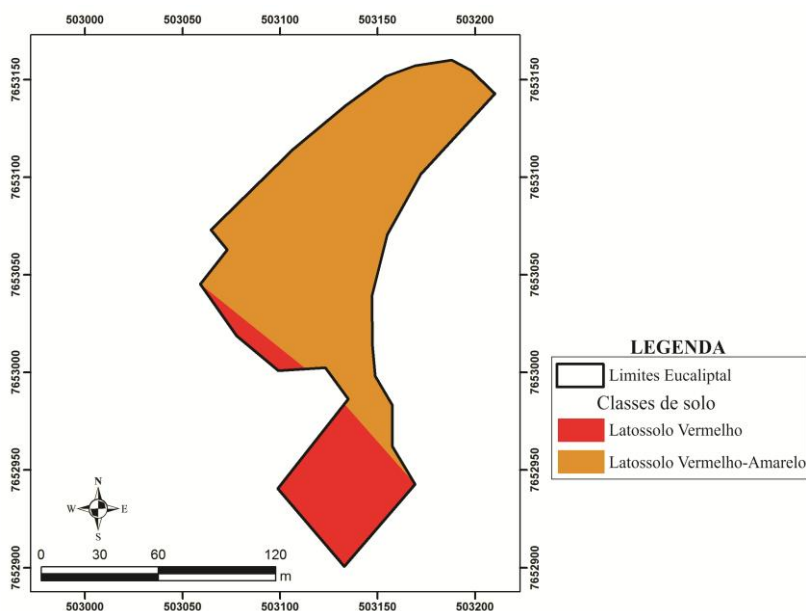


Figura 10 Distribuição espacial das classes de solo do eucaliptal

Na Tabela 4 são apresentados os dados de matéria orgânica e análise textural para os pontos amostrados.

Tabela 4 Dados da análise de solo no eucaliptal

Ponto de coleta	Profundidade (cm)	(%)				Textura	Classe
		M.O.	Areia	Silte	Argila		
PS01	0 – 10	3,99	47	10	43	Argilosa	LVA
	20 – 30	1,07	32	12	56	Argilosa	
PS02	0 – 10	3,28	43	10	47	Argilosa	LVA
	20 – 30	2,61	32	14	54	Argilosa	
PS06	0 – 10	3,99	27	9	64	Argilosa	LV
	20 – 30	2,36	23	13	64	Argilosa	

As duas classes de solo apresentam textura argilosa, tanto no horizonte A quanto no B, o que favorece uma maior retenção de água no perfil destes solos. O alto teor de matéria orgânica na camada superficial dos perfis de solo é justificado pela presença marcante da serrapilheira depositada sobre o solo. O microclima proporcionado pelo povoamento possibilita a acelerada decomposição deste material que é prontamente incorporado ao solo.

Os dados observados de densidade e porosidade do solo no perfil estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 Dados médios, máximos e mínimos de densidade e porosidade do solo em perfil no eucaliptal

Densidade do solo ($D_s - g.cm^{-3}$)						
Camada	0–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–40 cm	60–100 cm	
Média	1,27	1,32	1,34	1,27	1,15	
Máxima	1,64	1,52	1,53	1,48	1,42	
Mínima	1,09	1,09	1,08	1,06	0,96	
Volume Total de Poros (VTP - %)						
Camada	0–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–40 cm	60–100 cm	
Média	51,4	50,4	49,4	51,1	55,3	
Máxima	58,9	57,2	55,1	59,3	61,4	
Mínima	43,0	43,5	42,6	45,5	46,3	

Em termos médios, a densidade do solo aumenta da camada superficial até os 30 cm de profundidade, quando começa a decair até atingir o menor valor a 100 cm de profundidade. O comportamento inverso foi observado para o volume total de poros que decaiu até os 30 cm de profundidade e passou a aumentar até os 100 cm, atingindo o seu maior valor.

A variabilidade da densidade do solo e porosidade no perfil do solo em um povoamento de eucalipto pode estar relacionada aos tratos culturais empregados na área (GUARIZ et al., 2009). Uma potencial justificativa para o aumento da densidade e consequente redução da porosidade entre 10 e 30 cm de profundidade e a presença de “pé de grade” como efeito de sucessivas gradagens realizadas na área antes da implementação do eucalipto quando na mesma área existia um cafezal.

Na análise exploratória dos atributos físicos do solo em todas as camadas não foram observadas tendências espaciais dos dados observados ou a presença de valores extremos (outliers) possibilitando a análise variográfica com todos os dados observados e sem transformação.

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos físicos do solo densidade e volume total de poros em cada camada analisada no perfil de solo do eucalipto.

Tabela 6 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os atributos físicos do solo no eucalipto

Variável	Modelo	C_0	C_0+C_1	Alcance (m)	GDE (%)	EMR
D_s 0-10	Exponencial	0,00	0,0274	100,0	100,0	0,04
D_s 10-20	Exponencial	0,00	0,0165	100,0	100,0	0,11
D_s 20-30	Exponencial	0,00	0,0237	100,0	100,0	-0,14
D_s 30-40	Gaussiano	0,00	0,0299	100,0	99,9	-0,04
D_s 60-100	Gaussiano	0,01	0,01931	100,0	67,18	-0,01
VTP 0-10	Exponencial	0,00	31,7464	100,0	100,0	0,06
VTP 10-20	Exponencial	0,00	19,1811	100,0	100,0	0,07
VTP 20-30	Exponencial	0,00	16,2742	100,0	100,0	0,10

VTP 30-40	Exponencial	0,00	21,8894	100,0	100,0	0,07
VTP 60-100	Exponencial	0,00	22,8712	100,0	100,0	-0,01

Para a densidade do solo, até os 30 cm de profundidade o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o exponencial. O baixo valor do efeito pepita ($C_0 - 0,0$) encontrado permitiu a obtenção de grau de dependência espacial classificado como forte de acordo com Zimback (2001). Para as camadas de 30-40 e 60-100 cm o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o gaussiano apresentando GDE forte e moderado, respectivamente.

Para ajuste dos modelos foi trabalhado um alcance fixo de 100,0 metros. Carvalho, Takeda e Freddi (2003) afirmam que o alcance indica até que ponto as amostras são correlacionadas permitindo assim o delineamento de futuras amostragens com melhor relação custo/benefício sem depreciar a qualidade do estudo.

Para o volume total de poros, o modelo que apresentou o melhor ajuste em todas as camadas foi o exponencial apresentando sempre um GDE classificado como forte (ZIMBACK, 2001).

Os valores dos erros médios relativos (EMR) encontrados para os semivariogramas ajustados corroboram com a precisão dos ajustes. Quanto mais próximo de 0,0 melhor o ajuste com base nesta estatística de precisão.

A densidade do solo reduz na área no sentido norte/sul seguindo este padrão em todas as profundidades analisadas. O efeito inverso é observado para o volume total de poros do solo que aumenta no sentido norte/sul. A classe do Latossolo Vermelho apresenta os menores valores de densidade e maior porosidade do solo quando comparado ao Latossolo Vermelho-Amarelo.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as espacializações da densidade do solo e volume total de poros, respectivamente, para as cinco camadas de solo analisadas no eucaliptal a partir da krigagem ordinária.

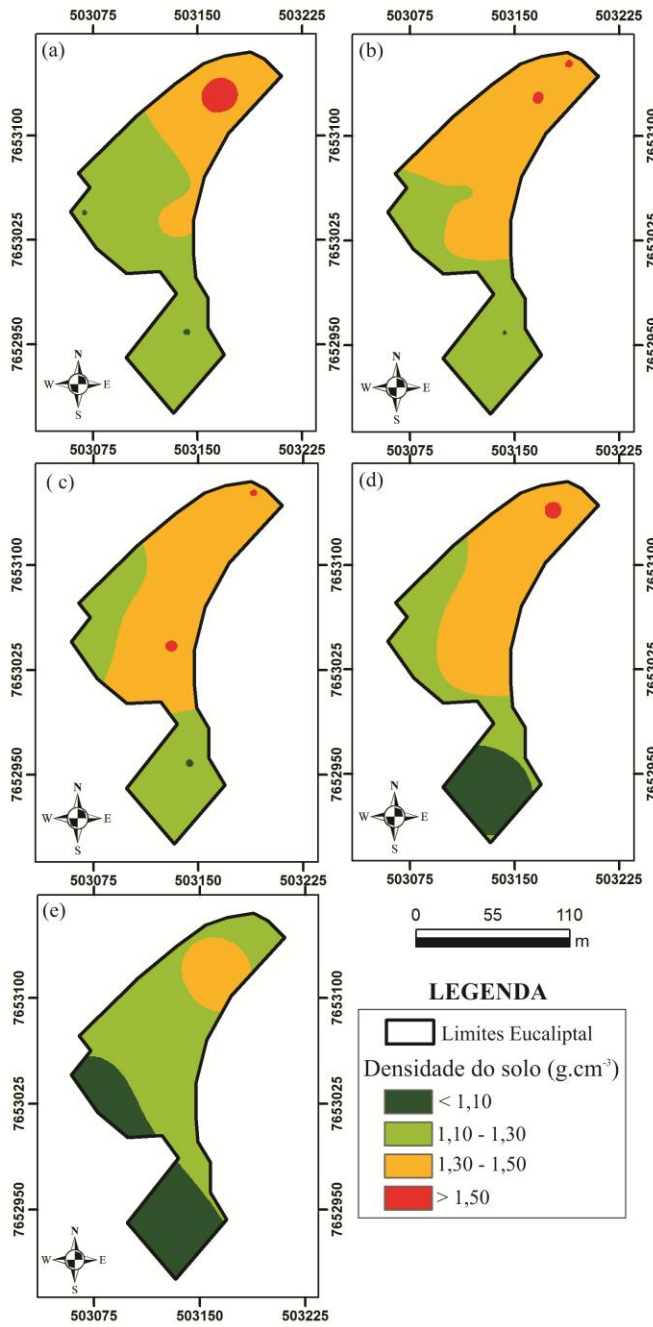


Figura 11 Distribuição espacial da densidade do solo nas profundidades de 10 (a), 20 (b), 30 (c), 40 (d) e 100 cm (e)

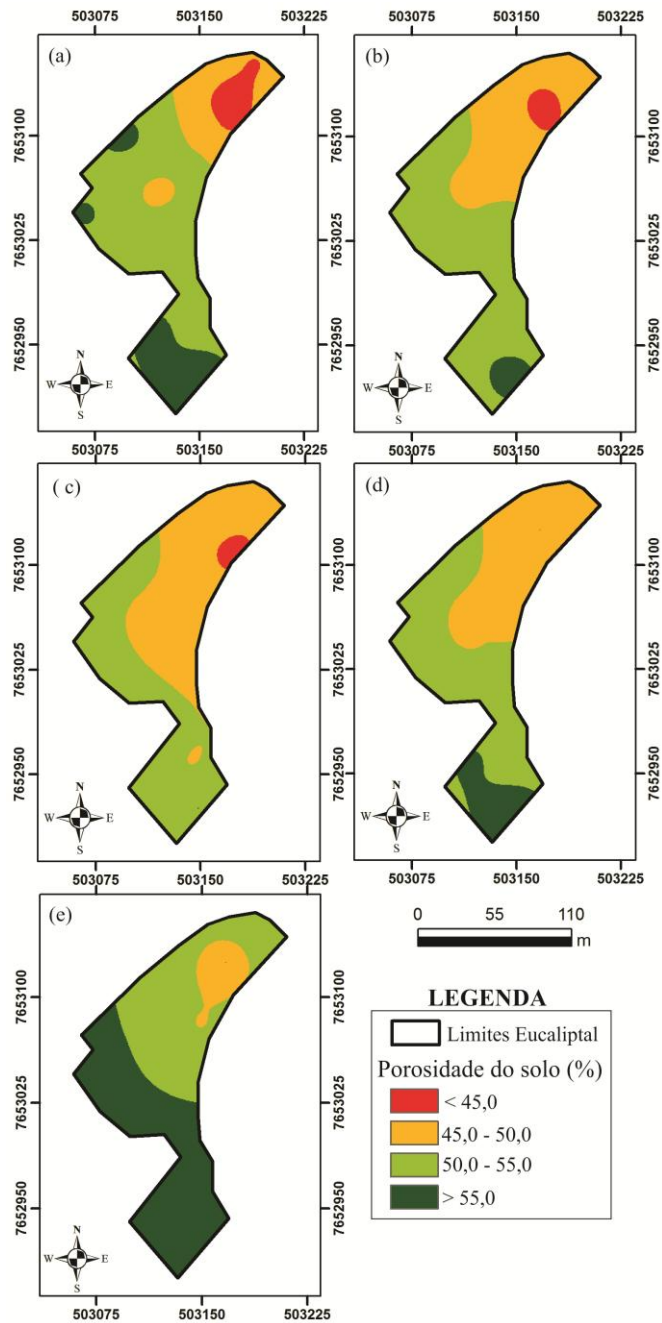


Figura 12 Distribuição espacial da porosidade do solo nas profundidades de 10 (a), 20 (b), 30 (c), 40 (d) e 100 cm (e)

Devido à amplitude dos dados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{SAT}) foi aplicado o método de interpolação do inverso quadrático da distância ao invés da análise variográfica por apresentar um resultado espacial de melhor qualidade e representatividade.

A condutividade hidráulica do solo saturado variou no eucaliptal entre 0,04 e 3,38 $m \cdot dia^{-1}$. O aumento na área segue padrão similar do observado para a densidade e porosidade do solo seguindo o sentido norte/sul.

A Figura 13 apresenta a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado no eucaliptal.

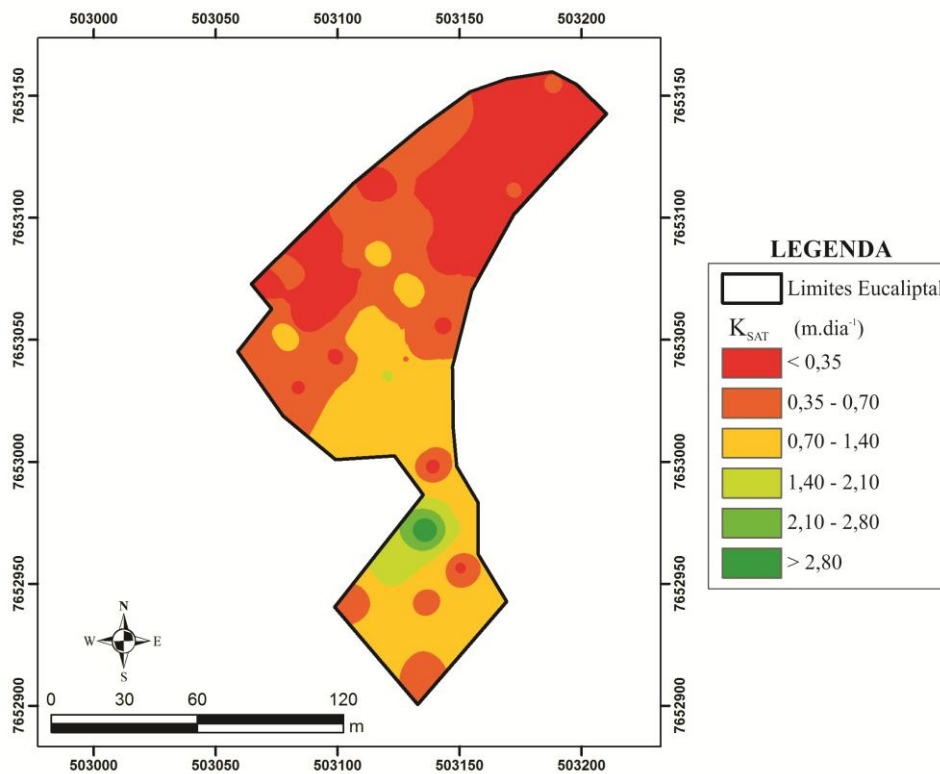


Figura 13 Distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado no eucaliptal

4 CONCLUSÕES

O povoamento de eucalipto apresenta uma distribuição diamétrica compatível com uma floresta equiânea com incremento médio de 1,11 cm no DAP no período analisado. Em relação à altura total dos indivíduos a floresta apresenta um crescimento estabilizado.

O maior incremento, em termos médios, das variáveis DAP, AB, VM, IAF e serrapilheira foram observados no espaçamento 3 x 2 metros, enquanto que o maior incremento em altura foi registrado no espaçamento 3 x 5 metros.

Os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 apresentaram um comportamento atípico em relação à normal climatológica para o município de Lavras com aumento das temperaturas (média, máxima e mínima) e velocidade do vento. Já a precipitação pluvial e umidade relativa do ar apresentaram valores abaixo da normal climatológica.

O dossel do eucalipto promove alterações no microclima interno do povoamento reduzindo a amplitude das variáveis meteorológicas quando comparado ao clima externo ao povoamento.

Os atributos físicos densidade do solo e volume total de poros apresentam forte continuidade espacial em todo o perfil do solo analisado. A densidade do solo reduz no sentido norte/sul enquanto que a porosidade aumenta neste mesmo sentido.

A condutividade hidráulica do solo saturado apresenta alta variabilidade na área estudada com a classe do Latossolo Vermelho apresentando os maiores valores observados quando comparado com a classe do Latossolo Vermelho-Amarelo.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MIRANDA, R. O. V.; CASTRO, R. V. O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1275-1281, 2010.
- ATAÍDE, G. M.; CASTRO, R. V. O.; CORREIA, A. C. G.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; ROSADO, A. M. Interação árvores e ventos: Aspectos ecofisiológicos e silviculturais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 523-536, 2015
- BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.
- CALDEIRA, M. V. W.; VITORINO, M. D.; SCHAADT, S. S.; MORAES, E.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma floresta ombrófila densa. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 53-68, 2008.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.
- CAVICHIOLO, S. R.; DEDECK, R. A.; GAVA, J. L. Modificações nos atributos físicos de solos submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 571-577, 2005.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, p. 1-16, 2015.
- CPTECa – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Boletim CLIMANÁLISE**. Disponível em

<<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0214.shtml>>. Acesso em: 28 set. 2015.

CPTECb – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Boletim InfoClima**. Disponível em < <http://infoclima1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 28 set. 2015.

CROUS, K. Y.; QUENTIN, A. G.; LIN, A. S.; MEDLYN, B. E.; WILLIAMS, B. G.; BARTON, C. V. M.; ELLSWORTH, D. S. Photosynthesis of temperate *Eucalyptus globulus* trees outside their native range has limited adjustment to elevated CO₂ and climate warming. **Global Change Biology**, Maryland, v. 19, n. 12, p. 3790-3807, 2013.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007.

DRAKE, J. E.; ASPINWALL, M. J.; PFAUSTSCH, S.; RYMER, P. D.; REITCH, P. B.; SMITH, R. A.; CROUS, K. Y.; TISSUE, D. T.; GHANNOUM, O.; TJOELKER, M. G. The capacity to cope with climate warming declines from temperate to tropical latitudes in two widely distributed *Eucalyptus* species. **Global Change Biology**, Maryland, v. 21, n. 1, p. 459-472, 2015.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA – Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10 Reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. 83 p.

FREITAS, E. C. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; FONSECA, D. M.; SANTOS, M. V.; LEITE, H. G.; MACHADO, V. D. Deposição de serapilheira e de nutrientes no solo em sistema agrossilvipastoril com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 409-417, 2013.

GHANNOUM, O.; WAY, D. A. On the role of ecological adaptation and geographic distribution in the response of trees to climate change. **Tree Physiology**, Oxford, v. 31, n. 12, p. 1273-1276, 2011.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, G. F.; NAPPO, M. E.; TOMAZELO FILHO, M. Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 947-959, 2010.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. CD-ROM.

HARTMANN, D. L.; TANK, A. M. G. K.; RUSTICUCCI, M. Observations: atmosphere and surface. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Org.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 161–218.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3 ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. 402 p.

IBÁ – **Dados e estatísticas**. Disponível em: <http://www.iba.org/pt/dados-e-estatisticas>. Acesso em: 05 ago. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2014**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>. Acesso em: 25 mar. 2015.

JARAMILLO-BOTERO, C.; SANTOS, R. H. S.; FARDIM, M. P.; PONTES, T. M.; SARMIENTO, F. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes de

espécies arbóreas nativas em um sistema agroflorestal na zona da mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 869-877, 2008.

LEMOS, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 32, p. 153-192, 2010.

MELLO, J. M.; DINIZ, F. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, C. R.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JÚNIOR, F. W. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fuste e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 185-194, 2009.

OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C.; KLINKE NETO, G.; ARAÚJO, E. F. Water erosion in soils under Eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 2, p. 159-169, 2013.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R.; FORTES, L. T. G. (Org.). **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília:INMET, 2009. 465 p.

ROSADO, A. M. **Avaliação da tolerância de árvores de eucalipto a quebra por vento**. 2006. 43 p. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

ROVEDDER, A. P. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALMOLIM, R. S. D.; REICHERT, J. M.; SCHENATO, R. B. Compreensão e aplicabilidade do conceito de solo florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 517-528, 2013.

SANTOS, R. D.; CURI, N.; SHIMIZU, S. H. **Guia prático para classificação de solos brasileiros**. Lavras: Ed. do autor, 2015. 82 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Meteorologia e climatologia florestal**. 1 ed. Curitiba: Editora UFPR, 2004. 195 p.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 276 p.

SPAROVECK, G.; VAN LIER, Q. J.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case of study for Brazil. **International Journal of Climatology**, Reading, v. 27, n. 2, p. 257-266, 2007.

SPERANDIO, H. V.; CAMPANHARO, W. A.; CECÍLIO, R. A.; NAPPO, M. E. Zoneamento agroecológico para espécies de eucalipto no estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 3, p. 203-216, 2010.

THIERSCH, C. R.; ANDRADE, M. G. de; MOREIRA, M. F. B.; LOIBEL, S. Estimativa da relação hipsométrica em clones de *Eucalyptus* sp. com o modelo de curtis ajustado por métodos bayesianos empíricos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 01-08, 2013.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. **Clima e recursos hídricos**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 348 p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2012. 460 p.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A.; MACHADO, R. E. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espacial usando imagens ETM+/LANDSAT. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 421-430, 2004.

YANG, Y.; GUO, J.; CHEN, G.; YIN, Y.; GAO, R.; LIN, C. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. **Plant and Soil**, The Hague, v. 323, n. 1-2, p. 153-162, 2009.

WILDE, S. A. **Forest soils:** their properties and relation to silviculture. New York: The Ronald Press Company, 1958. 536 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento de fertilidade do solo.** 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V.; SILVA, J. E. Soil organic carbon as affected by afforestation with eucalyptus and pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 285-294, 2002.

CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO DA PRECIPITAÇÃO INTERNA E ANÁLISE DA DINÂMICA DO ESCOAMENTO NO TRONCO EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus*

RESUMO

A precipitação pluvial incidente sobre o dossel de uma floresta pode ser redistribuída para o interior do povoamento através da precipitação interna e escoamento pelos troncos ou retornar para a atmosfera por meio da evaporação direta da água que ficou retida no dossel. O objetivo neste capítulo foi quantificar o particionamento da precipitação pluvial em três componentes (precipitação interna – P_i ; escoamento no tronco – EsT ; e perdas por interceptação - IL) a partir da interação desta com um povoamento de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Foram instalados 37 pluviômetros no interior de um povoamento clonal híbrido de eucalipto e 30 coletores de escoamento pelo tronco para monitoramento da P_i e EsT no período de 01/11/2013 a 31/10/2015. A P_i observada foi 72,7 % da precipitação externa (PG), enquanto que o EsT foi 3,1 % da PG . A P_i apresentou-se estruturada espacialmente com forte grau de dependência espacial e baixos erros entre os dados observados e estimados. Observou-se que a P_i aumentou com o espaçamento, uma vez que há maior abertura entre as linhas de plantio atingindo uma diferença de 10,43 % entre os espaçamentos 3 x 2 e 3 x 5 metros. O EsT apresenta incremento com o aumento do volume precipitado. Os indivíduos pertencentes a menor classe diamétrica são 32 vezes mais eficientes na geração de EsT comparados aos pertencentes à maior classe diamétrica. As perdas por interceptação da precipitação foram maiores no espaçamento 3 x 2 metros (26,1 % da PG), seguida pelo 3 x 3 metros (23,4 % da PG) e 3 x 5 metros (14,9 % da PG).

Palavras-chave: Variabilidade espacial. Sazonalidade. Manejo florestal.

ABSTRACT

The gross precipitation over the canopy of a forest can be redistributed into the stand in throughfall and stemflow or return to the atmosphere through direct evaporation of water that was retained in the canopy. The objective of this chapter was to quantify the partitioning of rainfall into three components (throughfall - Pi; Stemflow - EsT, and interception losses - IL) from the interaction of this with a *Eucalyptus* stand in the south of Minas Gerais. Have been installed 37 rain gauges inside a stand clonal *Eucalyptus* hybrid and 30 stemflow collectors for monitoring of Pi and EsT in the period from 11/01/2013 to 31/10/2015. Pi observed was 72.7% of the gross precipitation (PG), whereas EsT was 3.1% of PG. Pi presented is structured spatially with strong spatial dependence and low error between observed and estimated data. It was observed that Pi increased with, there is a greater opening between the planted rows reaching a difference of 10.43% spacings between 3 x 2 and 3 x 5 meters. The EsT has increased with the increase in rainfall volume. Individuals belonging to smaller diameter class are 32 times more efficient in generating flow compared to belong to larger diameter class. The interception losses were greater in the precipitation spacing 3 x 2 meters (601.5 mm), followed by 3 x3 m (539.9 mm) and 3 x 5 meters (342.9 mm).

Keywords: Spatial variability. Seasonality. Forest management.

1 INTRODUÇÃO

Ao estudar as relações entre a precipitação pluvial e a paisagem, surge questionamento pertinente e persistente relacionado ao efeito da cobertura vegetal na redistribuição da chuva e as consequências desta redistribuição nos demais componentes do ciclo hidrológico.

Para Balbinot et al. (2008), ao analisar os efeitos da cobertura vegetal sobre a quantidade de água em uma bacia hidrográfica, deve-se observar todos os componentes que atuam na redistribuição da chuva (interceptação, precipitação interna, escoamento pelo tronco e movimento de água no solo) e não somente o deflúvio final na bacia. A compreensão destes processos de redistribuição da precipitação pluvial tem implicações importantes na predição quantitativa das perdas por interceptação da cobertura vegetal, disponibilidade hídrica e armazenamento de água em bacias com características florestais (KATO et al., 2013).

O primeiro estágio do particionamento da precipitação é a interceptação. A interceptação envolve as perdas por evaporação e o consumo de água das gemas, além de promover alterações na qualidade da água antes desta atingir o solo (Balieiro et al., 2007).

A redistribuição da precipitação pluvial a partir do dossel tem sua variabilidade afetada por uma gama de fatores abióticos e bióticos. Os fatores abióticos são, principalmente, representados pelas características da precipitação (intensidade, duração, volume total e intervalo entre eventos sucessivos), taxa de evaporação e vento (velocidade e direção) (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA JUNIOR; FROST, 2006; STAELENS et al., 2008). Os fatores bióticos estão em função, principalmente, da arquitetura do dossel e da espécie (forma, tamanho e ângulo de inserção da folha no ramo, geometria tridimensional da copa e capacidade de armazenamento) (CROCKFORD;

RICHARDSON, 2000; JOHNSON; LEHMANN, 2006; LEVIA JUNIOR; FROST, 2006).

A interceptação da precipitação pluvial pelo dossel provoca variabilidade na distribuição espacial da precipitação interna (GERRITS; PFISTER; SAVENIJE, 2010). Os mesmos autores afirmam ainda que a interceptação tem como característica a alta sazonalidade provocada pelas mudanças na taxa evaporativa ao longo do ano e no próprio regime pluviométrico. Levia Junior e Frost (2006) analisaram os resultados de 163 estudos sobre o assunto e concluíram que a variabilidade espaço-temporal da precipitação interna é regida pelo comportamento físico da precipitação incidente e arquitetura do dossel.

A variabilidade espacial da interceptação e seus efeitos na precipitação interna e escoamento no tronco criam padrões de umidade distintos que persistem no tempo e estes padrões variam em função da espécie e seu papel na comunidade ecológica, propagando-se através da umidade do solo, recarga e fluxos geoquímicos (GUSWA, 2012; KATO et al., 2013).

A variabilidade da precipitação interna reduz com o aumento da precipitação incidente (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; ZIMERMANN; ZIMERMANN; ELSENBEER, 2009; GERRITS; PFISTER; SAVENIJE, 2010). Stealens et al. (2006) apontam que a alta variabilidade da precipitação interna associada a eventos de baixa magnitude é induzida pelas diferenças nas perdas iniciais de interceptação no dossel além das aberturas existentes neste.

Price e Carlyle-Moses (2003) perceberam que um ponto crítico na avaliação da variabilidade espacial da precipitação interna é a quantidade de coletores necessários para representar adequadamente uma dada área. Eles identificaram que para chuvas menores que 2 mm é necessário uma quantidade muito maior de coletores quando comparados a eventos com lâmina superior a 4 mm. Cabe ressaltar que não há uma definição de metodologia suficientemente

conclusiva para o monitoramento da redistribuição da precipitação pluvial e com resultados validados nos diversos ecossistemas e padrões de povoamentos florestais existentes.

Alguns estudos têm aplicado métodos geoestatísticos para explicar a variabilidade espacial da precipitação interna em ambientes florestais a partir da análise da dependência espacial de amostras pontuais (BOUTEN; HEIMOVAARA; TIKTAK, 1992; GÓMEZ et al., 2002; KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; ZIMERMANN; ZIMERMANN; ELSENBEEER, 2009; GERRITS; PFISTER; SAVENIJE, 2010). Alguns trabalhos têm apresentado coeficientes de variação da precipitação interna, em termos espaciais, com valores estáveis entre 15 e 30% para eventos de grande magnitude ou acumulados ao longo do tempo (escalas diária, semanal ou decenal) (CARLYLE-MOSES; LAUREANO; PRICE, 2004; KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005).

No tocante à caracterização da erosividade da chuva e o padrão da precipitação, os estudos têm sido focados na análise de dados oriundos de estações localizadas a céu aberto, sem nenhuma inferência sobre como o dossel florestal age sobre o evento de precipitação. Nanko et al. (2011) afirmam que o dossel modifica o tamanho da gota e a energia cinética desta afetando assim a erosividade da chuva que atinge os solos florestais.

Um componente muitas vezes negligenciado nos estudos de hidrologia florestal é o escoamento no tronco. Levia Junior e Frost (2003) indicam que a sub-representação desta variável está associada a uma suposta pequena fração desta em relação ao total precipitado. Estes autores questionam esta justificativa, pois o escoamento no tronco é função da área seccional dos indivíduos e estes ocupam uma pequena fração da área total da floresta.

O escoamento no tronco é canalizado para uma pequena área em volta da base da árvore tornando-se uma importante fonte de água e nutrientes nesta

região, podendo ainda afetar fortemente o padrão espacial da umidade e composição química do solo, além da distribuição e composição da vegetação rasteira (HERWITZ, 1986; FALKENGREN-GRERUP, 1989; DUROCHER, 1990; LEVIA JUNIOR; FROST, 2003; JOHNSON; LEHMANN, 2006).

Levia Junior e Frost (2003) também identificaram ausência de um protocolo padrão para o monitoramento do escoamento no tronco o que acaba dificultando a comparação dos resultados entre estudos distintos. Para contornar esta situação, estes autores recomendam a divulgação do erro padrão dos dados analisados, pois este permite uma melhor noção da variabilidade média dos resultados sendo uma informação mais útil na comparação entre trabalhos distintos.

Para a cultura do eucalipto no Brasil, tem-se encontrado valores de perdas por interceptação entre 10,0 e 20,0%, precipitação interna entre 75,0 e 85,0% e escoamento no tronco na faixa de 1,0 a 5,0% da precipitação externa (LIMA, 1976; ALMEIDA; SOARES, 2003; BALIEIRO et al., 2007; SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011; SHINZATO et al., 2011).

Objetivou-se neste trabalho quantificar o particionamento da precipitação pluvial em três componentes (perdas por interceptação, precipitação interna e escoamento no tronco) a partir da interação desta com um povoamento de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Em termos específicos, buscou-se: (i) caracterizar a precipitação interna no tocante aos totais, intensidade e duração dos eventos correlacionando-os com a precipitação incidente; (ii) avaliar o comportamento físico da precipitação interna em termos de padrões hidrológicos de precipitação; (iii) estudar a variabilidade espacial da precipitação interna em termos anuais e sazonais (períodos secos e chuvosos); (iv) caracterizar o escoamento no tronco e os efeitos do manejo florestal neste; e (v) correlacionar características físicas da precipitação incidente com o comportamento do escoamento no tronco.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em um povoamento de eucalipto localizado na unidade experimental do Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal (LEMAF) no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Para caracterização dos eventos de precipitação foram utilizados dados obtidos em duas estações meteorológicas (Figura 1) no período de 1º de novembro de 2013 a 31 de outubro de 2015, totalizando 24 meses de observação.

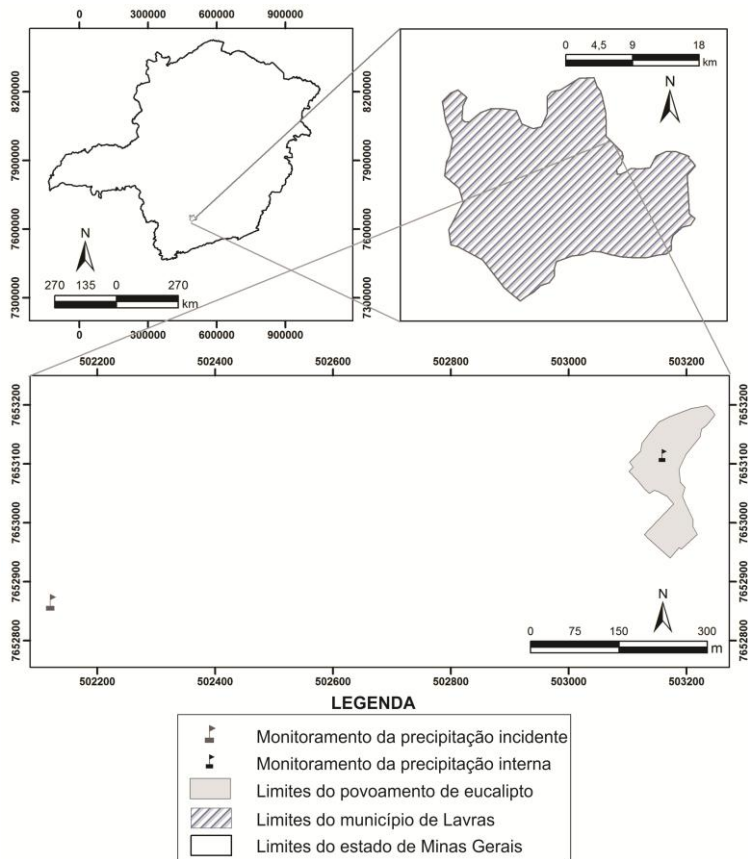


Figura 1 Localização geográfica da área experimental e dos postos pluviométricos utilizados

2.1 Erosividade e padrão hidrológico da precipitação

Para determinação da precipitação incidente (externa) e estudo de seu comportamento físico, foram utilizados dados oriundos de pluviogramas registrados no posto de monitoramento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizado a uma distância de 1000 metros do povoamento.

Na análise física da precipitação interna foram utilizados dados obtidos de uma estação meteorológica instalada no centro do povoamento, configurada para registrar a lâmina precipitada a cada dez minutos com precisão de 0,2 mm.

Inicialmente os dados foram tratados na escala diária e analisada a frequência dos eventos ocorridos e lâmina total, seguindo os intervalos de classe propostos na Tabela 1.

Tabela 1 Intervalos de classe para precipitação diária

Classe de Chuva (mm)
0,2 – 5,0
5,0 – 10,0
10,0 – 20,0
20,0 – 30,0
30,0 – 40,0
> 40,0

Para individualização dos eventos chuvosos foi adotada a metodologia proposta por Cabeda (1976) que define uma chuva individual como aquela separada de outra por um intervalo mínimo de seis horas.

Para cada evento individual foram determinados seu tempo de duração, em horas, sua intensidade média, em mm.h^{-1} , e as intensidades máximas em 10, 30, 60 e 120 minutos, todas em mm.h^{-1} .

A energia cinética de cada evento foi calculada conforme a Equação 1, proposta por Wischmeier e Smith (1978) e adaptada por Foster et al. (1981) para o sistema internacional de unidades.

$$Ec = 0,119 + 0,0873 * \log(I) \quad (1)$$

Em que E_c é a energia cinética, em $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$; I é a intensidade média da chuva, em $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. A energia cinética por incremento de chuva foi obtida conforme a Equação 2.

$$Ec_i = Ec * LP \quad (2)$$

Sendo E_{c_i} a energia cinética de cada incremento, em $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ e LP a lâmina precipitada do incremento de chuva, em mm . A energia cinética do evento de precipitação foi determinada pela soma da energia cinética de cada incremento, conforme Wischmeier e Smith (1978).

A análise do potencial erosivo da precipitação interna e externa foi conduzida com base no índice de erosividade EI_{30} (Equação 3). Para uma chuva ser considerada erosiva a mesma deve ter como característica uma lâmina total do evento superior a 10 mm ou energia cinética total do evento maior que 3,6 $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ (DE MARIA, 1994).

$$EI_{30} = EC_i * I_{30} \quad (3)$$

EI_{30} é a erosividade da chuva ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) e I_{30} a intensidade máxima consecutiva, em 30 minutos. A partir do somatório dos valores de EI_{30} de cada evento erosivo em cada mês foram obtidas as erosividades mensais referentes à precipitação externa e interna.

Determinaram-se os padrões hidrológicos de cada evento de precipitação pluvial (incidente e interna) segundo a classificação proposta por Horner e Jens (1942) que separa os eventos em três classes: avançado – onde o pico de maior intensidade ocorre antes de 33% da duração do evento chuvoso; intermediário,

onde o pico de maior intensidade localiza-se entre 33% e 66% da duração do evento; e tardio, com o pico do evento ocorrendo após 66% da duração do mesmo.

Para a análise do padrão hidrológico dos eventos de precipitação pluvial adotou-se como critério uma lâmina mínima de 1,4 mm, uma vez que eventos com lâmina total precipitada inferior a esta não permitem a classificação devido à presença de múltiplos picos de mesma intensidade ao longo do evento ou duração inferior a 30 minutos.

2.2 Variabilidade espacial da precipitação interna

Para o estudo da variabilidade espacial da precipitação interna foram utilizados 38 pluviômetros distribuídos no interior do povoamento conforme Figura 2. Destes, 30 pluviômetros são do modelo “Ville de Paris” (Figura 3a), um equivale ao pluviômetro da estação meteorológica automática localizada no interior do povoamento (Figura 3b) e sete são do tipo calha (Figura 3c).

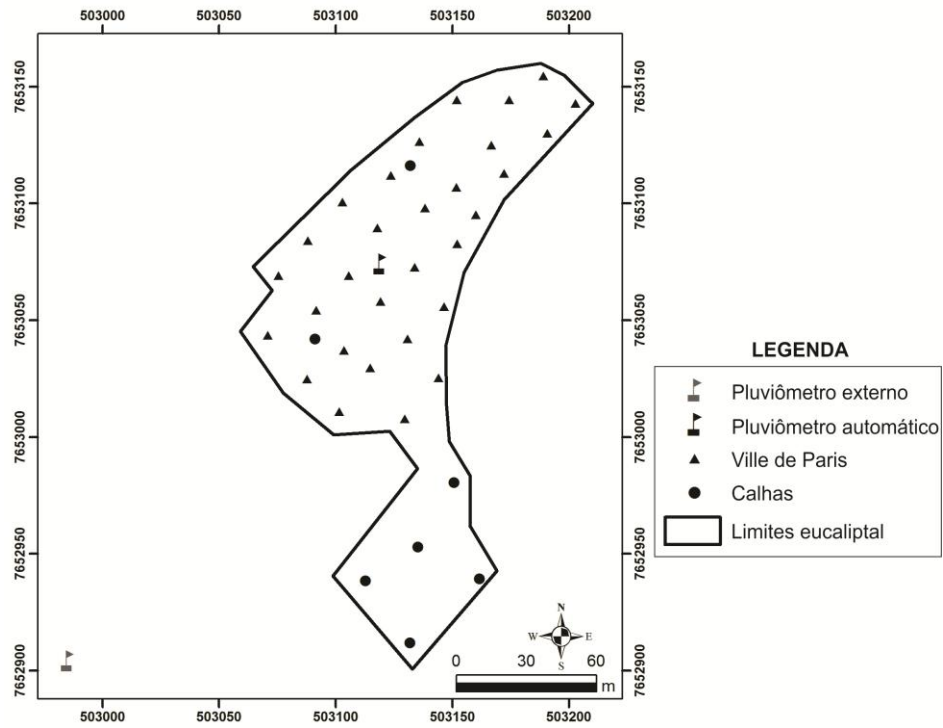


Figura 2 Distribuição espacial dos pluviômetros no interior do povoamento de eucalipto

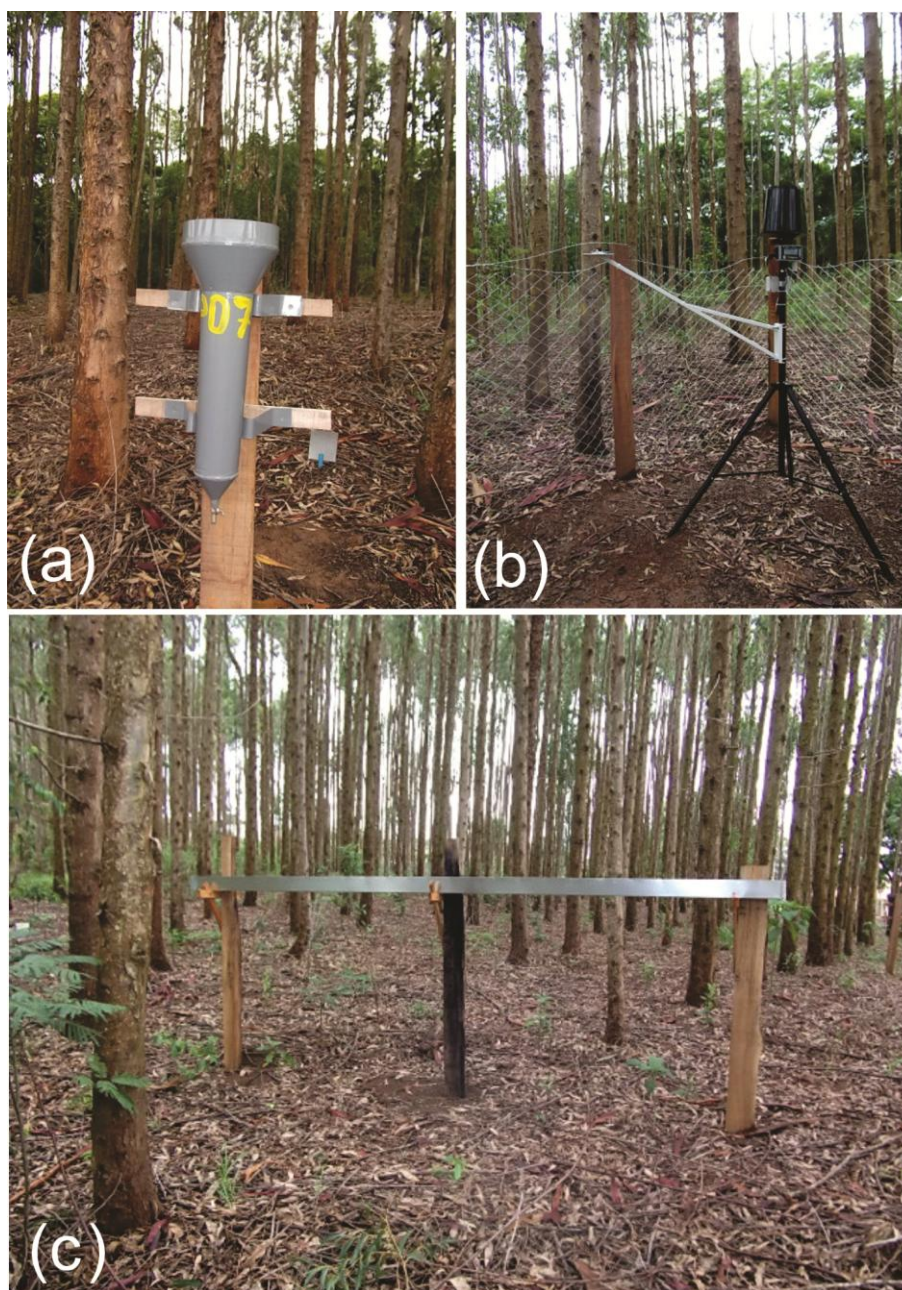


Figura 3 Pluviômetros “Ville de Paris” (a) e automático (b) e calha (c)

Os pluviômetros “Ville de Paris” foram instalados em uma grade aproximadamente regular com distância média de 20 metros próximos aos indivíduos identificados com diâmetros representativos no experimento (vide capítulo 2). Também foi instalado um pluviômetro modelo “Ville de Paris” a 150 metros do experimento em área aberta, gramada e distante de obstáculos para uma medição mais precisa da precipitação pluvial incidente sobre o povoamento.

As medições dos eventos chuvosos foram realizadas no período entre 8:00 e 12:00 horas da manhã. Em condição de chuva neste período a medição era realizada no período da tarde com intervalo mínimo de duas horas após o fim do evento a fim de garantir a drenagem efetiva do dossel. A lâmina precipitada internamente foi obtida a partir da Equação 4.

$$h_{pi} = \left(\frac{V}{A}\right) \times 10 \quad (4)$$

Em que h_{pi} corresponde à lâmina observada no dia, em mm; V o volume coletado em ml e A representa a área do coletor em cm^2 . Posteriormente, os dados foram acumulados para as escalas mensal (média), anual (2013/2014 e 2014/2015) e sazonal (diferenciando os períodos seco e chuvoso de cada ano hidrológico).

A espacialização foi realizada em função da porcentagem da precipitação interna. Este percentual foi obtido através da relação entre os totais, nas diversas escalas analisadas, da precipitação interna e a precipitação incidente.

A verificação de tendências e valores discrepantes por meio da análise exploratória dos dados observados é uma etapa imprescindível para aplicação confiável de técnicas geoestatísticas (MELLO; VIOLA, 2013). Desta maneira, foram gerados gráficos de tendência espacial, histogramas de

frequência e gráficos do tipo “box plot” para identificar valores discrepantes e removê-los quando necessário das séries de dados.

Em seguida, procedeu-se o ajuste de semivariogramas experimentais com base nos modelos exponencial, esférico e gaussiano, aplicando-se o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) utilizando o software ArcGIS em sua versão 10.1. Para identificação do melhor ajuste foram empregados os coeficientes estatísticos Grau de Dependência Espacial (GD – Equação 5), Erro Médio (EM – Equação 6), Tendência de Estimativa (TE – Equação 7) e Desvio Padrão dos Erros Reduzidos (S_{ER} – Equação 8).

$$GD(\%) = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

Em que: C_1 corresponde à contribuição e $C_1 + C_0$ representa o patamar. O grau de dependência espacial foi classificado em forte (maior que 75 %), moderado (entre 75 e 25 %) e fraco (menor que 25 %) segundo Zimback (2001).

$$EM(\%) = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{|\hat{z}_i - z_i|}{z_i} \times 100 \quad (6)$$

Em que: n representa o número de dados, Z_i o valor observado no ponto i e \hat{Z}_i corresponde ao valor estimado no ponto i .

$$TE(\%) = \frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{\hat{z}_i - z_i}{z_i} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{z_i - \hat{z}_i}{\sigma \hat{z}_i} \right)^2} \quad (8)$$

Em que $\sigma \hat{Z}_i$ representa o desvio padrão da estimativa no ponto i .

Por fim, para espacialização dos dados médios mensais, anuais e sazonais foi aplicado o método da Krigagem Ordinária com base no melhor ajuste dos semivariogramas experimentais testados utilizando o software ArcGIS em sua versão 10.1 para confecção dos mapas.

O percentual da precipitação interna foi avaliado em função dos manejos empregados no povoamento de eucalipto (três tipos de espaçamentos).

2.3 Escoamento no tronco

Para o estudo da dinâmica do escoamento no tronco no povoamento de eucalipto foram instalados coletores nas 30 árvores identificadas como representativas do povoamento e escolhidas em função da classe diamétrica com base nos dados do censo realizado em 2013 conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Quantidade de coletores de escoamento no tronco em função da distribuição diamétrica do povoamento

Classe	Limites (cm)		Coletores
	Inferior	Superior	
C01	2,50	7,49	1
C02	7,50	12,49	4
C03	12,50	17,49	5
C04	17,50	22,49	9
C05	22,50	27,49	7
C06	27,50	32,49	3
C07	32,50	37,60	1

Os coletores consistem em um conjunto composto pelo sistema de captação e armazenamento. O sistema de captação é formado por uma mangueira de polipropileno flexível, fixada no tronco em espiral e vedada com silicone para evitar vazamentos, a fim de coletar todo o volume drenado da copa pelo fuste.

A mangueira é direcionada para um balde vedado com capacidade máxima de 65 litros, onde o escoamento fica armazenado até o momento da leitura (Figura 4). As leituras são realizadas simultaneamente à medição da precipitação interna, seguindo o mesmo padrão metodológico desta.



Figura 4 Coletor de escoamento no tronco utilizado no monitoramento

A lâmina escoada pelo tronco (h_{EST}) foi obtida com base na Equação 9, em mm, onde V corresponde ao volume coletado em L e A representa a área da copa em m^2 .

$$h_{EST} = \left(\frac{V}{A} \right) \quad (9)$$

A área da copa foi estimada a partir da projeção vertical da copa de cada árvore no solo. Para tanto, a projeção foi seccionada em oito triângulos nos quais

foram mensuradas as distâncias dos segmentos que formavam o ângulo de 45° de cada triângulo (Figura 5).

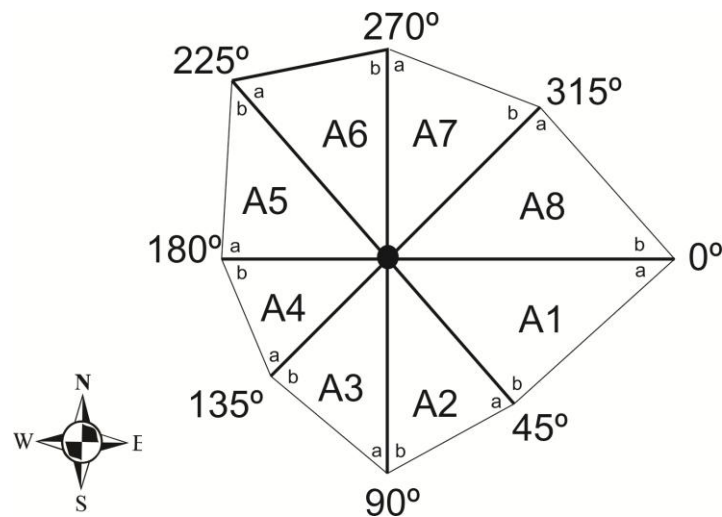


Figura 5 Projeção vertical da copa e suas subdivisões em função do eixo do tronco da árvore

A estimativa da área da copa de cada indivíduo foi realizada segundo a Equação 10 conforme Shinzato et al. (2011).

$$A = \sum_{i=1}^8 \frac{(a_i \times b_i \times \sin 45)}{2} \quad (10)$$

Em que A representa o somatório das áreas de cada seção da copa do indivíduo (m^2); a e b correspondem aos comprimentos, em metros, das seções de um ângulo de 45° entre si.

Foi aplicada a Razão de Afunilamento (F) proposta por Herwitz (1986) que permite comparar diferentes entradas de escoamento no tronco entre indivíduos, sendo representada pela Equação 11.

$$F = \frac{VEsT}{P \times AB} \quad (11)$$

Em que $VEsT$ representa o volume escoado pelo tronco de um indivíduo (L), P corresponde a precipitação incidente no povoamento (mm) e AB expressa a área basal do indivíduo (m^2).

2.4 Perdas por interceptação

As perdas por interceptação da precipitação incidente foram estimadas com base na Equação 12.

$$IL = PG - Pi - EsT \quad (12)$$

Em que IL representa as perdas por interceptação, PG a precipitação externa, Pi a precipitação interna e EsT o escoamento no tronco, todos em porcentagem da precipitação externa. Esta informação foi espacializada e mapas de interceptação desenvolvidos.

Por fim, foram identificados os efeitos dos espaçamentos empregados no povoamento nos valores de perdas por interceptação da precipitação pelo dossel florestal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os dois anos de monitoramento foram registrados 2306,8 mm de precipitação externa. Este total foi distribuído em 160 eventos diários, onde a lâmina máxima observada em um único evento foi de 82,2 mm. A precipitação interna apresentou uma lâmina total, no mesmo período em termos médios, igual 1678,0 mm, correspondendo a 72,7 % da precipitação externa, sendo que a maior lâmina observada foi de 52,5 mm.

Balieiro et al. (2007) identificaram um percentual de 78,5% de precipitação interna para um povoamento de *Eucalyptus*. Rodrigues e Costa (2009) observaram um valor médio de 80% da precipitação incidente que consegue ultrapassar o dossel do eucaliptal. Os valores encontrados neste estudo, portanto, estão muito próximos dos citados, e são explicados pela idade e espaçamento do povoamento (10 anos e 10 m², em média), que se apresenta com crescimento estabilizado e bom fechamento de copa, favorecendo assim o processo de interceptação da precipitação incidente.

No Gráfico 1 estão apresentadas as frequências dos eventos (a) e a lâmina precipitada (b) por classe de chuva.

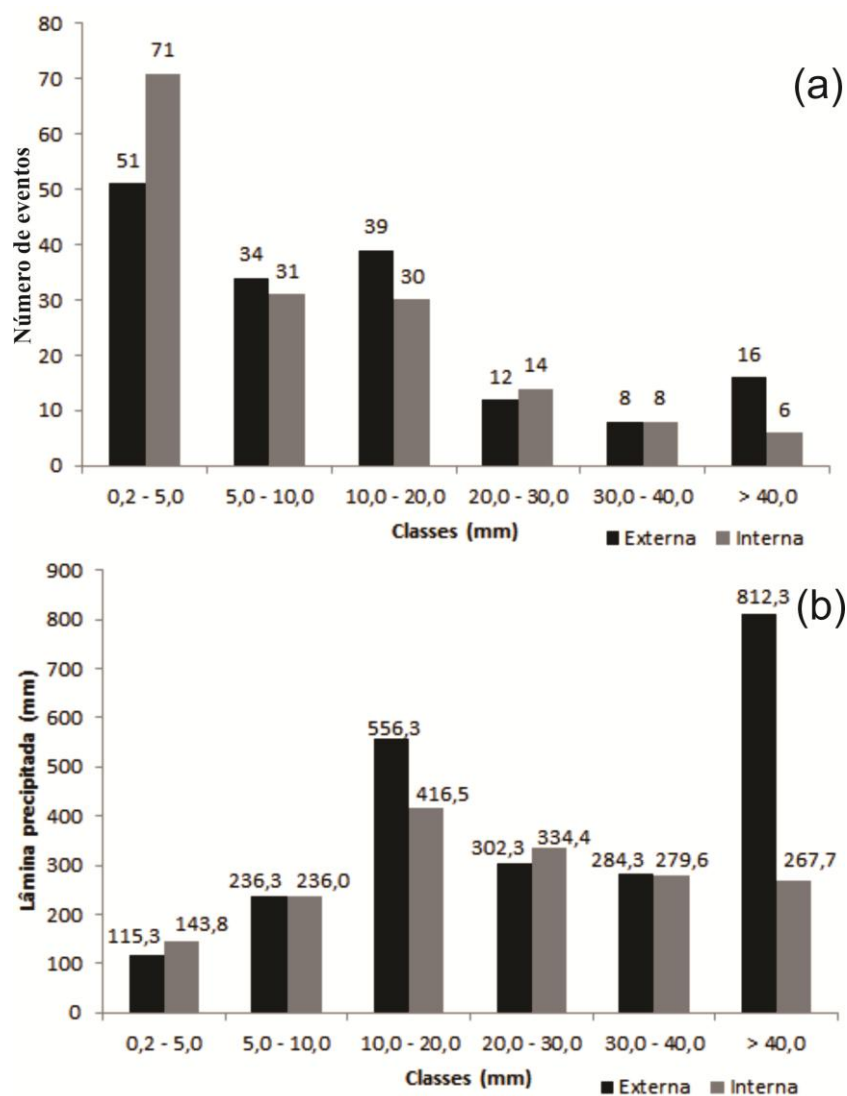


Gráfico 1 Número de eventos (a) e lâmina total precipitada (b) por classe de chuva

Com base no gráfico da letra a, observa-se que 31,9 % dos eventos de precipitação incidente (externa) apresentam uma lâmina inferior a 5,0 mm, porém esta classe representa apenas 5,0 % do volume total precipitado sobre o dossel. 44,4 % dos eventos de precipitação interna localizam-se na classe inferior a 5,0 mm, o equivalente a 8,6 % do volume precipitado internamente.

Efeito inverso foi observado na classe com eventos maiores que 40,0 mm, em que a precipitação externa apresentou 10,0% do total de eventos com lâmina equivalente a 35,2 % do total precipitado, enquanto que 3,8 % dos eventos de precipitação interna ocorreram nesta classe, representando 16,0 % do volume observado internamente. Estes dados confirmam e destacam o papel do dossel florestal no particionamento da precipitação incidente provocando um atraso na chegada da água até o piso florestal.

O período chuvoso na região sul de Minas Gerais ocorre entre os meses de outubro e março, enquanto que o período seco entre abril e setembro. Foi observado que 74,2 % do total da precipitação externa ocorreu no período chuvoso, restando 25,8 % dos eventos no período seco. Padrão similar foi registrado para a precipitação interna, com percentuais de 74,9 e 25,1 para os períodos chuvoso e seco, respectivamente.

De acordo com Ávila et al. (2014), o processo de redistribuição da água da chuva no ambiente florestal é influenciado pela distribuição temporal dos eventos sendo representado pela sazonalidade climática. Ao discretizar os percentuais de precipitação interna em função da sazonalidade climática percebe-se que o período chuvoso apresenta uma precipitação interna equivalente a 73,4 % da precipitação externa contra 70,8 % para o período seco. No período chuvoso, o dossel permanece úmido por mais tempo permitindo assim alcançar de maneira mais rápida e efetiva a capacidade máxima de armazenamento do mesmo, favorecendo o processo de precipitação interna. Entretanto, na região, as lâminas precipitadas no período seco são concentradas em poucos eventos provocando um efeito similar do período chuvoso com rápida saturação do dossel.

3.1 Análise da erosividade e padrões hidrológicos da precipitação interna

Os 160 eventos diários de precipitação externa registrados no período foram desmembrados em 198 eventos com intervalo mínimo de 6 horas entre eles, dos quais 119 apresentaram lâmina superior a 1,4 mm. Já para a precipitação interna foram contabilizados 98 eventos que atenderam a este critério.

No Gráfico 2 estão apresentadas as intensidade médias dos eventos por classe de chuva.

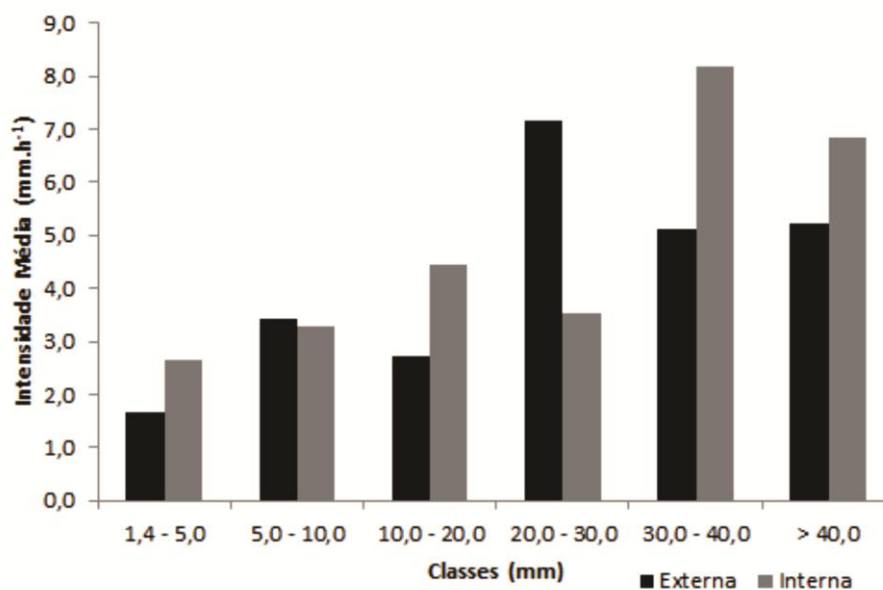


Gráfico 2 Intensidade média dos eventos por classe de chuva

De maneira geral, os eventos pertencentes à menor classe apresentam baixa intensidade média apesar de sua alta frequência tanto para precipitação externa quanto para a interna.

Destaca-se uma maior intensidade média para os eventos internos em relação aos externos. Este fato ocorre devido ao menor tempo de duração dos eventos internos que tem seu início atrasado devido à interceptação pelo dossel.

No Gráfico 3 são apresentadas as porcentagens dos eventos de precipitação externa e interna classificados de acordo com os padrões hidrológicos da chuva.

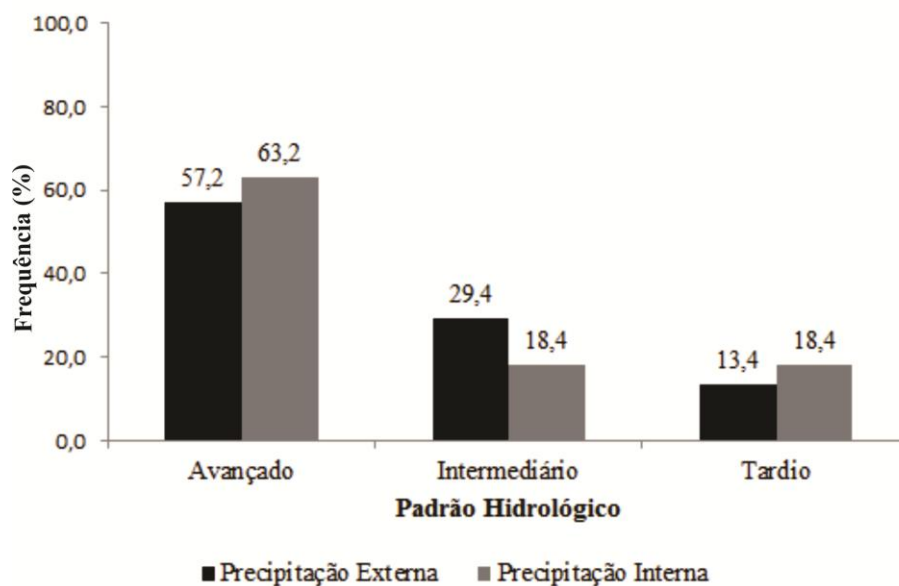


Gráfico 3 Distribuição dos padrões hidrológicos da precipitação externa e interna em um povoamento de eucalipto

Há um predomínio do padrão avançado em relação aos demais para ambas as precipitações. O aumento de eventos classificados com padrão avançado para a precipitação interna pode ser explicado pela influência do dossel florestal. Há um atraso no início do evento internamente quando comparado ao evento externo devido à retenção de água no dossel, provocando uma tendência de aproximação do pico com o terço inicial do evento.

Aquino et al. (2014) estudando os padrões de chuva externa para a região de Lavras, identificaram o padrão avançado como predominante na região, correspondendo a 59 % dos eventos observados. Desta maneira, o padrão

da precipitação interna acompanha a dinâmica e o padrão da precipitação externa.

Sob mesmas condições de lâmina precipitada e duração, o padrão avançado tende a ser menos danoso no tocante à erosão, pois o solo encontra-se com menor umidade e a ocorrência do pico no primeiro terço do evento acarretará em menores perdas de solo, uma vez que o solo estará com umidade mais baixa no início do evento, favorecendo a infiltrabilidade. Valvassori e Back (2014) e Bazzano, Eltz e Cassol (2010) identificaram o padrão avançado como menos danoso ao solo quando comparado aos demais padrões de chuva.

Na Tabela 3 são apresentadas as principais características físicas da precipitação externa por padrão de chuva para Lavras.

Tabela 3 Características físicas da precipitação externa por padrão de chuva para o município de Lavras entre 2013 e 2015

Unidade	P (mm)	td (h)	EC (MJha)	Im	Imax (mm.h ⁻¹)				EI30
					10'	30'	60'	120'	
Padrão Avançado									
Total	940,6	501,2	198,6	-	-	-	-	-	5858,3
Média	13,8	7,4	2,9	2,7	26,6	14,3	9,1	5,8	195,3
Máximo	64,8	34,7	15,2	12,4	158,4	65,6	41,6	22,5	872,7
Mínimo	1,4	0,5	0,2	0,1	1,2	1,2	0,8	0,4	11,1
Desvio	13,1	6,8	3,1	2,7	28,4	14,0	9,0	5,1	237,0
Padrão Intermediário									
Total	382,4	195,2	80,9	-	-	-	-	-	1977,7
Média	10,9	5,6	2,3	5,1	22,4	13,5	8,3	4,5	152,1
Máximo	38,2	19,8	10,0	24,2	114,0	48,8	32,0	18,9	488,6
Mínimo	1,4	0,3	0,2	0,1	2,4	0,8	0,4	0,3	4,7
Desvio	10,6	5,8	2,5	5,7	23,3	13,2	8,1	4,8	132,7
Padrão Tardio									
Total	117,4	107,5	23,0	-	-	-	-	-	227,0
Média	7,3	6,7	1,4	1,6	14,5	8,5	5,0	2,9	45,4
Máximo	15,6	14,7	3,3	5,3	43,2	26,0	13,0	6,6	84,4
Mínimo	1,4	1,5	0,2	0,4	1,8	0,8	0,8	0,7	18,3
Desvio	4,5	4,3	1,1	1,5	12,6	7,2	3,6	2,0	25,8

Em que: P = Precipitação; td = Tempo de duração do evento; EC = Energia cinética; Im = Intensidade média; Imax = Intensidade máxima em um dado intervalo de tempo em minutos; EI30 = Índice de erosividade.

Na Tabela 4 são apresentadas as principais características físicas da precipitação interna por padrão de chuva para o povoamento de eucalipto.

Tabela 4 Características físicas da precipitação interna por padrão de chuva para o povoamento de eucalipto entre 2013 e 2015

Unidade	PG (mm)	td (h)	EC (MJha)	Im	Imax				EI30
					10'	30'	60'	120'	
Padrão Avançado									
Total	737,0	450,5	158,2	-	-	-	-	-	3586,4
Média	11,9	7,3	2,6	2,7	20,2	12,3	7,5	4,8	149,4
Máximo	50,2	32,7	19,6	13,8	106,8	61,2	38,0	19,8	672,4
Mínimo	1,4	0,2	0,2	0,2	1,2	0,8	0,6	0,4	9,7
Desvio	12,1	7,5	3,4	3,1	21,9	13,1	8,1	4,6	178,0
Padrão Intermediário									
Total	161,4	74,7	34,2	-	-	-	-	-	558,5
Média	9,0	4,1	1,9	6,8	21,4	11,8	6,2	4,7	93,1
Máximo	28,2	18,7	6,1	21,8	63,6	34,4	14,8	11,2	163,7
Mínimo	1,6	0,3	0,3	0,2	2,4	1,6	1,2	0,6	15,2
Desvio	7,5	5,6	1,7	6,3	16,6	9,1	4,6	3,8	58,7
Padrão Tardio									
Total	156,6	91,3	32,5	-	-	-	-	-	764,5
Média	8,7	5,1	1,8	3,5	14,8	10,1	6,5	3,1	191,1
Máximo	38,8	14,0	9,7	23,3	55,2	38,4	30,4	10,8	372,6
Mínimo	1,4	0,3	0,2	0,2	2,4	1,2	0,8	0,6	4,2
Desvio	10,1	4,5	2,5	5,3	16,9	12,2	8,2	3,2	130,8

Em que: PG = Precipitação externa; td = Tempo de duração do evento; EC = Energia cinética; Im = Intensidade média; Imax = Intensidade máxima em um dado intervalo de tempo em minutos; EI30 = Índice de erosividade.

Observa-se, de maneira geral, que todos os padrões de precipitação interna apresentam uma lâmina média precipitada por evento muito próxima, variando entre 8,7 e 11,9 mm, enquanto que a precipitação externa apresenta maior variabilidade em termos médios (7,3 a 13,8 mm). Entretanto, as outras características da chuva apresentam comportamento distinto entre os padrões.

Na análise da precipitação interna para o padrão avançado foi encontrado o maior tempo de duração e, conseqüentemente, menor intensidade média da precipitação. De maneira geral, tanto no padrão avançado quanto no intermediário, as características físicas da precipitação externa apresentam-se

com maior magnitude e desvio quando comparadas às características da precipitação interna.

Em contrapartida, para o padrão tardio a precipitação interna apresenta maiores desvios e magnitude para todas as características físicas quando comparada à precipitação externa neste padrão hidrológico de chuva.

No Gráfico 4 são apresentadas as erosividades médias mensais para a precipitação externa e interna ao povoamento de eucalipto.

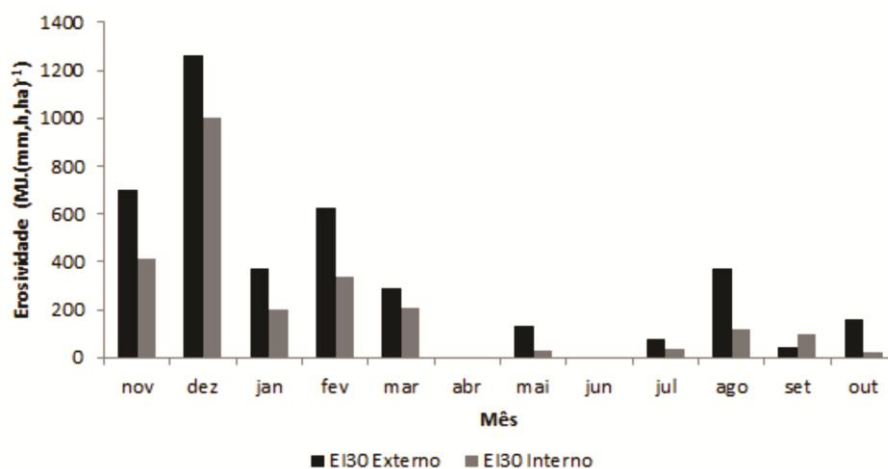


Gráfico 4 Erosividade média mensal externa e interna ao povoamento de eucalipto

Do total observado de erosividade, 84,6 % foi provocado pela precipitação externa no período chuvoso. Comportamento similar também foi observado para a erosividade provocada pela precipitação interna (88,7 %). Os dados encontrados para a erosividade em função da precipitação interna apresentam-se, em termos totais, 39,1 % menores que os observados para a precipitação externa.

Segundo classificação proposta por Foster et al. (1981), a erosividade externa no período de análise, pode ser classificada como média, apresentando um valor total anual de $4031,8 \text{ MJ.mm.(h.ha)}^{-1}$. Resultado similar foi observado

para a erosividade provocada pela precipitação interna com valor de 2454,7 MJ.mm.(h.ha)⁻¹ classificado como de média erosividade.

Os resultados obtidos para a precipitação interna reforçam algumas evidências encontradas em estudos de precipitação externa (AQUINO et al., 2014; VALVASSORI; BACK, 2014; BAZZANO; ELTZ; CASSOL, 2010) de que o padrão avançado é menos danoso ao solo.

3.2 Análise exploratória dos dados de precipitação interna

Na Tabela 5 são apresentados dados estatísticos referentes a cada período utilizado para espacialização da porcentagem da precipitação interna.

Tabela 5 Estatística descritiva da porcentagem da precipitação interna para o povoamento de eucalipto

Período	Média	Mediana	D.P.	A.	C.V.	T.N.
	(% Pi)				(%)	
Janeiro	71,01	72,24	14,56	-0,584	20,5	0,290 ^{NS}
Fevereiro	72,68	72,57	9,37	-0,370	12,9	0,289 ^{NS}
Março	71,29	73,71	10,83	-0,849	15,2	0,596 [*]
Abril	79,28	78,59	9,88	-0,014	12,5	0,247 ^{NS}
Mai	78,63	78,92	8,39	-0,162	10,7	0,213 ^{NS}
Junho	72,94	72,69	11,43	-0,096	15,7	0,166 ^{NS}
Julho	73,39	75,96	11,91	-0,495	16,2	0,693 [*]
Agosto	65,29	65,95	8,38	-0,072	12,8	0,449 [*]
Setembro	72,02	71,44	8,42	-0,052	11,7	0,197 ^{NS}
Outubro	70,01	72,53	10,85	-0,327	15,5	0,459 [*]
Novembro	74,89	75,51	10,67	-0,151	14,3	0,430 [*]
Dezembro	69,32	68,45	8,04	0,046	11,6	0,274 ^{NS}
Anual 13/14	72,87	72,39	10,92	-0,637	15,0	0,305 ^{NS}
Anual 14/15	73,10	72,93	8,78	0,006	12,0	0,252 ^{NS}
Chuvoso 13/14	71,81	72,07	10,44	-0,175	14,5	0,195 ^{NS}
Chuvoso 14/15	73,48	74,33	9,37	-0,191	12,7	0,276 ^{NS}
Seco 13/14	77,12	77,48	10,77	-0,711	14,0	0,404 [*]
Seco 14/15	71,69	70,29	8,76	0,327	12,2	0,457 [*]

D.P. = desvio padrão; A. = assimetria; C.V. = coeficiente de variação; T.N. = teste de normalidade de Anderson-Darling; NS = não significativo a 5%; * = significativo a 5%.

De maneira geral, as medidas de posição, média e mediana, para todos os períodos analisados apresentaram valores próximos.

Os coeficientes de variação encontrados apresentam variabilidades classificadas como baixa ou média segundo os critérios definidos por Warrick e Nielsen (1980) que classificam valores menores que 12 % como de baixa variabilidade, valores entre 12 e 60 % como de média variabilidade e valores superiores a 60 % como alta variabilidade. Os meses de maio, setembro e dezembro foram classificados como de baixa variabilidade enquanto que os outros períodos foram enquadrados como média variabilidade dos dados.

As médias mensais de março, julho, agosto, outubro e novembro, além dos períodos secos dos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 não apresentaram comportamento normal de acordo com o teste de normalidade de Anderson-Darling. O restante dos períodos analisados apresentou distribuição simétrica com tendência à normalidade.

A análise exploratória permitiu identificar valores extremos (outliers) em alguns conjuntos de dados. Estes promoveram um aumento na variabilidade e maior dispersão dos dados em torno da média e foram retirados da série para a análise geoestatística.

Não foi observada nos períodos analisados a existência de tendência direcional descartando assim a necessidade de análise direcional dos dados (anisotropia).

Na Figura 6 estão apresentados, como exemplo, os gráficos utilizados na análise exploratória para o mês de março.

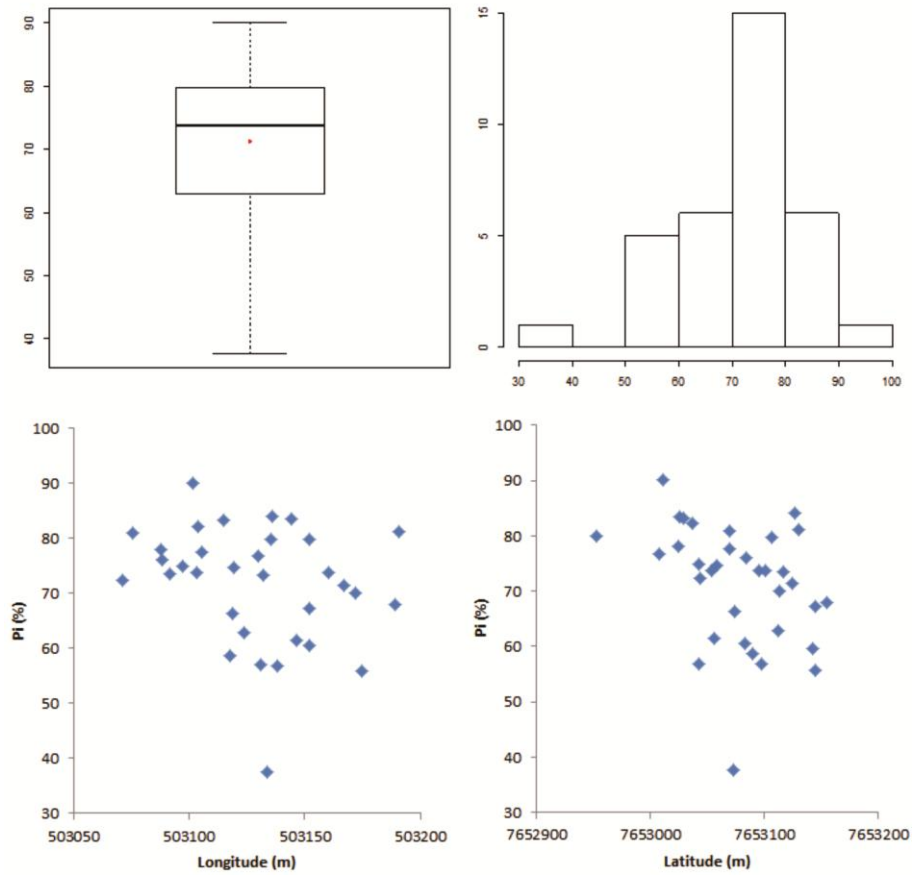


Figura 6 Gráficos utilizados na análise exploratória para o mês de março

3.3 Mapeamento da precipitação interna

Na Tabela 6 são apresentados os valores das estatísticas referentes à validação cruzada aplicadas na análise espacial da porcentagem da precipitação interna.

Tabela 6 Estatísticas de precisão aplicadas na análise espacial da porcentagem da precipitação interna em um povoamento de eucalipto

Período	Classificação do GD	EM (%)	TE (%)	S_{ER}
Janeiro	Forte	14,90	3,79	0,97
Fevereiro	Moderado	8,99	2,17	0,99
Março	Moderado	10,79	2,09	0,92
Abril	Moderado	9,06	1,35	0,96
Maio	Forte	7,36	0,80	0,95
Junho	Forte	9,24	0,87	0,96
Julho	Moderado	12,91	2,41	0,99
Agosto	Forte	9,81	1,02	1,00
Setembro	Forte	9,35	1,26	1,03
Outubro	Forte	10,43	1,80	0,98
Novembro	Forte	9,96	1,44	1,10
Dezembro	Forte	9,98	1,41	1,02
Anual 2013/2014	Forte	11,19	1,75	1,00
Anual 2014/2015	Forte	9,97	1,00	1,08
Chuvoso 2013/2014	Moderado	12,25	1,11	1,00
Chuvoso 2014/2015	Forte	11,09	1,34	1,07
Seco 2013/2014	Forte	10,05	1,48	1,00
Seco 2014/2015	Forte	9,04	0,73	1,02

De maneira geral, os dados estimados com base na validação cruzada são semelhantes aos dados observados nos períodos estudados. Os valores de erro médio (EM) encontrados são considerados baixos, tendo o valor máximo igual a 14,9 %, registrado para o mês de fevereiro.

Todos os períodos apresentaram uma ligeira tendência de superestimativa dos dados observados com base no índice TE onde o mês de janeiro apresentou o maior desvio absoluto. Para o desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) todos os períodos analisados apresentaram desempenho satisfatório com valores bem próximos à unidade.

Segundo a classificação proposta por Zimback (2001), a análise espacial dos dados de porcentagem da precipitação interna apresentou forte dependência espacial para boa parte dos períodos analisados. Os meses de fevereiro, março, abril e julho, além do período chuvoso do ano hidrológico 2013/2014

apresentaram um grau de dependência espacial moderado com muitos deles próximos ao limite superior desta classificação.

Os resultados da análise variográfica aplicada aos dados de porcentagem da precipitação interna no povoamento de eucalipto contendo o modelo de semivariograma que apresentou o melhor ajuste, os valores médios observados empregados na análise variográfica, o valor do grau de dependência espacial, efeito pepita e alcance para cada período analisado estão representados nas Figuras 7, 8 e 9 para os períodos entre janeiro e junho, julho e dezembro e anuais, períodos secos e chuvosos, respectivamente.

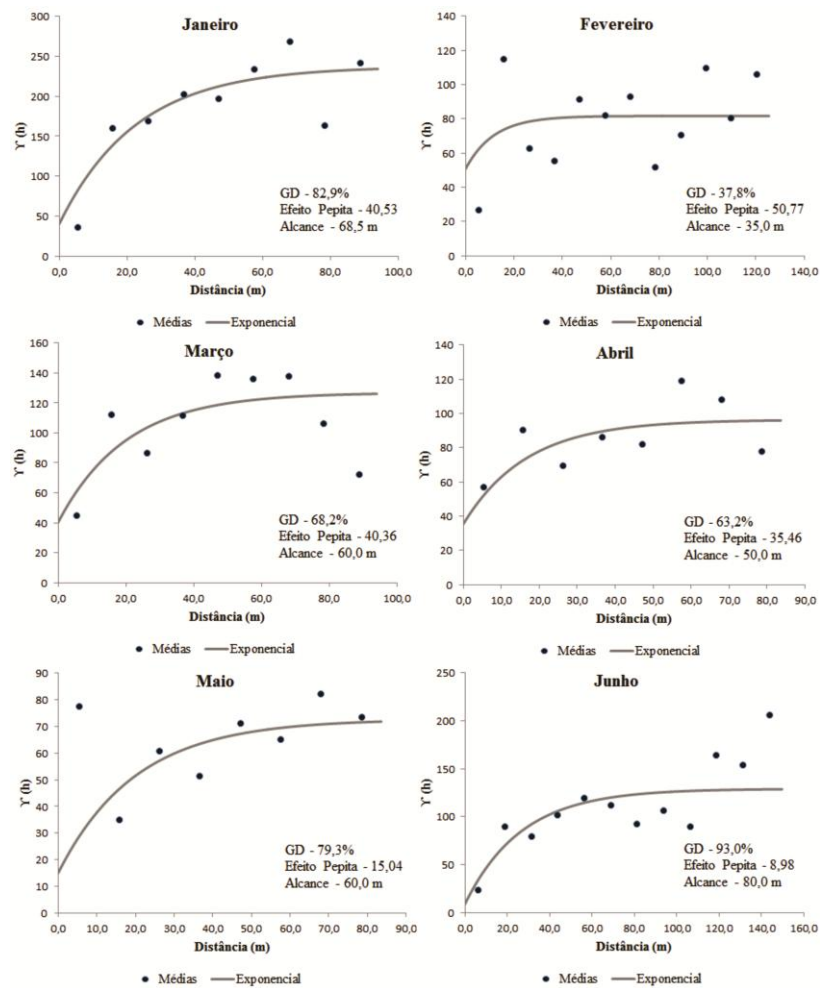


Figura 7 Semivariogramas ajustados para os dados de percentagem média da precipitação interna no período de janeiro a junho no povoamento de eucalipto

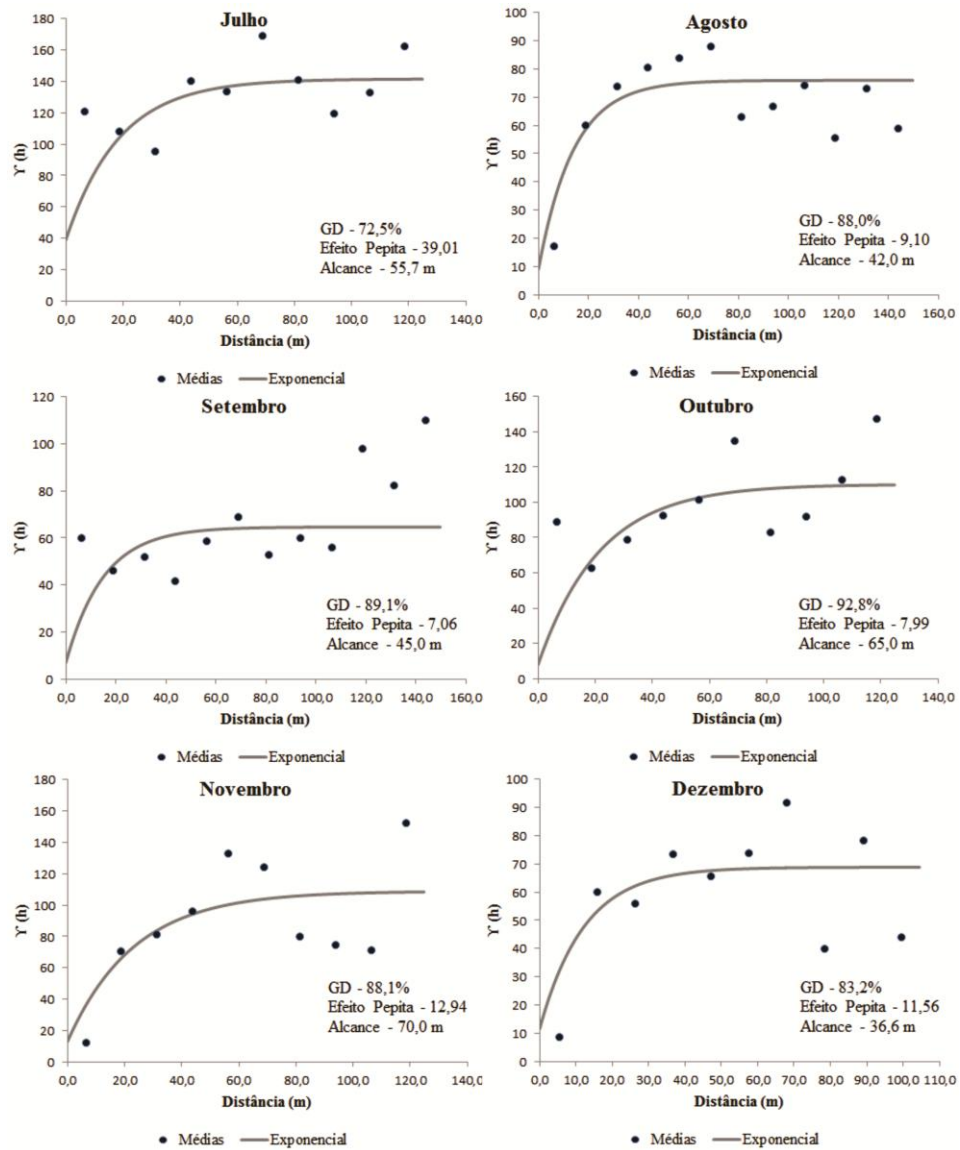


Figura 8 Semivariogramas ajustados para os dados de porcentagem média da precipitação interna no período de julho a dezembro no povoamento de eucalipto

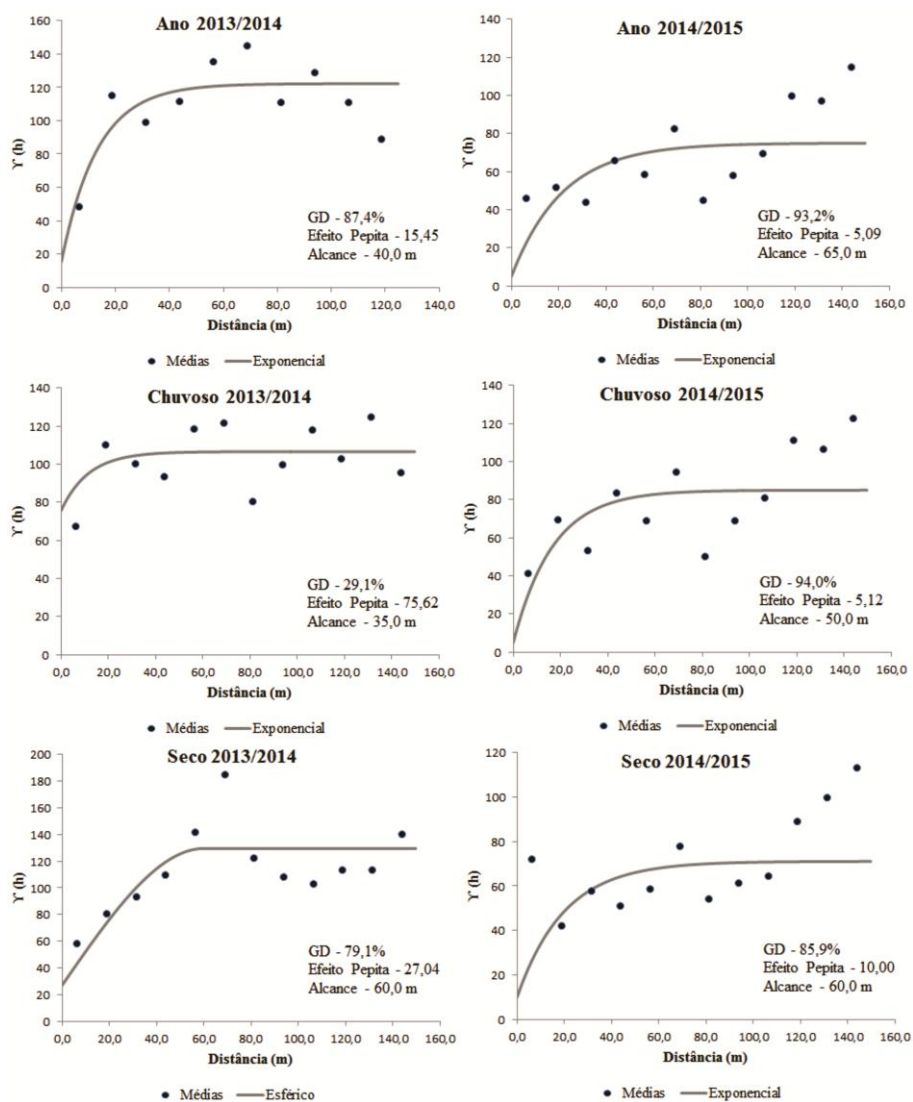


Figura 9 Semivariogramas ajustados para os dados de porcentagem da precipitação interna para os totais anuais, período chuvoso e seco dos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 no povoamento de eucalipto

Para o período seco do ano hidrológico 2013/2014 o modelo de semivariograma que melhor se ajustou foi o esférico enquanto que para todos os outros períodos analisados o modelo exponencial apresentou o melhor ajuste aos semivariogramas empíricos analisados.

Os valores de efeito pepita encontrados são baixos e, em alguns casos, próximos a zero aumentando assim o grau de dependência espacial. As exceções são o mês de fevereiro e o período chuvoso do ano hidrológico 2013/2014 que apresentaram valores elevados.

Os valores de alcance encontrados variam entre 35,0 e 80,0 metros. O alcance permite identificar qual a distância máxima que a variável em estudo consegue explicar sua variabilidade a partir de um ponto de observação.

A porcentagem da precipitação interna aumenta no sentido nordeste-sudoeste para todos os períodos, a exceção é a média mensal do mês de junho que cresce no sentido norte-sul no povoamento de eucalipto. Nota-se menor porcentagem da precipitação interna na borda leste do povoamento que faz fronteira com um fragmento de mata nativa com predominância de Angico, enquanto que a borda sudoeste apresenta uma maior passagem da precipitação incidente.

Em termos de amplitude, as médias mensais de outubro a março apresentaram-se maiores quando comparadas ao conjunto de abril a setembro. O total anual e o período seco dos anos hidrológicos de 2013/2014 e o período chuvoso de 2014/2015 também tiveram uma maior amplitude quando comparados com seus respectivos.

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas as espacializações pelo método da Krigagem ordinária da porcentagem da precipitação interna para os períodos de janeiro a junho, julho a dezembro e anuais, secos e chuvosos para os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente.

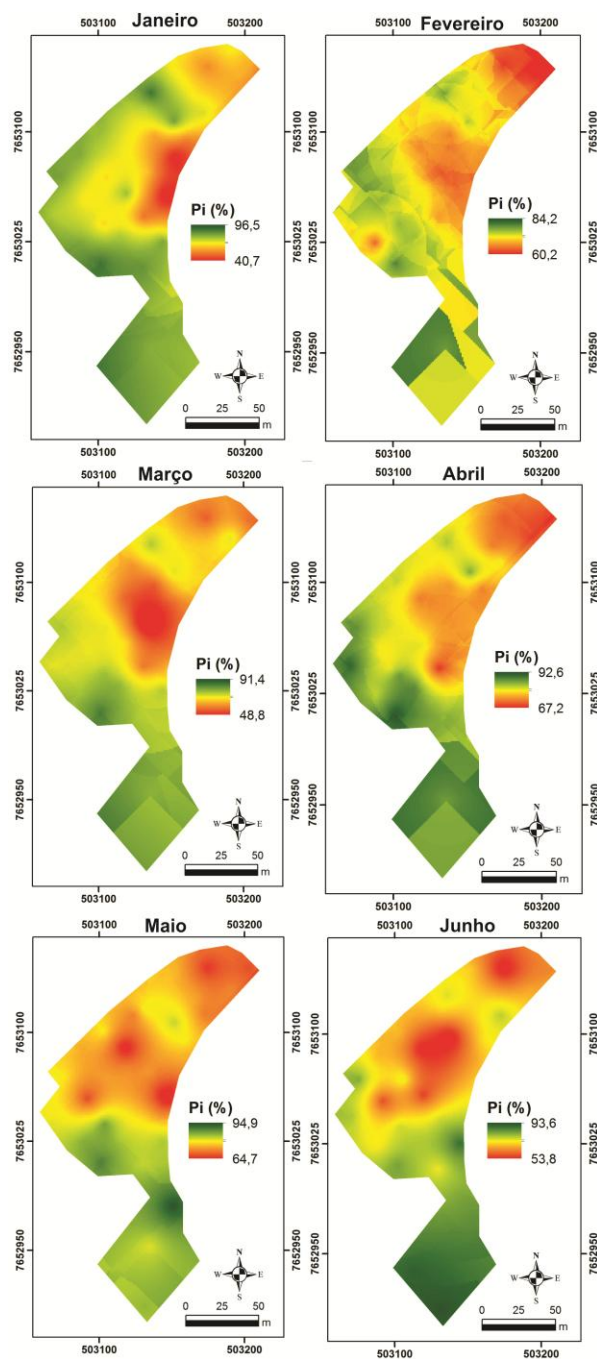


Figura 10 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os meses de janeiro a junho

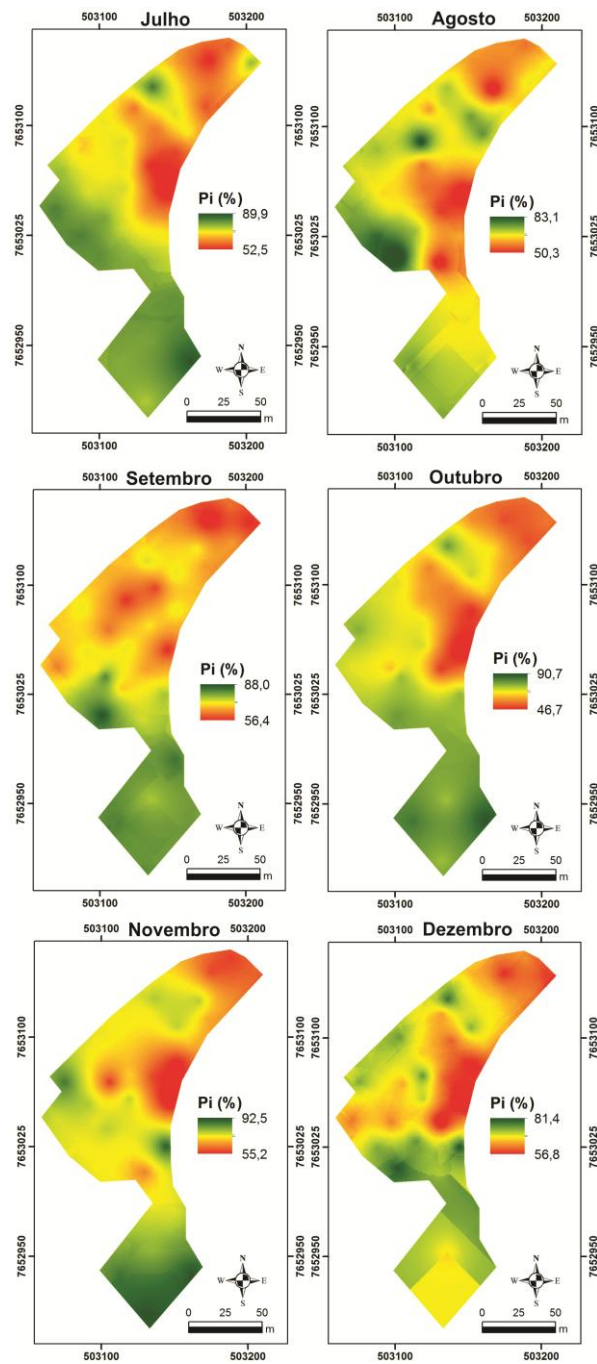


Figura 11 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os meses de julho a dezembro

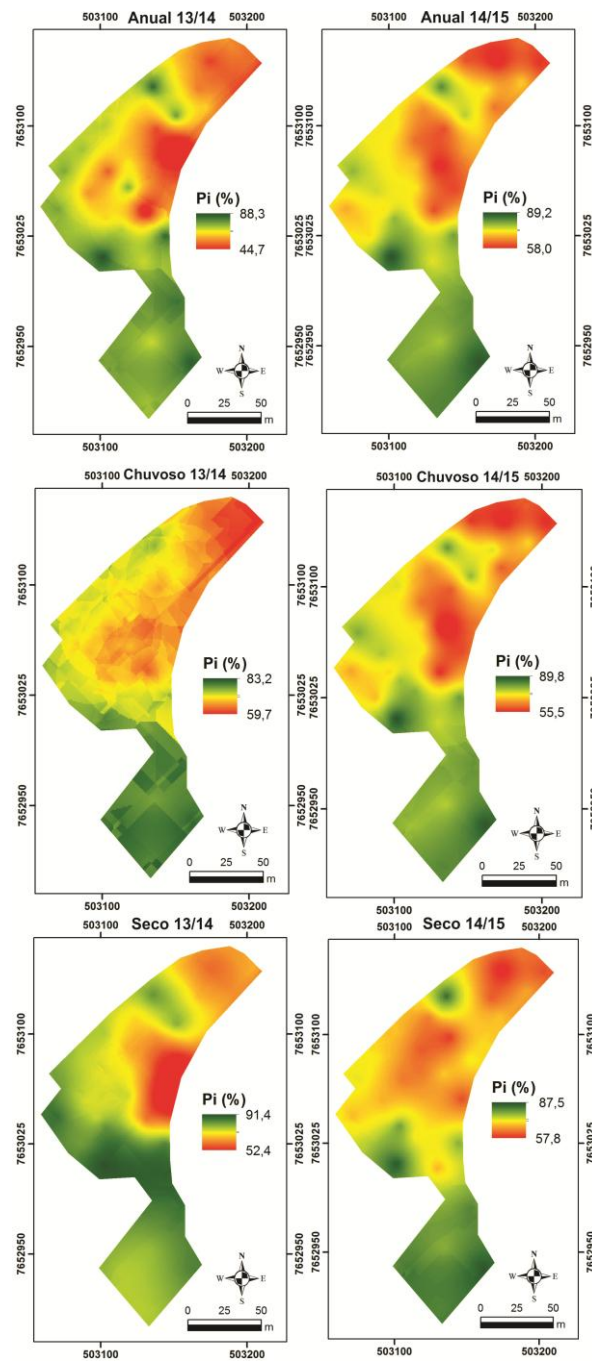


Figura 12 Espacialização da porcentagem da precipitação interna para os períodos chuvosos, secos e os anos hidrológicos de 13/14 e 14/15

Na Tabela 7 são apresentados os valores de porcentagem e lâmina da precipitação interna em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto.

Tabela 7 Porcentagem e lâmina correspondente em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto

Espaçamento	3 x 2 metros		3 x 3 metros		3 x 5 metros	
	%	mm	%	mm	%	mm
Janeiro	71,68	115,8	71,18	115,0	82,76	133,7
Fevereiro	72,71	97,9	73,47	98,9	76,82	103,4
Março	70,21	100,2	73,47	104,8	81,77	116,7
Abril	78,27	54,6	81,11	56,5	87,32	60,9
Mai	76,00	29,2	81,48	31,3	86,72	33,3
Junho	68,29	13,0	76,15	14,5	88,75	16,9
Julho	71,52	16,4	73,37	16,8	82,50	18,9
Agosto	65,19	17,4	63,89	17,1	67,55	18,0
Setembro	68,78	57,3	74,72	62,2	81,56	67,9
Outubro	67,96	25,7	70,05	26,5	82,11	31,0
Novembro	73,57	115,0	73,10	150,0	85,36	175,2
Dezembro	69,19	116,9	70,44	119,0	72,98	123,3
Anual 13/14	71,08	718,8	72,97	737,9	81,13	820,4
Anual 14/15	70,67	915,6	74,25	962,0	82,62	1070,4
Chuvoso 13/14	69,83	537,1	71,75	551,9	79,90	614,6
Chuvoso 14/15	71,33	726,0	74,40	757,2	82,69	841,6
Seco 13/14	75,83	183,5	78,50	190,0	83,36	201,7
Seco 14/15	68,32	189,8	73,55	204,3	82,30	228,6
Média	71,14	225,9	73,77	234,2	81,57	259,8
Máximo	78,27	915,6	81,48	962,0	88,75	1070,4
Mínimo	65,19	13,0	63,89	14,5	67,55	16,9

Constata-se que quanto maior o espaçamento, maior a precipitação incidente que atravessará o dossel e atingirá o piso florestal. Considerando uma média entre todos os períodos analisados o espaçamento 3 x 2 metros apresentou o menor volume coletado nos pluviômetros, seguido pelos espaçamentos 3 x 3 e 3 x 5 metros, respectivamente.

O espaçamento 3 x 3 metros apresenta um comportamento similar ao 3x2 metros com precipitação interna ligeiramente superior (2,63%). Nos meses de janeiro, agosto e novembro o espaçamento 3 x 3 apresentou menor percentual de precipitação interna comparado ao 3 x 2 metros. A velocidade e direção do vento podem ser as possíveis causas desta condição associados à ocorrência de eventos convectivos, entretanto estas variáveis não foram observadas localmente ao longo deste estudo.

Estes resultados confirmam que a variabilidade espaço-temporal da precipitação interna está em função das características físicas da chuva e da arquitetura do dossel, sendo este último influenciado diretamente pelo espaçamento empregado no povoamento.

Vários trabalhos apresentaram porcentagens de precipitação interna próximos dos encontrados neste estudo para espécies de eucalipto, entretanto avaliaram apenas em termos médios por talhão (GASPAROTO et al., 2014; RODRIGUES; COSTA, 2009; BALIEIRO et al., 2007; VALENTE; DAVID; GASH, 1997) ou por bacia hidrográfica (SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011; ALMEIDA; SOARES, 2003) sem avaliar efeitos do manejo nesta variável.

3.4 Dinâmica do escoamento no tronco

Os valores de escoamento pelo tronco (EsT) variaram em função do diâmetro do indivíduo e da lâmina de precipitação incidente no povoamento. No Gráfico 5 são apresentados os valores de escoamento pelo tronco, tanto em lâmina quanto em porcentagem, em função das classes diamétricas estudadas.

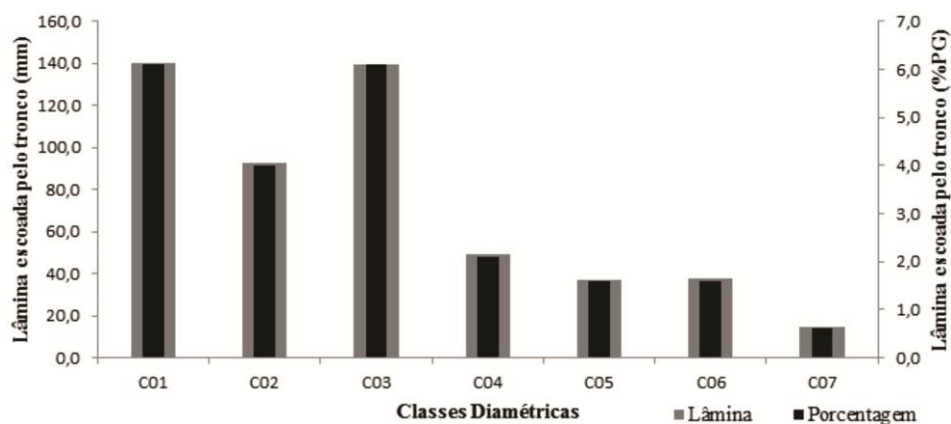


Gráfico 5 Escoamento no tronco em função de classes diamétricas em um povoamento de eucalipto

O escoamento pelo tronco em indivíduos de eucalipto decresce com o aumento do diâmetro a altura do peito (DAP). A análise, em função de classes diamétricas, apontou uma lâmina de 140,2 mm (6,1% da PG) para a menor classe no período estudado contra 14,9 mm (0,6% da PG) para a classe representativa dos indivíduos com maiores DAP.

No Gráfico 6 são apresentadas as lâminas escoadas (a) e a porcentagem (b) do escoamento pelo tronco para cada classe diamétrica em função das classes de chuva no povoamento de eucalipto.

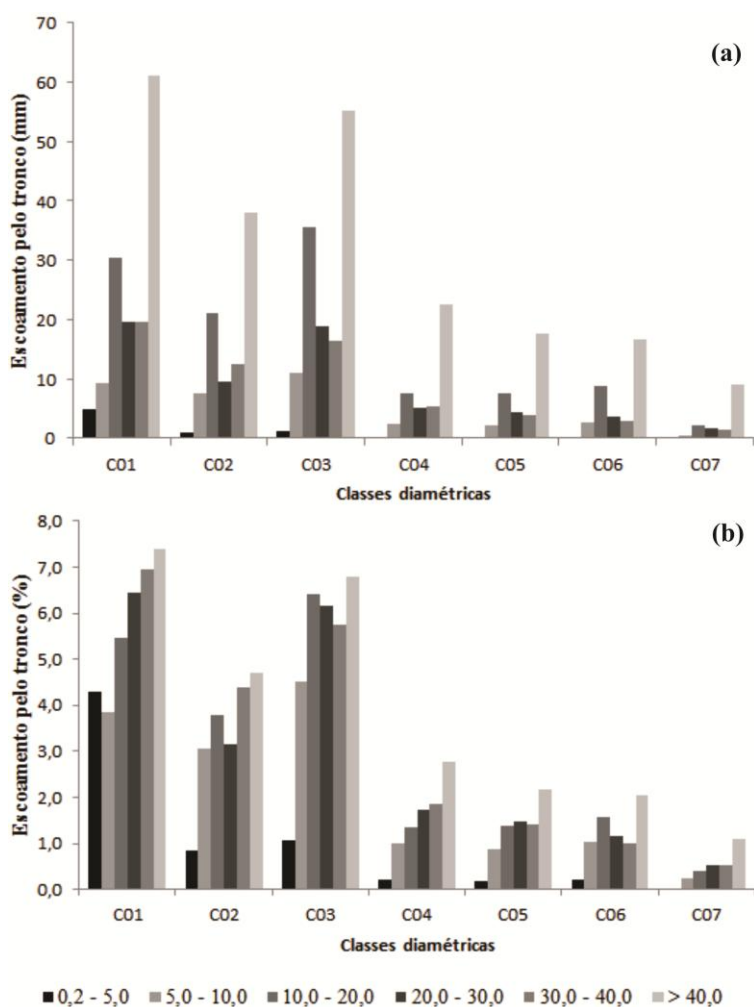


Gráfico 6 Lâmina (a) e porcentagem (b) do escoamento pelo tronco por classe de chuva em povoamento de eucalipto

Em termos de lâmina, as precipitações incidentes com totais superiores a 40,0 mm apresentaram maior volume escoado pelos troncos de indivíduos de eucalipto em todas as classes diamétricas analisadas. Este fato ocorre devido ao dossel florestal permanecer saturado por um período de tempo maior se comparado a outros intervalos de classe o que induz a uma maior drenagem pela estrutura lenhosa dos indivíduos.

Observa-se também que a maior classe diamétrica não apresenta escoamento pelo tronco na ocorrência de eventos inferiores a 5,0 mm. Estes indivíduos apresentam-se, geralmente, com uma casca mais espessa favorecendo uma maior absorção da água da chuva por estas estruturas com consequente perda por evaporação.

O padrão de distribuição do escoamento no tronco identificado por classe diamétrica para a precipitação incidente se manteve na segregação por classe de chuva com os indivíduos das classes 1 e 3 com comportamento similar. A classe 2 com uma redução média de 2 % em relação as anteriores e as classes restantes apresentando um escoamento pelo tronco, em média, 1,5 % da precipitação incidente.

Para uma análise do comportamento médio do povoamento em relação ao escoamento pelo tronco foi gerada uma série simulada ponderada pela quantidade de indivíduos presentes em cada classe diamétrica. Na Tabela 8 são apresentados os pesos de cada classe diamétrica na série sintética.

Tabela 8 Peso de cada classe diamétrica na geração da série simulada de escoamento pelo tronco no povoamento de eucalipto

Classe	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07
Peso	0,038	0,132	0,188	0,288	0,248	0,091	0,015

No Gráfico 7 está apresentada a série sintética de escoamento pelo tronco representativa do povoamento de eucalipto.

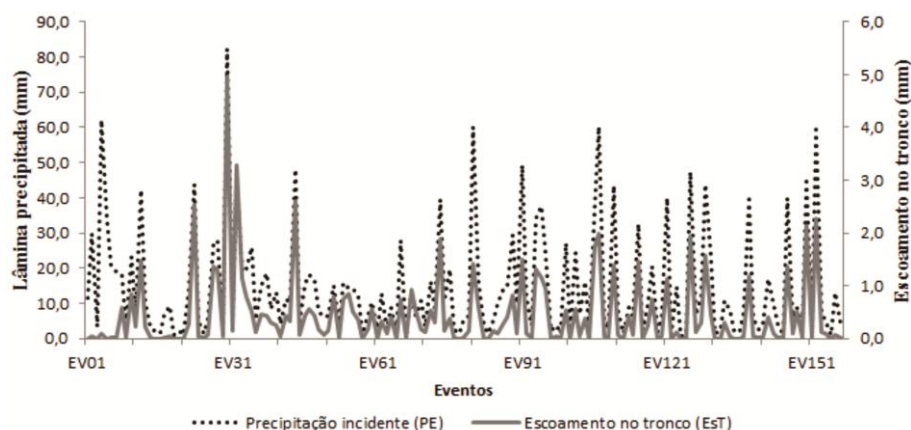


Gráfico 7 Série simulada de escoamento pelo tronco para o povoamento de eucalipto

Em relação aos totais, o escoamento pelo tronco corresponde a 3,1 % (71,1 mm) da precipitação incidente no povoamento de eucalipto no período analisado. O escoamento no tronco acompanha o comportamento da precipitação incidente incrementando com o aumento do volume precipitado. Eventos com lâmina precipitada inferior a 3,7 mm não geraram escoamento pelo tronco.

Livesley, Baudinette e Glover (2014) encontraram valores de escoamento no tronco de 0,3 % e 1,7 % para as espécies *Eucalyptus nicholli* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente, em Victoria – Austrália. Valente, David e Gash (1997) encontraram 1,7 % em um povoamento de *Eucalyptus globulus* em Portugal, enquanto, Laclau et al. (2003) encontraram um valor médio de 1,62 % no Congo em povoamento híbrido de eucalipto.

No Brasil Shinzato et al. (2011) observaram escoamento no tronco equivalente a 1,0 % da precipitação incidente em um povoamento de *Eucalyptus cloeziana*. Já Rodrigues e Costa (2009) e Balieiro et al. (2007) encontraram 5,9 % de escoamento no tronco para povoamentos de *Eucalyptus grandis* no sudeste brasileiro.

No Gráfico 8 são apresentadas regressões entre as lâminas precipitadas e escoadas pelo tronco para todas as classes diamétricas estudadas e a série simulada gerada.

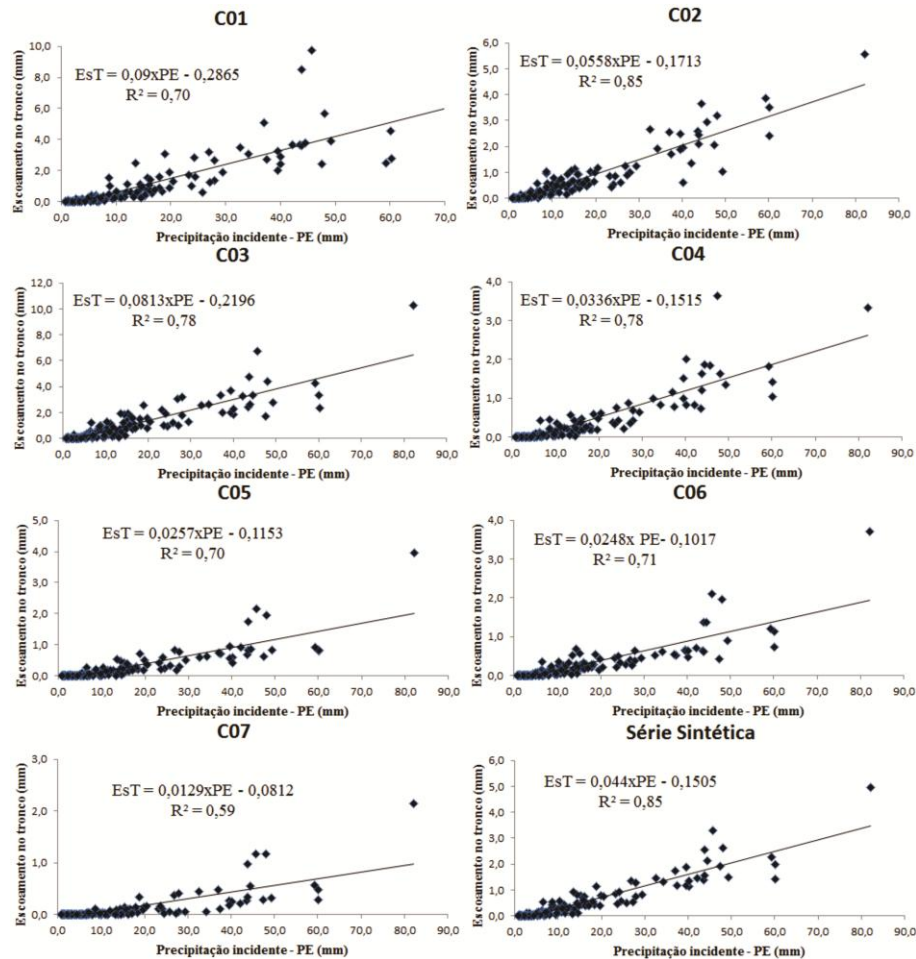


Gráfico 8 Regressões entre lâmina precipitada (PE) e escoada pelo tronco (EsT) por classe diamétrica em povoamento de eucalipto

De maneira geral, há forte correlação linear entre a lâmina precipitada e escoada pelos troncos dos indivíduos de todas as classes diamétricas estudadas. A série simulada apresentou forte correlação com coeficiente de determinação

igual a 0,85. As equações geradas são importantes para o preenchimento de falhas na série ocasionadas, geralmente, pelo tombamento dos coletores.

Ao analisar o escoamento pelo tronco em função dos períodos secos e chuvosos, em termos percentuais, observa-se uma maior produção de escoamento nos períodos secos com destaque para o ano hidrológico 2013/2014. A exceção das classes diamétricas C05 e C07, todas as outras apresentaram este comportamento. A classe C03 apontou um acréscimo de 2,0 % entre o período seco e chuvoso de 2013/2014.

A série simulada apresentou o mesmo comportamento das classes com acréscimo de 0,7 % e 0,1 % para os períodos secos dos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015 em relação aos chuvosos, respectivamente, indicando um comportamento estável no período analisado.

No Gráfico 9 são apresentadas as lâminas (a) e percentuais (b) do escoamento pelo tronco por classe diamétrica em função dos períodos secos e chuvosos dos anos hidrológicos estudados no povoamento de eucalipto.

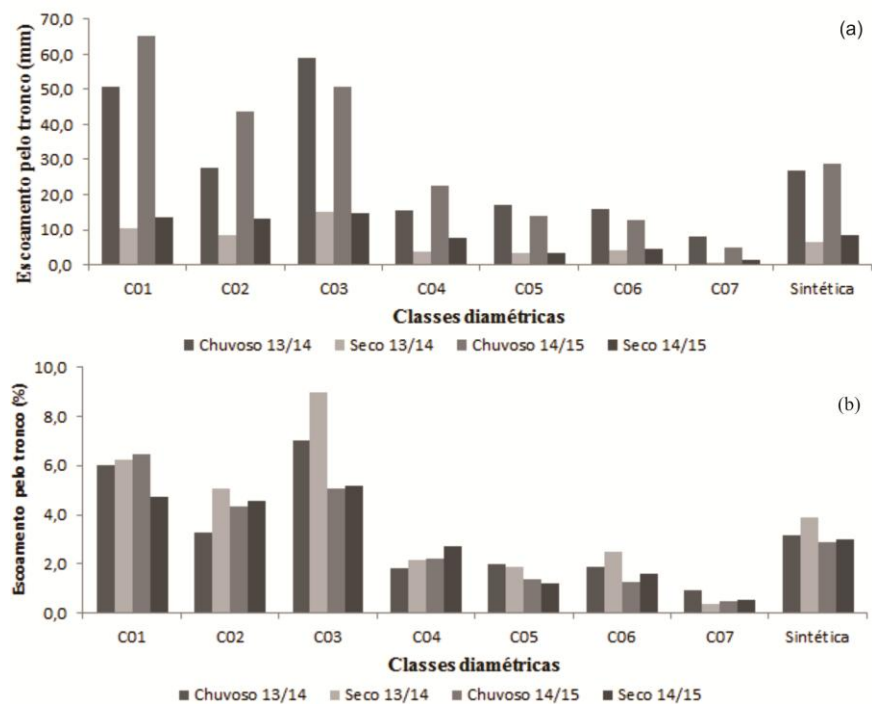


Gráfico 9 Lâmina (a) e porcentagem (b) do escoamento pelo tronco por classe diamétrica para os períodos secos e chuvosos em povoamento de eucalipto

As lâminas precipitadas no período seco são concentradas em poucos eventos provocando um efeito similar ao período chuvoso com rápida saturação do dossel e consequente drenagem justificando assim esse desempenho superior em termos percentuais.

No Gráfico 10 são apresentadas regressões entre as lâminas precipitadas e escoadas pelo tronco para os períodos seco e chuvoso em função do diâmetro do indivíduo de eucalipto.

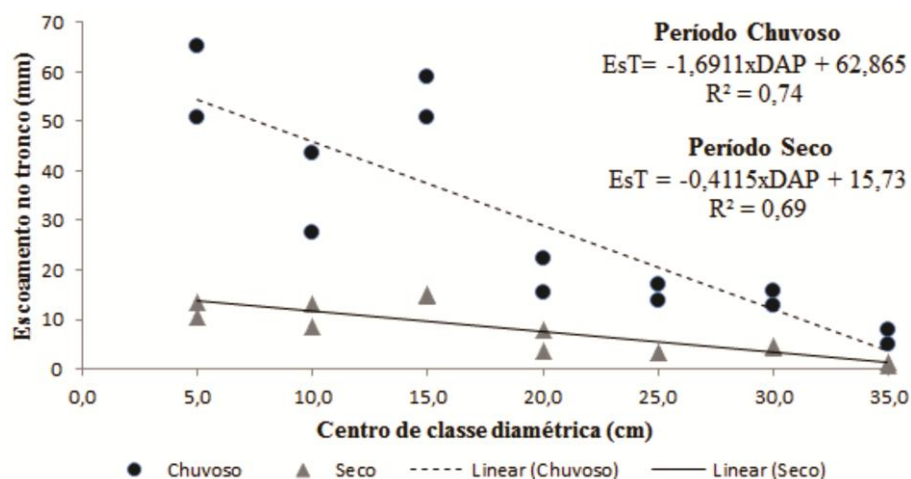


Gráfico 10 Regressões entre lâmina precipitada externa (PG) e escoada pelo tronco (EsT) para os períodos seco e chuvoso em um povoamento de eucalipto

A razão de afinilamento (F) proposta por Herwitz (1986) representa a quantidade de água precipitada que atinge a base da árvore permitindo comparar indivíduos com diferentes áreas seccionais e interespécies. A razão de afinilamento variou, em média, de 16,01 a 0,50 (adimensional) partindo dos indivíduos com menor diâmetro até os maiores (Tabela 9) e mantendo o comportamento das análises anteriores, em que o escoamento pelo tronco decresce com o aumento do diâmetro e conseqüentemente da área seccional.

Tabela 9 Razão de afinilamento para cada classe diamétrica no povoamento de eucalipto

Classe	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07
F	16,01	7,69	6,67	1,60	1,24	0,94	0,50

Percebe-se que os indivíduos de eucalipto com menor diâmetro são 32 vezes mais eficientes na geração do escoamento pelo tronco que indivíduos da maior classe diamétrica. Maiores valores da razão de afinilamento indicam maior escoamento pelo tronco, resultando assim, em maior quantidade de água

disponível nas camadas do solo próximo à zona radicular (LI et al., 2008; CARLYLE-MOSES; PRICE, 2006).

Levia et al. (2010) sugerem que a variabilidade temporal do escoamento no tronco, possivelmente, afeta os padrões de umidade do solo. A intensidade da precipitação e a velocidade e direção do vento também afetam as estradas de escoamento no tronco e sua concentração espacial na base da árvore (LEVIA JUNIOR; FROST, 2003). Desta maneira, o escoamento pelo tronco corrobora com a manutenção da umidade do solo na zona radicular permitindo a manutenção eficiente dos processos fisiológicos dos indivíduos mesmo nos períodos secos.

3.5 Perdas por interceptação da precipitação

Para estimativa das perdas por interceptação foi admitido que a série simulada de escoamento no tronco é representativa do povoamento. Esta condição de contorno foi implementada visto que a distribuição espacial da variável diâmetro a altura do peito não segue um padrão espacial e ao utilizar os valores pontuais poderia incorrer em tendências na estimativa da interceptação.

Na Figura 13 são apresentadas as espacializações da porcentagem das perdas por interceptação para os períodos secos, chuvosos e para os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015.

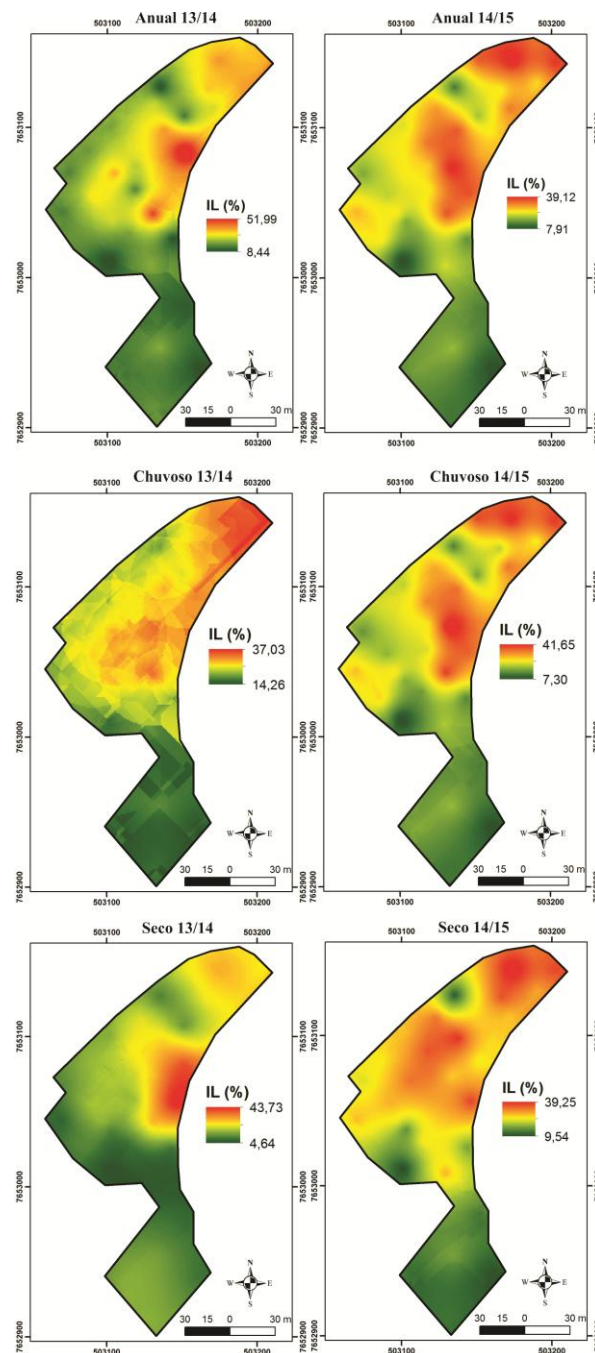


Figura 13 Espacialização da porcentagem das perdas por interceptação para os períodos chuvosos, secos e os anos hidrológicos de 13/14 e 14/15

As perdas por interceptação reduzem no sentido Nordeste/Sudoeste para os períodos analisados, excetuando o período seco do ano hidrológico 2014/2015 que reduz no sentido Norte/Sul.

Em média, as perdas por interceptação no povoamento foram de 22,74 % e 22,64 % para os anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente. Já para os períodos secos e chuvosos as perdas por interceptação foram de 17,77 % e 24,13 % (2013/2014) e 23,99 % e 22,28 % (2014/2015), respectivamente.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de porcentagem e lâmina, em termos médios, das perdas por interceptação em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto.

Tabela 10 Porcentagem e lâmina correspondente das perdas por interceptação em função dos espaçamentos para cada período analisado no povoamento de eucalipto

Espaçamento	3 x 2 metros		3 x 3 metros		3 x 5 metros	
Unidade	%	mm	%	mm	%	mm
Anual 13/14	25,69	259,8	23,76	240,3	15,49	156,6
Anual 14/15	26,42	341,7	22,84	295,4	14,41	186,4
Chuvoso 13/14	27,02	227,4	25,07	211,0	16,92	142,4
Chuvoso 14/15	25,79	259,7	22,71	228,7	14,37	144,7
Seco 13/14	20,29	34,4	17,70	30,0	12,67	21,5
Seco 14/15	28,66	82,0	23,48	67,2	14,66	42,0

O espaçamento 3 x 2 metros mostra-se como a densidade de plantio que mais intercepta a precipitação incidente e conseqüentemente perde mais água para a atmosfera em comparação aos demais espaçamentos estudados. Este espaçamento perdeu 601,5 mm no período analisado, 10,9 % e 43,0 % a mais que os espaçamentos 3 x 3 e 3 x 5 metros, respectivamente.

Avaliando os períodos secos e chuvosos dos anos hidrológicos estudados percebe-se uma inversão de comportamento. No ano hidrológico 2013/2014 o período chuvoso apresentou, em termos percentuais, maiores

perdas quando comparado ao período seco. Para o ano hidrológico 2014/2015, o período seco apresentou maiores perdas por interceptação em todos os espaçamentos estudados.

O ano hidrológico 2013/2014 apresentou um volume precipitado 21,8 % menor que o 2014/2015, com destaque para o período seco que ficou 36,7 % abaixo da média. Associado a isto, as temperaturas médias e máximas do ar no período chuvoso do ano 2013/2014 apresentaram-se maiores em relação a 2014/2015 sendo, provavelmente, este conjunto de fatores os responsáveis pela inversão de comportamento das perdas por interceptação observadas neste estudo.

As perdas por interceptação são reflexo direto da arquitetura do dossel do povoamento que por sua vez sofre influência do manejo empregado. Um menor espaçamento implica em maior densidade populacional e as espécies de eucalipto tem a característica de desrama natural mantendo uma copa mínima e eficiente. Desta maneira, o incremento de copa provocado pelo aumento do espaçamento perde peso perante a quantidade de indivíduos presentes em cada espaçamento afetando as perdas por interceptação.

Livesley, Baudinette e Glover (2014) encontraram valores de perdas por interceptação de 43,9 % e 27,3 % para as espécies *Eucalyptus nicholli* e *Eucalyptus saligna*, respectivamente, em Victoria – Austrália. Valente, David e Gash (1997) encontraram 10,8 % em um povoamento de *Eucalyptus globulus* em Portugal.

Já Rodrigues e Costa (2009), Balieiro et al. (2007) e Almeida e Soares (2003) encontraram 9,11 %, 15,6 % e 11,0 %, respectivamente, de perdas por interceptação em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no sudeste brasileiro.

4 CONCLUSÕES

A precipitação interna total registrada em um povoamento adulto de *Eucalyptus* na região sul de Minas Gerais correspondeu a 72,7 % da precipitação incidente. Ao avaliar o efeito sazonal, a precipitação interna apresenta um comportamento similar entre os períodos seco (74,9 %) e chuvoso (25,1 %).

A análise variográfica indicou que a porcentagem de precipitação interna apresenta-se estruturada espacialmente com forte grau de dependência espacial e baixos erros entre os dados estimados e observados. Percebe-se um aumento gradual da precipitação interna com o aumento do espaçamento atingindo uma diferença de até 10,43 % entre o menor e maior espaçamento estudado.

Em relação aos totais, o escoamento pelo tronco corresponde a 3,1 % (71,1 mm) da precipitação incidente no povoamento de eucalipto no período analisado. O escoamento no tronco acompanha o comportamento da precipitação incidente, incrementando com o aumento do volume precipitado. Eventos com lâmina precipitada inferior a 3,7 mm não geraram escoamento pelo tronco.

Os indivíduos de eucalipto pertencentes a menor classe diamétrica são 32 vezes mais eficientes na geração do escoamento pelo tronco que indivíduos da maior classe diamétrica. O período seco produz 0,4 % mais escoamento pelo tronco que o período chuvoso em termos médios.

As perdas por interceptação são maiores no espaçamento 3 x 2 metros (601,5 mm), seguido pelo 3 x 3 metros (539,9 mm) e 3 x 5 (342,9 mm).

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; AVANZI, J. C. Soil losses from typic Cambisols and Red Latosol as related to three erosive rainfall patterns. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 213-220, 2014

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; PINTO, L. C.; SILVA, A. M. Partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 583-595, 2014.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.

BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A.; FONTES, R. L. F.; DIAS, L. E.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. Evaluation of the throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapele* and *Eucalyptus grandis*. **Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 339-346, 2007.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 235-244, 2010.

BOUTEN, W.; HEIMOVAARA, T. J.; TIKTAK, A. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. **Water Resources Research**, v. 28, n. 12, p. 3227-3233, 1992.

CABEDA, M. S. V. **Computation of storm EI values**. West Lafayette: Purdue University, 1976. 6p.

CARLYLE-MOSES, D. E.; LAUREANO, J. S. F.; PRICE, A. G. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. **Journal of Hydrology**, v. 297, n. 1-4, p. 124-135, 2004.

CARLYLE-MOSES, D. E.; PRICE, A. G. Growing-season stemflow production within a deciduous forest of southern Ontario. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 20, n. 17, p. 3651-3663, 2006.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Interciência: 2ª Ed., 2008. 600 p.

CROCKFORD, R.H.; RICHARDSON, D.P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, West Sussex, v.14, p.2903-2920, 2000.

DE MARIA, I. C. Cálculo da erosividade da chuva. In: LOMBARDI NETO, F.; CASTRO, O. M.; DE MARIA, I. C.; DECHEN, S. C. F.; VIEIRA, S. R. **Manual de programas de processamento de dados de campo e de laboratório para fins de experimentação em conservação do solo**. Campinas: IAC/SCS, 1994. Não paginado.

DUROCHER, M. G. Monitoring spatial variability of forest interception. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 4, n. 3, p. 215-229, 1990.

FALKENGREN-GRERUP, U. Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in Southern Sweden. **Journal of Applied Ecology**, v. 26, n. 1, p. 341-352, 1989.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

GASPAROTTO, E. A. G.; TONELLO, K. C.; SHIZATO, E. T.; VALENTE, R. O. A. Throughfall in different forest stands of Iperó, São Paulo. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 303-310, 2014.

GERRITS, A. M. J.; PFISTER, L.; SAVENIJE, H. H. G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 24, p. 3011-3025, 2010.

GÓMEZ, J. A.; VANDERLINDEN, K.; GIRÁLDEZ, J. V.; FERERES, E. Rainfall concentration under olive trees. **Agricultural Water Management**, v. 55, p. 53-70, 2002.

GUSWA, A. J. Canopy vs. root: Production and destruction of variability in soil moisture and hydrologic fluxes. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2012.

HERWITZ, S. R. Infiltration-excess caused by stemflow in a cyclone-prone tropical rainforest. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 11, n. 4, p. 401-412, 1986.

HORNER, W. W.; JENS, S. W. Surface runoff determination from rainfall without using coefficients. **Transactions of ASAE**, v. 107, n.1, p. 1039-1117, 1942.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow. **Ecoscience**, Québec, v. 13, n. 3, p. 324-333, 2006.

KATO, H.; ONDA, Y.; NANKO, K.; GOMI, T.; YAMANAKA, T.; KAWAGUCHI, S. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations. **Journal of Hydrology**, v. 504, p. 1-11, 2013.

KEIM, R. F.; SKAUGSET, A. E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1-4, p. 263-274, 2005.

LACLAU, J. P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J. P.; KAZOTTI, J. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, v. 91, n. 7, p. 879-892, 2003.

LEVIA, D. F.; STAN II, J. T. V.; MAGE, S. M.; KELLEY-HAUSKE, P. W. Temporal variability of stemflow volume in a beech-yellow poplar forest in relation to tree species and size. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 1-2, p. 112-120, 2010.

LEVIA JUNIOR, D. F.; FROST, E. E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. **Journal of Hydrology**, v. 274, n. 1-4, p. 1-29, 2003.

LEVIA JUNIOR, D. F.; FROST, E. E. Variability of throughfall volume and solute inputs on wooded ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 5, p. 605-632, 2006.

LI, X. Y.; LIU, L. Y.; GAO, S. Y.; MA, Y. J.; YANG, Z. P. Stemflow in three shrubs and its effect on soil water enhancement in semiarid loess region of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1501-1507, 2008.

LIMA, W. P. Interceptação da chuva em povoamento de eucalipto e pinheiro. **Revista IPEF**, Piracicaba, n. 13, p. 75-90, 1976.

LIVESLEY, S. J.; BAUDINETTE, B.; GLOVER, D. Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees – The impacts of canopy density and bark type. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 13, n. 1, p. 192-197, 2014.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 37-44, 2013.

NANKO, K.; ONDA, Y.; ITO, A.; MORIWAKI, H. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops and kinetic energy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 9, p. 1173-1182, 2011.

PRICE, A. G.; CARLYLE-MOSES, D. E. Measurement and modeling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 119, n. 1-2, p. 69-85, 2003.

RODRIGUES, V. A.; COSTA, P. N. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas em povoamento de eucalipto. **BioEng**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 77-86, Jan/Abr, 2009.

SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a Eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 25, p. 1910-1923, 2011.

SHINZATO, E. T.; TONELLO, K. C.; GASPAROTO, E. A. G.; VALENTE, R. O. A. Escoamento pelo tronco em diferentes povoamentos florestais na Floresta Nacional de Ipanema em Iperó, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 395-402, 2011.

STEALENS, J.; SCHRIJVER, A. D.; VERHEYEN, K.; VERHOEST, N. E. C. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. **Journal of Hydrology**, v. 330, n. 3-4, p. 651-662, 2006.

STEALENS, J.; SCHRIJVER, A. D.; VERHEYEN, K.; VERHOEST, N. E. C. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception within a single

beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics and meteorology. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 22, p. 33-45, 2008.

VALENTE, F.; DAVID, J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, v. 190, p. 141-162, 1997.

VALVASSORI, M. L.; BACK, A. J. Caracterização das chuvas erosivas em Urussanga, SC, com relação ao padrão de distribuição temporal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 1020-1027, 2014.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. P. 319-344.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise especial de atributos químicos do solo para fins de mapeamento de fertilidade**. 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZIMMERMANN, A.; ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H. Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns. **Water Resources Research**, v. 45, p. 1-18, 2009.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DAS PERDAS POR INTERCEPTAÇÃO EM UM PLANTIO DE *Eucalyptus*

RESUMO

Compreender como ocorre a interação entre a cobertura florestal e a precipitação pluvial é essencial para uma análise eficiente do consumo de água pela floresta. As perdas por evaporação da água retida no dossel florestal são uma saída importante do balanço hídrico em ambientes florestais. A aplicação de modelos para estimativa desta variável tem-se mostrado uma ferramenta útil e eficiente em estudos de hidrologia florestal. O objetivo neste capítulo foi aplicar o modelo de Gash para florestas esparsas em um povoamento de eucalipto no sul de Minas Gerais. Foram monitoradas a precipitação interna e o escoamento pelo tronco em 24 pontos na escala diária, além do levantamento dos parâmetros que alimentam o modelo de Gash para florestas com dossel esparsa. As perdas por interceptação da precipitação estimadas pelo modelo apresentaram um desvio médio de 18,5 % em relação aos dados observados, com R^2 de 0,72, C_{NS} igual a 0,59 e P_{bias} de 18,2 %, indicando um bom desempenho do modelo. O destaque da parametrização do modelo foi o fator de cobertura (c) que, em média, foi de 0,54, reforçando a característica de dossel esparsa de um povoamento de eucalipto. As lâminas necessárias para saturar o dossel e os troncos, em média, foram de 3,0 mm e 6,3 mm, respectivamente. O espaçamento 3 x 2 metros apresentou maiores desvios entre os dados observados e estimados pelo modelo para as perdas por interceptação quando comparado aos espaçamentos 3 x 3 e 3 x 5 metros.

Palavras-chave: Modelo de Gash. Evaporação do dossel. Floresta esparsa.

ABSTRACT

Understanding how is the interaction between forest cover and rainfall is essential for an efficient analysis of water consumption by forest. Evaporative losses of water retained in the forest canopy are an important output of the water balance in forest environments. The application of models to estimate this variable has proven to be a useful and powerful tool in forest hydrological studies. The aim of this chapter is to apply the model to Gash sparse forests in a *Eucalyptus* stand in southern Minas Gerais. Was monitored the throughfall and stemflow in 24 points in the daily scale, and a survey of the parameters that feed the Gash model for forests with sparse canopy. Interception losses estimated by the model showed an average deviation of 18.5% compared to the observed data, with R^2 of 0.72, C_{NS} equal to 0.59 and Pbias 18.2%, indicating a good performance of model. The highlight of the parameterization of the model was the coverage factor (c) that, on average, was 0.54, reinforcing the sparse canopy characteristic of a *Eucalyptus* stand. The depth required to saturate the canopy and trunks on average were 3.0 mm and 6.3 mm, respectively. The spacing 3 x 2 meter showed higher differences between the observed data and estimated by the model when compared to the spacings 3 x 3 and 3 x 5 meters.

Keywords: Gash model. Canopy evaporation. Sparse forest.

1 INTRODUÇÃO

Ao analisar o papel de áreas florestadas no ciclo hidrológico é essencial discretizar as entradas e saídas de água deste sistema físico e como a cobertura vegetal (arquitetura do dossel) afeta o particionamento e redistribuição da precipitação ao longo do tempo e do espaço.

Vose et al. (2011) afirmam que a água é um serviço ecossistêmico primário derivado de paisagens florestais e que há um crescente interesse nos possíveis impactos que podem ser provocados por alterações climáticas e como estes impactos podem ser compensados ou atenuados com uso de estratégias de manejo florestal.

Destaca-se como componente primordial em estudos de balanço hídrico florestal a interceptação da precipitação pelo dossel. Czikowsky e Fitzjarrald (2009) apontam os potenciais destinos que o volume precipitado interceptado pode ter após interagir com o dossel: (i) as gotas de chuva podem interagir com as folhas, principalmente, e galhos alterando sua direção e energia cinética e contribuindo com a precipitação interna; (ii) após atingir a capacidade de saturação das folhas e galhos, escoar pelo tronco; e (iii) ficar temporariamente armazenado no dossel e ser evaporado.

A interceptação da chuva pelo dossel afeta tanto os processos ecológicos da floresta quanto os processos hidrológicos subsequentes, influenciando a disseminação de patógenos e o ciclo do carbono através da redução da umidade do solo e aumento do risco de estresse hídrico (SARI; PAIVA; PAIVA, 2015; LINK; UNSWORTH; MARKS, 2004; HUBER; GILLESPIE, 1992).

Lima (1976) afirma que durante os períodos secos a demanda atmosférica é atendida somente pela transpiração dos vegetais e evaporação da água contida no solo, entretanto, nos períodos chuvosos a interceptação pelo dossel passa a contribuir com as perdas de água para atmosfera. Calder (1977)

indica que as perdas de água por interceptação do dossel é um componente dominante da evapotranspiração em povoamentos florestais.

Intervenções silvícolas como a substituição da vegetação nativa por um monocultivo ou o reflorestamento para fins comerciais alteram as características do dossel, afetando a redistribuição da precipitação e aumentando a variabilidade do volume precipitado que atinge o piso florestal com consequências diretas nas perdas de água por evaporação (VOSE et al., 2011; ECHEVERRIA; HUBER; TABERLET, 2007; BRYANT; BHAT; JACOBS, 2005).

As perdas por interceptação podem variar de 7,0 a 50,0 % da precipitação incidente dependendo do tipo de cobertura florestal analisada (CHAFFE et al., 2010; VIEIRA; PALMIER, 2006; DINGMAN, 2002; CALDER, 1990). O clima também afeta a dinâmica das perdas por interceptação em ambientes florestais. Asdak et al. (1998), Lloyd e Marques (1988) e Bruijnzeel e Wiersum (1987) afirmam que as incertezas nas estimativas em florestas de clima tropical são maiores quando comparadas às florestas temperadas, principalmente, devido à diversidade de espécies e complexidade na estruturação do dossel florestal.

O principal desafio em estudos de interceptação florestal está na obtenção *in situ* desta variável. A interceptação não pode ser medida diretamente sendo então uma estimativa obtida através de análises indiretas de campo e modelagem numérica (PRICE; CARLYLE-MOSES, 2003). Esta dificuldade de monitoramento faz com que, em vários estudos e modelos hidrológicos, a interceptação seja desconsiderada no balanço hídrico em bacias com predominância de cobertura florestal (GERRITS et al., 2006; LLORENS; GALLART, 2000).

Oliveira et al. (2008) indicam ainda os altos custos para instalação, manutenção e monitoramento de todas as variáveis necessárias para a estimativa

das perdas por interceptação, fato este que corrobora com a utilização mais frequente de modelos para estimar a interceptação.

Faz-se necessária uma diferenciação dos termos modelo e simulação para uma melhor compreensão de seus usos e evitar o seu emprego indiscriminado nas abordagens metodológicas. Um modelo é uma representação de um sistema real ou imaginário usando uma linguagem, um meio, e de acordo com um ponto de vista específico, sendo assim, considerado como uma representação do conhecimento é a principal ferramenta para se estudar o comportamento de sistemas complexos. O aspecto mais importante de um modelo é a relação simplicidade *versus* fidelidade (TRIVELATO, 2003). Tucci (2005) afirma que simulação é o processo de utilização do modelo baseado na estimativa de parâmetros, verificação de seus ajustes e a previsão de novas informações por meio de diferentes entradas.

Para Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007) a redução das diferenças entre os valores simulados e observados não é tarefa trivial devido à forte não linearidade dos processos hidrológicos e às inúmeras fontes de erro que podem contaminar o processo.

Melo Neto (2012) afirma que a quantidade e a simplicidade dos parâmetros estão associadas ao fenômeno que se quer representar. É essencial entender o modelo para usá-lo, mas existe uma diferença entre entender o modelo e possuir habilidade para encontrar uma solução para o mesmo. A habilidade do usuário é essencial no uso do modelo. O ajuste manual é realizado por tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo e análises dos resultados.

1.1 Modelagem das perdas por interceptação da precipitação

A maneira mais simples para obtenção das perdas por interceptação da precipitação em ambientes florestais é através do uso de modelos simplificados de balanço hídrico, conforme Equação 1.

$$IL = PG - P_i - EsT \quad (1)$$

Em que IL representa as perdas por interceptação, PG é a precipitação externa sobre o dossel florestal, P_i a precipitação interna e EsT o escoamento pelo tronco. O empirismo associado a este tipo de modelo é o principal limitador da sua aplicação que é restrita à cobertura florestal estudada, seus respectivos manejos, localização geográfica e condições climáticas observadas.

Horton (1919) foi o primeiro a tentar estimar as perdas por interceptação da precipitação a partir de um modelo de regressão linear. Até a década de 70 estas eram as abordagens empregadas na estimativa das perdas por interceptação (SÁ; CHAFFE; OLIVEIRA, 2015).

Rutter et al. (1971) propuseram um modelo numérico de base física fundamentado na partição da precipitação incidente sobre um povoamento florestal, permitindo estimar as perdas por interceptação a partir da capacidade de armazenamento do dossel. Rutter, Morton e Robins (1975) desenvolveram a versão definitiva do modelo adicionando o módulo que trata do escoamento pelo tronco.

De acordo com Dijk e Bruijnzeel (2001), o modelo de Rutter tem como principal desvantagem prática a alta resolução temporal de dados exigidos pelo modelo com aplicações na escala horária.

Diversos pesquisadores desenvolveram modelos buscando aperfeiçoar e simplificar as abordagens adotadas no modelo de Rutter (CALDER, 1977; GASH, 1979; MASSMAN, 1983; MULDER, 1985; CALDER, 1986; GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995; LIU, 1997; VALENTE; DAVID; GASH, 1997;

DIJK; BRUIJNZEEL, 2001). Dentre estes modelos de estimativa das perdas por interceptação destaca-se o modelo proposto por Gash (1979) que é, essencialmente, uma forma analítica do modelo de Rutter incorporando alguns recursos simples obtidos a partir de regressões lineares.

O modelo de Gash considera a precipitação como uma sucessão de eventos chuvosos discretos em que cada evento apresenta três fases distintas: (1) fase de umedecimento – que representa o período entre o início do evento até a saturação do dossel; (2) fase de saturação – período em que o dossel permanece saturado; e (3) fase de secagem – representado pelo período que vai desde o fim do evento chuvoso até o dossel e o tronco estarem completamente secos (VALENTE; DAVID; GASH, 1997). Liu (1997) indica que em vários estudos o modelo de Gash foi aplicado admitindo-se que em um dia ocorre apenas um único evento chuvoso, facilitando o processo de modelagem em termos da escala temporal.

Entretanto, os modelos originais de Rutter e Gash tendem a superestimar as perdas por interceptação em florestas onde o dossel apresenta-se com características esparsas. Pela teoria destes modelos a superfície evaporante estende-se por toda a área do terreno, enquanto que, na realidade, em florestas esparsas, a área evaporante é reduzida (VALENTE; DAVID; GASH, 1997).

Gash, David e Lachaud (1995) propuseram uma reformulação do modelo de Gash buscando uma melhor representação da evaporação em florestas esparsas. O modelo passou a considerar dois sub-sistemas: o primeiro, em que parte da precipitação passa sem contato com a copa das árvores podendo atingir os troncos ou o piso florestal diretamente e um segundo, em que a precipitação interage com a copa das árvores (Figura 1).

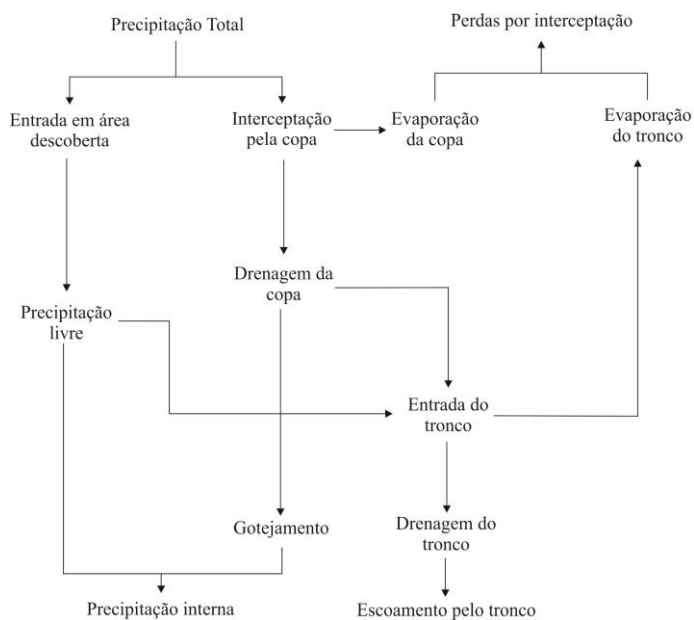


Figura 1 Fluxograma do modelo de Gash para florestas esparsas

Vários estudos foram realizados aplicando o modelo de Gash para florestas esparsas e apresentaram desempenho satisfatório (GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995; VALENTE; DAVID; GASH, 1997; JACKSON, 2000; BRYANT; BHAT; JACOBS, 2005; CUARTAS et al., 2007; SÁ; CHAFFE; OLIVEIRA, 2015).

Diante do exposto, tomou-se como objetivo principal neste capítulo aplicar o modelo de Gash para florestas esparsas em um povoamento de eucalipto localizado no sul de Minas Gerais.

Como objetivos específicos, buscou-se: (i) calibrar os parâmetros do modelo de Gash para florestas esparsas em um povoamento de eucalipto; (ii) comparar as estimativas de perdas por interceptação obtidas com o modelo de Gash para florestas esparsas com os resultados encontrados aplicando um balanço hídrico simplificado; e (iii) avaliar espacialmente as respostas do modelo de Gash para florestas esparsas em função dos manejos empregados para

os períodos secos e chuvosos, além dos totais anuais para o povoamento de eucalipto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o monitoramento da precipitação externa (PG) foi instalado um pluviômetro modelo “Ville de Paris” a 150 metros do experimento, em área aberta, gramada e distante de obstáculos para uma medição mais precisa da precipitação pluvial externa ao povoamento. O período de monitoramento foi de 1/11/2013 a 31/10/2015, correspondendo a dois anos hidrológicos na região.

Ao lado deste pluviômetro há uma estação meteorológica monitorando na escala horária as seguintes variáveis: temperatura média do ar (°C), temperaturas máximas e mínimas do ar (°C), umidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (mBar), velocidade do vento (m.s⁻¹) e insolação (h). Os dados desta estação foram trabalhados posteriormente para a escala diária.

Os dados meteorológicos foram aplicados na estimativa da evaporação potencial do dossel (mm.dia⁻¹) onde foi utilizada a equação de Penman-Monteith (Equação 2).

$$E_p = \left\{ \frac{(\Delta \times R_n) + \left[\rho_a + c_p \times \left(\frac{e_s + e_a}{r_a} \right) \right]}{\Delta + \gamma \times \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right\} \times \left(\frac{1}{\lambda \times \rho_w} \right) \quad (2)$$

Em que:

Δ representa a declividade da curva de pressão de saturação do vapor da água (kPa.°C⁻¹);

R_n representa o saldo de radiação (MJ.m⁻².s⁻¹);

ρ_a corresponde a densidade do ar (1,22 kg.m⁻³);

c_p representa a constante calor específico do ar (0,001 MJ.kg⁻¹.K⁻¹);

e_s corresponde a pressão de saturação do vapor da água (kPa);

e_a corresponde a pressão parcial do vapor da água (kPa);

r_a representa a resistência aerodinâmica (s.m⁻¹);

r_s representa a resistência estomática ($s.m^{-1}$);

γ representa a constante psicométrica ($kPa.^{\circ}C^{-1}$);

λ é o calor latente de vaporização ($MJ.kg^{-1}$);

ρ_w representa a densidade da água à temperatura ambiente ($1000 kg.m^{-3}$).

A Equação 3 expressa o procedimento de cálculo do saldo de radiação.

$$R_n = (R_{ns} + R_b) \times 86400 \quad (3)$$

Em que R_b e R_{ns} representam, respectivamente, os saldos de radiação de onda longa e de onda curta, ambos em $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$. As Equações 4 e 5 representam os procedimentos de estimativa destes componentes, respectivamente.

$$R_b = - \left[0,9 \times \left(\frac{n}{N} \right) + 0,1 \right] \times (0,34 - 0,14 \times \sqrt{e_a}) \times \sigma \times (T_{kx}^4 - T_{kn}^4)^{0,5} \quad (4)$$

$$R_{ns} = (1 - r) \times R_s \quad (5)$$

Em que n corresponde ao número de horas de brilho solar (horas); N duração do dia (horas), σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T_{kx} e T_{kn} são as temperaturas máximas e mínimas absolutas do ar ($^{\circ}K$), r é o albedo (0,23) e R_s trata da radiação de onda curta ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$). A radiação de onda curta incidente na superfície e a radiação incidente no topo da atmosfera (R_a) foram estimadas com base nas Equações 6 e 7, respectivamente.

$$R_s = \left[0,25 + \left(0,5 \times \frac{n}{N} \right) \right] \times R_a \quad (6)$$

$$R_a = 37,586 \times dr \times [(ws \times \sin \phi \times \sin \delta) + (\cos \phi \times \cos \delta \times \sin ws)] \quad (7)$$

Onde dr corresponde à distância relativa da Terra ao sol, ws é o ângulo horário do nascer ao por do sol (radianos), ϕ representa a latitude do local e δ é a declinação solar (radianos). Já a resistência aerodinâmica (r_a) e a razão entre a resistência estomática e a aerodinâmica ($r_s.r_a^{-1}$) foram determinadas com base nas Equações 8 e 9, respectivamente.

$$r_a = \frac{94}{U_{m,10}} \quad (8)$$

$$\frac{r_s}{r_a} = 0,34 \times VV \quad (9)$$

Em que $U_{m,10}$ representa a velocidade média do vento a 10 metros de altura ($m.s^{-1}$) e VV corresponde a velocidade do vento a dois metros de altura ($m.s^{-1}$).

Uma série de equações de caráter secundário foi aplicada para obtenção das diversas variáveis necessárias e ajustes de unidades para o emprego da equação de Penman-Monteith.

Para aplicação do modelo de Gash para florestas esparsas foram utilizados 24 locais distribuídos na área de estudo (Figura 2), para o monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco, ambos na escala diária. A descrição dos equipamentos e dos procedimentos utilizados para o monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco estão descritos na metodologia do Capítulo 3 deste estudo.

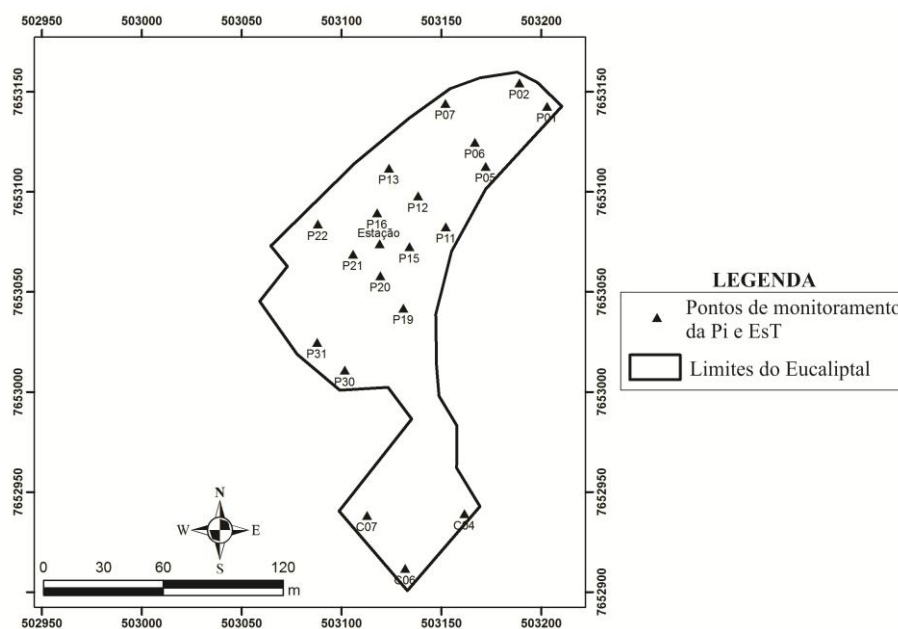


Figura 2 Pontos de monitoramento da precipitação interna e escoamento pelo tronco no povoamento de eucalipto

2.1 Modelagem das perdas por interceptação

Para estimativa das perdas por interceptação da precipitação foi aplicado o modelo analítico de Gash revisado para florestas com dossel esparso (GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995). Estes autores embutiram no modelo original de Gash um fator de cobertura (c) para representar, por unidade de área, o quanto da precipitação externa (P_G) é interceptada pelo dossel florestal e o seu complemento, chamado de coeficiente de precipitação livre (p), que representa o quanto desta atravessa o dossel livremente.

Em sua concepção, o modelo assume que há tempo suficiente entre eventos para permitir que o dossel e os troncos dos indivíduos estejam completamente secos. Neste estudo, admitiu-se que a análise na escala diária foi suficiente para atender esta premissa do modelo.

Outra diretriz do modelo é a subdivisão deste em três fases distintas: (i) fase de umedecimento – em que a precipitação incidente é inferior a quantidade necessária para saturar o dossel ($P < g$); (ii) fase de saturação – onde a intensidade da precipitação (R) é maior que a taxa de evaporação do dossel (E); e (iii) fase de secagem – representado pelo período que vai desde o fim do evento chuvoso até o dossel e o tronco estarem completamente secos.

Devido à escala temporal empregada neste estudo, as taxas reais de evaporação e intensidade da precipitação incidente foram substituídas por taxas médias de cada evento, conforme Liu (1997).

O fator de cobertura (c) em cada ponto de monitoramento foi estimado a partir da Equação 10, proposta por Dijk e Bruijnzeel (2001).

$$c = 1 - e^{-k \cdot L} \quad (10)$$

Em que k representa o coeficiente de extinção e L , o índice de área foliar (IAF). Para o fator k (adimensional) foi adotado o valor de 0,42 (ALMEIDA; RIBEIRO; LEITE, 2013), o qual foi empregado em povoamentos híbridos de *Eucalyptus urophylla* e *grandis* em Minas Gerais.

Para estimativa do IAF foi utilizado um sensor LAI-2000® da LICOR. Em cada local de monitoramento foram realizadas 10 leituras e posteriormente calculada uma média destas para cada ponto.

O coeficiente de precipitação livre (p) é resultado da análise complementar do fator de cobertura (Equação 11).

$$p = 1 - c \quad (11)$$

A capacidade de armazenamento do dossel (S), em mm, foi estimada aplicando-se o método da regressão proposto por Leyton (LEYTON;

REYNOLDS; THOMPSON, 1967) que consiste na análise gráfica dos dados de precipitação interna em função dos dados de precipitação externa. Ao ajustar uma regressão linear simples para este conjunto de dados, a capacidade de armazenamento do dossel é representada pelo intercepto negativo da linha traçada no eixo da precipitação interna.

Para aplicação desta metodologia é necessário identificar a lâmina mínima capaz de saturar o dossel para selecionar os eventos base para o ajuste da regressão. Vários estudos têm adotado valores de precipitação externa a partir de 1,5, 2,0 e 3,0 mm como limiar para aplicação desta metodologia (VIEIRA; PALMIER, 2006; BRYANT; BHAT; JACOBS, 2005; CARLYLE-MOSES; PRICE, 1999; GASH; MORTON, 1978).

No presente estudo foram utilizados eventos de precipitação externa entre 2,0 e 20,0 mm na estimativa da capacidade máxima de armazenamento do dossel (S), segundo Cuartas et al. (2007). Percebeu-se que o emprego de valores de precipitação externa acima de 20,0 mm causava um aumento excessivo da capacidade de armazenamento do dossel, inviabilizando a modelagem.

A capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área coberta (S_c) foi calculado segundo a Equação 12.

$$S_c = \frac{S}{c} \quad (12)$$

A taxa média de evaporação (\bar{E}) e a intensidade média da precipitação externa (R), ambos em mm.h^{-1} , foram obtidas de acordo com o método proposto por Gash (1979), que consiste na média da evaporação e da precipitação, respectivamente, para os eventos de precipitação externa acima de um determinado valor. Novamente, foram selecionados eventos de precipitação externa entre 2,0 e 20,0 mm para estimativa destas variáveis.

A taxa média de evaporação do dossel por unidade de área coberta, em mm.h^{-1} , (\bar{E}_c) foi obtida com base na Equação 13.

$$\bar{E}_c = \frac{E}{c} \quad (13)$$

Embasado nestas variáveis pode-se calcular a quantidade de precipitação necessária para saturar o dossel ($P'g$), em mm, a partir da Equação 14.

$$P'g = -\frac{R}{E_c} \times S_c \times \ln \left[1 - \left(\frac{E_c}{R} \right) \right] \quad (14)$$

São dois os parâmetros associados ao escoamento pelo tronco: a proporção da precipitação incidente que atinge diretamente o tronco (pt) e a capacidade de armazenamento do tronco (St). Estes parâmetros são obtidos a partir do ajuste de uma regressão linear simples entre dados observados de escoamento pelo tronco contra precipitação externa. O coeficiente angular da regressão representa o parâmetro pt e o intercepto negativo no eixo do escoamento pelo tronco é o parâmetro St .

A quantidade de precipitação incidente necessária para saturar o tronco ($P''g$) foi obtida com base na Equação 15.

$$P''g = \frac{St}{pt} \quad (15)$$

As perdas por interceptação da precipitação (IL) são determinadas em função de quatro componentes do modelo que relacionam a lâmina precipitada com a saturação do dossel ($P'g$) e do tronco ($P''g$).

As perdas por interceptação para os m eventos que são insuficientes para a saturação do dossel ($PG < P'g$) são definidas pela Equação 16.

$$I_m = c \times PG \quad (16)$$

As perdas por interceptação para os n eventos que são suficientes para saturar o dossel ($PG \geq P'g$) são definidas pela Equação 17.

$$I_n = \frac{E_c}{R} \times (PG_j - P'g) + (c \times P'g) \quad (17)$$

Já as perdas por interceptação para os q eventos que são suficientes para saturar o tronco ($PG \geq P''g$) são definidos pela Equação 18.

$$I_q = St \quad (18)$$

Já as perdas por interceptação para os $n-q$ eventos que são insuficientes para saturar o tronco ($PG < P''g$) são definidos pela Equação 19.

$$I_{n-q} = pt \times PG \quad (19)$$

Por fim, as perdas por interceptação da precipitação (IL), em mm, são calculadas segundo a Equação 20.

$$IL = I_m + I_n + I_q + I_{n-q} \quad (20)$$

O modelo de Gash para florestas com dossel esparsos também permite estimar a lâmina escoada pelo tronco (SF - Equação 21) e a precipitação interna (TF - Equação 22), ambos em mm.

$$SF = pt \times (PG - P''g) \quad (21)$$

$$TF = PG - (SF + IL) \quad (22)$$

A estimativa da lâmina que escoou pelo tronco só é aplicada para eventos em que a precipitação incidente é superior à capacidade de armazenamento do tronco ($PG \geq P''g$).

As perdas por interceptação da precipitação estimadas foram acumuladas para representar os períodos secos e chuvosos, além dos totais anuais durante o período analisado e espacializadas utilizando-se o método do inverso quadrático da distância através do software ArcGIS em sua versão 10.3.

Os mapas das estimativas de perdas por interceptação foram confrontados com os respectivos mapas observados (vide Capítulo 3) e foram gerados mapas dos resíduos representando a diferença entre os dados estimados e observados.

Também foram realizadas análises, em termos médios, em função dos manejos empregados (diferentes espaçamentos) para as perdas estimadas pelo modelo de Gash para florestas esparsas.

Por fim, a eficiência do modelo em estimar as perdas por interceptação foi avaliada em função dos índices P_{bias} (Equação 23), pelo coeficiente de determinação (R^2 - Equação 24) e pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS} - Equação 25).

$$P_{bias} = \left(\frac{\bar{\Pi}_{Gash} - \bar{\Pi}_{OBS}}{\bar{\Pi}_{OBS}} \right) \times 100 \quad (23)$$

Em que $\bar{\Pi}_{Gash}$ representa as perdas médias por interceptação da precipitação estimadas pelo modelo revisado de Gash e $\bar{\Pi}_{OBS}$ representa as perdas médias observadas por interceptação da precipitação, ambos em mm.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (IL_{OBSi} - \bar{\Pi}_{OBS}) \times (IL_{Gashi} - \bar{\Pi}_{Gash})}{\left[\sum_{i=1}^n (IL_{OBSi} - \bar{\Pi}_{OBS})^2 \right]^{0,5} \times \left[\sum_{i=1}^n (IL_{Gashi} - \bar{\Pi}_{Gash})^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad (24)$$

Em que IL_{Gash} representa as perdas por interceptação da precipitação estimadas para i-ésimo dia pelo modelo revisado de Gash e IL_{OBS} representa as perdas observadas por interceptação da precipitação para o i-ésimo dia, ambos em mm.

$$C_{NS} = \frac{\sum_{i=1}^n (IL_{OBSi} - IL_{Gashi})^2}{\sum_{i=1}^n (IL_{OBSi} - \bar{\Pi}_{OBS})^2} \quad (25)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção subdivide-se na análise do comportamento dos parâmetros do modelo de Gash para florestas com dossel esparso e na avaliação do desempenho do modelo para um povoamento de eucalipto no sul de Minas Gerais.

3.1 Parametrização do modelo de Gash para florestas esparsas

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios e a amplitude para todos os parâmetros do modelo de Gash para florestas esparsas na estimativa das perdas por interceptação.

Tabela 1 Amplitude dos parâmetros aplicados ao modelo de Gash para florestas esparsas em um povoamento de eucalipto

Parâmetros	Unidade	Média	Máximo	Mínimo
c	Adimensional	0,54	0,69	0,42
p	Adimensional	0,46	0,58	0,31
\bar{E}	mm.h ⁻¹	0,13	0,13	0,12
$\bar{E}c$	mm.h ⁻¹	0,07	0,09	0,05
\check{R}	mm.h ⁻¹	0,34	0,41	0,33
P'g	mm	3,03	3,90	2,15
P''g	mm	6,30	10,61	3,21
S	mm	1,46	2,11	0,94
Sc	mm	2,71	3,42	1,95
St	mm	0,24	0,66	0,03
pt	mm	0,06	0,49	0,01

Os valores encontrados para o parâmetro fator de cobertura (c) tornam explícita a característica de abertura do dossel do povoamento de eucalipto estudado. Valente, David e Gash (1997) estudando um povoamento de *Eucalyptus globulus* em Portugal, encontraram fator c de 0,60. Steidle Neto et al.

(2012) encontraram um valor mais próximo ao deste estudo (0,58), para híbridos de *Eucalyptus grandis* e *urophylla*.

Os valores encontrados para o coeficiente de precipitação livre (p) são relevantes, principalmente se comparados a florestas densas onde este fator pode chegar a zero. Em média, 46 % da precipitação incidente no povoamento ultrapassa o dossel sem contato com o mesmo, contribuindo diretamente para o escoamento superficial ou infiltração da água no solo, podendo também ser interceptada diretamente pelos troncos dos indivíduos (pt). Em média, a fração de precipitação livre convertida diretamente para os troncos (pt) é de 6 %, entretanto, chegou a 49 % em um indivíduo monitorado neste estudo.

A capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área coberta (Sc) apresentou grande amplitude entre os pontos estudados, com diferença de até 75 % do máximo valor calculado em relação ao mínimo.

Os valores do parâmetro Sc indicam uma boa capacidade de retenção de água no dossel pelos indivíduos deste povoamento (2,71 mm). Entretanto, distinguem-se dos valores encontrados por Aston (1979) para seis espécies de *Eucalyptus* em que os valores variaram de 0,2 a 0,8 mm. Dos eventos de precipitação externa (34 eventos), 21,3 % ficaram abaixo do valor de Sc contribuindo integralmente para as perdas por interceptação.

Segundo Bulcock e Jewitt (2012), a capacidade de armazenamento do dossel é o parâmetro de maior importância na modelagem das perdas por interceptação, pois, este representa a entrada de água que poderá atender os processos hidrológicos subsequentes à interceptação.

A taxa média de evaporação (\bar{E}) encontrada foi de 0,13 mm.h⁻¹ e está de acordo com valores encontrados para regiões tropicais, podendo variar de 0,10 a 0,32 mm.h⁻¹ (CUARTAS et al., 2007; VIEIRA; PALMIER, 2006; WALLACE; MCJANNET, 2006; DIJK; BRUIJNZEEL, 2001).

O valor da intensidade média da precipitação externa (R) foi de 0,34 mm.h⁻¹, apresentando-se significativamente abaixo de valores encontrados em regiões tropicais, como os de Cuartas et al. (2007) de 7,13 mm.h⁻¹, de 6,0 mm.h⁻¹ (SÁ;CHAFFE; OLIVEIRA, 2015) e Vieira e Palmier (2006) de 1,95 mm.h⁻¹.

Estas diferenças ocorrem devido à escala temporal da análise. Os estudos mencionados acima foram realizados com base na escala de evento e, de maneira geral, os eventos em regiões tropicais têm curta duração, geralmente abaixo de três horas, e são de caráter convectivo, o que favorece o aumento da intensidade média da precipitação incidente.

Wallace e McJannet (2006) aplicaram o modelo de Gash para florestas esparsas para duas escalas temporais, baseada em eventos e total diário. Estes autores obtiveram melhor desempenho do modelo ao empregar a análise dos totais diários e justificam o resultado pela redução significativa na quantidade de eventos com lâmina insuficiente para saturar o dossel. Ao aumentar o tempo de análise (24 horas), estes eventos pequenos e independentes são agregados compondo eventos com lâmina maior, sendo enquadrados em outros termos do cálculo das perdas por interceptação que favorecem a redistribuição da precipitação.

O parâmetro que representa a quantidade de água necessária para saturar o dossel (P'g) apresentou amplitude de 81 % entre o máximo e mínimo valor estimado, com 23,1 % dos eventos (37 eventos) abaixo do seu valor médio (3,03 mm). Já o parâmetro que trata da quantidade de água necessária para saturar o tronco (P''g) apresentou elevada amplitude (230,5 %) entre os pontos estudados e 39,4 % dos eventos de precipitação externa (63 eventos) não proporcionaram a saturação dos troncos no povoamento.

A apresentação dos valores médios e respectivas amplitudes dos parâmetros necessários para aplicação do modelo de Gash para florestas com dossel esparso são imprescindíveis nos processos de modelagem das perdas por

interceptação. Assim, busca-se a otimização destes parâmetros visando produzir uma referência para estudos de simulação e predição em hidrologia. Especificamente para plantios híbridos de eucalipto no Brasil, não há na literatura até o presente momento parametrização completa do modelo de Gash para florestas esparsas.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios por espaçamento para todos os parâmetros ajustados ao modelo de Gash para florestas esparsas na estimativa das perdas por interceptação.

Tabela 2 Valores médios por espaçamento do plantio de eucalipto dos parâmetros aplicados no modelo de Gash para florestas com dossel esparso

Parâmetros	Unidade	Espaçamento (metros)		
		3 x 2	3 x 3	3 x 5
c	Adimensional	0,58	0,50	0,48
p	Adimensional	0,42	0,50	0,52
\bar{E}	mm.h ⁻¹	0,13	0,13	0,12
$\bar{E}c$	mm.h ⁻¹	0,07	0,06	0,06
\check{R}	mm.h ⁻¹	0,35	0,34	0,33
P'g	mm	3,06	3,02	2,95
P''g	mm	7,59	5,24	3,72
S	mm	1,56	1,36	1,28
Sc	mm	2,72	2,72	2,69
St	mm	0,29	0,26	0,04
pt	mm	0,08	0,06	0,01

De maneira geral, percebe-se um decréscimo de todos os parâmetros na medida em que se aumenta o espaçamento entre os indivíduos no eucaliptal. Destaque para o fator de cobertura com diferença de 20,8 % entre os espaçamentos 3 x 2 e 3 x 5 metros.

Este comportamento pode ser justificado analisando o índice de área foliar (IAF). O menor espaçamento possibilita um maior fechamento do dossel e conseqüentemente um maior IAF. Em contrapartida, o maior espaçamento

permite maior abertura do dossel e menor sobreposição das folhas afetando diretamente todos os parâmetros associados à arquitetura do dossel e redistribuição da precipitação externa.

3.2 Análise de desempenho do modelo de Gash esperso para um povoamento de eucalipto

As perdas por interceptação modeladas para o povoamento de eucalipto foram, em termos médios, de 612,6 mm, representando 40,2 % da precipitação externa. Este valor é 18,5 % superior às perdas observadas, que foram de 516,9 mm (33,9 % da precipitação externa).

Nos Gráficos 1, 2 e 3 são apresentadas, respectivamente, as perdas por interceptação da precipitação, escoamento pelo tronco e precipitação interna, em termos percentuais, observados e estimados pelo modelo de Gash para florestas com dossel esperso bem como os resultados das estatísticas de precisão aplicadas para todos os pontos estudados.

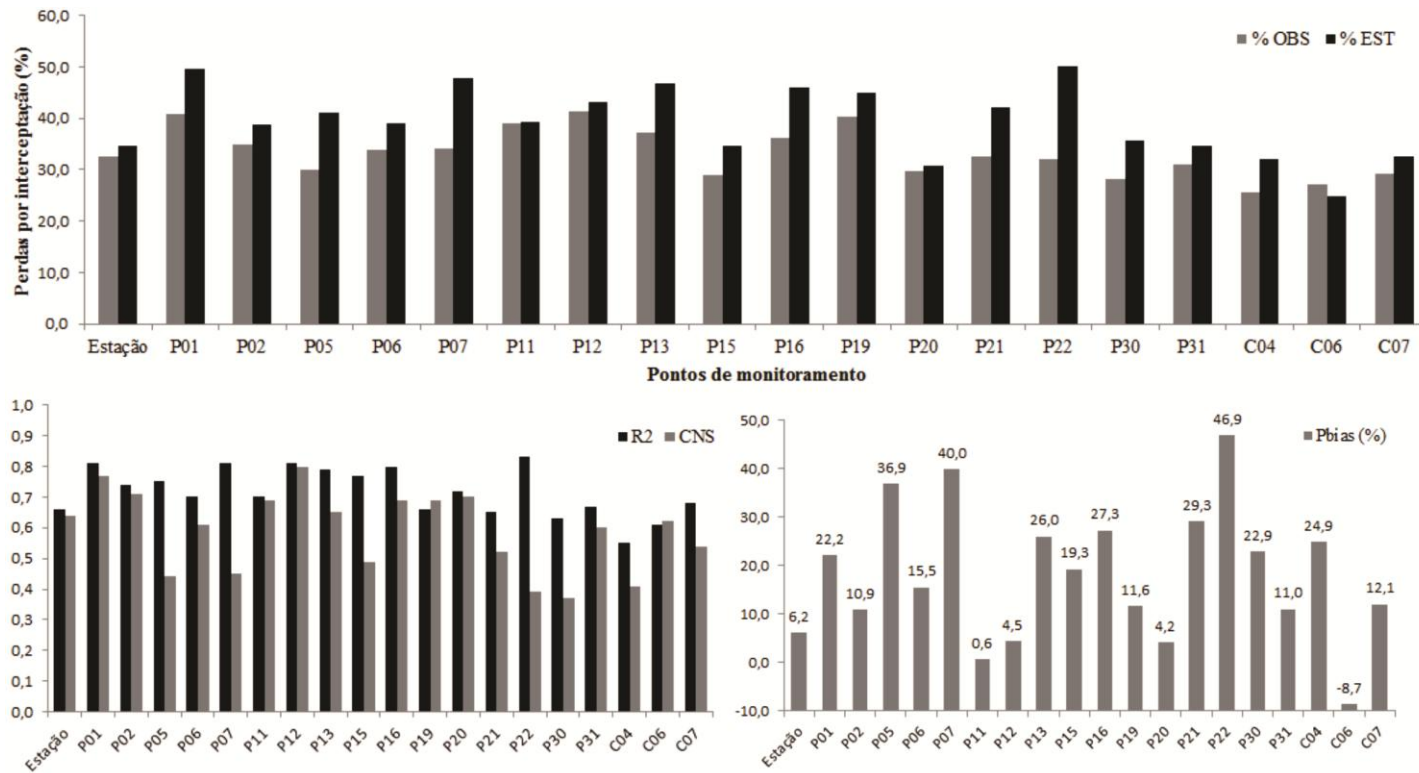


Gráfico 1 Perdas por interceptação observadas e estimadas e estatísticas de precisão associados ao modelo de Gash para florestas com dossel esparso ajustado para um povoamento de eucalipto

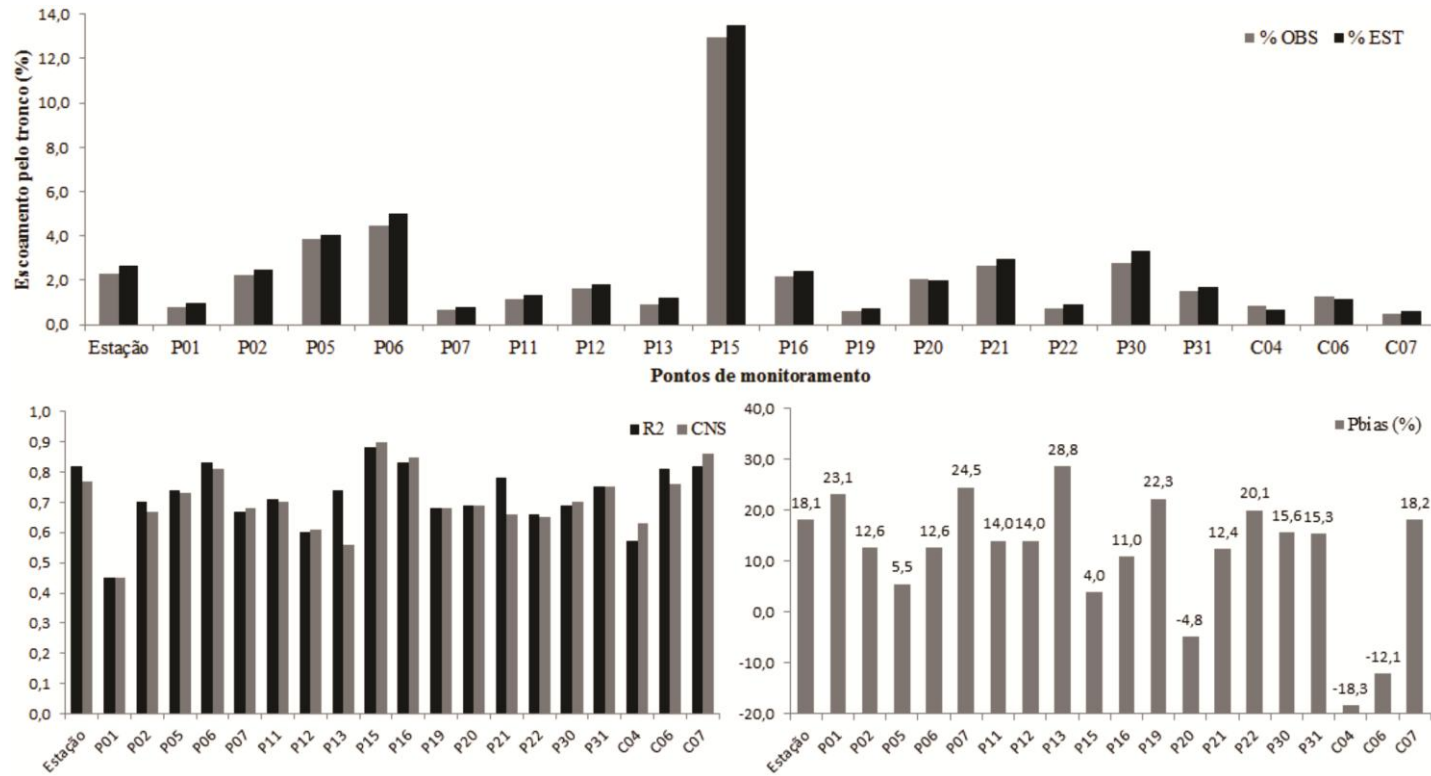


Gráfico 2 Escoamento pelo tronco observados e estimados e estatísticas de precisão associadas ao modelo de Gash para florestas com dossel esparsa ajustado para um povoamento de eucalipto

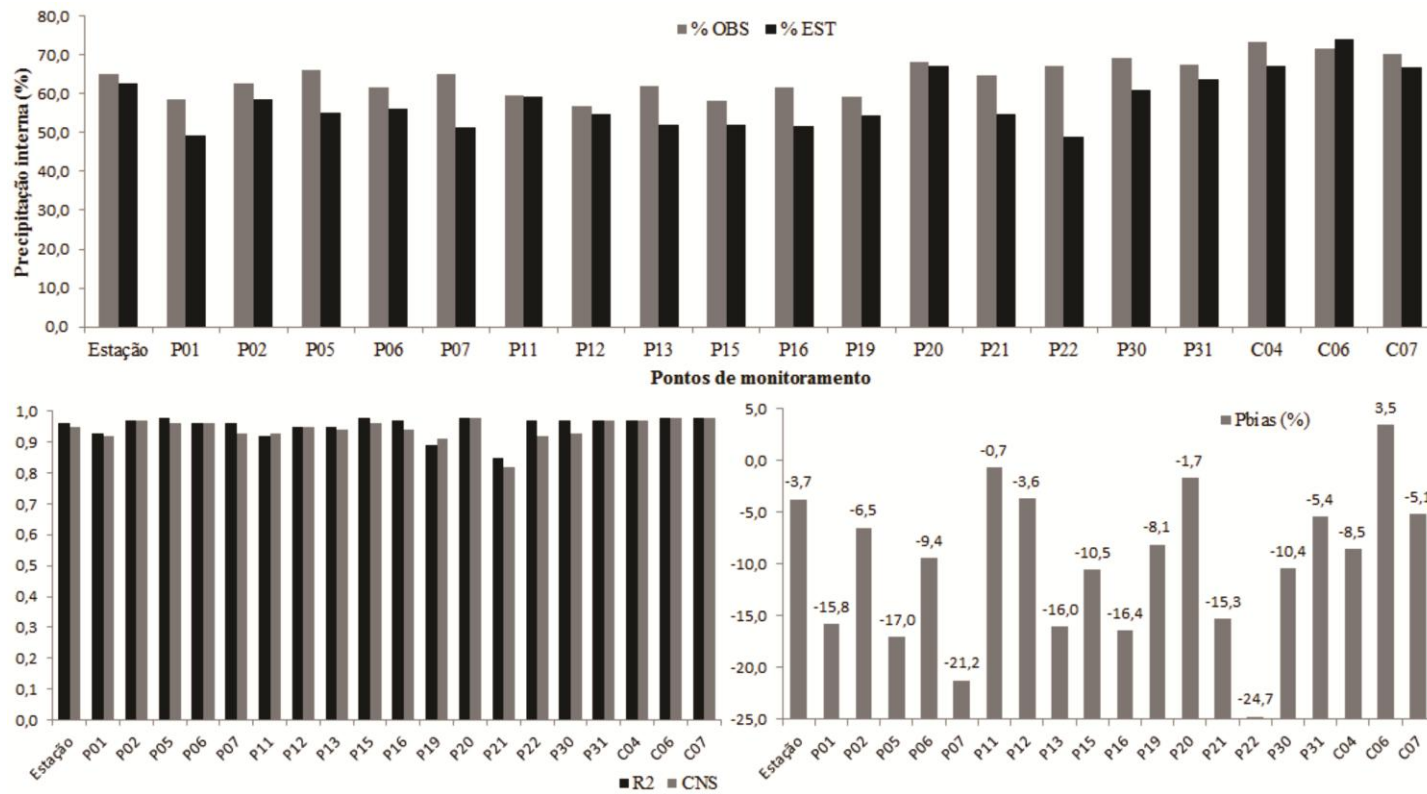


Gráfico 3 Precipitação interna observada e estimada e estatísticas de precisão associadas ao modelo de Gash para florestas com dossel esperso ajustado para um povoamento de eucalipto

O desempenho das estatísticas de precisão aplicadas na avaliação da qualidade do modelo de Gash para florestas com dossel esparso na estimativa da partição da precipitação, de maneira geral, pode ser considerado adequado. O coeficiente de determinação (R^2) para ser considerado adequado deve apresentar valores superiores a 0,50. Van Liew et al. (2007) indicaram que valores do coeficiente Pbias inferiores a |25| % representam uma estimativa satisfatória e, por fim, para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}), Gottschalk e Motovilov (2000) afirmam que valores deste índice superiores a 0,36 corroboram a adequabilidade do modelo na escala diária.

As perdas por interceptação estimadas apresentaram o maior desvio no ponto P22, com superestimativa de 18,1 %, enquanto que o menor desvio foi de 1,2 % no ponto P20. Em termos médios, para o povoamento de eucalipto, o Pbias apresentou superestimativa de 18,2 %, o C_{NS} ficou em 0,59 e o R^2 foi de 0,72.

Os índices C_{NS} e R^2 apresentaram valores considerados aceitáveis para todos os pontos estudados. No entanto, o Pbias indicou que a simulação pode ser considerada inadequada para os pontos P05 (36,9 %), P07 (40,0 %), P13 (26,0 %), P16 (27,3 %), P21 (29,3 %) e P22 (46,9 %).

A estimativa do escoamento no tronco pelo modelo de Gash para florestas com dossel esparso apresentou valores de R^2 , C_{NS} e Pbias de 0,72, 0,71 e 11,85 %, respectivamente, todos considerados adequados e com bom desempenho. O único ponto em que houve reprovação foi o P13, que no índice Pbias apresentou valor de 28,8 %.

Para estimativa da precipitação interna, todos os índices apresentaram desempenho satisfatório em todos os pontos simulados. O desvio médio foi de 6,5 %, com R^2 de 0,95, Pbias de -9,8 % e C_{NS} de 0,94.

Valente, David e Gash (1997) encontraram para um plantio de *Eucalyptus globulus* em Portugal eficiência de 81,2 %, 99,8 % e 80,3 % na

estimativa das perdas por interceptação, precipitação interna e escoamento pelo tronco, respectivamente, aplicando o modelo de Gash para florestas com dossel esparso.

Bryan, Bhat e Jacobs (2005), para plantios de *Pinus* no estado da Georgia – Estados Unidos, aplicando o mesmo modelo deste estudo, obtiveram valores para o C_{NS} de 0,59 a 0,99 com desvios de -10,2 % até 1,7 % entre os dados estimados e observados. Já Chaffe (2009) para estimativa da precipitação interna utilizando o modelo de Rutter para florestas esparsas em povoamento de *Pinus taeda* no Brasil, encontrou valores de C_{NS} entre 0,76 e 0,78, entretanto não obteve desempenho satisfatório na modelagem do escoamento pelo tronco, com valores de C_{NS} negativos.

No Gráfico 4 são apresentadas as perdas por interceptação médias percentuais observadas e estimadas do povoamento de eucalipto para os períodos analisados.

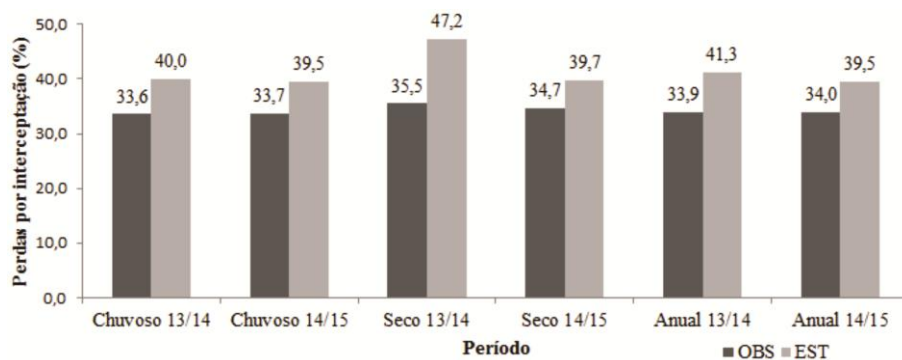


Gráfico 4 Perdas por interceptação da precipitação observadas e estimadas para os períodos analisados em um povoamento de eucalipto

De maneira geral, os períodos secos e chuvosos, além dos totais anuais, apresentaram um comportamento similar. As perdas nos períodos secos tenderam a ser maiores se comparadas aos períodos chuvosos dos respectivos

anos. Destaque para o período seco do ano hidrológico 2013/2014, que apresentou um desvio de 11,7 % entre os dados observados e estimados.

O ano hidrológico 2014/2015 foi mais úmido quando comparado ao ano 2013/2014, apresentando uma maior sequência de dias nublados e consecutivos com chuva. Esta situação propicia uma redução na evaporação potencial, afetando também o processo de simulação.

Wallace e McJannet (2008) avaliando cinco bacias florestais em Queensland – Austrália, com o modelo de Gash encontraram variações nas estimativas de perdas por interceptação para períodos secos entre 0,0 % e 16,0 %, enquanto que para os períodos úmidos estas variações foram menores, entre -3,4 % e 4,5 %.

Ao analisar os desvios por espaçamento, o 3 x 2 metros apresentou os maiores desvios em todos os períodos analisados com médias de -10,0 %, -7,5 % e -7,0 % para os períodos secos, chuvosos e totais anuais, respectivamente. Contudo, a menor variabilidade foi encontrada para o espaçamento 3 x 5 metros, oscilando de -4,7 % no período seco a -2,6 % no período chuvoso. O espaçamento 3 x 3 metros apresentou desvios médios entre -7,9 % e 4,0 % nos períodos analisados.

Esta maior variabilidade associada ao espaçamento 3 x 2 metros pode ser explicada pela amplitude do fator de cobertura (c) que foi de 44,6 % contra 35,7 % para o espaçamento 3 x 3 metros e 22,7 % para o espaçamento 3 x 5 metros.

Nas Figuras 3, 4 e 5 são apresentadas as espacializações, em termos percentuais, das perdas por interceptação observadas, estimadas e os desvios entre elas para os períodos secos, chuvosos e totais anuais, respectivamente, dos anos hidrológicos de 2013/2014 e 2014/2015.

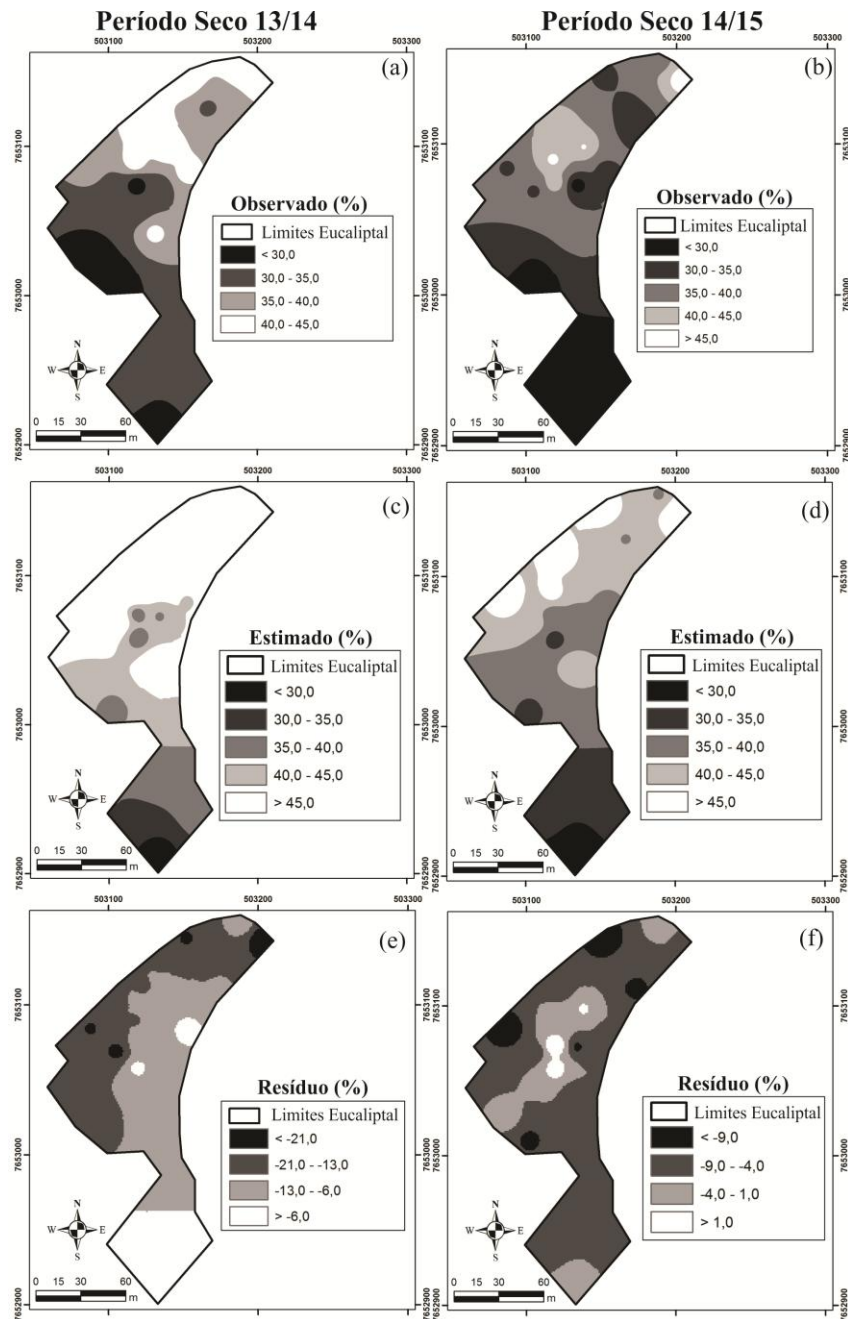


Figura 3 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os períodos secos dos anos hidrológicos de 2013/2014 (a, c e e) e 2014/2015 (b, d e f), respectivamente

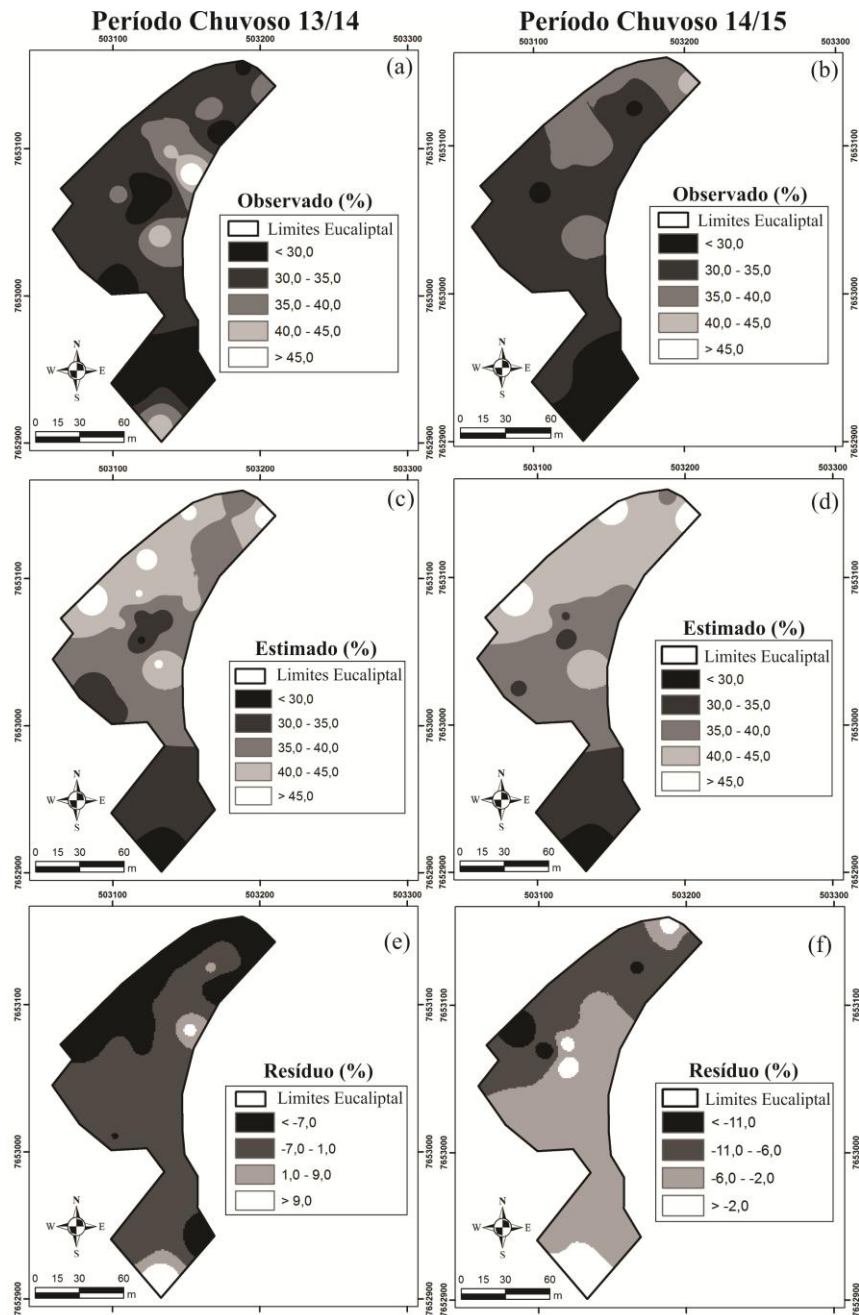


Figura 4 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os períodos chuvosos dos anos hidrológicos de 2013/2014 (a, c e e) e 2014/2015 (b, d e f), respectivamente

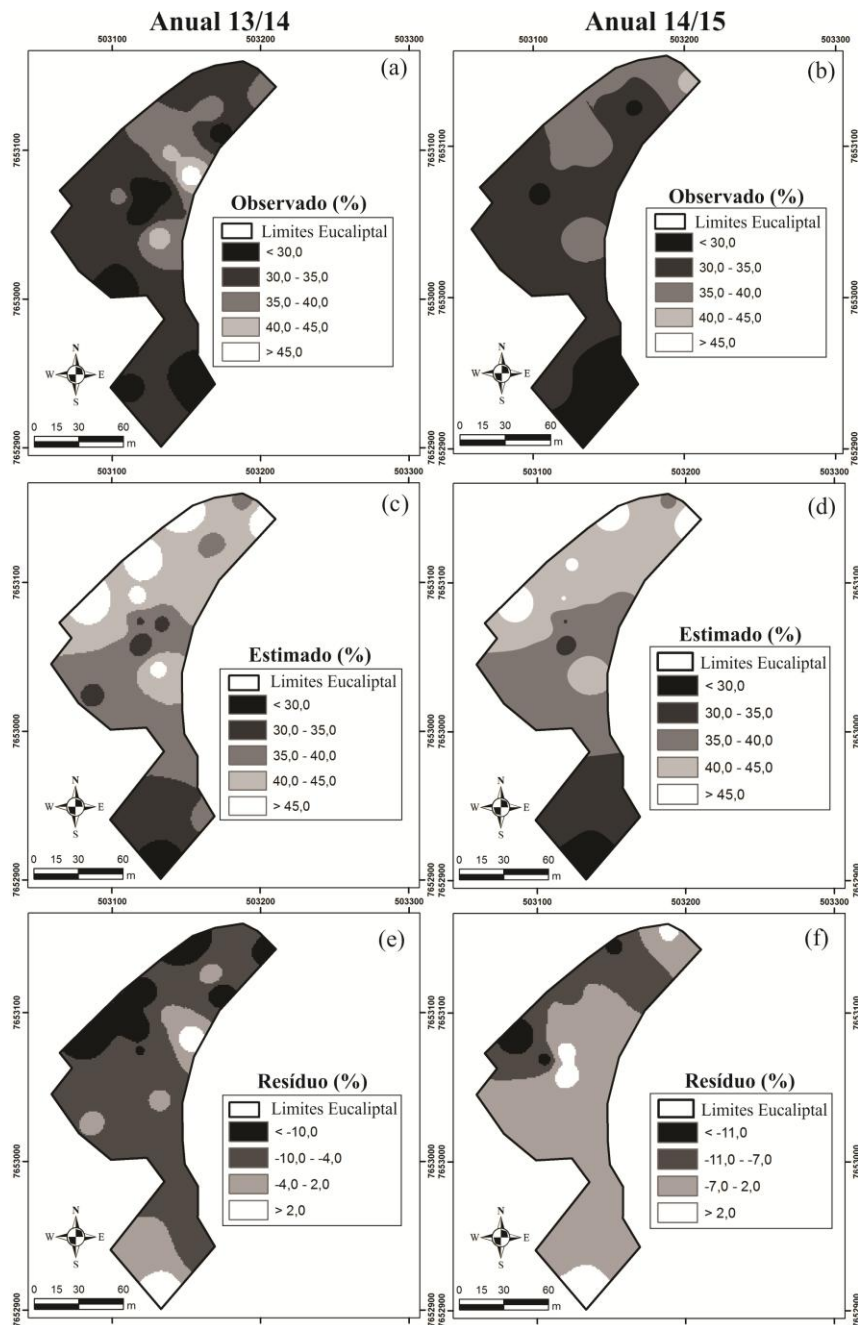


Figura 5 Espacialização das perdas por interceptação observadas, estimadas e desvios para os totais anuais dos anos hidrológicos de 2013/2014 (a, c e e) e 2014/2015 (b, d e f), respectivamente

Na Tabela 3 é apresentado um resumo dos resultados encontrados neste estudo e dados de outros estudos aplicando o modelo de Gash para florestas com dossel esparso para a cultura do eucalipto, povoamentos de outras espécies e florestas nativas.

Tabela 3 Aplicações do modelo de Gash para florestas com dossel esparso

Autores	Espécie	Localidade	PG (mm)	Pi	EsT (% da PG)	IL
Gash, Lloyd e Lachaud (1995)	<i>Pinus pinaster</i>	França	613,0	-	-	11,4
Valente, David e Gash (1997)	<i>Eucalyptus globulus</i>	Portugal	1042,8	89,2	1,5	9,3
Valente, David e Gash (1997)	<i>Pinus pinaster</i>	Portugal	935,6	83,0	0,2	16,8
Moses e Price (1999)	Floresta Temperada	Canadá	213,8	77,7	3,0	19,3
Jackson (2000)	Sistema agroflorestal	Quênia	1583,0	89,0	0,6	10,4
Cuartas et al. (2007)	Floresta Amazônica	Brasil	3064,2	84,9	0,6	14,5
Ghimire et al. (2012)	Floresta nativa	Nepal	-	-	-	22,6
Ghimire et al. (2012)	Pinheiros	Nepal	-	-	-	19,4
Neste estudo (Estimado)	Eucalipto “urograndis”	Brasil	1523,9	57,2	2,6	40,2
Neste estudo (Observado)				63,7	2,4	33,9

4 CONCLUSÕES

O modelo de Gash para florestas com dossel esparso apresentou desempenho aceitável na estimativa das perdas por interceptação da precipitação em um povoamento híbrido de eucalipto no sul de Minas Gerais.

As perdas estimadas pelo modelo apresentaram um desvio médio de 18,5 % em relação aos dados observados, R^2 de 0,72, C_{NS} igual a 0,59 e P_{bias} de 18,2 %, todos respaldando o desempenho adequado do modelo.

O modelo também estimou com boa precisão a fração que escoou pelos troncos e a lâmina precipitada internamente. O escoamento pelo tronco apresentou valores de R^2 , C_{NS} e P_{bias} de 0,72, 0,71 e 11,85 %, respectivamente, e a precipitação interna com desvio médio de 6,5 % superior aos valores observados, tendo sua estimativa respaldada por um R^2 de 0,95, P_{bias} de -9,8 % e C_{NS} de 0,94.

O destaque da parametrização do modelo foi o parâmetro fator de cobertura (c) que expressou valores médios no povoamento de 0,54 explicitando a característica aberta do dossel do eucaliptal e corroborando com a escolha do modelo específico para florestas esparsas.

As lâminas necessárias para saturar o dossel e os troncos, em média, foram de 3,0 mm e 6,3 mm, respectivamente. A intensidade média da precipitação externa na escala diária (24 horas) foi de $0,34 \text{ mm.h}^{-1}$, enquanto que a taxa média de evaporação por unidade de área foi de $0,07 \text{ mm. h}^{-1}$.

O espaçamento 3 x 2 metros apresentou maiores desvios entre os dados de perdas por interceptação observados e estimados pelo modelo de Gash para florestas esparsas quando comparado a outros espaçamentos para todos os períodos analisados neste estudo com destaque para o período seco com desvio médio de -10,0 %.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; LEITE, F. P. Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no leste de Minas Gerais, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 547-556, 2013.

ASDAK, C.; JARVIS, P. G.; GARDINGEN, P. V.; FRASER, A. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. **Journal of Hydrology**, London, v. 206, n. 3-4, p. 237-244, 1998.

ASTON, A. R. Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, London, v. 42, n. 3-4, p. 383-396, 1979.

BRUJINZEEL, L. A.; WIERSUM, K. F. Rainfall interception by a young *Acacia auriculiformis* (a. cunn) plantation forest in West Java, Indonesia: Application of Gash's analytical model. **Hydrological Process**, West Sussex, v. 1, n. 4, p. 309-319, 1987.

BRYANT, M. L.; BHAT, S.; JACOBS, J. M. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. **Journal of Hydrology**, London, v. 312, n. 1-4, p. 95-108, 2005.

BULCOCK, H. H.; JEWITT, G. P. W. Field data collection and analysis of canopy and litter interception in commercial forest plantations in the KwaZulu-Natal Midlands, South Africa. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 10, p. 3717-3728, 2012.

CALDER, I. R. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, Central Wales. **Journal of Hydrology**, London, v. 33, n. 3-4, p. 247-265, 1977.

CALDER, I. R. A stochastic model of rainfall interception. **Journal of Hydrology**, London, v. 89, n. 1-2, p. 65-71, 1986.

CALDER, A. **Evaporation in the uplands**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1990. 148 p.

CARLYLE-MOSES, D. E.; PRICE, A. G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. **Journal of Hydrology**, London, v. 214, n. 1, p. 103-110, 1999.

CHAFFE, P. L. B. **Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em interceptação**. 2009. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CHAFFE, P. L. B.; KOBAYAMA, M.; YAMASHIKI, Y.; TAKARA, K. Is interception information important for rainfall-runoff modeling?. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, v. 54, p. 73-78, 2010.

CUARTAS, L. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M. G.; WATERLOO, M. J.; MÚNERA, J. C. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, n. 1-2, p. 69-83, 2007.

CZIKOWSKY, M. J.; FITZJARRALD, D. R. Detecting rainfall interception in an Amazonian rain forest with eddy flux measurements. **Journal of Hydrology**, London, v. 377, n. 1-2, p. 92-105, 2009.

DIJK, A. I. J. M. V.; BRUIJNZEEL, L. A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. **Journal of Hydrology**, London, v. 247, n. 3-4, p. 230-238, 2001.

DINGMAN, S. **Physical Hydrology**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646 p.

ECHEVERRÍA, C.; HUBER, A.; TABERLET, F. Comparative study of water balance components in a native forest and a meadow in southern Chile. **Bosque**, Valdivia, v. 28, n.3, p. 271-280, 2007.

GASH, J. H. C.; MORTON, A. J. An application of the Rutter model to estimation of interception loss from the Thetford Forest. **Journal of Hydrology**, London, v. 38, n. 1, p. 49-58, 1978.

GASH, J. H. C. An analytical model of rainfall interception by forests. **Quartely Journal of the Royal Meteorology Society**, London, v. 105, n. 443, p. 43-55, 1979.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, London, v. 170, n. 1-4, p. 79-86, 1995.

GERRITS, A. M. J.; SAVENIJE, H. H. G.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L. Measuring forest floor interception in a beech forest in Luxemburg. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 3, p. 2323-2341, 2006.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling: a scandinavian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON: 'CAN SCIENCE AND SOCIETY SAVE THE WATER CRISIS IN THE 21 ST CENTURY - REPORTS FROM THE WORLD', 21., 2000, Tokyo. **Anais...**Tokyo: Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p. 38-45.

HORTON, R. Rainfall interception. **Monthly Weather Review**, v. 47, p. 603-623, 1919.

HUBER, L.; GILLESPIE, T. J. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. **Annual Review of Phytopatology**, Palo Alto, v. 30, p. 553-577, 1992.

JACKSON, N. A. Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 100, n. 4, p. 323-336, 2000.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A. K.; MINE, M. R. M. Modelo hidrológico com atualização de estado: modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 93-103, 2007.

LEYTON, L.; REYNOLDS, E. R. C.; THOWPSON, F. B. Rainfall Interception in Forestland Moorland. In: SOPPER, W. E.; LULL, H. W. **Forest Hydrology**. Oxford: Pergamon Press, 1967. p.163-178.

LIMA, W. P. Interceptação da chuva em povoamentos de eucalipto e de pinheiro, **Revista do IPEF**, Piracicaba, n. 13, p. 75-90, 1976.

LINK, T. E.; UNSWORTH, M.; MARKS, D. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 171-191, 2004.

LIU, S. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. **Ecological Modelling**, v. 99, n. 2-3, p. 151-159, 1997.

LLOYD, C. R.; MARQUES, A. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 42, n. 1, p. 63-73, 1988.

LLORENS, P.; GALLART, F. A simplified method for forest water storage capacity measurement. **Journal of Hydrology**, London, v. 240, n. 1-2, p. 131-144, 2000.

MASSMAN, W. J. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forests. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 261-286, 1983.

MELO NETO, J. O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

MULDER, J. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.), **The Forest–Atmosphere Interaction**. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1983. p. 77–196.

OLIVEIRA, L. L.; COSTA, R. F.; COSTA, A. C. L.; SOUSA, A. S.; BRAGA, A. P. Modelagem da interceptação na floresta nacional de Caxiuana, no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 318-326, 2008.

PRICE, A. G.; CARLYLE-MOSES, D. E. Measurements and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 119, n. 1-2, p. 69-85, 2003.

RUTTER, A. J.; KERSHAW, K. A.; ROBINS, P. C.; MORTON, A. J. A predictive model of rainfall interception forest, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 9, p. 367-384, 1971.

RUTTER, A. J.; MORTON, A. J.; ROBINS, P. C. A predictive model of rainfall interception IN forest, II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 12, n. 1, p. 367-380, 1975.

SÁ, J. H. M.; CHAFFE, P. L. B.; OLIVEIRA, D. Y. Análise comparativa dos modelos de Gash e de Rutter para a estimativa da interceptação por floresta ombrófila mista. **Revista Brasileira de recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 1008-1018, 2015.

SARI, V.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Precipitação interna em floresta Atlântica: comparação entre sistemas de monitoramento fixo e móvel.

Revista Brasileira de recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 849-861, 2015.

STEIDLE NETO, A. J.; RIBEIRO, A.; LOPES, D. C.; SACRAMENTO NETO, O. B.; SOUZA, W. G.; SANTANA, M. O. Simulation of rainfall interception of canopy and litter in *Eucalyptus* plantation in tropical climate. **Forest Science**, v. 58, n. 1, p. 54-60, 2012.

TRIVELATO, G. C. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. São José dos Campos: INPE, 2003. 20 p. (Nota Técnica).

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005. 678 p.

VALENTE, F.; DAVID, J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forest in Central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, London, v. 190, n. 1-2, p. 141-162, 1997.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrological Research**, London, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VIEIRA, C. P.; PALMIER, L. R. Medida e modelagem da interceptação da chuva em uma área florestada na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. **Revista Brasileira de recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 101-112, 2006.

VOSE, J. M.; SUN, G.; FORD, C. R.; BREDEMIER, M.; OSTSUKI, K.; ZHANG, Z.; ZHANG, L. Forest ecohydrological research in the 21 st century: what are the critical needs? **Ecohydrology**, Hoboken, v. 4, n. 2, p. 146-158, 2011.

WALLACE, J.; MCJANNET, D. On interception modeling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. **Journal of Hydrology**, London, v. 329, n. 3-4, p. 477-488, 2006.

WALLACE, J.; MCJANNET, D. Modelling interception in coastal and montane rainforests in northern Queensland, Australia. **Journal of Hydrology**, London, v. 348, n. 3-4, p. 480-495, 2008.

**CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO
E MOVIMENTO DE ÁGUA NO SOLO EM FLORESTA DE
EUCALIPTO**

RESUMO

Em florestas com dossel esparso faz-se necessária a observação do escoamento superficial direto (ESd) e como a densidade de plantio afeta a ocorrência deste. Por sua vez, a compreensão da variabilidade temporal da umidade do solo é importante para um manejo adequado de culturas florestais. O objetivo neste capítulo foi analisar a dinâmica do escoamento superficial direto e a caracterização do movimento de água no perfil do solo em um povoamento clonal de *Eucalyptus*. Foram analisados dados de ESd associados aos eventos chuvosos registrados entre 01/11/2013 e 31/10/2015. A umidade do solo foi observada em intervalos de 15 dias em 25 pontos distribuídos no povoamento de eucalipto. A lâmina total de ESd foi de 163,1 mm no período analisado. O coeficiente de escoamento real, relação entre a lâmina de água que atinge o solo e o ESd, foi de 8,4 %. A umidade do solo apresenta alta variabilidade espacial na camada de 0-10 cm, enquanto que a partir dos 30 cm até 100 cm de profundidade a umidade tende a ficar mais homogênea em toda a área. O período seco apresenta maior estabilidade temporal da umidade do solo quando comparado ao período chuvoso. A variação do armazenamento de água no perfil do solo foi maior no ano hidrológico 14/15 comparado ao 13/14. O armazenamento de água no perfil do solo tende a reduzir no sentido Nordeste/Sudoeste no povoamento, com o espaçamento 3 x 2 metros apresentando o maior armazenamento (42,7 mm) e o 3 x 5 metros o menor armazenamento (18,8 mm).

Palavras-chave: Estabilidade temporal. Umidade do solo. Variação de armazenamento de água no solo.

ABSTRACT

In forests with sparse canopy it is necessary to observe the overland flow (ESd) and how plant densities affect the occurrence of this. In turn, understanding the temporal variability of soil moisture is important for proper management of forest crops. The aim of this chapter is to analyze the dynamics of overland flow and characterization of water movement in the soil profile in a clonal stand of *Eucalyptus*. ESd data were analyzed associated with rainfall events recorded between 01/11/2013 and 31/10/2015. Soil moisture was observed in 15-day intervals at 25 points distributed in the *Eucalyptus* stand. The total depth ESd was 163,1mm the period analyzed. The real direct runoff coefficient, the relationship between the depth of water which strikes the ground and ESd was 8.4%. Soil moisture has a high spatial variability in the 0-10 cm layer, while from 30 cm to 100 cm deep moisture tends to become more homogeneous throughout the area. The dry period is more temporal stability of soil moisture when compared to the rainy season. The change in water storage in the soil profile was higher in the hydrological year 14/15 compared to 13/14. The water storage in the soil profile tends to reduce towards Northeast/Southwest in the stand, with the spacing 3 x 2 meters featuring the largest storage (42.7 mm) and 3 x 5 meters the lowest storage (18.8 mm).

Keywords: Temporal stability. Soil moisture. Variation of water storage in soil.

1 INTRODUÇÃO

Após interagir com o dossel florestal e os troncos dos indivíduos, a lâmina da precipitação interna e, localmente, o escoamento pelo tronco atingem o piso florestal. A partir deste momento podem ocorrer dois processos importantes do ciclo hidrológico: o escoamento superficial direto (ESd) e a infiltração da água no perfil do solo.

No tocante ao escoamento superficial direto, em florestas densas, este componente é com frequência desconsiderado na análise do balanço hídrico devido ao forte fechamento do dossel, presença de sub-bosque e serapilheira densa, fatores estes que inibem a manifestação deste escoamento. Entretanto, em ambientes de florestas com dossel esparso faz-se necessária a observação desta variável para identificar como as práticas de manejo afetam a formação da serapilheira e a interação da água com a camada superficial do solo.

A existência de uma floresta atua em duas frentes que afetam diretamente a ocorrência do ESd: redução da intensidade e da quantidade de chuva que atinge o solo, especialmente com o dossel seco, e indiretamente, nas condições estruturais do solo, favorecendo o processo de infiltração (TURNBULL; WAINWRIGHT; BRAZIER, 2010).

Pereira et al. (2006) afirmam que a densidade populacional do povoamento florestal afeta o regime hídrico do solo com consequências diretas no escoamento superficial direto. Silva et al. (2011) estudando manejos culturais em plantio de eucalipto encontraram valores de escoamento superficial direto variando entre 0,5 % e 1,2 % da precipitação incidente em um Latossolo Vermelho, enquanto que para um Latossolo Vermelho-Amarelo, a variação foi entre 2,6 % e 3,8 % da precipitação incidente. Já Trevisan et al. (2012) estudando uma microbacia florestada com eucalipto observou um ESd equivalente a 8 % da precipitação incidente.

Por sua vez, os processos de infiltração e redistribuição da água no perfil do solo são drasticamente afetados pela variabilidade do volume de água que interage com a superfície do solo e os efeitos da cobertura vegetal neste. Desta maneira, identificar os processos e mecanismos que influenciam a variabilidade da umidade do solo é importante para um manejo adequado de culturas agrícolas e florestais.

A compreensão da variabilidade da umidade do solo, empregando as escalas espacial e temporal, é essencial na quantificação da variação do armazenamento de água no perfil do solo, informação esta fundamental em estudos de predição e previsão de cheias e na modelagem agroclimática (ALBERGEL et al., 2010; BOLTEN et al., 2010; KOSTER et al., 2010; FAMIGLIETTI et al., 2008).

Entin et al. (2000) afirmam que o padrão espacial da umidade do solo pode ser representado por um componente de pequena escala composto pela classe de solo, topografia e cobertura vegetal, e por um componente de grande escala englobando as condições atmosféricas, sendo representado pela precipitação e demanda evapotranspirativa.

Guswa (2012) atesta que a variabilidade horizontal da umidade do solo é afetada, principalmente, pela variação da precipitação interna e escoamento pelos troncos, enquanto que a variabilidade vertical fica em função das características físicas do perfil do solo e, principalmente, da distribuição do sistema radicular da cobertura vegetal.

A análise da variabilidade temporal da umidade do solo é um procedimento complexo e dinâmico que envolve, geralmente, a necessidade de um conjunto amostral extenso acarretando em aumentos significativos de custos do monitoramento ao longo do tempo.

Vachaud et al. (1985) foram os primeiros a observar que, apesar da variabilidade espaço-temporal, existem padrões espaciais de umidade do solo e

tais padrões apresentam pouca variação no tempo. A partir destas observações, estes autores propuseram o conceito de estabilidade temporal, que consiste na associação constante entre a localização espacial e as medidas estatísticas que caracterizam uma determinada propriedade do solo ao longo do tempo (VAN WESENBEECK; KACHANOSKI, 1988). Identificar pontos de amostragem com padrões de umidade do solo temporalmente estáveis significa que tais pontos apresentam umidade igual à média amostral, sendo estes representativos da área, reduzindo assim os custos de monitoramento (GAO; SHAO, 2012).

Gonçalves, Folegatti e Silva (1999) afirmam que o conceito de estabilidade temporal aplicado à umidade do solo é realístico, na medida em que existe alta probabilidade de que uma posição mais úmida em um determinado instante permaneça assim em outros momentos.

Entretanto, Hu et al. (2010) indicam que a maioria dos esforços aplicados na análise da estabilidade temporal da umidade do solo têm-se concentrado na camada superficial do solo com poucos estudos avaliando o perfil de solo.

Em estudo realizado por Western, Grayson e Blöschl (2002) constatou-se que a maioria das análises teóricas de umidade do solo aplicando modelos estatísticos dinâmicos ignoram os efeitos da sazonalidade da umidade do solo focando apenas na variabilidade temporal da precipitação e evapotranspiração.

Desta maneira, tomou-se como objetivo neste capítulo, a análise da dinâmica do escoamento superficial direto e a caracterização do movimento de água no perfil do solo em um povoamento clonal de *Eucalyptus*.

Como objetivos específicos buscou-se: (i) relacionar a lâmina real que atinge o piso florestal com o escoamento gerado na superfície através do coeficiente de escoamento superficial; (ii) analisar a estabilidade temporal do conteúdo de água no solo por camadas; (iii) avaliar o padrão de estabilidade para

os períodos secos e chuvosos; e (iv) espacializar a variação do armazenamento no perfil do solo no período estudado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção foi subdividida em duas para melhor compreensão das abordagens aplicadas neste estudo.

2.1 Monitoramento do escoamento superficial direto (ESd)

Para o monitoramento do escoamento superficial direto (ESd) foram instaladas 5 parcelas representativas das classes de solo e declividade presentes na área de estudo. Cada parcela possui área de 1 m² com calha coletora na parte inferior recebendo toda a drenagem da parcela e redirecionando o deflúvio para um recipiente fechado com capacidade de 60 litros. As parcelas foram construídas com chapas de aço galvanizado cravadas perpendicularmente ao eixo do solo, 30 cm no perfil. Na Figura 1 estão representados a distribuição espacial das parcelas na área de estudo (a) e detalhes das parcelas instaladas (b).

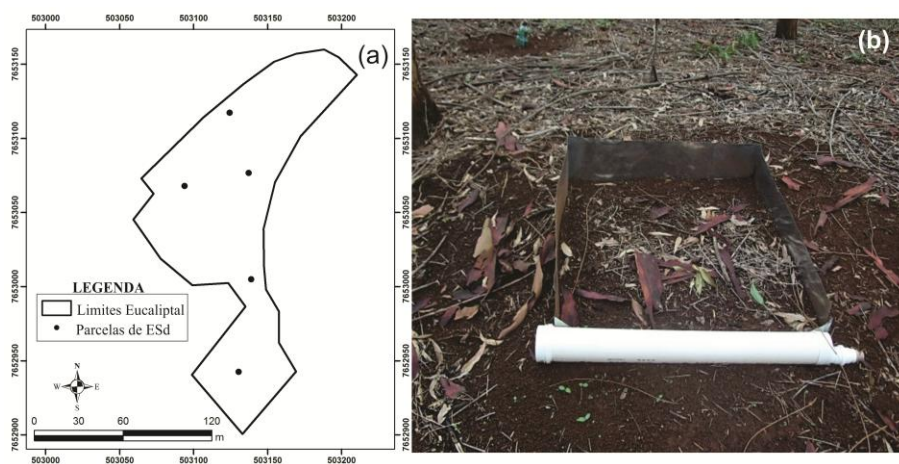


Figura 1 Distribuição espacial das parcelas de monitoramento do ESd (a) e detalhes da parcela (b)

As parcelas foram instaladas em julho de 2013 e deixadas em pousio por 1 ano permitindo assim a estabilização do solo após a movimentação durante o processo de instalação. O monitoramento do ESd ocorreu no período de 01/07/2014 até 31/10/2015, totalizando 16 meses de observação.

Na Tabela 1 são apresentadas as classes de solo, volume total de poros na camada de 0 – 10 cm, condutividade hidráulica e declividade de cada parcela.

Tabela 1 Características físico-hídricas do solo e topográficas para as parcelas de monitoramento do ESd

Parcelas	Classe de solo	VTP (%)	K_{SAT} (m.dia ⁻¹)	Declividade (%)
PS02	LVA	51,4	0,37	13,5
PS03	LVA	50,7	0,50	3,9
PS04	LVA	52,9	0,21	11,3
PS05	LVA	52,7	0,58	9,2
PS06	LV	55,9	0,55	10,7

A lâmina escoada superficialmente foi obtida da média das 5 parcelas conforme a Equação 1.

$$ESd = \frac{\sum_1^5 \left(\frac{V}{A} \right)}{5} \quad (1)$$

Em que *ESd* representa o escoamento superficial direto (mm), *V* o volume de água coletado (L) e *A* a área da parcela (m²).

Foi calculado o índice Coeficiente de escoamento superficial (*C* - %) para todos os eventos chuvosos registrados e obtida a média destes para os períodos secos, chuvosos e total (Equação 2).

$$C = \left(\frac{ESd}{PG} \right) \times 100 \quad (2)$$

É proposto aqui uma nova consideração sobre este índice onde o ESd é obtido como função da lâmina real de água que atinge o solo (LAS) ao invés da precipitação externa (PG), conforme Equação 3.

$$Cr = \left(\frac{ESd}{LAS} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que Cr representa o coeficiente de escoamento superficial real, em %.

Este novo índice busca apresentar uma informação mais próxima da realidade de ambientes florestais onde o processo de interceptação afeta drasticamente a lâmina de água que de fato é disponibilizada para o solo. A lâmina real de água que atinge o solo (LAS) corresponde ao somatório da precipitação interna (Pi) com a lâmina escoada pelos troncos dos indivíduos (EsT).

Também foi realizada uma classificação do ESd gerado em função de classes de chuva (Tabela 2) e seus respectivos índices, em termos médios, além de ajustes de regressões relacionando o ESd à intensidade de precipitação, LAS e Precipitação externa.

Tabela 2 Classes de chuva aplicadas na análise do ESd

Classe de chuva (mm)
3,0 – 5,0
5,0 – 10,0
10,0 – 20,0
20,0 – 30,0
30,0 – 40,0
> 40,0

2.2 Monitoramento da umidade do solo

Para o monitoramento da umidade do solo foi utilizada uma sonda *Profile Probe* da marca Decagon Devices®, modelo *PR2*, permitindo estimar a umidade do solo tanto em porcentagem quanto com base em volume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Foram instalados 25 tubos de acesso da sonda buscando representar a diversidade de classes de solo, declividade e os manejos empregados na área de estudo.

A sonda fornece dados de umidade representativos para cinco camadas de solo no perfil até um metro de profundidade sendo as camadas: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm.

Na Figura 2 é apresentada a distribuição espacial dos pontos de monitoramento da umidade do solo no povoamento de eucalipto.

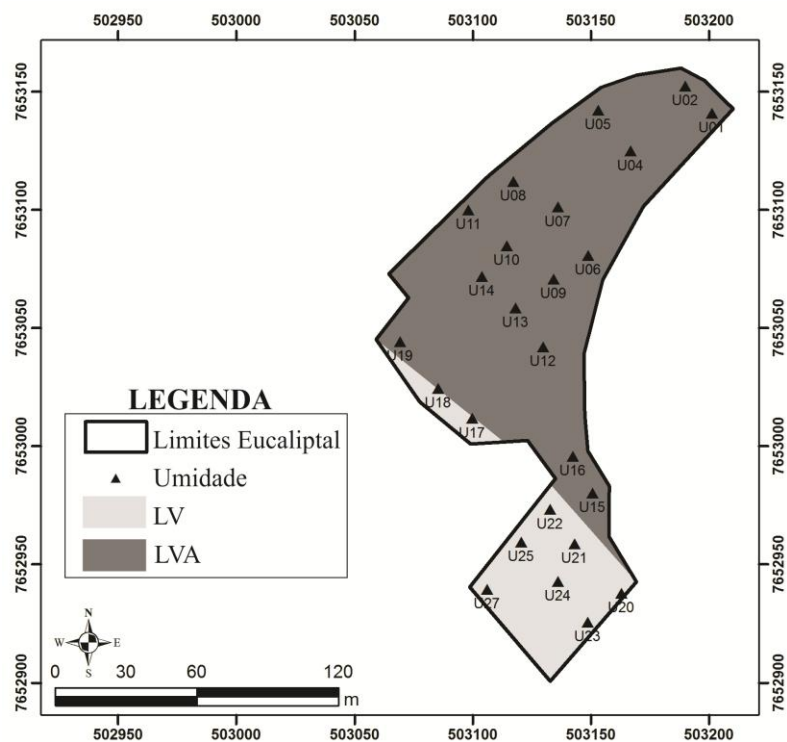


Figura 2 Distribuição espacial dos pontos de monitoramento da umidade do solo no povoamento de eucalipto

Foram realizadas 83 leituras de umidade do solo no período entre 01/11/2013 e 31/10/2015, com intervalo médio de sete dias no ano hidrológico 2013/2014 e de 15 dias para o ano hidrológico de 2014/2015. Na ocorrência de alguns eventos pluviométricos de magnitude relevante foram realizadas leituras adicionais visando captar uma variação mais detalhada do armazenamento no tempo. Com base nessas leituras, foi realizada uma análise do comportamento médio da umidade do solo, em porcentagem, por camada para o período estudado.

2.3 Estudo da estabilidade temporal da umidade e variação do armazenamento no perfil do solo

Para análise da estabilidade temporal da umidade do solo foi aplicada a técnica da diferença relativa proposta por Vachaud et al. (1985). Esta técnica permite caracterizar a persistência temporal do padrão de umidade do solo e identificar pontos de monitoramento da umidade do solo estatisticamente representativos da área de estudo. A diferença relativa (δ_{ij}) é expressa pela Equação 4.

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \quad (4)$$

Em que θ_{ij} corresponde ao valor da umidade do solo na posição i no tempo j e $\bar{\theta}_j$ representa a umidade média de todas as posições no tempo j .

Para cada posição i foi calculada a média temporal da diferença relativa ($\bar{\delta}_i$) e o seu desvio padrão ($\sigma(\bar{\delta}_i)$) conforme as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma(\bar{\delta}_i) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad (6)$$

Em que m representa o número de leituras, neste caso 83.

Na sequência, os dados da diferença relativa média são plotados em ordem crescente, onde o ponto que mais se aproximar de zero, será o ponto representativo da área estudada apresentando maior estabilidade temporal. Brocca et al. (2012) indicam que valores com diferença relativa próximos a zero e baixo desvio padrão devem ser considerados o ponto representativo.

O estudo da estabilidade temporal foi aplicado para as cinco camadas analisadas levando-se em consideração todo o período estudado e a subdivisão entre períodos secos e chuvosos dos anos hidrológicos.

Buscou-se ainda identificar três pontos representativos da umidade do solo para cada camada estudada sendo estes pontos expressivos dos manejos empregados. Por problemas com a sonda na camada de 40-60 cm, tendo sido possível realizar apenas algumas leituras no início do monitoramento, admitiu-se que a umidade observada na camada de 30-40 cm seria representativa da camada de 30-50 cm e a umidade observada na camada de 60-100 cm seria representativa da camada de 50-100 cm. Assim, a análise da variação do armazenamento de água no perfil do solo (ΔArm) para o povoamento de eucalipto, foi calculada conforme a Equação 7.

$$\Delta Arm = Arm_i - Arm_{i-1} \quad (7)$$

Em que Arm_i representa o armazenamento de água no solo em um dado tempo i e Arm_{i-1} representa o armazenamento de água no solo no tempo anterior, todos em mm.

$$Arm_{(t)} = \theta \times h \quad (8)$$

Onde $Arm_{(t)}$ representa o armazenamento de água no solo em um dado instante, θ corresponde a umidade volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$) e h representa a profundidade da camada de solo.

O armazenamento calculado para cada camada foi acumulado para representar o perfil do solo e empregado no cálculo da variação de armazenamento de água no solo no período estudado.

Os dados de variação de armazenamento dos 25 pontos estudados foram espacializados aplicando o interpolador Inverso Quadrático da Distância (IQD) com o uso do SIG ArcGIS em sua versão 10.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor avaliação das informações esta seção foi subdividida em quatro tópicos: análise do escoamento superficial direto, caracterização da umidade do solo, estudo da estabilidade temporal da umidade do solo e avaliação da variação do armazenamento de água no perfil do solo.

3.1 Comportamento do escoamento superficial direto

No período de observação do escoamento superficial direto (ESd) foi registrada uma lâmina total de precipitação externa (PG) de 1424,1 mm, enquanto que a lâmina escoada pela superfície foi de 163,6 mm. A lâmina de água que realmente atingiu o solo (LAS) foi de 1067,2 mm. No Gráfico 1 é apresentada a distribuição temporal do escoamento superficial direto.

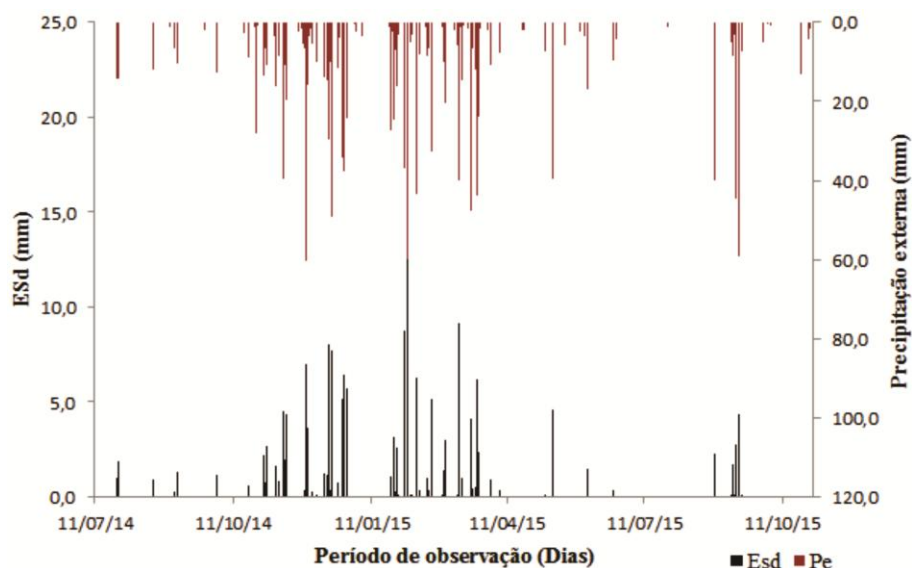


Gráfico 1 Distribuição temporal do escoamento superficial direto observado na área

No período foram observados 106 dias com chuva, dos quais 101 apresentaram registro no interior do povoamento, e 71 dias geraram algum escoamento superficial direto. A menor lâmina de ESd observada foi de 0,1 mm associada a um evento externo de 5,1 mm e com LAS de 3,0 mm. A maior lâmina de ESd observada foi de 13,1 mm associada a 60,1 mm de precipitação externa e LAS de 45,6 mm.

O coeficiente de escoamento superficial (C), em relação aos totais de precipitação externa, foi de 11,5 %. Levando-se em consideração a média por evento de PG, o C foi de 6,4 %, enquanto que calculando o índice apenas para os eventos que provocaram ESd, o fator C apresentou uma média de 9,4 %.

Cândido et al. (2014), estudando perdas de solo e água em ambientes florestais encontraram valores de C para eucalipto variando entre 0,1 e 6,4 % em talhões com declividade máxima de 5 % para Latossolos Vermelhos. Silva et al. (2011) encontraram valores de C entre 2,6 e 3,8 % para Latossolos Vermelho-Amarelos ocupados com eucalipto na bacia do Rio Doce, Minas Gerais. Os coeficientes de escoamento superficial destes estudos foram calculados com base nos dados totais de precipitação e com declividade média do terreno entre 2 e 5 %.

Os valores mais altos de C encontrados neste estudo, em parte, podem ser explicados pela declividade média da área (8,1 %) que está acima da maior parte das áreas cultivadas com eucalipto no Brasil, que é de 5 %.

Destacam-se ainda as diferenças entre as abordagens para cálculo deste coeficiente. Considerar apenas os totais de PG e ESd induz a uma superestimativa dos valores de C provocada, indiretamente, pela exclusão dos efeitos da intensidade da precipitação e umidade antecedente no ESd. A abordagem que se apresenta como mais adequada é o emprego da média de C por evento de precipitação que traz indiretamente os efeitos das propriedades físicas do evento e da condição de umidade antecedente no ESd.

A nova abordagem proposta neste estudo para cálculo do coeficiente C em ambientes florestais (Cr) empregando o valor da lâmina real que atinge o solo (LAS), composta pelo somatório da precipitação interna com o escoamento pelo tronco, busca representar com maior precisão os efeitos da cobertura na produção do escoamento superficial direto.

Adotando-se os critérios apresentados para o coeficiente de escoamento superficial real (Cr), em relação aos totais observados, este foi de 15,4 %. Levando-se em consideração a média por evento de LAS, o Cr foi de 8,4 %, enquanto que calculando o índice apenas para os eventos que provocaram ESd, o Cr foi igual a 12,5 %. Observa-se um acréscimo de 3,9 %, 2,0 % e 3,1 %, respectivamente, para as abordagens analisadas.

Esta proposta de índice tem sua importância associada ao planejamento conservacionista do solo e no dimensionamento de obras hidráulicas em bacias hidrográficas com características de uso e ocupação com predominância de coberturas florestais onde a subestimativa do ESd poderá acarretar no comprometimento dos projetos desenvolvidos nestas áreas.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos coeficientes C e Cr, além das médias de Pe, LAS e ESd classificados segundo a lâmina real que atinge o solo para o eucaliptal.

Tabela 3 Valores médios de C e Cr em função da LAS para o eucaliptal

Classe de LAS	Nº. de Eventos	(mm)			(%)	
		PG	LAS	ESd	C	Cr
3,0 – 5,0	17	5,7	3,9	0,1	2,1	3,3
5,0 – 10,0	21	10,6	8,0	1,0	9,5	12,5
10,0 – 20,0	15	17,9	14,1	2,3	12,4	15,4
20,0 – 30,0	9	36,3	25,9	5,5	15,1	20,6
30,0 – 40,0	4	42,9	32,3	5,0	11,6	15,3
> 40,0	5	53,7	44,4	7,3	13,6	16,4
-	Média	18,5	13,9	2,3	12,5	9,4

Percebe-se que eventos com LAS inferiores a 5,0 mm tem como característica a pouca produção de ESD, enquanto que os eventos com LAS entre 20,0 e 30,0 mm produzem, aproximadamente, seis vezes mais ESD comparados a menor classe.

3.2 Caracterização da umidade do solo

Em termos médios, a umidade do solo aumenta na medida em que se avança em profundidade no perfil. A camada superficial representada pela profundidade de 0 a 10 cm apresenta a menor umidade média, em termos percentuais, entre camadas e a maior amplitude observada na série histórica, além de alta variabilidade, segundo o coeficiente de variação (35,8 %).

Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas descritivas referentes à umidade média do solo para todas as camadas avaliadas no eucalipto. Já no Gráfico 2 é apresentada a distribuição empírica dos dados de umidade por camada.

Tabela 4 Estatísticas descritivas da umidade média do solo para o povoamento de eucalipto

Parâmetro	Camadas (cm)				
	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	60 - 100
Média (%)	15,5	22,4	26,6	27,8	28,6
Máxima (%)	32,0	36,5	37,5	39,4	41,6
Mínima (%)	6,4	15,0	20,6	23,3	24,0
Desvio Padrão (%)	5,6	5,0	4,1	3,5	3,3
CV (%)	35,8	22,2	15,3	12,7	17,5

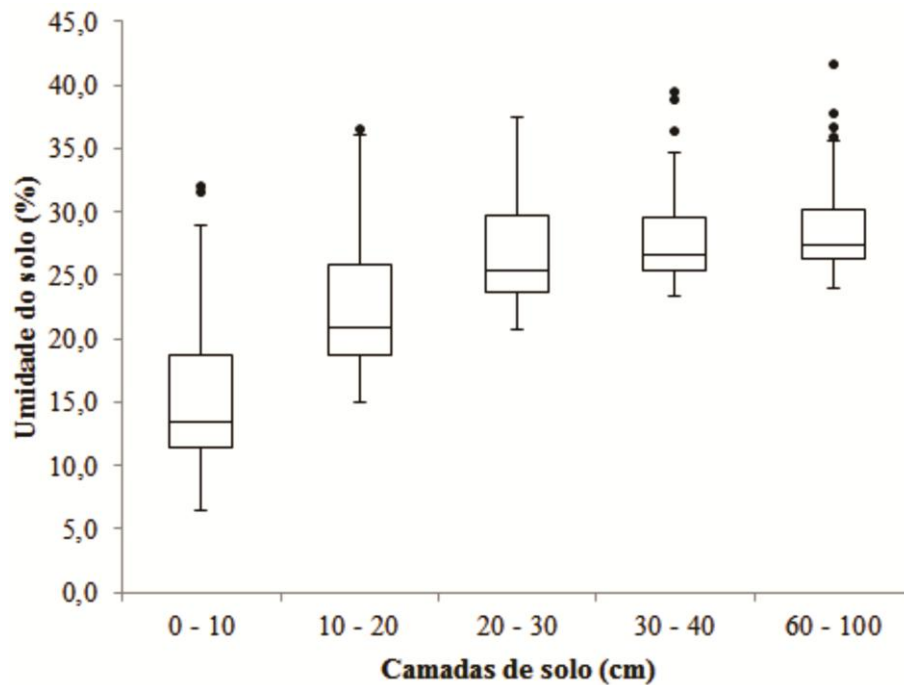


Gráfico 2 Distribuição empírica dos dados de umidade do solo por camada

Percebe-se que a dispersão no perfil vai aumentando da camada mais profunda (60-100 cm) para a camada mais superficial (0-10 cm). O desvio padrão corrobora com esta afirmativa seguindo o mesmo comportamento e apresentando maior desvio na camada superficial e menor na camada mais profunda do perfil do solo.

No Gráfico 3 são apresentadas as séries históricas da umidade média do solo para todas as camadas monitoradas no povoamento de eucalipto e a série de eventos chuvosos observados nos dias de monitoramento.

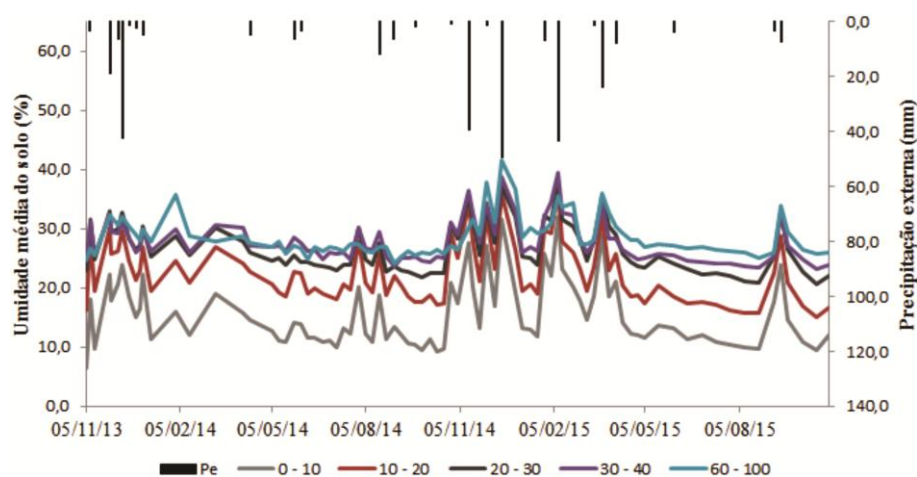


Gráfico 3 Séries históricas da umidade média do solo por camada no povoamento de eucalipto

Com base no Gráfico 3 percebe-se a grande flutuação dos dados médios de umidade do solo no período estudado para as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Estas camadas apresentam como característica uma rápida resposta aos eventos chuvosos, as quais são as responsáveis por atender a demanda evaporativa do solo e são as mais exploradas pelo sistema radicular dos indivíduos contribuindo para um decaimento de forma mais acentuada da umidade. Gao e Shao (2012) afirmam que os processos de ascensão capilar, percolação e infiltração também atuam significativamente na variabilidade temporal da umidade no perfil do solo.

Hu et al. (2010) também observaram comportamento similar ao encontrado estudando a variabilidade da umidade do solo em uma bacia hidrográfica na China e Trevisan et al. (2012) em uma microbacia com eucalipto na Serra do Mar.

3.3 Estabilidade temporal da umidade do solo em Latossolo ocupado por eucalipto

Nos Gráficos 4a, 4b, 4c, 5a e 5b são apresentadas as diferenças relativas médias e respectivos desvios padrões para a umidade do solo no eucaliptal nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm, respectivamente.

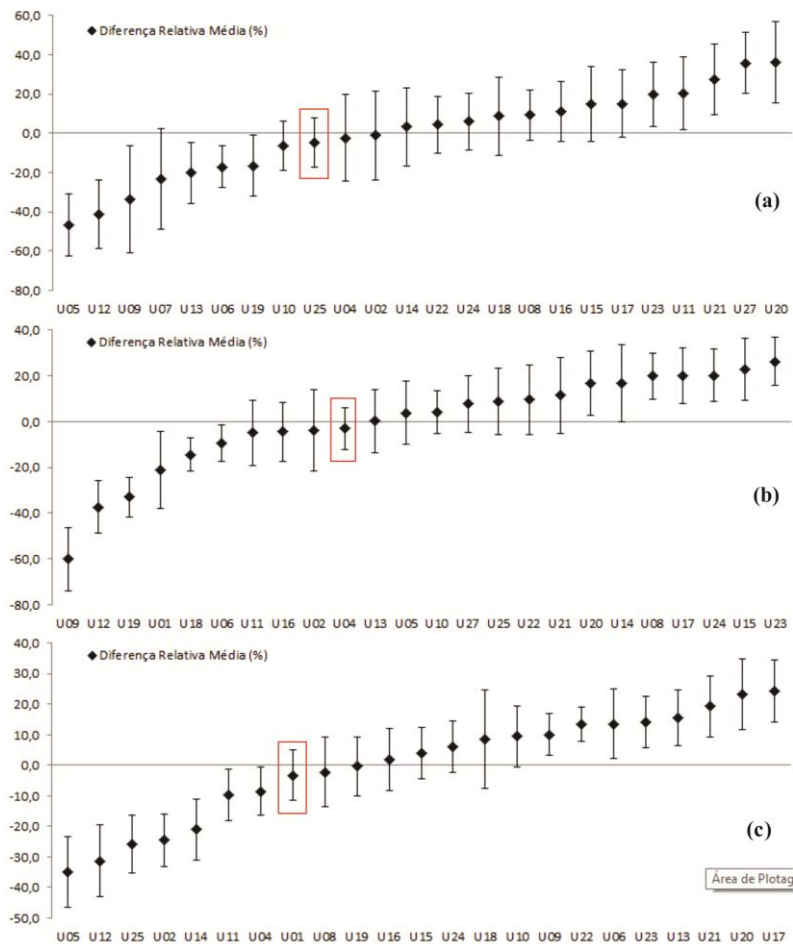


Gráfico 4 Diferença média relativa e desvio padrão da umidade do solo para as camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-30 cm (c)

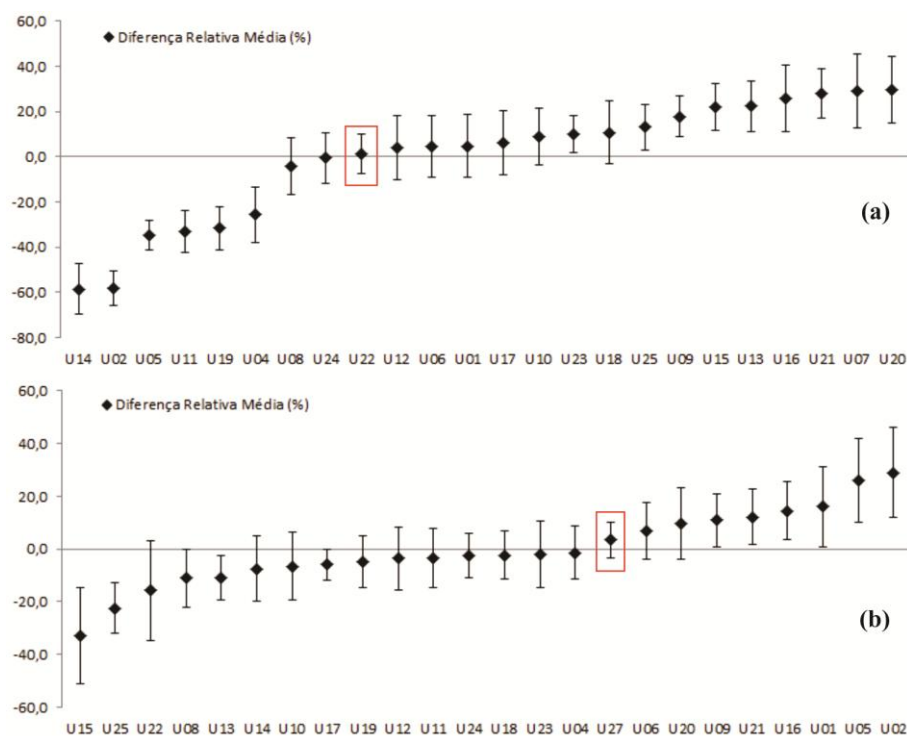


Gráfico 5 Diferença média relativa e desvio padrão da umidade do solo para as camadas de 30-40 cm (a) e 60-100 cm (b)

Percebe-se elevada amplitude entre os dados de Diferença Relativa Média (DRM) para todas as camadas estudadas. Estas amplitudes foram de 83,1 %, 86,4 %, 59,4 %, 88,5 % e 61,8 % para as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm, respectivamente. Gao e Shao (2012) encontraram amplitudes entre 93,2 % e 172,3 % estudando os padrões temporais da umidade do solo até três metros de profundidade no perfil do solo com cobertura predominante de pastagem.

Brocca et al. (2012) sugeriram utilizar como parâmetros de seleção do ponto representativo da umidade média do solo na área aquele que apresentar uma DRM, em módulo, inferior a 5 % e o menor desvio padrão. Seguindo estes critérios, os pontos U25, U04, U01, U22 E U27 são os indicados como

representativos do padrão de umidade do solo para as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm, respectivamente, para o povoamento de eucalipto estudado. Os pontos U05 e U20 foram os que apresentaram menor e maior umidade média do solo ao longo do tempo, respectivamente, entre todas as camadas estudadas. O ponto U05 localiza-se no LVA com alta densidade do solo e baixa K_{SAT} e porosidade, enquanto que o U20 está sob o LV e apresenta-se bem estruturado.

Os desvios padrões médios foram de 17,5 %, 12,7 %, 9,7 %, 11,5 % e 11,7 % para as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm, respectivamente. Gao e Shao (2012) e Hu, Shao e Reichardt (2010) encontraram comportamento similar deste parâmetro estatístico estudando a estabilidade temporal da umidade do solo estratificando o perfil em camadas.

No Gráfico 6 são apresentados as correlações entre a série de umidade média nas camadas e o ponto indicado como representativo destas.

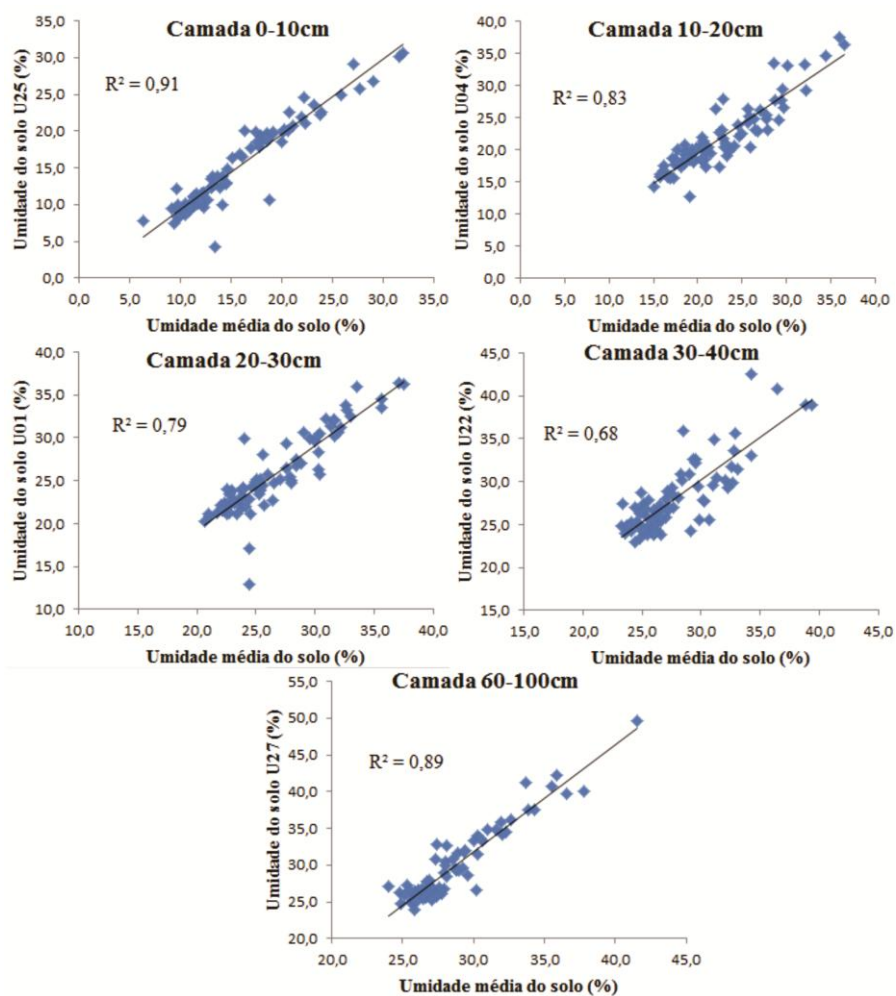


Gráfico 6 Correlação entre a umidade média do solo e os pontos representativos encontrados para cada camada de solo no eucaliptal

Constata-se de fato uma forte relação entre os pontos identificados como representativos e a umidade média do solo nas camadas analisadas. Observa-se também um decréscimo do desvio padrão médio da DRm à medida que aumenta a profundidade do solo até 30 cm voltando a crescer até 100 cm de profundidade.

Dos cinco pontos representativos do padrão de umidade do solo para as camadas estudadas, três estão localizados no Latossolo Vermelho e destes pontos dois representam as camadas mais profundas do perfil de solo analisado. Esta classe de solo apresenta-se melhor estruturada quando comparada ao Latossolo Vermelho-Amarelo, com menores densidades do solo e conseqüentemente maior volume total de poros nas três camadas estudadas.

Outra característica físico-hídrica determinante é a condutividade hidráulica do solo (K_{SAT}) que se apresenta maior no Latossolo Vermelho. Esta condição favorece a drenagem para camadas mais profundas permitindo a estas camadas, atingirem uma umidade de equilíbrio mais rapidamente.

Destaca-se também a presença observada em campo de camada de impedimento na profundidade de 20-30 cm do solo, com menores valores de K_{SAT} para toda a área. Esta condição favorece a uniformização da umidade do solo na área na camada superficial resultando em uma melhor condição para alcançar um padrão de estabilidade temporal.

Na Tabela 5 são apresentadas as diferenças médias relativas com respectivos desvios padrões dos pontos representativos do padrão de estabilidade temporal da umidade do solo para as cinco camadas estudadas e por espaçamento para o povoamento de eucalipto.

Tabela 5 Diferença Média Relativa da umidade do solo por espaçamento no povoamento de eucalipto

Espaçamento (m)	3 x 2		3 x 3		3 x 5	
	DRm (%)	DP (%)	DRm (%)	DP (%)	DRm (%)	DP (%)
0 – 10	3,2	19,7	-11,0	17,7	-4,9	12,6
10 – 20	-3,1	9,3	-4,4	13,0	15,5	13,6
20 – 30	-3,2	8,2	1,9	10,1	4,0	8,5
30 – 40	4,7	13,9	4,7	13,7	1,2	8,6
60 – 100	-4,8	9,7	-2,4	9,0	3,4	6,9

Segundo os critérios de seleção adotados neste trabalho, o espaçamento 3 x 3 metros na camada de 0-10 cm e o espaçamento 3 x 5 metros na camada 10-20 cm de profundidade do solo não apresentaram pontos estatisticamente representativos da umidade média do solo. Esta condição indica que a malha de pontos não foi suficiente para representar a variabilidade da umidade do solo nestas camadas, sendo necessária a realocação ou ampliação da grade de monitoramento nestas camadas e espaçamentos.

O menor desvio padrão médio observado no perfil foi encontrado no espaçamento 3 x 5 metros seguido do 3 x 3 e 3 x 2 metros. No espaçamento 3 x 5 metros, além de maior abertura do dossel o que facilita maior entrada de água no sistema, há também uma menor presença do sistema radicular fato este que favorece uma maior persistência dos padrões de umidade do solo, provavelmente, relacionado ao menor consumo hídrico das plantas.

Avaliando a estabilidade temporal da umidade no perfil do solo para os períodos chuvoso (Gráfico 7) e seco (Gráfico 8) no povoamento de eucalipto identifica-se um comportamento similar ao observado para a série completa. De maneira geral, o período seco apresenta menor variação da DRm em relação ao período chuvoso exceto a camada de 60-100 cm que apresentou relação inversa com período chuvoso com menor amplitude em relação ao seco.

Para o período chuvoso não foram identificados pontos representativos da umidade média do solo no povoamento de eucalipto para as profundidades de 0-10 cm, 20-30 cm e 30-40 cm no espaçamento 3 x 3 metros. Já para o período seco, somente a camada de 0-10 cm que não apresentou ponto representativo da umidade do solo no espaçamento 3 x 3.

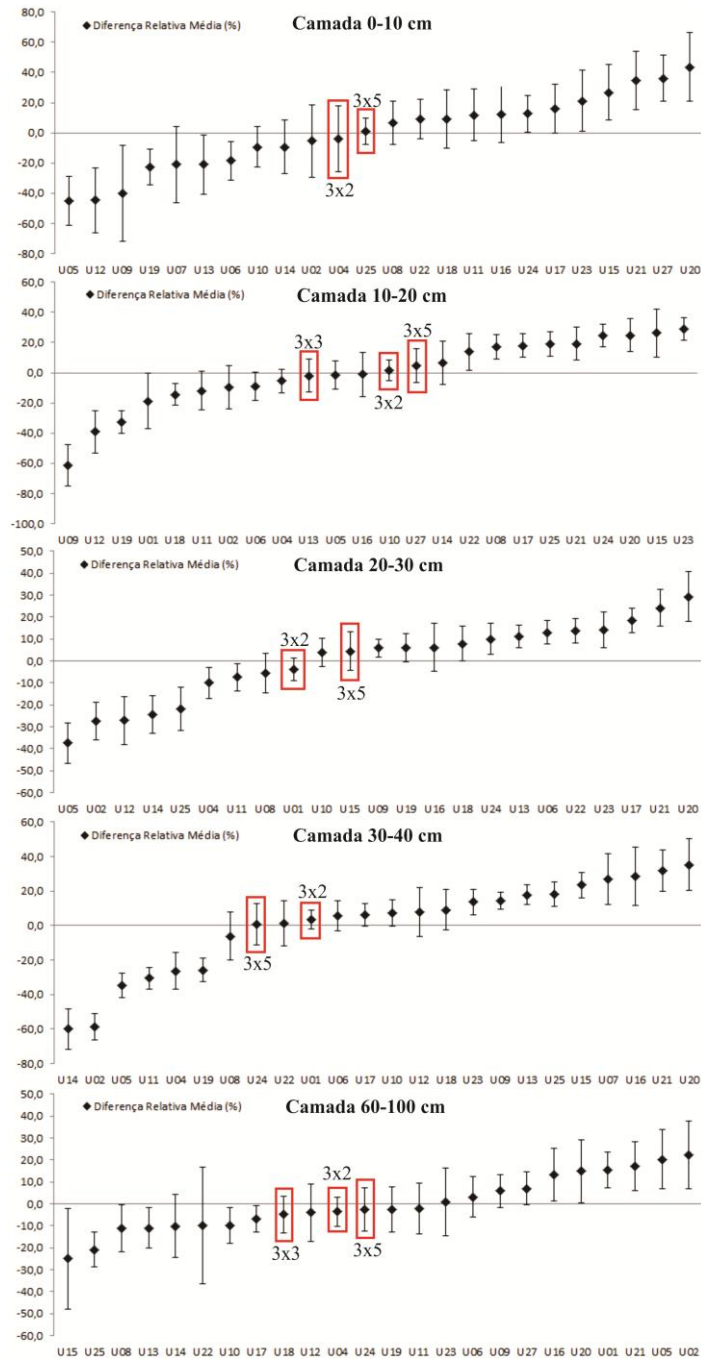


Gráfico 7 DRm da unidade do solo para o período chuvoso em um povoamento de eucalipto

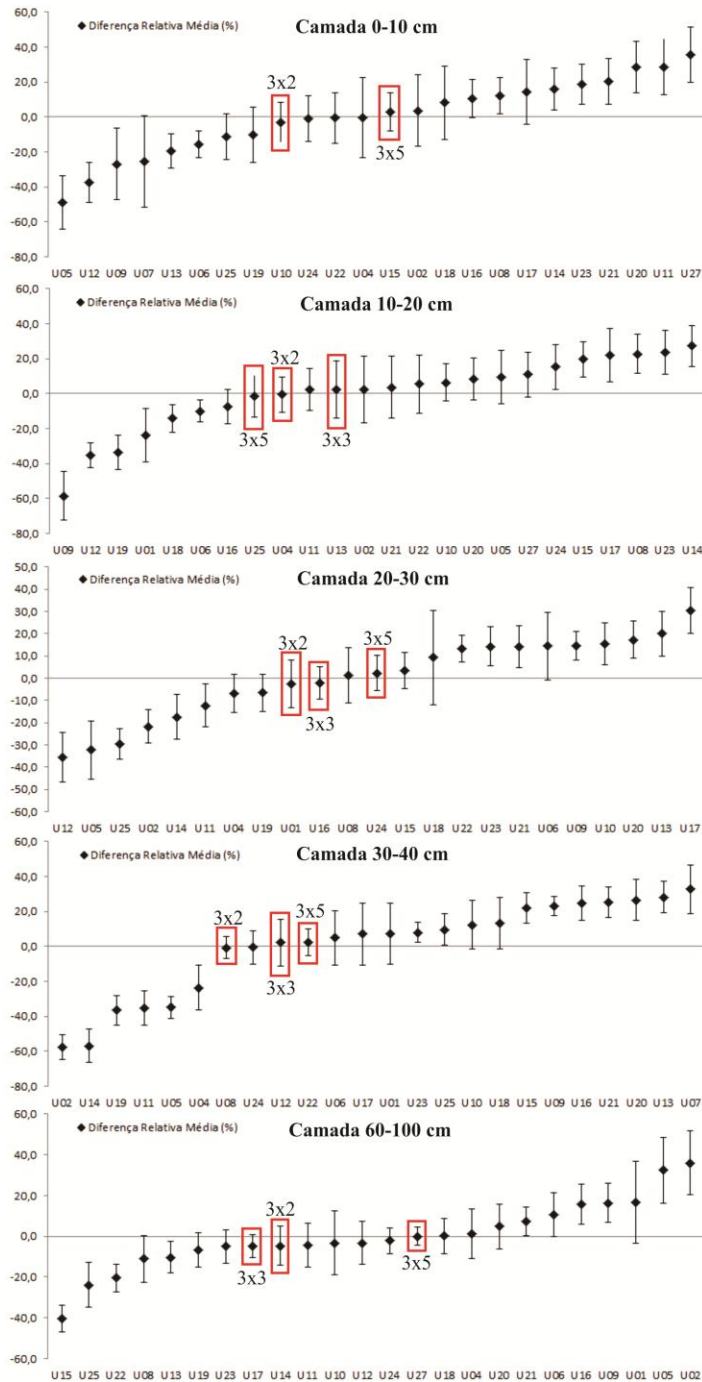


Gráfico 8 DRm da umidade do solo para o período seco em um povoamento de eucalipto

3.4 Variação de armazenamento da água no solo

Na Tabela 6 são apresentadas as variações médias de armazenamento de água no solo, por camada, para os períodos secos e chuvosos durante o monitoramento no povoamento de eucalipto.

Tabela 6 Variação do armazenamento de água por camada de solo no povoamento de eucalipto

Período	Camadas (cm)				
	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	50 - 100
Chuvoso 13/14	8,5	6,5	3,0	5,0	11,5
Seco13/14	8,3	8,8	6,2	7,0	0,8
Chuvoso 14/15	-5,5	-6,5	-4,6	-10,5	7,3
Seco 14/15	0,4	-0,7	-1,3	-2,6	-4,6
Total (mm)	11,4	8,1	3,4	-1,1	15,0

Observa-se uma maior retenção de água no perfil do solo no ano hidrológico 2013/2014 comparado ao ano 2014/2015 apresentando armazenamento propriamente dito enquanto que no ano seguinte há redução do volume armazenado em todas as camadas.

Avaliando a série histórica completa apenas a camada de 30 a 50 cm de profundidade apresentou redução no volume armazenado no final do estudo em relação ao início do monitoramento.

O ano hidrológico 2013/2014 apresentou regime pluvial 39 % abaixo da média histórica com distribuição irregular dos eventos chuvosos no tempo. Esta condição associadas ao aumento das temperaturas máximas e mínimas observadas no período afetam o comportamento fisiológico dos indivíduos reduzindo sua atividade fotossintética e consequente consumo hídrico provocado pelo aumento da dificuldade de extração da água no solo.

Na Figura 3 é apresentada a variação espacial do armazenamento de água no solo em todo o perfil estudado para o povoamento de eucalipto.

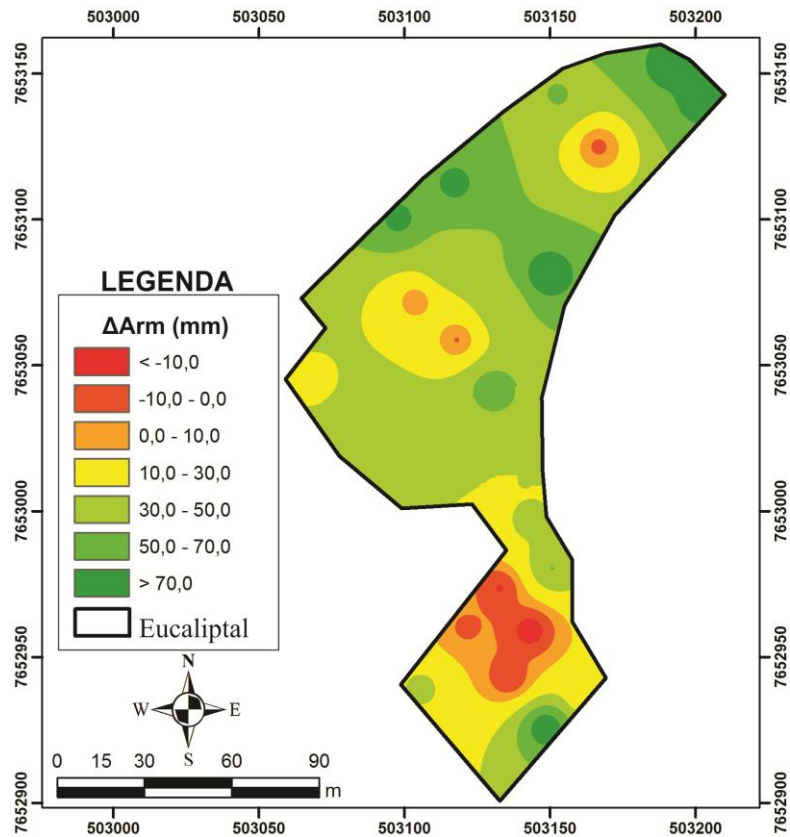


Figura 3 Distribuição espacial da variação de armazenamento de água no perfil do solo no povoamento de eucalipto

O armazenamento de água no solo tende a reduzir no sentido Nordeste/Sudoeste no povoamento. O espaçamento 3 x 2 metros apresenta um armazenamento médio de 42,7 mm no perfil seguindo pelo 3 x 3 metros com 41,5 mm armazenados e o 3 x 5 metros com 18,8 mm de armazenamento no período estudado. O melhor fechamento do dossel e um maior adensamento do sistema radicular favorecem uma maior retenção de água no perfil do solo além da condutividade hidráulica mais lenta do solo em que se encontram os espaçamentos 3 x 2 e 3 x 3 metros.

4 CONCLUSÕES

Foi observada uma lâmina de 163,1 mm de escoamento superficial direto (ESd). O coeficiente de escoamento superficial (C) médio por evento de precipitação externa (Pe) foi de 6,4 % em relação à lâmina precipitada.

Neste trabalho foi proposto um novo índice fundamentado na lâmina real que atinge o solo (LAS) composto pela precipitação interna e escoamento pelo tronco. O índice Cr, calculado com base nestas informações, foi de 8,4 %. Recomenda-se o emprego deste índice no planejamento e dimensionamento de obras hidráulicas em bacias hidrográficas com ocupação predominante de povoamentos florestais.

A umidade média do solo ao longo do período observado apresentou alta variabilidade principalmente na camada superficial de 0 a 10 cm de profundidade. A umidade do solo tende a ficar mais homogênea a partir dos 30 cm até 1 metro de profundidade.

Analisando o padrão de estabilidade temporal da umidade do solo no povoamento de eucalipto os pontos U25, U04, U01, U22 E U27 foram os indicados como representativos do padrão de umidade do solo para as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 60-100 cm, respectivamente. O período seco apresenta uma maior estabilidade temporal da umidade do solo no perfil quando comparado ao período chuvoso com menor variação da diferença média relativa e respectivo desvio padrão.

A variação do armazenamento de água no perfil do solo foi maior no ano hidrológico 2014/2015 comparado ao 2013/2014. O armazenamento de água no solo tende a reduzir no sentido Nordeste/Sudoeste no povoamento tendo o espaçamento 3 x 2 metros o maior armazenamento médio (42,7 mm) e o 3 x 5 metros com 18,8 mm de armazenamento no período estudado no eucaliptal.

REFERÊNCIAS

ALBERGEL, C.; CALVET, J. C.; DE ROSNAY, P.; BALSAMO, G.; WAGNER, W.; HASENAUER, S.; NAEIMI, V.; MARTIN, E.; BAZILE, E.; BOUYSSSEL, F.; MAHFOUF, J. F. Cross-evaluation of modeled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in Southwestern France. **Hydrology and Earth System Science**, v. 14, p. 2177-2191, 2010.

BOLTEN, J. D.; CROW, W. T.; JACKSON, T. J.; ZHAN, X., REYNOLDS, C. A. Evaluating the utility of remotely-sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 57-66, 2010.

BROCCA, L.; TULLO, T.; MELONE, F.; MORAMARCO, T.; MORBIDELLI, R. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. **Journal of Hydrology**, London, v. 422-423, p. 63-75, 2012.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BATISTA, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do Rio Paraná, no leste de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1565-1575, 2014.

ENTIN, J. K.; ROBOCK, A.; VINNIKOV, K. Y.; HOLLINGER, S. E.; LIU, S.; NAMKAI, A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. 9, p. 11865-11877, 2000.

FAMIGLIETTI, J. S.; RYU, D.; BERG, A. A.; RODELL, M.; JACKSON, T. J. Field observations of soil moisture variability across scales. **Water Resources Research**, v. 44, n. 1, p. 1-16, 2008.

GAO, L.; SHAO, M. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. **Catena**, Schaafein, v. 95, p. 24-32, 2012.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 155-164, 1999.

GUSWA, A. J. Canopy vs. Root: Production and destruction of variability in soil moisture and hydrologic fluxes. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 3, p. 1-13, 2012.

HU, W.; SHAO, M.; HAN, F.; REICHERDT, K.; TAN, J. Watershed scale temporal stability of soil water content. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 181-198, 2010.

HU, W.; SHAO, M.; REICHERDT, K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 762-773, 2010.

KOSTER, R. D.; MAHANAMA, S. P. P.; LIVNEH, B.; LETTENMAIER, D. P.; REICHLER, R. H. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. **Nature Geoscience**, London, v. 3, n. 9, p. 613-616, 2010.

PEREIRA, M. R. R.; KLAR, A. E.; SILVA, M. R.; SOUZA, R. A.; FONSECA, N. R. Comportamento fisiológico e morfológico de clones de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes níveis de água no solo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 518-531, 2006.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 765-776, 2011.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; GROppo, J. D.; SILVA, R. W. C.; MARTINELLI, L. A. Dinâmica da água em uma microbacia com cobertura florestal de eucalipto localizada na Serra do Mar no Vale do Paraíba do Sul.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 207-216, 2012.

TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BRAZIER, R. E. Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. **Hydrological Process**, West Sussex, v. 24, n. 4, p. 393-414, 2010.

VACHAUD, G. A.; SILANS, A. P.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M.; Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 4, p. 822-828, 1985.

VAN WESENBEECK, I. J.; KACHANOSKI, R. G. Spatial and temporal distribution of soil water in the tiled layer under a corn crop. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 52, n. 2, p. 363-368, 1988.

WESTERN, A. W.; GRAYSON, R. B.; BLOSCHL, G. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. **Earth and Planetary Sciences**, v. 30, p. 149-180, 2002.

CAPÍTULO 6 – BALANÇO HÍDRICO EM UMA FLORESTA PLANTADA DE *Eucalyptus*

RESUMO

O balanço hídrico em ambientes florestais representa uma análise quantitativa dos fluxos de água em áreas com predominância de cobertura florestal onde são avaliadas as entradas e saídas de água do sistema e como a cobertura afeta esta dinâmica. O objetivo neste capítulo foi a análise do balanço hídrico florestal (BHF) em um povoamento clonal de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Para realização do BHF foram observadas as variáveis precipitação interna (P_i), escoamento pelo tronco (EsT), escoamento superficial direto (ESd) e variação no armazenamento de água no perfil do solo (ΔArm). Estas variáveis foram utilizadas na estimativa da evapotranspiração real (ETr) que posteriormente foi decomposta em perdas por interceptação (IL), evaporação de água no solo (Es) e transpiração (Tr). O incremento de madeira em volume no povoamento entre 13/05/2014 e 31/10/2015 foi relacionado à Tr para análise do consumo hídrico por espaçamento estudado. A ETr estimada no período foi de 1631,3 mm, equivalente a 102,7 % da precipitação incidente (PG), indicando retirada de água no perfil do solo. A Es foi de 82,8 mm (5,2 % da PG). A Tr estimada para o povoamento foi de 1107,3 mm (69,7 % da PG), com média diária de 2,2 mm, máxima de 8,2 e mínima de 0,4 mm. Em média, o povoamento consumiu 20,3 mm para produzir 1 m³ de madeira. O espaçamento 3 x 2 metros mostrou-se mais eficiente com consumo de 14,4 mm.m⁻³, seguido do 3 x 3 metros (28,0 mm.m⁻³) e 3 x 5 metros (31,7 mm.m⁻³).

Palavras-chave: Evapotranspiração real. Transpiração. Consumo hídrico.

ABSTRACT

The water balance in forest environments is a quantitative analysis of water flows in areas with a predominance of forest cover where the system inputs and water outlets are evaluated and how coverage affects this dynamic. The aim of this chapter is the analysis of the forest water balance (BHF) in a clonal population of *Eucalyptus* in southern Minas Gerais. For realization of BHF were observed variables throughfall (Pi), stemflow (EsT), overland flow (ESd) and variation in water storage in the soil profile (ΔA_{rm}). These variables were used to estimate the real evapotranspiration (ETr) was subsequently decomposed in interception losses (IL), evaporation of water in the soil (Es) and real transpiration (Tr). The volume of wood increase in population between 05/13/2014 and 31/10/2015 has been linked to Tr for analysis of water consumption by studied spacing. ETr estimated for the period was 1631.3 mm, equivalent to 102.7% of gross precipitation (PG), indicating withdrawal of water in the soil profile. Es was 82,8mm (5.2% of PG). The Tr estimated for the stand was 1107.3 mm (69.7% of PG), a daily average of 2.2 mm, maximum 8.2 and minimum of 0.4 mm. On average, 20.3 mm stand consumed for producing 1 m³ of wood. The spacing 3 x 2 meters was more efficient with consumption of 14.4 mm.m⁻³, followed by 3 x 3 meters (28.0mm.m⁻³) and 3 x 5 meters (31.7mm.m⁻³).

Keywords: Real evapotranspiration. Transpiration. Water use.

1 INTRODUÇÃO

É fundamental a compreensão dos fenômenos e processos que atuam nas relações água-floresta e como o manejo florestal afeta estas relações. Para tanto, faz-se necessário a caracterização dos componentes do ciclo hidrológico tomando como ferramenta o balanço hídrico florestal.

O balanço hídrico em ambientes florestais representa uma análise quantitativa dos fluxos de água em áreas com predominância de cobertura florestal onde são avaliadas as entradas de água no sistema (precipitação incidente, ascensão capilar e fluxos laterais de água no solo), interações com a cobertura florestal (interceptação, armazenamento no dossel, escoamento pelo tronco e precipitação interna) e saídas de água no sistema (escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial, drenagem profunda, evaporação da água no solo, evaporação da água armazenada nas superfícies vegetais e transpiração).

Para Almeida, Ribeiro e Leite (2013), conhecer os processos de perda de água e os componentes que atuam de forma efetiva no balanço hídrico geram informações de grande importância para a realização de um manejo florestal adequado em microbacias com atividade silvicultural.

Facco et al. (2012) destacam que são raros os trabalhos que levam em consideração os efeitos da silvicultura sobre os recursos hídricos devido às dificuldades para quantificação dos mesmos. Desta maneira, a compreensão do uso da água pela cobertura vegetal e a análise de suas dependências escalares apresenta potencial para explicar uma parte significativa do balanço hídrico bem como sua variabilidade no tempo e espaço (THOMPSON et al., 2011).

Granier (1999) ressalta que existe uma ampla variedade de modelos de balanço hídrico que se diferenciam em função dos objetivos, quantidade de dados de entrada e complexidade, além da resolução espacial e temporal

desejada na análise. Para Lima e Zakia (2006) um desafio atual e persistente é o levantamento e incorporação de variáveis ambientais em modelos de gestão florestal, os quais são empregados, geralmente, na predição da produtividade do povoamento e potenciais limitações e/ou impactos no ambiente com consequências diretas nos recursos hídricos.

Dentre as espécies florestais utilizadas comercialmente, o gênero *Eucalyptus* tem destaque mundial em área plantada. Booth (2012) afirma que 10 % das plantações florestais do planeta são ocupadas com povoamentos de eucalipto, o que equivale a 20 milhões de hectares. Destes, aproximadamente, 6,9 milhões de hectares estão localizados no Brasil de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2014).

Almeida et al. (2007) afirmam que há, historicamente, controvérsias sobre os efeitos de povoamentos de eucalipto sobre os recursos hídricos em várias partes do mundo. Alguns estudos têm verificado os efeitos de povoamentos de eucalipto, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos, em relação aos recursos hídricos e componentes do ciclo hidrológico e como estas interações afetam o balanço hídrico (ALMEIDA; RIBEIRO; LEITE, 2013; CAVALCANTE; MENDES, 2012; FACCO et al., 2012; NIZINSKI; GALAT; GALAT-LUONG, 2011; FEIKEMA; MORRIS; CONNELL, 2010; CARNEIRO et al., 2008; HUBBARD et al., 2004; LANE et al., 2004; ALMEIDA; SOARES, 2003; CÂMARA; LIMA, 1999).

Dentre os componentes do balanço hídrico, os comumente utilizados como variável dependente nos modelos são: a variação de armazenamento de água no solo e a evapotranspiração real. Wilson et al. (2001) afirmam que a partir de uma amostragem espacial representativa da umidade do solo é possível obter estimativas da evapotranspiração em escala diária com boa qualidade.

A evapotranspiração sofre influência direta do déficit atmosférico de vapor d'água e do déficit hídrico do solo. Ohta et al. (2008) destacam a

importância da escala temporal na análise da evapotranspiração, pois as variações temporais do déficit atmosférico de vapor d'água ocorrem em um intervalo de tempo bem mais curto e de forma mais dinâmica quando comparado às variações de água no perfil do solo.

Dentre os componentes da evapotranspiração, a transpiração é o maior deles, porém, é o componente que apresenta maiores dificuldades para o monitoramento com precisão e altos custos associados a medições diretas de todos os parâmetros e variáveis vinculadas aos modelos mais usuais (DAVID et al., 1997).

Soares e Almeida (2001) relataram a eficiência do controle estomático de indivíduos de *Eucalyptus grandis* sobre a transpiração no período seco. Soares, Almeida e Penchel (1997) observaram que em situações onde não há limitação de água no solo o eucalipto pode transpirar até 8 mm por dia; em contrapartida, no período de estiagem a transpiração pode chegar a zero.

Diante do exposto, tomou-se como objetivo principal neste capítulo a análise do balanço hídrico em um povoamento clonal de *Eucalyptus* no sul de Minas Gerais. Como objetivos específicos buscou-se: (i) avaliar os efeitos do manejo florestal aplicado (três espaçamentos distintos) na partição dos componentes do balanço hídrico; (ii) estimar a evapotranspiração real para o povoamento; (iii) decompor a evapotranspiração real nos componentes evaporação do dossel e transpiração; e (iv) relacionar o consumo hídrico com a produtividade do povoamento no período analisado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A análise do balanço hídrico foi aplicada em um povoamento clonal de eucalipto localizado na unidade experimental do Laboratório de Estudo e Projetos em Manejo Florestal (LEMAF) no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA) conforme a Figura 1.

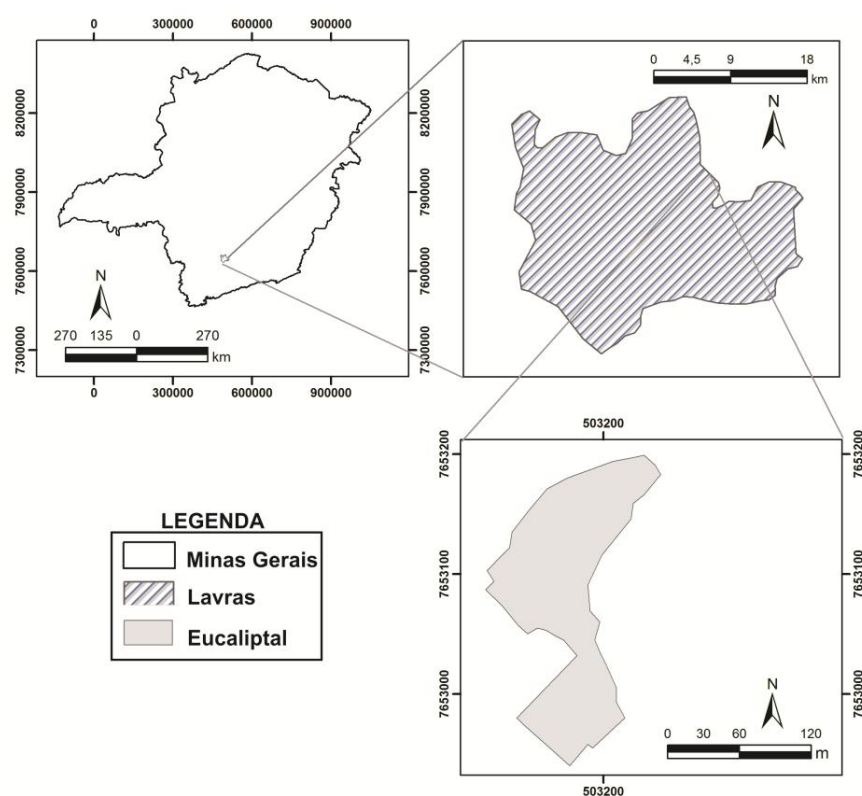


Figura 1 Localização geográfica da área experimental

Para realização do balanço hídrico foram mensuradas as variáveis precipitação externa (PG), precipitação interna (Pi), escoamento pelo tronco (EsT), escoamento superficial direto (ESd) e umidade do solo (θ) até um metro

de profundidade. Devido a diferenças existentes no período de início do monitoramento entre estas variáveis, o balanço hídrico foi realizado efetivamente para o período de 13/05/2014 a 31/10/2015.

Para o monitoramento da precipitação externa (PG) foi instalado um pluviômetro modelo “Ville de Paris” a 150 metros do experimento em área aberta, gramada e distante de obstáculos. As variáveis precipitação interna, escoamento pelo tronco e umidade no perfil do solo foram observadas em 16 pontos conforme expresso na Figura 2.

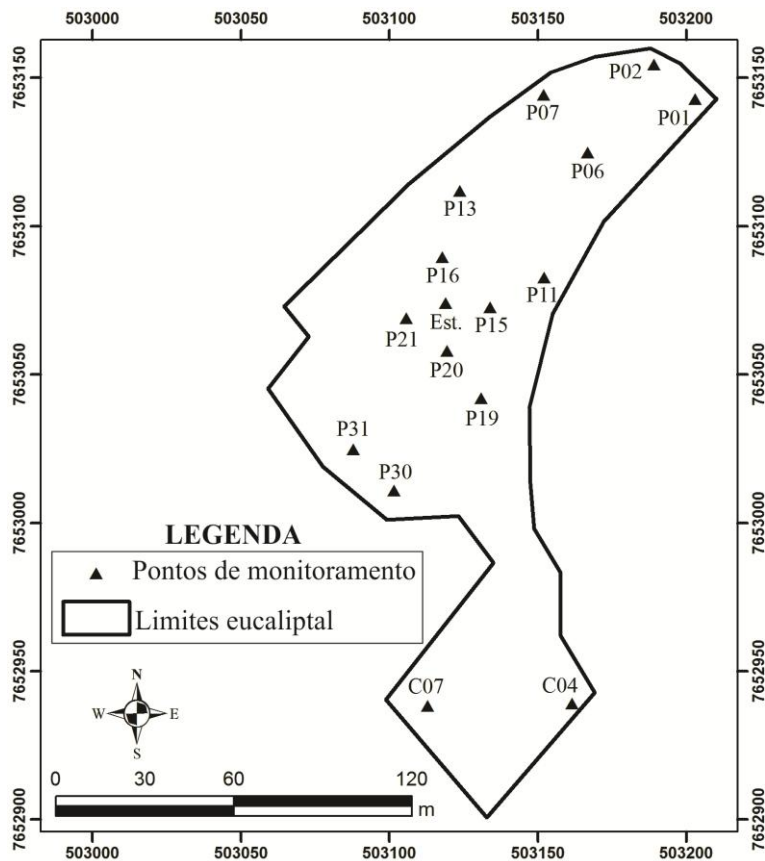


Figura 2 Pontos de monitoramento da P_i , EsT e θ no eucaliptal

O monitoramento da precipitação interna foi realizado com pluviômetros modelo “Ville de Paris” e calhas. O escoamento pelo tronco foi interceptado por coletores de polipropileno instalados nos indivíduos que direcionam o volume escoado para um recipiente de armazenamento. Para o monitoramento do escoamento superficial direto (ESd) foram instaladas 5 parcelas representativas das classes de solo e declividade presentes na área de estudo e calculada a média das leituras. Cada parcela possui área de 1 m² com calha coletora na parte inferior recebendo toda a drenagem da parcela e redirecionando-a para um recipiente fechado com capacidade de 60 litros.

As medições foram realizadas após os eventos chuvosos no período entre 8:00 e 12:00 horas da manhã. Em condição de chuva neste período a medição foi realizada no período da tarde com intervalo mínimo de duas horas após o fim do evento, a fim de garantir a drenagem efetiva do dossel.

O monitoramento da umidade do solo foi realizado com uma sonda *Profile Probe* da Decagon Devices®, modelo *PR2*. Foram instalados 16 tubos de acesso para sonda permitindo observar a umidade nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 e 50-100 cm no perfil do solo. As medições foram realizadas em intervalos de 15 dias entre si.

Os dados de precipitação interna, escoamento pelo tronco e escoamento superficial direto foram acumulados na escala diária para quinzenal a fim de uniformizar o intervalo de monitoramento com a umidade do solo. Na Figura 3 são apresentados os sensores utilizados no monitoramento hidrológico.



Figura 3 Monitoramento da precipitação interna (a), escoamento pelo tronco (b), escoamento superficial direto (c) e umidade do solo (d) na área experimental

A quantificação do balanço hídrico quinzenal no povoamento de eucalipto seguiu a Equação 1, tomando-se a evapotranspiração real como variável dependente:

$$ETr = LAS - ESd \pm \frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} \quad (1)$$

Em que ETr é a evapotranspiração real (mm), LAS corresponde à lâmina de água que atinge o solo, composto pelo somatório da precipitação interna e escoamento pelo tronco (mm), ESd é a parcela escoada superficialmente (mm) e

$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ representa a variação do armazenamento de água no solo, no perfil monitorado (mm).

Neste estudo, foi admitido que os processos de ascensão capilar e percolação além da profundidade de um metro no perfil de solo compensam-se no intervalo de tempo adotado.

A variação do armazenamento de água no perfil do solo foi obtida a partir da Equação 2. Já o armazenamento de água no perfil do solo para um tempo t foi determinado com base na Equação 3.

$$\Delta\theta = Arm_i - Arm_{i-1} \quad (2)$$

$$Arm = (\theta_{0-10} \times 100) + (\theta_{10-20} \times 100) + (\theta_{20-30} \times 100) + (\theta_{30-50} \times 200) + (\theta_{50-100} \times 500) \quad (3)$$

Em que Arm_i e Arm_{i-1} representam o armazenamento de água no perfil do solo em um dado tempo t e a leitura anterior, respectivamente, (mm), θ_{0-10} , θ_{10-20} , θ_{20-30} , θ_{30-50} e θ_{50-100} equivalem à leitura de umidade do solo com base em volume nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 e 50-100 cm, respectivamente.

A evapotranspiração real pode ser decomposta em três componentes: perdas por interceptação da precipitação pela cobertura vegetal (IL), evaporação da água do solo (Es) e transpiração (Tr). A transpiração do povoamento, em mm, foi estimada com base na Equação 4.

$$Tr = ETr - IL - Es \quad (4)$$

As perdas por interceptação foram determinadas descontando-se da precipitação externa as observações de precipitação interna e escoamento pelo tronco. Já a evaporação da água no solo foi estimada a partir da Equação 5.

$$Es = (\Delta t - \Delta c) \times 0,2 \quad (5)$$

Em que Δt representa o intervalo de dias entre leituras e Δc corresponde a quantidade de dias entre leituras com nebulosidade maior ou igual a 8 e chuva durante o dia. O valor médio de $0,2 \text{ mm.dia}^{-1}$ associado à evaporação da água do solo foi observado em estudos realizados por Soares e Almeida (2001), Almeida, Ribeiro e Leite (2013) e Almeida e Sands (2015) em povoamentos florestais híbridos de *Eucalyptus* e este valor admitido como representativo para este estudo.

A evapotranspiração potencial ou de referência (ETP, mm.dia^{-1}) para o período foi estimada com base na equação de Penman-Monteith (Equação 6).

$$ETP = \frac{\Delta \times Rn}{(\Delta + \gamma^*) \times \lambda} + \frac{\gamma \times 900 \times U_2 \times (e_s - e_a)}{(\Delta + \gamma^*) \times (T + 273)} \quad (6)$$

Em que Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor de água ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), Rn o saldo de radiação ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), γ a constante psicométrica ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), γ^* a constante psicométrica modificada ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), λ o calor latente vaporização ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), U_2 a velocidade do vento medida a 2 metros de altura ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_s a pressão de saturação de vapor de água (kPa), e_a a pressão parcial de vapor de água (kPa) e T a temperatura do ar (°C).

Com base nos dados de transpiração real e evapotranspiração potencial calculou-se a proporção da transpiração em função da evapotranspiração potencial (ITr).

Foram calculadas também as umidades médias para cada intervalo de tempo (θ_m), umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) para o perfil do solo, todos em $m^3 \cdot m^{-3}$, e aplicado o índice $S\theta$ conforme a Equação 7.

$$S\theta = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

Foram ajustadas relações entre os dados de ITr e $S\theta$ para o período de tempo estudado a fim de identificar a umidade média no perfil do solo a partir do qual o processo de transpiração é máximo.

Realizaram-se também correlações entre a lâmina transpirada no período estudado e o volume de madeira produzido pelo povoamento a fim de determinar a eficiência hídrica do plantio.

O volume de madeira de cada indivíduo (VM_i) foi obtido a partir da Equação 8.

$$VM_i = g_i \times \hat{H}T_i \times f \quad (8)$$

Em que VM corresponde ao volume de madeira de cada indivíduo (m^3), g_i representa a área seccional (m^2), $\hat{H}T$ refere-se a altura total de cada indivíduo (m) e f corresponde ao fator de forma (0,46).

OS volumes de cada indivíduo foram acumulados para representar o total de cada espaçamento analisado neste estudo bem como o total produzido em todo o povoamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção foi dividida em três partes: análise dos componentes do balanço hídrico florestal, estimativa da evapotranspiração real, e análise da transpiração real e consumo hídrico por um povoamento de eucalipto.

3.1 Análise dos componentes do balanço hídrico florestal

No período estudado foi observada uma lâmina total de precipitação externa (PG) de 1588,5 mm. Em termos médios, o povoamento de eucalipto apresentou uma lâmina de água que atinge o solo (LAS) de 1105,9 mm (69,6 % da PG), escoamento superficial direto (ESd) de 174,3 mm (11,5 % da PG), 484,4 mm (30,5 % da PG) de perdas por interceptação (IL) e uma variação de armazenamento no perfil do solo (Δ Arm) de -227,5 mm. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios destas variáveis para cada manejo empregado no povoamento.

Tabela 1 Variáveis de entrada do balanço hídrico por manejo florestal empregado no povoamento de eucalipto estudado

Espaçamento	3 x 2		3 x 3		3 x 5	
Unidade	mm	%	mm	%	mm	%
LAS	1033,9	65,0	1152,2	72,5	1254,7	78,9
IL	556,6	35,0	438,2	27,5	334,3	21,1
Δ Arm	-221,9	-	-289,9	-	-163,5	-

Percebe-se que quanto maior o espaçamento maior a quantidade de água que chega ao piso florestal e menores são as perdas por interceptação da precipitação pelo dossel. Observou-se também uma menor variação no armazenamento de água no perfil do solo para o maior espaçamento em comparação com os demais. Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis de

entrada do balanço hídrico em função do período chuvoso e da média dos dois períodos secos estudados.

Tabela 2 Variáveis de entrada do balanço hídrico para os períodos seco e chuvoso no povoamento de eucalipto estudado

Espaçamento	3 x 2		3 x 3		3 x 5	
Unidade	mm	%	mm	%	mm	%
Período Seco						
LAS	149,0	28,8	173,1	30,1	192,2	30,6
IL	97,2	34,9	72,1	32,9	53,1	31,8
Δ Arm	-105,3	-	-114,5	-	-84,3	-
Período Chuvoso						
LAS	735,9	71,2	805,9	69,9	870,4	69,4
IL	362,1	65,1	294,0	67,1	228,1	68,2
Δ Arm	-11,4	-	-60,9	-	5,1	-

O mesmo padrão observado para os totais se repetiu discretizando entre períodos seco e chuvoso. O período chuvoso concentra, em média, 70 % da água que chega ao solo e 67 % das perdas por interceptação da precipitação pelo dossel. Em relação ao armazenamento de água no perfil do solo o período chuvoso apresentou menor variação com déficits para os espaçamentos 3 x 2 e 3 x 3 metros e ligeira recarga no espaçamento 3 x 5 metros.

O déficit hídrico no solo do povoamento no período estudado expressa os efeitos dos baixos índices pluviométricos registrados e aumento das temperaturas médias, mínimas e máximas do ar no período comparadas às médias para o município de Lavras. A temperatura média anual do ar no período analisado ficou 2,9 °C acima da normal climatológica enquanto que as temperaturas máxima e mínima anual do ar ficaram ambas 1,1 °C acima da normal climatológica. Já os totais pluviais ficaram 30 % abaixo da média.

Os resultados percentuais da água que atinge o solo e perdas por interceptação encontrados neste estudo foram semelhantes aos obtidos em estudos com povoamentos clonais de eucalipto em várias partes do mundo

(GASPAROTO et al., 2014; TREVISAN et al., 2012; SATO; AVELAR; COELHO NETTO, 2011; SHINZATO et al., 2011; HU et al., 2010; RODRIGUES; COSTA, 2009; ALMEIDA; SOARES, 2003; VALENTE; DAVID; GASH, 1997).

A variação do armazenamento de água no solo acompanha a resposta da umidade média do perfil aos eventos chuvosos. Os períodos secos correspondem ao momento de maior extração de água do perfil sem reposição da mesma, provocando os déficits observados. No Gráfico 1 são apresentadas as séries da umidade média e da variação do armazenamento no perfil do solo no eucaliptal.

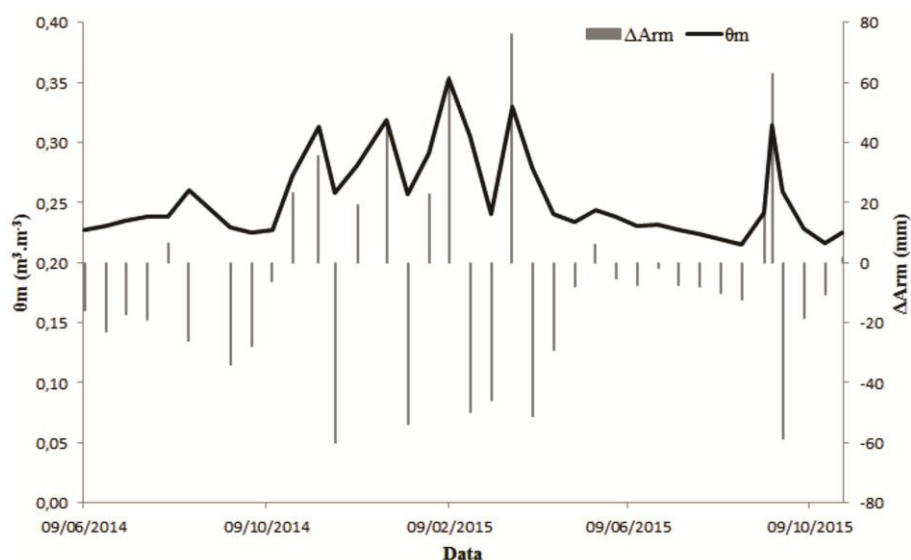


Gráfico 1 Séries de umidade média e variação do armazenamento no perfil do solo no povoamento de eucalipto

3.2 Estimativa da evapotranspiração real

A evapotranspiração real do povoamento (ETr) estimada pelo método do balanço hídrico foi de 1631,3 mm no período analisado, correspondendo a 102,7 % da precipitação registrada. A ETr representa a principal saída de água do

sistema composta pelas perdas por interceptação do dossel, evaporação do solo e transpiração. O resultado estimado indica que houve utilização das reservas hídricas do solo correspondendo ao déficit de armazenamento observado no mesmo. A ETr média diária foi de 3,3 mm com máxima de 8,5 mm.dia⁻¹ e mínima de 0,5 mm.dia⁻¹.

Avaliando o resultado do balanço hídrico por manejo, a Etr estimada foi menor no espaçamento 3 x 5 metros (1584,9 mm – 99,8 % da PG), seguida do 3 x 2 metros (1597,9 mm – 100,6 % da PG) e 3 x 3 metros (1692,8 mm – 106,6 % da PG). A média diária para os espaçamentos 3 x 2, 3 x 3 e 3 x 5 metros foram de 3,2 mm, 3,4 mm e 3,1 mm, respectivamente. No Gráfico 2 são apresentadas as séries de evapotranspiração real (ETr) e precipitação externa (PG) para o povoamento de eucalipto acumuladas em intervalos de 15 dias.

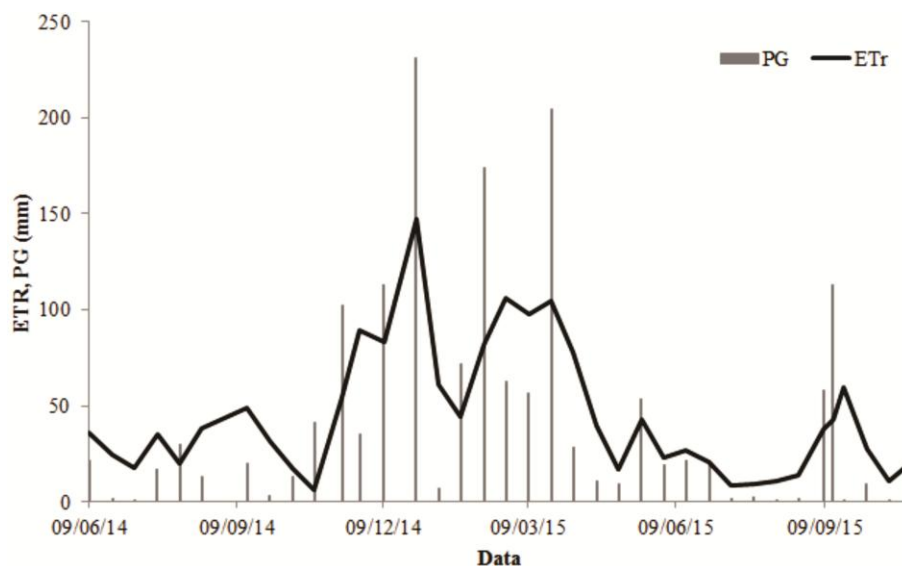


Gráfico 2 Séries de evapotranspiração real e precipitação para o povoamento de eucalipto

Almeida e Sands (2015) avaliaram o balanço hídrico em 11 sítios experimentais localizados no Brasil e Austrália para um ciclo completo de

produção de *Eucalyptus globulus* e para híbridos de *Eucalyptus grandis* sob condições climáticas distintas e observaram uma variação da evapotranspiração real entre 77,0 e 124,6 % da precipitação que ocorreu nos povoamentos. A média da proporção da ETr em relação a PG foi de 96,5 % sendo que quatro sítios apresentaram uma saída maior que a entrada no período observado.

Nizinski, Galat e Galat-Luong (2011) analisaram o balanço hídrico em povoamentos de *Eucalyptus saligna* no Congo discretizando o balanço hídrico em função dos períodos secos e chuvosos e encontraram proporções da ETr em relação a PG de 78,4 % para os períodos chuvosos e de 463,3 % para os períodos secos analisados, em termos médios.

No Gráfico 3 são apresentados os resultados da relação entre ETr e PG para os períodos seco e chuvoso em função dos espaçamentos e a média para o povoamento.

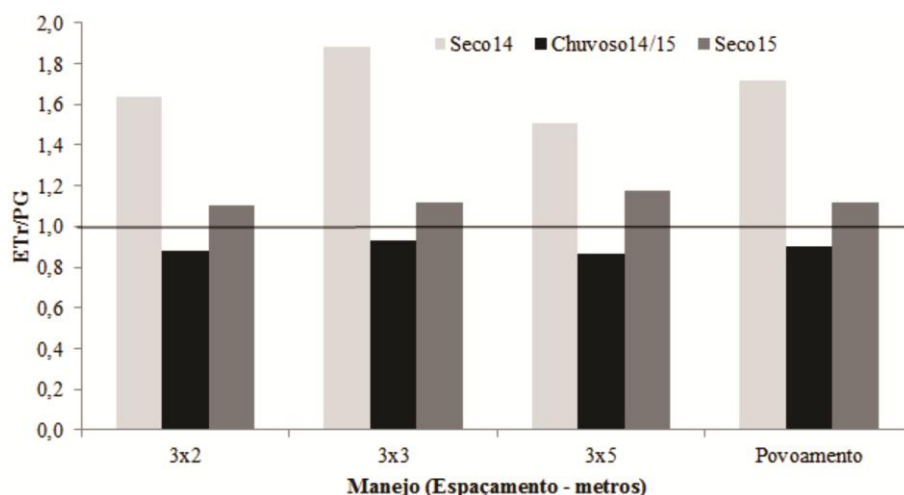


Gráfico 3 Relação entre ETr e PG para os períodos secos e chuvoso em função do manejo empregado no eucaliptal

Em termos totais, a relação ETr/PG apresentou variação entre 1,00 e 1,07 entre os espaçamentos e 1,03 para o povoamento. Valores abaixo da

unidade sinalizam um potencial armazenamento de água no solo e/ou recarga subterrânea, enquanto que valores superiores à unidade indicam retirada de água armazenada no perfil do solo.

Esta relação entre a ETr e a PG é um reflexo da demanda atmosférica e demonstra, de maneira simplista, o funcionamento do sistema solo-planta-atmosfera. No período estudado, houve uma maior entrada de energia no sistema, expresso pelo aumento das temperaturas e menor entrada de água via precipitação em relação à última Normal Climatológica (vide Capítulo 2). Esta condição associada a menor umidade relativa do ar no período, favoreceu a maior extração de água do solo para atender a demanda atmosférica.

Os períodos chuvoso 2014/2015 e seco de 2015 apresentaram resultados semelhantes entre o povoamento e as três densidades de plantio empregadas com recuperação da umidade do solo no período chuvoso e retirada no período seco. Os valores variaram entre 0,87 e 0,93 para o período chuvoso 14/15 e entre 1,11 e 1,18 para o período seco de 2015.

O período seco de 2014 apresentou maior variabilidade entre os manejos e o povoamento devido à baixa precipitação no período e os efeitos do espaçamento na estruturação dos dosséis. A relação ETr/PG variou entre 1,51 e 1,88, com o espaçamento 3 x 5 metros apresentando o menor valor e o 3 x 3 metros com o valor máximo. O período seco de 2014 é o principal responsável pelo decaimento da umidade armazenada no perfil do solo neste estudo.

De maneira geral, os valores desta relação são próximos a unidade para plantações de eucalipto para anos com precipitações dentro da normalidade histórica de cada região e em casos de baixo volume de chuvas, este índice será tão maior quanto menores forem os índices pluviométricos (ALMEIDA et al., 2013; ALMEIDA et al., 2007; ALMEIDA; SOARES, 2003).

A evaporação de água diretamente do solo estimada (Es) foi de 82,8 mm, equivalendo-se a 5,2 % da precipitação incidente no povoamento ou a 7,5

% da lâmina de água que efetivamente atingiu o solo no período analisado. A evaporação da água do solo em estudos de balanço hídrico florestal é comumente desprezada (CAVALCANTE; MENDES, 2012; CÂMARA; LIMA, 1999; ALMEIDA; RIEKERK, 1990) devido à pequena contribuição/efeito no balanço como um todo e dificuldades na mensuração desta variável.

Em estudos onde foi realizada a observação da evaporação da água do solo/piso florestal, a Es variou entre 5,0 e 14,3 % em relação à precipitação incidente nos povoamentos (FEIKEMA; MORRIS; CONNELL, 2010; ALMEIDA et al., 2007; LANE et al., 2004; SOARES; ALMEIDA, 2001), valores estes próximos aos estimados neste estudo.

3.3 Análise da transpiração real e consumo hídrico por um povoamento de eucalipto

A partir dos dados da ETr, IL e Es estimou-se a transpiração real (Tr) do povoamento. A Tr estimada para o povoamento foi de 1107,3 mm, equivalente a 69,7 % da precipitação externa (PG). A Tr média diária foi de 2,2 mm com máxima estimada em 8,2 mm.dia⁻¹ e mínima de 0,4 mm.dia⁻¹. A transpiração real do povoamento equivale a 67,9 % da evapotranspiração real destacando-se como o maior componente da ETr. No Gráfico 4 são apresentadas as séries de transpiração real (Tr) e evapotranspiração real (ETr) para o eucalipto.

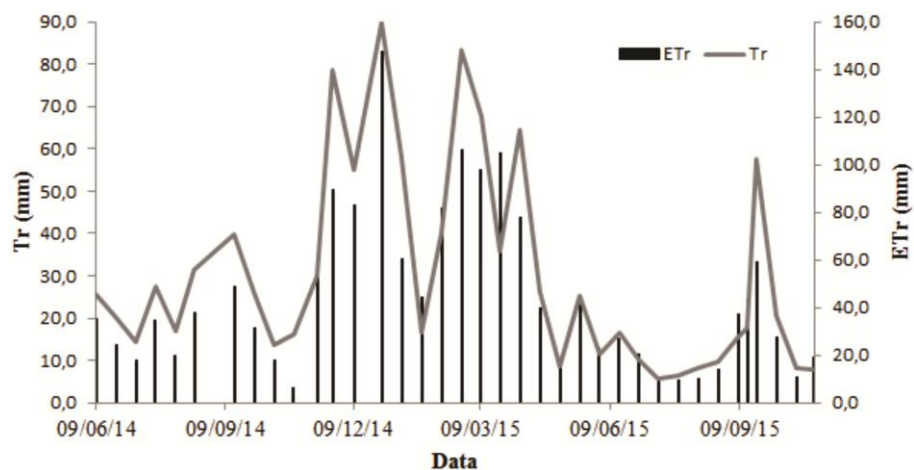


Gráfico 4 Séries de Tr e ETr para o povoamento de eucalipto

As estimativas de Tr encontradas neste estudo são semelhantes às observadas em plantações de eucalipto pelo mundo sob diferentes condições climáticas (ALMEIDA et al., 2013; FACCO et al., 2012; NIZINSKI; GALAT; GALAT-NUONG, 2011; FORRESTER et al., 2010; ALMEIDA et al., 2007; SOARES; ALMEIDA, 2001) em que a transpiração variou entre 60 e 80,8 % da precipitação (PG).

Na Tabela 3 são apresentados os valores estimados para a transpiração real por espaçamento em função dos períodos secos (2014 e 2015) e chuvoso (2014/2015).

Tabela 3 Dados de transpiração real estimados em função do espaçamento e dos períodos secos e chuvoso estudados

Espaçamento	3 x 2 metros		3 x 3 metros		3 x 5 metros	
Unidade	(mm)	(%PG)	(mm)	(%PG)	(mm)	(%PG)
Seco 2014	206,9	13,0	258,0	16,2	176,9	11,1
Chuvoso 14/15	587,2	37,0	702,7	44,2	704,6	44,4
Seco 2015	201,1	12,7	247,2	15,6	288,8	18,2
Total	995,2	62,6	1207,9	76,0	1170,3	73,4

Em termos médios, a transpiração tende a ser 30,5 %, 28,1 % e 34,0 % menor no período seco em comparação ao chuvoso para os espaçamentos 3 x 2, 3 x 3 e 3 x 5 metros, respectivamente. O espaçamento 3 x 2 metros apresentou a menor extração de água do solo entre os três manejos estudados contrabalanceando com a menor entrada de água no solo devido à maior interceptação da precipitação pelo dossel florestal.

A transpiração tende a ser maior quanto maior for a disponibilidade hídrica do solo até encontrar uma umidade ótima onde a partir da qual o aumento da umidade do solo não afeta o processo transpiratório. As espécies do gênero *Eucalyptus* são conhecidas pela sua eficiência estomática, respondendo rapidamente a redução da umidade do solo e aumento na radiação incidente sobre o dossel florestal. No Gráfico 5 é apresentada a relação entre os índices ITr e Sθ para o eucaliptal.

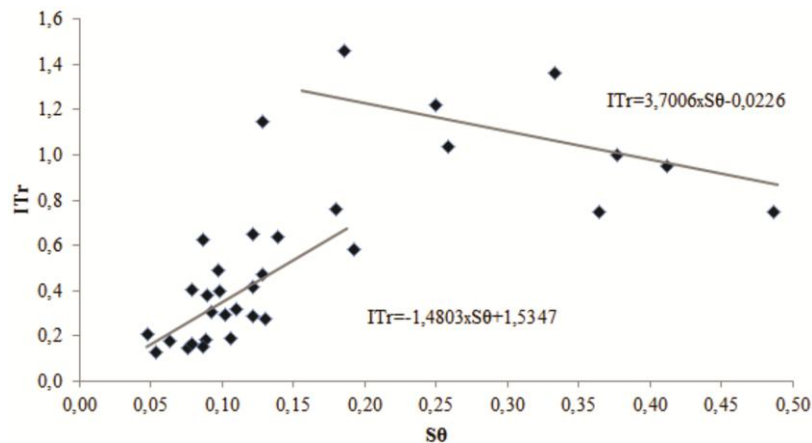


Gráfico 5 Relação entre os índices ITr e Sθ para o eucaliptal

O Itr representa a relação entre a transpiração real e a evapotranspiração potencial, enquanto que o Sθ corresponde à umidade relativa do solo. Igualando-se às equações ajustadas para os dois conjuntos de dados do Gráfico 5 foi possível identificar qual a umidade média no perfil do solo onde a partir da qual

a transpiração é máxima. O valor da umidade média do perfil do solo (θ_m) identificado foi de $0,295 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, que equivale a 59,0 % da umidade na capacidade de campo. Constatou-se que em 16,7 % do tempo, a umidade do solo foi superior a este valor, ou seja, em 83,3 % do tempo a transpiração do povoamento não é máxima e há estresse hídrico afetando seu crescimento potencial com a redução da umidade do solo.

O valor de ITr associado ao ponto ótimo de umidade do perfil do solo foi de 1,09. Nizinski, Galat e Galat-Nuong (2011) e Calder (1986) encontraram valores deste índice entre 0,79 e 0,84 para espécies de *Eucalyptus*.

O povoamento apresentou um incremento total no volume de madeira de $84,1 \text{ m}^3$ no período analisado ($54,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Discretizando por espaçamento, o 3 x 2 metros apresentou incremento de $53,1 \text{ m}^3$ no período analisado ($69,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), incremento total de $18,1 \text{ m}^3$ para o 3 x 3 metros ($43,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) e $12,9 \text{ m}^3$ para o espaçamento 3 x 5 metros ($36,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Relacionando o volume de madeira incrementado durante o estudo com a lâmina transpirada estimou-se que para cada metro cúbico de madeira produzida por hectare pelo povoamento é extraído 20,3 mm de água do perfil do solo ($3715,8 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ha}^{-1}$). Na Tabela 4 são apresentadas estas relações para cada um dos espaçamentos estudados.

Tabela 4 Relação entre incremento de madeira e consumo hídrico em função do espaçamento em um povoamento de eucalipto

Espaçamento	Incremento		Consumo	
	(m^3)	($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	(mm)	($\text{L} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ha}^{-1}$)
3 x 2	53,1	69,0	14,4	2088,3
3 x 3	18,1	43,2	28,0	6483,8
3 x 5	12,9	36,9	31,7	8600,9

O espaçamento 3 x 2 metros proporcionou uma produção de biomassa mais eficiente comparado aos indivíduos dos outros espaçamentos estudados.

Almeida e Sands (2015) encontraram valores de consumo de 11,1 e 23,5 mm para incremento de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ para plantios de *Eucalyptus* no Brasil e Austrália, respectivamente, durante um ciclo de corte completo.

4 CONCLUSÕES

Em termos médios, para uma precipitação incidente (PG) de 1588,5 mm, o povoamento de eucalipto apresentou uma lâmina de água que atinge o solo (LAS) de 1105,9 mm (69,6 % da PG), escoamento superficial direto (ESd) de 174,3 mm (11,5 % da PG), 484,4 mm (30,5 % da PG) de perdas por interceptação (IL) e uma variação de armazenamento no perfil do solo (ΔArm) de -227,5 mm.

Com base nestes valores, a evapotranspiração real (ETr) estimada para o povoamento foi de 1631,3 mm (102,7 % da PG). Ao aplicar o balanço hídrico por manejo, a ETr estimada foi menor no espaçamento 3 x 5 metros (1584,9 mm – 99,8 % da PG), seguida do 3 x 2 metros (1597,9 mm – 100,6 % da PG) e 3 x 3 metros (1692,8 mm – 106,6 % da PG).

A evaporação de água diretamente do solo estimada (Es) foi de 82,8 mm equivalendo-se a 5,2 % da precipitação incidente no povoamento. A transpiração real estimada para o povoamento foi de 1107,3 mm, destacando-se como maior componente da ETr (67,9 %).

Para produzir 1 metro cúbico de madeira por hectare, em média, o povoamento consumiu 20,3 mm de água do perfil do solo. O espaçamento 3 x 2 metros mostrou-se o mais eficiente em termos de consumo hídrico com consumo de 14,4 mm de água para produzir 1 m³.ha⁻¹. O espaçamento 3 x 5 metros apresentou a maior demanda com o consumo de 31,7 mm de água para produzir 1 m³.ha⁻¹.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C.; SANDS, P. J. Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. **Ecohydrology**, Malden, p. 1-21, 2015.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. C.; LANDSBERG, J. J.; REZENDE, G. D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrids plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1-2, p. 10-21, 2007.

ALMEIDA, A. P.; RIEKERK, H. Water balance of *Eucalyptus globulus* and *Quercus suber* forest stands in south Portugal. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 38, n. 1-2, p. 55-64, 1990.

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; LEITE, F. P. Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no leste de Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 547-556, 2013.

BOOTH, T. H. Eucalypts and their potential for invasiveness particularly in Frost-Prone regions. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1-7, 2012.

CALDER, I. R. Water use of *Eucalyptus* – A review with special reference to south India. **Agricultural Water Management**, v. 11, n. 3-4, p. 333-342, 1986.

CÂMARA, C. D.; LIMA, W. P. Corte raso de uma plantação de *Eucalyptus saligna* de 50 anos: impactos sobre o balanço hídrico e a qualidade da água em uma microbacia experimental. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 41-58, 1999.

CARNEIRO, R. L. C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C. A. M.; LEITE, F. P.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Consumo de água em plantios de eucalipto: Parte 2 Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em tratamentos irrigados e não-irrigados. **Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11-18, 2008.

CAVALCANTE, R. B. L.; MENDES, C. A. B. Modelagem do balanço hídrico em povoamentos de eucalipto sob diferentes manejos como auxílio ao gerenciamento de impacto hidrológico da atividade. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 268-280, 2012.

DAVID, T. S.; FERREIRA, M. I.; DAVID, J. S.; PREREIRA, J. S. Transpiration from a mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. **Oecologia**, v. 110, n. 2, p. 153-159, 1997.

FACCO, A. G.; RIBEIRO, A.; PRUSKI, F. F.; MONTEIRO, W. C.; LEITE, F. P.; ANDRADE, R. G.; MENEZES, S. J. M. C. Técnicas de geoinformação para estimativa do balanço hídrico em eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1243-1250, 2012.

FEIKEMA, P. M.; MORRIS, J. D.; CONNELL, L. D. The water balance and water sources of a *Eucalyptus* plantation over shallow saline groundwater. **Plant and Soil**, v. 332, n. 1, p. 429-449, 2010.

FORRESTER, D. I.; THEIVEYANATHAN, S.; COLLOPY, J. J.; MARCAR, N. E. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1761-1770, 2010.

GASPAROTTO, E. A. G.; TONELLO, K. C.; SHIZATO, E. T.; VALENTE, R. O. A. Throughfall in different forest stands of Iperó, São Paulo. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 303-310, 2014.

GRANIER, A.; BRÉDA, N.; BIRON, P.; VILLETTE, S. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. **Ecological Modelling**, v. 116, n. 2-3, p. 269-283, 1999.

HU, W.; SHAO, M.; HAN, F.; REICHERDT, K.; TAN, J. Watershed scale temporal stability of soil water content. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 181-198, 2010.

HUBBARD, R. M.; RYAN, M. G.; GIARDINA, C. P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, v. 10, n. 4, p. 427-436, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2014**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp>. Acesso em: 25 mar. 2015.

LANE, P. N. J.; MORRIS, J.; NINGNAN, Z.; GUANGYI, Z.; GUOYI, Z.; DAPING, X. Water balance of tropical eucalypt plantations in south-eastern China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 253-267, 2004.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. (Org.). **As florestas plantadas e a água**: Implementando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: RiMa, 2006. 226 p.

NIZINSKI, J. J.; GALAT, G.; GALAT-LUONG, A. Water balance and sustainability of *Eucalyptus* plantations in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). **Russian Journal of Ecology**, Moscow, v. 42, n. 4, p. 305-314, 2011.

OHTA, T.; MAXIMOV, T. C.; DOLMAN, A. J.; NAKAI, T.; MOLEN, M. K. V.; KONONOV, K. V.; MAXIMOV, A. P.; HIYAMA, T.; IJIMA, Y.; MOORS, E. J.; TANAKA, H.; TOBA, T.; YABUKI, H. Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch

forest over a 7-year period (1998–2006). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n.1 2, p. 1941-1953, 2008.

RODRIGUES, V. A.; COSTA, P. N. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas em povoamento de eucalipto. **BioEng**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 77-86, Jan/Abr, 2009.

SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a Eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil. **Hydrological Processes**, West Sussex, v. 25, p. 1910-1923, 2011.

SHINZATO, E. T.; TONELLO, K. C.; GASPAROTO, E. A. G.; VALENTE, R. O. A. Escoamento pelo tronco em diferentes povoamentos florestais na Floresta Nacional de Ipanema em Iperó, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 395-402, 2011.

SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, London, v. 253, n. 1-4, p. 130-147, 2001.

SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C.; PENCHEL, R. M. **Hydrological balance of Eucalypt plantations through transpiration by the method of Penman–Monteith**. In: Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus. Salvador, Brazil, 1997.

THOMPSON, S. E.; HARMAN, C. J.; TROCH, P. A.; BROOKS, P. D.; SIVAPALAN, M. Spatial scale dependence of ecohydrologically mediated water balance partitioning: A synthesis framework for catchment ecohydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 10, p. 1-20, 2011.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; GROPPA, J. D.; SILVA, R. W. C.; MARTINELLI, L. A. Dinâmica da água em uma microbacia com cobertura florestal de eucalipto localizada na Serra do Mar no Vale do Paraíba do Sul.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 207-216, 2012.

VALENTE, F.; DAVID, J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**, v. 190, p. 141-162, 1997.

WILSON, K. B.; HANSON, P. J.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER, S. D. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 2, p. 153-168, 2001.